
大規模高精度流体－構造連成解析手法の開発と詳細実験による

精度・妥当性検証

平成 24 年度～平成 28 年度私立大学戦略的研究基盤形成支援事業

研 究 成 果 報 告 書

平成 29 年 3 月

学校法人名 東洋大学

大学名 東洋大学

研究組織名 計算力学研究センター

研究代表者 田村善昭

【東洋大学 総合情報学部 教授】



東洋大学

はしがき

東洋大学計算力学研究センター（本センター）は、文部科学省学術フロンティア推進事業の支援を受け、平成 17 年度に設立されました。本報告書は、これに続いて採択された文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業（平成 24 年度～28 年度）による研究成果をまとめたものです。

学術フロンティア推進事業では計算力学の中でも構造解析に重点を置いて研究を進めましたが、今回は、流体—構造連成解析という、より複雑な問題に取り組みました。個別の手法では精度良く解ける問題も、複数の現象が絡むと解析が難しくなったり、あるいは解けたとしてもそれが正しいのか評価が難しくなります。ここでは、手法開発とともに、その精度や妥当性をどのように検証するのかという問題—一般には V&V（Validation & Verification）などと呼ばれる—をテーマとして研究を進めました。その詳細は本報告書にある通りですが、当初の目的は概ね果たせたものと考えています。

また、本センター設立当初より、研究の推進とともに、海外との連携や学生・若手研究者の育成にも力を入れてきました。これらについても本報告書で述べています。

本事業による活動はこれをもって終了しますが、本センターではこれまでの成果を活かしつつ、更に計算力学の発展に寄与すべく活動を続けて行きたいと考えています。関係各位の一層のご指導ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げますと共に、最後となりましたが、この 5 年間の活動にご協力・ご支援をいただきましたみなさまに厚く御礼申し上げます。

平成 29 年 3 月 31 日

東洋大学計算力学研究センター長
田村 善昭

総合目次

はしがき（研究代表者：田村善昭）

1. 平成 24 年度～平成 28 年度「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」 研究成果報告書概要	1
2. 若手研究者の育成状況	41
3. 外部評価委員会報告	55
4. 研究成果の公開	85
4. 1. 年報	86
4. 1. 1. 2012 年度計算力学研究センター年報	87
4. 1. 2. 2013 年度計算力学研究センター年報	195
4. 1. 3. 2014 年度計算力学研究センター年報	290
4. 1. 4. 2015 年度計算力学研究センター年報	387
4. 1. 5. 2016 年度計算力学研究センター年報	504
4. 2. 成果報告会	629
4. 3. シミュレーション学会誌特集記事	635
4. 4. Validation & Verification for Computational Mechanics	673
4. 5. その他	839

**1. 平成 24 年度～平成 28 年度「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」
研究成果報告書概要**

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

平成 24 年度～平成 28 年度「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」 研究成果報告書概要

1 学校法人名 東洋大学 2 大学名 東洋大学

3 研究組織名 計算力学研究センター

4 プロジェクト所在地 埼玉県川越市鯨井2100

5 研究プロジェクト名 大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による
精度・妥当性検証

6 研究観点 研究拠点を形成する研究

7 研究代表者

研究代表者名	所属部局名	職名
田村善昭	東洋大学総合情報学部	教授

8 プロジェクト参加研究者数 14 名

9 該当審査区分 理工・情報 生物・医歯 人文・社会

10 研究プロジェクトに参加する主な研究者

研究者名	所属・職名	プロジェクトでの研究課題	プロジェクトでの役割
田村善昭	総合情報学部・教授	立体可視化を利用した新しい精度検証・妥当性検証	研究代表者（立体可視化装置の構築と検証のための可視化手法の開発）
芦野俊宏	国際地域学部・教授	高精度流体—構造連成解析手法の開発	解析対象の物性に関する構成方程式の開発
塩谷隆二	総合情報学部・教授	流体—構造連成解析手法の2種の計算機システムへの適用	解析プログラムのスーパーコンピュータへの適用
中林靖	総合情報学部・准教授	高精度流体—構造連成解析手法の開発	連成解析アルゴリズムの開発と実装
藤松信義	理工学部・准教授	流体—構造連成現象の実験と詳細計測	実験、計測装置の構築とデータ取得
藤岡照高	理工学部・教授	計測結果による精度検証・妥当性検証	オープンソース CAE の精度・妥当性検証

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

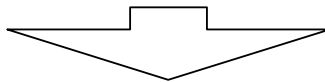
新藤康弘	理工学部・助教	計測結果による精度検証・妥当性検証	人体解析モデルの構築と解析精度の向上
江澤良孝	計算力学研究センター・客員研究員	計測結果による精度検証・妥当性検証	最適化手法を援用した解析精度の向上
(共同研究機関等) 矢川元基	原子力安全研究協会・理事長	計測結果による精度検証・妥当性検証	対象に要求される精度と実験結果,解析結果の検討
横山真男	明星大学情報学部・准教授	高精度流体—構造連成解析手法の開発	粒子法による解析と実験との比較
古川知成	ヴァージニア工科大学・教授	計測結果による精度検証・妥当性検証	対象に要求される精度と実験結果,解析結果の検討
松原仁	琉球大学工学部・准教授	高精度流体—構造連成解析手法の開発	固液連成解析手法の提案と実証
富山潤	琉球大学工学部・准教授	高精度流体—構造連成解析手法の開発	流体—粒子拡散連成解析手法の提案と実証
金山寛	日本女子大学理学部・特任教授	流体—構造連成解析手法の2種の計算機システムへの適用	解析プログラムのスーパーコンピュータへの適用

<研究者の変更状況(研究代表者を含む)>

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
詳細実験による流体現象・構造現象の分離	理工学部・准教授	吉野隆	映像情報を利用して連成現象を分離し、シミュレーション開発に援用する。

(変更の時期:平成 24 年 4 月 1 日)



新

変更前の所属・職名	変更(就任)後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
		吉野隆	削除

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

追加

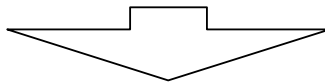
変更前の所属・職名	変更(就任)後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
明星大学情報学部・准教授	明星大学情報学部・准教授	横山真男	粒子法による解析と実験との比較
琉球大学工学部・助教	琉球大学工学部・助教	松原仁	固液連成解析手法の提案と実証
ヴァージニア工科大学・教授	ヴァージニア工科大学・教授	古川知成	対象に要求される精度と実験結果,解析結果の検討

(変更の時期:平成 24 年 4 月 1 日)

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
計測結果による精度検証・妥当性検証	工学研究科・教授	矢川元基	対象に要求される精度と実験結果,解析結果の検討

(変更の時期:平成 25 年 4 月 1 日)



新

変更前の所属・職名	変更(就任)後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
工学研究科・教授	原子力安全研究協会・理事長 (東洋大学計算力学研究センター・客員研究員)	矢川元基	対象に要求される精度と実験結果,解析結果の検討

追加

変更前の所属・職名	変更(就任)後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
琉球大学工学部・准教授	琉球大学工学部・准教授	富山潤	流体－粒子拡散連成解析手法の提案と実証

(変更の時期:平成 25 年 4 月 1 日)

追加

変更前の所属・職名	変更(就任)後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
日本女子大学理学部・特任教授	日本女子大学理学部・特任教授	金山寛	解析プログラムのスーパーコンピュータへの適用

(変更の時期:平成 26 年 4 月 1 日)

追加

変更前の所属・職名	変更(就任)後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
理工学部・教授	理工学部・教授	藤岡照高	オープンソース CAE の精度・妥当性検証

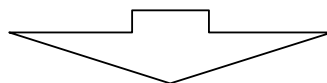
(変更の時期:平成 27 年 4 月 1 日)

旧

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
計測結果による精度検証・妥当性検証	総合情報学部・教授	江澤良孝	最適化手法を援用した解析精度の向上

(変更の時期:平成 27 年 4 月 1 日)



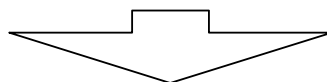
新

変更前の所属・職名	変更(就任)後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
総合情報学部・教授	東洋大学計算力学研究センター・客員研究員	江澤良孝	最適化手法を援用した解析精度の向上

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
高精度流体—構造連成解析手法の開発	琉球大学工学部・助教	松原仁	固液連成解析手法の提案と実証

(変更の時期:平成 28 年 4 月 1 日)



新

変更前の所属・職名	変更(就任)後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
琉球大学工学部・助教	琉球大学工学部・准教授	松原仁	固液連成解析手法の提案と実証

追加

変更前の所属・職名	変更(就任)後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
理工学部・助教	理工学部・助教	新藤康弘	人体解析モデルの構築と解析精度の向上

(変更の時期:平成 28 年 4 月 1 日)

11 研究の概要(※ 項目全体を10枚以内で作成)

(1) 研究プロジェクトの目的・意義及び計画の概要

近年、計算力学分野では「計算の品質」(精度検証と結果の妥当性検証)が重視されている。しかし、「京」コンピュータ等の計算機の大規模化で研究が盛んになっているマルチスケール／マルチフィジックスの問題に対しては、検証が十分とは言えず、実問題への適用、例えば安心・安全の分野での利用が進んでいない。そこで、ここでは、大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と、それを含めた流体—構造連成解析の精度検証・妥当性検証を目的とする。具体的には、1. 大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発、2. 精度検証・妥当性検証のための詳細な流体—構造連成実験、3. 詳細実験による精度検証・妥当性検証、を

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

行う。1. では、従来法の多くが、流体・構造それぞれに適した手法を合わせて解析をするときに、それぞれ単体での精度・妥当性は確保されているものの、両者の境界面(データのやりとり)において内挿・補間などによる精度低下が理論的にあり、結果の精度が保証されないのに対して、ここでは理論的に内挿・補間を排除し、原理的に一体化法(流体と構造を一つのシステムとして解く方法。精度は保証されるが、一般に効率が悪く、また大規模化が難しい)と同じ精度が期待できる手法を新たに開発しようとするものである。さらに、ここで用いる流体解析手法、構造解析手法はいずれも大規模化に適したものを選んでいるので、京などのスーパーコンピュータであっても効率よく解析を行うことが期待できる。2. は理論的側面とは別に、実際の解析がどれだけの精度を有しているかを見る方法の一つとしては実験との比較が有効であると考えられるが、流体—構造連成で標準的な問題が存在しないため、ここではそのような「標準問題」を提案し、またその詳細な実験を行うことで、解析の評価に用いることのできるデータを提供しようとするものである。しかし、どれだけ精度のよい実験でも、あるいは解析であっても誤差が必ず含まれる。そこで、3. では、単に結果の値を比較して差が大きい・小さいといった議論をするのではなく、主にベイズ推定等の理論を用いて、精度や妥当性を示す。これにより、実験の誤差も、解析の誤差も考慮しつつ、連成解析にどれだけの精度があるかを示すことができる。以上より、これまでの技術では不可能であった定量的・定性的検証を行うシステムの構築とこれに基づく大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発を行い、スーパーコンピュータによる実問題への応用を可能とし、計算科学・計算力学に大きく貢献することを目指す。

上記を進めるため、以下の 5 グループを作り研究を進める。「手法開発」グループは1. の手法開発を主とし、他に標準問題の解析および他の手法との比較検討(例えば粒子法など)も併せて行う。「大規模並列化」グループは「手法開発」グループが開発する手法の大規模化・高効率化を行う。「実験」グループは、標準問題の提案とその詳細実験を行う。「精度・妥当性検証」グループはいわゆる V&V を連成問題に対して行うための方法論を開発し、連成問題に適用する。「可視化検証」グループは、「精度・妥当性検証」グループが解析結果の数値を対象とするのに対し、実験で取得した(動)画像を比較対象として精度・妥当性を検証するための方法(システム)を開発する。それぞれのグループにはグループリーダーをおき、研究を推進するとともに、上記 3 つの目的を達成するため相互に連携して研究を行う。

(2) 研究組織

本学「計算力学研究センター(以下、本センター)」の研究体制を継続・発展させて研究プロジェクトを遂行している。研究者総数はのべ 19 名であり、本センター所属教員 8 名を中心に、ポスドク、研究支援者、RA、学外の客員研究員から構成されている。学部生、大学院生にも積極的に参加を促す。研究者は、先に述べた 5 つのグループのいずれかに所属する。各グループの研究はグループリーダーがこれを取りまとめ、研究代表者は各グループリーダーと適宜連絡をとり、各グループの進捗を確認すると共に、グループ間の調整を行う。これとは別に、プロジェクト全体の進捗は、原則月 1 回の運営委員会で確認し、年 1 回の拡大運営委員会で総括する。国内外の機関との共同研究も本センターが窓口となって積極的に行う。研究成果の発信はホームページで随時行うほか、国際シンポジウム、フォーラム、ワークショップを年数回開催している(<研究成果の公開状況>に後述)。また、外部評価委員会による評価を毎年度末に行い、拡大運営委員会での自己評価と併せ、プロジェクトの進捗状況を点検・評価している。

(3) 研究施設・設備等

本プロジェクトの目的である、大規模な流体—構造連成解析手法の開発のため、本センター

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

に既設の PC クラスタに加え、本プロジェクトで準備した GPU クラスタシステムを設置した。これに加え、風洞実験装置と VR 装置を設置し、解析手法の精度検証・妥当性検証を行った。実稼働時間は GPU クラスタシステムが 3004 時間、VR 装置が 1094 時間である。また、これらの機器の設置も含め、使用した主な施設の面積と人数は以下の通りである。

614 室 114.6m² 8名

CCMR 事務室 18.0m² 2名

CCMR 研究室 18.0m² 5名

数値デザイン実験室 78.0m² 3名

LSI/CAD 室 130.0m² 2名

数値流体力学実験室 104.0m² 4名

マクロ計算工額実験室 76.4m² 3名

なお、数値デザイン実験室以下は学部・大学院と共用している。

(4) 研究成果の概要 ※下記、13及び14に対応する成果には下線及び*を付すこと。

本プロジェクトでは、先に述べたように3つの目的を掲げ、これらを5つのグループに分かれて研究している。ここでは、まず3つの目的に対する成果について簡単に述べ、その後各グループの項で詳しく記すことにする。

プロジェクト全体の成果

大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発については、後にも述べるように、もともと精度が良い、SUPG/PSPG 安定化有限要素法による流体解析と、Enriched Free Mesh Method (EFMM)による構造解析をそれぞれに利用し、その境界面では完全に要素、節点が一致するようにして解析する手法を開発できた。もともと流体解析については大規模化ができていたが、EFMM については、未開発であった。本プロジェクトにおいて、これも実現できたため、全体として理論的に高精度かつ大規模で高効率な手法の開発に成功した。「それぞれが高精度」「境界面で内挿・補間がない」「大規模化で効率が落ちない」の要素をすべて満たすものは従来なかったので、本プロジェクトの大きな成果といえる。達成度としてもほぼ 100%である。

精度検証・妥当性検証のための詳細な流体—構造連成実験も、検証に用いることのできる、「標準問題」を提案し、その実験を行って詳細なデータを取得できた。当初は、流体中に方端支持のされた円柱まわりの流れと円柱の変形を標準問題としていたが、これについて、数値として円柱の変位の時系列データならびに円柱の側面及び底面からの高速動画像が取得できている。さらに、当初予定にはなかったが、片持ちシートのフラッタもデータを取ることができた。達成度は 100%と考える。

詳細実験による精度検証・妥当性検証については、ベイズ推定を中心とした方法論を提案し、検証も行った。また、実験・解析同時可視化システムも開発した。ただし、標準問題については、可視化による検証などを行ったものの、ここで提案している手法ではまだ検証できていないので、70%程度の達成度である。

以下、各グループの成果を達成度とともに記す。

1. 解析手法開発グループ

流体構造連成解析を高精度かつ高効率に行うためには、まず、流体解析コードや構造解析コードそれぞれが高精度かつ高効率なものである必要があり、さらに、それらを組み合わせる際の手法、すなわち連成アルゴリズムも高精度である必要がある。本グループで開発した手法は、流体解析に SUPG/PSPG 安定化有限要素法を用いて、構造解析には Enriched Free Mesh Method (EFMM)を用いるものである。SUPG/PSPG 法ベースの流体解析手法は既

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

に多くの研究者らに用いられてきた手法であり、並列化や大規模計算など多くの成果が発表されている。一方、EFMM ベースの構造解析は限られた分野で用いられてきたものであり、並列化や大規模計算の例はほとんど見られない。本グループでは EFMM ベースの構造解析コードを開発し、それに新たに考案した並列化手法を適用し、京コンピュータ上でも高い性能が出ることを実証した^{*発表 218,232}。また、上記の流体解析コードと構造解析コードを結びつける新たな連成解析手法を提案して様々な連成問題に適用を行った^{*発表 66,85}。この手法は、流体構造界面での物理量補間が全く必要でないという点が最大の特徴であり、特に時間刻み幅の小さい流体構造連成解析で問題となる物理量伝達の際の誤差を大幅に軽減出来ることが確認された。最終的に開発されたシステムを用いて、新規実験グループとの共通問題にも取り組み、実験と解析でほぼ同様の結果を得ることに成功した^{*発表 116,133} が、その誤差を詳細に評価する段階までは達していない。以上の点から本グループの達成度は 80%である。

2. 大規模並列グループ

ポストペタスケールシステムなど次世代の並列計算機アーキテクチャにおいて、大規模な数値計算データ処理を必要とする実アプリケーション・ソフトウェアが高い演算効率を得るためには、マイクロプロセッサやメモリなどハードウェアが持つ階層構造を考慮したプログラミングモデルを採用することが必要である。特に、入力データ生成や可視化などのプレ・ポスト処理から数値解析手法などのソルバー処理に至るまで、全ての処理がスパコン上で行われることを想定する必要がある。そこで、次世代並列計算機上における大規模数値計算データ処理システムに関する基盤技術として、これまで主に数値解析手法向けに研究開発してきた階層型領域分割法(HDDM)の技術を応用した、HDDM による大規模数値計算データ処理システムの研究開発^{*論文 34-36,46-49,56,57 図書 2,3}を行った。特に、学術研究・産業界で需要が高い有限要素法(FEM)と粒子法による連続体力学のシミュレーションに対象を絞ることで高性能が得られるアプリケーション特化型システムソフトウェア開発を行った。ターゲットとするアプリケーション・ソフトウェアは、HDDM による大規模計算・超並列計算で実績があり、HPCI 戦略プログラムやポスト「京」重点課題でも利用されているオープンソース CAE ソフトウェア ADVENTURE とした。本研究の成果物であるソフトウェアは、ADVENTURE プロジェクトホームページ内のサブプロジェクトページ(<http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/lexadv/>)にて一般公開している。当初研究計画では開発、公開予定ソフトウェア 11 項目に対し、公開済みソフトウェア 6 件、公開準備済みソフトウェア 4 件のため、達成度を 10 件/11 項目=90%とした。

3. 新規実験グループ

流体構造連成解析コードを検証するための標準問題を提案し、信頼性ある実験データを提供することを目的として研究した。またグループ目標として、実験を通じて流体構造連成問題に関する新しい実験手法、新しい指標を提案することを目指して取り組んだ。

解析コードの検証に利用するための標準問題であることから、数値計算のモデル化がしやすい問題であり、解析結果が実験結果と比較しやすくあるべきである、ことを踏まえて、次の二つの標準問題 (1)弾性円柱の空力振動、(2)シート材のフラッタ特性 を提案して、実験に取り組んだ。初年度は実験環境の整備と予備実験の実施、2年目は風洞装置による流体構造連成の静的・動的試験を始めた。3年目以降は本グループの特徴を出すために、新規実験として、運動する物体の空気力測定、柔らかい壁面による抵抗低減試験を行った。新規実験に取り組む中で、実験手法・解析手法を提案するだけでなく、工学的なデバイスを提案することを目指した。結果として、流体構造連成に関する2種類の標準問題を提案し、実験結果を得ることができた(100%)。また運動解析による空気力測定法、流体構造連成に関する新しい実験指標を提案(100%)するだけでなく、研究成果の副次的効果として機能性材料開発の可能性を確認することもできた。解析手法開発グループとの連携による数値計算結果と実

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

験結果の比較においては、利用しやすい形で実験結果を提供することが十分に出来ていないため、達成度は 70%である。

4. 精度・妥当性検証グループ

本グループでは、シミュレーションと実験の精度・妥当性を検証する技術および精度・妥当性を向上させるための技術の研究を行った。シミュレーションも実験も誤差を含んでおり、精度の検証および改良は重要なテーマである。具体的には、(1)解析精度を考慮した効率的な解析技術と実験のばらつきの解析精度への影響評価の研究、(2)物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式の開発、(3)オープン CAE(固体の有限要素法)を用いた精度検証などの研究を行った。

(1)については、段ボールを題材として、実験データから高精度で効率的な解析を行うための手法を開発した。さらに実験データのばらつきを考慮して、解析用に算出した数値の精度・妥当性を検証するための手法を開発した^{*論文 50 発表 178,230}(達成度 100%)。これらの成果は構造・流体連成解析にも適用可能であることを確認した。適用範囲拡大については達成度は 70%である。

(2)については、材料の特性に関わるデータについて、計算プログラムなどとのデータ交換に必要とされる標準的なデータ表現、知識表現の研究開発を行った^{*発表 12,28,31,37,67}。産業技術研究所とは材料物性を推計するための数式を記述するため記法を開発し、同所の熱物性データベースに用いられている^{*論文 3 発表 16,25,80,84}。また戦略イノベーション創造プログラム、革新的構造材料、マテリアルズ・インテグレーションにおいて、フェーズ・フィールド、有限要素法などを含む異なった材料特性推算モジュールの連携に必要とされるデータ構造の開発を推進した^{*発表 187,203,228,243}。

(3)についてはオープン CAE を用いて、固体の有限要素解析に対する精度検証の方法と事例を蓄積し、公開する上で、商用ソルバと並んでオープン CAE を取り上げることで、より幅広いユーザが自ら取り組み得る V&V 活動の実例として提示した^{*発表 182,249}。また、発展研究としてオープン CAE ソフトを用いて生体関節を模擬した三次元モデル内の応力分布解析を行い、その精度について、先行研究における生体実験データと比較し有用性を確認した。オープン CAE の医療分野およびバイオメカニクス分野等への発展性を示した^{*発表 246, 248}。達成度はグループ全体として 80%である。

5. 可視化検証グループ

まず、大型 VR 装置を導入し、これを用いて流体・構造連成解析結果の可視化検証をどのように行うか検討し、データの種類や目的により大きく2通りの可視化システムを構築した。1 つは、汎用可視化ソフトウェアである AVS をベースとしたもので、この上に、解析結果を表示するモジュールと実験の動画像を表示するモジュールを載せて同時に同じ位置で可視化する、時空間同時表示システムを構築した。もう1つは、本 VR 装置が標準としている VR4MAX という CG ソフトウェアの入力データとして実験及び解析結果を与えるもので、ここでは解析結果は VRML というファイル形式を経由して、また実験の画像は CG のテクスチャとして VR4MAX の前段である 3dsMax に与えられる仕組みになっている。本プロジェクトで提案している標準問題の実験結果および解析結果を用いて、開発したシステムの有効性を検証した^{*図書 7}。また、新たな可視化検証手法を提案する^{*論文 32 図書 7 発表 79,82,106}とともに、本 VR 装置以外の装置による可能性についても検討した。当初予定と比べると、リアルタイムの可視化ができていないこと、まだシステム公開の道筋がついていないことの2点が達成できていないので、全体として 75%程度の達成度であると考える。

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

＜優れた成果が上がった点＞

プロジェクト全体

3 つの目的に対応づけて述べると、まず流体-構造連成解析の新しい手法を提案できた。これは将来的に公開ないしは他の研究者にも利用できる形にすることを考えているが、流体部分が ADVENTURE という公開ソフトウェアシステムとも互換があることから、これとの連携も期待される。

次に、流体-構造連成解析に対する標準問題を提案したことも、今後の同手法開発に大きく寄与すると考える。従来は、比較的信頼できるとされる他者の2次元の解析結果を比較対象とすることがあったが、これにより3次元のより実用的な問題での検証が可能となる。

最後に、精度・妥当性については、問題によって推定の仕組みや影響する要素を選ぶ必要があるため、システム化(自動化)されているわけではなく、あくまで方法論の提案であるが、ここではいくつかの例によって、連成問題において、実験・解析にそれぞれ誤差があっても、精度を確率分布で示しながら、実験と解析の比較、ないしは真値の推定が可能であることを示したのも大きな成果である。

1. 解析手法開発グループ

従来、並列化が困難だとされていた EFMM に新たに考案した並列化手法を適用することによって、京コンピュータでも高い並列化効率とスケーラビリティを出すことを実証した。また、流体構造界面での物理量補間が全く必要でないという特徴をもった新たな連成解析アルゴリズムを提案してそれらを様々な流体構造連成問題に適用することに成功した。結果として従来と同程度の計算量で連成解析として精度が高くなる手法を構築することが出来た。

2. 大規模並列グループ

超並列計算機で超大規模有限要素解析を実現するために、メニーコアプロセッサを想定したハイブリッド並列化、局所 Schur 補元行列の陽的構築による演算効率化、複数材料モデル解析を高速化する ScaledBDD 法開発、複素線形対称方程式を効率的に求解する MINRES-like_CS 法開発、などを行った。これにより、「京」8,196 計算ノードを用いて世界的にトップクラスとなる 1 千億自由度規模の有限要素解析に成功した。本成果は、「第 18 回日本計算工学講演会ベストペーパーアワード」を受賞^{*発表 73} など国内外で高く評価された。

3. 新規実験グループ

運動する物体に作用する空気力を測定するとき、物体に計測器を付けると良好な測定結果が得られないことから、高速度カメラを用いて物体の運動解析を行い、その結果から空気力を測定する方法を検討した。その結果、加速度運動している物体に働く空気力は、定常流速下にある物体に働く空気力と異なることを示し、その特性を明らかにした。この研究成果は国際会議にて講演^{*発表 112}、ならびに論文誌^{*論文 39}に論文掲載された(達成度 100%)。その後、高速度カメラの台数を増やした実験を行い、剛体の運動解析への適用を試みており、回転運動に対しても加速度運動時の空気力特性が変わることを確認している。成果の続報は実験力学に投稿中である。

標準問題の実験を通じて、流体構造連成による物体の振動周波数は、物体の形状、材料特性と流速に対して、特徴ある性質を持つことを確認^{*発表 113}した。実験結果を系統的に整理すると材料特性と流体力との関係を見出すことができた。次元解析を通じて明らかになったことは、材料に作用する曲げモーメントと流体力によるモーメントの比をパラメータとして実験結果が明確に整理できることである。その成果は実験力学に投稿中であり、他誌への投稿も準備している。

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

4. 精度・妥当性検証グループ

(1) 効率的で精度のよい解析技術と実験のばらつきの解析精度への影響評価の研究
少ない実験データで精度良く最適値を求めるためのサンプリング手法^{*発表²⁷}を開発するとともに、均質化法解析のための材料定数において、実験データのばらつきを考慮して、材料定数を算出し、算出したデータの妥当性を評価する技術^{*論文⁵⁰, 発表^{178, 221, 230}}ができあがった。この技術は均質化法のみならず、構造・流体連成を含む一般の解析において、求めたいデータを算出する際に一般的に適用可能な方法である。

(2) 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式の開発

材料に関わるドメイン・オントロジーの分野では先駆けた研究を行っており、海外の論文への引用のみならず、材料データベースに関わるプロジェクトにおいて用いられている。マテリアルズ・インテグレーションにおいては、当センターで開発したプロトタイプの技術を統合システム開発グループにフィードバックし、汎用データベースの基盤として用いられている。

(3) オープン CAE による V&V

オープンソース CAE を用いて、特別な設備を必要とせず、客観的に再現可能な実験的検証事例(材料非線形, 幾何学的非線形, 非定常熱伝導, 熱疲労)を作成した^{*発表^{182,249}}。また、生体モデルを用いた構造解析を実施し、精度・妥当性について検証を行った^{*発表^{246,248}}。

5. 可視化検証グループ

時空間同時可視化という新しい概念を提案し、実証した^{*図書⁷}。これにより、実験と解析あるいは異なる解析同士の比較がより分かり易くできるようになったと共に、VR を可視化に利用することの必然性を示すことができた。

<課題となった点>

プロジェクト全体

当初目標では、開発した手法も、標準問題の実験・解析データも公開する予定であったが、まだ公開に至っていない。手法については、単にそのままコードを公開するのか、ライブラリ等、ユーザがそれぞれのコードに組み込むような形にするのか、あるいは先にふれた ADVENTURE システムの一部とするのかなど、議論が煮詰まっていない。標準問題については、きれいに整理された形の実験データはあるものの、実験ごとのばらつきや誤差などを含んだ形で生に近いデータをどのように提供するか(これをうまく利用することで精度や誤差の推定が可能となるので)が課題となっている。これらについては、プロジェクト終了後もひきつづき作業を行いたいと考えている。

また、精度・妥当性検証については、簡単の問題では実証できたが、標準問題など規模の大きな問題にはまだ適用できていない。これも時間的な問題が大きく、ひきつづき行っていきたい。

1. 解析手法開発グループ

新規実験グループとの連携による解析結果と実験結果の比較において、定性的には一致した結果が得られているが、解析条件の設定の困難さ等によりその誤差を詳細に評価するレベルでの結果が得られていない。また、大規模並列グループの成果である HDDM ベースのライブラリを流体解析コードや構造解析コードに導入してはならず、こちらの連携も不十分であった。

2. 大規模並列グループ

連続体力学向け DSL として、要素・セル・粒子に対する物理モデルを対象とし、LaTeX ベース数式記述からプログラムコードへのトランスレータ開発、小規模行列やテンソル演算をマ

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

ルチコア・メニーコアプロセッサや GPU などに最適化したライブラリを開発したが、トランスレータの性能を実用レベルに向上させるには、開発コストが十分でないことが判明し、トランスレータについては、プロトタイプの開発までと計画を変更した。

3. 新規実験グループ

解析手法開発グループとの連携による数値計算結果と実験結果の比較においては、利用しやすい形で実験結果を提供することが十分に出来ていないことが残された課題である。その理由として、数値計算の境界条件が実験との整合性を取りにくいこと、測定結果にばらつきを含みやすい材料特性値が計算結果に強く影響してしまうこと、が挙げられる。検証する上での問題点が明らかなので、材料特性のばらつきが数値解析結果に与える影響について提示していきたい。

4. 精度・妥当性検証グループ

- (1)の課題については、ベイズ推定において、事前確率の設定が推定に影響する。そこで、適切な事前確率を簡易に求めるための階層ベイズモデルを開発した。
- (2)の課題については、材料に関わるデータ・知識は膨大でかつ複雑であり、現在の研究体制は不十分である。
- (3)の課題については、オープン CAE に関しては、接触と材料非線形・幾何学的非線形が同時に生じる問題の検証には至らなかった。

5. 可視化検証グループ

本プロジェクトで用いた大型 VR 装置はまだまだ高価で、一般的に利用するのは難しく、そのためここで開発したシステムそのものを公開する価値は少なく、アイデアを示すに留まっている。そこで、近年急速に普及しつつあるゴーグル型 VR 装置(Head Mounted Display)の使用も視野に入れて研究を進めてきたが、こちらは完成には至っていない。

<自己評価の実施結果と対応状況>

約月1回の運営委員会と、年1回の拡大運営委員会で研究の進捗等を報告し、年度末に後に述べる外部評価委員会で自己評価について報告し、翌年度初めに当該年度の研究計画を立ててプロジェクトを進めてきた。個別の達成度は上記の通りであるが、当初の目的の大部分は達成できたと考えている。

<外部(第三者)評価の実施結果と対応状況>

毎年年度終わりに4名の外部評価委員(学内2名、学外2名)からなる外部評価委員会を開催し、評価を受けた。本報告書には平成 24 年度から 28 年度まで 5 年分の評価票を参考資料として添付しているが、全体として B～A の評価を受けている。個別には、産学連携の推進、グループ間の連携の推進、学内外のプロモーション、今後の展開(本手法をどのように発展させていくのか)等が指摘されており、その都度、翌年度の計画にこれらを反映させて活動が続けてきた。このうち、学外への発信については、本年3月刊行予定の英文書籍およびシミュレーション学会誌の本センターの特集記事などである程度できるものと考えている。

<研究期間終了後の展望>

本プロジェクトは終了するが、センターとしては進行中のプロジェクトがあり、引き続き活動が続けて行く。その中で、本プロジェクトの成果は当然活用されるし、また課題として残った点についても研究を進めて行くことができると考えている。

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

手法開発グループおよび大規模並列化グループでは、次のステップとして商用化支援プログラムへの申請を検討している。

精度・妥当性検証は、標準問題を含め実用問題での本手法の有効性を議論して行く。

可視化検証については、構築したシステムを今後は本センターでの他の問題に適用して有効利用を図ると共に、必要に応じて改良をしていきたい。

本プロジェクトでは、計算力学の中でも流体－構造連成に焦点をあてて研究を行ってきた。今後の展望として、1. 実用問題に展開する。2. 他の連成問題に拡張する。の2つの方向が考えられる。前者については、2013 年度に関わっていたタイヤの解析などが考えられる。また、後者については、すでに他の連成問題も取り組んでいる^{*論文 14-17,22,38,40}ので、これらにも本プロジェクトの成果を応用して行きたい。

また、精度・妥当性検証ではベイズ推定を中心的に用いてきたが、連成問題に関連してベイズ推定以外の機械学習^{*論文 1,7 発表 83,115,148,219}についても研究を行ってきており、今後は機械学習を用いて実験や解析を統合するような枠組みについても研究をしていきたいと考えている。

<研究成果の副次的効果>

プロジェクト全体

まず、本プロジェクトを通して、国内外の大学(東京大学, 東京理科大学, 韓国成均館大学, 台湾龍華科学技術大学, バングラデシュシャージャラル工科大学他)との共同研究などが進んだことが挙げられる。特に、韓国成均館大学, 台湾龍華科学技術大学, バングラデシュシャージャラル工科大学は、本プロジェクトがきっかけとなり、大学間協定を結ぶことができた。また、本センターでは学生教育や若手研究者の育成にも取り組んでおり、あとに述べるように計5回の国際学生ワークショップを開催した。本プロジェクトにはのべ学部生7名, 研究生1名, 大学院生12名(博士前期課程8名, 博士前期課程4名)が参加し, 学位取得者3名を輩出した。博士研究員は, 3名中2名が本学出身者であり, うち1名は研究期間中に他大学に博士研究員として転出しており, 一定の成果を上げたと考えている。

1. 解析手法開発グループ

開発したシステムのうち、EFMM ベースの構造解析コードはパッケージとしてまとまっており公開可能である。また、本グループが開発した連成解析手法は、他の高精度な四面体一次要素を用いた構造解析手法とともに利用することが可能である。

2. 大規模並列グループ

開発システムは十分に商用化の価値があると判断しており、今後の展開により、商用化が実現されると期待している。

3. 新規実験グループ

新規実験内容として、柔らかい壁面による抵抗低減試験に取り組んだ^{*発表 51,65}。物体表面がゴムやゲルのような粘弾性材料であるとき、金属やアクリルのように硬質の物体に作用する空気抵抗と比べて粘弾性物体の空気抵抗が低減することを確認した。材料特性と抵抗低減効果の関係を調べた結果、適切な材料を選定することで、抵抗低減効果が得られることが分かった。これは新しい抵抗低減デバイスへの応用が期待できる技術である。一方、シリコンゴム・ゲルのような材料は一度硬化すると材料の性質を変更することができない。そこで、材料に新機能を持たせる方法を検討した結果、ヤング率を2倍以上変化することに成功した。この成果は国際会議で講演予定である。この技術は抵抗低減だけでなく、様々な応用に繋が

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

るものと考えている。

4. 精度・妥当性検証グループ

(1)の課題については、この研究成果は構造解析のみならず流体・構造連成を含む解析一般に適用可能な方法であり。解析結果の妥当性評価が可能となり、それを用いて設計したものの信頼性を定量的に評価できるようになる。製品デザインの信頼性向上につながる。

(2)の課題については、当センターのみならず、一般での活用が見込まれる。

(3)の課題についてはオープン CAE の新興国、中小企業への普及。

5. 可視化検証グループ

ここでの成果は、流体・構造連成解析に限らず様々な解析の可視化を利用した V&V に利用可能である。また、環境があれば、本プロジェクトのような大型 VR 装置でなく、HMD 等でも利用可能と考える。さらに、本プロジェクトに関連して、新しい可視化手法も提案しているが、これらも他の可視化に利用できると考える。

12 キーワード(当該研究内容をよく表していると思われるものを8項目以内で記載してください。)

- | | | |
|-----------------|-----------------|--------------------|
| (1) <u>計算力学</u> | (2) <u>連成解析</u> | (3) <u>V&V</u> |
| (4) <u>構造解析</u> | (5) <u>流体解析</u> | (6) <u>大規模並列化</u> |
| (7) <u>可視化</u> | (8) _____ | |

13 研究発表の状況(研究論文等公表状況。印刷中も含む。)

上記、11(4)に記載した研究成果に対応するものには*を付すこと。

<雑誌論文>

1. *M.MASUDA, Y.NAKABAYASHI and G.YAGAWA, "Radius Parallel Self-Organizing Map", Journal of Computational Science and Technology, Vol.6, pp.16-27, 201211.
2. N.TSURUMI, Y.TAMURA and Y.MATSUMOTO, "Improvement of Bubble Model in High Void Fraction for Cavitating Flow Simulations", Journal of Computational Science and Technology, Volume 6, No 3, pp. 113-128, 2012.
3. *T.ASHINO and Y. YAMASHITA, "Development of an Openmath Content Dictionary for Mathematical Knowledge of Materials Science and Engineering ", Data Science Journal, 11 (2012) PASMD17-ASMD21, 2012.
4. K.MUROTANI, G.YAGAWA and J-B, CHOI, "Adaptive finite elements using hierarchical mesh and its application to crack propagation analysis", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.253, pp.1-14, 2013.
5. K.SAKIHARA, H.MATSUBARA, T.EDO and G.YAGAWA, "Multi-dimensional Moving Least Squares Method Applied to 3D Elasticity Problems", Engineering Structures, Vol. 47, pp. 45-53, 2013.
6. 崎原康平, 松原仁, 江戸孝昭, 原久夫, 矢川元基, "弾性固体問題における付帯条件付

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

- き多次元型移動最小自乗法", 日本機械学会論文集 (A 編), Vol.78, No.786, pp.142-151, 2012 年
7. *増田正人, 中林靖, 矢川元基, "フリーキックサポートシステムの開発", 計算工学会論文集, No.20120009, 2012 年
 8. 松原仁, 原久夫, "風化サンゴ骨格の破壊強度とその性状: 微細孔と孔内液圧の影響", 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol. 68, No. 4, pp. 610-620, 2012 年 10 月
 9. 松原仁, 江戸孝昭, 原久夫, 伊良波繁雄, "振り外力を受ける環状切欠き丸棒におけるファクトリールーフ状破断面の形成メカニズムに関する数値解析的検討", 日本計算工学論文集, No. 20120016, 2012 年 11 月
 10. 松原仁, 江戸孝昭, 原久夫, "岩盤のき裂ネットワークを考慮した不連続体解析手法の提案およびき裂進展解析", 日本計算工学論文集, No.20120017, 2012 年 12 月
 11. 鶴見伸夫, 田村善昭, 松本洋一郎, "音波伝播の式を用いた気泡を含む液体中を伝播する集束超音波の数値解析", 日本機械学会論文集 B 編第 78 巻第 796 号, pp. 2096-2112, 2012 年 12 月
 12. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, "粒状構造を有する脆性材料の離散き裂進展解析手法の開発および性能評価", 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.69, pp.31-45, 2013 年 1 月
 13. K.MUROTANI, G.YAGAWA and J-B, CHOI, "Adaptive finite elements using hierarchical mesh and its application to crack propagation analysis", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.253, pp.1-14, 2013
 14. 広瀬孝三郎, 江戸孝昭, 松原仁, "裂性岩盤の狭小領域構造を考慮した広大領域における物質移動シミュレーション", 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.69, No.3, pp.367-377, 2013 年
 15. Taka-Aki Edo, Hitoshi Matsubara and Hisao Hara, "Comparison of Numerical and experimental results on Red soil muddy water flow in sand basin with filtration", 7thInternational Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, pp. 127-130, 2013.11
 16. Taka-Aki Edo, Hitoshi Matsubara and Hisao Hara, "Kita-Uebaru Landslide Analysis by using Material Point Method (MPM)", 7thInternational Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, pp. 39-42, 2013.11
 17. Kosaburo Hirose and Hitoshi Matsubara, "Mudcrack patterns of Okinawa regional soils", 7thInternational Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, pp. 35-38, 2013.11
 18. Yokoyama M., Mochizuki O., Yagawa G, "Surface Condition of Solid in Splash Formation", IACM expressions, No. 34,,pp2-5, 2014.02
 19. Yokoyama M, Kubota Y, Kikuchi K, Yagawa G and Mochizuki O, "Some remarks on surface conditions of solid body plunging into water with particle method ", Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences, Vol.1.1,pp1-14, 2014.06
 20. 郭永明, 堂脇徹朗, 矢川元基, 上谷俊平, "自然境界弱形式を有する選点法", 計算工学講演会論文集, Vol.19, 2014.06
 21. 郭永明, 吉田大祐, 矢川元基, 上谷俊平, "Over-Range 選点法における局所座標定数の最適値", 計算工学講演会論文集, Vol.19, 2014.06.
 22. 富山潤, "コンクリート橋上部工に付着する飛来塩分に関する数値解析的検討", コンクリ

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

- ート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.874-879, 2014.
23. 風間洋, 富山潤, 下地健, 小旗俊介, “沖縄県内陸部におけるFAC利用に関する中性化耐久性検討”, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.850-855, 2014.
 24. 福地啓太, 宮野伸介, 富山潤, 大城武, “防食 PC 鋼材の付着性能とプレテンション PC 桁のせん断耐力に関する研究”, プレストレスコンクリート学会, 第 23 回シンポジウム, pp.605-610, 2014.
 25. 戸田勝哉, 楊威, 富山潤, 下村匠, “分光分析を用いたコンクリート構造物の塩分分布測定法の開発”, 非破壊検査, 2014.10.
 26. A. M. M. Mukaddes, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, “Performance Evaluation of Domain Decomposition Method with Sparse Matrix Storage Schemes in Modern Supercomputer”, International Journal of Computational Methods, Vol.11, Suppl. 1, 1344007, pp.1-14, 2014.
 27. Itaru Ishikawa, Hiroshi Kawai, Yosuke Kobayashi, Ryuji Shioya, Genki Yagawa, “Simulation Results and its Performance by Using a Developing Eigenvalue Analysis Module of the ADVENTURE System”, Procedia Engineering, Volume90, 140-146, 2014
 28. A.M.M. Mukaddes, Masao Ogino, Ryuji Shioya, “The Study of Thermal-solid Coupling Problems Using Open Source CAE Software”, Procedia Engineering, Volume90, 147-153, 2014.
 29. M.Yokoyama, K.Murotani, G.Yagawa, O.Mochizuki, “Some considerations on surface condition of solid in computational fluid-structure interaction”, in NUMERICAL SIMULATIONS OF COUPLED PROBLEMS IN ENGINEERING, pp. 171-186, 2014, Springer International Publishing.
 30. Yong-Ming GUO, Kouji SHIOYA, Kei OOBUCHI, Genki YAGAWA, Shunpei KAMITANI, “Accuracy improvement of collocation method by using the over-range collocation points for 2-D and 3-D problems”, Mechanical Engineering Journal, Vol.1, No.2, pp.1-19, 2014.
 31. Shinsuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Genki Yagawa, “Parallelization of Enriched Free Mesh Method for Large Scale Fluid-structure Coupled Analysis”, Procedia Engineering, 90, pp. 288-293, 2014
 32. *Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi and Yoichiro Matsumoto, “Visualizations of Bubble Motions and Temperature Rises by Focused Ultrasound,” Procedia Engineering, Volume 90, December 2014, pp. 5-10.
 33. Terutaka Fujioka, “Elastic-Route Estimation of Strain Range in Notched Components Under Thermal Loading Without Performing Stress Linearization”, Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, 137(2), 021205-1 to 021205-6, April 2015.
 34. *Shin-ichiro Sugimoto, Daisuke Tagami, Masao Ogino, Amane Takei, Hiroshi Kanayama, “Improvement of Convergence in Time-Harmonic Eddy Current Analysis with Hierarchical Domain Decomposition Method”, Transaction of the Japan Society for Simulation Technology, Vol.7, No.1, pp.11-17, 2015.
 35. *Hiroshi KAWAI, Kohmei SATOH, Yasunori YUSA, Takayuki UOMOTO, Ryuji SHIOYA, Hiroshi OKADA, “AutoMT a library for tensor operations and its

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

- performance evaluation for solid continuum mechanics applications”, Mechanical Engineering Letters Vol.1, No.15-00349, pp.1-10, 2015.
36. *Kohei MUROTANI, Issei MASAIE, Takuya MATSUNAGA, Seiichi KOSHIZUKA, Ryuji SHIOYA, Masao OGINO, Toshimitsu FUJISAWA, “Performance Improvements of Differential Operators Code for MPS method on GPU”, Computational Particle Mechanics, Vol.2, Issue 3, pp.261-272, 2015.
 37. Kazuo KONAGAI, Rama Mohan POKHAREL, Hitoshi MATSUBARA and Masataka SHIGA, “Geotechnical aspect of the damage caused by the April 25th, 2015 Gorkha earthquake of Nepal”, JSCE Journal of Disaster FactSheets, FS2015-E-0002, July 2015.
 38. 富山潤, 羽瀨貴士, 宮里心一, 中林靖, “コンクリート橋梁上部工に付着する塩分量分布に関する数値実験”, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.769-774, 2015
 39. T. Nosaki, N. Fujimatsu, “Trajectory analysis based on aerodynamic characteristics of baseball with accelerating motion”, Journal of Visualization, September 2015.
 40. 富山潤, “コンクリート構造物を対象としたミクロ・マクロ塩害環境に関する研究”, コンクリート構造物の補修, 補強およびアップグレードシンポジウム, Vol.15, pp.405-410, 2015 年 10 月
 41. Hitoshi Matsubara, Kosaburo Hirose, Taka-aki Edo, Kei-ichi Tamanaha, Hisao Hara and Tomonori Yamada, “Numerical modelling of mudcrack grows”, Proceedings of the 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ATC1-3-17, November 2015.
 42. 広瀬孝三郎, 松原仁, 原久夫, “マッドペーストにおける乾燥収縮亀裂のフラクタル次元解析”, 土木学会論文集 C(地圏工学), 72(1), 27-37, 2016
 43. F Zhang, Y Zhu, T Furukawa, W Song, “Kinematic Analysis of a Partially Decoupled 3-DOF Parallel Wrist”, Journal of Robotics, 2015 (790414), pp.1-9, 2015.
 44. K Takami, T Furukawa, M Kumon, D Kimoto, G Dissanayake, “Estimation of a nonvisible field-of-view mobile target incorporating optical and acoustic sensors”, Journal of Autonomous Robots, 40 (2), pp. 343-359, 2015.
 45. B Li, T Furukawa, “Microtexture Road Profiling System Using Photometric Stereo”, Journal of Tire Science And Technology, 43 (2), pp.117-143, 2015.
 46. *Hiroshi Kanayama, “An Industrial Application of Thermal Convection Analysis”, International Journal of Computational Methods, Vol.13, No.2, 2016 (Accepted).
 47. *H. Zhu, Q. Yao, H. Kanayama, “Large-scale computations of flow around two cylinders by a domain decomposition method”, Mathematical Problems in Engineering, Vol.2016: 8 pages 2016, Article ID 4126123.
 48. *河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 山田知典, 吉村忍, “領域分割法におけるローカル Schur 補元アプローチの性能評価”, Transaction of JSCEs, Vol. 2016, 20160006, 2016 年 2 月(DOI: 10.11421/jsces.2016.20160006)
 49. *H. Kanayama, “An industrial application of thermal convection analysis, International Journal of Computational Methods”, Vol.13, No.2:15 pages 2016.
 50. *Masahiko Shimamura, Yoshitaka Ezawa, Yoshiaki Tamura, Satoru Takashimizu, and Daisuke Satou, “High Accurate Analysis by Experiment and Simulation Using Bayesian Inference for Corrugated Cardboard”, Mechanical Engineering Journal,

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

Vol. 3, No. 4, 16-00072, August, 2016.

51. K. Tazoe, M. Oka and G. Yagawa, "Loading frequencies effects on the oxide induced crack closure in extremely low stress intensity factor range", International Journal of Fracture Fatigue & Wear, Vol. 4, 153-157, 2016.
52. Yong-Ming GUO, Genki YAGAWA, "A meshless method with conforming and nonconforming sub-domains", International Journal for Numerical Methods in Engineering, DOI: 10.1002/nme.5431, 2016.
53. Masao Ogino, Hongjie Zheng, Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, Ryuji Shioya, Liu Lijun, "Tsunami Run-Up and Inundation Simulations Using LexADV_EMPS Solver Framework on Fujitsu FX100", SC16 Research Poster (Peer-reviewed International Conference), Salt Lake City, Nov. 13 - 18, 2016.
54. Masao Yokoyama, Genki Yagawa, "Relation between violin timbre and harmony overtone", Proceedings of Meetings on Acoustics (POMA), Honolulu, Hawaii, 28 Nov. - 2 Dec. 2016.
55. 小林謙一, 藤岡照高, "微小領域からサンプリングした試料による高経年ボイラーチューブの健全性評価とクリープ余寿命推定", ボイラ研究, 400 号, pp.10-15, 2016 年 12 月
56. *Wada, Y., Murotani, K., Ogino, M., Kawai, H. and Shioya, R., "High resolution visualization library for exa-scale supercomputer", Mathe. Prog. Expressive Image Synth. III, Springer, pp.83-94, 2016.
57. *杉本振一郎, 荻野正雄, 金山寛, "階層型領域分割法による回転機の解析", 電気学会論文誌 B, Vol.137, No.3, in press.

<図書>

1. Yokoyama M., Murotani, K., Yagawa, G., and Mochizuki, O., "Some Considerations on Surface Condition of Solid in Computational Fluid-Structure Interaction", In Numerical Simulations of Coupled Problems in Engineering (2014) pp. 171-186, Springer International Publishing.
2. *Hiroshi Kawai, Masao Ogino, Ryuji Shioya, Shinobu Yoshimura, "Fundamentals of High-Performance Computing for Finite Element Analysis", High-Performance Computing for Structural Mechanics and Earthquake / Tsunami Engineering (Springer Tracts in Mechanical Engineering), Springer, pp.1-21, 2015.
3. *Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, Eiichi Nagai, Toshimitsu Fujisawa, Akira Anju, Hiroshi Kanayama, Satoshi Tanaka, Kyoko Hasegawa, "Large-Scale Tsunami Run-Up Analysis Using Particle Method", High-Performance Computing for Structural Mechanics and Earthquake / Tsunami Engineering (Springer Tracts in Mechanical Engineering), Springer, pp.157-177, 2015.
4. 日本応用数理学会編, 矢川元基分担執筆, "応用数理の散歩道", 岩波書店, pp.238-253, 2016 年 6 月
5. 矢川元基, 酒井譲, "粒子法", 岩波書店, 2016 年 11 月
6. H. Kanayama, H. Dan, "Tsunami Propagation from the Open Sea to the Coast", Tsunami, edited by M. Mokhtari, ISBN 978-953-51-2677-5, InTech: Chapter 4 (61-72) 2016.
7. *Yoshiaki Tamura, Ryuji Shioya and Yasushi Nakabayashi (ed.), "Validation & Verification for Computational Mechanics", Springer, to appear.

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

<学会発表>

1. G.YAGAWA, "An Efficient Domain Decomposition Algorithm for Fe Simulation", The Colloquium on Advances in Computational Science, Engineering and mathematics in honor of Tinsley Oden's 75th birthday, Univ.Texas at Austin, USA, 2012.1.19
2. Y.EZAWA, S.SHIMAMURA, K.SUGA and S.AOKI, "Effects of Material Properties of Cue on Ball Trajectory in Billiard", The 4th International Conference on Advanced Manufacturing, Taiwan, 2012.3.4-8
3. G.YAGAWA, "Memories of Ptofessor Y.J.Kim", ASINCO9 (Kaohsuing, Taiwan), 2012.4.19
4. G.YAGAWA, "Some Remarks on Domain Decomposition Algorithm for FE Simulation", Celebration Meeting of the FEM Class of 42 Fellows (Barcelona, Spain), 2012.5.8
5. G.YAGAWA, "Some Strategies for High-performance FEM", ESI Global Executive Meeting (Amagi, Japan), 2012.5.22
6. K.SAKIHARA, H.MATSUBARA and G.YAGAWA, "An Application of Multi-dimensional Moving Least Squares Method to 3D Crack Analysi", 10th World Congress on Computational Mechanics (Sao Paulo, Brazil), 2012.7.10
7. G.YAGAWA, "Some considerations on high performance computational mechanics", The JSME-CMD International Computational Mechanics Symposium (ICMS) (Kobe, Japan), 2012.10.11
8. G.YAGAWA, "Preliminary study for exascale computing in Japan", Second international workshop on "COllaborative DEvelopment of SImulation software of next GeNeration (CO-DESIGN 2012)" (Peking University, Beijing, China), 2012.10.23-25
9. G.YAGAWA, "Recent advances on simulation technology", ESI Users' Forum Japan 2012 (Tokyo, Japan), 2012.11.21
10. 矢川元基, "福島原子力事故の総合工学的観点", 第2回「量子ビームを用いた材料・生体の構造と機能の研究」成果報告会 (いばらき量子ビーム研究センター、東海村、茨城), 2012.3.16
11. 矢川元基, "計算科学技術における我が国の貢献", 日本学術会議第3回計算科学シミュレーションシンポジウム (東京), 2012.4.25
12. *芦野俊宏, "国際材料データベースの事例と課題", 日本地球惑星科学連合 2012 年大会 地球電磁気・地球惑星圏学会 データ問題検討分科会, 2012.5.22
13. 矢川元基, "計算科学技術に関する2, 3の課題", 第24回 CCSE ワークショップ (柏), 2012.6.19
14. 矢川元基, "計算力学シミュレーションの現状と課題", ADVENTURECluster ユーザー会 (東京), 2012.6.27
15. 藤松信義, "技術をどのように伝えるか", 日本実験力学会 産学連携支援センター主催 パネルディスカッションー実験技術を語るー, 2012.12.15
16. *T.ASHINO and Y.YAMASHITA, "Development of Openmath Content Dictionary for Mathematical Knowledge of Materials Science and Engineering", The 3rd Asian Materials Database Symposium, AMDS 2012, Japan Nara, 2012.4.17

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

17. Hitoshi MATSUBARA, Taka-aki EDO, Ryuji SHIOYA and Genki YAGAWA, "Large-scale simulation for fracture pattern of brittle porous media in Compression", Proceedings of 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM), 2012.7
18. Kohei SAKIHARA, Hitoshi MATSUBARA, Ryuji SHIOYA and Genki YAGAWA, "An application of Multi-dimensional moving least squares method to 3D crack analysis", Proceedings of 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM), 2012.7.
19. I. ISHIKAWA, Y.KOBAYASHI, R.SHIOYA, R.NAKAOKA, A.MATSUOKA, G.YAGAWA, "Development of Structural Eigenanalysis Module for The Adventure System", The 10th WORLD CONGRESS ON COMPUTATIONAL MECHANICS (WCCM 2012), 19719.pdf, SaoPaulo, Brazil, 2012.7.9.
20. M. FUKAYA, R. MORINAKA, N. SAITOU, H. HATOU, Y. TAMURA, Y. MATSUMOTO, "Cavitating Jet Simulation for Predicting Residual Stress Improvement of cylindrical Structure by Water Jet Peening", 8th International Symposium on Cavitation, Singapore, 2012.8
21. Y. TAMURA, N. TSURUMI, Y. MATSUMOTO, " Further Improvement of Bubble Model for Cavitating Flow Simulations", 8th International Symposium on Cavitation, Singapore, 2012.8
22. Kaworu YODO, Ryuji SHIOYA, Akio MIYOSHI, Takuru ASAUMI, " Parallel CAE System for Large Scale Problems Based on HTML5 and WebGL", DETC2012-70909, pp.1-7, Proceedings of the 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2012, August 12-15, Chicago, Illinois, USA, 2012.8.14
23. Kaworu YODO, Hiroshi KAWAI, Hiroshi OKADA, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, "Development of The Next-Generation Computational Fracture Mechanics Simulator on The Earth Simulator 2", DETC2012-70909, pp.1-7, Proceedings of the 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2012, August 12-15, Chicago, Illinois, USA, 2012.8.15
24. Hitoshi MATSUBARA, "Numerical simulation of fracture network in rock based on GFEM and MLSM", KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2012, pp.227-231, 2012.9
25. *T.ASHINO, "Development of Openmath Content Dictionary for Mathematical Knowledge of Materials Science and Engineering", 日本学術会議主催学術フォーラム「データと発見-Data Intensive Scientific Discovery」, 2012.9.10
26. N. TSURUMI, Y. TAMURA, Y. MATSUMOTO, "Numerical Simulation of Wave Propagation in Two-Phase Fluid", European Congress on Computational Methods in Applied Science and Engineering (ECCOMAS 2012), Vienna, Austria, 2012.9.10-14
27. *Y.EZAWA, S.TAKASHIMIZU, "Novel infill criterion for stochastic metamodel-based optimization", ECCOMAS 2012 - European Congress on Computational Methods in Sciences and Engineering, 2012.9.11

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

28. *T.ASHINO, "Electronic Data Exchange for Materials Science and Engineering", IUMRS-ICEM 2012, Yokohama, Japan, 2012.9.27
29. A.M.M.MUKADDES, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, " A Computational Study of Sparse Matrix Storage Schemes in The Domain Decomposition Method", Proceedings of 25th JSME Computational Division Conference, Kobe, Japan, 2012.10.6
30. A.M.M.MUKADDES, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, "ADVENTURE _Thermal-An Open Source Module for Large Scale Heat Conduction Problems", PUCDIP 2012, Kyusyu, Japan, 2012.10.13
31. *Toshihiro ASHINO, "Data and Expressions for Science and Engineering into e-Journal", 23nd International CODATA Conference, Taipei, Oct., 2012
32. Hitoshi MATSUBARA, Takaaki EDO and Hisao HARA, "Crack Propagation Model for Discrete Fracture Network based on GFEM and MLSM", Proceedings of the 4th international conference on computational methods, 2012.11
33. 大橋秀樹, 浅海拓来, 塩谷隆二, "スマートフォン端末を用いた CAE 可視化システム", HPCS2012, 名古屋大学, 2012.1.26
34. 小林陽介, 矢川元基, "3次元き裂の自動進展解析", 第 61 回理論応用力学講演会, 東京大学, 2012.3.7-9
35. 松尾友紀, 伊倉宏治, 田村善昭, "圧縮性気液二相流の数値解析手法の開発", 日本機械学会関東支部第 18 期総会講演会, 日本大学生産工学部(千葉), 2012.3.9-10
36. 小俣慎弥, 田村善昭, "ダリウス形風車まわりの流体解析", 日本機械学会関東支部第 18 期総会講演会, 日本大学生産工学部(千葉), 2012.3.9-10
37. *芦野俊宏, "材料データ交換の標準化: CEN WS SERES の概要", CCMR-HDDMPPS (CREST プロジェクト) 合同シンポジウム, 2012.3.29
38. 長岡慎介, "流体-構造連成解析の為に新しい解析手法とその応用例", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29
39. 江澤良孝, "最適デザインの効率化について", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29
40. 中林靖, "リアルタイムシミュレーションの防災への応用", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29
41. 田村善昭, "キャビテーション/エロージョンの数値予測", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29
42. 塩谷隆二, "ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解放ライブラリ開発", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29
43. 松原仁, "多孔質体の圧縮破壊パターンに関する数値解析的検討", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29
44. 矢川元基, "東電原子力事故調査と計算力学", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29
45. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 吉村忍, "領域分割法における BDD 前処理のための並列直接ソルバーの開発", 第 15 回計算工学講演会, Vol.15, No.1, pp.191-192, 2012.5.27
46. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, "先在き裂を考慮したき裂進展シミュレーション", 第 2 回土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会概要集, pp.95-96, 2012.9.

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

47. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, "脆性材料のき裂進展シミュレーション: 先在き裂と破壊プロセスの関連性", 土木学会第 67 回年次学術講演概要集, pp.339-340, 2012.9
48. 広瀬孝三郎, 松原仁, 江戸孝昭, 原久夫, "き裂ネットワークモデルを用いたき裂性岩盤における物質移動シミュレーション", 土木学会第 67 回年次学術講演概要集, pp.353-354, 2012.9
49. 横山真男, 窪田佳寛, 望月修, "突入物体の表面性状を考慮したスプラッシュの数値シミュレーション", 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012.9.10
50. 藤松信義, "Wavelet 基底に基づく VITA 法による乱流渦運動解析", 日本機械学会 2012 年度年次大会, (CD-ROM Proceedings), J054042, 2012.9.10
51. 藤松信義, "乱流摩擦抵抗低減効果と粘弾性皮膜運動に関する数値的研究", 日本機械学会 2012 年度年次大会, (CD-ROM Proceedings), J054046, 2012.9.10
52. 横山真男, 菊地謙次, 窪田佳寛, 望月修, "ハイドロゲル壁面近傍における流れの数値シミュレーション", 日本流体力学会年会 2012, 2012.9.17
53. 石川格, 小林陽介, 塩谷隆二, 矢川元基, "ADVENTURE 固有値解析モジュールの開発", 第 25 回計算力学講演会、407、神戸, 2012.10
54. 松原仁, "光外乱が亜熱帯生物の定着に及ぼす影響", 平成 24 年度沖縄しまて協会技術環境研究所研究発表会論文集, pp.25-34, 2012.10
55. 崎原康平, 松原仁, 江戸孝昭, 矢川元基, "付帯条件付き多次元移動最小自乗法を用いたき裂進展に関する研究", 日本機械学会第 25 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp.544-545, 2012.10
56. 横山真男, 菊地謙次, 窪田佳寛, 望月修, "生体を模擬したハイドロゲル壁面近傍における流れの数値シミュレーション", 可視化情報全国講演会 2012, 2012.10.4.
57. 横山真男, 菊地謙次, 窪田佳寛, 望月修, "水面に突入する物体表面の滑りを考慮したスプラッシュのシミュレーション", 日本機械学会 第 25 回計算力学講演会, 2012.10.7
58. 広瀬孝三郎, 江戸孝昭, 松原仁, "き裂性岩盤の狭小領域構造を考慮した広大領域における浸透流解析", 第 25 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, 2012.11
59. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, "き裂性岩盤におけるき裂進展解析", 第 25 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, 2012.11
60. 李思陽, 江澤良孝, "圧力容器の効率的解析技術と最適化技術の開発", 第 10 回最適化シンポジウム 2012, 2012.12.6
61. 清水聖, 江澤良孝, "確率的メタモデルによる大域的最適化", 第 10 回最適化シンポジウム 2012, 2012.12.7
62. 島村雅彦, 江澤良孝, "フラクタル構造物の構造最適化設計", 第 10 回最適化シンポジウム 2012, 2012.12.7
63. 藤松信義, "乱流統計量を求める際の注意点について", 日本実験力学会 分科会合同ワークショップ, 2012.12.7
64. 田村善昭, 鶴見伸夫, 松本洋一郎, "気泡の合体の効果を考慮したキャビテーション流れのための気泡モデル", 第 26 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2012.12.18-20
65. N. FUJIMATSU, "Direct Numerical Simulation on Drag Reduction of Channel Flow with Visco-Elastic Wall", 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2013.1.7
66. *長岡慎介, 中林靖, 矢川元基, "EFMM の並列流体-構造連成解析への適用", 第 62 回理論応用力学講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス, 2013.03.06-08

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

67. *芦野俊宏, “材料データベースの国際動向と今後の展望”, 科学技術未来戦略ワークショップ データを活用した設計型物質・材料研究(マテリアルズ・インフォマティクス)ワークショップ第 2 回, 東京, 2013.06.01
68. Shinsuke NAGAOKA, Yasushi NAKABAYASHI, Genki YAGAWA, “E Application of EFMM to Fluid-Structure Coupled Analysis and Its Parallelization”, SEECCM III, Kos Island, Greece, 2013.06.012-14
69. Hiroshi KAWAI, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, Shinobu YOSHIMURA “Performance Benchmark of Local Solvers on Supercomputers in Domain Decomposition Method”, The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS), Jeju, South Korea, 2013.06.09-13
70. Kaoru YODO, Ryuji SHIOYA, Yoshitaka WADA, Akio MIYOSHI, “Parallel CAE system based on HTML5, WebGL and offline visualization technology with domain decomposition method”, The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS), Jeju, South Korea, 2013.06.09-13
71. Itaru ISHIKAWA, Yosuke KOBAYASHI, Ryuji SHIOYA, Genki YAGAWA, “Vibration Analysis by an Eigenvalue Analysis Module of ADVENTURE System”, The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS), Jeju, South Korea, 2013.06.09-13
72. A.M.M. MUKADDES, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, “A Computational Study of Sparse Matrix Storage Schemes in Large Scale Thermal-Solid Coupling Analysis”, The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS), Jeju, South Korea, 2013.06.09-13.
73. *荻野正雄, 塩谷隆二, “階層型領域分割法による 1000 億自由度並列有限要素解析”, 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21
74. 石川格, 小林陽介, 塩谷隆二, 矢川元基, “ADVENTURE 振動固有値解析モジュールの開発”, 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21
75. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 吉村忍, “コース行列の逆行列を用いた BDD 前処理”, 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21
76. 和田義孝, 河合浩志, 塩谷隆二, “超大規模解析のための高精細可視化ライブラリの開発”, 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21
77. 淀薫, 塩谷隆二, 和田義孝, 三好昭生, “領域分割法に基づくオフライン可視化と WebGL による大規模解析用ネットワーク CAE システムの開発”, 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21
78. 荒井皓一郎, 岡田裕, 河合浩志, 淀薫, 塩谷隆二, “地球シミュレータによる大規模有限要素法破壊力学解析と破壊力学パラメータの計算手法”, 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21
79. 田村善昭, 鶴見伸夫, 松本洋一郎, “集束超音波による気泡運動と温度上昇の可視化”, 可視化情報シンポジウム, 東京, 2013.06.19-21
80. *Y. Yamashita, T. Baba and T. Ashino, “Semantic mathematical representation using OpenMath for equation”, The 10th Asian Thermophysical Properties Conference, Jeju, Kora, 2013.09
81. 長岡慎介, 中林靖, 矢川元基, “EFMM による並列流体-構造連成解析について”, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山大学津島キャンパス, 2013.09.08-11

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

82. *Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi, Yoichiro Matsumoto, “Numerical Simulation Method of HIFU with Microbubbles”, ASME/FDA 2013 1st Annual Frontiers in Medical Devices: Applications of Computer Modeling and Simulation (FMD2013), Washington DC, U. S. A., 2013.09.11-13
83. *増田正人, 中林靖, 田村善昭, “振動現象の連成解析及び自己組織化マップによるその分類”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013.11.02-04
84. *山下雄一郎(産総研), 馬場哲也, 芦野俊宏, “分散型熱物性データベースの開発 (10)-OpenMath を用いた数式データの表現-”, 第 34 回日本熱物性シンポジウム, 富山, 2013.11
85. *Shisuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Genki Yagawa, “Evaluation of Efficiency of New Fluid-Structure Coupled Analysis Method using Parallel Enriched Free Mesh Method”, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14
86. Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi, Yoshiaki Tamura, “Fluid-Structure Coupled Analysis of Vibration Phenomena and Its Classification and Prediction Using the modular network Self Organizing Map”, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics(APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14
87. Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi, Yoichiro Matsumoto, “Numerical Simulation of Nonlinear Acoustic Waves in Two-Phase Fluid”, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14
88. 石川 格, 河合浩志, 塩谷隆二, “振開発中の ADVENTURE 振動固有値解析モジュールによる並列計算”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013.11.02-04.
89. I. Ishikawa, M. Ogino, A. M. M. Mukaddes, Ryuji Shioya, “Trial Study of Multi-Level Domain Decomposition Method for Heat Transfer Analysis”, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14
90. 河合浩志, 塩谷隆二, “連続体力学向け DSL の開発”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013.11.02-04
91. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 山田知典, 吉村忍, “領域分割法ソルバーの性能ベンチマーク”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013.11.02-04
92. 和田義孝, 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, “超大規模解析のための高精細可視化ライブラリの並列化”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013.11.02-04
93. 淀薫, 塩谷隆二, 和田義孝, 河合浩志, 三好昭生, “大規模解析のためのレイキャスティング可視化技術の検討”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013.11.02-04
94. A M M Mukaddes, Masao Ogino and Ryuji Shioya, “A new implementation of sparse matrix-vector multiplication in the parallel finite element”, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14.
95. S. Sugimoto, M. Ogino and R. Shioya, “Implementation and acceleration of the

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

- domain decomposition method with complex data types”, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14
96. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, “Material Point Method(MPM)におけるエネルギー変動問題とその抑制法”, 土木学会第 68 回年次学術講演概要集, pp.233-234, 2013.09
 97. 広瀬孝三郎, 松原仁, “島尻粘土における乾燥き裂パターンに関する実験研究”, 土木学会 第 68 回年次学術講演概要集, pp.463-464, 2013.09
 98. 松原仁, 江戸孝昭, 原久夫, “不均質脆性固体における破壊形態の複雑性に関する数値解析的検討”, 第 26 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, pp.24-25, 2013.11
 99. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, “Material Point Method(MPM)を用いた斜面崩壊発生時の土質 強度の検討”, 第 26 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, pp.18-23, 2013.11
 100. 広瀬孝三郎, 松原仁, “Mud crack の形成メカニズムに関する実験的検討”, 第 26 回沖縄 地盤工学研究発表会講演概要集, pp.14-17, 2013.11
 101. Hitoshi Matsubara, “Numerical Study on the Forming Mechanism of Honeycomb-weathering of Rock”, Proceedings of 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, December 2013.
 102. Taka-Aki Edo, Hitoshi Matsubara and Hisao Hara, “High-accuracy Material Point Method based on the Moving Least Squares Method”, Proceedings of 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, December 2013.
 103. G. Yagawa, M. Yokoyama, K. Murotani, “High-Performance Computing for Fluid-Structure Interaction with Application to Splash Problem”, International Conference on Computational Fluid-Structure Interaction and Flow Simulation ",Tokyo, JAPAN, 2014.03.20
 104. Yasushi NAKABAYASHI, Shinsuke NAGAOKA and Genki YAGAWA, "An Efficient Approach for the Fluid-Structure Interaction Problems based on the Stabilized Finite Element Method and the Enriched Free Mesh Method", Advances in Computational Fluid-Structure Interaction and Flow Simulation, Tokyo, Japan, 2014.03.19-21
 105. Yasushi NAKABAYASHI, Shinsuke NAGAOKA and Genki YAGAWA, "An Efficient Parallelization Method and Asymmetric Solver for the Fluid-Structure Interaction Problem", KSME-JSME Symposium on Computational Mechanics & CAE 2014, Jeju, Korea, 2014.05.01
 106. *Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi, Yoichiro Matsumoto, "Visualizations of Bubble Motions and Temperature Rises by Focused Ultrasound", International Conference on Mechanical Engineering 2013 (ICME2013), Dahka, Bangladesh, 2014.06.20-21
 107. Yasushi NAKABAYASHI, Shinsuke NAGAOKA, Yoshiaki TAMURA and Genki YAGAWA, "An Efficient Parallelization and Asymmetric Solver for the FSI Solver

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

- based on the SUPG/PSPG Method and the Enriched Free Mesh Method", The 5th International Conference on Computational Methods (ICCM2014), Cambridge, England, 2014.07.28-30
108. G. Yagawa, Large scale fluid structure interaction considering the surface condition of the solid wall, ESI Forum2014, 2014.11.20(Tokyo)
 109. Shinsuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Genki Yagawa, "Parallelization of enriched free mesh method for large scale fluid-structure coupled analysis", International Conference on Mechanical Engineering 2013 (ICME2013), Dahka, Bangladesh, June 20-21, 2014.
 110. Itaru Ishikawa, Yosuke Kobayashi, Ryuji Shioya, Genki Yagawa, "Simulation results and its performance by using a developing eigenvalue analysis module of the adventure system", International Conference on Mechanical Engineering 2013 (ICME2013), Dahka, Bangladesh, June 20-21, 2014.
 111. M. Yokoyama, K. Murotani, K. Kikuchi, G. Yagawa, O. Mochizuki, "How deal with slippery surface between fluid and structure in particle method?" The 16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16) , Okinawa Convention Center, June 26, 2014.
 112. Takafumi Nosaki, Nobuyoshi Fujimatsu, "Experimental study of aerodynamic characteristics of baseball with accelerating motion", The 16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16) , Okinawa Convention Center, June 26, 2014.
 113. Naohiro Shinozaki, Nobuyoshi Fujimatsu. " Motion analysis and flow visualization of sheet flutter for various materials", The 16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16) , Okinawa Convention Center, June 26, 2014.
 114. Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi and Yoichiro Matsumoto, "Some Modifications of Bubble Model for Cavitating Flow Simulations", 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July, 2014.
 115. *Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi and Yoshiaki Tamura, "Fluid-Structure Interaction Analysis of Vibration Phenomena and Verification of its classification and Prediction Accuracy using Modular Network Self-Organizing Map", 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July, 2014.
 116. *Shinsuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Yoshiaki Tamura and Genki Yagawa, "The Comparison of the Experimental Result with the Numerical Analysis using the New Coupled Analysis Method based on the Enriched Free Mesh Method and the SUPG/PSPG Stabilized Finite Element Method", 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July, 2014.

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

117. Masao Yokoyama, Kohei Murotani, Genki Yagawa and Osamu Mochizuki, "Fluid-Structure Interaction Analysis with Slippery Mucus Skin", 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July, 2014.
118. 広瀬孝三郎, 松原仁, 粘性土における Mud crack 生成パターンに関する実験的検討, 土木学会第 69 回年次学術講演概要集, pp. 85-86, 2014.
119. 宮野伸介, 大城武, 富山潤, 福地啓太, “塗装 PC 鋼より線仕様のプレテンション PC 桁の付着性能に関する研究”, 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-013, pp.25-26, 2014.
120. 富山潤, 大城武, 大貫隆弘, “塩害環境化におけるエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた鉄筋コンクリートの防食に関する研究”, 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-439, pp.877-878, 2014.
121. 松浦葵, 富山潤, 迫田泰治, “ASR 劣化したプレテンション PC 桁橋の劣化調査とモニタリング調査”, 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-484, pp.967-968, 2014.
122. 横山真男, 野村和希, 望月修, “水底の形状変化を用いた水滴落下による騒音の緩和”, 日本機械学会流体力学部門講演会講演論文集, 2014.10.
123. 新城達也, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 富山潤, “ロックアンカー・ロックボルトの非破壊試験法の開発”, 土木学会西部支部沖縄会, 第 4 回技術研究発表会, pp.60-61, 2014.
124. 土屋憲一, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 富山潤, “トンネル掘削における発破振動計測の試み, 土木学会西部支部沖縄会”, 第 4 回技術研究発表会, pp.62-63, 2014.
125. 福長友弥, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 富山潤, “史的石積み構造物に対する多重パラメータ動態計測システムとその中城城址への適用”, 土木学会西部支部沖縄会, 第 4 回技術研究発表会, pp.64-69, 2014.
126. 亀川裕也, 藍檀オメル, 富山潤, 山口順圭, 屋我晃, 神谷和志, 上里尚也, “コンクリートプリズム(CPT)を用いた ASR 加速試験の遅延膨張性 ASR への適用性に関する研究”, 土木学会西部支部沖縄会, 第 4 回技術研究発表会, pp.128-129, 2014.
127. 外間賢伍, 松浦葵, 藍檀オメル, 富山潤, “コンクリート橋上部工の付着塩分量に関する調査および塩害環境評価法に関する基礎研究”, 土木学会西部支部沖縄会, 第 4 回技術研究発表会, pp.130 -131, 2014.
128. 松浦葵, 藍檀オメル, 富山潤, 迫田泰治, 浅井光輝, “ASR 劣化したプレテンション PC 桁橋の調査および損傷理論を導入したボクセル FEM を用いた膨張予測の基礎検討”, 土木学会西部支部沖縄会, 第 4 回技術研究発表会, pp.132-135, 2014.
129. 平田淳貴, 吉次優祐, 松浦葵, 藍檀オメル, 富山潤, “コンクリート梁の振動特性に関する基礎研究, 土木学会西部支部沖縄会”, 第 4 回技術研究発表会, pp.170-171, 2014.
130. 吉次優祐, 松浦葵, 平田淳貴, 松川博宣, 富山潤, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, “塩害劣化したコンクリート橋梁の振動特性評価に関する基礎研究”, 土木学会西部支部沖縄会, 第 4 回技術研究発表会, pp.172-173, 2014.
131. 松川博宣, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 富山潤, “モノレール駅の振動特性に関する基礎研究, 土木学会西部支部沖縄会”, 第 4 回技術研究発表会, pp.174-175, 2014
132. 増田正人, 中林靖, 田村善昭, “自己組織化マップを用いた解析結果の予測”, 日本

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

機械学会第 27 回計算力学講演会, 盛岡, 2014 年 11 月

133. *長岡慎介, 中林靖, 田村善昭, 矢川元基, “EFMM を用いた流体-構造連成解析と実験結果との比較”, 日本機械学会第 27 回計算力学講演会, 盛岡, 2014 年 11 月
134. 後藤恵理子, 瀬田陽平, 矢川元基, 横山真男, “容器の口から流れる液だれの数値シミュレーション”, 日本機械学会第 27 回計算力学講演会, 盛岡, 2014 年 11 月
135. Toshihiro Ashino, Yuichiro Yamashita and Tetsuya Baba, “The Requirements for Permanent URI’s of Reliable Constant Values and Unit Systems to Linked Measurement Data”, SciDataCon2014, Delhi, India, November 2014
136. 広瀬孝三郎, 松原仁, 原久夫, マッドペーストを用いた Mud crack 生成パターンに関する実験的検討, 第 27 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, pp.32-33, 2014.
137. 河合浩志, 谷村景貴, 塩谷隆二, “アクセラレーター向け最適化コード自動生成 DSL 開発”, 日本機械学会第 27 回計算力学講演会, 講演番号 1604, 岩手大学工学部, 2014 年 11 月 22 日~24 日
138. Hiroataka Tanimura, Hiroshi Kawai, and Ryuji Shioya, "A Development of Domain Specific Language(DSL) for Continuum Mechanics", JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software, P40, KOBE, JAPAN, December 2-4, 2014
139. Hiroshi Kawai, Masao Ogino, Ryuji Shioya, Tomonori Yamada, Shinobu Yoshimura, “Performance Tuning of Parallel Structural Analysis Code Based on Iterative Substructuring with BDD Pre-conditioner for Peta-scale Supercomputers”, The 18th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (FEF2015), Regent Taipei, Taiwan, March 16-18, 2015.
140. Hiroshi Kanayama, Masao Ogino, Shin-ichiro Sugimoto, “Preconditioners in Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems”, The 18th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (FEF2015), Regent Taipei, Taiwan, March 16-18, 2015.
141. Genki Yagawa, “Views of Japanese Academia on Fukushima Daiichi Nuclear Accident”, World Engineering Conference and Convention 2015, Kyoto, December 1, 2015.
142. 横山真男, 齊藤勇也, “ヒットチャートランキング上位に入る楽曲の特徴分析”, 情報処理学会研究報告音楽情報科学(MUS), 山梨, 2015 年 2 月
143. 渡辺大樹, 瀬田陽平, 横山真男, “HMD と Leap Motion を用いた指差し天体観測システムの開発”, 情報処理学会第 77 回全国大会, 京都, Vol.1, pp.651-653, 2015 年 3 月
144. 杉本振一郎, 田上大助, 荻野正雄, 武居周, 金山寛, “領域分割法を用いた時間調和渦電流解析の収束性改善(第 2 報)”, 静止器/回転機合同研究会・電磁界数値計算技術とその応用, 宮古島マリンターミナル, 2015 年 3 月 5-6 日
145. 月川久義, 井上雅弘, 金山寛, 田島正喜, “屋上から排出した水素の建物周囲の流れ解析”, 日本機械学会九州支部第 68 期総会・講演会, 福岡大学工学部, 2015 年 3 月 13 日
146. 金山寛, “自動販売機内部の熱対流解析”, 日本機械学会材料力学部門 2014 年度第 2 回「マルチフィジックスの実験／計算技術の高度化に関する研究会」, 東京大学山上会館 001 会議室, 2015 年 3 月 19 日

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

147. Yoshiaki Tamura, Tomoki Matsuo, “Numerical Simulation Method of Compressible Gas-Liquid Two Phase Flow”, PANACM 2015 1st Pan-American Congress on Computational Mechanics, Buenos Aires, Argentina, April 27-29, 2015.
148. *Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi, Shioya Ryuji, Fumihiko Hakuno, Hiroki Nishi, Shinichiro Takahashi, “Study of Effects of Blood Amino Acid and Hormone Level for Controlling Triglyceride Accumulation in the Liver of Rats using Self-Organizing Map”, 1st. Pan-American Congress on Computational Mechanics (PANACM 2015) & XI Argentine Congress on Computational Mechanics (MECOM 2015), Argentina, pp.885-891, April 27-29, 2015.
149. M. Yokoyama, Y. Seta, K. Murotani, G. Yagawa, “3D simulation considering surface condition of wall in particle method”, VI th International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED PROBLEMS 2015), Venice, Italy, May 2015.
150. 横山真男, “黄金比による音律で調弦した音楽”, 情報処理学会研究報告音楽情報科学(MUS), 東京, 2015 年 5 月
151. 富山潤, 浅井光輝, 久保善司, “損傷力学ベースボクセルFEMを用いたアルカリシリカ反応の膨張挙動解析の基礎研究”, 土木学会第 18 回応用力学シンポジウム講演概要集, pp.199-200, 2015 年 5 月
152. 室谷浩平, 越塚誠一, 塩谷隆二, 荻野正雄, 永井英一, 藤澤智光, 安重晃, MPS 法を用いた福島第一原子力発電所 1 号機タービン建屋の津波浸水解析”, 第 20 回計算工学講演会, Vol.20, B-5-4.pdf, pp.1-2, 2015 年 6 月 8 日
153. 和田義孝, 河合浩志, 荻野正雄, 室谷浩平, 塩谷隆二, 高精細可視化ライブラリ LexADV-VSCG へのポリゴン断面可視化の実装“, 第 20 回計算工学講演会, Vol.20, C-6-2.pdf, pp.1-2, 2015 年 6 月 9 日
154. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 山田知典, 吉村忍, 領域分割法における局所 Schur 補元アプローチの性能予測モデルと評価“, 第 20 回計算工学講演会, Vol.20, C-7-1.pdf, pp.1-2, 2015 年 6 月 9 日
155. 淀薫, 塩谷隆二, 荻野正雄, 室谷浩平, 大規模解析のための多階層領域分割法の基本設計と実装“, 第 20 回計算工学講演会, Vol.20, C-7-2.pdf, pp.1-2, 2015 年 6 月 9 日
156. 杉本振一郎, 田上大助, 荻野正雄, 武居周, 金山寛, 階層型領域分割法における時間調和渦電流解析の収束性改善(第 2 報)“, 第 20 回計算工学講演会, つくば国際会議場, 2015 年 6 月 8-10 日
157. Shinsuke NAGAOKA, Yasushi NAKABAYASHI, Yoshiaki TAMURA, Genki YAGAWA, “Efficient Approach for the Fluid-Structure Interaction Problems and the Comparison between Experiment and Computation”, ICCM2015, Auckland, New Zealand, July 14-17, 2015.
158. Hitoshi Matsubara, “Mathematical and numerical modelling for microbial rock weathering”, Proceedings of 13th US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM), San Diego, USA, July 2015.
159. S. Koshiyama, N. Fujimatsu, “Establishment of PSP Technique for Small-Scaled Model using the Supersonic Wind-Tunnel”, International Symposium

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

- on Space Technology and Science, Kobe International Conference Center, July 2015.
160. Kosaburo Hirose, Takaaki Edo and Hitoshi Matsubara, “Crack propagation simulation on mud pastes”, Proceedings of 13th US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM), San Diego, USA, July 2015.
 161. Hiroshi Kanayama, Masao Ogino and Shin-ichiro Sugimoto, “Preconditioners in Domain Decomposition Method for Magnetostatic Problems”, ICCM2015, Pullman Hotel, Auckland, New Zealand, July 14-17, 2015.
 162. Yoshiaki Tamura, “Development of Numerical Methods for Compressible Gas-Liquid Two Phase Flows”, The 13h Asian International Conference on Fluid Machinery 2015 (AICFM13), Tokyo, Japan, August 7-10, 2015.
 163. 藤松信義, “摩擦係数評価のための乱流境界層の普遍関数構築”, 日本実験力学会 2015 年度年次講演会, 新潟大学工学部, 2015 年 8 月
 164. M. Yokoyama, K. Murotani, O. Mochizuki, G. Yagawa, “Numerical and experimental study on splash formation with consideration of the surface condition of solid wall”, IV th Conference on Particle-Based Methods (PARTICLES 2015), Barcelona, Spain, September 2015.
 165. 横山真男, “現代音楽のための黄金比を用いた新音律の提案と評価”, 日本音響学会 2015 年秋季研究発表会, 福島, 2015 年 9 月
 166. 富山潤, 藍檀オメル, 亀川裕也, 山口順圭, 屋我晃, “遅延膨張性細骨材に対するコンクリートプリズムを用いた ASR 加速試験の適応性に関する研究”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-547, pp.25-26, 2015 年 9 月
 167. 風間洋, 富山潤, 下地建, 小簀俊介, “コンクリート表面の含有塩分量 C0 調査方法の提案”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-70, pp.139-140, 2015 年 9 月
 168. 佐川康貴, 山田一夫, 合田寛基, 久保善司, 富山潤, 川端雄一郎, “共通試験結果に基づくコンクリートプリズムを用いた ASR 加速試験方法に関する考察”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-548, pp.1095-1096, 2015 年 9 月
 169. 広瀬孝三郎, 松原仁, “マッドペーストにおける乾燥収縮亀裂のフラクタル次元解析”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 岡山, pp.783, 2015 年 9 月
 170. 崎山将, 広瀬孝三郎, 松原仁, “粘質土壌における亀裂進展シミュレーション”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 岡山, pp.573-574, 2015 年 9 月
 171. 室谷浩平, 越塚誠一, 塩谷隆二, 荻野正雄, 永井英一, 藤澤智光, 安重晃, “MPS 法を用いた福島第一原子力発電所 1 号機タービン建屋内部の津波浸水解析”, 第 28 回計算力学部門講演会, 130.pdf, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日
 172. 淀薫, 塩谷隆二, 荻野正雄, 室谷浩平, “大規模解析のための多階層領域分割法ソルバの開発”, 第 28 回計算力学部門講演会, 154.pdf, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日
 173. 鄭宏杰, 荻野正雄, 塩谷隆二, “京コンピ ュータにおける ADVENTURE_Solid 2.0 の性能評価”, 第 28 回計算力学部門講演会, 231.pdf, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日
 174. 増田正人, 塩谷隆二, 中林靖, 伯野史彦, 西宏起, 田村善昭, 高橋伸一郎, “自己組織化マップを用いたラットの血中アミノ酸量と肝臓脂肪の関係分類”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 321.pdf, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日
 175. 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, 鄭宏杰, 淀薫, “静磁場領域分割インターフェイス

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

- 問題の前処理付き共役勾配法”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日
176. Ryuji Shioya, Masao Ogino, Hiroshi Kawai, “Development of a Numerical Library based on Hierarchical Domain Decomposition and Extreme Large Scale FEM Simulation”, IWACOM-III, p93_OW4-3-2.pdf, Tokyo, Japan, October 12-14, 2015.
177. Hiroshi Kawai, Ryuji Shioya, “Domain specific language for continuum mechanics: translator from LaTeX to C/Fortran”, IWACOM-III, p94_OW4-3-3.pdf, Tokyo, Japan, October 12-14, 2015.
178. *島村雅彦, 江澤良孝, 田村善昭, 清水聖, 佐藤大亮, “ベイズ推定を用いた実験と数値シミュレーション融合による高精度予測”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日
179. 横山真男, 室谷浩平, 矢川元基, “粒子法によるミルククラウンの大規模数値シミュレーション”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 横浜, 2015 年 10 月
180. 瀬田陽平, 横山真男, 牧野光則, 矢川元基, “容器の縁形状を考慮した液だれの数値シミュレーション”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 横浜, 2015 年 10 月
181. 松原仁, “玄武岩質ガラスの微生物風化シミュレーション”, 計算工学会講演会, つくば, Vol.20, 2015
182. *藤岡照高, “構造解析ソルバ検証用参照解の整備(低合金鋼引張試験の Code-Aster による再現)”, オープン CAE シンポジウム 2015, 富山国際会議場, 2015 年 11 月
183. 広瀬孝三郎, 松原仁, “ベントナイトペーストに発生する乾燥収縮亀裂のフラクタル次元解析”, 第 28 回沖縄地盤工学研究発表会, 沖縄, pp.29-30, 2015 年 11 月
184. 江戸孝昭, 松原仁, “格子ボルツマン法を用いた発破騒音場における防音壁の効果に関する数値解析的検討”, 第 28 回沖縄地盤工学研究発表会, 沖縄, pp.1-6, 2015 年 11 月
185. 伯野史彦, 増田正人, 舘野昌洋, 西宏起, 高橋伸一郎, 塩谷隆二, “機械学習による血中アミノ酸濃度から肝臓脂肪蓄積量の予測”, 第 38 回日本分子生物学会年会, 第 88 回日本生化学会大会合同大会(BMN2015), 神戸, 2015 年 12 月 1-4 日
186. Yoshiaki Tamura, “Development of Numerical Simulation Method for Compressible Gas-Liquid Two-Phase Flows”, The 9th International Symposium on Cavitation (CAV2015), Lausanne, Switzerland, December 6-10, 2015.
187. *Toshihiro Ashino, “Data and knowledge structure for materials integration”, Pacifichem 2015, The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, Honolulu, Hawaii, December 2015.
188. MA Hopkins, RJ Griffin, A Leonessa, BY Lattimer, T Furukawa, “Design of a compliant bipedal walking controller for the DARPA Robotics Challenge”, IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots(Humanoids), pp.831-837, 2015.
189. C Knabe, J Seminatore, J Webb, M Hopkins, T Furukawa, “A Leonessa, Design of a series elastic humanoid for the DARPA Robotics Challenge”, IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp.738-743, 2015.
190. K Takami, T Furukawa, M Kumon, LC Mak, “Non-field-of-view indoor sound

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

- source localization based on reflection and diffraction”, IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), pp.59-64, 2015.
191. B Li, T Furukawa, “Photometric stereo under dichromatic reflectance framework dealing with non-Lambertian surfaces”, IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), pp.139-144, 2015.
 192. T Furukawa, L Dantanarayana, J Ziglar, R Ranasinghe, G Dissanayake, “Fast global scan matching for high-speed vehicle navigation”, IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), pp.37-42, 2015.
 193. K Takami, T Furukawa, “High-Resolution Deformation Measurement System for Fast Rotating Tires”, ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp.V008T13A058-V008T13A058, 2015.
 194. T Furukawa, K Takami, X Tong, D Watman, A Hamed, R Ranasinghe, G. Dissanayake, “Map-Based Navigation of an Autonomous Car Using Grid-Based Scan-to-Map Matching”, ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp.V003T01A005-V003T01A005, 2015
 195. B Li, T Furukawa, “Design and Calibration of a 3D High-Resolution Surface Profiling System Using Photometric Stereo”, ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp.V009T07A086-V009T07A086, 2015.
 196. MJ Bender, H McClelland, G Bledt, A Kurdila, T Furukawa, R Mueller, “Trajectory Estimation of Bat Flight Using a Multi-View Camera System”, IN AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, SciTech, pp.5-9, 2015.
 197. K Takami, T Furukawa, “Study of Tire Noise Characteristics with High-Resolution Synchronous Images”, EuroNoise 2015, pp.2113-2118, 2015.
 198. Genki Yagawa, “Reflection on Fukushima Daiichi Nuclear Accident”, ASINCO 2016, Nagasaki, April 12, 2016.
 199. Kanayama, H., Zheng, H., Sugimoto, S., Ogino, M., The BDD-DIAG Preconditioner in Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems (Keynote Lecture), ICCM2016, Berkeley, USA, 1-4 August 2016.
 200. 金山寛, 鄭宏杰, 杉本振一郎, 荻野正雄, “Considerations of Preconditioners for Magnetostatic Domain Decomposition Analysis”, 静止器/回転機合同研究会「電磁界数値計算技術とその応用」, 富士通株式会社本社事務所, 2016 年 1 月 20-21 日.
 201. 横山真男, 室谷浩平, 瀬田陽平, 矢川元基, “粒子法による粒子間インタラクションに着目した大規模数値シミュレーション”, 粒子法コードユーザーグループ第 33 回会合, 本郷, 2016 年 2 月
 202. 齊藤克佳, 瀬田陽平, 横山真男, “HMDとLeapMotionを用いたネットワーク型バーチャルプラネタリウムの開発”, 情報処理学会第 78 回全国大会, 横浜, 2016 年 3 月 10-12 日
 203. *T. Kadohira, T. Ashino, H. Ishiki, S. Minamoto, M. Watanabe, J. Inoue, M.

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

- Enoki and T. Koseki, “Establishment of descriptors-inventory for data-utilization in Materials Science and Engineering with collective intelligence”, ICME 2016, Second International Workshop on Software Solutions for Integrated Computational Materials Engineering, Barcelona, Spain, April 12-15, 2016.
204. 金山寛, 鄭宏杰, 杉本振一郎, 荻野正雄, “静磁場領域分割解析におけるインターフェイス問題”, 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 慶應義塾大学, 2016 年 5 月 18-20 日
205. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 山田知典, 吉村忍, “領域分割法における反復法に基づくローカルソルバーの性能評価”, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日-6 月 2 日
206. 和田義孝, 荻野正雄, 室谷浩平, 河合浩志, 塩谷隆二, “高精細可視化ライブラリ LexADV_VSCG のビューア対応機能の実装”, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日-6 月 2 日
207. 淀薫, 塩谷隆二, 荻野正雄, “大規模解析のための多階層領域分割法によるデータ圧縮効果”, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日-6 月 2 日
208. 鄭宏杰, 塩谷隆二, Mukaddes Abul Mukid Mohammad, 「京」を用いた ADVENTURE_Thermal による大規模熱伝導解析, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日-6 月 2 日.
209. Kawai, H., Ogino, M., Shioya, R., Yamada, T., Yoshimura, S., “Performance tuning of subdomain local FE solver in domain decomposition method”, ECCOMAS2016, Crete Island, Greece, 5-10 June 2016.
210. T. Fujioka, “Analytical Expression of Elastic Follow-up Factors in Fully Plastic Situation for Creep-fatigue Damage Assessment of High Temperature Components”, Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2016-63031, Vancouver, July 17-21, 2016.
211. Kanayama, H., Ogino, M., Sugimoto, S., Zheng, H., Yodo, K., “Application of the BDD-DIAG Preconditioner to Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems”, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24-29 July 2016.
212. Mukaddes, A.M.M., Shioya, R., Kanayama, H., Ogino, M., “Storing Techniques for Sparse Matrices-A Study on Thermal-Convection Problems”, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24-29 July 2016.
213. Kawai, H., Ogino, M., Shioya, R., Yamada, T., Yoshimura, S., “Mixed Precision Implementation of Coarse Inverse Approach in BDD Pre-conditioner”, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24-29 July 2016.
214. Zheng, H., Mukaddes, A.M.M., Shioya, R., Ogino, M., “Performance Evaluation of ADVENTURE_Solid and ADVENTURE_Thermal on the K computer”, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24-29 July 2016.
215. Hongjie ZHENG, Ryuji SHIOYA, Abul Mukid Mohammad MUKADDES, Masao OGINO, “Performance Evaluation of ADVENTURE_Solid and ADVENTURE_Thermal on the K Computer”, The 12th World Congress on Computational Mechanics (WCCM 2016), 152041.pdf, July, 2016.
216. Hiroshi KANAYAMA, Masao OGINO, Shin-ichiro SUGIMOTO, Hongjie ZHENG

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

- and Kaworu YODO, “Application of the BDD-DIAG Preconditioner to Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems”, The 12th World Congress on Computational Mechanics and The 6th Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM XII & APCOM VI), online, 2016/07/24-29, Seoul, Korea.
217. Shinsuke NAGAOKA, Yasushi NAKABAYASHI, Yoshiaki TAMURA and Genki YAGAWA (Toyo University), “Parallelization of Enriched Free Mesh Method for Large Scale Fluid-Structure Interaction Analysis”, WCCM/APCOM 2016, 2016.7.26.
218. *Shinsuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Yoshiaki Tamura, and Genki Yagawa, “Parallelization of Enriched Free Mesh Method for Large Scale Fluid-Structure Interaction Analysis”, WCCM XII & APCOM VI, Seoul, Korea, July 24-29, 2016.
219. *Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi, and Yoshiaki Tamura, “Prediction of Analysis Results with Deep Learning”, WCCM XII & APCOM VI, Seoul, Korea, July 24-29, 2016.
220. Yoshiaki Tamura, “Numerical Simulation Method of Gas-Liquid Two-Phase Flow for a Cavitation Bubble Collapse”, WCCM XII & APCOM VI, Seoul, Korea, July 24-29, 2016.
221. *Masahiko Shimamura, Yoshitaka Ezawa, Yoshiaki Tamura, Satoru Takashimizu, and Daisuke Satou, “High Accurate Analysis by Experiment and Simulation Using Bayesian Inference”, WCCM XII & APCOM VI, Seoul, Korea, July 24-29, 2016.
222. Youhei SETA, Masao YOKOYAMA, Mitsunori MAKINO, Genki YAGAWA, “Application of Particle Method to Liquid Dripping”, WCCM XII & APCOM VI, Seoul, Korea, July 24-29, 2016.
223. Mukaddes, A.M.M., Shioya, R., Ogino, M., “Finite Element Approach with Unsteady Bioheat Equation for Human Skin Injury”, ICCM2016, Berkeley, USA, 1-4 August 2016.
224. Hongjie ZHENG, Ryuji SHIOYA, “Large-Scale Fluid-Structure Analysis for Tsunami Inundation into the Interior of a Building using MPS-FEM Coupling Method”, International Conference on Computational Methods (ICCM 2016), 1585, August, 2016.
225. Kawai, H., Ogino, M., Shioya, R., Yamada, T., Yoshimura, S., “Subdomain local FE solver implementation using iterative solver in domain decomposition method”, ICTAM2016, Montreal, Canada, 21-26 August, 2016.
226. K. Tazoe, M. Oka and G. Yagawa, “LOADING FREQUENCIES EFFECTS ON THE OXIDE-INDUCED CRACK CLOSURE IN EXTREMELY LOW STRESS INTENSITY FACTOR RANGE”, 5th International Conference on Fracture Fatigue and Wear FFW 2016, Kitakyushu, Japan, 24 August 2016.
227. 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, 淀薫, 鄭宏杰, 静磁場の領域分割解析におけるコース問題の解法について, 静止器/回転機合同研究会, 石垣市商工会館, 2016 年 9 月 8-9 日
228. *Toshihiro Ashino, “Reusable Equation Library for Materials Informatics and

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

- Integration based on Materials Ontology”, SciDataCon 2016, Denver, US, September 11-13, 2016.
229. 横山真男, 栗原義己, “バイオリンの音色に関する印象語と音響特徴の相関分析の試み”, 日本音響学会 2016 年秋季研究発表会, 横浜, 2016 年 9 月 14-16 日
230. *島村雅彦, 江澤良孝, 田村善昭, 清水聖, 佐藤大亮, “ベイズ推定を用いた実験とシミュレーションによる高精度解析”, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016 年 9 月 22-24 日
231. 増田正人, 中林靖, 田村善昭, “深層学習を用いた連成解析結果予測”, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016 年 9 月 22-24 日
232. *長岡慎介, 中林靖, 田村善昭, 矢川元基, “高精度フリーメッシュ法の並列解析手法について”, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016 年 9 月 22-24 日
233. 瀬田陽平, 横山真男, 牧野光則, 矢川元基, “界面張力を考慮した粒子法による容器口から流れる液垂れの数値シミュレーション”, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016 年 9 月 22-24 日
234. 小林陽介, 村上恭子, 稲葉正和, 矢川元基, “フリーメッシュ法を用いた計測データからの高精度 3D モデリングアプリケーション”, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016 年 9 月 22-24 日
235. 金山寛, 淀薫, 鄭宏杰, 杉本振一郎, 荻野正雄, “部分領域を直接法で解く場合のインターフェイス問題の反復法について”, 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22-24 日
236. 鄭宏杰, 塩谷隆二, “スーパーコンピュータ京を用いた 3 次元大規模並列 MPS-FEM 流体構造連成解析”, 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22-24 日.
237. 和田義孝, 荻野正雄, 室谷浩平, 河合浩志, 塩谷隆二, “高精細可視化ライブラリ LexADV_VSCG のインタラクティブ可視化ビューア対応”, 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22-24 日
238. 横山真男, 瀬田陽平, 矢川元基, “容器口の形状に着目した液だれ防止方法の提案”, 日本流体力学会年会 2016, 名古屋, 2016 年 9 月 26-29 日
239. H. Hirayama, Y. Satoh, K. Takahashi and M. Yokoyama, “Multimedia Improvisation for brain waves, cello and live electronics”, iCLA Music and the Brain Symposium 2016, Yamanashi, Japan, October 2016.
240. 田添広喜, 岡正徳, 矢川元基, “酸化物誘起き裂閉口が無視できる場合の疲労き裂進展下限界特性の板厚依存性”, 日本機械学会材料力学カンファランス, 神戸, 2016 年 10 月 8 日
241. 松井陽平, 岡田満利, 高橋俊彦, 藤岡照高, “実機ガスタービン動翼から採取した試験片を用いたクリープ寿命評価手法”, 第 44 回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, 酒田, 2016 年 10 月 26-27 日
242. H.Kanayama, “Balancing domain decomposition (BDD) related preconditioners in engineering including magnetostatic problems”, CoMFoS16:Mathematical Analysis of Continuum Mechanics and Industrial Applications II, Kyushu University, October 22-24, 2016.
243. *Toshihiro Ashino, “Materials Information Integration Based on Ontology (Keynote)”, AMDS 2016 (The 5th Asian Materials Database Symposium), Hanoi, Vietnam, October 30-November 2, 2016.

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

244. 篠崎雅和, 瀬田陽平, 横山真男, “教育支援を目的としたネットワーク型バーチャルプラネタリウムの開発”, NICOGRAPH 2016, 富山, 2016 年 11 月 4-6 日
245. Hongjie Zheng, Masao Ogino, Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, Ryuji Shioya, “Large-scale Tsunami Run-up and Inundation Simulation Using an Explicit Moving Particle Simulation Solver Framework”, Women in HPC workshop at SC16, Salt Lake City, Nov. 13, 2016.
246. *市島泰人, 新藤康弘, 藤岡照高, “有限要素法による大腿頸骨角を考慮した簡易膝関節モデルの接触解析”, 日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会 2016, 埼玉, 2016 年 11 月 19 日
247. Hongjie ZHENG, Ryuji SHIOYA, “Large-scale analysis of ADVENTURE system on the K computer”, オープン CAE シンポジウム 2016@東京, 2016 年 11 月 24-26 日.
248. *市島泰人, 新藤康弘, 藤岡照高, “オープンソース CAE ソフト Salome-Meca を用いた膝関節半月板内における応力分布の数値的検討”, オープン CAE シンポジウム 2016, 東京, 2016 年 11 月 24-26 日
249. *三浦純哉, 藤岡照高, “Salome-Meca を用いた熱疲労試験の再現解析”, オープン CAE シンポジウム 2016, 東京, 2016 年 11 月 24-26 日
250. Masao YOKOYAMA, Yoshiki Awahara, Genki YAGAWA, “Relation between violin timbre and harmony overtone”, ASA-ASJ Joint Meeting 2016, Honolulu, USA, November 28-December 2, 2016.
251. 増田正人, 中林靖, 田村善昭, “深層学習を用いた流体解析結果予測”, 第 30 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2016 年 12 月 12-14 日

<研究成果の公開状況> (上記以外)

シンポジウム・学会等の実施状況、インターネットでの公開状況等

<既に実施しているもの>

*センターホームページの公開

「<http://www.toyo.ac.jp/site/ccmr/>」にて、研究センターのホームページを公開している。研究者向けのコンテンツとして研究内容、研究成果、年次報告書を公開している。また、一般向けコンテンツとして教育活動、産学連携活動、国際活動を公開している。さらに計算力学に馴染みの薄い方にも興味を持っていただけるコンテンツとして「ギャラリー」を公開している。この点が、本センターのホームページの特色である。「ギャラリー」では、「衝突と亀裂シミュレーション」や「津波のシミュレーション」の結果、ハイスピードカメラを用いて撮影した「軟式テニスボールの変形の瞬間の様子」などの画像を公開している。

これらの作品は、本センターの研究成果を基に作成されたものである。「ギャラリー」によって計算力学の可能性や面白さを伝えていくことを主な目的としている。現在、19点の作品を公開している。

*計算力学フォーラム

- ・ 第15回計算力学フォーラム, サンパウロ(ブラジル), 平成24年7月8日～13日, 国際会議 WCCM2012の中で行った。
- ・ 第16回計算力学フォーラム, 神戸, 平成24年10月6日～9日, 神戸ポートアイランド南地区において開催された日本機械学会第25回計算力学講演会の中で行った。
- ・ 第17回計算力学フォーラム, ゴールドコースト(オーストラリア), 平成24年11月25日～28

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

日、国際会議ICCM2012の中で行った。

- ・ 第18回計算力学フォーラム, 佐賀, 平成25年11月2日～4日, 佐賀大学において開催された日本機械学会第26回計算力学講演会の中で行った。
- ・ 第19回計算力学フォーラム, 仙台, 平成26年4月21～23日, 仙台国際センターにおいて開催されたCOMPSAFE2014の中で行った。
- ・ 第20回計算力学フォーラム, ケンブリッジ(イギリス), 平成26年7月28日～30日, 国際会議ICCM2014の中で行った。
- ・ 第21回計算力学フォーラム, 岩手, 平成26年11月22日～24日, 岩手大学において開催された日本機械学会第27回計算力学講演会の中で行った。
- ・ 第22回計算力学フォーラム, ブエノスアイレス(アルゼンチン), 平成27年4月27日～29日, 国際会議PANACM2015の中で行った。
- ・ 第23回計算力学フォーラム, オークランド(ニュージーランド), 平成27年7月14日～17日, 国際会議ICCM2015の中で行った。
- ・ 第24回計算力学フォーラム, 横浜, 平成27年10月10日～12日, 横浜国立大学において開催された日本機械学会第28回計算力学講演会の中で行った。
- ・ 第25回計算力学フォーラム, ソウル(韓国), 平成28年7月26日～29日, 国際会議WCCM2016の中で行った。
- ・ 第26回計算力学フォーラム, バークレー(アメリカ), 平成27年8月1日～4日, 国際会議ICCM2016の中で行った。
- ・ 第27回計算力学フォーラム, 名古屋, 平成27年9月22日～24日, 名古屋大学において開催された日本機械学会第29回計算力学講演会の中で行った。

*CCMR-HDDMPPS合同シンポジウム

- ・ 第8回CCMR-HDDMPPS(CRESTプロジェクト)合同シンポジウム, 白山キャンパス, 平成25年3月28日。
- ・ 第9回CCMR-HDDMPPS(CRESTプロジェクト)合同シンポジウム, 白山キャンパス, 平成26年3月10日。
- ・ 第10回CCMR-HDDMPPS(CRESTプロジェクト)合同シンポジウム, 白山キャンパス, 平成27年3月10日。
- ・ 第11回CCMR-HDDMPPS(CRESTプロジェクト)合同シンポジウム, 白山キャンパス, 平成28年3月8日。
- ・ 第12回CCMR-HDDMPPS(CRESTプロジェクト)合同シンポジウム, 白山キャンパス, 平成29年1月21日。

*学生ワークショップ

- ・ 東洋大学—龍華科技大學合同学生ワークショップ, 龍華科技大學(台湾), 平成25年2月25日。
- ・ 龍華科技大學—成均館大学—東洋大学若手ワークショップ, 東洋大学白山キャンパス, 平成25年9月6日。
- ・ 第1回日韓中台学生ワークショップ Mechanical Engineering Seminar (MES) 2015, 諏訪東京理科大学, 平成27年3月25日～26日。
- ・ カーディフ大学—東洋大学合同学生ワークショップ, カーディフ, 平成28年2月22,23日。
- ・ 龍華科技大學—東京理科大学—近畿大学—東洋大学合同学生ワークショップ, 台湾, 平成28年12月1-3日。

*その他

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

- ・ 第10回機械工学国際会議, ダッカ(バングラディッシュ), 平成26年6月19日～21日, keynote speakerなどで講演を行った。
- ・ 5th International Industrial Supercomputing Workshop(IISW2014), 東洋大学白山キャンパス, 平成26年10月2日～3日。
- ・ 東京都北区主催「ものづくり夜間大学校」, 東洋大学白山キャンパス, 平成26年10月23日, 30日。
- ・ 台湾・龍華科技大學川越キャンパス見学会, 東洋大学川越キャンパス, 平成27年6月23日, 川越キャンパスの案内及び本センターの紹介を行った。
- ・ 東洋大学産学協同教育センター中核人材育成講座「スマホアプリ開発入門講座」, 東洋大学川越キャンパス, 平成27年11月7日, 14日。

＜これから実施する予定のもの＞
なし。

14 その他の研究成果等

本センターでは、産学連携研究や他の研究機関との共同研究を積極的に推し進め、多くの成果が得られた。その研究成果を、以下にまとめる。

(a) JST CRESTプロジェクトとの連携

ポストペタコンなど次々世代の並列計算機アーキテクチャにおいて、大規模な数値計算データ処理を必要とする実アプリケーション分野が高い演算効率を得るためには、マイクロプロセッサやメモリの階層構造を考慮したプログラミングモデルが必要である。ポストペタコンの利用が想定される大規模シミュレーションでは、全ての処理がポストペタコン上で行われ、モジュール間のデータ受け渡しを最小限にするようなプログラミングモデル、並びにそれに基づく大規模数値計算データ処理システムの基盤技術が不可欠と言える。そこでCRESTプロジェクトでは、ポストペタコン上における大規模数値計算データ処理システムに関する基盤技術として、数値解析手法向けに研究開発してきた階層型領域分割法の技術を応用した、階層型領域分割法による大規模数値計算データ処理システムの研究開発を目指す。当センターは、研究項目「階層分割型数値計算ライブラリの基礎研究並びに設計とその応用」において共同研究を実施した。

(b) バージニア工科大学との連携

2012年8月にバージニア工科大学が中心となり、米国政府National Science Foundation (NSF)を支援母体とし、タイヤ研究センター(CenTiRe <<http://www.centire.org/>>)が設立され、産官学によるタイヤ・車両業界全体の技術の底上げを目的とした研究・開発・教育・交流など様々な活動を行っている。研究対象は、タイヤ材料、ゴム材料、タイヤモデリング、製造手法、並列コンピューティングとダイナミックシミュレーションなど、多岐にわたっている。日本からはタイヤメーカー4社、自動車メーカー2社の計6社が参加しており、国内活動の拠点を目的とし、2013年度より東洋大学計算力学研究センターが拠点大学として参加し、CenTiReの国際センターとしての活動を進めた。

(c) 株式会社 日立製作所 機械研究所との連携

(株)日立製作所機械研究所とは、(1)メッシュ生成技術、(2)構造健全性設計技術に関して連携を行っている。近年、産業界では解析主導設計による製品開発のスピードアップと設計上流段階での品質作り込みが最重要課題として進められている。そのためのCAEシステム

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

技術の開発をこれまで行い、実用性の検証を実施した。そこで、本年度は、テーマ(2)に関する、き裂進展解析を用いたCuコアはんだボールの接続信頼性評価メッシュ生成技術を中心に研究を行った。

(d) 独立行政法人 原子力安全基盤機構との連携

当センターで開発を行っているフリーメッシュ法(以下FMM)と仮想き裂閉口積分法(以下VCCM)を融合した構造健全性評価システムFMM-VCCMの信頼性の検証と実務への応用を目的として、独立行政法人原子力安全基盤機構(以下JNES)への技術支援を行った。また、JNES、株式会社テクノスター、プロメテック・ソフトウェア株式会社と連携し世界最先端レベルの破壊力学ソフトウェアの構築も行った。

(e) 東京理科大学との連携

東京理科大学と共同で配管内の腐食同定問題について研究した。東京理科大学ではおもに実験を、本センターではシミュレーション方法について研究を行った。逆問題の観測方程式のモデル化について検討することを目標とした。中性環境における金属部材の腐食は、溶存酸素によるカソード反応が支配的であるので、溶存酸素の金属部材表面への拡散速度が、カソード反応の律速反応になっていると考えられる。そこで、金属部材近傍の流体の速度勾配および溶存酸素の濃度分布に着目して、流れのある配管内の腐食を精度良くシミュレーションできるか考察を行った。更に、これらの解析をアダプティブに行うために、階層メッシュを用いた手法も開発した。

(f) 本田技術研究所との連携

本田技術研究所から、「ヘッドライト損傷解析手法の確立」と「永久変形量予測技術の開発」を依頼された。従来は、衝突解析ソルバーRADIOSSを用いることによって、これらの解析していた。しかし、より詳細で正確な解析を求めたいという要望からRADIOSSにプリポスト処理を加えることによって、これらの問題を解決する。「ヘッドライト損傷解析手法の確立」に対しては、アダプティブな亀裂進展解析の機能を、「永久変形量予測技術の開発」に対しては、アダプティブな永久解析の機能を加えることになる。これらの機能を加えることによって、超大型の並列計算機や専用のソルバーで長時間かかった解析を、これまでと同じ計算機環境で一晩あれば解析できるようになる。

(g) インテグラル・テクノロジー株式会社との連携

本連携は、「オーサリング機能をもつCAEソフトウェアの販売・カスタマイズ事業」という題目で、経済産業省近畿経済産業局の新連携支援事業の審査を受け通過した事業である。連携の仕組みは、インテグラル・テクノロジー株式会社をコア企業、エンジニアス・ジャパン株式会社を連携企業、東洋大学計算力学センターとアルテアエンジニアリング株式会社を外部支援団体としている。当センターは、有限要素法の計算精度を保持したままメッシュの数を減らす技術を提供する形で協力した。

15 「選定時」及び「中間評価時」に付された留意事項及び対応

法人番号	131070
プロジェクト番号	S1201035

＜「選定時」に付された留意事項＞

なし

＜「選定時」に付された留意事項への対応＞

なし

＜「中間評価時」に付された留意事項＞

成果発表を活発にすること、グループごとの成果は出ているので、グループ間の連携および外部との連携を考慮することが指摘された。

＜「中間評価時」に付された留意事項への対応＞

成果発表に関しては、13にあるように、57 件の投稿論文、251 件の学会発表、18 件のオーガナイズドセッション／フォーラム／シンポジウムその他、全体をまとめた英文書籍を発刊予定である。また、グループ間の連携にも留意して、当初の3つの目的に沿って研究を進めた他、今後の展望も見据え、中間評価後に、新たにドイツのゲーテ大学フランクフルト校や東京大学農学部などと共同研究を始めている。

2. 若手研究者の育成状況

東洋大学計算力学研究センターでは、従前よりプロジェクト研究の推進と共に、学生や若手研究者の育成にも努めてきている。

- ・ 博士研究員

下記は、研究助手および研究支援者として本プロジェクトに参加した者である。

- ・ 小林陽介 博士（工学）（東洋大学） 2012 年度
- ・ 谷村景貴 博士（理学）（首都大学東京） 2015, 2016 年度
- ・ 長岡慎介 博士（工学）（東洋大学） 2012～2016 年度
- ・ 増田正人 博士（工学）（東洋大学） 2012～2016 年度

- ・ 学生

5 年間のプロジェクトで、アルバイトおよび RA（Research Assistant）として活動した者は以下の通りである。

学部生：7 名

研究生：1 名

博士前期課程：8 名

博士後期課程：4 名

- ・ 学位取得者

増田正人，半径並列モジュラーネットワーク型自己組織化マップに関する研究，東洋大学大学院工学研究科博士論文，2012 年 9 月．

崎原康平，付帯条件付き多次元型移動最小自乗法の固体問題への適用性に関する研究，東洋大学大学院工学研究科博士論文，2013 年 3 月．

鶴見伸夫，気液二流体中を伝播する集束超音波の数値解析，東洋大学大学院工学研究科博士論文，2013 年 3 月．

- ・ 国際学生ワークショップ

都合 5 回開催した。次頁以降にそのプログラムを示す。

Lunghwa University – Toyo University Joint Student Workshop on Computational Mechanics

Date February 25, 2013
Venue Lunghwa University of Science and Technology, Taiwan

Program

9:30 - 9:40	Opening Address	Prof. Kuen Ting, Lunghwa University, Taiwan
9:40-12:00	Session 1 (20min x 7)	
12:00-13:30	Lunch Break	
13:30-16:10	Session 2 (20min x 8)	
16:10-16:20	Closing Remarks	Prof. Genki Yagawa, Toyo University, Japan

Session 1

“Numerical Simulations of Focused Ultrasound in Water with Micro Bubbles”

Nobuo Tsurumi, Graduate Student, Toyo University

“Development of the efficient analysis and optimization technology for pressure vessels”

Siyang Li, Graduate Student, Toyo University

“Structural optimum design of fractal structures”

Masahiko Shimamura, Graduate Student, Toyo University

“Numerical Simulation of a Single Bubble Collapse”

Tomoki Matsuo, Graduate Student, Toyo University

“The measurements of nanomechanical properties with temperature dependence by nanoindentation and atomic force microscopy”

C. S. Wu, Graduate Student, Lunghwa University

“The statistical analysis of hand vascular blood perfusion due to electromagnetic interference using Doppler's flow image instrument”

J. C. Yeh, Graduate Student, Lunghwa University

“The coupled thermal-mechanical analysis of contact problems in nanoindentation”

C.H. Huang, PH.D. student of National Chung Hsing University

Session 2

“Parallel EFMM for Fluid-Structure Coupled Problem”

Shinsuke Nagaoka, Postdoctoral Researcher, Toyo University

“Fluid Analysis of Moving Boundary using ALE Method”

Masato Masuda, Postdoctoral Researcher, Toyo University

“Development of Structural Eigenvalue Analysis Module for the ADVENTURE System”

Itaru Ishikawa, Postdoctoral Researcher, Toyo University

“Automated 3D Crack Propagation Analysis”

Yosuke Kobayashi, Postdoctoral Researcher, Toyo University

“Large Scale Heat Conduction Analysis using Efficient Domain Decomposition Approach”

Abul Mukid Mohammad Mukaddes, Postdoctoral Researcher, Toyo University

“The bioheat transfer analysis of laser surgery”

Y.L. Su, PH.D. student of National Chung Hsing University

“The structural integrity of tube support plate with thousands of holes in steam generator”

S.R. Lin, PH.D. student of National Taiwan University

“The electromagnetic and fluid analysis in MOCVD plasma simulation”

C.S. Chang, Post Doctor Researcher, National Central University

The 1st LHU-SKKU-TU Joint Student Workshop on Nano and Computational Mechanics

organized by

Nanomechanics Laboratory, Lunghwa University of Science and Technology, Taiwan

Mechanical Engineering, Sungkyun Kwan University, Korea

Center for Computational Mechanics Research, Toyo University, Japan

Date Friday, September 6th, 2013

Venue "Skyhall", The 16th floor of Building 2, Hakusan-Campus, Toyo University

Address 5-28-20 Hakusan, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8606, Japan

Program

10:00-10:10	Opening Address	Prof. Genki Yagawa, Toyo University, Japan
10:10-12:10	Session 1	(40min x 3)
12:10-13:30	Lunch Break	
13:30-15:30	Session 2	(15min x 8)
15:45-17:30	Session 3	(15min x 7)
17:30-17:40	Closing Remarks	TBD
18:00-20:00	Reception	

Session 1 (10:10-12:10)

"Eco-system design to create a new market for Neo-Smart-Human"

Prof. Jae Boong Choi, Sungkyunkwan University, Korea

"Nano & Bio Applications of a Mass-weighted Chemical Elastic Network Model"

Prof. Moon Ki Kim, Sungkyunkwan University, Korea

"Introduction of CCMR and Some Research Topics"

Prof. Yoshiaki Tamura, Toyo University, Japan

Session 2 (13:30-15:30)

“Estimation of C*-Integral for Slanted Circumferential Through-wall Cracked Pipes using 3D FE Analyses”

Min Koo Won, Graduate Student, Sungkyunkwan University, Korea

“Development of Skin Moisture Meter with Earphone Communication”

Kyoung Pyo Hong, Graduate Student, Sungkyunkwan University, Korea

“Estimation of Thermal Fatigue Life with FEM Considering the Bond Strength and Experiment Conditions”

Jang Gyun Lim, Graduate Student, Sungkyunkwan University, Korea

“Understanding of G Protein Signal Mechanism Based on Its Conformational Change”

Young Jin Kim, Graduate Student, Sungkyunkwan University, Korea

“Parallelization of Developing Structural Eigenvalue Analysis Module of the ADVENTURE System”

Itaru Ishikawa, Postdoctoral Fellow, Toyo University, Japan

“Evaluation of Effectiveness and Efficiency of Parallel EFMM”

Shinsuke Nagaoka, Postdoctoral Fellow, Toyo University, Japan

“Classification of Vibration Phenomena using Self-Organizing Map”

Masato Masuda, Postdoctoral Fellow, Toyo University, Japan

“Stochastic Global Optimization”

Satoru Takashimizu, Graduate Student, Toyo University, Japan

Session 3 (15:45-17:30)

“Combining Finite Element Method and Nanoindentation Measurement to Indentify the Elastoelastic Behavior of Metal Thin Film”

Chin Hsing Wu, Graduate Student, National Taiwan University of Science and Technology, Taiwan

“To Optimize the Laser Surgery Process using Mathematical Response Surface Method”

Yun Liang Su, PhD. Candidate, National Chungshing University, Taiwan

“Studies on the Nanomechanical Properties of Human Hair by Nanoindentation”

Hsiu Ming Chang, Undergraduate Student, Lunghwa University, Taiwan

“Studies on the Nanomechanical Properties of Biotissue by Nanoindentation”

Chin Chien Hung, Undergraduate Student, Lunghwa University, Taiwan

“Structural Optimum Design of Fractal Structures”

Masahiko Shimamura, Graduate Student, Toyo University, Japan

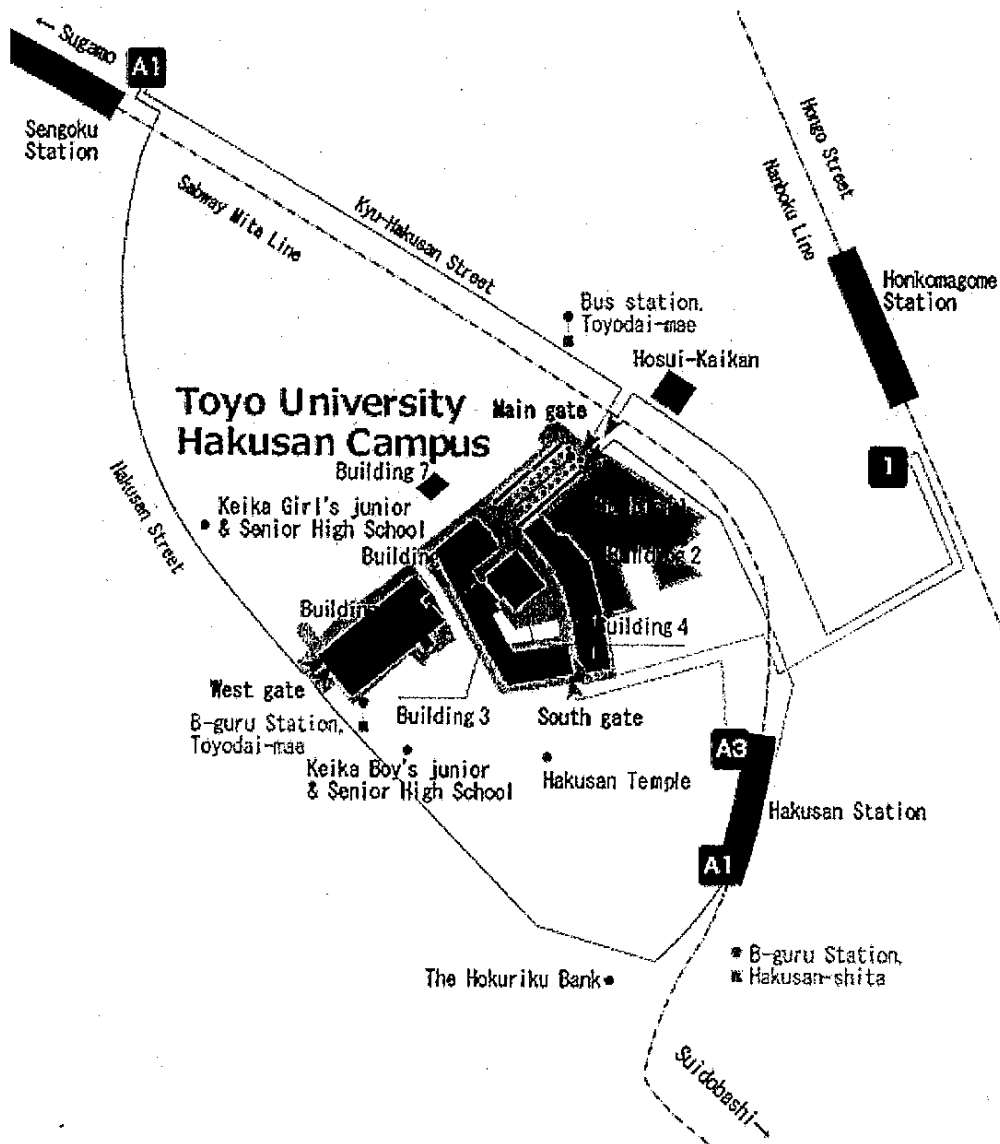
“Numerical Simulation of a Single Cavitation Bubble Collapse”

Tomoki Matsuo, Graduate Student, Toyo University, Japan

“Towards the Optimization of Vertical Axis Wind Turbine”

Satoshi Nagao, Graduate Student, Toyo University, Japan

Hakusan Campus, Toyo Universiy



Address : 5-28-20 Hakusan, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8606

Public Transportation

- Metropolitan Mita Line - 5 minutes from “Hakusan Station”, or 8 minutes from “Sengoku Station”
- Tokyo Metro Namboku Line - 5 minutes from “Hon Komagome Station”

October 9th 2014

Mechanical Engineering Seminar 2015

(MES2015)

March 24th – 27th, 2015

Tokyo University of Science, Suwa, Japan

Dear colleagues

After the success of the 2nd Student Seminar on Mechanical Engineering (SSME2013) held at Howard Beach Resort, Kenting, Taiwan in 2013, we are pleased to announce that Mechanical Engineering Seminar 2015 (MES2015) will be held at Tokyo University of Science, Suwa, Japan during March 24th – 27th, 2015. Suwa is a nice place for enjoying beautiful nature and classical Japanese traditions.

The purpose of the seminar is to share those of our research experiences and knowledge in regard to the new development and application of applied mechanics and mechanical engineering technologies. In addition, it is important to enhance friendship among students in Asian areas.

We would like to ask you and your students to present their recent research progresses and results in the seminar. If you have any questions, please feel free to contact us anytime.

We are looking forward to seeing you in Suwa, and enjoying beautiful nature of Suwa area with you.

With best regards,

Akiyuki Takahashi

Department of Mechanical Engineering,

Faculty of Science and Technology,

Tokyo University of Science

e-mail: takahash@rs.noda.tus.ac.jp

Mechanical Engineering Seminar (MES) 2015 Program

Seminar Location

Location: Building #6, 2nd floor, Lecture Hall, Tokyo University of Science Suwa
<http://www.suwa.tus.ac.jp/about/campusguide/>

Opening Ceremony

March 25th Wednesday

09:00 – 09:20 Opening Ceremony

Oral Presentations:

March 25th Wednesday

Session 1 (4) Chairperson: **Mamtimin Geni** (Xinjiang University, China)

Time	Presentation
09:20 – 09:40	Investigation on Fatigue Crack Propagation Behaviour in Plate with Multiple Discontinuities using XFEM <i>Yixiu Shu, Yazhi Li</i>
09:40 – 10:00	Development of Elastic Crack Opening Displacement Solutions for Circumferential Through-wall Cracks in Thin Elbows <i>Min-Kyu Kim, Han-Bum Surh, Min-Gu Won, Moon Ki Kim, Nam-Su Huh, Jae-Boong Choi</i>
10:00 – 10:20	Dislocation Dynamics Study on Influence of Elastic Anisotropy in Polycrystal Plastic Deformation <i>Yuya Suzuki, Akiyuki Takahashi</i>
10:20 – 10:40	(TBD) <i>Yong-Teng Zheng, Kuen Ting</i>

10:40 – 11:00 Coffee break

Session 2 (3) Chairperson: **Yoshiaki Tamura** (Toyo University, Japan)

Time	Presentation
11:00 – 11:20	Large Scale Fluid Structure Interaction Simulation with Smoothed Particle Hydrodynamics on Multi-core and -GPU Systems <i>Zhe Ji, Fei Xu, Akiyuki Takahashi</i>
11:20 – 11:40	Large-scaled Simulation on the Mixing Mechanism of Film Cooling based on Hybrid Thermal Lattice Boltzmann Method <i>Shangguan Yanqin</i>
11:40 – 12:00	Simulation of Droplet Impacting onto Elastic Solid with the SPH Method <i>Yinan Bie, Xiao-Jing Ma, Mamtimin Geni</i>

12:00 – 13:00 Lunch

Session 3 (5) Chairperson: **Moon Ki Kim** (Sungkyunkwan University, Korea)

Time	Presentation
13:00 – 13:20	Experimental Observation of the Skeletal Adaptive Repair Mechanism and Bionic Topology Optimization Method by using Cross-Type Reaction-Diffusion <i>Kaysar Rahman, Mamtimin Geni</i>
13:20 – 13:40	Molecular Dynamics Modeling of Mixed Dislocations in BCC Metals <i>Kazuki Takahashi, Akiyuki Takahashi, Akiyoshi Nomoto</i>
13:40 – 14:00	Study on Band Structures of Layered Phononic Crystals with Flexoelectricity <i>Wenjun Yang</i>
14:00 – 14:20	(TBD) <i>Li-Hsuan Kung, Kuen Ting</i>
14:20 – 14:40	The Influence of Oxidation Parameters on Stress Development at the Phase Transformation Zone in Thermal Barrier Coatings <i>CHAI Yi-jun, LIN Chen, LI Yue-ming</i>

14:40 – 15:00 Coffee break

Session 4 (4) Chairperson: **Kuen Ting** (Lunghwa University of Science and Technology, Taiwan)

Time	Presentation
15:00 – 15:20	In-situ Observation of Fracture and Failure Behavior in Thermal Barrier Coatings under Three-point Bending <i>Peng Jiang, Xueling Fan, Dingjun Li, Tiejun Wang, Yacong Wu</i>
15:20 – 15:40	Analytical Study on Small Punch Creep Test for Creep Life Prediction <i>Taeksang Lee, Jae Boong Choi, Moon Ki Kim</i>
15:40 – 16:00	Compressive Response of Short Nomex Honeycomb <i>Wei Feng, Fei Xu, Xiangyang Gao</i>
16:00 – 16:20	Study of Pressure Characteristics of Sealing Pair Oil-Film for Bellows Mechanical Seal <i>Ning Li, Mutellip Ahmat, Guangpeng Wang</i>

March 26th Thursday

Session 5 (4) Chairperson: **Shenping Shen** (Xi'an Jiaotong University, China)

Time	Presentation
09:00 – 09:20	Material Strength Changes due to Spinodal Decomposition in Fe-Cr Ferritic Steels <i>Takuya Suzuki, Akiyuki Takahashi, Akiyoshi Nomoto</i>
09:20 – 09:40	Normal Mode Guided Elastic Network Interpolation (NGENI) for Prediction of Conformational Pathway in Proteins <i>Byungho Lee, Jae Boong Choi, Moon Ki Kim</i>
09:40 – 10:00	(TBD) <i>Yun-Liaug Su, Kuen Ting</i>
10:00 – 10:20	Theoretical Prediction of Failure Envelopes for Composite Laminates including Nonlinear and In-situ Effect <i>Biao Li, Yazhi Li</i>

10:20 – 10:40 Coffee break

Session 6 (4) Chairperson: **Fei Xu** (Northwestern Polytechnical University, China)

Time	Presentation
10:40 – 11:00	Development of Efficient and Accurate Analysis Method for Cardboards <i>Masahiko Shimamura, Yoshitaka Ezawa</i>
11:00 – 11:20	Numerical Modeling and Simulation of Wind Blown Sand Morphology under Complex Wind-Flow Field <i>Mawsude Muhtar, Mardan Wali, Xamxinur Abdikerem, LeiWang, Afang Jin, Muhtar Sadir and Mamtimin Geni</i>
11:20 – 11:40	Development of Improved Integrity Assessment Standard Containing Axial and Circumferential Multiple Through-wall Cracks <i>Jin Won Hong, Jae Boong Choi, Moon Ki Kim</i>
11:40 – 12:00	(TBD) <i>Chin-Hsing Wu, Kuen Ting</i>

Poster Presentations:

3-minute presentation at Lunch time on March 25th.

Poster presentation during coffee break and lunch time

Order	Presentation
1	Flexoelectric Effects in Three-dimensional Eshelby's Nano-inclusion Problem <i>Shasha Yang, Shengping Shen</i>
2	SPH Numerical Simulation of Impact and Take-off of Sand Particles in Flat Bed <i>Jin A Fang, Mamtimin Geni</i>
3	Research on Mechanical Characteristics of the Oblique Arch Roof in Turpan Traditional Houses <i>Abulikemu Touheti, Sawulet Bekey, Mutailipu Ruzeaiti, Aierken Haimudula</i>
4	Stress analysis multibody contact problem based on SPH Method <i>Muhtar Kerim, Rahmatjan Imin, Azhar Halik, Mamtimin Geni</i>
5	Numerical Simulations and Dynamic Contact Behavior Analysis of Ball Bearing Lubrication System by Adopting FEM and SPH Coupling Method <i>Yue WU, Mamtimin Geni</i>

Cardiff University - Toyo University Joint Student Workshop

Data: Monday 22 and Tuesday 23, February 2016

Venue: Queen's Buildings, Cardiff University (room to be determined)

Program

Session 1 (Monday 22, 10:00-12:00)

Opening Address	Prof. Yasushi Nakabayashi	Toyo University
Special Lecture	Prof. Yoshiaki Tamura	Toyo University
Student Speaker 1	Atheel Jameel	Cardiff University
Student Speaker 2	Hongjie Zheng	Toyo University
Student Speaker 3	A. Mohanmad	Cardiff University
Student Speaker 4	Masahiko Shimamura	Toyo University

Session 1 (Monday 22, 14:00-16:00)

Special Lecture	Prof. Feng Xiao	Tokyo Institute of Technology
Student Speaker 5	Satoshi Koshiyama	Toyo University
Student Speaker 6	Syazana Omar	Cardiff University
Student Speaker 7	Shuhei Watanabe	Toyo University
Student Speaker 8	Li Qijie	Cardiff University

Session 3 (Tuesday 23, 10:00-12:00)

Special Lecture	Prof. Kensuke Yokoi	Cardiff University
Student Speaker 9	A. Noguchi and T. Mori	Toyo University
Student Speaker 10	Alex	Cardiff University
Student Speaker 11	T. Matsuzawa and M. Ota	Toyo University
Student Speaker 12	Deng	Tokyo Institute of Technology
Closing Remarks	Prof. Ryuji Shioya	Toyo University

4 Universities Joint Student Workshop

Lunghwa University of Science and Technology
Tokyo University of Science
Kindai University
Toyo University

Data: Thursday 1st, Friday 2nd and Saturday 3rd, December 2016

Venue: Lunghwa University of Science and Technology (room to be determined)

Program

Session 1 (Thursday 1st, 10:00-12:00)

Opening Address	Prof. Kuen Ting	Lunghwa University
Special Lecture	Prof. Masanori Kikuchi	Tokyo University of Science
Student Speaker 1	Keishi Kumamoto	Kindai University
Student Speaker 2	Yun-Liaug Su	Lunghwa University

Session 2 (Thursday 1st, 14:00-16:00)

Special Lecture	Prof. Yasushi Nakabayashi	Toyo University
Student Speaker 3	Shuhei Watanabe	Toyo University
Student Speaker 4	Chin-Hsing Wu	Lunghwa University
Student Speaker 5	Kensuke Yagi	Toyo University

Session 3 (Friday 2nd, 10:00-12:00)

Special Lecture	Prof. Yoshitaka Wada	Kindai University
Student Speaker 6	Yang Kui	Tokyo University of Science
Student Speaker 7	Li-Hsuan Kung	Lunghwa University

Session 4 (Friday 2nd, 14:00-16:00)

Special Lecture	Prof. Akiyuki Takahashi	Tokyo University of Science
Student Speaker 8	Hiromi Sekiguchi	Toyo University
Student Speaker 9	Chih-Cheng Wei	Lunghwa University
Student Speaker 10	Risa Ito	Toyo University

Session 5 (Saturday 3rd, 10:00-12:00)

Special Lecture	Prof. Ryuji Shioya	Toyo University
Student Speaker 11	Satoshi Koshiyama	Toyo University
Student Speaker 12	You-Ting Chou	Lunghwa University
Closing Remarks	Prof. Masanori Kikuchi	Tokyo University of Science

3. 外部評価委員会報告

各年度末に、以下の日程で外部評価委員会を開催した。

第1回委員会

日時：平成25年3月27日 15:00-17:00

場所：東洋大学白山第2キャンパスD棟計算力学研究センター1F会議室

第2回委員会

日時：平成26年3月18日(火)10:00-12:00

場所：東洋大学川越キャンパス福利厚生棟特別会議室

第3回委員会

日時：平成27年3月14日 14:00-16:00

場所：東洋大学白山キャンパス5号館1階5102教室

第4回委員会

日時：平成27年3月9日(水) 14:00-16:30

場所：東洋大学白山キャンパス5号館1階5102教室

第5回委員会

日時：平成29年3月6日(月) 14:00-16:30

場所：東洋大学川越キャンパス4号館4階第2会議室

センター長ならびに研究員より各年度の研究成果や活動状況を報告したのち、各委員に評価をいただいた。

次頁以下に、各回の外部評価票を添付する。

平成 24 年度外部評価委員会外部評価票

外部評価委員：

萩原 一郎（明治大学研究・知財戦略機構）

松本洋一郎（東京大学副学長）

神田 雄一（東洋大学副学長）

吉田 泰彦（東洋大学理工学部長）

吉田泰彦

1. センターの運営・研究体制は適当か

☒ 適当 ☐ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

2. 研究費の使い方は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

3. センターの目標は適当か

☒ 適当 ☐ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

今後、東日本大震災による汚染除去に関して、何らかの貢献はできなっているでしょうか？

4. 研究経過の科学的・技術的インパクトはどうか

☐ 高い ☒ 比較的高い ☐ 普通 ☐ やや低い ☐ 低い

【ご意見があれば】

5. 今後、研究成果が期待できるか

☐ 期待できる ☒ 比較的期待できる ☐ 普通 ☐ あまり期待できない ☐ 期待できない

【ご意見があれば】

6. その他、特記すべき事項

7. 総合評価

研究成果、特に論文成果においては研究員の中での片寄りが
見られる。しかし、概ね、研究及びその成果については評価できる。

評価票

評価委員御氏名

神田 雄一

1. センターの運営・研究体制は適当か

☐ 適当 ☐ 比較的適当 ☒ 普通 ☒ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

テーマ数、内容等より多様な形態をとっているのが体制としてしっかり構築した方が
よい。人員等配慮が必要かある。つらねてマネジメント手法を導入してはどうか。

2. 研究費の使い方は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

ふみぬきと判断する。

3. センターの目標は適当か

☐ 適当 ☐ 比較的適当 ☒ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

3点挙げているが、一番大きな目標は何なのか、明確にした方がよい。

4. 研究経過の科学的・技術的インパクトはどうか

☐ 高い ☒ 比較的高い ☐ 普通 ☐ やや低い ☐ 低い

【ご意見があれば】

昨年初は初年度であり、従来の継続と考慮すれば高いインパクトと
評価できる。

5. 今後、研究成果が期待できるか

☒ 期待できる ☐ 比較的期待できる ☐ 普通 ☐ あまり期待できない ☐ 期待できない

【ご意見があれば】

将来的には社会的課題(例えば環境問題、ものづくり等)への進展が
出ると期待し。

6. その他、特記すべき事項

・ つらねて体制を整える必要性を感じる。

・ 産学連携についても配慮に欲しい。

・ スピークホルダーのPR、よく研究紹介をして欲しい。

・ 海外大学との連携強化と期待
- 留学生、交換研究員等を増やす

7. 総合評価

初年度であり、また場所等、外的要因もあり充分な環境ではなかったと理解
するが、一応の成果は認められるので次年度以降に期待が大きいと見て、
是非、世界の取組と目途に欲しい。

“発掘”の意味を明確にするという理解が得られると感じた。

票價

評価委員御氏名

萩原一郎

1. センターの運営・研究体制は適当か

☒ 適當 ☐ 比較的適當 ☐ 普通 ☐ やや不適當 ☐ 不適當

【ご意見があれば】

構造、張床 石小石 中に エクスパート がいて

ハリスがやっている。博コースの生徒もやり
ながらやっている

2. 研究費の使い方は適当か

☒ 適當 ☐ 比較的適當 ☐ 普通 ☐ やや不適當 ☐ 不適當

【ご意見があれば】

~~人件費~~ 人件費 給与バランスがとれている。

磁束が多いほど大口径磁石有 磁石をさしての 方がよい

3. センターの目標は適当か

☐ 適當 ☒ 比較的適當 ☐ 普通 ☐ やや不適當 ☐ 不適當

【ご意見があれば】

図標が時換を得たものであつ、図の予算がとれている。

今後取り進めるために、さうして先の同好会
明証にされた方がよい。

4. 研究経過の科学的・技術的インパクトはどうか

☒ 高い ☐ 比較的高い ☐ 普通 ☐ やや低い ☐ 低い

【ご意見があれば】

Creek かとて、そのつみ 大なり。 ~~言ひあはれ~~、よりいかにあるに、いかに

しやがけたちが「愛」

ET-MM (当研直電刷各の γ)

5. 今後、研究成果が期待できるか

期待できる ☐ 比較的期待できる ☐ 普通 ☐ あまり期待できない ☐ 期待できない

概言をのさすとか)
ない

【ご意見があれば】

Crex を中心に大きな成果が得られた

計算と実験の両方をやることの大切さ

6. その他、特記すべき事項

実験に於ける材料の質も亦重要な点に入っている。

H24年度、千原学園、図はまさに構造的、政策的ものであり 精な、ある将

7月17-70もニハE 154にア3と
よいと考え3人3

新力学セクターは、日本には、本邦に乏しと思われ。

日本は、けん引と受けるからって決まってる。党内との協力、党外との協力を

7. 総合評価

より $\mathcal{O}_X(2) \otimes \mathcal{O}_X(1) \cong \mathcal{O}_X(3)$ である。

あまりナカ強く どのコラボ、でも 平土なの

皮革の材料への応用などにより広く利用される。

材料

上 47 の 5312

大衆良の7戸とで。 同11戸のついでに

731 km.

評価票

評価委員御氏名 松本洋一郎

1. センターの運営・研究体制は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

センター長を中心とした体制がとれている

2. 研究費の使い方は適当か

☒ 適当 ☐ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

3. センターの目標は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

流体力学-構造連成解析の研究は重要である。

4. 研究経過の科学的・技術的インパクトはどうか

☐ 高い ☒ 比較的高い ☐ 普通 ☐ やや低い ☐ 低い

【ご意見があれば】

精度検証に当たっては、境界条件等不確実な要素が適切に考慮し得る手法の開発が必要と認められる。

5. 今後、研究成果が期待できるか

☒ 期待できる ☐ 比較的期待できる ☐ 普通 ☐ あまり期待できない ☐ 期待できない

【ご意見があれば】

充分な成果が出ている訳ではないがその方向性は妥当であり期待したい。

6. その他、特記すべき事項

7. 総合評価

大規模高精度流体力学-構造連成解析手法の開発を目標としたセンターは時代の要請に合ったもので、他機関との連携を含めて発展すると期待したい。

平成 25 年度外部評価委員会外部評価票

外部評価委員：

萩原 一郎（明治大学研究・知財戦略機構）

松本洋一郎（東京大学副学長）

神田 雄一（東洋大学副学長）

吉田 泰彦（東洋大学理工学部長）

評価票

評価委員御氏名 根本洋一郎

1. センターの運営・研究体制は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

センター長リリー・ターナーにより強力的研究体制構築が望まれる

2. 研究費の使い方は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

適切な機器導入が図れており、活動の強化が期待される

3. センターの目標は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

より明確な目標設定が必要であるのか

4. 研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか

☐ 高い ☐ 比較的高い ☒ 普通 ☐ やや低い ☐ 低い

【ご意見があれば】

流木・構造体には重要なテーマあり、テーマ統一発信したほうが
社会的インパクトがあるのではないか

5. 今後、研究成果が期待できるか

☐ 期待できる ☒ 比較的期待できる ☐ 普通 ☐ あまり期待できない ☐ 期待できない

【ご意見があれば】

目標を統一し、より分かり易い事になり研究成果が期待される

6. その他、特記すべき事項

と思われる。

7. 総合評価

運営の努力は感じているが、各テーマ統一感が出ておらず
ポテンシャル割には発信が弱いように思われる。より明確な
テーマ設定と統一により社会的インパクトのある成果に期待したい。

評価票

評価委員御氏名

秋原一郎

1. センターの運営・研究体制は適当か

☒ 適当 ☐ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

口答発表, フォーラムなども積極的に行われており
センター長のリーダーシップも評価できる

2. 研究費の使い方は適当か

☒ 適当 ☐ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

人件費, 出張費, 設備費などバランスがとれている

3. センターの目標は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

第1の達成目標の目標, 何を解くとしてやるのか
より明確にするのが良いと感じた

4. 研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか

☐ 高い ☒ 比較的高い ☐ 普通 ☐ やや低い ☐ 低い

【ご意見があれば】

口答発表は十分行われている。これを正式論文とすることで
より更にインパクトが向上する

5. 今後、研究成果が期待できるか

☒ 期待できる ☐ 比較的期待できる ☐ 普通 ☐ あまり期待できない ☐ 期待できない

【ご意見があれば】

構造-音場解析も EFMHでヒリキもなど
今後の展開に大いに期待できる

6. その他、特記すべき事項

国際会議の主催や 関連の国際・国内会議で
積極的に OS 等を設けている

7. 総合評価

そのほかの目標をより明確にする

マルチスケール、マルチタイムの解析にも積極的に

チャレンジする、(例えば タイヤ、ボールの解析をする時
マルチスケール、マルチタイムの問題と
をどうする等)

このうちことをやることにより

更にセンターとしての機能が向上すると考えられる

評価票

評価委員御氏名

吉田 泰彦

1. センターの運営・研究体制は適当か

☐ 適当 ☐ 比較的適当 ☒ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

2. 研究費の使い方は適当か

☐ 適当 ☐ 比較的適当 ☒ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

3. センターの目標は適当か

☐ 適当 ☐ 比較的適当 ☒ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

4. 研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか

☐ 高い ☐ 比較的高い ☒ 普通 ☐ やや低い ☐ 低い

【ご意見があれば】

外部の方に、わかりやすい説明・広報。

5. 今後、研究成果が期待できるか

☐ 期待できる ☒ 比較的期待できる ☐ 普通 ☐ あまり期待できない ☐ 期待できない

【ご意見があれば】

6. その他、特記すべき事項

7. 総合評価

- 広報・説明：分野外の人にも、目的等がわかるような説明が必要。
- 研究員・若手学生の育成

一般的に、外部にわかりやすい説明・広報にはなっていないので、その点を検討することが必要である。
また、若手の人材の育成のため、管理システムの強化・見直し、若手への教育が不足しているようである。

概ね、研究としては順調に進捗しており、各グループ間の連携を^(より)強めることを希望する。

評価票

評価委員御氏名

神田 雄一

1. センターの運営・研究体制は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

概ね体制は適切と判断する。

2. 研究費の使い方は適当か

☒ 適当 ☐ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

適切と判断する。

3. センターの目標は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

プロジェクトの目標は適切と考えるが、センターの目標として
具体的な研究成果の目標が ~~あまり~~ 良いと感ずる。
も明示されると

4. 研究経過の科学的・技術的インパクトはどうか

☐ 高い ☒ 比較的高い ☐ 普通 ☐ やや低い ☐ 低い

【ご意見があれば】

基礎的な分野と応用分野の領域において
幅広く成果を出していることは評価できる。

5. 今後、研究成果が期待できるか

☒ 期待できる ☐ 比較的期待できる ☐ 普通 ☐ あまり期待できない ☐ 期待できない

【ご意見があれば】

基礎的な部分が多いと思われるが、これをベースとして
応用分野への展開を大いに期待したい。

6. その他、特記すべき事項

- ✓ 海外との共同研究等も進展しているので継続して欲しい。
- ✓ 研究のロードマップを作成したことは研究の明瞭性から良い。

7. 総合評価

- 産学連携の推進、センターのPRを積極的に展開してほしいと希望する。
- 成果を期待しております。

平成 26 年度外部評価委員会外部評価票

外部評価委員：

萩原 一郎（明治大学研究・知財戦略機構）

松本洋一郎（東京大学副学長）

神田 雄一（東洋大学副学長）

吉田 泰彦（東洋大学理工学部長）都合により欠席

評価票

評価委員御氏名 松本洋一郎

1. センターの運営・研究体制は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

研究より明確なアウトカム設定が必要である。

2. 研究費の使い方は適当か

☒ 適当 ☐ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

適切な機器が導入されている。結果期待したい。

3. センターの目標は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

適切と判断される。よりインパクトの高い課題の選定もあてはまらないか。

4. 研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか

☐ 高い ☒ 比較的高い ☐ 普通 ☐ やや低い ☐ 低い

【ご意見があれば】

目標に大規模化を取り上げるのは適切である。アルゴリズムとアーキテクチャの連携も興味深いと考えたい。

5. 今後、研究成果が期待できるか

☐ 期待できる ☒ 比較的期待できる ☐ 普通 ☐ あまり期待できない ☐ 期待できない

【ご意見があれば】

目標を明確化しつつ成果に期待したい。

6. その他、特記すべき事項

他領域との積極的な連携が必要とされる。

7. 総合評価

より社会、産業界にインパクトの高いテーマに絞って広報活動と強化するなど 強力な発信が期待される。

評価票

評価委員御氏名 萩原 一郎

1. センターの運営・研究体制は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

非常に興味深い 経路を認定し、^{100%} 未だとこでもなされている、
構造-経済面での 定数と変数-コンで対応させようとしている。

2. 研究費の使い方は適当か

☒ 適当 ☐ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

人件費、出張費、設備費などバリエーションが大きい

3. センターの目標は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

分析構造の妥当性を、均質化法で検証し、
それをもとに、必要に応じて検証し、その分野への貢献を目指すという
新しい研究法、実験法にとりかかっている

4. 研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか

☐ 高い ☒ 比較的高い ☐ 普通 ☐ やや低い ☐ 低い

【ご意見があれば】

広範をもち、やむを得ない。例えば、各研究で、社会インパクトを
是（は）げること、必要がある。このうちインパクトを高めるためのこの研究を
するという説明が欲しい。

5. 今後、研究成果が期待できるか

☒ 期待できる ☐ 比較的期待できる ☐ 普通 ☐ あまり期待できない ☐ 期待できない

【ご意見があれば】

構造法は正確な解ありとセンター関係の EFMHで
とりまわっている。このためそのインパクトがある。

6. その他、特記すべき事項

若しくは、~~その~~ 研究の発展に寄与すること
国際会議の開催や 国内の国内会議で 国境を越えて
積極的な O.S. を行っている

7. 総合評価

適当である。計算機科学の世界の力を借りて
研究を進めている。

広範をもち、明確に科学的な方法で
と更にその成果を明らかにする

国際会議に出席し、研究成果を報告し、その発展に寄与する
とある。

その成果を公表する

評価票

評価委員御氏名

神田 雄一

1. センターの運営・研究体制は適当か

☐ 適当 ☐ 比較的適当 ☒ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

✓ 研究プロジェクトのPDCAサイクルをしっかりと回す必要がある
✓ 自己点検評価を行ってはどうか。 (具体的)

2. 研究費の使い方は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

妥当と考える。

3. センターの目標は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

目標を各グループで共有すること大事。(具体的成果の明示)

4. 研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか

☐ 高い ☒ 比較的高い ☐ 普通 ☐ やや低い ☐ 低い

【ご意見があれば】

専門的には ~~まだ~~ 評価出来ないが、広報をもっとやる必要を感じ
(ELC)

5. 今後、研究成果が期待できるか

☐ 期待できる ☒ 比較的期待できる ☐ 普通 ☐ あまり期待できない ☐ 期待できない

【ご意見があれば】

今後の環境内題、学際的課題へのアプローチに期待したい
(工学・社会科学への活用も含めて)

6. その他、特記すべき事項

✓ 目標である若手育成への対応はどうするか？

✓ 教育への展開を考慮してほしい。

7. 総合評価

✓ スーパーグローバル大学との関連で留学生も含めて是非かかわってほしい。

✓ 産学連携の推進をもっと出来ないか？ → 社会的成果・評価に結びつく

✓ センターの成果の広報をもっと積極的に実施してほしい。

平成 27 年度外部評価委員会外部評価票

外部評価委員：

萩原 一郎（明治大学研究・知財戦略機構）

松本洋一郎（理化学研究所理事）

神田 雄一（東洋大学副学長）

寺田 信幸（東洋大学理工学部長）

評価票

評価委員御氏名 萩原 一郎

1. センターの運営・研究体制は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

Crest もやめ いろいろのだから、もっと多くの PD をやとえるの
 には良いでいいか。実績がクルーと研究クルーの良の工夫ができてい
 海外との連携による効果がよく分かる

2. 研究費の使い方は適当か

☒ 適当 ☐ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

やはり人件費が一番必要に思う
 次に旅費

3. センターの目標は適当か

☐ 適当 ☐ 比較的適当 ☒ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

明確な目標が必ずしもない。
 (特にこれはまだ目標であるか
 他との間に差別化して行くかの目標など)

4. 研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか

☐ 高い ☐ 比較的高い ☒ 普通 ☐ やや低い ☐ 低い

【ご意見があれば】

新聞報道など見られる
 構造-2 は建設が中心と見られるが、
 他とどう違うか差別化できているかの説明が十分でない

5. 今後、研究成果が期待できるか

☐ 期待できる ☒ 比較的期待できる ☐ 普通 ☐ あまり期待できない ☐ 期待できない

【ご意見があれば】

色々な研究をさせているが、同じようなものも二、三
 やり違っているから、期待できる

6. その他、特記すべき事項

Crest がクルーとの連携が良くあわせて、
 シンポジウムの主催を積極的に行っている

7. 総合評価

比較的良い。

計算力学にマテリアルニングをとりこむこと。

画像処理技術、実験と計算を融合せ
 るに新しい試み

構造-2 は建設関連も他とは異なる手法 (X-CT など) を
 高いを使われている。他を浸透する可能性あり

評価票

評価委員御氏名 長本洋一郎

1. センターの運営・研究体制は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

多様な課題に取り組んでおり有意な結果を得ているが今後はそれと
どいふに統合して行くかが課題である。

2. 研究費の使い方は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

会費と考えると。

3. センターの目標は適当か

☒ 適当 ☐ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

適切である。

4. 研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか

☐ 高い ☒ 比較的高い ☐ 普通 ☐ やや低い ☐ 低い

【ご意見があれば】

様々な手法・概念を用いて研究を進めており、適切な広報・謝辞をい。

5. 今後、研究成果が期待できるか

☒ 期待できる ☐ 比較的期待できる ☐ 普通 ☐ あまり期待できない ☐ 期待できない

【ご意見があれば】

どいふに集約して行くかが課題となる。今後は期待したい。

6. その他、特記すべき事項

他の機関等と連携があり、とても良い点がある。
国内の

7. 総合評価

多様な概念を取り込んで研究を進めており、明確な
研究の方向性を提示して行くことが望まれる。

評価票

評価委員御氏名

神田 雄一

1. センターの運営・研究体制は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

少人数体制の中ではよく研究運営がなされていると感じる。

2. 研究費の使い方は適当か

☐ 適当 ☐ 比較的適当 ☒ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

・収支を明確に示す必要がある。

・文芸刊の持ちこたを配慮すること重要。

3. センターの目標は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

目標、方向性はほぼ確立しているが、目標のーとして
産学連携の進展を挙げて欲しい。

4. 研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか

☐ 高い ☒ 比較的高い ☒ 普通 ☐ やや低い ☐ 低い

【ご意見があれば】

成果は多く出ているので、その公表の仕方が不恰なので
広報によりインパクトは上ると考える。

5. 今後、研究成果が期待できるか

☐ 期待できる ☒ 比較的期待できる ☐ 普通 ☐ あまり期待できない ☐ 期待できない

【ご意見があれば】

AIの活用、オープンCAE などを今後につなげる研究テーマの
芽ばえを作る必要性も考えて下さい。

6. その他、特記すべき事項

・昨年も述べたが、産学連携の成果を期待したい。

・SGU関連で海外の大学との学生間交流を活発にしたい。
(留学、交換研究員等)

7. 総合評価

これらの成果を ~~また~~ 統合して、大学内・外で評価される
ことを期待したい。

評価票

評価委員御氏名

寺田信幸

1. センターの運営・研究体制は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

2. 研究費の使い方は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

3. センターの目標は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

4. 研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか

☐ 高い ☐ 比較的高い ☐ 普通 ☒ やや低い ☐ 低い

【ご意見があれば】

社会的なインパクトが少し足りないように感じました。

5. 今後、研究成果が期待できるか

☐ 期待できる ☒ 比較的期待できる ☐ 普通 ☐ あまり期待できない ☐ 期待できない

【ご意見があれば】

本成果をどう社会に役立てるかを明確に表現する
必要があるように思います。

6. その他、特記すべき事項

最終報告書作成時には、各研究グループの関与性を
しっかりと位置づけておく必要があると思います。

7. 総合評価

A

平成 28 年度外部評価委員会外部評価票

外部評価委員：

萩原 一郎（明治大学研究・知財戦略機構）

松本洋一郎（理化学研究所理事）

神田 雄一（東洋大学副学長）

寺田 信幸（東洋大学理工学部長）

評価票

評価委員御氏名

寺田 信幸

*特に指定のないものは、H28 年度についてご評価下さい。

1. センターの運営・研究体制は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

2. 研究費の使い方は適当か

☐ 適当 ☐ 比較的適当 ☒ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

3. センターの目標は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

4. 研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか

☐ 高い ☐ 比較的高い ☒ 普通 ☐ やや低い ☐ 低い

【ご意見があれば】

研究成果がどの様な分野に生かされ、イノベーションを引起すのか？
社会に貢献できるのか？が明確に伝わらない。

5. 5年間のプロジェクトを総括しての評価はどうか

☐ 良い ☐ 比較的良好 ☒ 普通 ☐ あまり良くない ☐ 良くない

【ご意見があれば】

プロジェクト全体としてはおおむね評価できるが、出口としての活用が
見えにくい。

6. その他、特記すべき事項

本プロジェクトの成果を今後どう発展させていくのかを明確に示す必要がある。

7. 総合評価

「B」

評価票

評価委員御氏名 長本洋一郎

*特に指定のないものは、H28年度についてご評価下さい。

1. センターの運営・研究体制は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

小人数の組織としては十分な運営がなされている
小規模

2. 研究費の使い方は適当か

☐ 適当 ☐ 比較的適当 ☒ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

特に問題は無い。

3. センターの目標は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

目標の設定は妥当である。

4. 研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか

☐ 高い ☐ 比較的高い ☒ 普通 ☐ やや低い ☐ 低い

【ご意見があれば】

期待している水準を上回っているかと判断される。

5. 5年間のプロジェクトを総括しての評価はどうか

☐ 良い ☒ 比較的良好 ☐ 普通 ☐ あまり良くない ☐ 良くない

【ご意見があれば】

発表のしきりも後だが、取りまとめる工夫があれば比較的良好とい

6. その他、特記すべき事項

評価も可能である。

7. 総合評価

妥当な活動で行って来たと評価される。報告の工数
が必要である。特に同じような計算手法等の比較検討
を怠付にしておく必要があると思われる。

評価票

評価委員御氏名

神田 花佳

*特に指定のないものは、H28 年度についてご評価下さい。

1. センターの運営・研究体制は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

組織的には整っており適当と評価するが、実施とイコールをもちし
プロジェクト
効率化出来るか？ (プロジェクトマネジメント手法の活用など)

2. 研究費の使い方は適当か

☒ 適当 ☐ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

良好と評価

3. センターの目標は適当か

☒ 適当 ☐ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

目標は明確であった。

4. 研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか

☐ 高い ☒ 比較的高い ☐ 普通 ☐ やや低い ☐ 低い

【ご意見があれば】

基礎的知見と数値データは評価。

産学連携など社会的インパクトは弱々ところが見られた。

5. 5年間のプロジェクトを総括しての評価はどうか

☐ 良い ☒ 比較的良好 ☐ 普通 ☐ あまり良くない ☐ 良くない

【ご意見があれば】

学内外への発信も含めて活動の展開できたことと評価する。

論文書籍の刊行は良い。

6. その他、特記すべき事項 (大学の立場から)

今後は工学フロンティアへの付与を、学内・他部門との協働を

いざって欲しい、オリエンタ. パラダイムへの付与、産学連携を推進し欲しい。

7. 総合評価

5年間で基礎的知見を多く得られたことは評価する。本プロジェクトの特徴をアピールし、
今後は成果を明確にして次のステージ (応用的展開) への
方向性を示して欲しい。
産学官連携も含めて

総合評価 A

評価票

評価委員御氏名 萩原一郎

*特に指定のないものは、H28年度についてご評価下さい。

1. センターの運営・研究体制は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

国内外の機関との共同研究も本センターが窓口となり積極的に行っている。月例シンポジウム、フォーラム、7-7のつどい等数回開催している。なお企業との連携も積極的に行っている。

2. 研究費の使い方は適当か

☒ 適当 ☐ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

風洞実験装置とVR装置を設置するに際し、研究費を利用

3. センターの目標は適当か

☐ 適当 ☒ 比較的適当 ☐ 普通 ☐ やや不適当 ☐ 不適当

【ご意見があれば】

1. 大規模高層建築物の構造解析手法の開発
2. 構造解析、応答性解析の高度化と実用化
3. 詳細実尺モデルによる構造解析、応答性解析と明確な目標とに設定

4. 研究成果の科学的・技術的・社会的インパクトはどうか

☐ 高い ☒ 比較的高い ☐ 普通 ☐ やや低い ☐ 低い

【ご意見があれば】

従来、並列化が困難とされてきた非線形解析手法の並列化を実現し、適用することによって、高層建築物に対する並列化効率とスケーラビリティを向上させた。

5. 5年間のプロジェクトを総括しての評価はどうか

☐ 良い ☒ 比較的良好 ☐ 普通 ☐ あまり良くない ☐ 良くない

【ご意見があれば】

国内外の大学との共同研究が非常に多い。企業との連携も非常に多い。

6. その他、特記すべき事項

標準問題の試験を通じて、流体力学連成による物件の振動同調特性、物件の形状、材料特性と関連して、特徴ある性質を明らかにした。

7. 総合評価

比較的良好。論文数56篇あるが更に多い。流体力学連成解析に対する標準問題の改善が図られており、流体力学研究成果、ただし、本研究の特徴をより明確に示す必要がある。今後どのようにしていくかをより明確にしたい。

4. 研究成果の公開

4.1.年報

東洋大学計算力学研究センター

2012 年度 年報



2013 年 3 月

1. まえがき	3
2. 概要	4
2.1. センター設置について	4
2.2. 組織	5
3. 研究成果	7
3.1. 解析手法開発グループ	7
3.1.1. EFMM による高精度大規模並列流体-構造連成解析手法の開発.....	8
3.1.2. 付帯条件付き多次元型移動最小自乗法の 3 次元固体問題への適用性に関する研究.....	17
3.1.3. ブロック構造を有する固体の大規模 3 次元モデル生成および固液連成解析技術の構築	26
3.1.4. 粒子法手法による並列流体-構造連成解析手法	33
3.1.5. 振動現象の流体-構造連成解析と自己組織化マップを用いた分類	38
3.2. 大規模並列化グループ	43
3.2.1. 大規模構造物中のき裂の 3 次元自動進展解析	44
3.2.2. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発	50
3.3. 新規実験計測グループ	55
3.3.1. 物性データ交換のためのデータ表現形式の検討.....	56
3.3.2. ドット重心追跡法による変位・ひずみ場解析(古川先生)	58
3.3.3. 流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムの整備	64
3.3.4. 境界層特性評価のための普遍関数構築	66
3.3.5. 熱線流速計の温度依存性に関する検討	68
3.4. 精度・妥当性検証グループ	70
3.4.1. 最適化技術	71
3.5. 可視化検証グループ	77
3.5.1. 3 次元画像による定量的・定性的検証	78
3.6. 横断的研究会	83
3.6.1. 連成標準問題検討会	83
3.6.2. 計算力学と（材料）データベースの会	83
3.6.3. 楽器の流体（音響）構造連成研究会	83
4. 共同研究	84
4.1. JST CREST プロジェクト	84
5. 国際協力	86
5.1. バージニア工科大学.....	86
6. 情報発信	87
6.1. 第 15 回計算力学フォーラム（サンパウロ）	87

6.2.	第16回計算力学フォーラム (JSME CMD / 神戸)	88
6.3.	第17回計算力学フォーラム (ICCM / ゴールドコースト)	89
7.	教育活動	91
7.1.	教育活動風景	91
7.2.	卒業論文・修士論文の紹介	94
8.	業績リスト	96
8.1.	総説・解説・エッセイ	96
8.2.	論文	97
8.3.	招待講演	99
8.4.	講演論文・口頭発表	101
9.	結び	107

1. まえがき

本年度はセンターが活動を開始してから8年目にあたる。過去7年間のうち、5年間は私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」として活動を行ってきたが、本年度、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に選定され、いわば第2期の研究活動を開始したところである。この報告書は、その初年度の活動を中心にとりまとめたものである。

今回の、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業はその題目を「大規模高精度流体構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」とした。これは、それまでの流体解析や構造解析といった個別の物理の解析から一歩進めてより複雑な、また現実的な問題に計算力学の手法を適用しようとするのと、単に研究として行うのではなく、精度や妥当性を十分に検証し、あるいはその検証方法を確立することで、実用に耐えうるものとすることを目指してのことである。

本年度は、その1年目であるため、研究体制・研究環境の整備に重点をおくことになった。メンバーは、本学の3学部、I研究科の教員7名を中心に、博士研究員4名、研究支援者1名、客員研究員3名と大学院生からなる。さらに、これまでの関係から引き続き、韓国成均館大学とは年1回の学生ワークショップを中心に連携を図るほか、新たに台湾の龍華科技大学とも提携し、本報告書が出る頃には第1回の学生ワークショップが台湾で開かれているはずである。

また、当センターは昨年度より科学技術振興機構の戦略的研究推進事業 CREST にも選定されており、その活動についても本報告書では簡単にふれている。

本年度は、新たなテーマで研究を開始したところであり、また個人的にはセンター長を前任の矢川教授より引き継いだばかりということもあって、物足りなく感じられる向きもあるだろうと思われるが、今後ともさらなるご批判とご指導を賜れば幸いである。

2013 年 3 月

東洋大学計算力学研究センター長
田村善昭

2. 概要

本センターは、わが国の私立大学学術フロンティア拠点のひとつとして文部科学省から設置が認められ、平成17年度に活動を開始した。その後、平成23年度に科学技術振興機構の戦略的研究推進事業 CREST の選定、続いて平成24年度に文部科学省の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け、今日に至っている。本センターに参加する研究員は、東洋大学の複数学部・大学院の教員（工学研究科、国際地域学部、総合情報学部、理工学部）、博士研究員、大学院生などを中核とし、また客員研究員として関連分野の内外の研究者から構成されている。各自の専門分野は、構造解析、流体解析、破壊解析、逆問題・最適化、大規模並列計算、可視化など、計算力学分野で必要とされるほぼ全ての分野に跨っており、この分野における専門家集団である。平成23年度に採択を受けた CREST では「京」コンピュータ利用のための超大規模解析技術に関して、また平成24年度からは、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け、連成解析や計算力学の精度検証・妥当性検証にも積極的に取り組んでいる。さらに、東洋大学 125 周年を契機とした国際化に合わせて海外の関連する大学と積極的に交流を進め、若手の人材育成にも寄与したいと考えている。

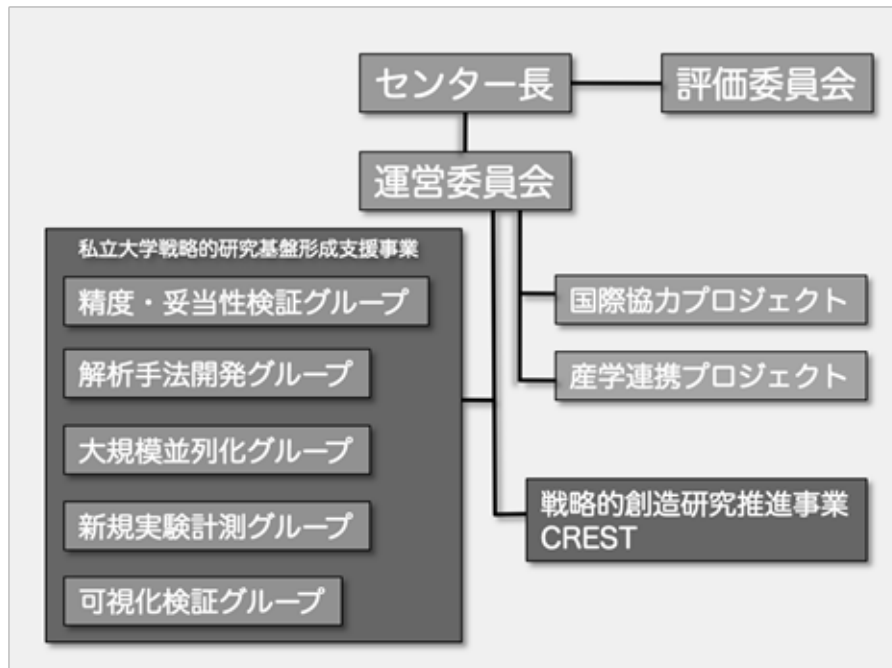
2.1. センター設置について

東洋大学計算力学研究センター設置の経緯とこれまでの概要は以下の通りである。

- ・平成17年6月 文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」に研究題目「数値逆解析手法の開発とその構造健全性向上のための応用」で採択され、計算力学研究センター発足
- ・平成17年12月 センター開所式開催のあと、白山第2キャンパス内計算力学研究センター棟に入居し本格活動開始
- ・平成22年3月 「学術フロンティア推進事業」終了
- ・平成23年8月 科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST
「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」に研究題目「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」で採択される。
- ・平成24年4月 文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に研究題目「大規模高精度流体構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」で採択される。

2.2. 組織

センターの組織とメンバーは以下の通りである。



メンバー

・センター長

田村 善昭 (東洋大学 総合情報学部 総合情報学科 教授)

・研究員

矢川 元基 (東洋大学大学院 工学研究科 機能システム専攻 教授)

芦野 俊宏 (東洋大学 国際地域学部 国際地域学科 教授)

江澤 良孝 (東洋大学 総合情報学部 総合情報学科 教授)

塩谷 隆二 (東洋大学 総合情報学部 総合情報学科 教授)

中林 靖 (東洋大学 総合情報学部 総合情報学科 准教授)

藤松 信義 (東洋大学 理工学部 機械工学科 准教授)

・研究助手

長岡 慎介 (東洋大学 計算力学研究センター)

石川 格 (東洋大学 計算力学研究センター)

A.M.M. Mukaddes (東洋大学 計算力学研究センター)

・研究支援者

小林 陽介 (東洋大学 計算力学研究センター)

増田 正人 (東洋大学 計算力学研究センター)

・客員研究員

古川 知成 (Virginia Tech)

松原 仁 (琉球大学 工学部 環境建設工学科)

横山 真男 (明星大学 情報学部 情報学科)

3. 研究成果

3.1. 解析手法開発グループ

解析手法開発グループでは、計算力学研究センターのプロジェクト名である「大規模高精度流体-構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」のうち、「高精度流体構造連成解析手法の開発」の部分に焦点を当てた活動を行っている。

流体-構造連成解析を高精度かつ安定的に実施するためには、まず、流体解析手法・構造解析手法そのものの精度や信頼性を高めた上で、それらを連成させるアルゴリズムについても十分に検討する必要がある。これまでのところ、計算力学研究センターでは流体解析に SUPG/PSPG 安定化有限要素法を用い、構造解析に EFMM を用いる手法を中心に連成解析を行ってきたが、このアプローチ以外にも例えば粒子法を用いた手法など様々な戦略が考えられる。本プロジェクトの初年度である平成 24 年度については、広くさまざまな解析手法を試して比較検討することを目的として活動を行った。

上記の事項を踏まえて、今年度は、以下の 5 項目について報告を行う。

- (1) EFMM による高精度大規模並列流体-構造連成解析手法の開発
- (2) 付帯条件付き多次元型移動最小自乗法の 3 次元固体問題への適用性に関する研究
- (3) ブロック構造を有する固体の大規模 3 次元モデル生成および固液連成解析技術の構築
- (4) 粒子法手法による並列流体-構造連成解析手法
- (5) 振動現象の流体-構造連成解析と自己組織化マップを用いた分類

3.1.1. EFMM による高精度大規模並列流体-構造連成解析手法の開発

(1) 目標・計画

本研究では、計算力学の分野において、その需要が高まりつつある連成現象を解く為の新しい大規模並列流体-構造連成解析手法を提案、実装することを目的としている。

我々の身の回りで生じている現象のほとんどは、何らかの力学現象が相互関連しあって起こっている。これらの現象を連成現象と呼び、この連成現象には多種多様な種類の現象が存在する。その中で、本研究においては、流体と固体とが相互関連する流体-構造連成現象をその対象としている。

近年の計算機の性能の向上と共に、数値計算技術は飛躍的に発展を遂げており、連成解析を取り扱った研究も徐々に増えつつある。しかしながら、単一の現象を対象とした研究と比較するとまだまだ十分な研究がなされているとは言い難い。これは、連成現象を取り扱うためには、単一現象を解く為の解析と比較して様々な解決すべき問題を多く含んでおり、これは、単に計算機の性能の向上のみで解決できる問題だけではなく、その解析アルゴリズムにも関係している為である。

本研究で提案する EFMM を用いた構造解析手法と、SUPG/PSPG 安定化 FEM を用いた流体解析手法とを組み合わせ、新しい流体-構造連成解析手法は、各解析領域場を使用するメッシュ分割パターンが共に四面体一次要素であることから、流体-構造境界面における整合性を完全に得ることが出来、その結果、流体-構造連成問題を解く際に非常に重要となってくる界面の連成効果を考慮する際に生じる問題を解消することに成功している。

さらに、前述の通り、各解析場で用いるメッシュ分割パターンは、高次要素を用いる事無く、線形要素である。それにもかかわらず、その解析結果は、従来の線形要素を用いた解析結果と比較して向上するという結果を得られている。これは、大規模問題を解く際に問題になってくる計算機リソースと計算時間の大幅な抑制を可能にすることを意味している。

このように、本研究で提案している EFMM と SUPG/PSPG 安定化 FEM とを組み合わせ、流体-構造連成解析手法は、未だに数多くの問題を有する流体-構造連成解析を解く為に非常に効果的な手法であると言える。

しかしながら、本提案手法は、近年の大規模解析の際に必要な不可欠となる並列処理を施す際に、大きな問題を有する手法であることが明らかとなった。この問題は、EFMM の解析アルゴリズムに起因するものであり、従来の要素ベースの領域分割手法への適用が困難である。さらに、この問題により、並列解析においては非常に重要な問題である各プロセッサ間の通信量が増加してしまい解析効率、並列化効率を大幅に低下させる一因となった。

平成 24 年度は、3 次元並列流体-構造連成解析手法を確立するために、SUPG/PSPG 安定化 FEM による流体解析手法の並列化、EFMM による構造解析手法の並列化と、その並列化の際に生じる問題点を解消するための処理を提案、実装した。そのうえで、これら 2 つの解析手法を組み合わせ、並列流体-構造連成解析手法の開発を行った。

次年度以降は、本解析手法による実現象を対象とした解析と、実験との比較による解析精度の検証を行う予定である。

(2) 意義・国際社会との比較

前述の通り、計算力学の分野において、流体・構造連成現象を対象とした研究の事例は、単一の現象を対象とした解析のケースと比較して非常に少なく、まだまだ十分な研究が成されているとは言い難い。

しかしながら、流体・構造連成現象は、工学の分野のみならず、バイオ分野などを中心に非常に重要な現象である事から、流体・構造連成現象を高速に解き、高精度な解析結果を得られる解析手法の開発と確立は非常に重要な意義を持つ。

流体・構造連成現象が原因となった事故として、ワシントン州のピュージェット湾にあるタコマナローズ海峡に架かる吊橋であるタコマナローズ橋の落下事故が有名である。タコマナローズ橋は風力を静荷重として考慮した設計では、風速 60m/sec の強風まで耐えられる設計が施されていた。しかしながら、実際には風速 19m/sec の風が吹いた折に崩落してしまった。これは風速 19m/sec の風が吹いた際に、橋の周りにカルマン渦と呼ばれる渦が生じ、その渦から橋に加えられる周期的な力と橋のねじれ振動が共振を起こし、振幅が増大してケーブルが破断した為に起きた事故である。この事故をきっかけに、風の動的メカニズムを考慮に入れた橋の設計が行われるようになってきた。この有名な事故も、仮に流体と構造の相互現象、連成効果を考慮に入れた安全性の確認を行っていれば十分に防ぐことが出来たものと予想される。

この事例からも、流体・構造連成現象は、一般的に構造物を設計する立場からは、その発生を回避すべき対象であり、このような事故の再発を未然に防ぐ為にも、また工学の分野のみならず、その他の分野においても、連成効果を無視することで発生する多くの事故を防ぐ為にも、流体・構造連成現象を対象とした研究とその研究成果から得られる解析手法の需要は今後ますます増加する事が予想される。

(3) 研究内容

本研究の目的は、大規模並列流体・構造連成解析システムの提案と構築である。3次元流体・構造連成問題については、平成 23 年度までの研究課程において、EFMM を使用した構造解析手法と、SUPG/PSPG 安定化 FEM とを組み合わせる新しい解析手法を実装し、バイオ分野の問題に適用し、良好な解析結果を得ることが出来ている。

具体的な解析手法として、連成効果を考慮した解析を行う際には、図 1 に示すように流体解析場と構造解析場の界面において、節点数、節点座標値に整合性がとれている事が望ましい。これは、図 2 のように、界面の節点位置に整合性が得られない場合には、流体場から構造場、構造場から流体場への連成効果を考慮する際に、その連成効果を内挿、補間する必要があり、このプロセスは複雑な流体・構造連成解析のアルゴリズムを更に複雑なも

のにするだけでなく、解析精度の低下の原因にもなる。

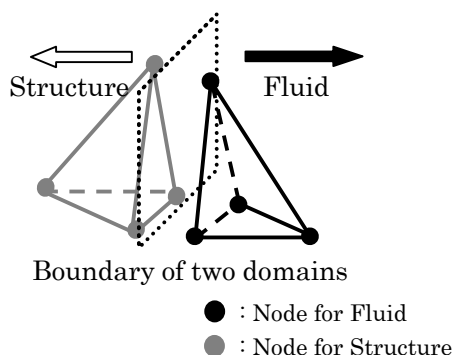


図 1 整合性の得られた流体・構造界面

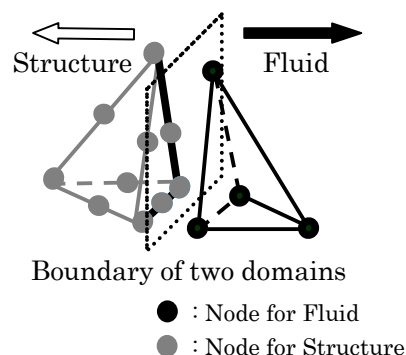


図 2 整合性が得られていない流体・構造界面

EFMM と SUPG/PSPG 安定化 FEM は、それぞれ解析に用いる要素は、四面体一次要素である事から、流体解析場と構造解析場においての整合性を得る事が出来る。更には、これらの解析手法は、従来の線形要素のみを使用した解析と比較して、解析精度を向上させる事が可能であるという特徴を持つ。

バイオ分野への適用例として、毛細血管内を移動する赤血球の血流による形状変形と、その形状変形に伴う流体場の流れの変化の様子についてのシミュレーション結果を示す。図 3 は解析に用いたモデルである。

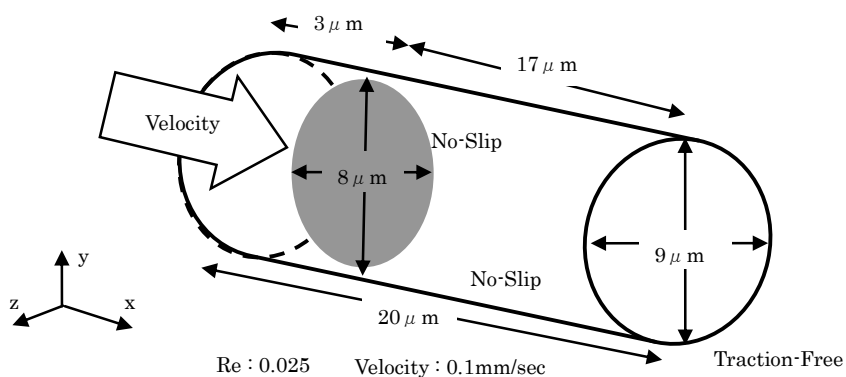


図 3 解析モデル

図 4、5 はそれぞれ解析により時々刻々と変化する流れ場と赤血球の形状変形の様子を示している。

赤血球は、毛細血管の様に、赤血球自体の長径よりも細い血管を通過する際には、血流により下流方向に向かってパラシュート型に形状変形をする様子が観測されているが、本数値解析結果では、その様子が伺える。

特に、構造解析結果では、赤血球の上流側中心に最も大きな圧力を観測しており、その結果から中心が大きく窪み、我々の体内で実際に観測されるパラシュート型への形状変形を良く計算できている。

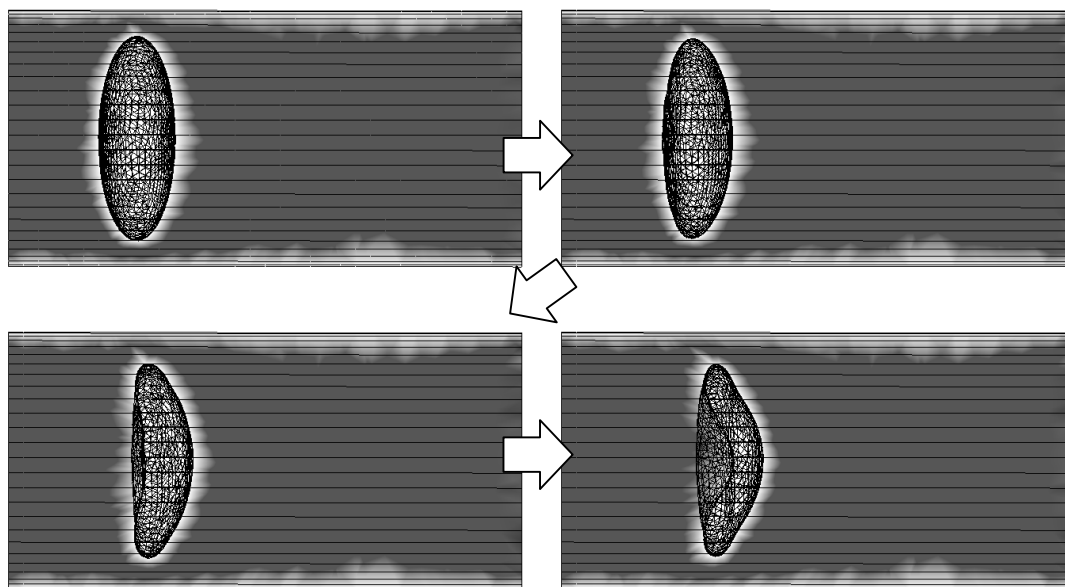


図 4 解析結果（流体解析場）

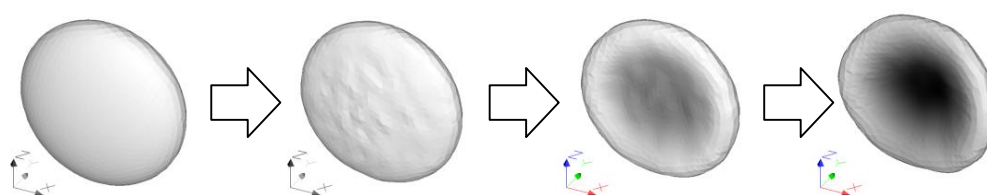


図 5 解析結果（構造解析場）

このように、本研究で提案している EFMM と SUPG/PSPG 安定化 FEM による新しい流体-構造連成解析手法は良好な解析結果を得られることが、確認できている。

（4）平成 24 年度進捗状況

前節で述べたように、EFMM と SUPG/PSPG 安定化 FEM とを組み合わせた流体-構造連成解析手法は、実現象と比較して良好な解析結果を得られることが示されている。

しかしながら、この EFMM と SUPG/PSPG 安定化 FEM とを組み合わせた連成解析手

法は、並列処理を行わない単一 PC での処理を行う場合には、非常に相性の良い組み合わせであるものの、並列処理を加えようと試みると幾つかの問題が生じる。

最も大きな問題点として挙げられるのが、EFMM の並列解析への適用が困難であるという点である。具体的には、静解析のようにメッシュの再生成を必要としない問題では、大きな問題も無く並列処理を適用することが可能である。その際、局所要素毎の処理を行う EFMM に対して、従来の Element-by-Element 手法に基づく Local element cluster - by - Local element cluster 処理を施すことで、並列 CG 解析を高速に解くことに成功している。

一方、メッシュの再生成を必要とするアダプティブ問題などの場合には、EFMM の解析アルゴリズムの特徴から、並列処理を行う事が困難になってくる。

我々が対象とする問題は、流体・構造連成問題である。多くの流体・構造連成問題では、流体と構造の相互作用によってメッシュ形状が時々刻々と変化する。また、解析領域数も多く、実現象を対象とした時、解析の為のメッシュ数は非常に大規模なものとなる事から、並列処理の実装は必要不可欠である。

並列 EFMM がアダプティブ解析などへの適用が困難な原因として、EFMM は図 6 に示すように解析領域全体の全ての節点が、その節点周りに局所要素クラスターを生成する。この局所要素クラスター毎に剛性マトリックスを生成して、それら節点ごとに生成される剛性マトリックスを全体剛性マトリックスに足し合わせることで、解析領域全体の剛性マトリックスを得ることが可能である。

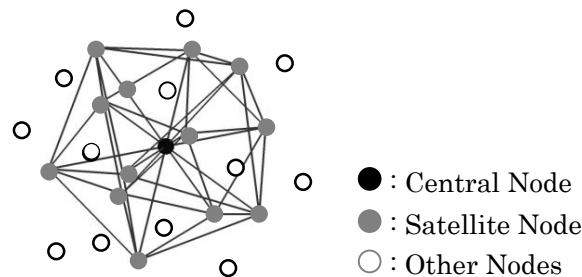


図 6 EFMM の生成する局所要素クラスター

当然、節点毎に剛性マトリックスを生成していくことから、局所剛性マトリックスの生成に関しては、100%の並列化効率を得ることが出来る。図 7 は、ある解析モデルに対して EFMM による剛性マトリックスの生成プロセスに並列処理を加えた際の並列化効率の推移を示したものである。

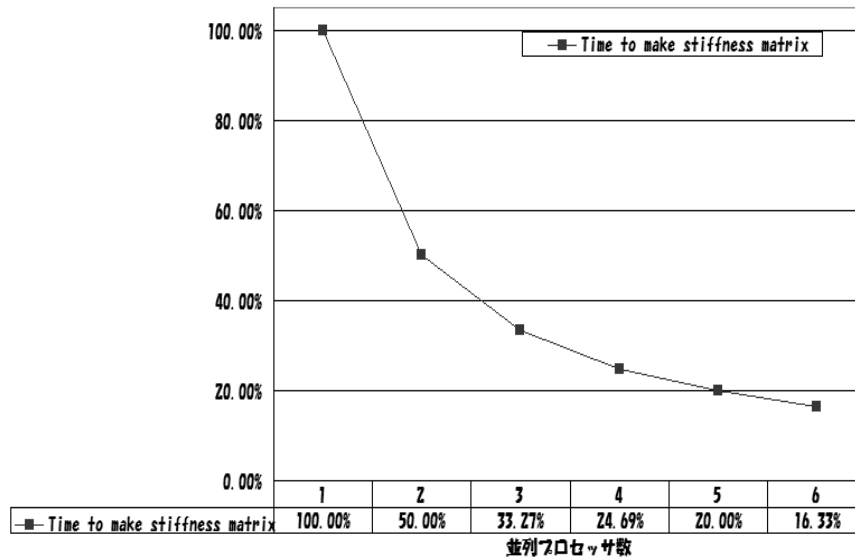


図 7 並列プロセッサ数と全体剛性マトリックス生成に要する時間の関係

このように、節点ベースの解析手法であることから、EFMM を並列静解析へ適用する場合には、非常に高効率な並列化効率を得ることが可能である。

しかしながら、EFMM は節点ベースの解析手法であることから、要素ベースの領域分割を行った際に、自身の担当領域内の節点の座標データのみならず、解析領域内の節点が生じる局所剛性マトリックスに依存する解析領域外の節点の座標データも合わせて必要になる。これは、アダプティブ解析のように解析と共に節点座標値が移動するに伴い、それらの移動した節点の座標値を領域間で通信する必要があることを意味する。これは、解析ステップ毎に求められるので大きな通信コストとなる。

そこで、本研究では、図 8 のように EFMM に要素ベースでの領域分割を行い、その領域内の節点のみを使って局所要素クラスターを生成して剛性マトリックスを作成する。

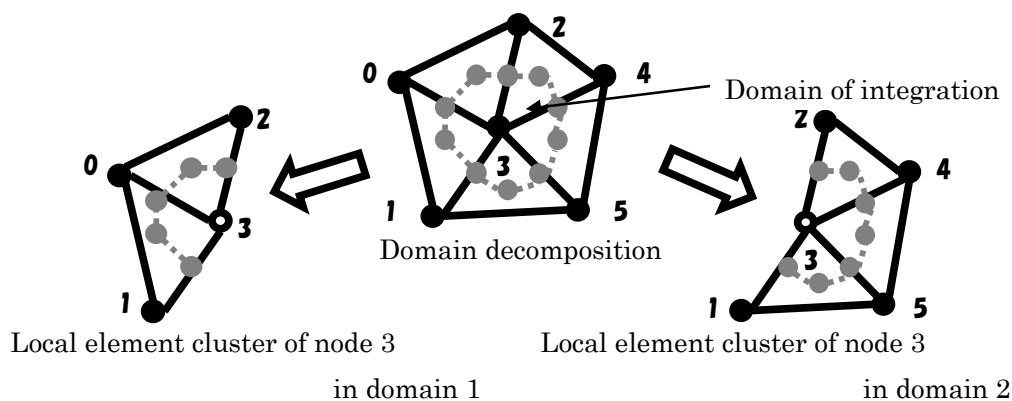


図 8 領域分割例

この方法を取ることで、リメッシングなどを施した際も、各節点座標値等のデータ通信は必要なくなる。一方で、本来節点ベースの解析手法であるにもかかわらず、複数の領域で同一の節点が、中心節点となる局所要素クラスターが生成される。この複数の領域に跨る同一の節点を中心節点とする局所要素クラスターは、積分領域は網羅できるものの、剛性マトリックス生成過程に必要となる縮約が正確に行えないことから、不正確な剛性マトリックスを生成することとなる為、解析精度の低下が懸念される。(図 8)

そこで、要素ベースの領域分割処理を施した **EFMM** の解析精度と並列プロセッサ数の関係について検証を行った。解析に用いるのは図 9 に示す簡単な片持ち梁モデルである。また、図 10 には領域分割例を示している。なお、本手法を用いて得られる全体剛性マトリックスは、本来の **EFMM** 解析で得られるような対称行列にはならず、非対称行列となる事から **GPBi-CG** 法などの非対称行列にも対応できるソルバーを用意する必要がある。

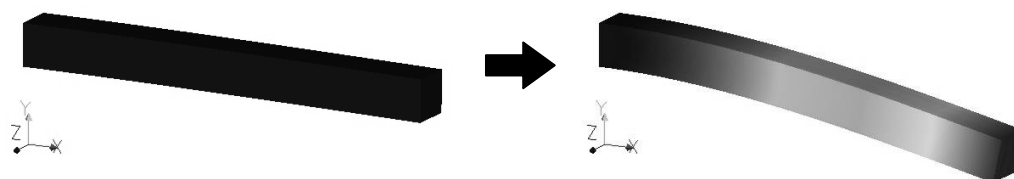


図 9 解析モデル

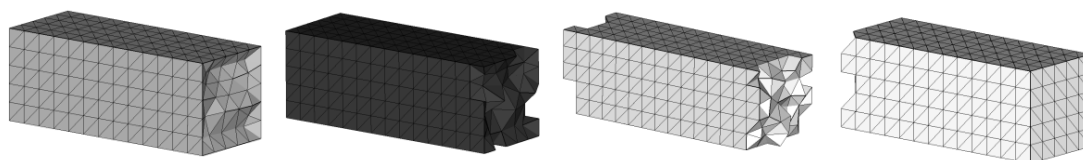


図 10 領域分割例

図 11 は、横軸に並列プロセッサ数、縦軸に正規化変位を表している。

図 11 から明らかなように、並列プロセッサ数が増加すれば増加するほど、解析精度は若干の低下を示す傾向にある。これは、領域分割を行うとその界面付近に不正確な局所要素クラスターが生成される。この不正確な局所要素クラスターは、領域分割数が増えれば増えるほど、各領域間の界面が増えるため、その数が増加する。結果、不正確な要素剛性マトリックスが多く計算され解析精度を低下させている。

しかしながら、解析領域全体の節点数を十分に取れば、その差は微々たる値に抑えることが可能となることが、解析結果の傾向から見て取れる。節点ベースの **EFMM** を正確に並列化した際の通信コストの増加と比較すると、本手法は大きなメリットがあると考えられる。

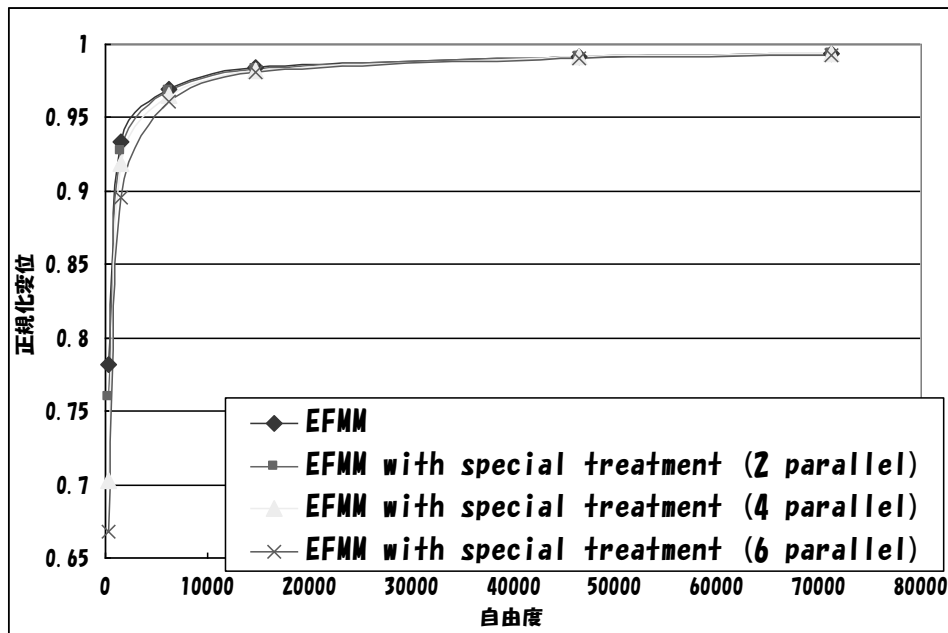


図 11 各並列台数における解析モデルの自由度と正規化変位の関係

今年度は、昨年度までに完成させた EFMM と SUPG/PSPG 安定化 FEM による新しい流体・構造連成解析システムの大規模並列化に着手した。

並列解析への適用時に、EFMM のリメッシングを含む問題での並列処理が非常に困難であるという問題点が明らかとなり、問題を解消する為の処理を提案し、有効な結果を得ることが出来た。

本手法を取り入れることで、現在、EFMM と SUPG/PSPG 安定化 FEM による新しい並列流体・構造連成解析手法を完成した。

来年度以降は、本手法のより高速な処理を施すためのチューニング、擬似弾性スミージングによるリメッシング手法を導入し、実験との比較による、本提案手法の健全性を明らかにしていく。

参考文献

- 1) Yagawa, G. and Matsubara, H., Enriched element method and its applications to solid mechanics, Proc. Computational Method In Engineering and Science EPMESC X, pp.15-18, 2006.
- 2) Tezduyar, T.E., Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations, *Advanced in Applied Mechanics*, 28 pp.1-44, 1991.

- 3) Tezduyar, T.E., Mittal, S., Ray, S.E. and Shih, R., Incompressible flow computations with stabilized bilinear and linear equal-order-interpolation velocity-pressure elements, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 95 pp.221-242, 1992.
- 4) Franca, L.P., Frey, S.L. and Hughes, T.J.R., Stabilized finite element methods I. Application to the advective - diffusive model, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 95 pp.253-276, 1992.
- 5) Franca, L.P. and Frey, S. L., Stabilized finite element methods II. The incompressible Navier-Stokes equations, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 99 pp.209-233, 1992.

3.1.2. 付帯条件付き多次元型移動最小自乗法の3次元固体問題への適用性に関する研究

(1) 目標・計画

近年、実構造物における構造健全性評価の効率的な実施が求められており、昨今の巨大化・複雑化した構造物の環境下において、3次元複合荷重下における応力状態や破壊現象を高精度かつ容易に解析できる計算手法の構築は非常に重要であり、そのニーズは今後さらに増えていくことが予想される。本研究では、3次元固体問題における高精度かつ効率的な計算力学手法を研究開発することを目的とする。

平成24年度では、有限要素法で使用されるメッシュ（要素）を必要とせず、境界拘束を容易に設定できる付帯条件付き多次元型移動最小自乗法（Multi-dimensional Moving Least Squares Method with Constraint Condition : C-MultiMLS 法）⁽¹⁾⁽²⁾の3次元固体問題へ適用する方法を提案し、本手法の妥当性について評価を行う。具体的には、既存手法との境界拘束に関する精度を検証する。次に3次元弾性固体問題を対象に、理論解および既存手法との精度検証を実施し、その有効性について確認する。また、破壊力学問題への適用方法を示し、その妥当性を検討する。

平成25年度では、前年度で構築した本提案手法を弾塑性および大変形問題を考慮できるよう拡張する。また、3次元解析においては大規模モデルを取り扱うため、並列計算による大規模解析への展開を目指す。

(2) 意義・国際社会との比較

昨今の3次元固体解析においては、様々な数値解析手法が提案されている。有限要素法は計算力学を代表する数値解析手法の1つであるが、物理量の設定や境界条件の付与など、メッシュ（要素）と呼ばれる部分領域単位で処理されるため、き裂の進展状況など、不連続面が時々刻々と変化するような問題や大変形問題に対しては、高性能なメッシュ再分割機能が不可欠となり、実用上大きなボトルネックとなっている。

一方、メッシュの考え方を払拭し、高性能な解を求めようとする動きは Belytschko らによって提案されたエレメントフリーガラーキン法（Element Free Galerkin Method : EFG 法）⁽³⁾など、いわゆるメッシュフリー法の研究に見られる。しかしながら、エレメントフリーガラーキン法では、移動最小自乗法（Moving Least Squares Method : MLS 法）をベースとしているため、Dirichlet 型境界条件を設定する際、有限要素法のように直接節点変位を拘束することができない。そのため、境界条件の設定に Lagrange 未定乗数法やペナルティ法等の特別な処理が必要となり、境界を拘束することが煩雑あるいは困難などの問題を抱えている。したがって、有限要素法のように直接節点変位を拘束でき、メッシュを必要としない EFG 法の両手法の利点を生かした方法論の確立は3次元固体解析を実施する上で、極めて有用であると考えられる。

以上のことから、本研究は学術的かつ実用的な側面を兼ね備えており、国際社会におい

でも重要な位置づけとなる研究であると考える．

(3) 研究内容

(A) 3次元 C-MultiMLS 法の定式化

ここでは、本研究で提案する3次元 C-MultiMLS 法の定式化について述べる．今、デカルトの直交座標系 (x, y, z) 上の座標 (x_i, y_i, z_i) に位置する評価点 i について考える．評価点 i 周りにおける変位を $u_{C-MultiMLS}(x, y, z)$ 、 $v_{C-MultiMLS}(x, y, z)$ および $w_{C-MultiMLS}(x, y, z)$ とすると、評価点 i 周りで2次の Taylor 展開をすることによって、次式が得られる．

$$\begin{aligned}
 u_{C-MultiMLS}(x, y, z) &\approx \\
 u_{C-MultiMLS}^h(x, y, z) &= u_i + \frac{\partial u}{\partial x} \tilde{x} + \frac{\partial u}{\partial y} \tilde{y} + \frac{\partial u}{\partial z} \tilde{z} \\
 &\quad + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tilde{x}^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \tilde{y}^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \tilde{z}^2 \\
 &\quad + \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \tilde{x} \tilde{y} + \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial z} \tilde{y} \tilde{z} + \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial x} \tilde{z} \tilde{x}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 v_{C-MultiMLS}(x, y, z) &\approx \\
 v_{C-MultiMLS}^h(x, y, z) &= v_i + \frac{\partial v}{\partial x} \tilde{x} + \frac{\partial v}{\partial y} \tilde{y} + \frac{\partial v}{\partial z} \tilde{z} \\
 &\quad + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \tilde{x}^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \tilde{y}^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \tilde{z}^2 \\
 &\quad + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \tilde{x} \tilde{y} + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial z} \tilde{y} \tilde{z} + \frac{\partial^2 v}{\partial z \partial x} \tilde{z} \tilde{x}
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 w_{C-MultiMLS}(x, y, z) &\approx \\
 w_{C-MultiMLS}^h(x, y, z) &= w_i + \frac{\partial w}{\partial x} \tilde{x} + \frac{\partial w}{\partial y} \tilde{y} + \frac{\partial w}{\partial z} \tilde{z} \\
 &\quad + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \tilde{x}^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \tilde{y}^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \tilde{z}^2 \\
 &\quad + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \tilde{x} \tilde{y} + \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial z} \tilde{y} \tilde{z} + \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial x} \tilde{z} \tilde{x}
 \end{aligned} \tag{3}$$

ここで、 u_i 、 v_i および w_i は評価点 i における x 方向変位、 y 方向変位および z 方向変位、 $\tilde{x} = x - x_i$ 、 $\tilde{y} = y - y_i$ 、 $\tilde{z} = z - z_i$ 、 x_i 、 y_i および z_i は評価点 i の座標値、 x 、 y および z は任意の座標値である．一方、弾性理論（微小変形理論）によって、ひずみおよび回転は、

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \theta_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\
\gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}, \quad \theta_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\
\gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \theta_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)
\end{aligned} \tag{4}$$

となる．ここで， ε_x は x 方向ひずみ， ε_y は y 方向ひずみ， ε_z は z 方向ひずみ， γ_{xy} ， γ_{yz} ， γ_{zx} はせん断ひずみ， θ_x ， θ_y ， θ_z は回転である．したがって，式(1)，式(2)，式(3)に式(4)を適用することにより評価点 i 周りの変位は次式のようになる．

$$\begin{aligned}
u_{C-MultiMLS}^h(x, y, z) = u_i + \varepsilon_{ix} \tilde{x} + \left(\frac{1}{2} \gamma_{ixy} - \theta_{iz} \right) \tilde{y} + \left(\frac{1}{2} \gamma_{ixy} + \theta_{iy} \right) \tilde{z} \\
+ \frac{1}{2} \varepsilon_{ix,x} \tilde{x}^2 + \frac{1}{2} (\gamma_{ixy,y} - \varepsilon_{iy,x}) \tilde{y}^2 + \frac{1}{2} (\gamma_{izx,z} - \varepsilon_{iz,x}) \tilde{z}^2 \\
+ \varepsilon_{ix,y} \tilde{x} \tilde{y} + \frac{1}{2} (\gamma_{ixy,z} + \gamma_{izx,y} - \gamma_{iyz,x}) \tilde{y} \tilde{z} + \varepsilon_{ix,z} \tilde{z} \tilde{x}
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
v_{C-MultiMLS}^h(x, y, z) = v_i + \left(\frac{1}{2} \gamma_{ixy} + \theta_{ij} \right) \tilde{x} + \varepsilon_{iy} \tilde{y} + \left(\frac{1}{2} \gamma_{ixy} - \theta_{ix} \right) \tilde{z} \\
+ \frac{1}{2} (\gamma_{ixy,x} - \varepsilon_{ix,y}) \tilde{x}^2 + \frac{1}{2} \varepsilon_{iy,y} \tilde{y}^2 + \frac{1}{2} (\gamma_{iyz,z} - \varepsilon_{iz,y}) \tilde{z}^2 \\
+ \varepsilon_{iy,x} \tilde{x} \tilde{y} + \varepsilon_{iy,z} \tilde{y} \tilde{z} + \frac{1}{2} (\gamma_{iyz,x} + \gamma_{ixy,z} - \gamma_{izx,y}) \tilde{z} \tilde{x}
\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
w_{C-MultiMLS}^h(x, y, z) = w_i + \left(\frac{1}{2} \gamma_{izx} - \theta_{iy} \right) \tilde{x} + \left(\frac{1}{2} \gamma_{iyz} + \theta_{ix} \right) \tilde{y} + \varepsilon_{iz} \tilde{z} \\
+ \frac{1}{2} (\gamma_{izx,x} - \varepsilon_{ix,z}) \tilde{x}^2 + \frac{1}{2} (\gamma_{iyz,z} - \varepsilon_{iy,z}) \tilde{y}^2 + \frac{1}{2} \varepsilon_{iz,z} \tilde{z}^2 \\
+ \frac{1}{2} (\gamma_{izx,y} + \gamma_{iyz,x} - \gamma_{ixy,z}) \tilde{x} \tilde{y} + \varepsilon_{iz,y} \tilde{y} \tilde{z} + \varepsilon_{iz,x} \tilde{z} \tilde{x}
\end{aligned} \tag{7}$$

ここで， θ_{ix} ， θ_{iy} ， θ_{iz} は評価点 i における回転， ε_{ix} ， ε_{iy} ， ε_{iz} は評価点 i における各軸方向のひずみ， γ_{ixy} ， γ_{iyz} ， γ_{izx} は評価点 i におけるせん断ひずみ， $\varepsilon_{ix,x}$ ， $\varepsilon_{ix,y}$ ， $\varepsilon_{ix,z}$ ， $\varepsilon_{iy,x}$ ， $\varepsilon_{iy,y}$ ， $\varepsilon_{iy,z}$ ， $\varepsilon_{iz,x}$ ， $\varepsilon_{iz,y}$ ， $\varepsilon_{iz,z}$ ， $\gamma_{ixy,x}$ ， $\gamma_{ixy,y}$ ， $\gamma_{ixy,z}$ ， $\gamma_{iyz,x}$ ， $\gamma_{iyz,y}$ ， $\gamma_{iyz,z}$ ， $\gamma_{izx,x}$ ， $\gamma_{izx,y}$ ， $\gamma_{izx,z}$ はひずみの微分量であり，“ x ”は x 方向微分，“ y ”は y 方向微分，“ z ”は z 方向微分を意味している．本手法の誤差評価関数は，各軸方向の変位関数内にひずみや回転などの共通項が存在するため，残差平方和の足し合わせとして，次式のように表される．

$$J_{C-MultiMLS} = \sum_j^N W(r_{ji}, h) \left\{ \left(u_{C-MultiMLS}^h(x, y, z) - u_j \right)^2 + \left(v_{C-MultiMLS}^h(x, y, z) - v_j \right)^2 + \left(w_{C-MultiMLS}^h(x, y, z) - w_j \right)^2 \right\} \quad (8)$$

ここで、 $W(r_{ji}, h)$ は重み関数、 h は重み関数の影響半径、 r_{ji} は評価点 i と影響半径内にある近傍粒子 j との距離、 u_j 、 v_j 、 w_j はそれぞれ近傍粒子 j における x 方向変位、 y 方向変位および z 方向変位である。本手法では、式(8)の誤差評価関数が最小となるように、ひずみや回転などの未定係数を決定する。

$$\frac{\partial J_{C-MultiMLS}}{\partial \mathbf{G}^T} = 0 \quad (9)$$

$$\mathbf{G} = \left\{ \begin{matrix} \theta_{ix} & \theta_{iy} & \theta_{iz} & \varepsilon_{ix} & \varepsilon_{iy} & \varepsilon_{iz} & \gamma_{ixy} & \gamma_{iyz} & \gamma_{izx} & \varepsilon_{ix,x} & \varepsilon_{ix,y} & \varepsilon_{ix,z} & \varepsilon_{iy,x} & \varepsilon_{iy,y} & \varepsilon_{iy,z} \\ \varepsilon_{iz,x} & \varepsilon_{iz,y} & \varepsilon_{iz,z} & \gamma_{ixy,x} & \gamma_{ixy,y} & \gamma_{ixy,z} & \gamma_{iyz,x} & \gamma_{iyz,y} & \gamma_{iyz,z} & \gamma_{izx,x} & \gamma_{izx,y} & \gamma_{izx,z} \end{matrix} \right\}^T \quad (10)$$

(B) 領域積分の方法

本手法では、剛性マトリックスを得るために、粒子ごとの領域積分を実行する必要がある。評価点周りにおける積分を行う方法には、節点積分法があるが、これらは節点周りの領域の面積を乗じることで表現している。そこで本研究では、着目する評価点ごとに積分領域を定義し、Gauss の数値積分を用いて領域積分を行った。具体的には、解析領域全体における積分の重複評価をさけるために、図 1 に示すように評価点および近傍粒子 3 つを用いた四面体領域を考え、評価点まわりのすべての四面体を集合させた領域を積分領域とした。

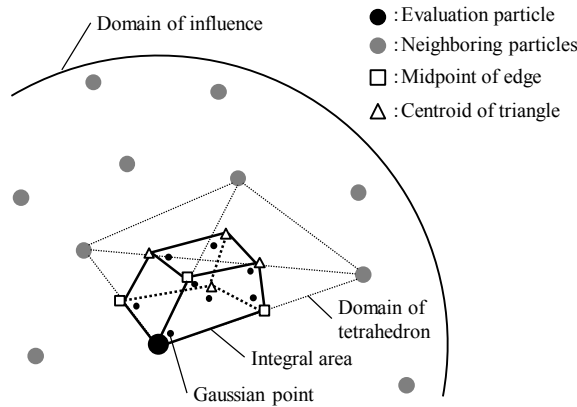


図 1 積分領域の定義 (3 次元)

(C) 境界拘束の精度⁽⁴⁾

ここでは、C-MultiMLS 法（以後、本法と略す）と EFG 法との境界拘束の精度を検証するため、図 2 に示す片持ち梁を対象に、動的陽解法による 2 次元振動解析を実施した。本例題では、ヤング率は 210GPa、ポアソン比は 0.3 を仮定した。また時間刻み幅はクラーン条件を考慮し、 $1.0\text{e-}7$ 秒に設定し解析を行った。

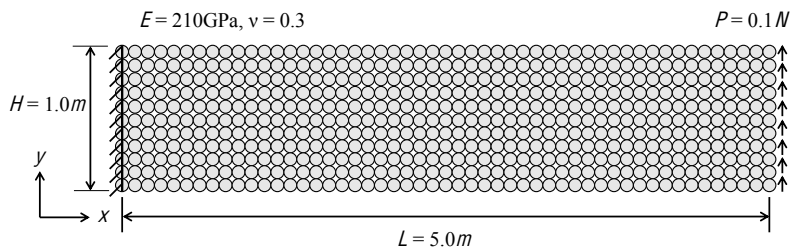
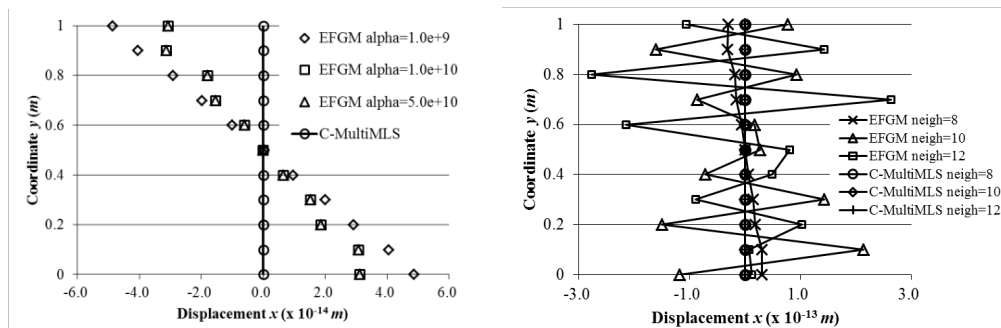


図 2 解析モデル



(a) ペナルティ数の違いによる変位挙動 (b) 近傍粒子数の違いによる変位挙動

図 3 固定端部における EFG 法と本法の変位挙動

図 3 の(a)に図 2 の固定端 ($x=0.0$) における EFG 法および本法の変位挙動を示す。同図より EFG 法ではペナルティ数が大きくなるに伴い、変位拘束の精度が向上することが確認できるが、ペナルティ数が $1.0\text{e}+10$ を用いた場合でも変位を拘束することはできなかった。またペナルティ数を $1.0\text{e}+11$ 以上に設定した場合には解が発散する結果となった。一方、本法では変位拘束できているのが確認できる。

EFG 法と本法における固定端部の近傍粒子数は、解析領域外側には粒子が存在しないため、内部の評価粒子と比べて近傍粒子数が少なくなる。そこで、固体端部の近傍粒子数が精度に与える影響を調べるため、ペナルティ数を $1.0\text{e}+10$ に設定した上で影響領域内に含まれる最低近傍粒子数を 8, 10, 12 と変更して解析を実施した。その結果を図 3 の(b)に示す。同図より、EFG 法では近傍粒子の個数に依存した形で解の振動が見られた。一方、本法で

は近傍粒子の個数にかかわらず変位の振動なく変位を拘束できることがわかった。

(D) 3次元弾性固体問題の精度検証⁽⁵⁾

ここでは、図4に示すような片持ち梁（ヤング率 $E=3.1 \times 10^7 \text{ GPa}$ ，ポアソン比 $\nu=0.3$ ）の自由端に分布荷重（ $P=-1.0 \text{ N}$ ）が作用する静弾性問題を対象として、変位精度について検証する。なおここでは、表記を簡単にするために、2次の項までTaylor展開して得られる本法を“GPM-quadratic”，1次の項までTaylor展開して得られる本法を“GPM-linear”と呼び、定ひずみ四面体要素を用いた有限要素法を“FEM-TET”，線形ひずみ四面体要素を用いた有限要素法を“FEM-TET2”と呼ぶことにする。

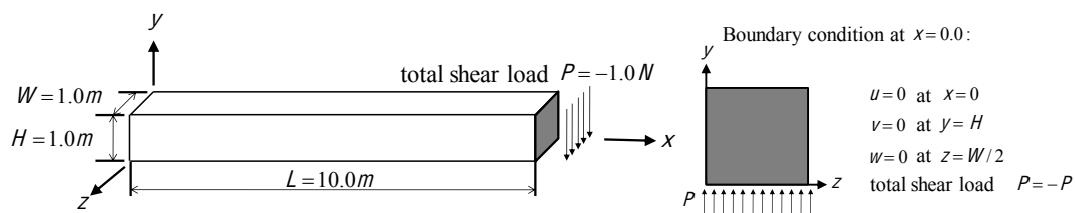


図4 片持ち梁モデル

図5に、総自由度数と荷重作用位置における変位の理論解にて正規化した正規化変位との関係を示す。同図より、総自由度数が少ない場合において、GPM-linearによる解の精度はFEM-TET2による場合より劣るが、FEM-TETの場合よりも優れる結果となった。GPM-quadraticの解は、FEM-TET2と比較して、総自由度数が少ない場合において若干の差があるものの、ほぼ同等な値を示す結果となった。理論解の収束性については、FEM-TETと異なり、GPM-linearにおいては上界から収束することがわかった。

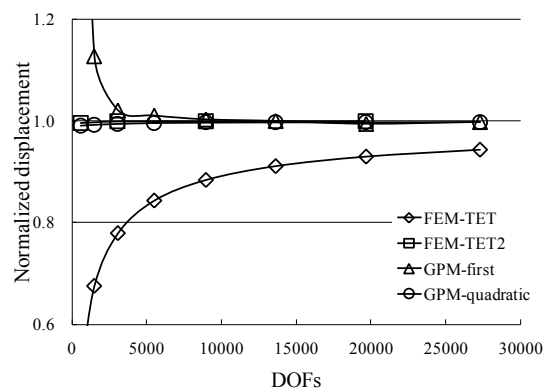


図5 正規化変位と自由度との関係

(E) 破壊力学問題への適用

本法の破壊力学問題へ適用する利点としては、以下のことが挙げられる。有限要素法な

どの既存手法によるき裂進展解析の場合、き裂面における結合部をリメッシュ技術によって完全に分離した形で表す方法が用いられる場合が多く、そのリメッシュ作業が現状のき裂進展解析を実施する上でのボトルネックとなっている。また、ジョイント要素を用いた解析手法なども提案されているが、2重節点の配置する必要があることや、多数の不連続面をモデル化することが困難であるといった課題が報告されている。

一方、本法では、積分領域の境界をき裂面として使用しているため、既存手法で行われるリメッシュ作業は必要としない利点を有していると考えられる。また、2重節点を配置する必要もないため、その作業工数も削減できる。

ここでは、破壊力学問題における本法の妥当性を検討するため、図6に示すような切り欠きを有する梁の中央部に強制変位が作用する場合の2次元き裂進展解析を行った。図7に本解析モデルの粒子分布を示す。また物性値として、ヤング率 $E=39224\text{Mpa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.2$ 、引張強度 $f_t=3.33\text{Mpa}$ とした。また境界条件として、梁の上部中央に強制変位 $u_y=1.0\text{e-}4\text{mm}$ を与えた。

図8にき裂進展状況を示す。同図より切り欠き上部からき裂が発生し、その後、梁上部へ進展する様子を再現できていることを確認した。

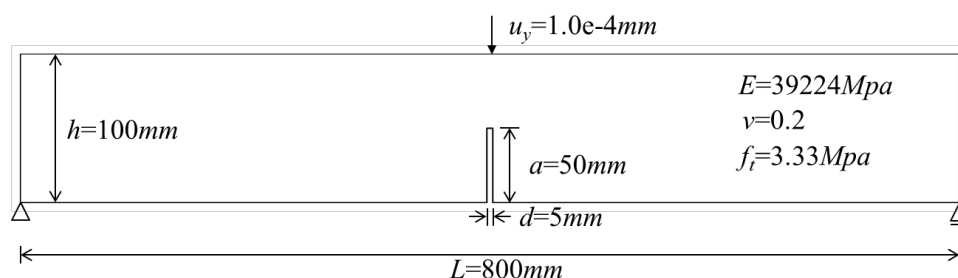


図6 切り欠きを有する梁（2次元）

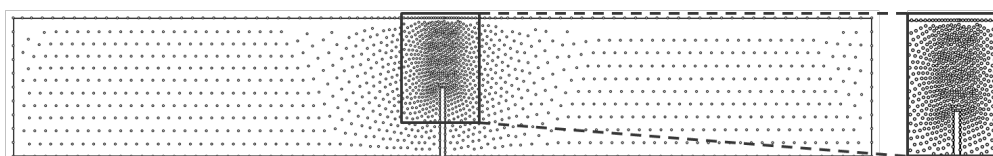


図7 解析モデルの粒子分布（総粒子数：1442）



図8 き裂進展状況（2次元）

次に，自由端において集中荷重を受ける片持ち梁（図 9 参照）の 3 次元き裂進展解析の例を示す．図 10 にき裂進展状況を示す．き裂は固定端上部より現れ，その後，下方方向に進展していく様子を確認した．しかしながら，3 次元き裂進展解析では離散したき裂が多く発生し，連続したき裂とならなかった．その原因として，初期に配置した粒子数が少なく，その結果，十分なき裂経路（本法におけるき裂面）の確保ができなかったことが考えられるため，今後，大規模計算への対応が必要であると考えられる．

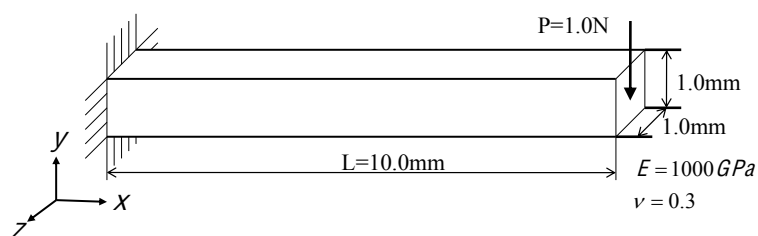
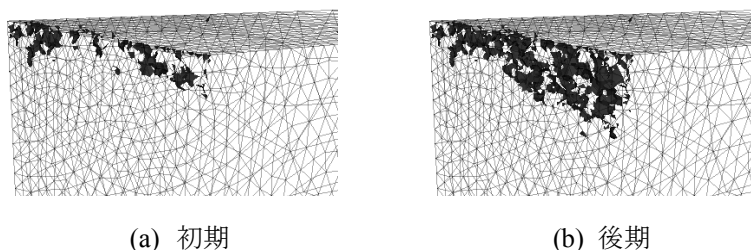


図 9 解析モデルと解析条件（3 次元）



(a) 初期

(b) 後期

図 10 固定端部のき裂進展状況（3 次元）

(4) 平成 24 年度進捗状況

今年度は，有限要素法で使用するメッシュを必要とせず，境界拘束を容易に設定できる付帯条件付き多次元型移動最小自乗法の 3 次元固体問題へ適用する方法を提案し，その妥当性について検討した．今後は，本法を弾塑性および大変形問題を考慮できるように拡張するとともに，並列計算による大規模解析技術を構築し，実構造物への応用について検討していく予定である．

参考文献

- (1) 松原仁，入部綱清，伊良波繁雄：粒子法の微分精度に関する一考察および物理自由度を有する移動最小自乗法，土木学会論文集 A，Vol. 66, No. 4, pp. 723-736, 2010.
- (2) 崎原康平，松原仁，江戸孝昭，原久夫，矢川元基：弾性固体問題における付帯条件付き多次元型移動最小自乗法，日本機械学会論文集（A 編），Vol. 78, No.786, pp. 142-151, 2012.
- (3) Belytschko T., Lu, Y. Y., Gu, L.: Element-Free Galerkin Method, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 37 pp. 229-256, 1994.
- (4) 崎原康平，松原仁，江戸孝昭，矢川元基：付帯条件付き多次元型移動最小自乗法とエレメントフリーガラーキン法における境界条件の精度，日本機械学会論文集（A 編）ノート，掲載予定.
- (5) Sakihara, K. Matsubara, H. Edo, T. and Yagawa, G.: Multi-dimensional moving least squares method applied to 3D elasticity problems, Engineering Structures, Elsevier, 2012 (accepted).

3.1.3. ブロック構造を有する固体の大規模3次元モデル生成および固液連成解析技術の構築

(1) 目標・計画

岩盤内部には大小様々なき裂が存在し、岩盤を成す材料は不均質かつ不確実なものである。また、き裂面の一部には地下水が流れており、岩盤内部の水理学的特性と材料学的特性の両方を考慮する必要がある。したがって、岩盤全体としての力学的挙動を解析することは必然的に複雑なものとなり、岩盤の安定性や岩盤崩落の危険性を精度良く評価することは困難である。これは、岩盤の崩落現象が、岩盤内部のき裂分布、材料分布、地下水流れ、き裂進展挙動などの物理現象が互いに連成した結果として生じることから、これらの現象のすべてを考慮した理論的・実験的検討は極めて困難であることに起因している。特に、海底地すべり現象は岩盤崩落が海底で発生することから、前記の物理的要因に加えて、海水の激しい容積移動が伴う。したがって、海底地すべり現象を解明し、人間社会の安心や安全を担保するためには、数値解析技術を援用した安全性評価が不可欠である。

本研究では、Sulsky らによって開発された MPM (Material Point Method) を基盤とした固体一破壊一流体連成解析技術を構築し、数値シミュレーションの観点から海底地すべり現象の力学的メカニズムやそれに伴って生じる津波の発生メカニズムを理解することを目指す。本研究の計画を図 1 に示す。同図に示すように、本研究では初年度で深層崩壊や表層崩壊を誘発するような様々な形状を有する岩盤 (岩山、連峰) や海底地すべり地層のモデル化技術を構築し、2 次元領域、3 次元領域の順で海底地すべりシミュレータの構築を目指す。また、3 次元解析においてはデータ数が膨大になることが予想されることから、並列計算機を用いた大規模解析への応用も視野に入れて議論する。

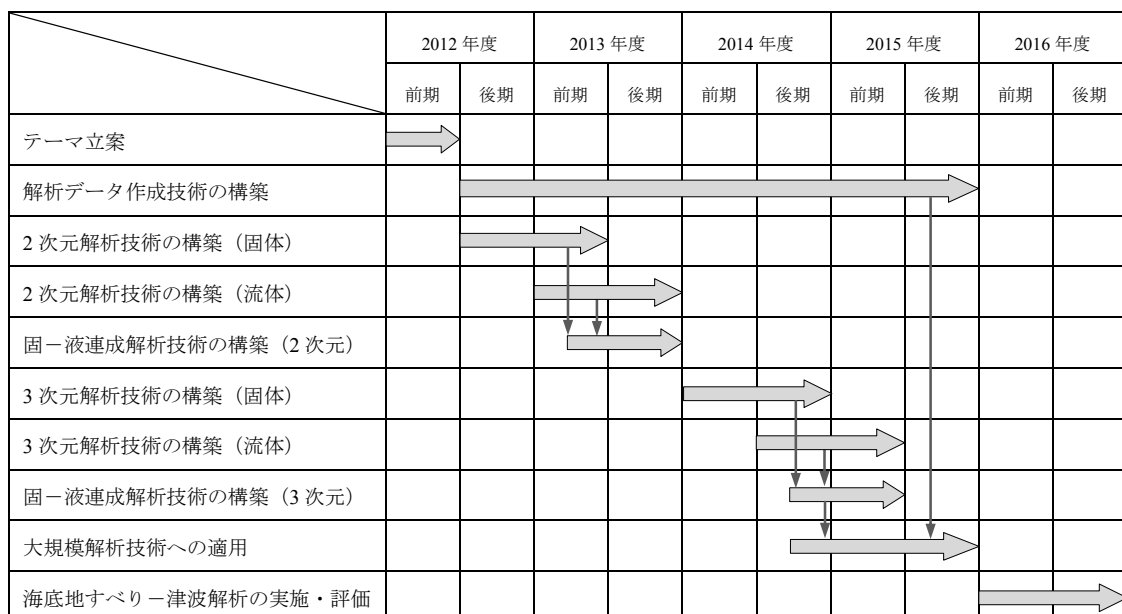


図 1 研究計画

(2) 意義・国際社会との比較

2004 年 12 月、インド洋沖で津波が発生し 22 万人もの死者・行方不明者を生じた。我が国においても 2011 年 3 月、東北地方を襲った津波により大規模な被害が生じ、国際的に津波への防災対策の重要性が高まっている。津波を誘発する原因のひとつに海底地すべりがある。海底地すべりは規模が非常に大きいことが特徴であり、陸上の地すべりによる土塊の移動距離は数百メートル程度であるのに対して、海底地すべり数十キロメートルに及び、すなわち海底地すべりは極めて大規模に発生する自然現象であることがわかる。さらに海底地すべりに関する研究は、地震探査、地形調査、コアリング等を用いて海底地すべりの地形形状の把握、発生年代の特定を行うものが多く、その力学的な挙動やメカニズム解明に着目した研究はあまり行われていないのが現状である。したがって、海底地すべり現象に対して計算力学的視点から解明することを指向した研究の国際社会における意義は極めて大きい。

不連続岩盤の大変形ならびに斜面崩壊を動的に解析できる手法に関して、個別要素法 (DEM) や不連続変形解析法 (DDA) などが挙げられる。個別要素法は、岩盤ブロックを剛体ブロックとし、剛体ブロック同士の衝突をバネとダッシュポットでモデル化する手法である。一方で不連続変形法は、FEM と同様に、ポテンシャルエネルギーの最小化原理に基づく手法であり、岩盤ブロックを弾性体とし、ブロック間の接触にペナルティ法による貫入制御を行うことで、ブロックの応力、ひずみ等が計算される。しかしながら、個別要素法は岩盤ブロックを剛体としているため岩盤の変形が無いものとしており、さらに解の唯一性が保証されておらず、ブロック同士の接触に関して力学的に曖昧な定義が使われているため、落石のように物体の動きが速い問題においては解の安定性が得られない場合がある。接触に関する検討が現在も進められているのが現状である。不連続変形法は、個別要素法とは異なり、ポテンシャルエネルギーの最小化原理に基づくため解の唯一性は保証されているものの、3 次元においてブロック同士の接触に関する定式化が極めて複雑であり、3 次元問題への拡張の足かせとなっている。さらに、大小様々なブロックを有する問題においては、ブロック同士の貫入制御が難しく、ブロック同士の透過やブロックが飛び散るなど実現象では有り得ない挙動が得られる場合がある。すなわち、不連続岩盤の大変形問題を動的に解析できる手法は存在するが、未だ確立されていないのが現状である。特に、海底地すべり現象は流体と固体が連成し合い、多くの亀裂を含む不確実な固体の 3 次元的な破壊現象を伴う極めて複雑な力学的問題であるから、精度の高い大容量・高速 3 次元計算が必要不可欠となり、数値計算手法を扱う計算力学分野においてはチャレンジングな対象である。

以上のことから、本研究は学術的かつ実用的な側面を兼ね備えており、国際社会においても重要な位置づけとなる研究のひとつであると考えらる。

(3) 研究内容

(A) 任意形状の地形形成技術の構築

本研究では、前述したように、Sulskyらによって開発されたMPM (Material Point Method) を基盤とした固体－破壊－流体連成解析技術を構築し、数値シミュレーションの観点から海底地すべり現象の力学的メカニズムやそれに伴って生じる津波の発生メカニズムを理解することを目標としている。そこで、本年度は様々な地形の3次元モデル化技術（3次元ブロックモデルの自動生成技術）を確立することに取り組んだ。以下に概略を述べる。

(B) 地形のモデル化方法

(1) 四面体要素のブロック化

四面体を用いたモデル生成技術は有限要素法の発展とともに進化してきた。近年においては、機械部品のように極めて複雑な形状を有する対象であっても高い精度のメッシュモデルを生成することが可能となっている。そこで、本研究ではブロックを作成する際、四面体要素で分割されたメッシュモデルを利用することにした。任意形状のモデルを四面体要素に分割する際、例えば、オープンソースの3次元 Mesh Generator である TetGen を用いて作成することができ、本研究ではこれを用いることにした。四面体を用いてブロックを作成する時、本研究では、ブロックの面は四面体要素の頂点、各辺の中点、各面の重心、要素の重心を用いて形成することを仮定した。したがって、ブロック面は必ず4つの点で構成される。図2に示すように四面体要素が一つの場合、この要素から作成されるブロックは4つであり、各ブロックは6つの面を有している。各ブロック面は頂点、辺の中点、面の重心、辺の中点からなる面が3面、要素の重心、面の重心、辺の中点、面の重心からなる面の3面が存在する。隣接する四面体要素が存在する時、隣り合うブロック同士の重複する面を取り除いてできるブロックを1ブロックとした。すなわち四面体要素における頂点が解析領域の境界に位置していない場合、その頂点はブロック面を形成する点としては用いないものとする。したがって、ブロックのサイズは要素サイズに依存するため、任意形状のモデルを四面体要素にて分割する際に、要素サイズを均一に分割した場合には各ブロックのサイズは均一となり、要素サイズをランダムに分割すると大小様々なブロックを有す地形モデルの作成が可能となる。

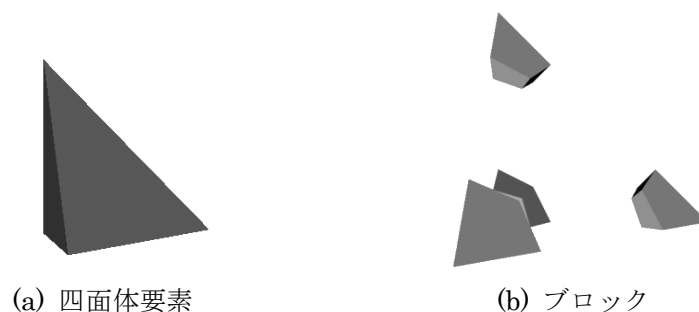
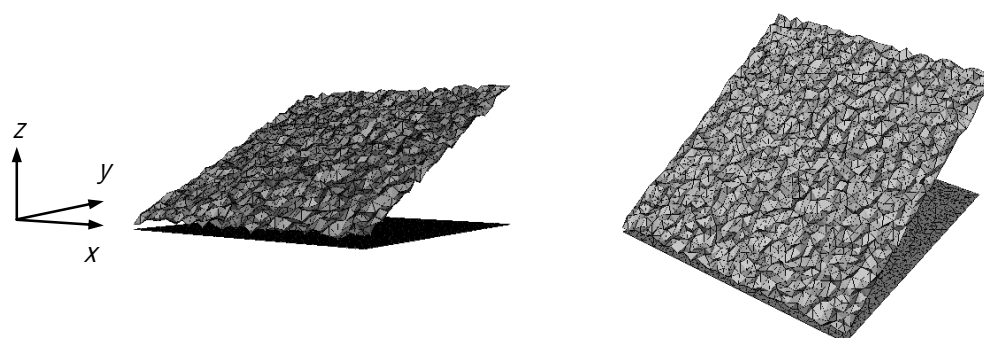


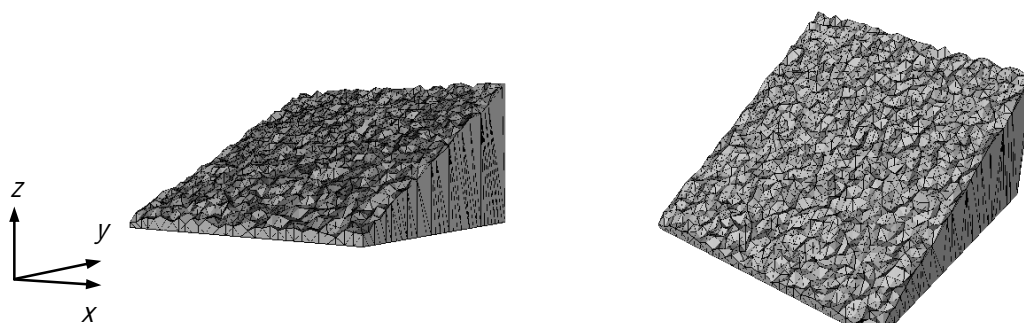
図2 四面体要素のブロック化

(2) 3次元地形のモデル化

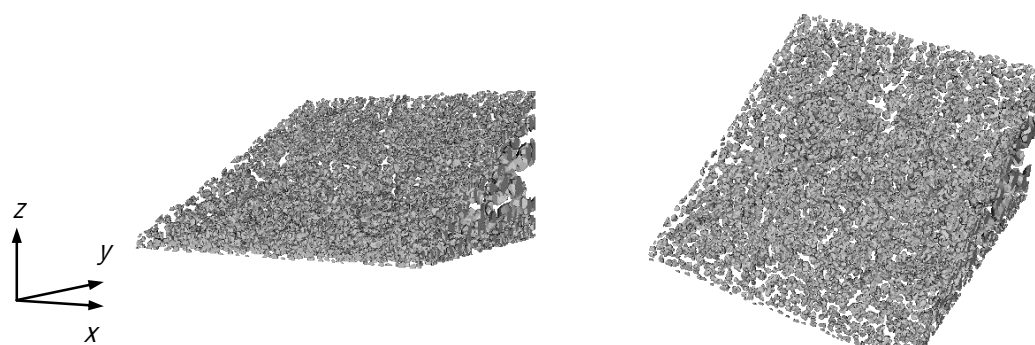
ここでは、3次元地形のモデル化手法について述べる。モデル化する地形の平面を x - y 平面とし、高さ方向を z 方向とする。まず x - y 平面の領域を決め、その領域を三角形要素にて分割する。そして、三角形要素の各頂点における z 座標に任意の値を与えた平面と、与えていない平面 ($z = 0.0$) を作成する (図 3(a)参照)。このとき、三角形要素は3次元モデルの表面パッチとなるため、各平面の三角形要素と2面の境界における節点同士を結んだ表面パッチを用いて、3次元地形のモデルにおける表面パッチを作成する (図 3(b)参照)。そして、この表面パッチのデータを用いて TetGen にて地形モデルを四面体要素にて分割し、(1) 節の方法にてブロック化を行う (図 3(c)参照)。なお本研究では、三角形要素を作成する際、オープンソースの2次元 Mesh Generator である Triangle を用いた。



(a) 2面の x - y 平面の作成



(b) 表面パッチの作成



(c) ブロック化

図 3 移動体の生成方法

(3) 不動域の作成

不連続変形法や個別要素法のように斜面崩壊をシミュレーションする場合，図 4 に示すように，上部の移動体と下部の不動域が作成され，一般的に不動域は 1 ブロックで表わされ，移動体に比べ，ブロックのサイズは極めて大きい．ここでは，そのような不動域の作成方法について述べる．まず (2) 節の方法を用いて，不動域の地形モデルを作成し，表面パッチを作成する．この表面パッチを用いて 1 ブロックの不動域を作成する．このとき (1) 節で述べたように，ブロック面は 4 つの点で構成されるため，表面パッチを形成する三角形要素内に点を設け，頂点，辺の中点，要素内の点で構成される 4 点をブロックの面とした．すなわち図 5 に示すように，1 つの三角形要素からできるブロック面は 3 面である．この面を用いることで，不動域が 1 ブロックにて表現可能となる．図 6 にフローチャート示した．本手法を用いることで，任意形状の不動域ならびに移動体の作成が可能となり，図 7 に示すように，移動体と不動域の結合を行うことで容易に任意形状の 3 次元地形をモデル化することが可能となる．

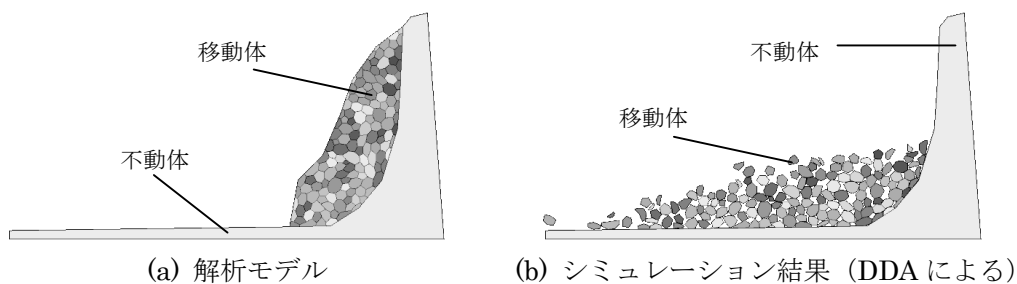


図 4 2次元ブロックを用いた地すべり解析の例

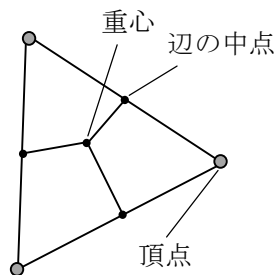


図 5 三角形要素の分割

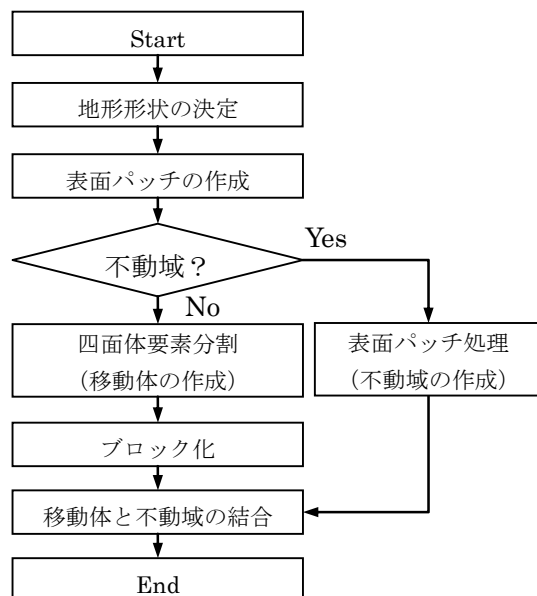
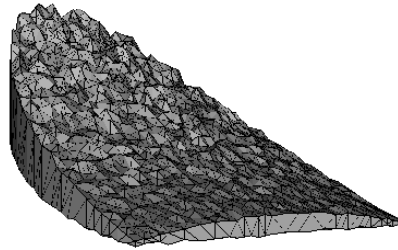
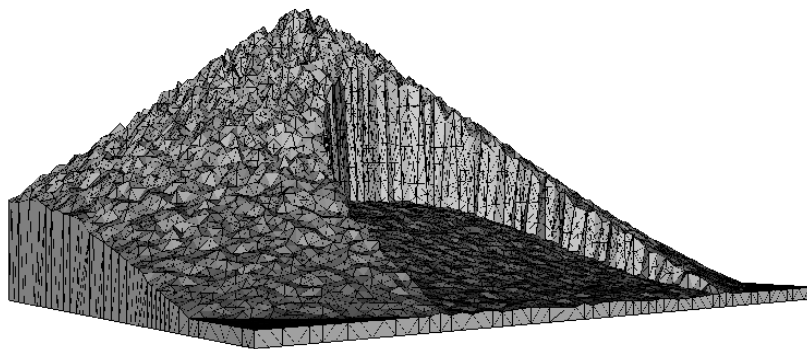


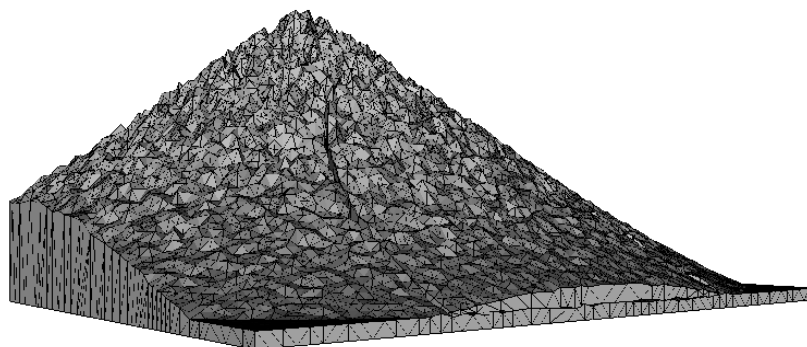
図 6 四面体ブロック化フロー



(a) 移動体 (# Block 1267)



(b) 不動域 (# Block 1)



(c) 地形モデル (# Block 1268)

図 7 任意形状の地形モデル

(4) 平成 24 年度進捗状況

今年度は、地すべり地形に対する3次元ブロックモデルの自動生成技術について議論した。ブロックの作成に関して、地形モデルをオープンソースであるTriangleとTetGenを用いて四面体要素にて作成し、その四面体要素の頂点、辺の midpoint、面の重心、要素の重心を用いて、四面体要素からブロックの作成を行った。また、地形モデルの表面パッチを用いることで複数のブロックからなる移動体ではなく、1ブロックからなる不動域の作成も行った。その結果、移動体と不動域からなる任意形状の地形モデルの作成が可能となった。今後はこれらの地形データならびにMPMを用いて斜面崩壊、海底地すべり等の大変形問題に適用し、崩壊メカニズムについて検討していく予定である。

参考文献

- (1) 松原仁, 江戸孝昭, 原久夫: 岩盤のき裂ネットワークを考慮した不連続体解析手法の提案およびき裂進展解析, 日本計算工学会論文集, No.20120017, 2012.
- (2) Hitoshi Matsubara, Takaaki Edo and Hisao Hara: Crack Propagation Model for Discrete Fracture Network based on GFEM and MLSM, Proceedings of the 4th International conference on computational methods, 2012.
- (3) Hitoshi Matsubara: Numerical simulation of fracture network in rock based on GFEM and MLSM, Proceedings of KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2012, pp. 227-231 2012.
- (4) 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫: 粒状構造を有する脆性材料の離散き裂進展解析手法の開発および性能評価, 土木学会論文集 C (地圏工学), 印刷中.

3.1.4. 粒子法手法による並列流体-構造連成解析手法

(1)目標・計画

本研究では、流れと構造物を粒子の集合体で表現する粒子法により、流体と構造体の相互作用による運動解析を数值的に行うことを目的にしている。

平成 24 年度は、構造物の表面性状の違いによる境界条件の変化がもたらす流れ場や運動への影響に取り組み、構造物と流れの相互作用点となる境界条件に新たなモデルを導入しその評価を行う。特に、表面性状としては生体などに関連する親水性をもつ表面における滑り効果を考慮した、物体の運動と周辺流れ場の連成計算を可能にすることを旨とする。具体的には、水に突入する物体が生成する水しぶきの数値シミュレーションを取り上げ、その物体表面の滑り度合いと境界条件の関連をモデル化する。そして、物体と流体の境界における滑りの条件の差により、物体突入により生成される水しぶきの形状変化などをシミュレーションできるようにする。

平成 25 年度以降では、前年度で取り上げた落下する物体の弾性を考慮に入れ、流体と構造体の変形も考慮に入れた連成問題に着手する。金属のような剛体ではなく生物のように柔らかい物体が落下し着水するときには、着水時の水面からの反作用などにより物体の形状に変形が伴う。また、着水時の物体変形は抗力を変化させ周囲の流れ場にも影響を与えるため、流れ場と物体変形の連成問題が生じる。そういった流体からの圧力変化による物体の変形を考慮に入れた数値計算を可能にし、粒子法を用いる利点である大変形や破砕のような自由境界面のシミュレーションの表現能力の向上を行う。さらに、将来的にはこれらの 3 次元化と大規模粒子数による詳細なシミュレーションを可能になるように並列計算への発展を目指す。

(2)意義・国際社会との比較

流体と個体の相互作用を扱う粒子法（MPS 法）シミュレーションを行うにあたって、個体である物体の表面性状の違いを数値計算に導入する方法を提案する。ここで扱う表面性状とは、高分子素材であるハイドロゲルといった表面に親水性で滑り特性を持つ物体を対象とする。

ハイドロゲルとは、寒天やゼラチンのような食品から医療や生体材料まで幅広く用いられている水を溶媒とする高分子ゲルであり、魚やカエルといった生物の体表面のヌメリはそういった高分子ゲルの一つである Mucin が主な成分である。これまで、我々は生物とそれらを取り巻く流体環境の解明として、生体材料でもあるハイドロゲルとその周辺流れについての研究を行ってきた。

本研究のように物体と流体の相互作用の先行研究としては、表面性状と壁面の水滴や表面の粗さや材質による流れ場の影響についての研究が行われており、液滴の接触角の調査から車体の撥水性や船体の抵抗低減の問題まで多く取り扱われている。また、落下物体が水面に衝突するときに生成されるスプラッシュ（飛沫）に関しては、物体の落下速度や形

状によってスプラッシュの形状が異なるが、さらに物体の材質の違い（例えばハイドロゲルとアクリル樹脂）によっても観察されるスプラッシュの形状に差が生じる。つまり、同じ運動条件でも表面性状の違いによって周囲の流れ場は異なる現象になるため、表面に滑りがあるような物体と流れの相互作用を数値シミュレーションで計算するには、物体と流体の境界条件に滑りの効果を記述するモデルの導入をする必要がある。

これまで数値シミュレーションにおける表面性状の違いの扱いとしては、ディンプルやボルテックスジェネレータのような剥離などを扱ったりする物体表面の構造的な点に着目した研究は多くなされてきたが、それら研究の物体と液体の境界は滑りなし条件で設定されており、上で挙げたような生体のぬめりのような表面の滑り効果を考慮した物体と流れの相互作用を扱ったシミュレーションはない。また、自由表面を伴う流れ場の解析に有効な粒子法の一つである MPS 法 (Moving Particle Semi-implicit 法) によるシミュレーションも多く研究成果があるが、既存の方法のままでは材質による差は表現できていない。一方、生体や医療といった分野の循環器系や細胞などのシミュレーション解析においても、血管壁や膜などの表面の滑りの扱いについては特に言及されていない。よって本研究では、ハイドロゲルといった親水性物質による物体とそうでない物体といったように、物体の壁面応力に違いのある物体と周辺流れ場の相互作用を計算する方法について提案する。

(3)研究内容

ハイドロゲル表面の滑りの効果を MPS 法に取り入れる方法として、ここでは表面の滑りを物体と流体の壁面の摩擦の低減として表し、その低減率を slip ratio として定義し、物体と流体の壁面のせん断力の計算に適用する方法をとった。まず、ハイドロゲルの物性値の一つである膨潤度 S (swelling degree) は、下記の式(5)のようにゲルの質量に対する水の質量の比で表される。

$$S = (m_{\text{water}} + m_{\text{gel}}) / m_{\text{gel}} \quad (1)$$

ここで m_{water} は溶媒となる水の質量、 m_{gel} はゲルの乾燥材料の質量である。本研究における、ハイドロゲル壁面と流体との間に生じる滑り率(slip ratio)については、流路を流れる水の PIV 実験により寒天壁面近傍の垂直方向の水の速度勾配からハイドロゲルの壁面応力を測定し、そこから滑り率(slip ratio) α として数値計算の境界条件に導入した。図 1 はその実験の模式図であるが、寒天およびアクリル(滑り無し条件として)でできた斜面上を流れる水の流速を水中に混入させたパーティクル使ってビデオ撮影により計測し、その壁面近傍における速度勾配から壁面応力を算出した。ここでは、アクリル斜面を滑り無しとして基準の壁面応力 τ とし、次式によって壁面近傍の速度勾配から算出する。なお、ハイドロゲルの動摩擦抵抗係数 μ は水 1.0×10^{-6} とする。

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \Big|_{y=0} \quad (2)$$

また膨潤度 S のときの壁面応力を τ' とし同様に壁面近傍の速度勾配から算出し、上の滑り無しの場合の応力との比を滑り率 α とした。

$$\alpha = \tau / \tau' \quad (3)$$

S に対して α は、実験結果より次式のように線形の値をとる結果が得られ、

$$\alpha = 1 - \beta S \quad (4)$$

その膨潤度 S と α の関連を図 2 に示す。この実験値より係数 β は 0.0012 であった。例えば膨潤度 150 では α は約 0.95 であり約 5% の壁面摩擦抵抗の低減になることを示している。(なお、no-slip の場合は $\alpha=1$ で、また完全にスリップする場合の α は 0 である)。

ここで得られた α は、ゲル壁面と水の境界付近における粘性の計算時の重み関数の係数と

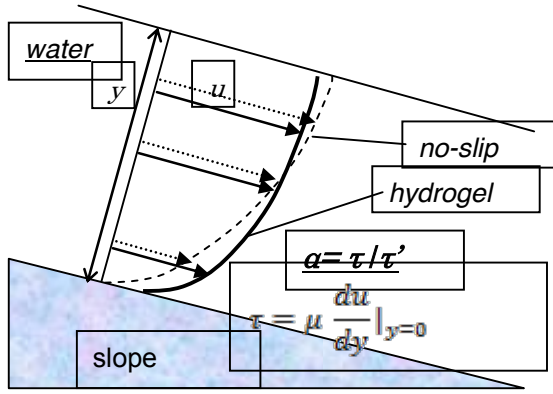


図 1 Definition of slip ratio α and flow on the hydrogel slope. The τ is wall shear stress on the slope with no-slip condition. The τ' is that on the slope with hydrogel (agar).

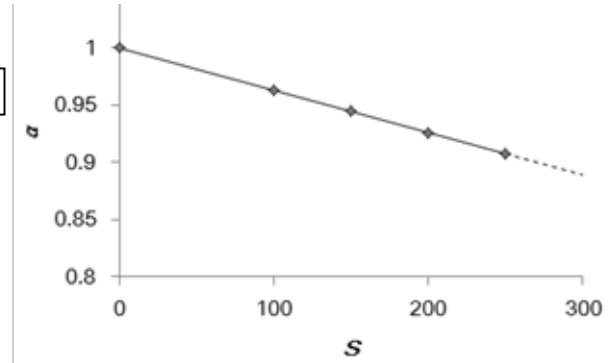


図 2 Relationship of swelling degree S of agar and slip ratio α , which was obtained experimentally.

して用いる。MPS 法では、各パーティクル間のせん断力の影響度を次の重み関数 κ として与え、本研究では、図 3 に示すように、寒天ゲル壁面と周囲の水の滑り（壁面せん断力の低減）の影響として、粘性項の計算における重み関数に滑り率 α を掛け合わせた κ_H を寒天ゲルの周囲 r_c にある水粒子との間にのみに用いた。

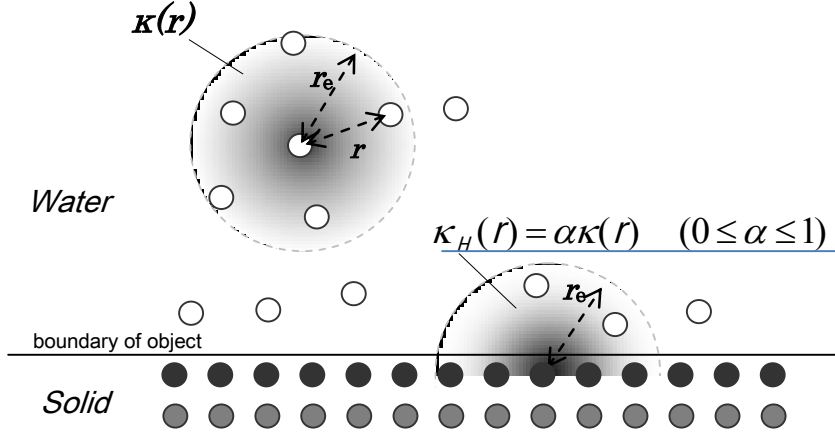


図3 Difference of weight functions κ_H and κ . The distance between particles denoted by r . The κ_H is used between the particle on the boundary of the hydrogel object and the virtual water particle near the boundary. Here, κ is used between the other particles, and α is the coordinate as a ratio of κ_H and κ .

$$\nabla^2 u_i = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum [(u_j - u_i) \kappa_H(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)], \quad (5)$$

$$\kappa_H(r) = \alpha \kappa(r), \quad (6)$$

ここで、 d は次元数、 λ は分散を表す定式で n^0 は初期粒子密度である。ただし、他の水同士
の重み関数には通常の κ を用いる。つまり、ハイドロゲルの表面を構成するパーティクルか
ら半径 r_e にある水粒子との粘性項計算についてのみ α を掛け、重み関数 κ_H で計算すること
で壁面応力を α 分だけ小さくしハイドロゲル壁面近傍の滑りを表現した。なお、他の項の
圧力勾配 ∇P などの扱いは従来の MPS 法と同じで、他の数値計算の解き方も従来の手法を
そのまま使用しており、本研究ではハイドロゲル壁面近傍のせん断力の扱いが異なる。

(4)平成 24 年度進捗状況

本研究の手法の検証として、管路内を流れるポアズイユ流れの二次元シミュレーション
を行った。図4に、高さ h の管路に水を流した時の、床面からの距離 y とその位置における
流速 u の分布について、床面の滑り無し条件 (no-slip) と滑り有り条件 (膨潤度 $S=100, 250$)
それぞれの結果を示す。床面の滑り無し条件および滑り有り条件共に流れの計算領域上面(y
 $= h$)は slip 条件で x 方向に流速 u_0 を与えるものとしている。速度分布 u は u_0 で、また高さ y
は h でそれぞれ割って正規化している。

シミュレーションによる結果をポアズイユ流れの速度分布の理論値と比較すると、同等の速度勾配が得られている。図中右に拡大図を示すが、滑りがある $S=250$ の結果において、no-slip の結果より床近傍で約 10%流速が増加しており、上述の実験と同様の結果になっていた。また、膨潤度の上昇に伴いハイドロゲル表面の滑りによる効果で壁面流速は増加している。つまり、壁面応力は表面近傍の速度勾配に比例するが、シミュレーション結果がハイドロゲルの膨潤度 S の増加により表面近傍の速度の変化率が減少しており（図 4 では縦に速度を取っているので傾きが急になる）、slip ratio の導入による表面の滑りによる効果で抵抗低減の効果の様子が実験同様に示せたことを表している。以上、壁面に slip ratio を滑り有り壁面近傍に導入することで、実験の結果と同様の計算が可能になり本手法は妥当であることが確認できた。

3.1.5. 振動現象の流体-構造連成解析と自己組織化マップを用いた分類

(1) 目標・計画

本研究では、流体と構造体の相互作用による振動現象の数値解析に行い、自己組織化マップを用いて解析データの分類を行い、条件による振動現象の特徴を検出することを目的にしている。条件による振動現象の特徴が分かれば、流路内に設置する温度計、圧力計などのさや管の選定や、楽器などの共振を伴う弦などの設計に役立てることが期待できる。

自己組織化マップは、高次元のベクトルデータを低次元空間(マップ)に写像するものであり、高次元データのクラスタリングを行える。また、マップを見ることでデータの特徴抽出やマイニングを行うことができる。自己組織化マップのマップ部分をモジュールに置き換えたモジュラーネットワーク型自己組織化マップもあり、モジュールを MLP(Multi Layer Perceptron)に置き換えたものが主で、入出力関係を保持することができる。このモジュラーネットワーク型自己組織化マップを用いると、分類後に未知の入力から想起して意図する出力を提示することが可能であり、設計に用いることができる。

自己組織化マップを用いてクラスタリングすることより、振動現象の分類が可能で、マップに写像することで直感的にデータを扱うこともできると期待できる。

平成 24 年度では、ADVENTURE システムのモジュールの一つである、ADVENTER_Fluid を用いて、流体-剛体の移動境界問題を解いた。移動境界には ALE 法を用いて解析を行う。また、解析対象は簡単のため 2 元無限円柱をモデルとして解析を行った。

平成 25 年度以降は、様々な条件での解析を行い、データを収集する。収集したデータを自己組織化マップでマッピングして振動現象の分類マップを作成し、ロックイン現象になりやすい条件、そうではない条件などを示唆するマップを形成する。また、流体-構造での場合の分類も目指す。

(2) 意義・国際社会との比較

自己組織化マップは分類機としてデータマイニングに多く用いられる手法であり、入力データをマップ上に配置することができる。また、この配置は似たデータ同士を近くに配置し、そうでないデータを遠くに配置するといった特徴を持つ。そのことから、入力データのクラスタリングが可能となり、データマイニングが行える。

本研究では、自己組織化マップを用いた振動現象の分類を行う。振動現象はロックイン現象の再現や渦励振など様々な研究が行われているが、特徴を分類した文献は目にしていない。本研究ではロックイン現象を視野に入れて研究を行う。境界条件による円柱の振動運動の特徴でクラスタリングできれば、ある条件下での振動がロックインするかないかの予想をたてることができる。このことにより、流路内のさや管の選定に役立てたり、ロックイン現象を意図的に起こす楽器の設計に役立てたりすることが期待できる。

また、流体・構造連成現象も視野にいれ、構造側が変形する場合の自己組織化マップによる分類は、構造物の変形具合をマップに写像することで、意図する構造の変形を選択的に選び出し使うことができる。

入力データを様々に変更することで、多様なマップを作成でき、流体・構造連成解析の解析データをまとめることができ、そのデータをベースに未知の条件でも、ある程度の予測をたてることが可能であると考えられる。

以上のことから、本研究は学術的かつ実用的な側面を兼ね備えており、国際社会においても重要な位置づけとなる研究のひとつであると考えられる。

(3) 研究内容

自己組織化マップ、並びにモジュラーネットワーク型自己組織化マップを作成した。自己組織化マップは2階層のニューラルネットワークであり、図1のように入力層と出力層(マップ)とに分かれる。また、出力層では格子上に配置されたユニットUが存在し、ユニットと入力層を結合荷重 w が結んでいる。自己組織化マップは競合学習により勝者ユニット(図1の場合 U_m)とその近傍(赤いサークル内)のユニットが入力データに似るように修正される。入力データを変更して同様に繰り返していくことで入力データをクラスタリングすることができる。

例として、動物のクラスタリングを行った。動物は16種類の動物を16個特徴(体(大, 中, 小), 2足歩行, 4足歩行, 羽, 縞, たてがみ, etc.)で表し、マップに配置した。出来上がったマップを図2に示す。

図2より、鳥類が下側に集まり、上に草食動物、肉食動物がクラスタリングできた。以上より、入力データを自己組織化マップで分類することが可能であり、特徴を見つけ出すことが可能である。

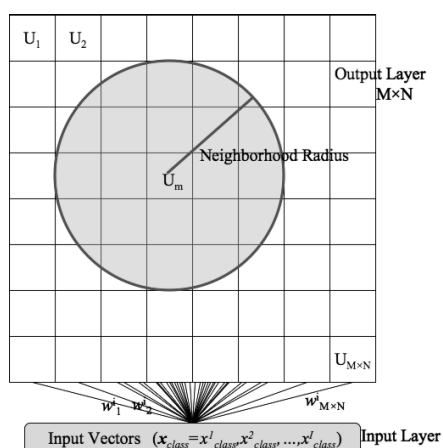


図1 自己組織化マップ概略図

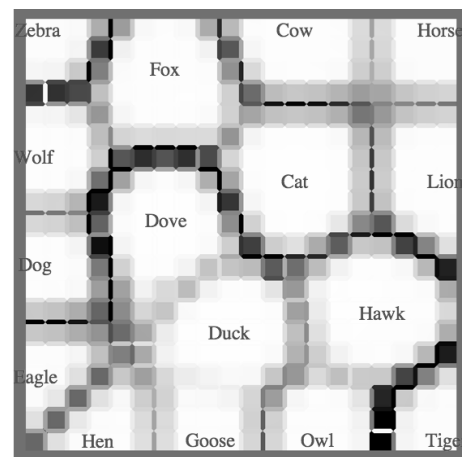


図2 動物のクラスタリング

本研究での入力ベクトルは、流速、円柱の直径、Re 数、バネ定数、円柱質量、最大振幅、平均振幅、波長などを考えている。

次に、流体・構造連成解析では、ADVENTURE システムを用いる。今回は移動境界問題を扱うために、ADVENTURER_Fluid モジュールを書き換えて、解析を行う。

ADVENTURE_Fluid モジュールは有限要素法による大規模並列非圧縮性流体解析モジュールであり、六面体用コードと四面体用コードがある。本研究では四面体用コードを用いる。四面体用コードは P1-P1 要素をベースとして、SUPG/PSPG 法による安定化が施されている。

ADVENTURE_Fluid モジュールに含まれる四面体用コード ADVENTURE_Fluid_Tet は P1-P1 要素を用いた有限要素法に非圧縮粘性流体解析コードで、SUPG/PSPG 法による安定化手法が用いられ、ALE 表記による有限要素法の弱形式は以下のように表される。

$$\begin{aligned}
 & \int w_i \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j u_{i,j} - f_i \right) d + \int w_{i,j} -_{ij} d + \int q u_{i,j} d \\
 & + \sum_e \int_e \text{SUPG} u_j w_{i,j} \cdot \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_k u_{i,k} - f_i \right) -_{ik,k} \right] d \\
 & + \sum_e \int_e \text{PSPFG} \frac{1}{-} q_i \cdot \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_k u_{i,k} - f_i \right) -_{ik,k} \right] d \\
 & = \int_h w_i h_i d
 \end{aligned} \tag{1}$$

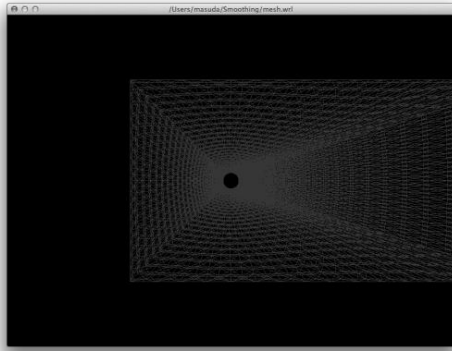
メッシュの移動がうまく扱われているか、円柱を sin 波で強制振動させて、メッシュの移動がうまく行えているか確かめた。図 3 に強制振動させた円柱周りのメッシュを示す。円柱の移動に伴ってメッシュも移動している。

実際は円柱にかかる流体力から円柱の移動量を求めることとなる。そのとき、Verlet 法を用いて円柱の次ステップの移動量を算出する。Verlet 法による円柱中心座標の移動位置の算出方法と、円柱表面の移動速度の算出方法を以下に示す。

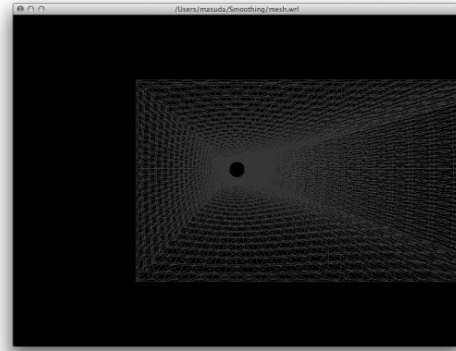
$$Pos_{new} = Pos_{old} + v dt + \frac{dt^2}{2m} (trac - kx) \tag{2}$$

$$v_{new} = v_{old} + \frac{dt}{2} (a_{new} + a_{old}) \tag{3}$$

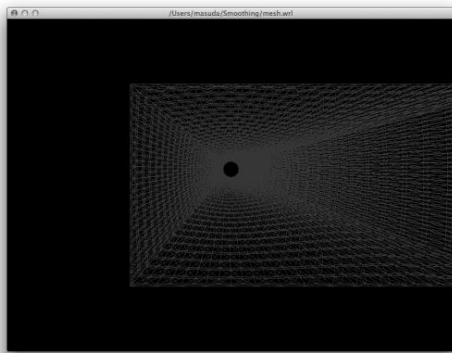
ここで、Pos は円柱の中心座標、v は円柱の移動速度、dt は時間刻み幅、m は円柱の質量、trac は円柱にかかる流体力、k はバネ定数、x は円柱の初期位置からの距離を表す。a は円柱の加速度である。式(2)より円柱の位置を求め、式(3)により円柱の速度を更新していく。これにより、円柱の運動を表すことができる。



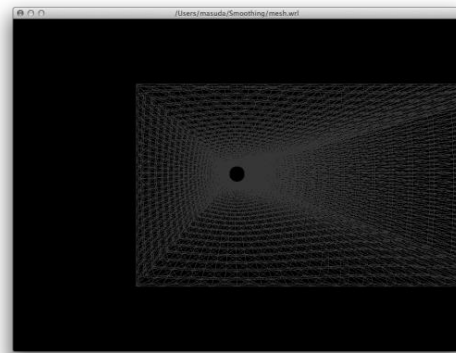
(a) $\sin 0$



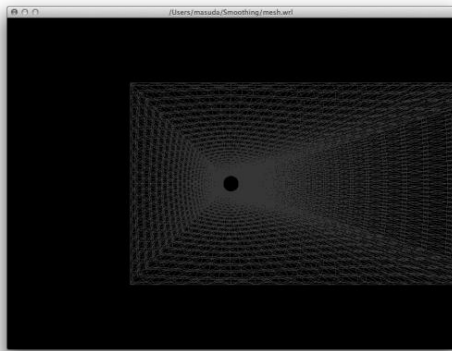
(b) $\sin 1/4 \pi$



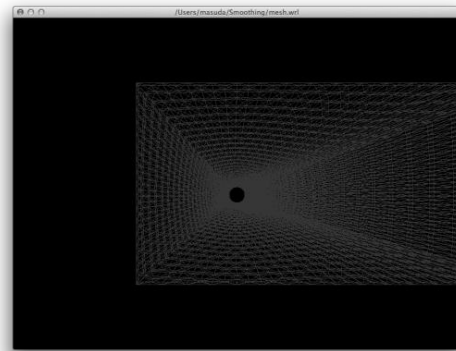
(c) $\sin 1/2 \pi$



(d) $\sin 3/4 \pi$



(e) $\sin \pi$



(f) $\sin 5/4 \pi$

図3 メッシュの移動制御

ここで、ADVENTURE_Fulid モジュールを書き換えたので、円柱周りの流れ解析を行う。このとき円柱は支持されていて動かない。円柱の揚係数，抗力係数，ストローハル数を調べる。

また、本研究の連成問題の解析モデルは図4に示す。モデルはy方向にだけバネで支持した円柱を風下に設置し、風上から一様流速を与える。このときx方向、z方向には動かない。

解析条件を適宜変更しながら、解析データを収集して、振動現象に関する自己組織化マップを作成する。

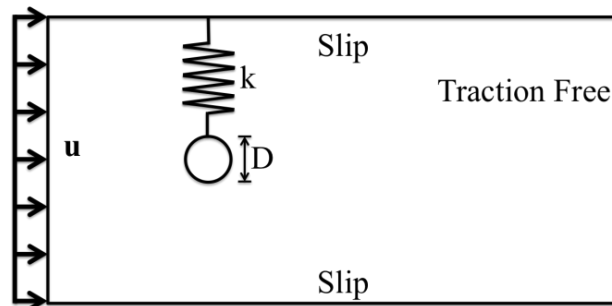


図4 解析モデル(イメージ)

(4) 平成24年度進捗状況

自己組織化マップで動物のクラスタリングを確認した。動物のクラスタリングを行った結果、特徴別にマップ上に配置されていることが確認できた。

流体-構造連成解析に向けて、ADVENTURE_Fluid モジュールを ALE 表記で SUPG/PSPG 法による 安定化有限要素法に書き換えた。また、メッシュの移動制御ができるようにした。Verel 法を ADVENTURE_Fluid モジュールに組み込み、円柱の受ける流体力から移動量、移動速度を求めることができた。

今後は、解析精度の確認と、移動境界問題を解き、解析データを収集して自己組織化マップでマッピングを行う予定である。

3.2. 大規模並列化グループ

2011 年に京コンピュータが 10 ペタ(Peta: 1 京)フロップス(Flops: Floting Points per second)に達し, TOP500 では 2 回連続世界 1 位となり, 2012 年には米国の Sepuoia, Titan がそれぞれ 1 位を記録し, 次世代スーパーコンピュータは, ペタの次の世代, つまりエクサ(Exa)フロップスを指す時代へと突入している. このことからハードウェアとしてコンピュータの性能が向上するスピードがいかに速いかが分かる. その一方で, これらの大規模なコンピュータ上で動作する効率的なソフトウェアの開発に関しては, その開発スピードもソフトウェアの品質も十分とは言えず, 多くのソフトウェアが 20 世紀の主要なソフトウェアを修正し続けて用いられているのが実情である. 特に, 1970~1980 年台に既に確立されているアルゴリズムに対して, 並列化の実装のみを加えた物が多く見られる. このような背景のもと, 本プロジェクトでは様々な計算機プラットフォーム上で効率的に動作する, 次世代の大規模解析システムを構築するとともに, 常に最先端のスーパーコンピュータ能力を活用するシミュレーション実現を目指す.

今年度は, 以下の項目について報告を行う.

- (1) 大規模構造物中のき裂の 3 次元自動進展解析
- (2) ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発
- (3) 流体・構造連成解析手法に用いる構造解析部分のための大規模メッシュモデリング

3.2.1. 大規模構造物中のき裂の3次元自動進展解析

(1) 目標・計画

原子力関連設備、化学プラント、航空宇宙システム等の高度の安全性が求められる構造物の設計や運用においては、SCC・疲労・腐食等に関連する劣化予測、実験が困難なシビアアクシデント時における挙動予測、事故要因の分析や補修工事の妥当性評価のための逆問題解析等の健全性評価手法を確立することが極めて重要である。しかし、構造健全性評価のための数値シミュレーションには、未だに熟練した解析技術者の経験と勘に頼っている要素が多く、システムティックで迅速・正確な解析手法は、まだ確立されていないというのが実情である。その主要因として、以下が挙げられる。

- ・大規模構造物に生じる3次元複雑形状のき裂を正確に表現する計算力学モデルの構築の困難さ。つまり、複雑形状・複雑き裂に対するプリプロセッシングの困難さ。
- ・マルチスケール・マルチフィジックス解析を精度良く効率よく解くことの重要性。

当センターでは、構造健全性に関する研究の一テーマとして、上記の要因を満足する、き裂進展解析システムの研究開発を継続している。

目標は、下記2つの技術の確立である。

- i) 大規模構造物中に発生したき裂の評価をタイムリーに実施可能な技術
- ii) 大規模構造物中の複雑形状き裂の三次元進展現象を完全自動でシミュレーションする技術

(2) 意義・国際社会との比較

原子力関連施設等でのSCCや疲労き裂の進展予測評価に関しては、実用上、感度解析も含めて1ヶ月程度で終了することが要求される。現在の六面体有限要素を用いたき裂進展解析では解析モデル生成にマニュアル操作が多く、一解析ケースあたり4-6ヶ月程度を要する。要求をまったく満足できていない。現在までに複雑な三次元形状をもつ構造に発生したき裂の解析を短時間に行うことや、また、その進展予測をするき裂進展解析はほぼ不可能であった。

本研究の成果によって、自動モデル生成技術の確立された四面体有限要素を使用し、き裂の形状や大きさに関するパラメトリック解析やき裂進展解析の完全自動化を実現し、原子力関連施設のSCCや疲労き裂問題の解析をタイムリーに実行可能とすることが可能になる。そのため、原子力関連機器の安全性評価の高度化に対して大きく寄与するものである。

(3) 研究内容

本年度までに、基礎的研究、ソフトウェアプラットフォームの構築、溶接残留応力場に

おける二次元き裂進展解析の実例はほぼ終了している．具体的には下記のとおりである．

(A) VCCM を用いた三次元き裂の応力拡大係数算出に関わる研究

モード I 埋没き裂，表面き裂，さらに混合モード解析により，計算精度の検証を行い，良好な精度で解析可能であることがわかった．¹⁾²⁾

(B) 三次元自動き裂進展解析システムの開発

プラットフォームには，(株)テクノスター社製の TSV-Pre³⁾ を利用している．最初に，き裂進展解析システムのフローを説明する (図 1)．

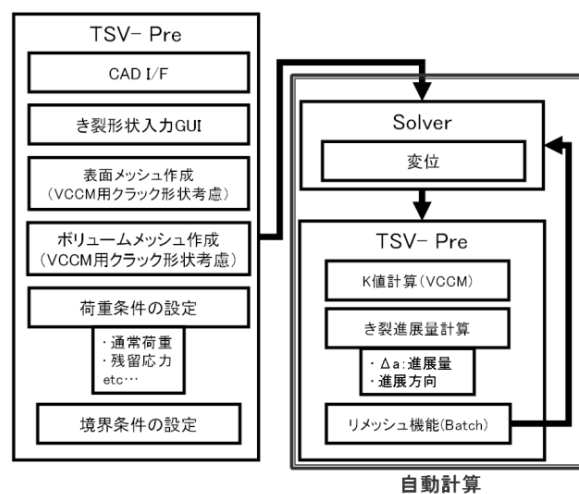


図 1 自動き裂進展解析システム フロー

最初に，図 1 左に示すとおり，手作業で初期き裂メッシュモデルを作成する．具体的には下記の流れになる．

1. CAD モデルをインポートする．
2. き裂形状を CAD モデルに追加する．
3. 自動メッシングにより，四面体二次要素でメッシュモデルを作成する．
4. 荷重，境界条件を設定する．

初期き裂メッシュモデルの例を，図 2 に示す．メッシュサイズは，き裂先端の応力拡大係数評価部が一番細かくするようにコントロールしている．また，き裂先端周りのメッシュ形状が VCCM の応力拡大係数計算条件に適する形（き裂面側とリガメント側で対象）になる．

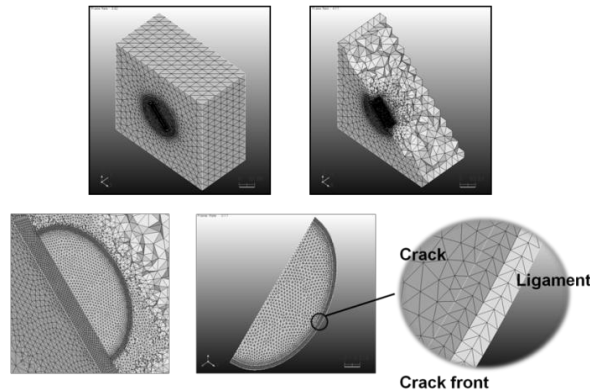


図 2 初期き裂メッシュモデル

初期き裂メッシュモデルを作成した後は、き裂進展パラメータを入力するだけで、完全自動のき裂進展解析が始まる。き裂進展パラメータは、「SCC または疲労の選択」「SCC の場合は、残留応力場の設定」「進展量」「き裂進展則」「スムージング係数」である。き裂進展則は、研究の多様性のために、パリス則等だけでなく、任意式にも対応する。

図 1 右側の自動き裂進展解析のフローについては、図 3 に詳細を示す。まず、変位と節点力を計算する。その後、VCCM により応力拡大係数を計算する。そして、き裂進展則に応力拡大係数を代入して、き裂進展量を求める。き裂進展量が求められたので、 Δt または ΔN 分、モデルのき裂形状が進展する。最後にリメッシングを実施する。以上の手順を、解析終了として設定されたステップ、もしくは、き裂が貫通するまで繰り返す。

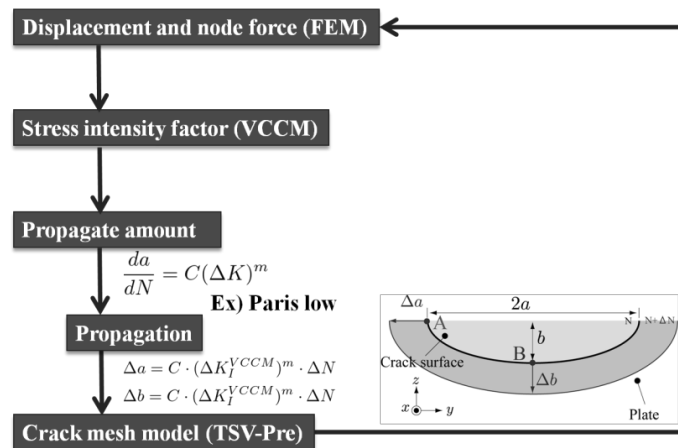


図 3 き裂進展計算フロー

(C) 溶接残留応力場における二次元き裂進展解析

き裂進展解析システムのロバスト性の評価として、溶接部を模した平板モデルで二次元き裂進展解析を実施した。残留応力場は、残留応力解析の環境に影響されないよう、応力

値をもった点群データに対応する．この点群データの応力値を四面体要素にマッピングする（図 4 参照）．図 5 に，残留応力場とき裂進展の軌跡を示す．

き裂進展則により，材料 A は材料 B，C に比べ，進展量を小さくしている．材料 C に進入時にき裂は終了する事とした．自動き裂進展解析により， Δt の進展量がコントロールすることにより，手作業では不可能な細かい進展量で，安定したき裂進展解析を実施することができた．

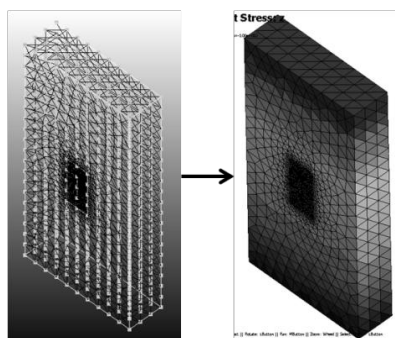


図 4 残留応力のマッピング

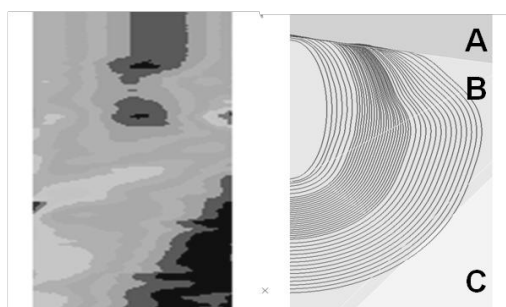


図 5 模擬残留応力場，き裂進展軌跡

（４）平成 24 年度進捗状況

上記の自動き裂進展解析システム開発に対して，進捗状況は以下の通りである．

・ 3 次元き裂進展解析への適用

【達成度 90%】基礎的問題に対してであるが，ほぼ完了している．ただし，ロバスト性に若干の問題があり，問題によってはシステムがストップする．その場合は，途中のステップからのリスタートを必要とする．

（例）半楕円表面き裂問題の解析

半楕円上面き裂問題をとき，2 ステップ以降の進展解析も実施した．半楕円上面き裂問題に対する典型的な有限要素法解析モデルを図 6 に示す．なお，本例題は，Raju - Newman の

表面き裂問題⁴⁾のモデルを参考に設定した．初期き裂の応力拡大係数は，円板状埋没き裂のモードⅠ応力拡大係数で正規化して表した結果を図 7 に示す．図 8 は，初期き裂と貫通後のき裂形状である．き裂が 3 次元に進展している様子がわかる．

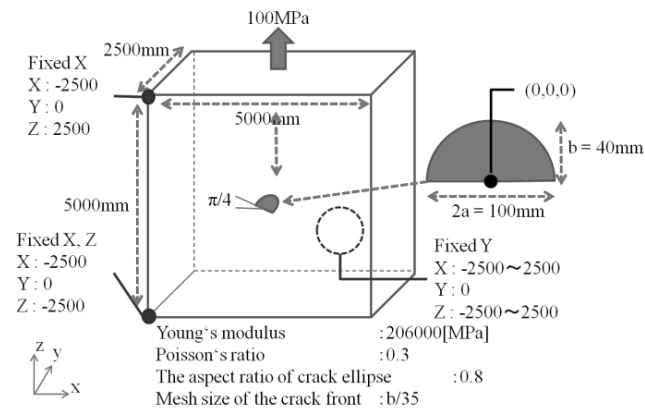


図 6 半楕円表面き裂モデル

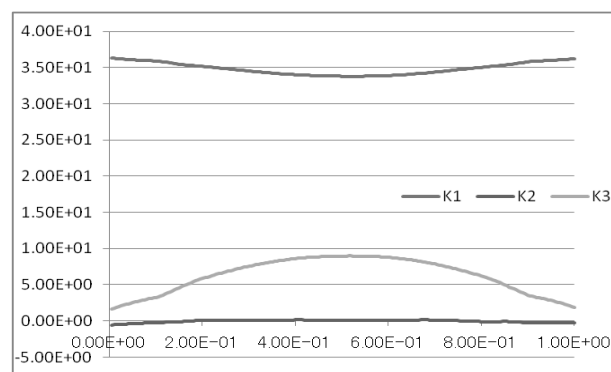


図 7 正規化応力拡大係数

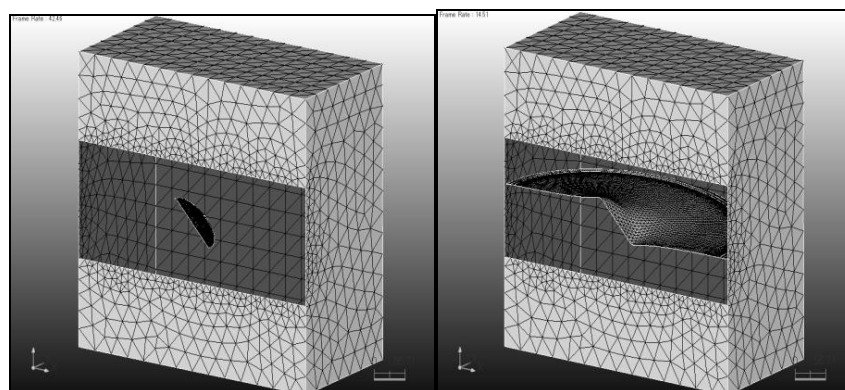


図 8 3 次元き裂進展解析

今後はロバスト性の向上化とともに、き裂の分岐進展や、複数き裂対応などを実施する予定である。

参考文献

- 1) 岡田，荒木，河合，大規模有限要素法解析のための応力拡大係数計算手法(四面体要素を用いた仮想き裂閉口積分(VCCM))，日本機械学会，第 73 巻，第 728 号，pp.498 - 505，2007.
- 2) 岡田，荒木，河合，大規模有限要素法解析のための応力拡大係数計算手法(混合モード／複雑形状き裂解析のための四面体要素仮想き裂閉口積分法(VCCM))，日本機械学会，第 73 巻，第 733 号，pp.997 - 1004，2007.
- 3) <http://www.e-technostar.com/>
- 4) Y.Murakami et al, Stress intensity factor handbook, volume 2 (1987),Pergamon Press.

3.2.2. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発

(1) 目標・計画

本研究では対象問題をある程度限定することで高性能が得られるアプリケーション特化型システム開発を行っていく。対象問題は連続体力学とし、産業界で需要が高い非構造格子並びに自由表面や移動境界問題に重要なメッシュフリー（粒子法を含む）の取り扱いを可能とする。時間方向の非定常性や問題が持つ非線形性を考慮する必要があるが、陰解法ベースの数値解析手法を対象とする。これらに対し、3つの課題(A)DDM 入出力ライブラリ開発、(B)DDM ソルバーライブラリ開発、(C)連続体力学向け DSL 開発に取り組む。本研究で開発されたライブラリを用いて連続体力学系シミュレータの実装と評価も行う予定である。

(2) 意義・国際社会との比較

ポストペタスケール計算を見据えた新技術の開発について、これまで同様汎用向けのライブラリなども開発されるであろうが、それらの利用では、非構造格子問題では高々数パーセントの性能、あるいはそれ以下しか期待できず、連続体力学系シミュレーションに特化したシステム開発が必要と考えられる。そもそも数パーセントの性能でのソフトウェアはペタコンでの運用が認められないという制約もあり、これはポストペタコンについてはさらに厳しくなることも想定される。

連続体力学系シミュレーションは、従来からの FEM, FVM, BEM など非構造格子アプローチに加え、近年ではメッシュフリーや粒子ベース手法による大規模計算の台頭が目覚しく、これらにも対応させ、非構造格子および節点、粒子ベースモデルを統一的に扱えるようにすることで、連続体力学系シミュレーション向けライブラリとして整備されれば、ポストペタコンの連続体力学系シミュレーションでの利用の拡大に大きく貢献することが期待できる。

(3) 研究内容

A) DDM (Domain Decomposition Method, 領域分割法) 入出力ライブラリ

本研究項目は、マルチレベル領域分割法に基づく多階層計算格子データの生成、操作および I/O ライブラリ開発を行うものである。一般的なアプリケーションシステムは、プレ・ソルバー・ポスト処理に分けられるが、これまでは最も高負荷であるソルバー部のみがスパコン上に実装されてきた。ポストペタコンでは、全ての処理をスパコン上に実装し、並列化することが当然求められてくる。しかし、従来の枠組みで並列化したのみでは、それに伴い生成される大規模な数値計算データ処理に多くの時間が割かれてしまうことが予想される。そこで、これまで研究代表者らがソルバー部の並列化手法として圧倒的な高い並列効率を示してきた階層型領域分割法の技術を応用した、マルチレベル領域分割法によるデータ処理システムの開発を行う。

B) DDM ソルバーライブラリ

本研究項目は、マルチレベル領域分割法に基づく連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列ライブラリ開発を行うものである。一般的な線形代数ソルバーは、アセンブリされた連立一次方程式を入力とするため、FEMにおけるメッシュ情報など本来解析手法が持つ特徴を利用せずに実装されてきた。それらは共有メモリ環境及びその中で解くことができる解析規模では問題となりにくい、ポストペタコンで対象とする解析規模では入力データから解析手法まで含めた分散メモリ環境向け並列化技術が必要となることが予想される。そこで、提案するマルチレベル DDM による多階層型データ構造を活用した、大規模な線形代数ソルバーの分散メモリ環境に適したライブラリを開発を行う。

これは、

- ・多階層領域分割に基づく分散メモリ並列向け線形代数ソルバーの構築
- ・多階層領域分割に基づくマルチレベルコースグリッド修正法の開発
- ・構造・熱・流体・磁場などを対象とする物理現象毎に特化したコースグリッド修正法の開発

を含む。つまり、これまでFEMを対象に研究を進めてきたDDMをマルチレベルに拡張し、さらにFVM, BEM, メッシュフリー, 節点ベースFEMや粒子法など連続体力学全般に適用する技術開発である。また、マルチレベルな領域分割を利用し、線形代数ソルバーにおける前処理手法について、研究代表者らがこれまで研究を進めてきた高速かつ安定した収束性を持つ反復解法であるBDD (Balancing Domain Decomposition) 法やBDDC (Balancing Domain Decomposition by Constraints) 法をマルチレベルに拡張し、さらに粒子法などへの応用も進める。開発システムは線形代数ライブラリとして整備していく。

C) 連続体力学向け DSL (Domain Specific Language, 問題領域専用言語)

本研究項目は、連続体力学向けDSLの開発と、それに対応した多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成の開発を行うものである。ポストペタコンのアーキテクチャでは、計算ノード間の並列性だけでなく計算ノード内での効率も重視される。各計算ノードはメニーコアやGPU, SIMD 拡張命令といった多種多様なアクセラレータを有し、これらを有効利用することが望まれる。従来のプログラミング言語やコンパイラ最適化技術での対処は不十分であり、現状ではそれぞれのアクセラレータごとに人手で最適化された個別の実装が必要とされている。一方、数値シミュレーションコードの場合、特に連続体力学分野においては、そのアプリケーションロジックは物理現象や数値解析スキームであり、これは数学表現、特に行列やテンソルで表記されることが多い。よって、連続体物理モデルをDSL化して、数学記述（例えば、行列、テンソルの式をtex形式で記述）から各アクセラレータタイプ向けに最適化されたライブラリをcallするコードを生成するコードジェネレータあるいはトランスレータアプローチが有効であると考えられ、これを実現するシステムの開発を行う。

(4) 平成 24 年度進捗状況

A) DDM 入出力ライブラリ

演算処理装置や記憶装置の階層構造に適した負荷分散機能として、非構造格子向けの多階層領域分割アルゴリズムを開発した。特に本年は、MPI-OpenMP ハイブリッド並列処理に適した多階層領域分割機能の開発を行った。更に、大規模解析支援機能として、四面体ソリッド要素と六面体ソリッド要素の一樣メッシュ細分割の機能の開発を行った。本ライブラリを用いることで、東大 T2K の 1,024 計算ノードを用いて 13 億要素数の非構造四面体メッシュを 280 秒で生成することができ、京コンピュータの 3,072 計算ノードを用いて 28 億要素数の非構造四面体メッシュを約 12 分で生成することに成功した。

また、粒子法向けライブラリの重要性が高まっていることから、当初計画を 1 年前倒して、メッシュフリー向け階層型領域分割アルゴリズムとメッシュフリー向け標準 I/O ライブラリを開発を行った。特に本年は粒子法向けの機能開発を行った。メッシュフリー向け階層型領域分割アルゴリズムでは、粒子が計算ノードに均等に割り当てられ、隣接間通信の少ない領域分割が行われるものである(図 1)。メッシュフリー向け標準 I/O ライブラリでは、大規模有限要素法解析の実績があり、ソースプログラムが公開されている ADVENTURE I/O ライブラリをベースに開発を行い、粒子法への対応を行った。粒子法で用いられる物理量のラベルを定義し、本ライブラリを用いることで解析プログラムから接続するプレポストまでの統一的な開発が可能となった。

本年度の成果を元に、来年度は「DDM 入出力ライブラリ」の 50%以上の機能開発を目指す。

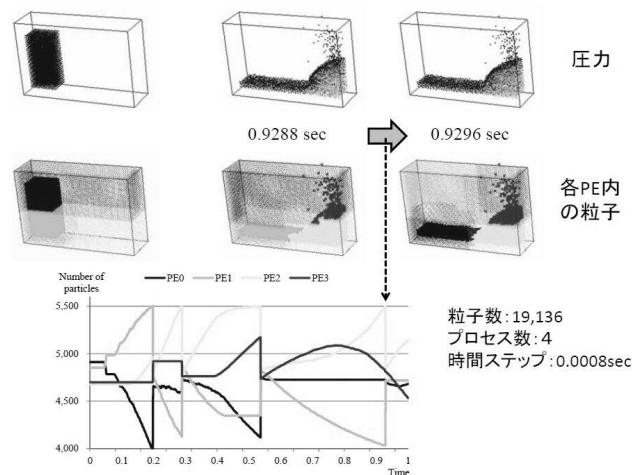


図 1 メッシュフリー向け領域分割ライブラリによる動的負荷分散例

B) DDM ソルバーライブラリ

非構造格子向け DDM 反復法ライブラリとして、多階層領域分割情報を利用した DDM 反復アルゴリズムの開発を行った。特に本年は、MPI-OpenMP ハイブリッド処理に適した 2 階層領域分割に基づく DDM 共役勾配法の開発を行った。線形代数演算のアプリ特化型最適化として、有限要素法における節点自由度数に応じた手動ループ展開や SIMD 向け最適化を行った。本ライブラリ

を用いることで、非構造格子による大規模有限要素解析が京コンピュータにおいて 10%以上のピーク性能比を得ることに成功した。また、目標アプリの 1 つである磁場解析向けに、非正則行列及び複素対称行列向け DDM 反復法アルゴリズムの開発を行った。本ライブラリを用いることで、解析規模に対してロバストな収束性を得ることが可能となった。来年度は、開発ライブラリを用いた外部ユーザによる実装評価を行っていく。

また、多階層前処理技術として、有限要素法向け BDD 並びに BDDC 前処理アルゴリズムの開発を行った。既の実績がある構造解析向け BDD 前処理については超並列計算環境向け実装技術の開発を行い、京コンピュータの 256 計算ノードでウィークスケーリング 89%、ストロングスケーリング 92%の並列効率を得られた。来年度は、京コンピュータの大規模ノードに加えて東大 FX10 と東工大 TSUBAME2 における性能評価を行う。構造解析向け BDDC 前処理アルゴリズムを開発し、試解析を行い、理論に基づく性能が得られた。来年度はポアソン・磁場解析向けアルゴリズム開発を行う。また、3 次元静磁場解析向け BDD アルゴリズムの検討を行った¹⁾。来年度は試解析を行う。

本年度の成果を元に、来年度は「DDM ソルバーライブラリ」の 50%以上の機能開発を目指す。

C) 連続体力学向け DSL

連続体力学向け DSL として、基本機能であるトランスレータ開発を行った。本年は特に、DSL の仕様・文法について詳細な検討を行った。LaTeX および独自のテキストベース DSL の二種類に対して、特に有限要素解析向け応用を意図し、言語仕様や LaTeX マクロを定めた。次に、アクセラレータ対応コード自動生成として、SIMD・GPU 向けに性能最適化ライブラリ開発を行った。本年は特に、スカラー型プロセッサでの SIMD 命令利用に重点を置き、テンソル・行列演算向けライブラリのプロトタイプ実装を行った。アイソパラメトリック要素の要素剛性行列作成コードのベンチマークにおいて、インテル社 Sandy Bridge において理論ピーク性能比の 40~70%、京コンピュータ(富士通 SPARC64 VIIIfx)において同 20~25%程度を、それぞれ達成した。また、外部ユーザによる開発中ライブラリの性能評価を並行して行うことで、開発効率化並びにユーザビリティ改善を行っている。

本年の成果を元に、来年度は「連続体力学向け DSL」の 30%以上の機能開発を目指す。

D) 連続体力学系シミュレータ

粒子法向けライブラリは実問題解析に適用可能かが重要な評価指針であるため、当初計画を前倒して、開発中の粒子法向けライブラリを用いたシミュレータ実装並び評価を並行して実施することとした。粒子法向けライブラリでは、関数ポインタを用いて利用者が粒子の物理量計算の関数を定義することができるので、解きたい物理モデルを自由に組み込むことができる仕様となっている。

東大 T2K を用いて、粒子法向けライブラリを用いたシミュレータの並列性能を測定したところ、64 計算ノード 1,800 万粒子から 1,024 計算ノード 2.6 億粒子へのウィークスケーリング性能評価で

94%の並列効率が得られ、6,900 万粒子の 64 計算ノードから 1,024 計算ノードのストロングスケーリング性能評価において 93%の並列効率が得られた。来年度は、東大 FX10 と東工大 TSUBAME2 への実装と性能評価を予定している。

また、プロメテック社に商用コード **ParticleWorks** を用いた GPU クラスタ上での試解析を外注した。来年度はその試験結果を元に、開発ライブラリの性能評価と検証に用いる予定である。

本年度はモデル作成や条件設定などにおいて仮想的なシミュレーションを行ったが、来年度は実問題解析を対象にシミュレータ実装と性能評価を行う予定である。

3.3. 新規実験計測グループ

流体－構造連成解析手法を検証するために詳細実験を行うと同時に，物性データ交換のための表現形式，変位・ひずみ場や流速分布データの解析手法，流体計測法を新しく開発することが目標である．数値計算を実施するには既存の物性データを入力する作業が必要であるが，データ表現の統一規格がないため，計算環境に依存するのが現状である．そこで，数値計算のシステムと物性データベースを連携して，数値計算に反映できる標準データの構築を検討する．また，数値計算の妥当性を評価するには詳細実験が不可欠であることから，物体の変位量，ひずみ量，流速分布，空気力など様々な計測実験を行い，数値計算結果の信頼性を評価する．また，熱線流速計の安価で簡易な温度較正法の構築，乱流境界層の速度分布全域を表わす普遍関数の検討についても報告する．

3.3.1. 物性データ交換のためのデータ表現形式の検討

(1) 目標・計画

数値シミュレーションのために基本的な物性値は必須のものであるが、材料の物性値を収めたデータベースにおけるデータ表現は統一されておらず、必要なデータは多くのデータベースがインターネット上に存在する現在でも事実上手作業で値を入力する必要がある。本研究では、材料データの標準データ交換形式を開発し、数値シミュレーションのシステムと物性データベースの連携を行うことを目的とする。

(2) 意義・国際社会との比較

材料物性に関するデータベースは各所で開発されているが、統一されたフォーマットは無く、データを交換するための標準を作成する試みは NIST などによって行われてきたが現在のところ定まった標準がない。データ交換のためのフォーマットの開発は、分散したデータベースの統合利用に加え、数値計算システムなどからの利用も容易になる。

芦野らのグループはオントロジー技術を用いた材料データの表現形式開発を進めており、2005,6 の二ヶ年 NEDO からの受託研究を受けて開発した材料データオントロジーは、物質・材料研究機構と産業技術総合研究所の間でのデータ交換を実現するとともに、現在 EU 標準規格委員会のワークショップにおける機械試験データのオントロジー開発においても参照されている。また、芦野は CODATA における材料データ交換フォーマットの国際タスクグループの議長を務めるなど、この分野の研究では国際的に見て比較的進んでいるが、我が国の材料データベースの整備やデータ交換のための組織的な取り組みは縮小傾向にある。

(3) 研究内容

2012 年度より、産業技術総合研究所において、材料の標準計測データを Linked Open Data として活用することが出来るようにするための作業が開始された。Linked Open Data は W3C などを中心に行われている活動であり、Semantic Web の技術に基づいて Web 上のデータをその意味内容が分かるような形でリンクして活用しようというものである。現在の World Wide Web では、自然言語で書かれたテキストがハイパーリンクによって接続されている構造であり、リンクにどのような意味があるかは問題にされない。これに対して Semantic Web では、それぞれのデータがどのような意味を持つかを明かにする形でリンクされる。

たとえば、材料物性であれば、材料の名前とある数値がリンクされるときに、この関係は熱伝導率である、などと内容に基づいてリンクされていれば内容に基づいて必要なデータを取得することが出来る。しかしながら、この場合リンクの意味などを定義する辞書となるものが必要であり、意味を持たないリンクと異なり作成には多大な労力を要する。現在、産総研における LOD への対応において、NEDO 受託研究によって、Semantic Web におけるオントロジー記述言語である OWL を用いて開発した材料データオントロジーが

活用されており、開発者として協力している。

また、材料の物性値は温度や圧力などの状態変数に依存するものであり、あらゆる状態での測定は不可能なことから、経験式や理論から実験値に基づいて導き出された関係式の形式で記述され、必要に応じて計算で求められる場合も多い。現在、材料データベースにはこのような数式を表現する標準的な手法がなく、また、一般的なデータベース管理システムではこのようなデータを管理することができないことから、各所で開発されたデータベースが独自の手法をとって表現している。

これに対して芦野らは、数式の意味を記述するために開発された **OpenMath** 規格を用いて数式の意味内容を記述して管理する手法を開発し、産総研の熱物性データベースに収録されている数式データの **OpenMath** 化を行っている。**OpenMath** は **XML** 形式での記述が可能のため、**LOD** のデータや **OWL** によるオントロジー記述との相互リンクや、数式処理システムなどとのデータ入出力、**MathML** に対応したブラウザでの数式レンダリングにも対応が容易であり、**LOD** との親和性も高い。

(4) 平成 24 年度進捗状況

本年度は、産総研熱物性データベースに収録された数式データについて、**OpenMath** による表記を用いたデータベースの試作を行うとともに、**LOD** への標準試験データのリンクについて、単位系の表記、**NEDO** オントロジーの活用にあたっての協力を進めた。

3.3.2. ドット重心追跡法による変位・ひずみ場解析(古川先生)

(1) 目標・計画

構造物の健全性は腐食や減肉，繰り返し荷重によるき裂に進展などによる断面積の減少が密接に関連している．構造物の破壊による事故を未然に防ぐためには，構造物の損傷よるみかけのヤング率の変化の検知が重要である．そのためには，広い測定範囲・適用性の高さを有する全視野測定が有効である．全視野測定は，近年のデジタルカメラと計算機の性能の向上と価格の低下により，測定への導入が比較的容易となった．デジタルカメラを使用した測定法には，モアレ法，スペックル法やデジタル画像相関法(Digital Image Correlation)法などがある．これらの手法には，装置の設置や操作が複雑である点や，計算量が多い点が問題点として挙げられる[1,2]．このような問題点を解決した手法の一つに，ドット重心法がある [3-6]．ドット重心法とは，図 1 に示すように，被測定対象物に付着されたドットマークをデジタルカメラで撮影し，そのドットマークの重心位置を算出し，重心の移動量を変位量とし，ひずみを求める手法である．

デジタルカメラを使用した手法において，レンズによるひずみが誤差の原因となる[7]．ドット重心法も例外ではなく，ドット重心法についての過去の研究[8]では，平板の一様引張りにおけるひずみ場の測定において，ひずみ場が一様に測定されない結果となった．この原因はレンズによるひずみであり，ドット重心法においてレンズのひずみを取り除く必要性を示している．ドット重心法の大きな利点は，扱う情報はドットの重心位置のみである点である．そのため，レンズの補正対象はドットの重心位置のみであり，画像を補正する手法に比べ計算量を大幅に削減できる．そこで本研究では，ドット重心法に適したレンズひずみの補正の事前処理の手法を提案し，また，円孔付き平板の測定に対して，提案手法を適用し検討した．

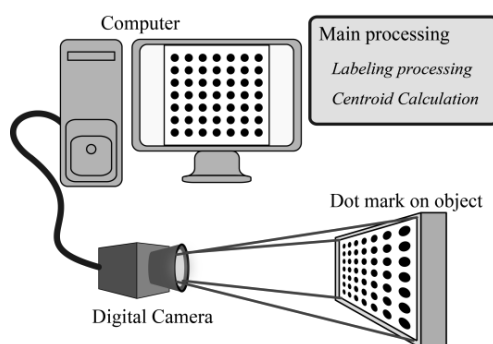


Fig. 1 System of Dot centroid method

(2) 研究内容,

レンズひずみは，正規化座標系において，原点からの距離 R とレンズひずみ係数 k_1, k_2, k_3 により式(1)でモデル化される．

$$\begin{aligned}
x_{dist} &= x(1.0 + k_1 R^2 + k_2 R^4 + k_3 R^6) \\
y_{dist} &= y(1.0 + k_1 R^2 + k_2 R^4 + k_3 R^6) \\
R &= \sqrt{x^2 + y^2}
\end{aligned} \tag{1}$$

ここで、 x , x_{dist} はそれぞれ理想的な重心位置と、撮影によって得られる重心位置である。機械的ひずみ場の測定では、理想的な重心位置で評価する必要がある。

画像座標 (x, y) と物体座標 (X, Y, Z) は射影変換式 (式 2) により関係づけられる。ここで、 a, b, c, d, e, f, g, h は射影変換係数である。

$$x = \frac{aX + bY + c}{gX + hY + 1.0}, y = \frac{dX + eY + f}{gX + hY + 1.0} \tag{2}$$

また、画像座標は、式(1)のレンズひずみを受け、式(3)のように示される。

$$\begin{aligned}
x_{dist} &= \frac{aX + bY + c}{gX + hY + 1.0} (1.0 + k_1 R^2 + k_2 R^4 + k_3 R^6) \\
y_{dist} &= \frac{dX + eY + f}{gX + hY + 1.0} (1.0 + k_1 R^2 + k_2 R^4 + k_3 R^6) \\
R &= \sqrt{\left(\frac{aX + bY + c}{gX + hY + 1.0} \right)^2 + \left(\frac{dX + eY + f}{gX + hY + 1.0} \right)^2}
\end{aligned} \tag{3}$$

式(3)より、すべての係数は撮影によって得られた重心位置と理想的な重心位置を使用し、レーベンバーグ・マーカート法により求める。

式 (1) のレンズひずみのモデル式は非線形であるため、解析的な逆変換が困難である。そこで数値的に逆変換を行う。まず、中心 $(a,0)$ 、半径 r の円を式(1)により写像した閉曲線の重心位置 x_c を以下の式(4)~(7)によって求める。解析的に写像された閉曲線の重心位置が求められれば、逆変換によりレンズひずみの補正が可能になる。撮影によって得られた重心位置から理想的な重心位置が推定できる。

$$\begin{aligned}
x &= (r \cos(\theta) - a)(k_0 + k_1 R^2 + k_2 R^4 + k_3 R^6) \\
y &= (r \sin(\theta))(k_0 + k_1 R^2 + k_2 R^4 + k_3 R^6) \\
\text{where } R^2 &= x^2 + y^2
\end{aligned} \tag{4}$$

$$S_x = \int_0^{2\pi} \int_0^r |J| x dr d\theta \tag{5}$$

$$S = \int_0^2 \int_0^r |J| dr d \quad (6)$$

$$x_c(a, r) = S_x(a, r) / S(a, r) \quad (7)$$

式(5)の断面一次モーメントと式(6)の面積について解析的に積分を行う⁽¹⁰⁾。撮影によって得られた重心位置 x_c を初期値とし, Newton-Raphson 法により理想的な重心位置 a を求める。

(3) 平成 24 年度進捗状況

数値例をここに示す。ここでは, 実際の重心位置を式 (8) と一般的なレンズひずみ係数 $k_0 = 1.0$, $k_1 = -0.2535$, $k_2 = 0.1178$ を使用し, 解析的にひずませる。

$$\begin{aligned} x_{distorted} &= x_{actual}(k_0 + k_1 R^2 + k_2 R^4) \\ y_{distorted} &= y_{actual}(k_0 + k_1 R^2 + k_2 R^4) \\ \text{where } R &= \sqrt{x_{actual}^2 + y_{actual}^2} \end{aligned} \quad (8)$$

次に, ひずんだ重心位置を提案手法により逆変換を行った。その結果を図 2 に示す。逆変換における数値誤差は 10⁻¹⁵ 以下であった。この結果より, レンズひずみ係数が既知である場合, 高精度な逆変換が可能となった。

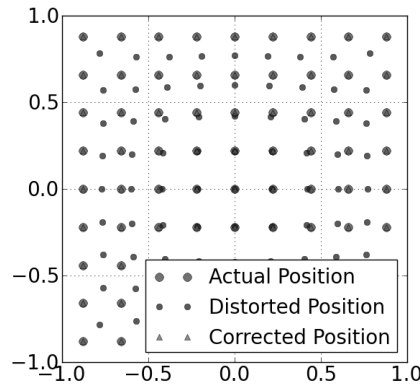


Fig. 2 Result of numerical inverse transformation

ひずみ場の測定のために, 厚さ 3mm の円孔付き平板を使用した。試験片の材質は, アルミニウム合金の A2017-T4 である。この材質のヤング率とポアソン比は, それぞれ 69.09GPa と 0.35 である。円孔付き平板にドットマークを付着させた試験片が図 3 である。この試験片を縦方向に 14.75kN の引張り荷重を与える。撮影に使用したデジタルカメラとレンズは, それぞれ Flea 3(Point Grey Research, Inc.)と HF35HA(Fujinon Corporation)である。引張試験において, 荷重を与える前後のドットマークをそれぞれ撮影し, 重心位置からメ

ツシュを作成した．その結果を図 4 に示す．

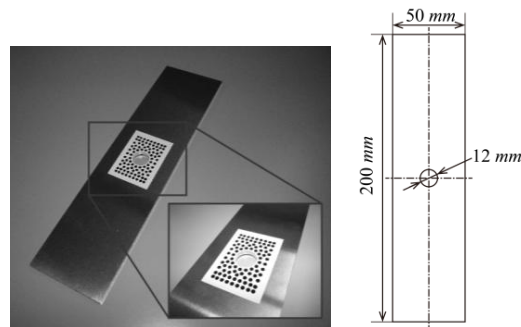


Fig. 3 Specimen and dot mark sheet

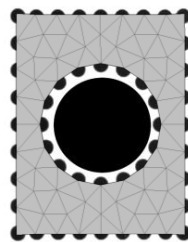
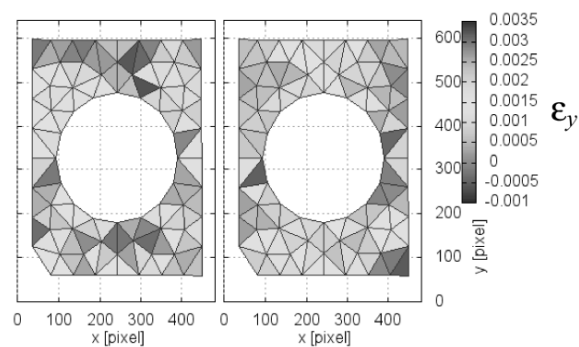


Fig. 4 Mesh by centroids of captured dots

図 4 に示されたメッシュと変位量から，グリーンのひずみの定義によりひずみ場を求めた．レンズのひずみの補正前後のひずみ場を図 5 に示す．



5-a Distorted 5-b Corrected

Fig. 5 Measurement result of strain field

次に，有限要素法汎用コード ANSYS による数値解を図 6 に示す．この結果は，補正後の結果が補正前の結果に比べ測定精度が向上していることを示している．この結果より，三角形一次要素で精度良く測定が行える事が確認できた．

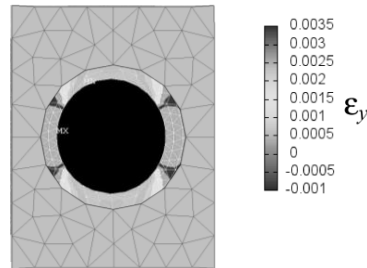


Fig. 6 Calculated result of strain field by ANSYS

次に、レンズひずみの補正前後のひずみ場の差を図 7 に示す。撮影領域の中心から離れるにつれ、ひずみの差は増加している。これは、撮影領域の中心から離れるにつれレンズのひずみの補正量が増える傾向と一致している。また、提案手法によって生じるひずみの差は 0.1%ひずみの測定に大きく影響する値であることが確認できた。

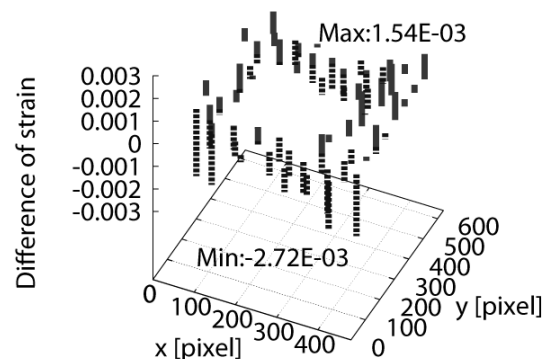


Fig. 7 Difference of strain between distorted result and collected result

本研究によりドット重心法に適したレンズひずみの補正に関する事前処理の手法を提案し、三角形一次要素と少ない自由度でひずみ場が高精度に求めることを実現した。これにより、レンズひずみの補正を含んだ変位とひずみ場を求めるシステムの開発を行った。

参考文献

- [1] Vendroux, G., and Knauss, W., G., 1998, “Submicron Deformation Field Measurements: Part2. Improved Digital Image Correlation”, Experimental Mechanics, Vol. 38, No.2
- [2] Uneda, M., Okuhata, S., and Ishikawa, K., 2010, “Study on Accuracy Evaluation of Deformation and Strain Distribution Measurement using Digital Image

Correlation Method”, JSME

- [3] Iliopoulos, A. P., Michopoulos, J. G., and Andriopoulos N. P., 2010, “Performance Analysis of the Mesh-Free Random Grid Method for Full-Field Synthetic Strain Measurement”, *An International Journal for Experimental Mechanics*
- [4] Michopoulos, J. G., and Iliopoulos, A. P., 2011, “A Computational Workbench for Remote Full Field 3D Displacement and Strain Measurements”. *ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, DETC2010/CIE-47739
- [5] Iliopoulos, A. P., Michopoulos, J. G., Orifici, A. C., and Thomson, R. S., 2011, “External Validation of the 2D Meshless Random Grid Method”. *ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, DETC2010/CIE-48232
- [6] Michopoulos, J. G., Hermanson, J. G., Iliopoulos, A. P., Lambrakos, S., and Furukawa, T., 2011, “On The Constitutive Response Characterization for Composite Materials via Data-driven Design Optimization”. *ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, DETC2010/CIE-47740
- [7] Bradski, G., and Kaehler, A., 2009, “Learning OpenCV”
- [8] Wada, T., Furukawa, T., 2011 “Noise reduction method for digital image based full field strain measurement”, *NAE2011, The 7th International Conference on Numeric Analysis Engineering*
- [9] Kobayashi, K., and Mori, C., 1997, “Relations between the Coefficients in the Projective Transformation Equation the Orientation Elements of a Photograph” , *PE&RS*

3.3.3. 流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムの整備

(1) 目標・計画

流体-構造連成解析手法を検証するための実証試験として、低速風洞試験を行う。図1は風洞試験装置システムの概要図である。風路内部に実験模型を設置して試験を行い、数値解析の検証用データを提供する。また本研究を通じて、新しい計測手法、解析手法の提案を目指す。

(2) 意義・国際社会との比較

流体-構造連成問題について数値計算、実験は多数行われているが、その殆どが単独に行われたものである。そのため文献ではいずれかの結果が引用される場合が多く、両者の信頼性を保証した上で、結果を議論した例が見られないのが現状である。本研究では、数値計算結果の信頼性を検証するためのデータを提供することを主眼として、様々な実験に取り組む。これまで行われていなかった数値計算と実験の両方を実施することで、計算上の問題点、実験上の問題点を明らかにする。

(3) 研究内容

2012年度は風洞試験装置システムの整備期間であり、2013年度は基礎試験フェイズ、2014年度以降は応用的な実験を検討している。Fig 1 は風洞試験装置システムの概要図である。実証試験では実験模型の運動解析、空気力計測、PIV流れ解析を組み合わせた流体実験を行う。

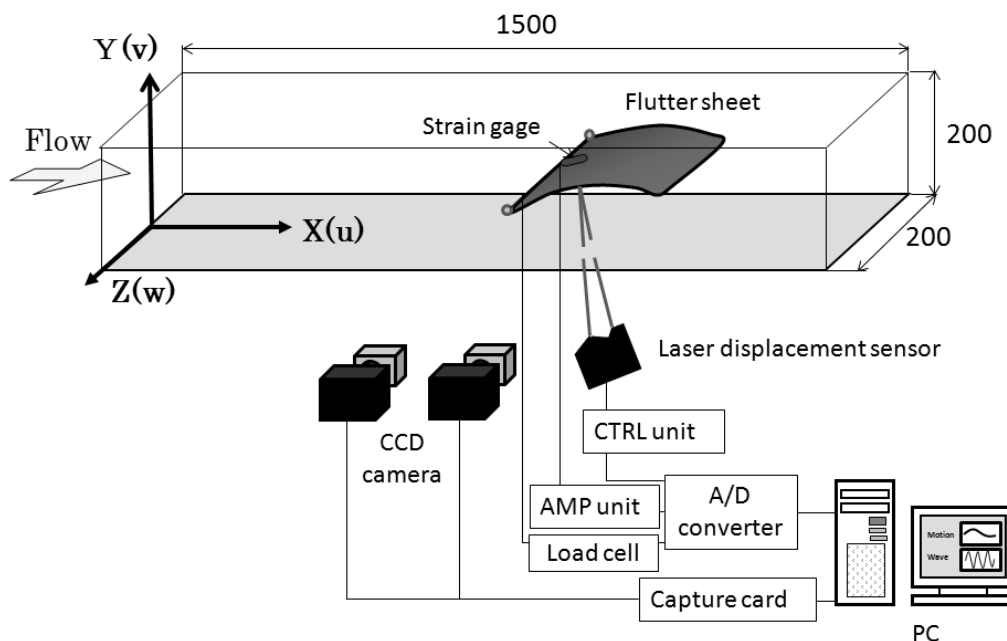


図1 風洞試験装置システム

現在予定している実験内容は以下の通りである。

- (1) 高速度カメラとレーザ変位計を用いた物体の振動周波数測定、振動モード解析

- (2) 実験模型の空気力測定
- (3) 実験模型の応力測定
- (4) 煙発生器による流れの可視化, PIV解析による流れ場解析
- (5) 流体計測手法および解析手法の検討

(4) 平成 24 年度進捗状況

検証試験に必要な風洞装置, 計測機器を導入し, 風洞試験装置システムの整備を行った. 風路断面内速度分布, 乱れ強さを測定して, 信頼性のある風洞試験環境を整えた. 今年度, 導入した装置, 機器は以下の通りである.

- (1) 風洞装置
- (2) 6分力計測システム
- (3) レーザ変位計
- (4) 3次元運動計測システム
- (5) 煙発生器
- (6) AD変換器
- (7) ステレオPIV計測システム

3.3.4. 境界層特性評価のための普遍関数構築

(1) 目標・計画

乱流境界層の速度分布を表わす普遍関数を構築する．これまで境界層速度分布を表現した様々な関数が提案されているが，乱流境界層の速度分布全体を記述することはできていない．本研究では，速度境界層の内層から外層，後流域を記述する関数を提案する．本手法は流体摩擦力の推算や境界層特性を算出するために適用できると考えられる．

(2) 意義・国際社会との比較

流体力学において摩擦抵抗低減は主要な研究の一つであることから，摩擦抵抗を高い精度で測定することが求められている．しかし，摩擦抵抗の大きさは一般的に小さいことから，定量計測が困難である．信頼性のある計測法として，浮動片を用いた直接計測法があるが，セッティングのための時間的コストが掛かること，平面以外の計測に不適當であることから，殆ど実施されていない．本研究では，速度分布から推算する間接計測に着目している．摩擦係数を推算するために，速度境界層を記述する様々な関数が定義されているが，乱流境界層が複雑な形をしていることから，単一の関数で記述することは出来ていない．本研究の目的である乱流境界層の速度分布を表す普遍関数を構築できれば，高精度に摩擦抵抗を計測するだけでなく，境界層特性を求めることもできると考えられる．

(3) 研究内容

乱流境界層の速度分布を表わす普遍関数を，物理的考察に基づいて導出する．内層を表わす定せん断層と外層を表わす速度欠損則を組み合わせると乱流境界層の速度分布を表現することができる．そのため，異なる関数を接続することが重要となる．提案する普遍関数と風洞試験結果，実験式と比較して，普遍関数の信頼性を評価する．

(4) 平成 24 年度進捗状況

乱流境界層を記述する速度分布関数は様々な種類がある．今年度は Spalding 則と Cole の後流関数を組み合わせることで，速度分布を積分形で陽的に表した関数を導いた(式(1))．

$$\frac{u}{u_\tau} = \int_0^{y^+} \frac{2 dy^+}{1 + \left\{ 1 + 4\kappa^2 y^{+2} \left[1 - \exp(-y^+ / A) \right] \right\}^{1/2}} + \frac{2\Pi}{\kappa} \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\eta\right) \quad (1)$$

カルマン定数 $\kappa=0.4$ ，後流強さ $\Pi=0.4757$ ，乱流混合長から算出される定数 A は式(2)のように表され，レイノルズ数 Re の関数として計算される．

$$A \approx 5B = 5(a \ln Re_\delta + b) \quad (2)$$

各係数は実験データを元に，Newton 法により算出できる．実験値は内層から外層までの

すべてのデータを使用した。

Figure 1 は式(1) を適用して得られた結果を実線で示している。比較のため、実験値 (○) も示している。提案した普遍関数は乱流境界層全体を表現できること、また実験データをよく再現できている。

Table 1 は提案した普遍関数で得られた摩擦係数と White の経験式を比較した結果である。提案した関数により、良好に C_f 値を推算できている。

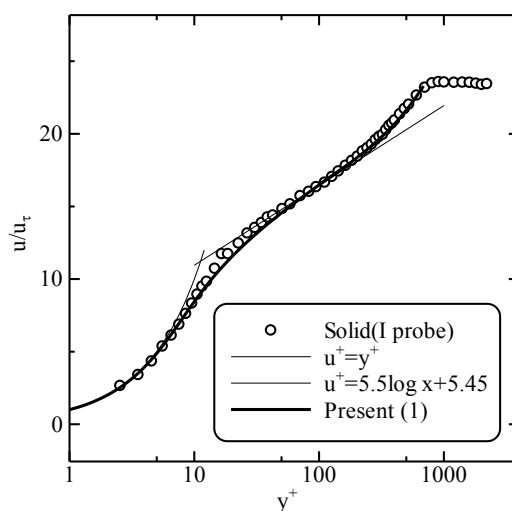


Fig.1 Logarithmic velocity profile (Eq. (1)).

Table. 1 Comparison of skin friction coefficient.

	$C_f \times 10^3$	Error (%)
White's formula	4.175	—
Present (1)	4.179	0.1

3.3.5. 熱線流速計の温度依存性に関する検討

(1) 目標・計画

熱線流速計は風速変動に対する応答性に優れており、さらに安価であることから現在でも流体力学、特に乱流の実験ではよく利用されている計測器のひとつである。しかし、熱線出力は風速に対して非線形であり、また気流温度の影響を受けるため、それぞれについて校正が必要である。通常はアナログリニアライザーを用いて出力を線形化し、気流温度変化に対してはそのつど校正しなおす必要がある。本研究では、熱線流速計のデジタル校正法と温風風洞を用いることなく温度校正する方法を検討することを目的としている。

(2) 意義・国際社会との比較

熱線流速計は現在も新しいタイプのセンサが提案されており、今後も改良の余地が残されている計測ツールである。しかし、熱線流速計を頻繁に使用している研究者であっても、速度と温度に関する校正は商用の計測システムに頼る場合が殆どであり、そのシステムは高価である。そこで本研究では、安価で簡易な速度、温度校正法を提案することを目指す。

(3) 研究内容

熱線流速計には、熱線に一定の電流を流した状態で測定する定電流型と、負帰還回路を用いて熱線の温度が一定になるように電流を調整する定温度型の2種類がある。速度計測には定温度型熱線流速計が使用される。風洞装置の流速を変化させて熱線流速計の速度校正を行い、温度補正については温風風洞を用いて温度校正を行うのが一般的である。

本実験では、(a) 熱線の発熱量と対流熱伝達のバランスから導出される King の式を速度校正に適用すること、(b) 温風風洞を用いることなく温度校正する方法を開発することを目的としている。

(4) 平成 24 年度進捗状況

定温度型では負帰還電圧 E と流速 U の関係を導出した。気流中におかれた熱線の発熱量（ジュール熱）が対流熱伝達による放熱量と平衡状態にあるとき、単位長さ当たりの熱線流速計周りの熱量の釣り合い方程式は次式となる。

$$\pi r_w^2 c_w \rho_w dT_w / dt + 2\pi r_w h (T_w - T_f) = I^2 R_w \quad (1)$$

定温度型熱線流速計を使用する場合は熱線の表面温度の時間変化がないため $dT_w/dt=0$ となり、(1)式は以下のようになる。

$$2\pi r_w h (T_w - T_f) - I^2 R_w = 0 \quad (2)$$

熱線表面の熱伝達率 N_{uf} は理論的に求めることができないので、実験式を用いて推算さ

れる（例えば，Collis-Williams の式）．その結果，出力電圧 E は

$$\begin{aligned} E^2 &= (T_w - T_f) (B' + C' U^n) \\ &= B(T_f) + C(T_f) U^n \end{aligned} \quad (3)$$

となる．ここで， B , C は気流温度に影響されることに注意する． n は熱線の半径 r_w と風速 U に基づくパラメータである．(3)式における B , C , n を求めることにより，校正曲線を決定することができる．今年度は，温度依存性がないものとして，各パラメータを最小自乗法により求めた．

Fig.1 は風速に対する熱線の出力電圧と(3)式を解いて得られた曲線を示している．Fig.2 は直線性を示すために $U^n \sim E^2$ で整理した．校正曲線は実験データを良好に再現していることが分かる．熱線流速計は強制対流により生じる流速と出力電圧の関係を測定するもので，ほぼ自然対流に近い状態になる流速 $U=0.5\text{m/s}$ 以下では，同一の校正式を用いて流速の出力電圧の関係を求めることは困難である．そのため，最小二乗法により求めた校正曲線を $U=0.5\text{m/s}$ 以下で使用する際には注意が必要である．

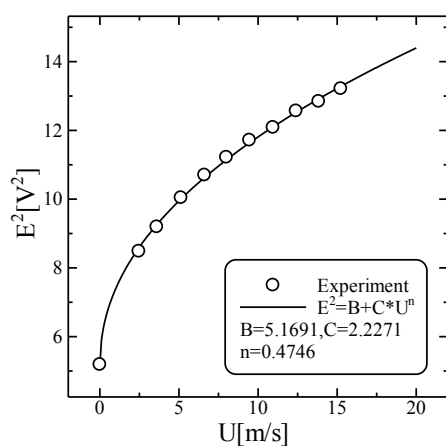


Fig.1 Calibration curve.

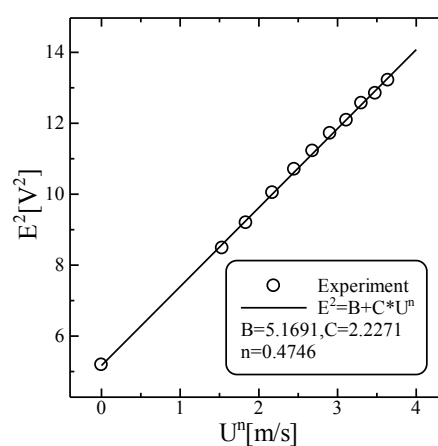


Fig.2 Linearized calibration curve.

3.4. 精度・妥当性検証グループ

精度のよい最適値を効率的にかつ精度良く予測する技術を開発することを目標として研究を行っている。最適化の効率化においては、サンプリング回数の削減と各サンプリングにおける時間の短縮が重要な意味をもっている。どのようなサンプリングを行うかは、予測値の精度に重要な影響を与える。サンプリング回数の削減手法としては、**Efficient Global Optimization** が有名である。これはメタモデルを使った最適化手法であり、メタモデルをいかに精度良く効率的に求めるかがポイントになっている。しかしながら、**Efficient Global Optimization** にはまだ各種の問題点が指摘されている。そこで、特に、メタモデルを使った最適化技術の研究に重点をおいている。また、同時に各サンプリングにおける時間短縮と精度向上を目的とした効率的な解析手法の開発も行っている。本年度は、メタモデルを使った最適化技術でいくつかの方法を開発した。また、具体的な製品として、燃料電池の圧力容器の最適化、およびフラクタル構造の最適化の研究を行った。これらの研究成果として精度のよい最適値を効率的に予測する見通しを得ることができた。今後、さらにアルゴリズムの改良と実証実験を行う予定でいる。

3.4.1. 最適化技術

(1) 目標・計画

精度のよい最適値を効率的にかつ精度良く予測する技術を開発することを目標として研究を行っている。計画では、まず従来の手法の問題点を調査してのち、改良アルゴリズムを考案する。つぎにその改良アルゴリズムによる検証を行って、改良アルゴリズムの改良を行う。同時に具体的な適用範囲の拡大を行う。また、各サンプリングにおける作業短縮を目的として、効率的な解析手法の開発を行う。

(2) 意義・国際社会との比較

最適化においてはサンプリングそのものに時間がかかることが多く、サンプリングの数を少なくすることが重要なテーマとなっている。そのための代表的手法が Efficient Global Optimization(EGO)である。Efficient Global Optimization のなかでも E I と呼ばれる手法が有名であるが、E I では余分なサンプリングを行ったり、最適点を見逃すこともある。そこで、より効率的で精度の良い解がえられる手法を開発している。これらの技術の開発により、最適化技術の実用性が高まることが期待される。

(3) 研究内容

(a) 確率的メタモデルによる大域的最適化

(i) モデル誤り： EGO ガウス過程などによるメタモデルは確率モデルの一種である。一般に、統計的予測や機械学習において予測モデルと真のモデルが一致することはまれであり、多かれ少なかれこの二つにはズレ（モデル誤り）がある。またそれとは別に最適化中の数値計算の誤差に対するロバスト性もこの中に含まれる。このズレを減らすには確率モデルのパラメータを増やしたり、複数のモデルの混合をすれば良いのだが、これをするパラメータ空間の特異点や計算量が増加する問題がある。そこで我々はあくまでシンプルな確率モデルを使いながらも、ある程度のモデル誤りに対してロバストとなるような2種類の改良方法を検討した。既存の代表的な手法である EI などと比べて我々の基準は頑健では無い。なぜなら EI において暗に仮定しているなだらかな勾配の分布をディラックのデルタ関数の様に先鋭にしたためである。この仮定を弱めるには勾配の条件付けを弱めればよい。これには2つのアプローチが考えられる。

(ii) 混合モデル： EI は勾配について考慮していないため勾配の暗に定義された事前分布は無情報事前分布である。そこで次に提案基準で使われる事後分布と EI とのそれによる混合モデルによって基準の頑強性の向上が期待される。

(iii) Softening： 頻度論的な条件付けに対し、ベイズ的に「Softening」したものを用いる。この事前分布は例えば基準自体の最適化を格子上に全探索する

場合、その格子のサイズ正しい分布を最適化する前の段階で求めておくことが出来る。

(iv)実験： 以上の手法の比較実験を行った．混合モデルにおいてはモデルの事前確率は等しいとした．また Softening に関しては勾配の事前分布は共役の多変量正規分布を用いることとし，平均0，共分散行列は $2^{-n}I$ ($n=-2,-1,\dots,6,7$)なる等方的なものを用いる (I は単位行列)．人工的な2次元の目的関数を4千個作り，それをそれぞれの手法で最適化する．大域的最適解を見つけるまでの目的関数の評価回数で書く手法のパフォーマンスを計量する．

実験結果は表1の通りとなった．

表中の θ は目的関数を生成する時に用いたパラメータで，小さいほど局所解の多い複雑な関数となる．適当な細かさの格子点について全探索してもよいし，設計空間の次元が大きければ各種大域的最適化手法を用いることになるが，いずれの場合においても最適解を正確に当てるのは難しい．つまりモデル誤りに相当するものが存在することになる．たとえば全探索する場合には目的関数の解がちょうど格子点上にない場合，格子点中の最小値においては勾配が0とならない可能性がある．混合モデルより softening の結果が悪い理由は現在のところ不明であるが，さらに原因を究明してアルゴリズムの改良を行う予定でいる．

表1 手法の比較実験の結果

	$\theta = 0.1$	0.2	0.3	0.4
EI	16.36	7.688	5.375	4.163
Prop.	26.24	6.953	4.263	3.825
Mix	16.69	6.41	4.259	3.822
Softening	$\theta = 0.1$	0.2	0.3	0.4
$n = -2$	25.89	7.959	4.983	4.226
$n = -1$	25.66	7.953	4.972	4.206
0	25.49	7.889	4.950	4.172
1	25.29	7.822	4.961	4.163
2	24.85	7.742	4.978	4.149
3	24.25	7.667	5.043	4.169
4	23.61	7.632	5.095	4.287
5	23.08	7.637	5.166	4.292
6	22.80	7.683	5.220	4.352
7	22.35	7.675	5.373	4.378

(b) 圧力容器の補強の最適化

A1 序言

近年大気汚染防止や地球温暖化対策の推進を図るため、燃料電池自動車(FCV)の普及が期待されている。燃料電池自動車では、燃料電池を極力高圧にすることが要求されている。しかしながら、安全でかつ高圧に耐える容器を作成することは容易でない。本研究はワイヤ補強によって安全性が高い、高圧の圧力容器を開発することを題材として、効率的で高精度な解析手法と最適化手法を開発することを目的として行っている。

A2 解析ソフト

汎用有限要素法解析ソフト ANSYS と MATLAB を用いて実施した。ANSYS とは、多種の解析（構造、伝熱、磁場、流体、圧電、音響など）が可能だけでなく、ほとんどすべての解析の間で連成解析が可能である。MATLAB とは数値解析ソフトウェアであり、行列計算、ベクトル演算、グラフ化や 3 次元表示などの豊富なライブラリを持った、インタプリタ形式の高性能なテクニカルコンピューティング言語、環境としての機能を持つ。

A3 解析モデル

ワイヤーを巻いた水素タンクのイメージは図 1 に示す。
寸法は丸い部分の寸法である



Fig. 1 Analysis model



Fig.2 Mesh for GA

A4 手法 1 遺伝的アルゴリズム

淘汰，交叉，突然変異等の進化を模擬した操作により新しい個体群作る．最適解を発見す

る手法である.

本研究は、ワイヤの替りにボンベの周りに要素を並び、要素のヤング率でワイヤがあるか、ないかを定める。

図2は上述した方法で遺伝子のように1と0でワイヤの位置を示した。MATLAB で書いたプログラムで ANSYS を自動化し、ワイヤの位置を全探索し、ワイヤの本数と位置の最適解を調べた。

図3は遺伝的アルゴリズム手法で解析した結果である。

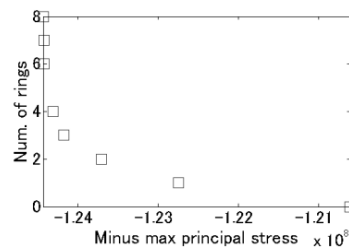


Fig. 3 Result of GA

A5 手法2 Efficient Global Optimization (EGO)

遺伝的アルゴリズムは収束が遅く多くの解が必要となり、より複雑な問題に適用困難なことがあり、EGO に着目した。EGO は大域的最適解を探索する手法であり、少ないサンプリング点で最適解を推定できる。

従来サンプリング点を追加する基準は EI である、先験情報有りの EI で最適解を調べた。

図4はワイヤが4本の場合の結果である。

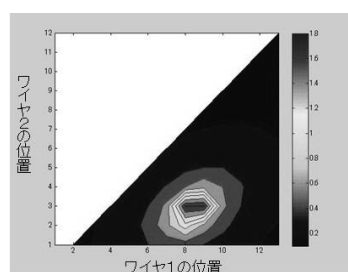


Fig. 4 Result of EI

A6 まとめ

燃料電池自動車の水素タンクのワイヤー補強の最適化を行った結果、遺伝的アルゴリズムの有効性を確認できた。

(c) フラクタル構造物の構造最適化

A1 諸言

近年複雑な形状をした建築物や構造物が注目されるようになりそれらの安全性や健全性評価を考慮した設計が重要になる。特に構造物の大きい複雑な形状による全体の挙動を最適化する様々な取組が行われている。そのひとつとして構造物の接続部の応力や変形量は重要課題と言える。

最近では計算機性能の向上や解析シミュレーション技術の高度化により、より高精度の解析が実現できるようになってきた。しかしながら複雑な構造を解析するには膨大な時間かつ複雑な形状のモデルを作成することが容易ではない。

本研究ではフラクタル構造の一つであるシェルピンスキー四面体を模擬した人工的に自然の木蔭を作るフラクタル日除けを題材に挙げ、解析精度の低下も含め、複雑構造物の最適化とロバスト性を考慮した最適化設計の開発の為に技術を開発した。

A2 解析シミュレーション

解析汎用有限要素法解析ソフト ANSYS Ver.13.0 を用いて実施した。ANSYS は、多種の解析（構造、伝熱、磁場、流体、圧電、音響など）が可能である。また連立方程式を解くソルバプログラムとモデルを作成するプリプロセッサ、結果処理を行うポストプロセッサがすべて一つの実行ファイルに収められ、ANSYS プログラムだけで有限要素解析に必要な作業がすべて可能になっている。またカスタマイズを行う為の言語 APDL が備わっており ANSYS のコマンドラインとともに、変数や IF 文や DO 文を使用することで有限要素解析を含めたプログラミングを行うことができる。GUI のカスタマズも可能で APDL と併用して使用し専用のマクロサブルーチンや GUI を使用することで特定の解析に対して操作を単純化することができる。本研究では APDL を用いてカスタマイズを行った。

A3 解析モデル

ANSYS を用いてシェルピンスキー四面体のモデルと四面体のモデルを作成し解析した。図 1 に示すのがシェルピンスキーのモデルである。横幅 3200mm、奥行き 1440mm、高さ 770mm、肉厚 2mm とした。図 2 に示すのが四面体モデルである。横幅 3200mm、奥行き 1440mm、高さ 770mm である。両モデルともヤング率 $4.1 \times 10^9 \text{Pa}$ （塩化ビニル）、ポアソン比 0.3 とし両モデルの各点を完全拘束し枠内の y 方向に鉛直下向きの荷重を加えた。

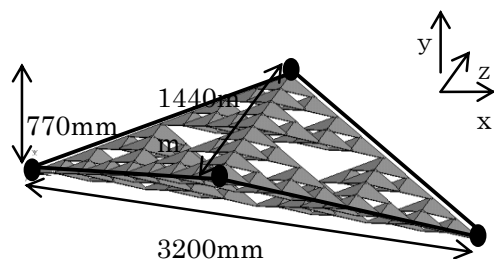


Fig1. Model with Sierpinski Tetrahedrons

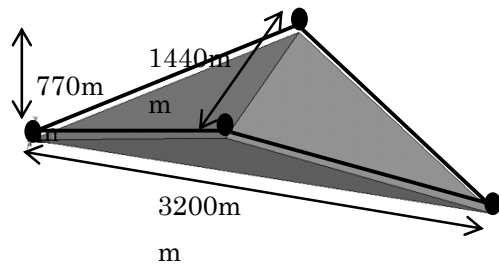


Fig2.Model with Tetrahedron

A4 等価

シェルピンスキー四面体と四面体モデルの変形量が等価になるようにする。要素剛性マトリックスの釣り合い式

$$\{f\} = [K]\{u\} \quad (1)$$

(1)式から強制変位 $\{u\}$ と反力 $\{f\}$ から直接、12行12列の等価な剛性マトリックス $[K]$ を求める。残りの変位量 $U_y, U_z, U_{xy}, U_{yz}, U_{zx}$ についても同様に剛性マトリックス $[K]$ 求めフラクタル日除けの大きさに並べた四面体モデルに等価したパラメータを適用しフラクタル日除けのクリティカルな節点を導出する。導出されたクリティカルな節点の最適化を行い再びシェルピンスキー四面体と四面体の等価を繰り返す。

現在、本手法による検証実験を行っている。

(4) 平成 24 年度進捗状況

本年度は、確率的メタモデルによる大域的最適化においては、いくつかの改良アルゴリズムを開発し、その検証実験を進めた。現在は、さらにアルゴリズムの改良を行っているところである。また、燃料電池車における圧力容器を対象として、最適化手法の適用検証を行った。さらに、フラクタル構造に均質化解析を組み合わせることにより、フラクタル構造全体を解析できる技術の開発を行った。

3.5. 可視化検証グループ

本プロジェクトでは、流体-構造連成解析の品質保証に特に重点を置いている。その中でも、

- ・解析結果を正しく理解し、評価すること
- ・実験結果等と公正な比較を行うこと

は重要な要素であると考えられる。そのためには、可視化は必須である。特に、連成解析は現象が複雑であり、限られた数値データのみでこれを評価することは困難である。実験における可視化技術やその応用は実験による検証の項目に譲り、ここでは、解析結果の可視化および、比較のための実験の可視化結果の表示を中心に研究を行う。解析は、当面簡単のため2次元および3次元でもそれほど3次元性が強くない問題を対象とするが、そうであっても特に流れ場は3次元であり、また今後のより一般的な問題に対応するためにも、3次元の可視化が本質である。そこで、ここでは連成解析において3次元データを如何に可視化するかを中心に研究を進める。1つは以下に述べるような立体視あるいはVR（バーチャルリアリティ）を用いた可視化であるが、これに限らず、3次元データの可視化方法を検討していく。

3.5.1. 3次元画像による定量的・定性的検証

(1) 目標・計画

本研究の目標は、流体構造連成問題について、数値解析の精度検証を支援するための、画像による定量評価、定性評価の手法やシステムを開発し、本プロジェクトで開発される連成解析手法の評価に供することである。特に、バーチャルリアリティ（VR）技術を利用した3次元可視化システムを中心に3次元画像による可視化評価を中心に研究を進める。

大きな計画としては、

平成24年度：

表示装置となるVR装置の導入を行い、ハードウェアの準備を行う。

平成25年度：

VR装置の上でソフトウェアを開発し、PCクラスタと結合してこの上での解析結果の表示を行う。

平成26年度：

画像による検証に利用するための可視化システムをVR装置上で開発する。

平成27年度：

積極的に可視化による比較・検証を行う。特に、（立体）画像を用い、実験と解析の可視化画像を重ねたり、並べたりして効果的な比較・検証方法について検討する。

平成28年度：

研究をまとめ、その公開方法について検討する。

としている。これらにより、従来とは異なる、多彩な可視化により、直感的・効果的な比較・検証が可能となり、開発される連成解析手法をより多面的に評価できると考える。

(2) 意義・国際社会との比較

連成解析は、複数の物理が関連するため、その妥当性の評価は単一の物理に対する解析よりも難しい。ここでは、流体-構造連成を中心に研究を行っているが、流体・構造それぞれ単独で妥当性を示すことができて、それらを組み合わせただけで連成問題が正しく解けるということでは必ずしもない。2つの物理をやり取りするものがあり、それが正しく評価されているかが、重要であるが、実験的に測定できるもの、できないもの等あり、単純ではない。ここでは、可視化、特に3次元画像を利用することで、実験と解析を出来る限り直接的に比較することを考えており、流体-構造連成解析の精度検証・妥当性検証のテンプレートとなることを期待している。

国際的に見ると、連成解析は計算力学における重要な研究テーマの1つであるが、必ずしも検証については進んでおらず、信頼できるとされる過去の解析例と比較したり、パラメータスタディによって、実験で見られる現象と、解析で得られる現象の範囲が等しい（あ

るいは近い) といったことを示すにとどまっている場合がほとんどである。連成解析手法を評価する手法の1つとして3次元画像を用いる方法は、ほとんど例がなく、その成果は重要なものとなると考える。

(3) 研究内容

本研究の中心となる装置は、図1の2面没入型ディスプレイ装置である。大きさは正面のスクリーンが $2.8 \times 2.1\text{m}$ 、下のスクリーンが同じく $2.8 \times 2.1\text{m}$ でここに2台のプロジェクターにより、それぞれ 1400×1050 の解像度の画像を表示する。画像は時分割方式で立体映像を投影できるようになっており、液晶シャッター眼鏡によって立体映像を観察する。立体映像は3台のグラフィックスワークステーションで生成する。1台はマスタで、あとの2台が正面と下面の映像を担当する。これとは別に観察者や観察者が持つコントローラの位置を赤外線カメラで取得するシステムがあり、1台のトラッキングワークステーションで制御する。グラフィックスワークステーションのマスタはトラッキングワークステーションから逐次データを取得して観察者（やコントローラ）の位置を計算する。

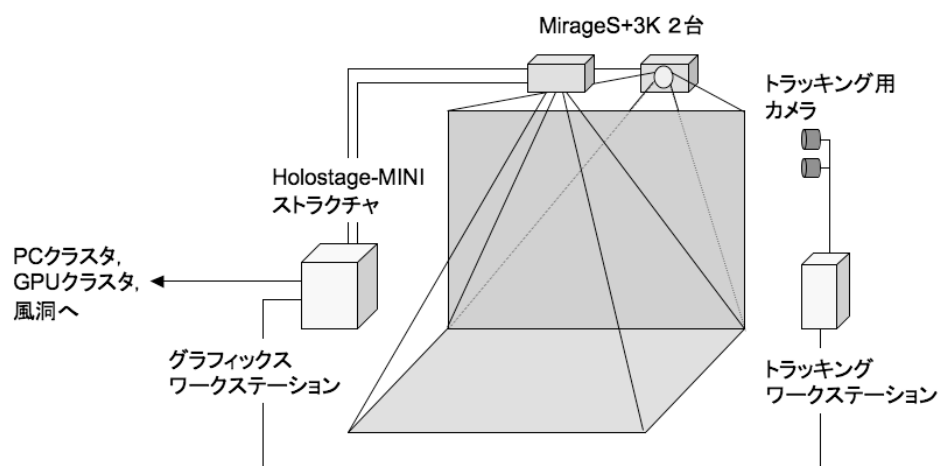


図1 システム構成図

このシステムに、流体-構造連成の3次元画像を表示する。表示する画像は大きく分けると、実験の画像と解析の画像の2種類である。これらを同時に、あるいは交互に表示することで直接的な比較を行う。

実験の画像については、物体の変位等、直接得られるものから、PIVで可視化した流れの速度分布やPSP（感圧塗料）で可視化した物体面上の圧力分布、画像解析により得られる応力分布等が考えられる。これらを得ることは、実験班の研究に委ねられるが、その3次元化や、本装置での表示にはデータの転送等も含めてさまざまな検討と技術的課題の克服が必要である。

解析結果については、単独の物理に基づく解析では多くの知識と経験があるものの、連成問題については、それぞれの物理に関する量を可視化表示するにとどまっており、まずは何を可視化することで連成解析の精度や妥当性評価につながるかの検討が重要となる。そのため、まず、さまざまな物理量の3次元可視化を可能とするシステムを開発する。解析は大規模となることが前提なので、そのデータをどのように転送し、また可視化するかも課題となる。

次に、実験と解析の比較である。たとえば、視点・スケールを合わせて交互に表示する／重ねて表示する、などが考えられるが、それには時間的・空間的な位置合わせ等、技術的な課題が多くある。また、必ずしも同じ量を表示できる訳ではないので、何を見るか、比べるかも問題となる。また、実験については、取得した画像（動画）をそのまま見るのか、あるいはデータを抽出して、解析結果と同じようにCGで表示するのかといったアプローチもありうる。これらについても時間をかけて検討し、システムを構築することで新しい可視化法・評価法につなげたい。

最終的には、システム化できるところはまとめたい。実験データも、標準的で精度の高いものが得られれば、標準問題として公開したいが、その際に3次元画像もその1つとできればよいと考えている。

(4) 平成 24 年度進捗状況

平成 24 年度は装置（ハードウェア）の導入を主な目的としていた。装置が大掛かりであるため、その詳細をつめ、実際に取得し、設置するにはそれなりに時間を要すると考えたからである。実際には、平成 24 年 12 月に図 2 のような装置を東洋大学川越キャンパス 1 号館 3 階に導入した。本来、計算力学研究センターは白山第 2 キャンパスに研究棟があり、当初はここに導入することを検討していたが、平成 25 年度に当センターが川越キャンパスに移動することが確定的となり、無駄な移動を少なくするため、あらかじめ川越キャンパスに設置した。ただし、平成 25 年度にはキャンパス内で設置場所を変更する予定である。

ハードウェアの構成は（3）で述べた通りである。図 2 に全体像を示す。上のプロジェクターは下面に投影する。正面のスクリーンは背面より投影する。図 3 と図 4 に計算機を示す。図 3 はグラフィックスワークステーションのマスタである。正面及び下面を受け持つワークステーションとトラッキングワークステーションは図 4 のように 1 つのラックに収まっている。



図2 VR装置全体。正面の映像は背面から投影する。



図3 グラフィックスワークステーションのマスター



図4 グラフィックスワークステーション2台とトラッキングワークステーション

図1のプロジェクターの下に2つ赤外線カメラがついている（図5）。これにより図6の液晶シャッター眼鏡とコントローラについているマーカを認識し、その位置をトラッキングワークステーションで算出する。

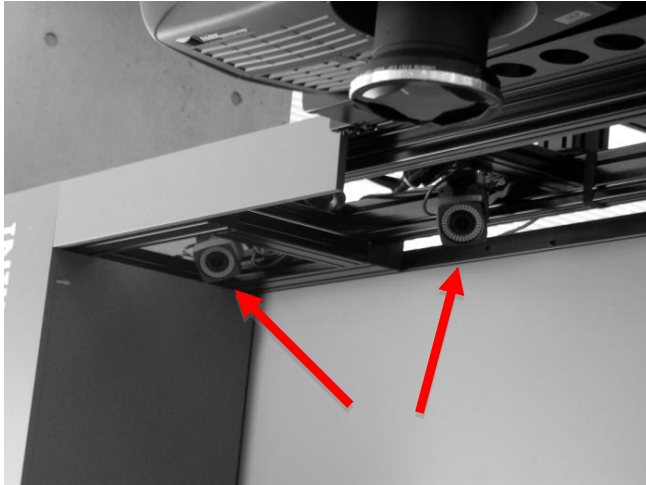


図5 トラッキング用赤外線カメラ（4台のうちの2台）



図6 コントローラと液晶シャッター眼鏡およびマーカ

平成 24 年度はまず、装置を入れ、基本的な動作を確認するところまでを目標とした。ハードウェアとして稼働するのはもちろんであるが、トラッキングワークステーションとその上で動作するソフトウェア（trackd）が正しく、観察者や観察者のコントローラの位置を認識すること、その情報をグラフィックワークステーションのマスタに送っていることを確認した。さらに、画像表示については、本格的なソフトウェアはこれから作っていくことになるので、まずは仮のデモプログラムによって、3次元立体画像が表示できることを確認し、平成 24 年度の当初目的は果たした。

今年度の残りと次年度は、この装置で動作する可視化システムを構築する予定である。

3.6. 横断的研究会

前述の5つの研究テーマは、本プロジェクトの柱となるものであるが、それぞれを横断的につなぐ研究や、それぞれの成果から派生した研究もまた重要であると考え。そこで、計算力学研究センターでは、そのときどきで研究会を立ち上げ、つの柱とは別のグループで研究を進めようと考えている。平成24年度は、まず3つの研究会を立ち上げた。ここではその概要を記す。

3.6.1. 連成標準問題検討会

連成解析の精度を高め、実用的な手法として育てるのには標準問題が必要であろうと考える。流体解析・構造解析などではそれぞれ手法を開発するとまず解くべき問題があり、それによって手法の精度や有効性等が確認できる。残念ながら連成問題にはそのような標準問題が少ない。そこで、ここでは流体—構造連成に関し、当センターで実験を行い、詳細なデータを取って標準問題として提案できるものを検討する。最終的には、実験・解析を行い、比較するとともに、それらを標準問題として公開する。平成24年度は、まず、現在標準的に解かれている問題を調査し、その中で、実験・計測が当センターで可能であると思われるものを選択し、実験準備を行った。具体的には流体力による2次元平板の曲げ問題等である。

3.6.2. 計算力学と（材料）データベースの会

連成問題の検証に重要な役割を果たすと考えられるものの1つが材料の特性をいかに解析に反映するかである。現在、材料力学の分野ではかなり詳細な材料データベースが作られているが、それらはなかなか計算力学と結びついていない。ここでは、それらをどのように結合していくことで、連成解析の精度向上が図れるかを目的としている。また、将来的には、いわゆるビッグデータと計算力学をどのように関連づけるかもテーマとなろう。平成24年度はまず材料データベースの現状把握を行っている。

3.6.3. 楽器の流体（音響）構造連成研究会

楽器は典型的な流体—構造連成問題であるが、楽器の設計・製造には多分に職人技的な意味合いが強く、科学的な解明が直接楽器の進歩には繋がらないなどの理由から、必ずしも積極的に取り上げられることはなかったと思われる。ここでは、客員研究員の横山准教授が、楽器製作を実際に手がけていることから、これと合わせて楽器の流体—構造連成問題と実験（実測）・解析の両面から解明し、設計に役立てようとするものである。平成24年度は、研究会を立ち上げたところで、これから問題設定等を行っていく。

4. 共同研究

4.1. JST CREST プロジェクト

H23 年 10 月より JST CREST 研究領域「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」において、研究課題名「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」が採択され、研究拠点を当センターに置き、研究を実施している。

4.1.1. 研究内容

ポストペタコンなど次々世代の並列計算機アーキテクチャにおいて、大規模な数値計算データ処理を必要とする実アプリケーション分野が高い演算効率を得るためには、マイクロプロセッサやメモリの階層構造を考慮したプログラミングモデルが必要である。特にそれは、入力データ生成や可視化などのプレ・ポスト処理から数値解析手法などのソルバー処理に至るまで、統一的に提供される必要がある。つまり、一般的な実アプリケーションはプレ／ソルバー／ポスト処理など目的に応じたモジュール群で構成されていることが多いが、ポストペタコンの利用が想定される大規模シミュレーションでは、全ての処理がポストペタコン上で行われ、モジュール間のデータ受け渡しを最小限にするようなプログラミングモデル、並びにそれに基づく大規模数値計算データ処理システムの基盤技術が不可欠と言える。

ここで、ポストペタコンのアーキテクチャとしては、SIMD 拡張命令、GPGPU、FPGA など何らかのアクセラレータを搭載したヘテロジニアスメニーコアで構成される計算ノードをネットワーク接続した、分散メモリ型アーキテクチャになると予想され、計算ノード内はチップ上／ボード上問わずに異種の演算装置が NUMA 型で搭載されることを想定する必要がある。また、演算性能と通信性能の向上比を考慮すると、マイクロプロセッサにとって計算ノード間ネットワークというのは、現在で例えると WAN 並みに遅く感じるネットワークとなる可能性があり、ポストペタコンはそれらを数十万から数百万ノード規模で接続して構築されると予想される。さらに、ポストペタコン利用が想定されるシミュレーションにおいて生成されるデータのファイルサイズはペタバイトオーダーになるが、ハードディスクなどの外部記憶装置の記憶容量やアクセス性能の大幅な改善にはまだ時間を要すると考えられる。つまり、ポストペタコンを利活用できるアプリケーションは、ヘテロジニアスな分散メモリ並列かつ数百万計算ノード環境において高い並列効率と演算効率を示す必要があるが、その高いハードルを突破できたとしても、大規模な入出力データを効率的に処理できない限り、本当の意味での利活用は不可能である。この問題を解決するためには、並列ファイル入出力システムの効率化やデータ圧縮展開アルゴリズムの高速化な

どだけではない、根本的なデータ量削減に関する解決策が求められる。

そこで本提案では、ポストペタコン上における大規模数値計算データ処理システムに関する基盤技術として、申請者らがこれまで主に数値解析手法向けに研究開発してきた階層型領域分割法の技術を応用した、階層型領域分割法による大規模数値計算データ処理システムの研究開発を目指す。この基盤技術にはアプリケーション分野に依存する箇所があることが予想されるため、本提案では連続体力学向けアプリケーションを対象としながら、具体的には以下の基盤技術開発をターゲットとする。

- A) マルチレベル領域分割法による連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列化ライブラリ
- B) マルチレベル領域分割法による多階層計算格子データの生成、操作および I/O ライブラリ
- C) 多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成と言語拡張機能

これらの技術に基づいて開発されるアプリケーションでは、核となるモジュール間のデータ受け渡し量を従来のものより 3 桁削減することが可能となり、ピーク演算性能比 20%以上のシステム開発の実現を目指す。

4.1.2. 研究実施体制

研究実施体制は次の 3 グループにより構成され、お互い連携して研究を遂行している。

(1) 「東洋大学」グループ

塩谷隆二(東洋大学, 研究代表者), 矢川元基, 田村善昭, 江澤良孝, 中林靖, Abul Mukid Mohammad Mukaddes, 石川格(東洋大学), 河合浩志(諏訪東京理科大学), 松原仁(琉球大学), 古川知成(バージニア工科大学), 淀薫(株式会社インサイト)

(2) 「名古屋大学」グループ

荻野正雄(名古屋大学, 主たる共同研究者), 金山寛(九州大学), 和田義孝(近畿大学)

(3) 「東京大学」グループ

越塚誠一(東京大学, 主たる共同研究者), 室谷浩平(東京大学), 藤澤智光(プロメテック・ソフトウェア株式会社)

5. 国際協力

5.1. バージニア工科大学

2012年8月にバージニア工科大学が中心となり、米国政府 National Science Foundation (NSF)を支援母体とし、タイヤ研究センター(CenTiRe <<http://www.centire.org/>>)が設立され、産官学によるタイヤ・車両業界全体の技術の底上げを目的とした研究・開発・教育・交流など様々な活動を行っている。研究対象は、タイヤ材料、ゴム材料、タイヤモデリング、製造手法、並列コンピューティングとダイナミックシミュレーションなど、多岐にわたっている。

日本からはタイヤメーカー4社、自動車メーカー2社の計6社が参加しており、国内活動の拠点を目的とし、2013年度より東洋大学計算力学研究センターが拠点大学として参加し、CenTiReの国際センターとしての活動を進めている。

6. 情報発信

6.1. 第 15 回計算力学フォーラム（サンパウロ）

2012 年 7 月 8 日から 13 日の 6 日間に亘りブラジル, サンパウロで行われた WCCM2012 にて, 第 15 回計算力学フォーラムを行った.

第 15 回計算力学フォーラムを, ブラジル, サンパウロで開催された 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM2012)内の, Mini-symposium「Large Scale Coupled Problems and Related Topics」の一環として開催した.

WCCM は 2 年に 1 回開催される世界で最も大きな計算力学の会議であり, 日本の計算力学関連の研究者になじみの深い国際会議であり, 日本からも多数の参加があった. 今回の会議では, 9 件の plenary lecture と 28 件の semi-plenary lecture があった. また, ミニシンポジウムが 165 件程度あり, これらのミニシンポジウムが 25 室に分かれパラレルセッションにおいて 5 日間にわたり開催された. 参加登録者数については 1,200 名程度と発表された.

本シンポジウムは 2 つのセッションから構成され以下の 9 件の講演が行われた.

- ・ A DDM Implementation Using Local Schur Complement Approach on Peta-scale Supercomputer
- ・ A Finite Element Simulation of Tsunami in Hakata Bay
- ・ An iterative method based on the domain decomposition method for large-scale complex symmetric linear systems
- ・ Development of Structural Eigenanalysis Module for the ADVENTURE System
- ・ Efficient numerical computations on magnetic field problems using an iterative domain decomposition method
- ・ Large-scale full-wave analysis of electromagnetic field by the finite element method using numerical human body models
- ・ Numerical analysis of surface characteristic and structural design for evaluation of polymer electrolyte fuel cell performance
- ・ Parallel Computing of Fluid-Structure Coupled Analysis Using SUPG/PSPG and Enriched Free Mesh Method.
- ・ Parallel Fluid-Structure Interaction Analysis of Wind Turbine Blades Using REVOCAP System



図1 会場入り口の様子

6.2. 第16回計算力学フォーラム (JSME CMD / 神戸)

2012年10月6日から9日の4日間に亘り神戸市ポートアイランド南地区で行われたCMD2012にて、第16回計算力学フォーラムを行った。

第16回計算力学フォーラムとして、兵庫県・神戸市ポートアイランド南地区で開催されたJSME 25rd Computational Mechanics Division Conference 2012 (CMD2012)内で、計算力学フォーラムとして、オーガナイズドセッション「大規模並列・連成解析と関連話題」を開催した。本フォーラムは2つのセッションから構成され以下の6件の講演が行われた。

- ・ 逆行列アプローチによるBDD コースグリッド修正の高速化
- ・ 領域分割法におけるスパース行列アルゴリズムの比較
- ・ MPI-OpenMP ハイブリッド並列領域分割法による100億自由度規模有限要素解析
- ・ 細分割ツールを用いた大規模並列磁場解析
- ・ 大規模複合構造物のマルチスケール解析
- ・ ADVENTURE 固有値解析モジュールの開発

これらの講演と議論を通し、大規模計算を中心とした現状と今後の課題に関する議論が行われた。

また、9日から11日に引き続き開催されたInternational Computational Mechanics Symposium 2012のPlenary Lectureにおいて、矢川元基教授による講演「Some considerations on high performance computational mechanics」が行われた。



図1 会場の様子



図2 懇親会の様子

6.3. 第17回計算力学フォーラム (ICCM / ゴールドコースト)

2012年11月25日から28日の4日間に亘りオーストラリア, ゴールドコーストで行われた ICCM2012 にて, 第17回計算力学フォーラムを行った.

第17回計算力学フォーラムとして, オーストラリア, ゴールドコーストで開催された 4th International Conference on Computational Methods (ICCM2012) 内で, Mini Symposia 「High Performance Computing and related topics」を開催した. 本シンポジウムは2つのセッションから構成され以下の10件の講演が行われた.

- ・ A Massively Parallel Structural Analysis Code on Peta-scale Supercomputer Based on Domain Decomposition Method Using Local Schur Complement Approach
- ・ Hybrid OpenMP+MPI parallelization of an implicit decoupling method for direct numerical simulation of turbulent boundary layer
- ・ Large Scale Parallel Analysis of Eigenanalysis Using ADVENTURE System with CAD System
- ・ Calculation of Volume from Crank Angle Using Reconfigurable Hardware
- ・ Performance of Domain Decomposition Method with Sparse Matrix Storages Schemes
- ・ Large Scale Parallel Analysis of Acoustic Fluid Structure Interaction Using ADVENTURE System
- ・ Space.Time Fluid.Structure Interaction Techniques for Long Arterial Segments
- ・ A Scalable and High Performance Implementation of the Domain Decomposition Method
- ・ Domain decomposition analysis of thermal convection problems based on the characteristic curve method

- ・ Optimal design of centrifugal pumps impeller

いずれも大規模並列計算に関する発表であり，これらの講演と議論を通し，大規模計算を中心とした現状と今後の課題に関する議論が行われた．



図 1 会場の様子

7. 教育活動

センター研究員らの指導のもとで、東洋大学工学部卒論学生、工学研究科大学院学生がセンターにおいて研究活動を行っている。

7.1. 教育活動風景

田村研究室

田村研究室では、学部生 7 名の卒業研究および大学院生 1 名の修士研究と 1 名の博士研究を行っている。

週 1 回のセミナーでは、大学院生 1 名、学部生 2,3 名が研究発表を行う。またそれ以外の学生は 1 週間の進捗を報告する。また、学部生は週 1 回の輪読で専門書を読み、大学院生は週 1 回の輪読で学術論文紹介を行っている。図 1 はセミナーの様子である。



図 1. セミナー風景

矢川研究室

矢川研究室では、博士課程の学生 1 名とポスドク、客員研究員を交えて、月に数回セミナーを開き、進捗状況を報告し、議論を行なっている。大学院生は、各自が計算力学を用いた独自のテーマを持ち、研究に取り組み、Java や C 言語で実装している。Free Mesh Method の高精度化手法である Enriched Free MeshMethod のき裂問題に対する有効性の検討や、精度の向上、六面体要素への拡張についての研究や、流体-構造連成解析手法への適用に関する研究、さらに粒子(節点)に回転やひずみ、曲率などの物理自由度を直接定義することができ、低自由度でありながら高精度な解が得られる"付帯条件付き多次元型移動最小自乗法"を用いた三次元弾性固体解析に関する研究が行われている。



図 2. 3次元き裂進展解析

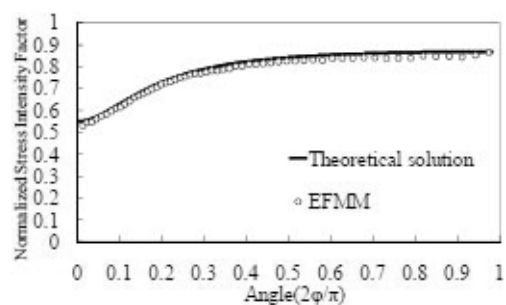


図 3. 解析精度検証結果

江澤研究室

江澤研究室では、学部学生 2 名卒業研究および大学院生 3 名の修士研究および博士研究を行っている。学部学生は毎週 1 回セミナーを開き、勉強会や進捗状況報告をしてもらっている。大学院生は、月に数回各自の研究の進捗状況報告および勉強会を実施している。学部学生はまず汎用構造解析プログラム ANSYS を習得してもらい、つぎに 3 次元 CAD の勉強をしてもらっている。大学院生は独自に開発したプログラム等を使って研究を行っている。図 4 はセミナーでの勉強会風景である。図 5 は ANSYS を使って解析をしている様子である。



図 4. セミナー風景



図 5. 卒業論文の研究風景

塩谷研究室

塩谷研究室では、学部学生 17 名の卒業研究、プロジェクト研究および大学院生 1 名の修士研究を行っている。毎週 1 回開催されるセミナーでは学生が研究進捗状況についての発表などを行っている。図 6 はタブレット端末上での可視化システムの様子であり、図 7 はスマートフォン向けアプリケーション開発の様子である。



図 6. 携帯端末上での可視化の様子

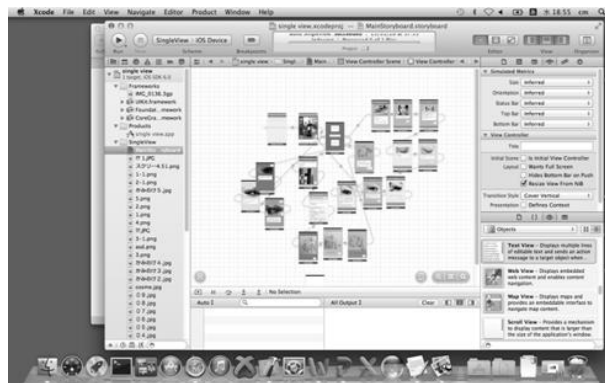


図 7. アプリ設計画面

中林研究室

中林研究室では、学部学生 10 名が卒業研究を行い、大学院生 1 名が博士論文のための研究を行っている。毎週 1 回開催されるセミナーでは各回とも 4 名が研究発表を行い研究の進捗状況の報告や内容について議論する。また、卒業論文提出締切が近くなると全員が週 1 回の進捗状況を行うことになっている。卒論発表会は研究内容の近い田村研究室と合同で行っている。図 8 は研究室の様子であり、図 9 は研究発表会の様子である。



図 8. 研究室の様子



図 9. 研究発表会

7.2. 卒業論文・修士論文の紹介

田村研究室

(1) 画像に基づく流体解析手法の開発

複雑な実形状まわりの流れを解析するには、物体形状に関する詳細な 3 次元データが必要であり、またそれを元に計算格子（要素）を生成するには専用のツールやプログラムをもってしてもかなりの時間と手間を要することが知られている。そこでここではそのような詳細なデータがない場合でも流体解析ができるようにするための手法として、画像をベースとしてその流れ場を解く方法を研究している。

(2) 医療分野での流体解析技術の利用

コンピュータによる流体解析、いわゆる CFD (Computational Fluid Dynamics) の進歩は目覚ましいが、まだまだ実用分野は限られている。ここでは、CFD の適用範囲を広げることを目的として、特に医療分野への応用について研究を行っている。具体的には、超音波による治療について解析を行っている。

(3) 混相流の解析手法の開発

気液 2 相流など混相流の数値解析にはいまだ様々な問題がある。ここでは、1 個の気泡が変形あるいは崩壊する問題や、多数の小気泡が液体中に存在する気泡流など問題ごとに手法を開発し、解析を行っている。

江澤研究室

(1) 震災時における機の最適化

機に震災時に荷重が掛かった場合の強度を評価し、強度を高くすることを検討した。

(2) 位相最適化を用いたローラーチェーンのプレート形状最適化

自転車のローラーチェーンのプレートの形状最適化を行った。

(3) ゲームプログラミングの最適化

オセロゲームの強さを高めるために、各種パラメータの最適化を行った。

(4) 圧力容器の効率的解析技術と最適化技術の開発

燃料電池車の圧力容器を題材として、最適化の効率化技術の開発を行った。まず、遺伝的アルゴリズムの適用を行い、問題点を抽出を行った。次に、Efficient Global Optimization の適用を行い、効率化できる見通しを得た。さらに先験情報を組み込むことにより、さらに効率的な最適化を実現した。

塩谷研究室

(1) マルチメディアデバイスを用いたシミュレーション

近年普及が進んでいるスマートフォンと呼ばれるポータブルマルチメディアデバイス端末について、その直感的かつ簡易な操作性に着目し、クラウド型 CAE システムの入出力端末としての利用を目的とし、マルチメディアデバイス上での可視化システムの構築を行なった。

(2) ネットワーク型 CAE ソフトウェアの開発

本研究では、遠隔地で運用される並列計算機システムを、インターネットを介して利用するネットワーク型 CAE システムについて、九州大学と共同研究を行うことにより、関東と九州間での遠隔利用実験を行った。解析結果の可視化機能の拡張を行い、可視化可能な物理量の選択肢を広げることを実現した。

(3) Windows 版熱伝導解析モジュール開発

計算サーバ上で実行される大規模有限要素並列計算を、簡易に実現する Windows 版システムとして開発された構造解析のシステムに、熱伝導解析機能を追加することを目的として、モジュールの開発を行い、いくつかの問題に対して有効性の検討を行った。

中林研究室

(1) スマートフォン用アプリケーションの企画・デザイン・開発

Android 端末や iOS 端末など、近年、情報機器の主流になりつつあるスマートフォンをプラットフォームとして、従来 PC や大型の計算機で行っていたような数値シミュレーションを実現する手法について広く研究を行っている。

(2) ニューラルネットワークを用いた予測システムの開発

ニューラルネットワークを用いて過去のデータを学習させることにより、何らかの予測を行うシステムの開発を行っている。これまでには、ドーナツショップの販売個数予測や、パチスロ機の設定予測などを試してきたが、本年度は過去の天気変化のデータを用いて、24 時間後の天気をニューラルネットワークで予測するシステムの構築を行った。

(3) 自己組織化マップの応用に関する研究

ニューラルネットワークの一種で、教師なし学習が可能であることや、多次元データの 2 次元マップ上での分類などに特徴がある自己組織化マップを用いて、様々なデータの分類や予測を行っている。本年度は過去の音楽 CD の売り上げや、曲自体のテンポや調などのデータを自己組織化マップにより分類・整理することにより、音楽の流行の変遷や将来予測をするシステムの構築を行った。

8. 業績リスト

本章では、2012 年 1 月から 2013 年 2 月までの当センターに関する業績を記載する。

8.1. 総説・解説・エッセイ

1. 矢川元基, "日本機械学会計算力学部門設立当時のことなど", 日本機械学会計算力学部門ユースレター, No.49, pp.1-3, 2012
2. 矢川元基, "情報は誰のものか", 日本原子力学会計算科学ニュース, 2012
3. 矢川元基, "巻頭言：事故調査の目的は何か", 原安協だより, No.247, pp.1-2, 2012
4. 矢川元基, 高橋桂子, "巻頭言：福島原子力事故、シミュレーションおよびその発言", 学術の動向, Vol.17, 2012
5. 田村善昭, 鶴見伸夫, "気泡を含む水中における集束超音波の数値解析＝超音波治療への応用を目指して＝", 超音波 TECHNO, VOL. 24, No. 4, pp. 46-51, 2012.7-8
6. 矢川元基, "巻頭言：2013 年を迎えて", 原安協だより, No.251, pp.1-2, 2013

8.2. 論文

1. M.MASUDA, Y.NAKABAYASHI and G.YAGAWA, "Radius Parallel Self-Organizing Map", Journal of Computational Science and Technology, Vol.6, pp.16-27, 2012
2. H.HIRAI, M.CHIBA, M.ABE, T.IKEDA and N.MIYAZAKI, "Stress Intensity Factor Analysis of an Interfacial Corner between Piezoelectric Bimaterials using the H-integral Method", Engineering Fracture Mechanics, Vol.82, No.1, pp.60-72, 2012
3. R.IMAI and M.NAKAGAWA, "A Reduction Algorithm of Contact Problems for Core Seismic Analysis of Fast Breeder Reactors", CMES:Computer Modeling in Engineering and Sciences, Vol.84, No.3, 253-282, 2012
4. N.TSURUMI, Y.TAMURA and Y.MATSUMOTO, "Improvement of Bubble Model in High Void Fraction for Cavitating Flow Simulations", Journal of Computational Science and Technology, Volume 6, No 3, pp. 113-128, 2012
5. T.ASHINO and Y. YAMASHITA, "Development of an Openmath Content Dictionary for Mathematical Knowledge of Materials Science and Engineering ", Data Science Journal, 11 (2012) PASMD17-ASMD21, 2012
6. K.MUROTANI, G.YAGAWA and J-B, CHOI, "Adaptive finite elements using hierarchical mesh and its application to crack propagation analysis", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.253, pp.1-14, 2013
7. K.SAKIHARA, H.MATSUBARA, T.EDO and G.YAGAWA, "Multi-dimensional Moving Least Squares Method Applied to 3D Elasticity Problems", Engineering Structures, Vol. 47, pp. 45-53, 2013
8. 崎原康平, 松原 仁, 江戸孝昭, 原 久夫, 矢川元基, "弾性固体問題における付帯条件付き多次元型移動最小自乗法", 日本機械学会論文集 (A 編), Vol.78, No.786, pp.142-151, 2012 年
9. 増田正人, 中林 靖, 矢川元基, "フリーキックサポートシステムの開発", 計算工学会論文集, No.20120009, 2012 年

10. 関 章一, 松本龍介, 井上義規, 武富紳也, 宮崎則幸, "類似的に水素の影響を考慮した鉄 EAM ポテンシャルの作成と水素ぜい化の分子動力学シミュレーション", 材料, 第 61 巻 2 号, pp.175-182, 2012 年 2 月
11. 松原 仁, 原 久夫, "風化サンゴ骨格の破壊強度とその性状: 微細孔と孔内液圧の影響", 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 68, No. 4, pp. 610-620, 2012 年 10 月
12. 松原 仁, 江戸孝昭, 原 久夫, 伊良波 繁雄, "振り外力を受ける環状切欠き丸棒におけるファクトリールーフ状破断面の形成メカニズムに関する数値解析的検討", 日本計算工学論文集, No. 20120016, 2012 年 11 月
13. 松原 仁, 江戸孝昭, 原 久夫, "岩盤のき裂ネットワークを考慮した不連続体解析手法の提案およびき裂進展解析", 日本計算工学論文集, No.20120017, 2012 年 12 月
14. 鶴見伸夫, 田村善昭, 松本洋一郎, "音波伝播の式を用いた気泡を含む液体中を伝播する集束超音波の数値解析", 日本機械学会論文集 B 編第 78 巻第 796 号, pp. 2096-2112, 2012 年 12 月
15. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, "粒状構造を有する脆性材料の離散き裂進展解析手法の開発および性能評価", 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.69, pp.31-45, 2013 年 1 月

8. 3. 招待講演

1. G.YAGAWA, "An Efficient Domain Decomposition Algorithm for Fe Simulation", The Colloquium on Advances in Computational Science, Engineering and mathematics in honor of Tinsley Oden's 75th birthday, Univ.Texas at Austin, USA, 2012.1.19
2. Y.EZAWA, S.SHIMAMURA, K.SUGA and S.AOKI, "Effects of Material Properties of Cue on Ball Trajectory in Billiard", The 4th International Conference on Advanced Manufacturing, Taiwan, 2012.3.4-8
3. G.YAGAWA, "Memories of Ptofessor Y.J.Kim", ASINCO9 (Kaohsuing, Taiwan), 2012.4.19
4. G.YAGAWA, "Some Remarks on Domain Decomposition Algorithm for FE Simulation", Celebration Meeting of the FEM Class of 42 Fellows (Barcelona, Spain), 2012.5.8
5. G.YAGAWA, "Some Strategies for High-performance FEM", ESI Global Executive Meeting (Amagi, Japan), 2012.5.22
6. K.SAKIHARA, H.MATSUBARA and G.YAGAWA, "An Application of Multi-dimensional Moving Least Squares Method to 3D Crack Analysi", 10th World Congress on Computational Mechanics (Sao Paulo, Brazil), 2012.7.10
7. G.YAGAWA, "Some considerations on high performance computational mechanics", The JSME-CMD International Computational Mechanics Symposium (ICMS) (Kobe, Japan), 2012.10.11
8. G.YAGAWA, "Preliminary study for exascale computing in Japan", Second international workshop on "COLlaborative DEvelopment of SIMulation software of next GeNeration (CO-DESIGN 2012)" (Peking University, Beijing, China), 2012.10.23-25
9. G.YAGAWA, "Recent advances on simulation technology", ESI Users' Forum Japan 2012 (Tokyo, Japan), 2012.11.21
10. 藤澤智光, "防災分野におけるシミュレーション CG の効用と課題", 第 1 回 S&V(Simulation & Visualization)研究会, 日本計算工学会, 中央大学, 2012.3.2

11. 矢川元基, "福島原子力事故の総合工学的観点", 第 2 回「量子ビームを用いた材料・生体の構造と機能の研究」成果報告会 (いばらき量子ビーム研究センター、東海村、茨城), 2012.3.16
12. 矢川元基, "計算科学技術における我が国の貢献", 日本学術会議第 3 回計算科学シミュレーションシンポジウム (東京), 2012.4.25
13. 芦野俊宏, "国際材料データベースの事例と課題", 日本地球惑星科学連合 2012 年大会 地球電磁気・地球惑星圏学会 データ問題検討分科会, 2012.5.22
14. 矢川元基, "計算科学技術に関する 2, 3 の課題", 第 24 回 CCSE ワークショップ (柏), 2012.6.19
15. 矢川元基, "計算力学シミュレーションの現状と課題", ADVENTURECluster ユーザー会 (東京), 2012.6.27
16. 藤澤智光, "MPS 法による津波シミュレーション", フォーラム 6 防災・減災にむけて 計算力学はいかに貢献できるか, 第 24 回計算力学講演会, 岡山大学, 2012.10.10
17. 藤松信義, "技術をどのように伝えるか", 日本実験力学学会 産学連携支援センター主催パネルディスカッションー実験技術を語るー, 2012.12.15

8. 4. 講演論文・口頭発表

1. T. IKEDA, M. OKA, S. KAWAHARA, N. MIYAZAKI, K. MATSUMOTO, S. KOHARA, Y. ORII, F. YAMADA and M. KADA, "Combination between the Nonlinear Finite Element Analyses and the Strain Measurement Using the Digital Image Correlation for a New 3D SIC Package", IEEE International 3D System Integration Conference (3DIC), Osaka, Japan, 2012.2.1
2. A.M.M.MUKADDES, "Performance of Domain Decomposition Method with Sparse Matrix Storage Scheme", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29
3. T.ASHINO and Y.YAMASHITA, "Development of Openmath Content Dictionary for Mathematical Knowledge of Materials Science and Engineering", The 3rd Asian Materials Database Symposium, AMDS 2012, Japan Nara, 2012.4.17
4. Hitoshi MATSUBARA, Taka-aki EDO, Ryuji SHIOYA and Genki YAGAWA, "Large-scale simulation for fracture pattern of brittle porous media in Compression", Proceedings of 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM), 2012.7
5. Kohei SAKIHARA, Hitoshi MATSUBARA, Ryuji SHIOYA and Genki YAGAWA, "An application of Multi-dimensional moving least squares method to 3D crack analysis", Proceedings of 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM), 2012.7
6. I.ISHIKAWA, Y.KOBAYASHI, R.SHIOYA, R.NAKAOKA, A.MATSUOKA, G.YAGAWA, "Development of Structural Eigenanalysis Module for The Adventure System", The 10th WORLD CONGRESS ON COMPUTATIONAL MECHANICS (WCCM 2012), 19719.pdf, SaoPaulo, Brazil, 2012.7.9
7. M. FUKAYA, R. MORINAKA, N. SAITOU, H. HATOU, Y. TAMURA, Y. MATSUMOTO, "Cavitating Jet Simulation for Predicting Residual Stress Improvement of cylindrical Structure by Water Jet Peening", 8th International Symposium on Cavitation, Singapore, 2012.8
8. Y. TAMURA, N. TSURUMI, Y. MATSUMOTO, " Further Improvement of Bubble Model for Cavitating Flow Simulations", 8th International Symposium on Cavitation, Singapore, 2012.8

9. Kaworu YODO, Ryuji SHIOYA, Akio MIYOSHI, Takuru ASAUMI, " Parallel CAE System for Large Scale Problems Based on HTML5 and WebGL", DETC2012-70909, pp.1-7, Proceedings of the 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2012, August 12-15, Chicago, Illinois, USA, 2012.8.14

10. Kaworu YODO, Hiroshi KAWAI, Hiroshi OKADA, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, "Development of The Next-Generation Computational Fracture Mechanics Simulator on The Earth Simulator 2", DETC2012-70909, pp.1-7, Proceedings of the 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2012, August 12-15, Chicago, Illinois, USA, 2012.8.15

11. Hitoshi MATSUBARA, "Numerical simulation of fracture network in rock based on GFEM and MLSM", KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2012, pp.227-231, 2012.9

12. T.ASHINO, "Development of Openmath Content Dictionary for Mathematical Knowledge of Materials Science and Engineering", 日本学会会議主催学術フォーラム「データと発見-Data Intensive Scientific Discovery」, 2012.9.10

13. N. TSURUMI, Y. TAMURA, Y. MATSUMOTO, "Numerical Simulation of Wave Propagation in Two-Phase Fluid", European Congress on Computational Methods in Applied Science and Engineering (ECCOMAS 2012), Vienna, Austria, 2012.9.10-14

14. Y.EZAWA, S.TAKASHIMIZU, "Novel infill criterion for stochastic metamodel-based optimization", ECCOMAS 2012 - European Congress on Computational Methods in Sciences and Engineering, 2012.9.11

15. T.ASHINO, "Electronic Data Exchange for Materials Science and Engineering", IUMRS-ICEM 2012, Yokohama, Japan, 2012.9.27

16. A.M.M.MUKADDES, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, " A Computational Study of Sparse Matrix Storage Schemes in The Domain Decomposition Method", Proceedings of 25th JSME Computational Division Conference, Kobe, Japan, 2012.10.6

17. A.M.M.MUKADDES, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, "ADVENTURE _Thermal-An Open Source Module for Large Scale Heat Conduction Problems", PUCDIP 2012, Kyusyu, Japan, 2012.10.13
18. Toshihiro ASHINO, "Data and Expressions for Science and Engineering into e-Journal", 23nd International CODATA Conference, Taipei, Oct., 2012
19. Hitoshi MATSUBARA, Takaaki EDO and Hisao HARA, "Crack Propagation Model for Discrete Fracture Network based on GFEM and MLSM", Proceedings of the 4th international conference on computational methods, 2012.11
20. N. FUJIMATSU, "Direct Numerical Simulation on Drag Reduction of Channel Flow with Visco-Elastic Wall", 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2013.1.7
21. 大橋秀樹, 浅海拓来, 塩谷隆二, "スマートフォン端末を用いた CAE 可視化システム", HPCS2012, 名古屋大学, 2012.1.26
22. 岡大智, 池田徹, 宮崎則幸, "デジタル画像相関法によるひずみ計測を用いた三次元積層チップの微細接合部のひずみ評価", 第 18 回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム (Mate 2012), 横浜市, 2012.1.31
23. 小林陽介, 矢川元基, "3次元き裂の自動進展解析", 第 61 回理論応用力学講演会, 東京大学, 2012.3.7-9
24. 松尾友紀, 伊倉宏治, 田村善昭, "圧縮性気液二相流の数値解析手法の開発", 日本機械学会関東支部第 18 期総会講演会, 日本大学生産工学部 (千葉), 2012.3.9-10
25. 小俣慎弥, 田村善昭, "ダリウス形風車まわりの流体解析", 日本機械学会関東支部第 18 期総会講演会, 日本大学生産工学部 (千葉), 2012.3.9-10
26. 小金丸正明, 多田直弘, 池田 徹, 宮崎則幸, "HyENEXSS を用いた N 型半導体における機械的応力効果のシミュレーション", 応用物理学会関西支部セミナー: 先端半導体デバイスのシミュレーション, 吹田市, 2012.3.27
27. 芦野俊宏, "材料データ交換の標準化: CEN WS SERES の概要", CCMR-HDDMPPS (CREST プロジェクト) 合同シンポジウム, 2012.3.29

28. 長岡 慎介, "流体・構造連成解析の為の新しい解析手法とその応用例", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29
29. 小林陽介, "き裂の 3 次元自動進展解析", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29
30. 中川雅俊, "高速炉の炉心群振動解析手法の研究", ", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29
31. 宮崎則幸, " α 鉄中の転位射出に及ぼす水素の影響", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29
32. 江澤良孝, "最適デザインの効率化について", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29
33. 藤澤智光, "防災シミュレーションと CG", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29
34. 中林靖, "リアルタイムシミュレーションの防災への応用", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29
35. 田村善昭, "キャビテーション/エロージョンの数値予測 ", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29
36. 塩谷隆二, "ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解放ライブラリ開発", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29
37. 松原仁, "多孔質体の圧縮破壊パターンに関する数値解析的検討", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29
38. 矢川元基, "東電原子力事故調査と計算力学", CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム, 東洋大学, 2012.3.29
39. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 吉村忍, "領域分割法における BDD 前処理のための並列直接ソルバーの開発", 第 15 回計算工学講演会, Vol.15, No.1, pp.191-192, 2012.5.27

40. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, "先在き裂を考慮したき裂進展シミュレーション", 第 2 回土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会概要集, pp.95-96, 2012.9
41. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, "脆性材料のき裂進展シミュレーション: 先在き裂と破壊プロセスの関連性", 土木学会第 67 回年次学術講演概要集, pp.339-340, 2012.9
42. 広瀬孝三郎, 松原仁, 江戸孝昭, 原久夫, "き裂ネットワークモデルを用いたき裂性岩盤における物質移動シミュレーション", 土木学会第 67 回年次学術講演概要集, pp.353-354, 2012.9
43. 横山真男, 窪田佳寛, 望月修, "突入物体の表面性状を考慮したスプラッシュの数値シミュレーション", 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012.9.10
44. 藤松信義, "Wavelet 基底に基づく VITA 法による乱流渦運動解析", 日本機械学会 2012 年度年次大会, (CD-ROM Proceedings), J054042, 2012.9.10
45. 藤松信義, "乱流摩擦抵抗低減効果と粘弾性皮膜運動に関する数値的研究", 日本機械学会 2012 年度年次大会, (CD-ROM Proceedings), J054046, 2012.9.10
46. 横山真男, 菊地謙次, 窪田佳寛, 望月修, "ハイドロゲル壁面近傍における流れの数値シミュレーション", 日本流体力学会年会 2012, 2012.9.17
47. 石川格, 小林陽介, 塩谷隆二, 矢川元基, "ADVENTURE 固有値解析モジュールの開発", 第 25 回計算力学講演会、407、神戸, 2012.10
48. 松原仁, "光外乱が亜熱帯生物の定着に及ぼす影響", 平成 24 年度沖縄しまて協会技術環境研究所研究発表会論文集, pp.25-34, 2012.10
49. 崎原康平, 松原仁, 江戸孝昭, 矢川元基, "付帯条件付き多次元移動最小自乗法を用いたき裂進展に関する研究", 日本機械学会第 25 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, pp.544-545, 2012.10
50. 横山真男, 菊地謙次, 窪田佳寛, 望月修, "生体を模擬したハイドロゲル壁面近傍における流れの数値シミュレーション", 可視化情報全国講演会 2012, 2012.10.4

51. 横山真男, 菊地謙次, 窪田佳寛, 望月修, "水面に突入する物体表面の滑りを考慮したスプラッシュのシミュレーション", 日本機械学会 第 25 回計算力学講演会, 2012.10.7
52. 広瀬孝三郎, 江戸孝昭, 松原仁, "き裂性岩盤の狭小領域構造を考慮した広大領域における浸透流解析", 第 25 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, 2012.11
53. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, "き裂性岩盤におけるき裂進展解析", 第 25 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, 2012.11
54. 李思陽, 江澤良孝, "圧力容器の効率的解析技術と最適化技術の開発", 第 10 回最適化シンポジウム 2012, 2012.12.6
55. 高清水聖, 江澤良孝, "確率的メタモデルによる大域的最適化", 第 10 回最適化シンポジウム 2012, 2012.12.7
56. 島村雅彦, 江澤良孝, "フラクタル構造物の構造最適化設計", 第 10 回最適化シンポジウム 2012, 2012.12.7
57. 藤松信義, "乱流統計量を求める際の注意点について", 日本実験力学学会 分科会合同ワークショップ, 2012.12.7
58. 田村善昭, 鶴見伸夫, 松本洋一郎, "気泡の合体の効果を考慮したキャビテーション流れのための気泡モデル", 第 26 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2012.12.18-20

9. 結び

本報は、2012 年度の活動を取りまとめたものである。なお、2013 年 3 月に予定されているセンター評価委員会に間に合わせるために原稿締め切りを 2013 年 1 月 30 日とした。したがって、それ以降のデータについては掲載されていないことをお断りしたい。

社会が抱える問題、あるいは産業界が抱える問題を発掘しながらソリューションを見出していくことをセンターに関係する全ての研究者が使命として共有しながら今後の活動や研究開発を進めていきたい。

東洋大学計算力学研究センター

2013 年度 年報



2014 年 3 月

1. まえがき	3
2. 概要	4
2.1. センター設置について	4
2.2. 組織	5
3. 研究成果	7
3.1. 解析手法開発グループ	7
3.1.1. 並列流体-構造連成解析手法の開発	8
3.1.2. 流体-構造連成解析の SOM を用いた分類及び予測技術の開発	14
3.1.3. 物体壁面の表面性状を考慮した流れのシミュレーション	17
3.1.4. 飛来塩分シミュレーション -流体～粒子弱連成解析-	30
3.1.5. ブロック構造を有する固体の大規模 3 次元モデル生成および固液連成解析 技術の構築	33
3.2. 大規模並列化グループ	36
3.2.1. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発	37
3.2.2. 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築	43
3.3. 新規実験計測グループ	46
3.3.1. 流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムの構築	47
3.3.2. 境界層特性評価のための普遍関数構築	51
3.3.3. 弾性体による空気抵抗低減効果に関する検討	53
3.4. 精度・妥当性検証グループ	56
3.4.1. 段ボールにおける構造解析手法の開発と精度の検証	57
3.4.2. 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式開発	60
3.4.3. 確率的大域的最適化	62
3.4.4. 複雑構造物の軽量化設計技術の開発	65
3.5. 可視化検証グループ	67
3.5.1. 3 次元画像による定量的・定性的検証	68
3.6. 横断的研究会	73
3.6.1. 連成標準問題検討会	73
3.6.2. 計算力学と（材料）データベースの会	73
3.6.3. 楽器音響と流体構造連成研究会	73
3.6.4. タイヤ研究会	74
4. 共同研究	75
4.1. JST CREST プロジェクト	75
5. 国際協力	77
5.1. TU-LHU student workshop（龍華科技大学 / 台湾）	77
5.2. LHU-SKKU-TU 若手ワークショップ（白山 / 日本）	78

5. 3.	SSME 2013 (墾丁 / 台湾).....	79
6.	情報発信	80
6. 1.	第 18 回計算力学フォーラム (JSME-CMD / 佐賀)	80
7.	教育活動	81
7. 1.	教育活動風景.....	81
7. 2.	卒業論文・修士論文の紹介	84
8.	業績リスト	86
8. 1.	総説・解説・エッセイ	86
8. 2.	論文	86
8. 3.	講演論文・口頭発表.....	87
9.	受賞	92
9. 1.	日本機械学会計算力学部門賞第 91 期業績賞	92
9. 2.	2013 JACM Fellows Award(日本計算力学連合フェロー賞)	93
10.	結び.....	94

1. まえがき

本年度はセンターが活動を開始してから9年目にあたる。過去8年間のうち、5年間は私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」として活動を行ってきたが、昨年度、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に選定され、いわば第2期の研究活動を開始したところである。この報告書は、その2年目の活動を中心にとりまとめたものになる。

今回の、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業はその題目を「大規模高精度流体構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」としている。これは、それまでの流体解析や構造解析といった個別の物理の解析から一歩進めてより複雑な、また現実的な問題に計算力学の手法を適用しようとするのと、単に研究として行うのではなく、精度や妥当性を十分に検証し、あるいはその検証方法を確立することで、実用に耐えうるものとするを目標としていることである。本年度は、その2年目であり、昨年度に整えた研究体制のもと、各メンバー、グループが研究を進めている。それぞれの進展については3章に詳しく述べられている。また、韓国成均館大学、台湾龍華科技大学とは合同で学生ワークショップを開いた。さらに、戦略的研究推進事業 CREST やその他、センターに関連する研究についてもふれている。

本年度は実際に研究が動き始めたところであると言える。本格的な成果が示せるのは来年度であろうと思われるが、その中でも期待できるいくつかの成果は本報に含まれている。まだまだ、物足りなく感じられる向きもあろうかと思われるが、今後ともさらなるご批判とご指導を賜れば幸いである。

2013 年 3 月

東洋大学計算力学研究センター長
田村善昭

2. 概要

本センターは、わが国の私立大学学術フロンティア拠点のひとつとして文部科学省から設置が認められ、平成 17 年度に活動を開始した。その後、平成 23 年度に科学技術振興機構の戦略的研究推進事業 CREST の選定、続いて平成 24 年度に文部科学省の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け、今日に至っている。

本センターに参加する研究員は、東洋大学の複数学部・大学院の教員（工学研究科，国際地域学部，総合情報学部，理工学部），博士研究員，大学院生などを中核とし，また客員研究員として関連分野の内外の研究者から構成されている。

各自の専門分野は，構造解析，流体解析，破壊解析，逆問題・最適化，大規模並列計算，可視化など，計算力学分野で必要とされるほぼ全ての分野に跨っており，この分野における専門家集団である。平成 23 年度に採択を受けた CREST では「京」コンピュータ利用のための超大規模解析技術に関して，また平成 24 年度からは，私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け，連成解析や計算力学の精度検証・妥当性検証にも積極的に取り組んでいる。

さらに，東洋大学 125 周年を契機とした国際化に合わせて海外の関連する大学と積極的に交流を進め，若手の人材育成にも寄与したいと考えている。

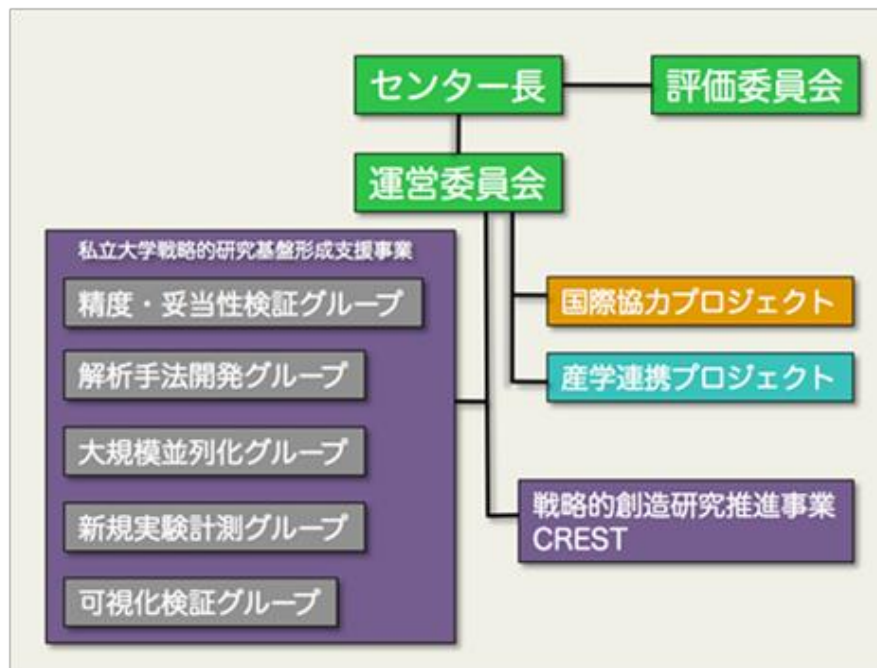
2.1. センター設置について

東洋大学計算力学研究センター設置の経緯とこれまでの概要は以下の通りである。

- ・平成 17 年 6 月 文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」に研究題目「数値逆解析手法の開発とその構造健全性向上のための応用」で採択され，計算力学研究センター発足
- ・平成 17 年 12 月 センター開所式開催のあと，白山第 2 キャンパス内計算力学研究センター棟に入居し本格活動開始
- ・平成 22 年 3 月 「学術フロンティア推進事業」終了
- ・平成 23 年 8 月 科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」に研究題目「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」で採択される。
- ・平成 24 年 4 月 文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に研究題目「大規模高精度流体構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」で採択される。

2.2. 組織

センターの組織とメンバーは以下の通りである.



メンバー

・センター長

田村 善昭 (東洋大学 総合情報学部 総合情報学科 教授)

・研究員

芦野 俊宏 (東洋大学 国際地域学部 国際地域学科 教授)

江澤 良孝 (東洋大学 総合情報学部 総合情報学科 教授)

塩谷 隆二 (東洋大学 総合情報学部 総合情報学科 教授)

中林 靖 (東洋大学 総合情報学部 総合情報学科 准教授)

藤松 信義 (東洋大学 理工学部 機械工学科 准教授)

・研究助手

A.M.M. Mukaddes (東洋大学 計算力学研究センター)

石川 格 (東洋大学 計算力学研究センター)

増田 正人 (東洋大学 計算力学研究センター)

長岡 慎介 (東洋大学 計算力学研究センター)

・学生

島村 雅彦 (東洋大学大学院 工学研究科機能システム専攻 博士後期課程)

清水 聖 (東洋大学大学院 工学研究科機能システム専攻 博士後期課程)

松尾 友紀 (東洋大学大学院 工学研究科機能システム専攻 博士前期課程)

長尾 智 (東洋大学大学院 工学研究科機能システム専攻 博士前期課程)

・客員研究員

矢川 元基 (元東洋大学計算力学研究センター長，東京大学名誉教授，
東洋大学名誉教授)

金山 寛 (名古屋大学情報基盤センター 特任教授)

富山 潤 (琉球大学工学部 准教授)

古川 知成 (Virginia Tech)

松原 仁 (琉球大学 工学部 助教)

横山 真男 (明星大学 情報学部 情報学科 准教授)

3. 研究成果

3.1. 解析手法開発グループ

解析手法開発グループでは、計算力学研究センターのプロジェクト名である「大規模高精度流体-構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」のうち、「高精度流体構造連成解析手法の開発」の部分に焦点を当てた活動を行っている。

流体-構造連成解析を高精度かつ安定的に実施するためには、まず、流体解析手法・構造解析手法そのものの精度や信頼性を高めた上で、それらを連成させるアルゴリズムについても十分に検討する必要がある。これまでのところ、計算力学研究センターでは流体解析に SUPG/PSPG 安定化有限要素法を用い、構造解析に EFMM を用いる手法を中心に連成解析を行ってきたが、このアプローチ以外にも例えば粒子法を用いた手法など様々な戦略が考えられる。

上記の事項を踏まえて、今年度は、以下の 5 項目について報告を行う。

- (1) 並列流体-構造連成解析手法の開発
- (2) 流体-構造連成解析の SOM を用いた分類及び予測技術の開発
- (3) 物体壁面の表面性状を考慮した流れのシミュレーション
- (4) 飛来塩分シミュレーション -流体～粒子弱連成解析-
- (5) ブロック構造を有する固体の大規模 3 次元モデル生成および固液連成解析技術の構築

3.1.1. 並列流体-構造連成解析手法の開発

(1) 目標・計画

本研究では、流体-構造連成現象を解く為の新しい解析手法を開発することを目的としている。本研究で提案する Enriched Free Mesh Method(EFMM)^[1]を用いた構造解析手法と、SUPG/PSPG 安定化有限要素法^{[2][3][4][5]}を用いた流体解析手法を組み合わせた、新しい流体-構造連成解析手法^[6]は、各解析領域場を使用するメッシュ分割パターンが共に線形要素であることから、流体-構造境界面における整合性を完全に得ることが出来、その結果、流体-構造連成問題を解く際に、非常に重要となる、各解析場の境界面の連成効果を考慮する際に生じる問題を解消することに成功している。さらに、前述の通り、各解析場に用いられるメッシュ分割パターンは、線形要素のみであるにも関わらず、その解析精度は、従来の線形要素を用いた解析結果と比較して向上すると云う結果を得られている。この特徴から、本提案手法は、大規模問題を解く際に問題になってくる計算機リソースと計算時間の大幅な抑制を可能にすることを意味している。一方で、本手法は、近年の大規模解析の際に必要な不可欠となる並列処理を施す際に、大きな問題を有する手法であることが明らかとなった。この問題は、EFMM の解析アルゴリズムに起因するものである。

今年度は、本提案手法による大規模並列解析を行う際に必要不可欠となる EFMM の並列解析手法の確立とその実装、およびその並列化効率の検証を行った。昨年度、提案した EFMM の為の並列化手法には、応用研究を行った所、幾つかの問題点が明らかとなった為、別の並列化手法を導入する必要があるが出てきた為である。

平成 26 年度は、今年度提案した EFMM の並列解析手法を導入した、EFMM と SUPG/PSPG 安定化有限要素法による大規模並列流体-構造連成解析手法の確立と、その解析精度の健全性を実証する為の実験結果との比較を行う。

平成 27 年度は、実験と数値解析とのリアルタイムでの融合を目指した、チューニングを行いつつ、様々な現象を数値解析により解明する。

平成 28 年度には、実験結果と数値解析結果の比較を基に、開発手法について纏める方針である。

(2) 意義・国際社会との比較

現在、国内外を問わずに、計算力学の分野において、流体-構造連成現象を対象とした研究は非常に注目されており、積極的に進められている。この現象を解く為に、多くの研究者が様々なアプローチを行い、沢山の新しい解析手法が提案され、多くの成果が発表されている。その一方で、決定的な解析手法が確立されていないのが現状である。

提案されている多くのアプローチは、流体解析手法として粒子法を用いているものが非常に多い。メッシュ分割を必要としない粒子法を用いることで、流体解析場において多くのアドバンテージが得られることがその一因と考えられる。しかしながら、我々の提案している手法は、流体解析場、構造解析場共に格子法を用いている。格子法を、それぞれの解析場に用いる事で、解析精度の面では、粒子法を用いたアプローチと比較して大きなアドバンテージを有していると考えられる。

本手法の確立により、数値シミュレーションにおいて、非常に重要な解析精度を損なうことなく、多くの流体-構造連成現象を解く事が可能になると考えられる。このことから、非常に意義のある研究内容であると言える。

(3) 研究内容

EFMMと SUPG/PSPG 安定化有限要素法とを組み合わせた、本提案手法の大規模並列化の際に問題となるのは EFMM の解析アルゴリズムである。EFMM による数値解析を行う場合には、従来の有限要素法による数値解析とは異なる方法で、剛性マトリックスを生成し、それら得られた剛性マトリックスを基に、連立一次方程式を解き、解を得る。

具体的には、EFMM を用いた解析では、解析領域内の全ての節点がそれぞれ中心節点となり、図 1 に示すような局所要素クラスターと呼ばれる、幾つかの要素で生成されたクラスターが生成され、それら局所要素クラスター毎に局所剛性マトリックスが計算される。

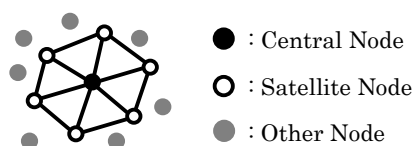


Fig.1 Fundamental concept of local elements cluster

並列解析を行う際には、一般的に領域分割法(Domain Decomposition Method : DDM)が用いられる。この DDM は、節点ベースの手法と、要素ベースの手法とに大別される (図 2)。

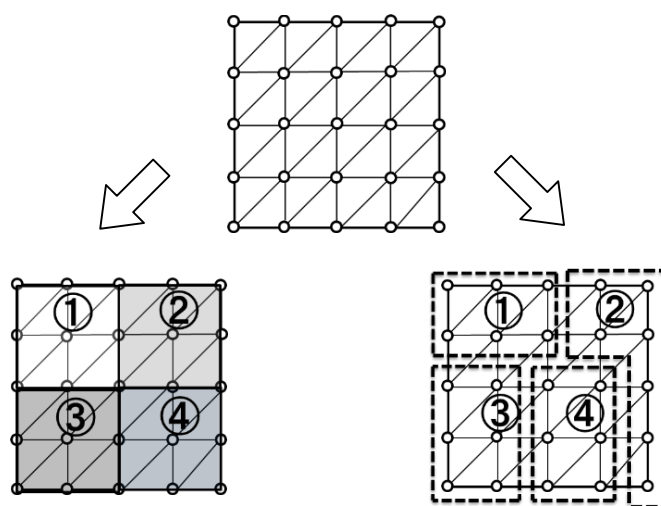


Fig.2 An example of domain decomposition method

EFMMは、中心節点毎に局所要素クラスターを生成する節点ベースの解析手法であることから、節点ベースの DDM の使用が望ましいように考えられるが、局所要素クラスターを生成する節点群との兼ね合いから、最適化された領域分割を行う事は、非常に困難であると考えられる。

そこで、本研究では、要素ベースの DDM を基に、EFMM 解析用の領域分割を行う事で、EFMM の並列化へのアプローチを行った。図 3 に具体的な領域分割方法のフローチャートを示す。

Analysis domain

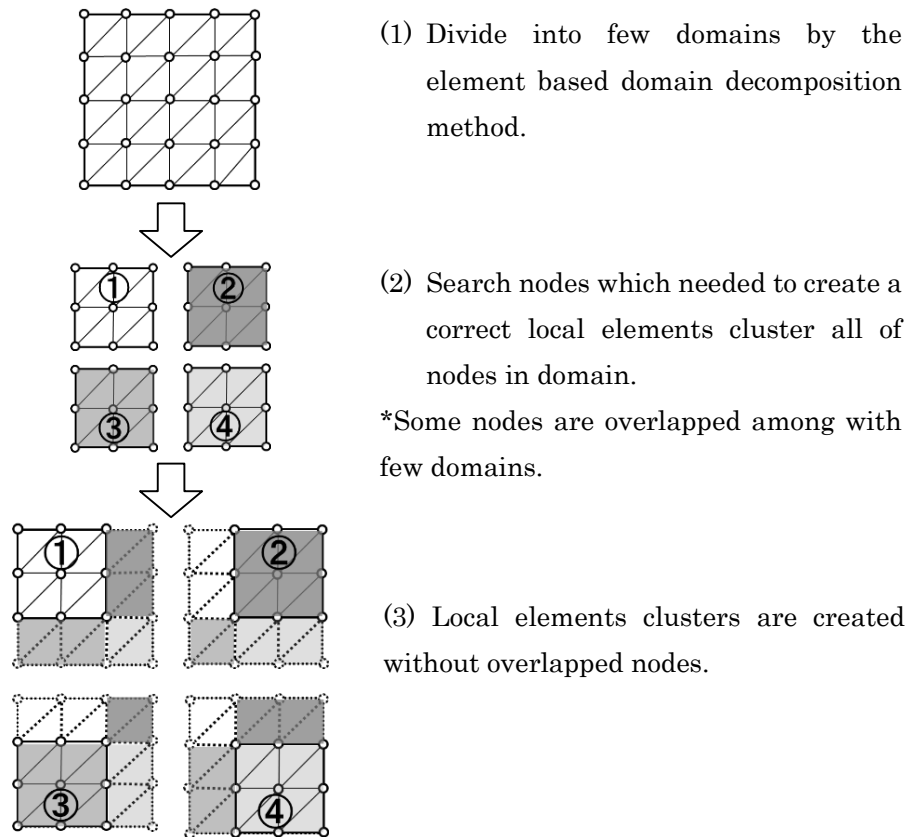


Fig.3 The flowchart of parallelization method for EFMM

本手法を用いる事で、ソルバー内で求められる、通信を必要とする節点数は、図4に示すように、従来の element-by-element 処理を施した並列解析と理論上は同数となる。ただし、局所要素クラスターの形状等により、若干の変動は起こり得る事に注意が必要である。また、ソルバー内の行列・ベクトル積に関しても、局所要素クラスター毎に処理を行う local elements cluster-by-local elements cluster 処理を施す事が可能である。これは、従来の element-by-element 処理をベースとした方法であり、計算機メモリーの節約と、計算時間の大幅な削減が可能となる。

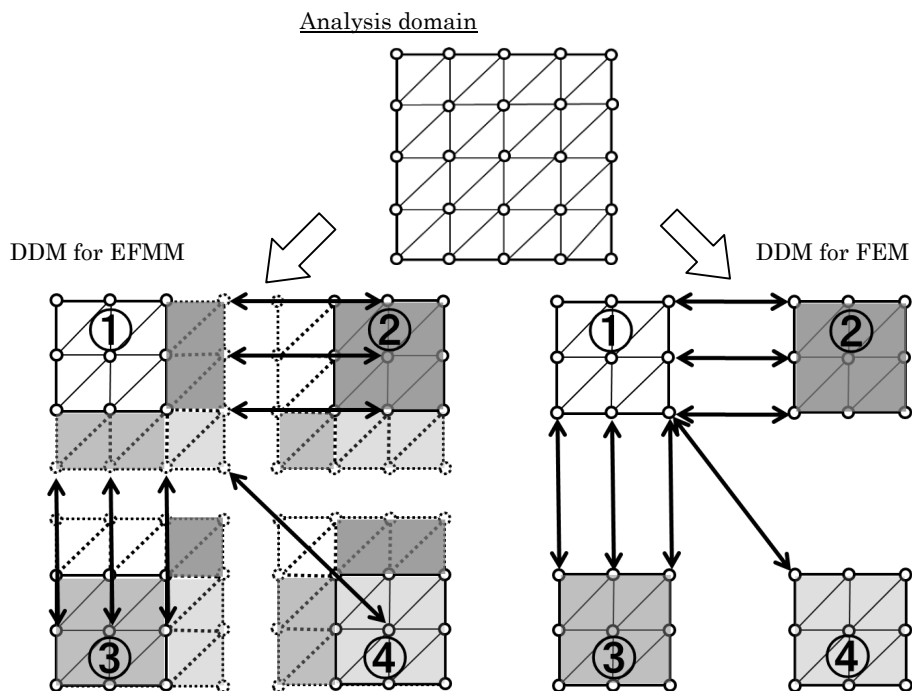


Fig.4 The Comparison of the communication cost

本並列化手法のデメリットとしては、各局所領域間のインターフェイス上の節点を中心節点とする局所要素クラスターを重複して計算する必要がある事. もう一点、通信テーブルが若干複雑になる事が挙げられる. これは、通信を必要とする各局所領域内の節点が各局所領域間のインターフェイス上で対応していない事、通信を要する節点数が必ずしも一致していない事に起因する問題である.

本並列化手法による解析のスピードアップを検証する為に、図 5 に示したエンジンブロックモデルを用いた簡単な静的弾性解析を行った. 解析に用いた解析モデルの要素数は、約 20 万である. 境界条件としてモデル底面を全方向固定し、モデル上面にz方向荷重を与えた.

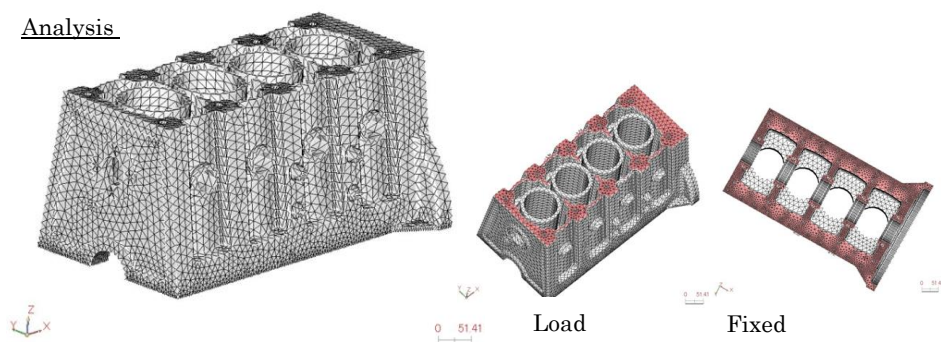


Fig.5 An analysis model and conditions

なお、領域分割は前述の方法に基づいて行うが、図 6 に示すように単純に要素数がある程度一定になるように、単純に x 方向に分割を行った為、通信量を考慮した最適化は行っていない。なお、本手法によるスピードアップは、ストロングスケーリングで計算したものである。

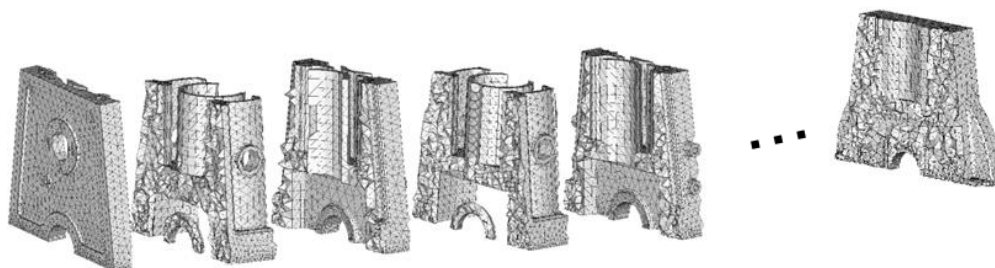


Fig.6 An example of domain decomposition

図7は、単一での解析に要するソルバー部分の解析時間と並列プロセッサ数を 2, 4, 6, 8, 10 台とした時のスピードアップを示したものである。

同図から、10 並列の際のスピードアップが約 8.4 倍と概ね良好な結果が得られている事が分かる。本数値解析例でのスピードアップの算出がストロングスケーリングであり、並列プロセッサ数の増加と共に通信コストの割合が高くなる事、領域分割の最適化を行っていないと云う事を鑑みると、本提案手法は、十分良好な結果を得られる手法であると言う事が出来る。

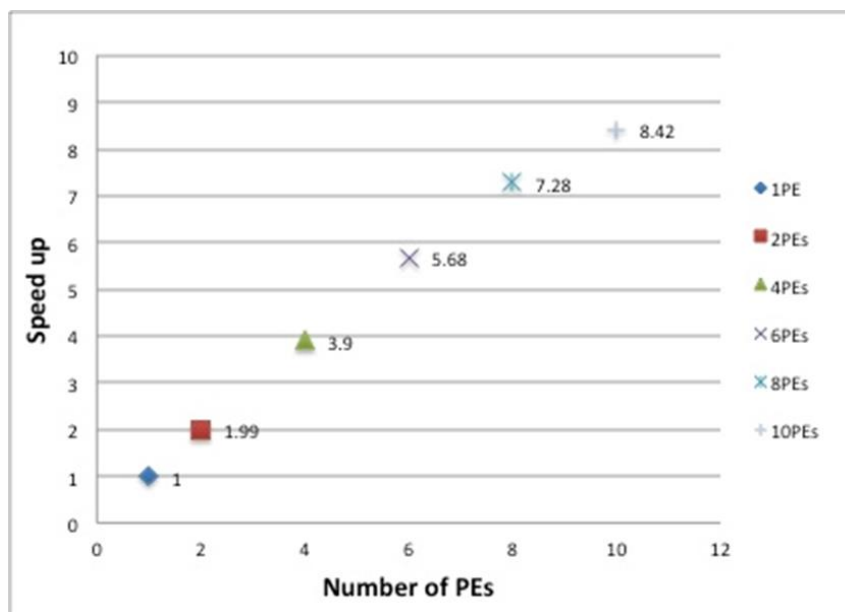


Fig.7 Speedup of the parallel EFMM

(4) 平成 25 年度進捗状況

今年度は、我々の提案している EFMM と SUPG/PSPG 安定化有限要素法を組み合わせた流体-構造連成解析手法を用いた大規模解析を行う際に必要不可欠であり、その適用が非常に困難であった、EFMM の並列解析手法を提案、実装し、その並列化効率の有効性を実証した。

本提案手法を用いる事で、EFMM と SUPG/PSPG 安定化有限要素法という、流体-構造連成解析を行う際に、非常に相性の良い解析手法を大規模問題へ適用させる事が可能となった。

来年度は、本提案手法を用いた大規模並列流体-構造連成解析手法を実装し、数値解析結果と実験結果との比較・検証を行い、本提案手法の解析精度面での健全性を示す予定である。

参考文献

- [1] Yagawa, G. and Matsubara, H., “Enriched element method and its applications to solid mechanics”, *Proc. Computational Method In Engineering and Science EPMESC X*, pp. 15-18, 2006.
- [2] Tezduyar, T.E., “Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations”, *Advanced in Applied Mechanics.*, 28, pp. 1-44, 1991.
- [3] Tezduyar, T.E., Mittal, S., Ray, S.E. and Shih, R., Incompressible flow computations with stabilized bilinear and linear equal-order-interpolation velocity-pressure elements, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 95 pp.221-242, 1992.
- [4] Franca, L.P., Frey, S.L. and Hughes, T.J.R., Stabilized finite element methods I. Application to the advective - diffusive model, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 95 pp.253-276, 1992.
- [5] Franca, L.P. and Frey, S. L., Stabilized finite element methods II. The incompressible Navier-Stokes equations, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 99 pp.209-233, 1992.
- [6] S. Nagaoka, Y. Nakagabashi and G. Yagawa, Accurate fluid-structure interaction computations using elements without midside nodes. *Comput Mech.*, Vol. 48, pp. 269-276, 2011.

3.1.2. 流体-構造連成解析の SOM を用いた分類及び予測技術の開発

(1) 目標・計画

本研究では、流体と構造体の相互作用による振動現象の数値解析に行い、自己組織化マップ (Self-Organizing Map : SOM) を用いて解析データの分類を行い、条件による振動現象の特徴を検出することを目的にしている。条件による振動現象の特徴が分かれば、流路内に設置する温度計、圧力計などのさや管の選定や、楽器などの共振を伴う弦などの設計に役立てることが期待できる。また、自己組織化マップをモジュラーネットワーク型自己組織化マップ(modular network SOM : mnSOM)に変えることで分類と予測を可能にする。mnSOM を用いた予測技術の開発も目指す。

平成 25 年度では、流体-剛体の移動境界問題を解き、自己組織化マップで分類した。解析モデルは 2 次元円柱で、流れ方向に対して垂直方向にのみ移動するようにバネ・ダンパー系で指示した。メッシュコントロールは ALE 法と速度 Verlet 法を用いて実行した。解析条件を変え、複数の解析結果を得た。得られた解析データを SOM でマッピングし、振動現象に起因しているファクタを検討した。

平成 26 年度以降は、SOM の学習パラメータを変え、分類性能の向上を図る。また、解析結果の数を増やしてマッピングを行う。同様に、mnSOM でのマッピングを行い、予測精度の向上を図る。また、流体-構造連成問題での 場合の分類も目指す。

(2) 意義・国際社会との比較

SOM はデータマイニングに多く用いられる手法であり、入力データをマップ上に配置することができる。また、この配置は似たデータ同士を近くに配置し、そうでないデータを遠くに配置するといった特徴を持つ。また、入力データ間を補間することもできる。

本研究では、SOM を用いた振動現象の分類を行う。振動現象はロックイン現象の再現や渦励振など様々研究が行われているが、特徴を分類した文献は目にしてない。境界条件による円柱の振動運動の特徴でクラスタリングできれば、ある条件下での振動がロックインするかもしれないかの予想をたてることできる。

また、流体-構造連成現象も視野にいれ、構造側が変形する場合の SOM による分類は、構造物の変形具合をマップに写像することで、意図する構造の変形を選択的に選び出し使うことができる。

入力データを様々に変更することで、多様なマップを作成でき、流体-構造連成解析の解析データをまとめることができ、そのデータをベースに未知の条件でも、ある程度の予測をたてることが可能であると考えられる。

以上のことから、本研究は学術的かつ実用的な側面を兼ね備えており、国際社会においても重要な位置づけとなる研究のひとつであると考ええる。

(3) 研究内容

SOM は、高次元のベクトルデータを低次元空間(マップ)に写像するものであり、高次元

データのクラスタリングを行える．また，マップを見ることでデータの特徴抽出やマイニングを行うことができる．mnSOM は SOM のマップユニット部分をモジュールに置き換えたものである．モジュールは MLP(Multi Layer Perceptron)に置き換えたものが主で，入出力関係を保持することができる．この mnSOM を用いると，分類後に未知の入力から想起して意図する出力を提示することが可能であり，設計に用いることができる．

本研究での SOM に与える入力条件として，円柱質量とバネ定数，ダンパー係数，流速，レイノルズ数，バネの固有振動数，円柱振幅，円柱振動数，最大揚力係数，ストローハル数，平均抗力係数の 11 項目を与える．

流体-剛体連成解析は，ADVENTURE_Fluid を用いて数値解析した．移動境界問題を扱うために ALE 法を，円柱の移動を計算するために速度 Verlet 法を用いた．解析モデルを Fig.1 に示す．Table 1 に示した解析条件で計 48 通りの解析を行った．

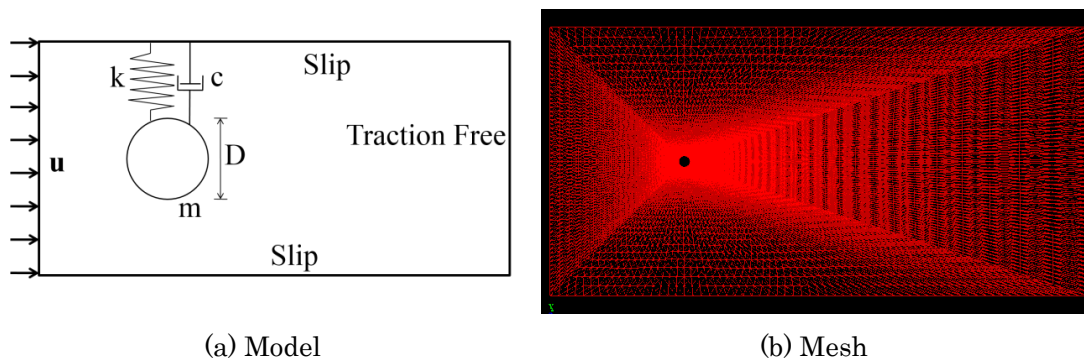


Fig.1 Model of Analysis

Table 1 Input-Output Relationship of mnSOM

Input			Output	
Items	Unit	Ways	Items	Unit
Mass of Cylinder	[kg]	0.5 1.0	Amplitude of Cylinder	[m]
Spring Constant	[kg/s]	0.5 1.0	Frequency of Cylinder	[Hz]
Dumper Coefficient	[kg/s ²]	0.0 0.01	Maximum Coefficient of Lift	[-]
Flow Velocity	[m/s]	0.5 1.0	Strouhal Number	[-]
Reynolds Number	[-]	100 500 1000	Average Coefficient of Drag	[-]
Natural Frequency	[Hz]	-		

SOM の分類結果を Fig.2 に示す．入力項目別に確認すると速度と振動，ストローハル数と円柱振動がそれぞれに起因していることが確認できた．

次に mnSOM の分類，予測を行う．mnSOM のモジュールは MLP を用いる．SOM とは

違い MLP の入出力を決定する必要がある．そこで，本研究では入力に解析条件，出力に解析結果を与える(Table 1)．これにより解析条件から解析結果を予測することができる．勝者モジュール間は滑らかに補間され，未知の入力に対しても相応の出力が期待できる．MLP の補間能力を考えて，入出力関係をグループ分けして学習を行う．これにより，MLP の補間と SOM の補間を最大限に発揮し，補間性能の向上が見込める．

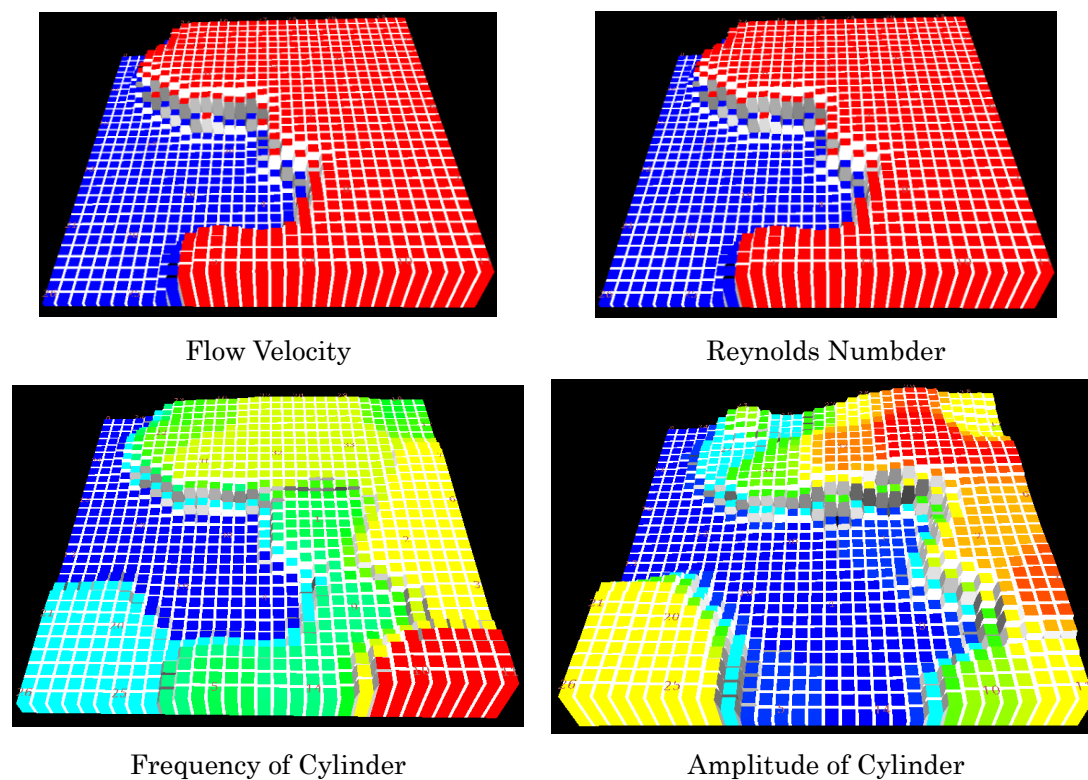


Fig.2 Result of SOM

(4) 平成 25 年度進捗状況

流体-剛体連成解析を行い，48 通りの解析結果を得た．解析結果から SOM 及び mnSOM の分類, 学習データを取得した．それを用いて SOM, の分類, mnSOM の予備実験を行った．

SOM の分類では入力データ間の関係を確認することができた．解析条件と解析結果の関係が視覚的にも確認でき，振動現象の分類が可能であることを確認した．

mnSOM では解析結果の分類，可視化を行い，予測性能を評価した．しかし，未知のデータに対しての検証はできていないので，今後の課題である．また，予測性能の向上を図るため，学習パラメータの調整と解析データを増やす必要があると考える．

今後は予測精度の向上を図り，解析対象を流体と構造の連成問題に拡張して，分類，予測を行う予定である．

3.1.3. 物体壁面の表面性状を考慮した流れのシミュレーション

(1) 目標・計画

これまで多くの流れのシミュレーションは、物体と流体の間の境界条件は滑り無しで計算されてきた。しかし、物体表面の性状によっては、一概に滑り無し条件では適切な結果が得られない場合もある。一例として、魚類や両性類の体表にはヌメリや滑りがあるが、その為にこれまでの滑り無し壁面とは異なる流れが観察され、この滑りといった表面性状の効果を計算に導入する必要がある。本研究では、境界条件に滑りを考慮に入れることで、その様な滑りのある物体を表現する方法を提案し、粒子法(MPS 法)による流れのシミュレーションを行うことを目的とする。検証については、生体材料の1つであり水触媒の高分子ゲルであるハイドロゲルを用いて、ポアズイユ流れ及びスプラッシュの実験と比較し、シミュレーション結果と実験の比較を行う。

(2) 研究内容

1 はじめに

本研究では、流体と物体の相互作用を扱う数値シミュレーションを行うにあたって、物体の表面性状の違いを計算に導入する方法を提案する。流体と物体の相互作用（Fluid Structure Interaction）の先行研究については、表面の粗さや材質による流れ場への影響に関しての研究が行われており、液滴の接触角の調査から車体の撥水性や船体の抵抗低減の問題まで多く取り扱われてきた⁽¹⁻⁴⁾。また、これまでの数値シミュレーションにおける表面性状の違いの扱いに関しては、ディンプルやボルテックスジェネレータ等のように剥離というような物体表面の構造的な点に着目した研究は多くなされてきたが、それらのほとんどは物体と液体の境界は滑りなし条件で設定されてきた。

しかし、例えば、魚類や両生類のような体表にヌメリをもった生物と流れや、消化器官や血管の内壁は一律に滑りなし条件とはいえないと思われるが、そういった生体表面のもつ滑り効果を考慮した物体と流れの相互作用を扱ったシミュレーションは少ない。材質の表面性状の違いによって周囲の流れ場が変化する状況もあり、例えば、落下物体が水面に衝突するときに生成されるスプラッシュ（飛沫）が挙げられる。スプラッシュは物体の形状や衝突速度によって、水飛沫の形状が変化することが分かっている⁽⁵⁾が、また、物体の材質の違い（例えばハイドロゲルとアクリル樹脂）によっても、観察されるスプラッシュの形状に差が生じる（後述の図7を参照）。つまり、同じ運動条件でも表面性状の違いによって周囲の流れ場は異なる現象になるため、この例のように表面に滑りがあるような物体と流れの相互作用をシミュレーションで計算するには、物体と流体の境界条件に滑りの効果を記述するモデルを導入する必要がある。

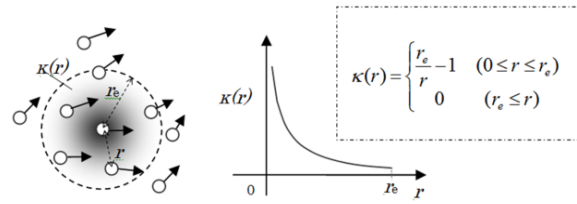


図 1 Schema of MPS method and weight function κ . The r is distance between particles. The range where the effect of weight function

また，自由表面を伴う流れ場の解析に有効な粒子法の一つである MPS 法（Moving Particle Semi-implicit 法）^(6,7)によるシミュレーションも多くの研究成果が報告されているが，既存の方法のままでは材質による差は表現できていない．一方，生体や医療といった分野の循環器系や細胞などのシミュレーション解析においても，血管壁⁽⁸⁻¹²⁾や膜⁽¹³⁻¹⁶⁾などの表面の滑りの扱いについては特に言及されていない．また，これまで我々は生物とそれらを取り巻く流体環境の解明として，流体中の細胞の大変形⁽¹⁷⁾や生体材料のハイドロゲルとその周辺流れについての研究を行ってきた⁽¹⁸⁾．そこで，本論文で扱う表面性状については，上述のような生体材料であり生物の体表のヌメリの成分であり，親水性高分子ゲルのハイドロゲルといった滑り特性を持つ物体を対象としている．ハイドロゲルとは，寒天やゼラチンのような食品から医療や生体材料まで幅広く用いられている水を溶媒とする高分子ゲルであり，魚やカエルといった生物の体表面のヌメリはそういった高分子ゲルの一つである Mucin が主な成分である⁽¹⁹⁾．

本研究では，表面性状の考慮が必要なシミュレーションにおける物体壁面の条件の取り扱いについて言及するものであり，2 章にて，その例として生体材料の一つのハイドロゲルにおける滑りを粒子法（MPS 法）による計算へ導入する方法について述べ，3 章で，壁面の滑りを考慮して計算した粒子法シミュレーションを実験との比較によって評価・考察し，4 章にて結言を述べる．

2 流体と物体表面における相互作用の導入

MPS 法は，混相流やスロッシング，波，破壊など流体の自由表面や，また，大変形を扱う構造物のシミュレーションを行うのに有効な手法として，近年盛んに用いられている数値シミュレーション手法である⁽⁶⁾．MPS 法はメッシュレスな粒子法の一つであるため，有限要素法などの他の格子を切る計算方法に比べ，界面が大変形したり合体・分裂したりする流体のシミュレーションを容易に行えるメリットがある．

図 1 に示すように，離散的な流体粒子および固体粒子に作用する運動方程式をたて，各計算ステップで連立方程式を解き，各粒子の運動を追跡するラグランジュ的な方法である．運動量保存則は Navier-Stokes の式で表され，各粒子に作用する外力や粘性による移動量

を陽的に計算して仮の位置を求めた後に、質量保存則としての連続の式の代わりに、粒子密度一定の条件を満たすためにポアソン方程式を解くといった半陰的解法である。ここでは、生体材料のような表面性状が通常と異なるハイドロゲル表面で見られるような滑りの効果を、MPS法による流れ場を解く計算に導入する方法を述べる。

2.1 粒子法と流れの基礎方程式

非圧縮粘性流体の流れ場を計算するにあたって、Navier-Stokesの支配方程式は次式の通りである。

$$\frac{Du}{Dt} = F - \frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 u \quad (1)$$

ここで、 u は流れ場の速度ベクトルで、 ρ は流体密度、 P は圧力、 ν は動粘性係数、そして F は重力などの外力である。また、Navier-Stokesの式において、MPS法における圧力項のgradientと粘性項のLaplacianの離散的な計算方法はそれぞれ以下のように表せられる。

$$\nabla P_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{p_j - p_i}{|\tilde{r}_j - \tilde{r}_i|^2} (\tilde{r}_j - \tilde{r}_i) \kappa(|\tilde{r}_j - \tilde{r}_i|) \right] \quad (2)$$

$$\nabla^2 u_i = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_j [(u_j - u_i) \kappa(|\tilde{r}_j - \tilde{r}_i|)] \quad (3)$$

ここで、 r は粒子の位置ベクトル、 d は計算領域の次元、 λ は統計的な分散を表す変数、 n^0 は粒子の初期配置の密度、 p は圧力を示す。本研究では、詳細は次節で述べるが、実験結果からの類推によりこの陽的に計算されるLaplacianに滑りの効果を導入する。なお、MPS法では図1右に示すように、各パーティクル間の相互作用の影響度として重み関数 κ は以下の式として与える。

$$\kappa(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (0 \leq r \leq r_e) \\ 0 & (r_e \leq r) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 r は二点間の距離であり、パーティクル近傍の影響範囲を示す閾値 r_e は一般的に用いられている $2.1l_0$ とし⁽⁶⁾、 l_0 は初期状態のパーティクルの平均間隔で、計算時間と描画の分解能を考慮し $l_0 = 4\text{mm}$ とした。

2.2 ハイドロゲル表面の滑りの効果の導入

物体表面の滑りの効果をMPS法に取り入れる方法を示す。ここでは、表面の滑りを物体と流体の壁面応力の低減として捉え、実験によりその低減率を滑り率(slip ratio) α として求め、ハイドロゲル壁面とその近傍の流体に作用するせん断力の計算に適用するといった、

実験から得られた現象を元にした手法である。

まず、ハイドロゲルの物性値の一つである膨潤度 S (swelling degree) は、下記の式(5)のようにゲルの質量に対する水の質量の比で表される。

$$S = (m_{\text{water}} + m_{\text{gel}}) / m_{\text{gel}} \quad (5)$$

ここで m_{water} は溶媒となる水の質量、 m_{gel} はゲルの乾燥材料の質量であり、つまり、水分量が大きいほど S の値が大きくなる。本研究の対象には、含水量の調整や成型の容易さからハイドロゲルとして寒天を選んだが、寒天は主にアガロースと呼ばれる高分子による鎖状の分子構造で、網目状の架橋構造を作りその合間に水分子を含み、その値は数百といった多量の水分を含有することができる。

次に、ハイドロゲル壁面と流体との間に生じる滑り率 α については、ハイドロゲルによ

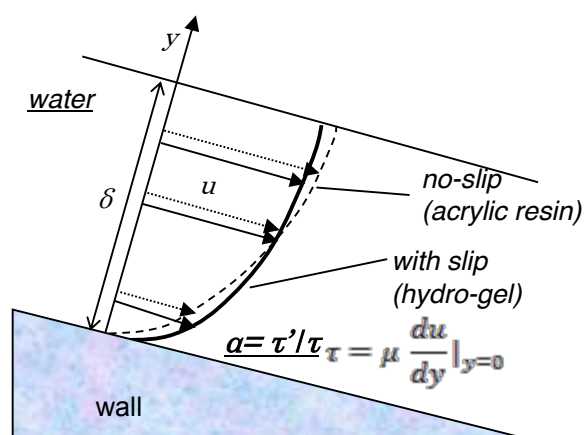


図2 Schema of experiment of a film flow with slip at the wall. Slip ratio α was the ratio of wall shear stress obtained by the experiment. The τ is wall shear stress on the slope with no-slip condition. The τ' is that on the slope with

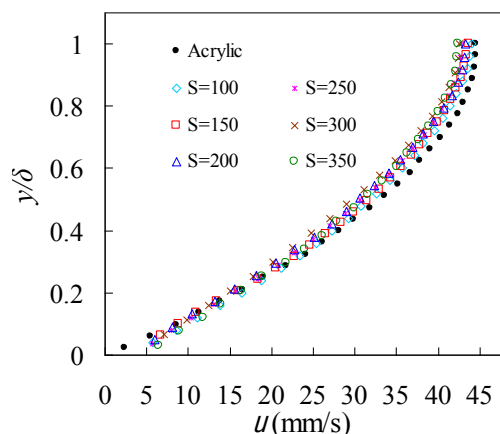


図3 Experimental result⁽¹⁸⁾ of velocity profile of flow on the agar wall. The u is the velocity of water.

る滑り有りの壁面応力およびアクリル樹脂による滑り無しの壁面応力の比で求めた．流路を流れる水の PIV 実験による壁面近傍の垂直方向の速度勾配から，壁面応力をそれぞれ求めその比を α として数値計算の境界条件に導入することにした．

実験のより詳しい説明は参考文献⁽¹⁸⁾にゆずるが，図 2 にその実験の模式図と α の導出に関する概要を示す．実験は，ハイドロゲルによる滑り有り条件およびアクリル樹脂による滑り無し条件による斜面上に，パーティクルを混入させた水を上部から流し，パーティクルの移動の様子を側面からハイスピードカメラによるビデオ撮影により計測した．流路は長さ 400mm，幅 20mm のアクリル樹脂板で作成し，ハイドロゲルの層をその底面上に一樣に形成させた．ハイドロゲルには形成の容易さから寒天を取り上げたが，さらに比較のためにカラギーナンゲルでも同じ実験を行った．ハイドロゲル層の上に流した水の流速は 44.5mm/s で，計測した流れの壁面垂直方向 y の高さ δ はハイドロゲル表面から 0.83mm であった．なお，水の注入は撮影箇所から十分はなれた上流から行い，ハイドロゲル表面はこの流れによる変形や流失はなかった．

図 3 に，実験による膨潤度 S の違いによる寒天上およびアクリル樹脂上の流速の分布を示す．床面垂直な方向 y における斜面方向の速度 u の分布は，寒天($S=100\sim350$)では $y/\delta=0.2$ より下の壁面近傍でアクリル樹脂(Acrylic)に比べ速くなっており，概略図 2 の実線のように寒天の表面近傍では滑りがある流れが観測された．なお，滑り無し条件のアクリル樹脂では，図 2 の破線のようにポアズイユ流れが観測され，これは理論値と一致していた．

ここで，実験精度について述べると，壁面上を流れる液膜流れの理論値と比較を行ったところ，計測より得られた滑り無し条件としてのアクリル板上の速度分布は液膜流れの理論値との相関係数が 0.999 であり非常に良好な一致が得られた．また，壁面近傍での標準誤差は最大 $\pm 0.06\%$ であった．この測定精度をもって，図 3 はハイドロゲル上を流れる液膜流れの速度分布を計測しているので精度は保障されていると言える．

壁面応力 τ は，次式のとおりに壁面近傍における速度勾配から算出する．

$$\tau = \mu \left. \frac{du}{dy} \right|_{y=0} \quad (6)$$

ここで μ は水の粘度で， u は流速である．壁面における速度勾配 du/dy は，壁面に最も近い方から 2 つのパーティクルを選び，それらのパーティクルの底面に平行な方向の速度変化量 du を垂直方向の距離 dy で除算して求めた．計測したパーティクルの斜面からの距離は $10\mu\text{m}$ 以下で，概ね精度は保障される値である．本研究では，アクリル斜面を滑り無しとして基準の壁面応力 τ とし，また寒天のときの壁面応力を τ' とし，次式の様にそれぞれの応力の比を滑り率 α とする．

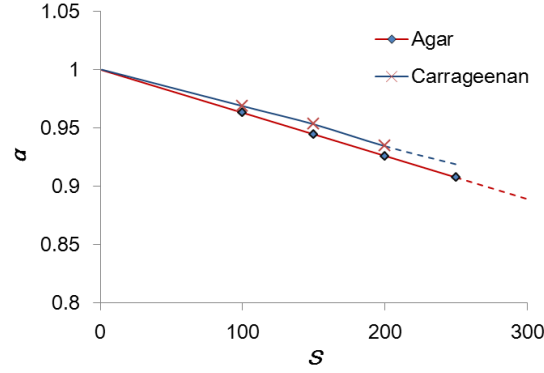


図 4 Relationship of swelling degree S of agar and slip ratio α , which was obtained

$$\alpha = \tau' / \tau \quad (7)$$

また、膨潤度 S と滑り率 α の関係は、寒天およびカラギーナンゲルによる実験結果から図 4 に示すような値が得られ、それぞれ線形となる結果となったことにより次式のようにモデル化した。

$$\alpha = 1 - \beta S \quad (8)$$

係数 β は、実験値より寒天(Agar)の場合 0.0012 であった。よって、膨潤度 150 では α は約 0.94 であり約 6% の壁面摩擦抵抗の低減になることを示している。なお、no-slip の場合は $\alpha = 1$ で、また完全にスリップする場合は $\alpha = 0$ とする。

次いで、ここで得られた α は、図 5 に示すようにゲル壁面と水の境界付近における、陽的な粘性の計算時の重み関数の係数として用いる。MPS 法では、各パーティクル間のせん断力の影響度を重み関数 κ として与えるが、本研究では、寒天ゲル壁面と周囲の水の滑り（壁面せん断力の低減）の影響として、粘性項の計算における重み関数に滑り率 α を掛け合わせた κ_H を寒天ゲルの周囲 r_b にある水粒子との間にのみに用いた。ほかの粒子間である壁から離れたところの粒子や水粒子同士には通常の κ を用いる。

$$\nabla^2 u_i = \frac{2d}{\lambda \rho^0} \sum [(u_j - u_i) \kappa_H(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)] \quad (9)$$

i : water particle near hydro-gel wall
 j : surface particle of hydro-gel wall

$$\kappa_H(r) = \alpha \kappa(r) \quad (10)$$

つまり、ハイドロゲルの表面を構成するパーティクルから半径 r_b にある水粒子との粘性項計算についてのみ α を掛けた重み関数 κ_H で計算することで、壁面応力を α 分だけ小さくし

ハイドロゲル壁面近傍の滑りを表現した。

3 シミュレーション結果と考察

本章では、既存の粒子法プログラムに対し 2 章で示したハイドロゲル壁面の滑りの効果を導入したシミュレーション結果を示す。まず、2.2 節で述べたハイドロゲル表面上を流れる水の実験と比較することで、本手法の妥当性を検証し、次に、生体分野での応用例として、ハイドロゲル球が水面に落下によって生じるスプラッシュのシミュレーションを行った。

3.1 ハイドロゲル床上の流れの検証

本研究で提案した手法の検証として、式(9)と式(10)を用いてハイドロゲル床面上の流れる水の水の速度分布についてシミュレーションを行った。図 6 に、高さ h の管路に水を流した時の、床面からの距離 y とその位置における流速 u の分布について、床面の滑り無し条件 (no-slip) と滑り有り条件 (膨潤度 $S = 100, 250$) それぞれの結果を示す。計算条件については、 re は参考文献^(6,7,9)などでよく用いられている $2.1l_0$ とし、また、初期粒子間隔 l_0 は 4mm とした。また、計算領域は長さ $80 l_0$ 、高さ $20 l_0$ とし、計算領域上面($y = h$)は slip 条件で x 方向に流速 $u_0 = 4\text{cm/s}$ を与えるものとしている。なお、速度分布 u は与えた流れの初速 u_0 で、また高さ y は h でそれぞれ割って正規化している。

シミュレーションの結果については、まず、滑り無し条件(no-slip)ではポアズイユ流れになることが知られているが、本計算による流れの速度分布を理論値（破線）と比較すると

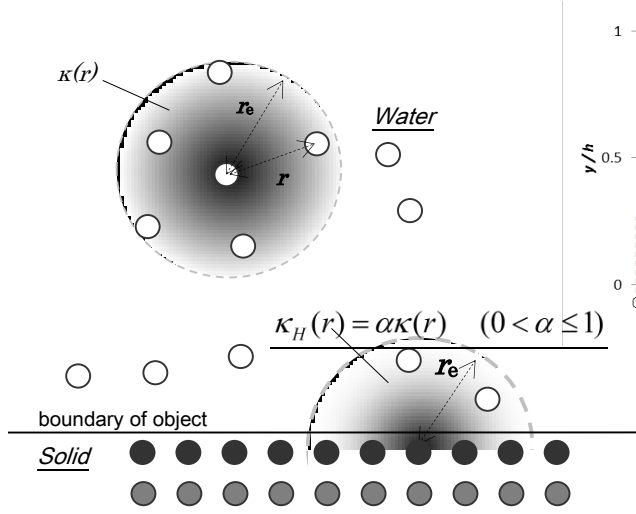


図 5 Difference of weight functions κ_H and κ . The distance between particles denoted by r . The κ_H is used between the particle on the boundary of the hydrogel object and the virtual

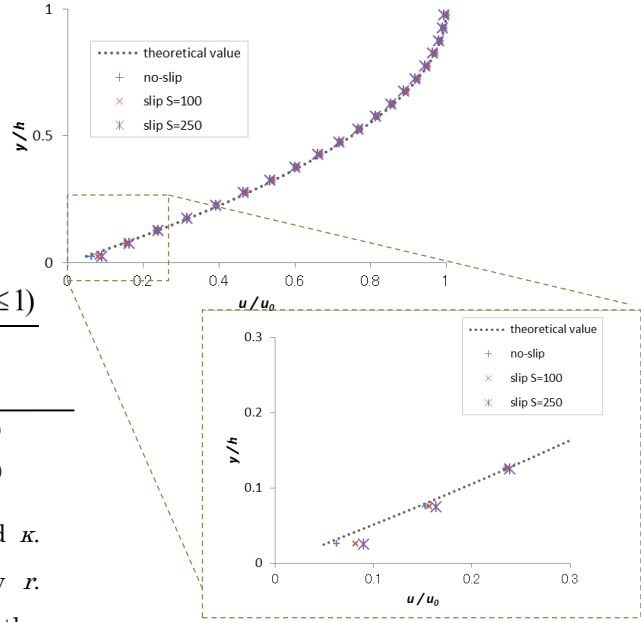
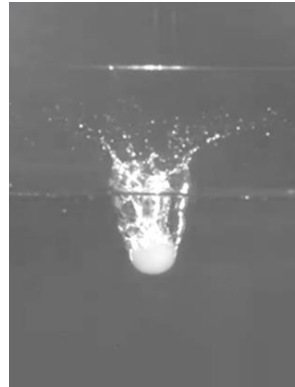
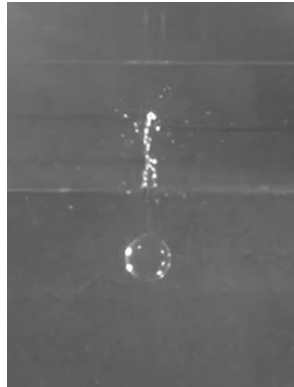


図 6 Difference of flow velocity u on the hydro-gel wall (slip wall) and no-slip wall in a conduit by MPS method. The U_0 is the



(A) Hydrogel (Agar)



(B) Acrylic resin

図 7 Difference of water splash by a sphere made of hydro-gel and a sphere made of acrylic resin. The picture at left is the splash of an agar sphere (Radius=10mm, $S = 100$), the picture at right is a splash of acrylic resin (Radius=10mm). The velocity impacting water surface in both photos was the same, but each splash's form was different.

同等の速度勾配が得られており、滑り無し条件では正しく計算ができています。次いで、図 6 の右下に拡大図を示すが、ハイドロゲル床面である $S=100$ や $S=250$ の条件では、膨潤度の上昇に伴いハイドロゲル表面の滑りによる効果で壁面近傍の流速が増加している。例えば、滑りがある $S=250$ の結果において、no-slip の結果より床近傍で流速が約 10% 増加しており、前述の実験と同様の結果であった。図 6 は横に速度を取っているため、傾きが急になっていることはハイドロゲルの膨潤度 S の増加により表面近傍の速度の変化率が減少していることを表している。つまり、壁面応力は式(6)に示したように表面近傍の速度の変化率に比例するので、このシミュレーション結果は壁面応力が低減していることを表していることになる。以上により、slip ratio を滑り有り壁面近傍に導入することで実験の結果と同様の計算が得られ本手法は妥当であるといえる。

ここで、粒子法におけるパラメータの影響についての検証について述べておく。閾値 r_e に関して、一般的に用いられている 2.1ℓ 以外の場合では、図 6 で示した速度勾配において差が生じた。 r_e が 2.1 より小さい 1.8 などでは流速が壁面と上面の中間($y/h=0.5$)付近で実験値よりも大幅に大きい値になり、また一方、 r_e が 2.1 より大きい 2.4 や 2.6 などでは壁面近傍の流速が急激に増加した。よって、結局 r_e は文献の値 2.1 の時に、全体的によくゲル状のポアズイユ流れを表現できていた。また一方、初期粒子間隔 ℓ については、この間隔を 2 倍 4 倍、1/2 倍 1/4 倍と変えてシミュレーションの検証をしたが、図 6 の壁面近傍のスリップによる効果の傾向が変わるといった違いはなかった。なお、粒子の移動に関しては 4 次精度のルンゲクッタ法を用いている。

3.2 ハイドロゲル球が生成するスプラッシュにおける滑りの効果

次に、本手法の応用例としてハイドロゲル球が水面に突入した時のスプラッシュの二次元シミュレーションを行った。

スプラッシュは流体の自由表面や大変形、物体との連成といった計算工学における流体と固体の相互作用問題 (Fluid Structure Interaction) の観点で興味深い現象である⁽²⁰⁻²³⁾。本研究で扱った滑りとスプラッシュにおいては、バイオミメティクスの観点では、魚類が泳ぐときやカエルが水面に飛び込むときに生じるしぶきや、またはイルカのトムズ効果で知られるような表面分泌物による抵抗低減の現象などに関連している。また、競泳水着や船体壁面における飛沫のメカニズムや造波の抵抗低減といったように、スポーツや造船分野の研究においても自由表面を扱うスプラッシュが取り上げられている。こういった研究は、通常の no-slip でない境界条件でのシミュレーションも検討されるべきではないかと思われる。

表面性状の違いにより周辺の流れが影響を受ける現象の例を図 7 に示す。大きさと水面への突入速度が同じ(A)ハイドロゲル球 (寒天: $S=100$) と、(B)アクリル樹脂球によるスプラッシュの形状のスナップショットである。球は吸引による Launcher 装置で吸いながら静止させ後、電気スイッチにて吸引を止めることで無回転で落下させた。静水面に突入した

際に形成されるスプラッシュ映像は、真横からハイスピードカメラ（Vision Research Inc. Phantom V7.1）を使用し 4000 frames/sec で撮影したものである。物体には、水に飛び込むカエルなどの小生物などを想定し、その大きさに近い半径 $R=10\text{mm}$ の球を、高さ $50R$ から落下させた。

図 7(A)のハイドロゲル球では、いわゆるミルククラウンのような冠状のスプラッシュが形成されるが、アクリル樹脂球(B)では柱状になった。この例のように、どちらも表面はなめらかであるが、物体表面の滑りといった性質によって周辺流れ場が影響を受ける例があるので、本研究のようにシミュレーションにおいても表面性状の違いは考慮されるべきである。

図 8 に、ハイドロゲルの滑りの効果をいれたシミュレーションと実験によるハイドロゲル球のスプラッシュとの生成過程を示す。本研究では、MPS 法における滑りの効果による結果への影響をみるため、計算コストも考慮してここでは三次元でのシミュレーションではなく二次元で検証した。実際のスプラッシュとの三次元に起因する相違の比較は今後の課題にしたい。球は半径 $R=10\text{mm}$ でシミュレーションの水槽は半径 $20R$ 、深さ $20R$ とし、スプラッシュの形状への影響がないことを確認した大きさである。

ハイドロゲルの球が水槽の水面に着水した瞬間を $t=0.0$ として、 $t=0.02$ で最初のスプラッシュ(Primary Splash)が上がり、いわゆるこれはミルククラウン⁽²⁰⁾に見られるものである。その後 $t=0.03$ では球が沈降するに伴い柱状の空気のキャビティができる。このシミュレーション結果は実験結果で観察されるスプラッシュと良く似た結果が得られた。

図 9 は、ハイドロゲル球によるスプラッシュのシミュレーションで、その飛散する水粒子の軌跡をトレースしたものである。水面に突入した瞬間を $t=0$ とし、水粒子の運動の軌跡を $t=0.045$ までプロットしたものである。軌跡として表示している粒子は、突入する寒天ゲル球の直下を $x=0$ とし近傍の半径 R 内にある水粒子であり、青線は $S=50$ の時の軌跡を、赤線は $S=350$ の時の軌跡をそれぞれ示している。

図 9 の軌跡の広がり方の違いにみられるように膨潤度が大きくなるにつれ水粒子の飛散する軌跡が外側に広がり、粒子の移動距離は膨潤度が大きいほど多かった。この原因としては、ハイドロゲル球周辺の水の移動速度が滑りにより増加することが考えられる。

図 10 に、各 S に対する水粒子の平均速度 V_{ave} の変化を示すが、各 S における値は図 9 に示した球の落下地点付近の粒子の平均をとっている。このグラフより、膨潤度 S の大きい方が V_{ave} は速く、ハイドロゲル表面における滑りの影響により表面の周辺にある水粒子の速度が増加したことを示している。

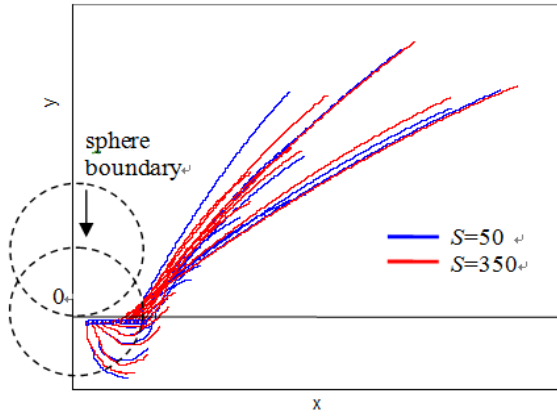


図9 Path lines of a virtual water particle near the impact point hydrogel sphere plunging, during $T=0$ to 0.045sec . The particles started from the surface of water at $x=0$ to R . Blue line: $S=50$, Red line: $S=350$. The particle of $S=350$ moved wider than that of $S=50$.

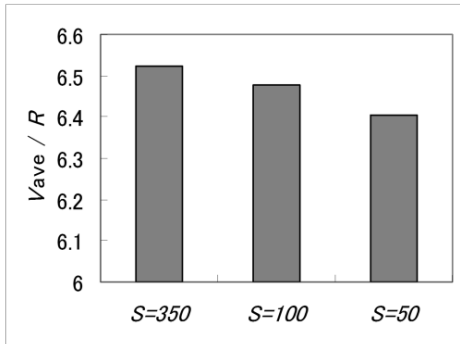


図10 Average velocity of the particles included in splash as shown in Fig.6.

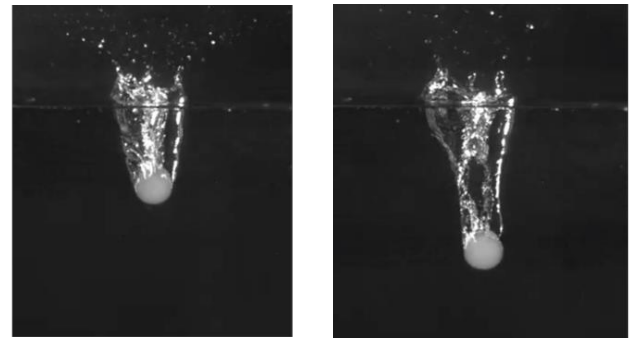
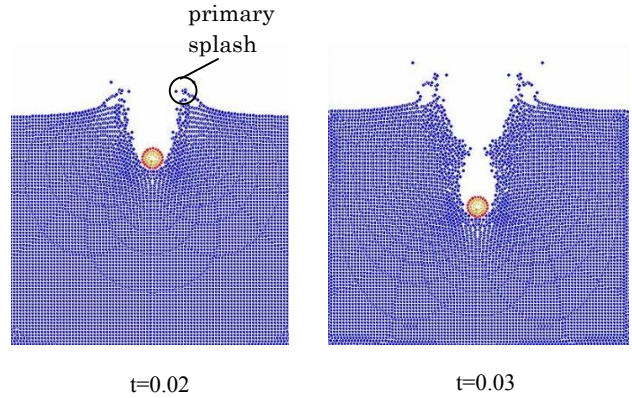


図8 Crown-type-splash of hydrogel ($S=100$) by experiment and simulation. Primary

以上、本研究の提案する手法により、ハイドロゲルの膨潤度の違いに応じた **slip-ratio** を導入することで、物体表面の滑りの度合いが周辺流れ場に与える影響が解析できるようになった。なお、スプラッシュの観察においては、実験環境での詳細な流れ解析は難しく、筆者らも PIV や着色によって着水物体の近傍の流れをトレースしようとしたが、パーティクルが気泡やキャビティによってさえぎられたり、光の反射や前面に跳ね上がる波などが障害になったりして解析は満足に行えなかった。また、膨潤度の大きいハイドロゲルでは球そのものが柔らかくなることによる変形の影響も受けるため、表面の滑り効果のみの影響を観察するためにも、本研究のようなシミュレーションによる解析が滑りの影響の調査には有効な一手段であると考えられる。

4 おわりに

本研究は、物体表面に滑りを有するような物体周りの流れ場のシミュレーションを計算する方法を提案した。二次元の非圧縮性流体の粒子法(MPS 法)シミュレーションにおいて、膨潤度に応じた壁面の滑り度合いとして滑り率(slip ratio)を実験より求め、それをナビエ・ストークスの式における粘性項を陽的に計算する際に、重み関数に掛ける係数として導入した。

提案した手法の検証として、管路内を流れるポアズイユ流れの数値シミュレーションを行い、ハイドロゲル壁面近傍における流速が滑り無し条件に比べ増加するといった、実験との同様の結果が得られることを確認した。そして、本手法による計算方法の応用例として、生物の水面への飛び込みに見られるようなスプラッシュを取り挙げた。膨潤度に応じたスプラッシュの違いのシミュレーションを行い、膨潤度の増加により球近傍の水粒子の速度が上昇しスプラッシュの幅が増大することを示した。

本研究の効果として、流体と物体壁面の干渉において通常の no-slip 条件ではない表面性状として滑りを計算に導入したが、これにより、ぬめりのある体表面を持った生物や、さらには血管や消化器の内壁といった生体における流れのシミュレーションへ適用の可能性を示すことが出来た。

引用文献

- (1) Manservigi, S., and Scardovelli, R., “A variational approach to the contact angle dynamics of spreading droplets”, *Computers & Fluids*, Vol.38 (2009), pp.406-424.
- (2) Tanaka, Y., Washio, Y., Yoshino, M., and Hirata T., “Numerical simulation of dynamic behavior of droplet on solid surface by the two-phase lattice Boltzmann method”, *Computers & Fluids*, Vol.40 (2011), pp.68-78.
- (3) Muradoglu, M., and Tasoglu, S., “A front-tracking method for computational modeling of impact and spreading of viscous droplets on solid walls”, *Computers & Fluids*, Vol.39 (2010), pp.615-625.
- (4) Yabe, T., Chinda, K., and Hiraishi, T., “Computation of surface tension and contact angle and its application to water strider”, *Computers & Fluids*, Vol.36 (2007), pp.184-190.
- (5) Kubota, Y., and Mochizuki, O., “Splash Formation by a Spherical Object Plunging into Water”, *Journal of Visualization*, Vol.12 (2009), pp.339-345.
- (6) 越塚誠一, 粒子法 (2005), pp.10-29, 日本計算工学会.
- (7) Harada, T., Suzuki, Y., Koshizuka, S., Arakawa, T., and Shoji, S., “Simulation of Droplet Generation in Micro Flow Using MPS Method”, *JSME International Journal*, Series B, Vol.49 (2006), pp.731-736.
- (8) Takizawa, K., Bazilevs, Y., Tezduyar, T.E., “Space-time and ALE-VNS Techniques for patient-specific cardiovascular fluid-structure interaction modeling”, *Arch. Comput. Methods Eng.*, Vol.19 (2012), pp.171-225
- (9) 田中正幸, 越塚誠一, “粒子法を用いた赤血球の変形シミュレーション”, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol. 26 No.1 (2007), pp.49-55.
- (10) Tsubota, K., Wada, S., Kamada, H., Kitagawa, Y., Lima, R. and Yamaguchi, T., “A particle method for blood flow simulation, - Application to flowing red blood cells and platelets -”, *Journal of the Earth Simulator*, Vol.5 (2006) pp.2-7.
- (11) Shirai, A., Fujita, R., and Hayase, T., “Transit characteristics of a neutrophil passing through a circular constriction in a cylindrical capillary vessel”, *JSME International Journal*, Series C, Vol.45, (2002), pp.974-980.
- (12) Sun, S., Migliorini, C., and Munn L.L., “Red Blood Cells Initiate Leukocyte Rolling in Post Capillary Expansions: A Lattice Boltzmann Analysis”, *Biophysical Journal*, Vol.85 (2003) pp.208-222.

- (13) Barthes-Biesel, D., Diaz, A, and Dhenin, E, “Effect of constitutive laws for two-dimensional membranes on flow-induced column deformation”, *J.Fluid Mech.*, Vol.460 (2002), pp.211-222
- (14) Ramanjan, S., and Pozrikidis, C., “Deformation of liquid capsules enclosed by elastic membranes in simple shear flow: large deformations and the effect of fluid viscosities”, *J. Fluid Mech.*, Vol.361 (1998) pp.117-143.
- (15) Zhu, L.D., Chin, R.C.Y., “Simulation of elastic filaments interacting with a viscous pulsatile flow”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.197 (2008), pp.2265–2274.
- (16) Taylor, C.A., Hughes, T.J. R, and Zarins, C.K., “Finite element modeling of three-dimensional pulsatile flow in the abdominal aorta: Relevance to atherosclerosis”, *Annals of Biomedical Engineering*, Vol.26 (1998) pp.975–987.
- (17) Yokoyama, M., and Mochizuki, O., “Deformation of a fluid-filled compliant cylinder in a uniform flow”, *Journal of Fluids and Structures*, Vol.25 (2009) pp.1049-1064.
- (18) Kikuchi, K., and Mochizuki, O., “A flow on a hydrogel surface mimicked a living cell”, *The 21st International Symposium on Transport Phenomena*, (2010), CD-ROM
- (19) Ling, S.C., and Ling, T.Y., “Anomalous drag-reducing phenomenon at a water / fish-mucus or polymer interface”, *J.Fluid Mech*, Vol.65 (1974), pp.499-512.
- (20) Worthington, A.M., “On Impact with a Liquid Surface”, *Proceedings of the Royal Society of London* , Vol. 34 (1982), pp.217-230.
- (21) Krechetnikov, R., and Homsy, G.M., “Crown-forming instability phenomena in the drop splash problem”, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol.331 (2009), pp.555-559.
- (22) Bussmann M., Chandra S. and Mostaghimia J., “Modeling the splash of a droplet impacting a solid surface”, *Physics of fluids*, Vol.12 (2000), pp.3121-3132.
- (23) Yoon, S.S., Jepsen, R.A., Nissen, M.R., and O’Hern T.J., “Experimental investigation on splashing and nonlinear fingerlike instability of large water drops”, *Journal of Fluids and Structure*, Vol. 23 (2007), pp. 101-115.

3.1.4. 飛来塩分シミュレーション -流体～粒子弱連成解析-

(1) 目標・計画

本研究はコンクリート構造物の塩害劣化シミュレータの開発を目的としている。コンクリートの塩害は、海から運ばれる海塩粒子（飛来塩分）に起因する場合と、コンクリートの構成材料である骨材に未洗浄あるいは十分洗浄していない海砂が使用された場合がある。本研究で対象としている塩害は、前者である。

飛来塩分に起因したコンクリート構造物の塩害は、海から運ばれる塩分がコンクリート表面に付着し、それらの一部が構造物内部に浸透し、内部の鉄筋位置まで達し、それらの濃度が腐食発生源限界塩化物イオン濃度を超えると、鉄筋が腐食・膨張し、その膨張圧でコンクリートに有害なひび割れを生じさせる劣化現象である。

本研究では、それらの劣化現象を精度よく予測するための数値解析的手法を開発することを目標としている。これまで ADVNETURE_Fluid_Tet および粒子拡散手法の一種であるランダムウォーク法を用い、流体・粒子弱連成解析において、飛来塩分の移流・拡散および構造物への付着シミュレーションを実施してきた。今年度の目標は、本解析結果と実構造物との付着塩分の調査との比較を行い、本手法の妥当性を検討することである。

今後ののは、構造物に付着した塩分の浸透解析、鋼材腐食・膨張解析、コンクリートのひび割れ解析などを実施し、コンクリート構造物の塩害劣化シミュレータの作成を目指す。

(2) 意義・国際社会との比較

世界的にコンクリート材料は社会基盤を構成する多くの構造物に使用されており、コンクリート構造物の合理的でかつ効率的な維持管理を行うためには、劣化因子（塩害の場合は、飛来塩分など）の作用強度の空間的分布の把握が必要である。本手法は飛来塩分の移流・拡散および構造物への付着現象をシミュレートでき、劣化因子の空間的分布の評価が可能である。このため、塩害劣化に対する維持管理のための劣化進行予測を行うための有力な手法であるといえる。

(3) 研究内容

本解析手法は、2 段階に分かれる。具体的には、ADVENTURE_Fluid_Tet により構造物周辺の流れ場（風速場）を解く第1ステップと、第1ステップで得られた流れ場を用いて粒子拡散手法の一つであるランダムウォーク法により飛来塩分粒子の移流・拡散を解く第2ステップからなる。ここでは ADVENTURE_Fluid_Tet の説明は省略し、ランダムウォーク法について概説する。

本研究では飛来塩分の移流拡散モデルとして粒子拡散手法の一種である 3 次元ランダムウォーク法を用いた。このモデルは、発生源から追跡粒子を放出し、個々の粒子が平均流と乱流によって運ばれるとして、その後の粒子の分布を、3 次元空間で計算するものである。

(a) 粒子位置の更新(移流・拡散)

3 次元乱流で i ステップ目の粒子の位置 $x_i(x,y,z)$ とし、それぞれの速度を $u_i(u,v,z)$ とする。その特徴として、粒子の速度を求める際に、乱流統計量により粒子の拡散性状を表現する。

以下にそれぞれの粒子の位置と速度の関係を示す。

発生した塩分粒子の輸送を次式で表す。

$$x_j^{i+1} = x_j^i + u_j^{i+1} \Delta t \quad (1)$$

ここで、 Δt は時間ステップである。また、 $i+1$ ステップ後の粒子速度を次式に表す。 j は座標を表す。

$$u_j^{i+1} = U_j^{i+1} + \alpha u_j^i + \lambda_j^{i+1} \quad (2)$$

ここで、 U_j^i は平均的な風速であり、Adventure_Fluid_Tet から得られる流れ場を用いる（弱連成）。 λ_j^{i+1} は乱流統計量、 α はラグランジュの相関関数である。また、乱流統計量は次式となる。

$$\lambda_j^{i+1} = (1 - \alpha^2)^{1/2} \sigma_j \cdot \eta_j^{i+1} \quad (3)$$

粒子は平均値がゼロの正規分布に従うとしている。 σ_j は粒子拡散の標準偏差を表し、粒子の拡散性状を表現するものである。また、 σ は次式に示す Fick 形の拡散形式を持つものとしてモデル化を行っている。

$$\sigma = \sqrt{2Kt} \quad (4)$$

ここで、 K は乱流拡散係数であり、粒子速度に依存すると仮定し、次式から求めている。

$$K = \frac{\beta}{3} (u^2 + v^2 + w^2) \cdot t \quad (5)$$

ここで、 β は係数、 t は時間である。

(b) 付着判定

本研究の位置づけは、コンクリート表面に付着する塩分量を評価することであるため、ランダムウォーク法に用いる粒子が構造物へいかに付着するかは重要なモデル化となる。しかし、その件について十分な検証データがないため、本研究では、構造物に衝突した粒子はすべて付着するとした完全付着モデルを採用した。

(c) 粒子の塩分濃度、沈降速度

ランダムウォーク法の大きな特徴の一つに個々の粒子ごとに個性を持たせることができることが挙げられる。過去の研究において粒子の塩分濃度および沈降速度などを定義したが、今回の検証においては、対象橋梁の高さが海面より 5m 程度で、さらに、高さがそれほどないため、粒子の塩分濃度は一定であると仮定し、付着塩分量は付着粒子の個数に依存するとした。また、今回の解析対象において、沈降速度の影響は小さいものと考え、沈降速度は考慮していない。

(4) 平成 25 年度進捗状況

以下に平成 25 年度の進捗状況を示す。本年度は本手法と実測値を比較し、本手法の妥当性を検証した。対象としたコンクリート構造物は、沖縄本島北部の西海岸側に建設されたプレテンション PC 橋である。対象橋梁の側面図を図-1 に示す。付着塩分はガーゼ拭き取り法にて採取した。また、測定位置は、図-1 の南側端部、中央部および北側端部である。

今回は、飛来塩分の影響のみを受ける中央部の結果について報告する．今回付着塩分採取法に採用したガーゼ拭き取りの様子と測定位置を図-2 に示す．図-3 に付着塩分量の結果を示す．測定位置は、図に示す 6 主桁すべての 5 か所であり、測定位置を海側から順位番号付けしており図の横軸の番号に対応する．

つぎに解析結果について説明する．図-4 に ADVENTURE_Fluid_Tet により計算した 0.5 秒後の風速ベクトルであり、その風速場を用いてランダムウォーク法の解析を行った．なお、境界条件としての入力風は、年平均風速を参考に 5m/s とした．図-5 に飛来塩分の移流・拡散・構造物への付着解析の結果を示す．また、図-6 に解析より得られた付着塩分量（単位面積当たりの粒子数）の結果を示す．

実測値および本解析値の付着塩分量はともに、主桁下面が多く、特に 2 番目の桁下面が最も多く、陸側へ向かうにしたがって付着塩分量が少なくなっていく結果を示している．この結果より、定性的ではあるが本手法の妥当性が得られた．今後は定量的な評価を行う予定である．

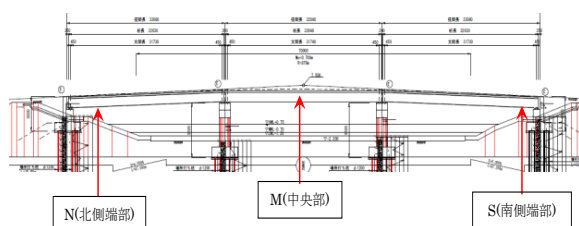


図-1 対象橋梁（側面図）

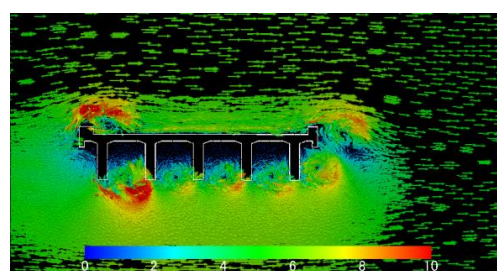


図-4 風速ベクトル図(0.5s)

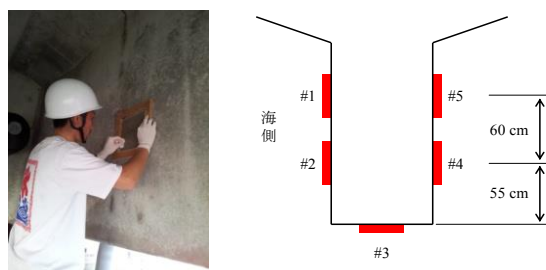


図-2 測定の様子と測定位置

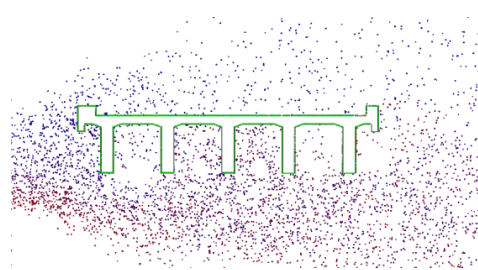


図-5 飛来塩分シミュレーション

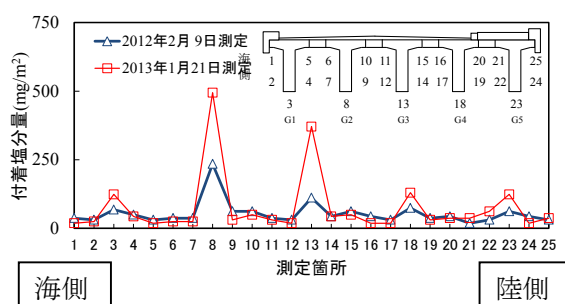


図-3 付着塩分量（実測値）

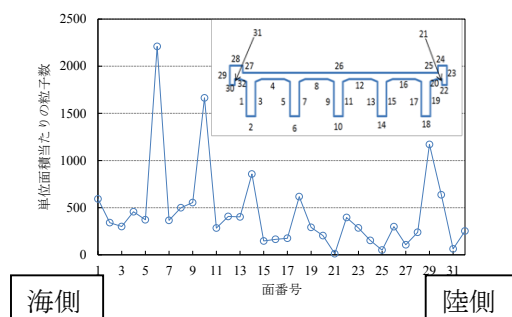


図-6 付着塩分量（解析値）

3.1.5. ブロック構造を有する固体の大規模3次元モデル生成および固液連成解析技術の構築

(1) 目標・計画

地盤・岩盤の内部には大小様々なき裂が存在し、それを成す材料は不均質かつ不確実なものである。したがって、地盤・岩盤全体としての力学的挙動を解析することは必然的に複雑なものとなり、その安定性や斜面崩壊、岩盤崩落の危険性を精度良く評価することは困難である。これは、上記の崩壊現象が、材料内部のき裂分布、材料分布、地下水流れ、き裂進展挙動などの物理現象が互いに連成した結果として生じることから、これらの現象のすべてを考慮した理論的・実験的検討が極めて困難であることに起因している。我が国は平野部が少ないため山間部まで人間の居住空間が広がっているため、土石流のような土の流動現象が生じると多くの人的被害を伴う場合が多い。したがって、地盤・岩盤の流動現象を解明し、人間社会の安心や安全を担保するためには、数値解析技術を援用した安全性評価が不可欠である。

本研究では、Sulsky らによって開発された MPM (Material Point Method) を基盤とした固体－破壊－流体連成解析技術を構築し、数値シミュレーションの観点から海底地すべり現象の力学的メカニズムやそれに伴って生じる津波の発生メカニズムを理解することを目標とする。本研究では初年度で深層崩壊や表層崩壊を誘発するような様々な形状を有する岩盤(岩山、連峰)や海底地すべり地層のモデル化技術を構築した。今年度は、地盤の流動解析の構築を目標とした。

(2) 意義・国際社会との比較

地すべりや津波等の自然災害の多発に伴い、国際的に防災対策の重要性が高まっている。土石流や斜面崩壊・崩落等の土の流動現象はマルチフィジックスな現象であり、これを力学的に解明することは現代社会が立ち向かうべき課題の一つである。実際の土砂災害時における土塊の移動距離は数百～千メートル程度であり、極めて大規模な自然現象であることは想像に難くない。しかしながら、破壊力学や流体力学等の様々な分野において、三次元数値解析や大規模解析が複数実施されているにもかかわらず、土の流動現象の大規模数値シミュレーション技術に関する研究開発は見当たらず、未だ達成されていない。したがって、土の流動解析を可能とする大規模シミュレーション技術を構築することの国際社会における意義は極めて大きい。

不連続岩盤の大変形ならびに斜面崩壊を動的に解析できる手法として、個別要素法 (DEM) や不連続変形解析法 (DDA) などが挙げられる。しかしながら、地盤の流動現象は土の材料的性質や土粒子と地下水との力学的連成挙動が極めて複雑であるため、これらを精度よく解析できるまでには至っていない。さらには、多くの亀裂を含む不確実な岩盤の破壊力学解析に至っては、地下水や内部き裂を考慮することができる高度な3次元破壊シミュレータの開発が必須となることから、極めてチャレンジングな研究対象となっている。

以上のことから、本研究は学術的かつ実用的な面で研究的意義を見出すことができ、国際社会においても重要な位置を占める研究のひとつであると考えられる。

(3) 研究内容

(A) 支配方程式

図-1 に示すように, MPM は粒子が持つ物理量を Euler 格子における節点の内挿関数を用いて Euler 格子に集約させ, Euler 格子にて運動方程式を解き, 算出された物理量を再び内挿関数を用いて粒子に集約することで, 連続体の変形, 移動現象を表現する手法である. このとき, 連続体における質量および運動量の保存則は次式で表わされる.

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \mathbf{a} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} \quad (2)$$

ここで, ρ :密度, \mathbf{v} :速度, \mathbf{a} :加速度, $\boldsymbol{\sigma}$:応力, \mathbf{b} :体積力である.

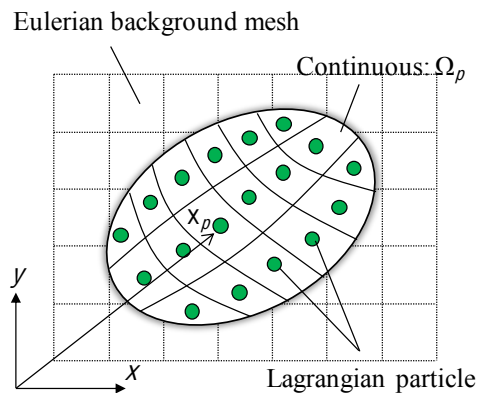


図-1 MPM の概念図

(B) 地すべり解析 (Kita-Uebaru Landslide)

次に, MPM の大変形問題への適用を試みる. 本研究では, 沖縄県中頭郡中城村で発生した地すべり^[1](以下, Kita-Uebaru landslide と称す)を対象とした. 解析モデルは Tokashiki et al. (2011)^[2]の研究を参考した. また弾塑性構成則には, Drucker-Prager の降伏関数を用いた. 図-2 に時間と移動層先端の到達距離の関係を示す. 本解析では, 観測結果を基に内部摩擦角がピーク値 (25deg) の場合と残留内部摩擦角値 (12deg) の場合において解析を行った. 同図より, 内部摩擦角が 25deg の時, 移動層はほとんど動いていないことが分ける. 一方, 内部摩擦角が 12deg の時, 50 秒間における移動距離は 110.7m となり, Gibo et al. (2006)^[3]の観測値の 110m とほぼ同等な値となった. このことから, 斜面崩壊が発生する時の地盤の強度特性はピーク強度から著しく低下していることが示唆される. また, Tokashi et al. (2011)^[2]の解析結果 (50 秒時における到達距離: 109.87m) と比較すると, 解析開始時から 15 秒において, Tokashiki et al.の結果では, 移動層の移

動距離は線型的に増加している。一方で、本解析結果においては、二次関数的に移動距離が増加していることがわかる。すなわち、本解析結果では、斜面崩壊は突発的に発生したことがわかる。図-3 に、内部摩擦角が 12 degss と 25 degs における Kita-Uebaru landslide のシミュレーション結果を示す。同図においても、内部摩擦角が 25 degs の時、移動層がほとんど移動してないことがわかる。

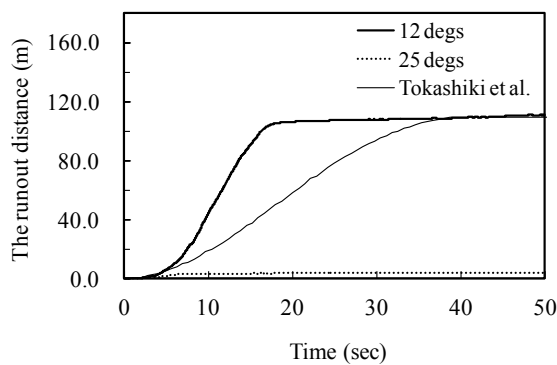


図-2 解析結果

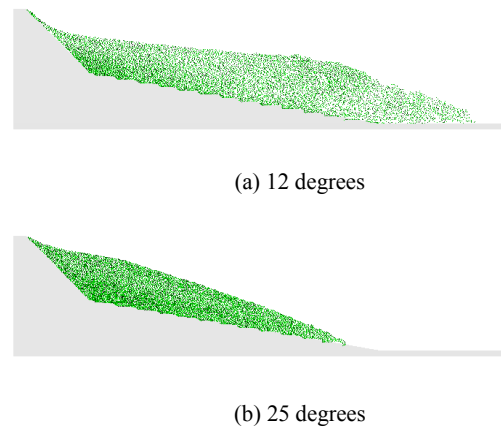


図-3 角内部摩擦角における地盤の変形挙動

(4) 平成 25 年度進捗状況

今年度は、地盤の大変形解析を評価できる手法の確立を目的とし、MPM を斜面崩壊現象へ適用し、その妥当性の検証を行った。その結果、観測値と解析結果が同程度の値を示し、その有用性が検証された。今後は、本手法の 3 次元化ならびに大規模化への拡張を予定している。

参考文献

- 1) 陳伝勝, 宜保清一, 佐々木慶三, 中村真也: 沖縄, 島尻層群泥岩分布地域の地すべり類型区分の試みー地すべりの危険度評価に関連してー, 日本地すべり学会誌, Vol. 43, No. 6, pp.1-12, 2007.
- 2) Tokashiki, N. and Aydan, Ö.: Kita-Uebaru natural rock slope failure and its back analysis. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 62, pp.25-31, 2011.
- 3) Gibo S, Zhou Y, Sasaki K, Nakamura S (2006) Kitauebaru landslide caused by continual rainfall in Nakagusuku Village, Okinawa Prefecture, on June 10, 2006. *Journal of the Japan Landslide Society* 43 (2): 44-47

3.2. 大規模並列化グループ

2011 年に京コンピュータが 10 ペタ(Peta: 1 京)フロップス(Flops: Floating Points per second)に達し, TOP500 では 2 回連続世界 1 位となり, 2013 年には中国の Tianhe-2 が 33 ペタにより 1 位を記録し, 次世代スーパーコンピュータは, ペタの次の世代, つまりエクサ(Exa)フロップスを指す時代へと突入している. このことからハードウェアとしてコンピュータの性能が向上するスピードがいかに速いかが分かる. その一方で, これらの大規模なコンピュータ上で動作する効率的なソフトウェアの開発に関しては, その開発スピードもソフトウェアの品質も十分とは言えず, 多くのソフトウェアが 20 世紀の主要なソフトウェアを修正し続けて用いられているのが実情である. 特に, 1970~1980 年台に既に確立されているアルゴリズムに対して, 並列化の実装のみを加えた物が多く見られる. このような背景のもと, 本プロジェクトでは様々な計算機プラットフォーム上で効率的に動作する, 次世代の大規模解析システムを構築するとともに, 常に最先端のスーパーコンピュータ能力を活用するシミュレーション実現を目指す.

今年度は, 以下の項目について報告を行う.

- (1) ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発
- (2) 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築

3.2.1. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発

(1) 目標・計画

本研究では対象問題をある程度限定することで高性能が得られるアプリケーション特化型システム開発を行っていく。対象問題は連続体力学とし、産業界で需要が高い非構造格子並びに自由表面や移動境界問題に重要なメッシュフリー（粒子法を含む）の取り扱いを可能とする。時間方向の非定常性や問題が持つ非線形性を考慮する必要があるが、陰解法ベースの数値解析手法を対象とする。これらに対し、3つの課題 (A) DDM 入出力ライブラリ開発, (B) DDM ソルバーライブラリ開発, (C) 連続体力学向け DSL 開発に取り組む。本研究で開発されたライブラリを用いて連続体力学系シミュレータの実装と評価も行う予定である。

(2) 意義・国際社会との比較

ポストペタスケール計算を見据えた新技術の開発について、これまで同様汎用向けのライブラリなども開発されるであろうが、それらの利用では、非構造格子問題では高々数パーセントの性能、あるいはそれ以下しか期待できず、連続体力学系シミュレーションに特化したシステム開発が必要と考えられる。そもそも数パーセントの性能でのソフトウェアはペタコンでの運用が認められないという制約もあり、これはポストペタコンについてはさらに厳しくなることも想定される。

連続体力学系シミュレーションは、従来からの FEM, FVM, BEM など非構造格子アプローチに加え、近年ではメッシュフリーや粒子ベース手法による大規模計算の台頭が目覚しく、これらにも対応させ、非構造格子および節点、粒子ベースモデルを統一的に扱えるようにすることで、連続体力学系シミュレーション向けライブラリとして整備されれば、ポストペタコンの連続体力学系シミュレーションでの利用の拡大に大きく貢献することが期待できる。

(3) 研究内容

A) DDM (Domain Decomposition Method, 領域分割法) 入出力ライブラリ

本研究項目は、マルチレベル領域分割法に基づく多階層計算格子データの生成、操作および I/O ライブラリ開発を行うものである。一般的なアプリケーションシステムは、プレ・ソルバー・ポスト処理に分けられるが、これまでは最も高負荷であるソルバー部のみがスパコン上に実装されてきた。ポストペタコンでは、全ての処理をスパコン上に実装し、並列化することが当然求められてくる。しかし、従来の枠組みで並列化したのみでは、それに伴い生成される大規模な数値計算データ処理に多くの時間が割かれてしまうことが予想される。そこで、これまで研究代表者らがソルバー部の並列化手法として圧倒的な高い並列効率を示してきた階層型領域分割法の技術を応用した、マルチレベル領域分割法によるデータ処理システムの開発を行う。

B) DDM ソルバーライブラリ

本研究項目は、マルチレベル領域分割法に基づく連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列ライブラリ開発を行うものである。一般的な線形代数ソルバーは、アセンブリされた連立一次方程式を入力とするため、FEMにおけるメッシュ情報など本来解析手法が持つ特徴を利用せずに実装されてきた。それらは共有メモリ環境及びその中で解くことができる解析規模では問題となりにくい、ポストペタコンで対象とする解析規模では入力データから解析手法まで含めた分散メモリ環境向け並列化技術が必要となることが予想される。そこで、提案するマルチレベル DDM による多階層型データ構造を活用した、大規模な線形代数ソルバーの分散メモリ環境に適したライブラリを開発を行う。

これは、

- ・多階層領域分割に基づく分散メモリ並列向け線形代数ソルバーの構築
- ・多階層領域分割に基づくマルチレベルコースグリッド修正法の開発
- ・構造・熱・流体・磁場などを対象とする物理現象毎に特化したコースグリッド修正法の開発

を含む。つまり、これまでFEMを対象に研究を進めてきたDDMをマルチレベルに拡張し、さらにFVM, BEM, メッシュフリー, 節点ベースFEMや粒子法など連続体力学全般に適用する技術開発である。また、マルチレベルな領域分割を利用し、線形代数ソルバーにおける前処理手法について、研究代表者らがこれまで研究を進めてきた高速かつ安定した収束性を持つ反復解法であるBDD (Balancing Domain Decomposition) 法やBDDC (Balancing Domain Decomposition by Constraints) 法をマルチレベルに拡張し、さらに粒子法などへの応用も進める。開発システムは線形代数ライブラリとして整備していく。

C) 連続体力学向け DSL (Domain Specific Language, 問題領域専用言語)

本研究項目は、連続体力学向けDSLの開発と、それに対応した多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成の開発を行うものである。ポストペタコンのアーキテクチャでは、計算ノード間の並列性だけでなく計算ノード内での効率も重視される。各計算ノードはメニーコアやGPU, SIMD 拡張命令といった多種多様なアクセラレータを有し、これらを有効利用することが望まれる。従来のプログラミング言語やコンパイラ最適化技術での対処は不十分であり、現状ではそれぞれのアクセラレータごとに人手で最適化された個別の実装が必要とされている。一方、数値シミュレーションコードの場合、特に連続体力学分野においては、そのアプリケーションロジックは物理現象や数値解析スキームであり、これは数学表現、特に行列やテンソルで表記されることが多い。よって、連続体物理モデルをDSL化して、数学記述（例えば、行列、テンソルの式をtex形式で記述）から各アクセラレータタイプ向けに最適化されたライブラリをcallするコードを生成するコードジェネレータあるいはトランスレータアプローチが有効であると考えられ、これを実現するシステムの開発を行う。

(4) 平成 25 年度進捗状況

A) DDM (Domain Decomposition Method, 領域分割法) 入出力ライブラリ

これまで開発してきた多階層領域分割アルゴリズムについて、非構造格子向け並びにメッシュフリー向けの機能強化を行った。特に、京コンピュータや PRIMEHPC FX10 が持つ Tofu を例に、ネットワークトポロジーを意識したデータ配分の自動調整アルゴリズムの検討と開発などを行った。本ライブラリを用いることで、東京大学 FX10 の 600 計算ノードを用いてポリゴンモデルから 20 億粒子生成を 20 秒、京コンピュータの 8,196 計算ノードを用いて 258 億要素の非構造四面体メッシュ生成を約 94 分で成功するなど、ポストペタコンで想定される超大規模シミュレーションのプレ処理に有効なライブラリであることが示された。

また、超大規模シミュレーション結果を高効率に可視化するために、マルチプラットフォーム大規模領域分割型並列可視化ライブラリ VSCG (Versatile Scientific Computing Graphics library) の開発を開始した。VSCG は依存ライブラリが数学関数のみであることから、将来を含めた多様な計算機環境で動作することが可能であり、メッシュ・粒子の描画に対応した基礎的な可視化機能の開発を行った。ソフトウェア描画を行うライブラリであり、超大規模データに対する高精細画像生成を容易に可能とした (図 1)。この高精細画像は最低でも $10^4 \times 10^4$ ピクセル画像を生成し結果の評価に用いる。また、プロセスごとの描画と画像出力、並びに深さ情報に基づく画像重畳機能を備えており、それらを利用することで並列可視化を可能とした。VSCG を用いて多階層領域分割されたメッシュまたは粒子の並列可視化システムを構築し、京コンピュータ上で 112 億自由度有限要素モデルのポスト処理に成功した。

さらに、非構造格子向け DDM 圧縮技術の開発を開始した。多階層領域分割による領域間境界上情報への圧縮率調査を行っている。一般的な CG 法の演算量 ($O(n^3+n^2)$) を基準に試算を行った。全体剛性行列を解く計算量と領域ごとの小さな剛性行列を解く計算量の比が極めて大きくなることが分かった。100 億自由度有限要素法モデルの計算量の比は、 10^{10} 以上の計算量比が生じる。このことから、袖領域の変位量をもとに内部の変位、ひずみ、応力を再度計算することは現実的であることが分かった。現在、計算速度の計測と全体の計算量がどの程度のオーダーになるのかを詳細に調べ、次世代計算機のパフォーマンス推定の基礎データとする予定である。

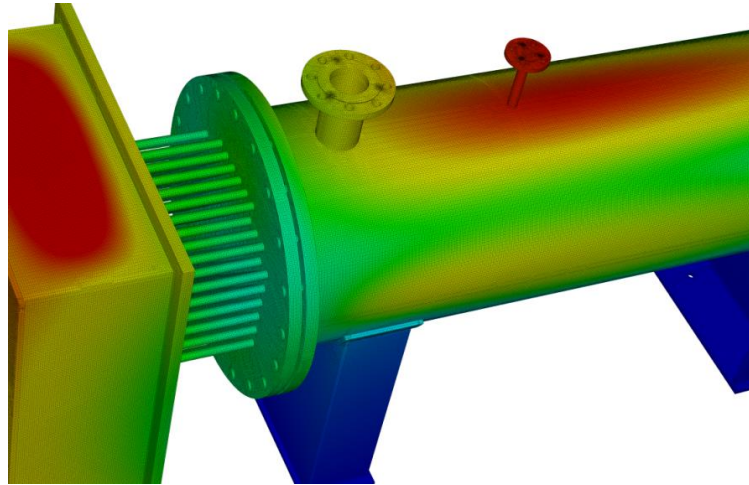


図1 1,200×9,000 ピクセル画像の部分拡大図（重力による変位分布コンタ）

B) DDM ソルバーライブラリ

非構造格子向け DDM 反復法ライブラリとして、多階層領域分割情報を利用した DDM 反復アルゴリズムの機能強化を行った。特に、ポストペタコンに対する社会ニーズを想定し、現在のペタコンを用いた 1,000 億自由度規模有限要素解析の実現性について検討した。DDM-CG 法の部分領域問題ソルバーとして Eisenstat 技法に基づく CG 法+SSOR 前処理を適用するなど、実装に関する最適化を行うことで、京コンピュータの 8,196 計算ノードを用いて 1,040 億自由度規模有限要素解析（古代建築物パンテオンモデルの自重解析）に 81.8 時間で成功した。本手法はストロングスケーリング性能として約 90%の並列効率を示しており、京コンピュータの全計算資源を利用することで実用時間内に計算できる見込みであり、ポストペタコンにおいては実用化できる可能性が示された。また、非圧縮性粘性流れ問題や電磁界問題解析を想定し、CR 法や MINRES 法など、様々な反復法に基づく DDM 反復法の開発を継続的に行っている。

非構造格子向け多階層前処理技術として、有限要素法向け BDD 前処理アルゴリズムの機能強化を行った。特に、BDD 前処理の超並列計算環境向け実装技術の強化を行い、112 億自由度有限要素解析において 53 反復（収束判定値は相対残差が 3 桁小さくなった時点）で収束解を得ることに成功した。また、異種材料混在モデルにおける収束性を改善するために、DDM 反復法に対する対角スケーリング処理法の新解釈を提案した。特に BDD 前処理において効果的であり、物性値が 100 倍以上でなる複数部材で構成された構造物のシミュレーションにおいて、20 倍以上の収束性改善に成功した。

また、多階層領域分割情報を用いた非構造格子向け数値解析手法のヘテロジニアスコンピューティング向け負荷分散アルゴリズムの開発を行った。特に CPU と GPU のヘテロジニアス環境において、計算ノードに割り当てられた部分領域群を OpenMP の動的スケジューリング機能を用いて CPU コアや GPU に動的負荷分散を行う機能を開発した。6 コア CPU

単体に比べて、6 コア CPU-GPU ハイブリッドにおいて約 2 倍の高速化に成功した。

さらに、非構造格子向け DDM ソルバーライブラリオ試しツールの開発を開始した。これは、既存の反復法ライブラリユーザーに対して DDM 反復法の試験環境を提供するものであり、ユーザーニーズのフィードバックを可能とする仕組みでもある。

MPS 陽解法（粒子法）向けの数値解析手法開発では、東京大学 FX10 の 4,800 計算ノード上において 200 億粒子のベンチマーク計算に成功した。並列性能では、25 億粒子の 60 計算ノードから 4,800 計算ノードのストロングスケーリングで 0.9933 を達成した。実証例題として、石巻市街地に津波が侵入して、直径 9 m の 2 つのタンクが地上構造物に衝突しながら漂流する解析に成功した（図 2）。本解析は、東京大学 FX10 の 600 計算ノードや九州大学 CX400 の 32 計算ノードを用いた最大 3.8 億粒子の解析である。

今後は、「非構造格子向け多階層領域分割情報を利用した DDM 反復法アルゴリズム」、「ボアソン・構造解析向け BDD・BDDC による多階層コースグリッド修正法」と「多階層領域分割情報を用いた非構造格子・メッシュフリー数値解析手法の開発」の開発を継続して実施する。

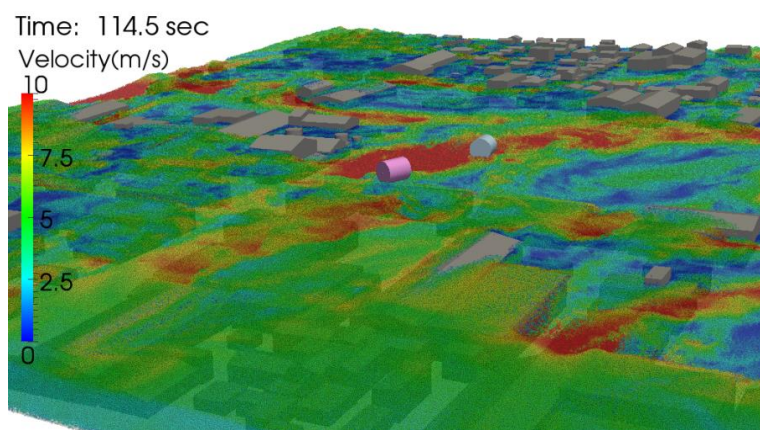


図 2 直径 9m の 2 つのタンクが津波によって流される様子を 3.8 億粒子で可視化した結果

C) 連続体力学向け DSL (Domain Specific Language, 問題領域専用言語)

マルチコア及び SIMD 命令セット向け最適化ライブラリを開発を進めた。開発中の①構造解析・要素剛性、②非線形材料構成則、③熱伝導解析・要素剛性のそれぞれの行列テンソルライブラリでは、Intel (Sandy Bridge) でピーク性能比①60%、②27%、③50%を達成し、東京大学 FX10 ではピーク性能比①27%、②14%、③35%を達成することに成功した。粒子系シミュレーションのための DSL の β 版を開発した結果、東京大学 FX10 ではピーク性能比 7%を達成した。トランスレータについては、グループ内外のユーザからのフィードバック情報を元に、文法レベルの検討を行っている。

また、豊田中央研究所や東京理科大学に外部ユーザとして、本 DSL を利用してもらうこ

とで、性能評価と並行してユーザビリティの改善を行っている。加えて、本 DSL を、理化学研究所、JAMSTEC、JAXA、JAEA、東京大学生産技術研究所、東京大学地震研究所や国内スパコンセンターなどへの普及活動を積極的に行い、理化学研究所 京コンピュータ、東京大学 FX10、T2K 及び GPU クラスタ、九州大学 FX10、JAMSTEC ES2、筑波大学 T2K、名古屋大学 FX1、京都大学 XE6、九州大学 CX400 などの利用実績を築きつつある。更に、HPC 技術の産業界向け応用に関する国際ワークショップに参加し、韓国 KiSTi における HPC クラウド開発への協力を行うことで、海外スパコンセンターへの普及活動も行っている。

今後は需要の高いマルチコア及び SIMD 命令セット向けの最適化ライブラリの開発を延長して実施する。また、GPU 向けの開発を重点的に行う。GPU 向け開発には、CUDA 及び OpenACC の利用を検討する。また、メニーコア CPU を視野に、インテルの MIC を対象にした拡張も検討する。トランスレータはプロトタイプを作成する予定である。

D) 連続体力学系シミュレータ

本研究項目は、研究項目 (A) ～ (C) で開発されたマルチレベル領域分割法による基盤技術の性能評価を行うために、マルチレベル領域分割法による連続体力学系シミュレータの開発を行うものである。

新たに機能追加された「DDM 入出力ライブラリ」、「DDM ソルバーライブラリ」と「連続体力学向け DSL」を用いて、大規模構造物の耐震解析や実地形津波解析などを実証例題とし、理化学研究所 京コンピュータ、東京大学 FX10、T2K 及び GPU クラスタ、名古屋大学 FX1、筑波大学 T2K、九州大学 CX400 などアーキテクチャの異なる複数のスパコン上においてそれぞれ性能評価を行った。

今後は、評価環境として東京工業大学 TSUBAME2.0、京都大学 CRAY XE6、名古屋大学の新システムなどを追加し、多様な計算機上において性能評価を行うことで、ポストペタスケールにおける連続体力学系シミュレータの課題を明らかにする。また、大規模な実証問題解析を行い、それらの実用化に必要な計算資源量を推定評価する。

3.2.2. 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築

(1) 目標・計画

A) 静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装

磁場解析の分野ではこれまで約 20 年近く、東京大学の菊地文雄名誉教授が線形静磁場問題で確立した独創的な混合法的定式化を自然な形で 3 次元渦電流問題や 3 次元非線形静磁場問題に独自の工夫を加えて拡張し、ADVENTURE_Magnetic を公開してきた。ごく最近部分領域問題を直接法で解くことにより 1 億実自由度や約 5,000 万複素自由度の大規模解析を可能にした魅力を次世代計算機で更に活かすためにはもう 1 桁程度の計算速度の改善が望ましい状況がある(速ければ速いほど、実際の設計に用いる計算モデルを更に詳細化できる)。本研究では、この高速化に対応する研究を行い、もう 1 桁高速化したソフトウェアを公開していく。ここに述べた手法に基づく磁場解析ソフトウェアは、国産市販ソフトウェアは言うまでもなく国際的に見てもあまり例がない。また現在数百万自由度規模程度で留まっている電磁場解析の規模の拡大にとって現時点ですでにブレイクスルーを引き起こした研究になっている。実際、大規模解析では我々の現時点のレベルを目標にする研究チームもいくつか現れているが、本研究では得意とする大規模化に更に高速性を加味することにより、追随者の上を行く **Perfect Only One** を目指す。

B) 熱対流解析コードの機能強化

非圧縮性粘性流解析・熱対流解析の分野では現時点の ADVENTURE_sFlow をもとに計算サービスを行っているベンチャー企業も現われている。ADVENTURE_sFlow では磁場解析や構造解析と同様な手法で計算しているので、高速化の検討を共通の課題として行え、入力データの共有化がしやすく連成解析が行いやすいという特長がある。低炭素社会向けシミュレーション技術に応用分野を特化し解析機能を限定してでも、この特長を早く引き出したいと考えている。

(2) 意義・国際社会との比較

3 次元電磁場の有限要素解析はこれまでやや試行錯誤的に行われており、信頼のおける数値解法が未だ十分確立されていない状況にある。このようななかで、我々は菊地理論をベースに、工学的応用を展開するという形を採っており、国際的に見ても極めてユニークな注目すべき研究を展開している。これまでに開発されてきた文部科学省支援研究による電磁場解析ソフトウェアの骨格を一貫して提供してきたという自負もある。今後の低炭素社会に向けて電気自動車の利用が推進されているが、電磁環境適合性(EMC)のためにも電磁場解析の有用性は増している。非圧縮性粘性流・熱対流や固体力学の大規模解析も統一的な手法で研究を進めているので、それらとの連成解析が有利に行えるという利点も持っている。

(3) 研究内容

A) 静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装

3次元磁場の有限要素法による解析, 特に3次元渦電流解析(複素自由度 4,355 万の問題が 32 台の PC クラスタを用い 5 時間弱で解けている)並びに 1 億自由度を最近可能にした 3次元非線形静磁場解析に対しては, 領域分割法を用いる際の数値計算上の諸問題を以下の更なる高速化に関する課題に焦点を絞って研究する.

「離散化に伴い生じる超大規模(1 億自由度以上)の疎な対称連立 1 次方程式と連立非線形方程式に対する領域分割法を意識した効率的な数値解法を確立し, 特にもう 1 桁の高速化を可能にする前処理方法を確立する.」

B) 熱対流解析コードの機能強化

3次元非圧縮性粘性流解析についてはこれまでの内容を発展させた新アルゴリズムの導入を図る. 2006 年 7 月に公開したモジュール ADVENTURE_sFlow はその後水素利用社会向けシミュレーション技術でも応用があったので, 熱対流解析の基本機能が非定常解析機能も含めて追加され, 前処理機能の強化による高速化が実現されたため, 実用レベルの有効性をチェックする段階になっている. 非定常解析機能では Stokes 問題のみならず, Navier-Stokes 問題に対しても特性曲線法の活用により対称な連立 1 次方程式ソルバーを活用できることがポイントになっている.

(4) 平成 25 年度進捗状況

A) 静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装

今年度は BDD 前処理の実装実現のために二つの課題を設定した. 一つはノイマンノイマン前処理を実装させること, もう一つはコース行列を作成し, それを既存のパラレルソルバーで解くことである. この二つが実現できれば, BDD の実装はほとんど実現できると言ってよいほどの重要な 2 項目になる. ノイマンノイマン前処理は 2005 年に一度成功した実績があるが当時の記録が紛失しており, 新たな開発を行うことになった. 現時点ではコードの骨格ができた段階であり, (1)のテーマの B)の研究テーマと連携しながら完成を急いでいる段階である. 一方, コース行列作成はテストランを行っている段階であり, まだ少数の部分領域情報の重ね合わせしか実現できていない. これを全部分領域までに拡張できれば, 並列ソルバーは既存のものをを使う予定なので, 第 2 項目もクリアできると考えている.

B) 熱対流解析コードの機能強化

このテーマは今年度の課題として公開用ドキュメントの整備以外に以下の 4 課題を設定した. すなわち ADVENTURE_sFlow への機能強化として

- ・熱方程式部分への DDM フレームワークの適用

- ・熱流束境界条件入力機能の追加
- ・熱伝達境界条件入力機能の追加
- ・BDD 前処理における通信処理改善の検討

を図るものである。最初の DDM フレームワークの適用は(1)のテーマの B)の研究テーマと連携しながら、開発ライブラリのプロトタイプテストを兼ねたものであるが、プロトタイプ提供を待っている段階である。2 番目、3 番目のテーマは 1 番目のテーマが予定より遅れているので、DDM フレームワークを除いた形での実現をまず目指している。4 番目は派生した問題を解決しながら、検討を続けている段階である。

3.3. 新規実験計測グループ

流体・構造連成解析では，流れと構造物の相互作用を含むことから，流体もしくは構造のみの現象よりも複雑となる場合が殆どであり，現象を数値解析結果のみで評価することは困難である．また，連成問題に関する研究の多くが，解析もしくは実験のみに頼ったものであり，両方を実施して実験結果，数値解析結果の信頼性を議論したものは見られない．

本グループの目的は，流体・構造連成問題の実験を行い，数値解析結果の信頼性を評価するための情報を提供することである．そのためには，予め実験結果の質を保証しておくことが重要であり，さまざまな観点から計測を試みることで，それぞれの計測結果の信頼性を調べておくことが不可欠となる．流れと構造物の運動は3次元的である．一般的に，ある点の変位や流速を同時計測するとき，その値の信頼性を高めるほど，空間分解能は低下する．逆に，空間分解能を上げると各点の測定値の信頼性は低下する．このようなことから，点計測と面計測の測定値を比較することで，観察される現象や結果の質についても検討する．

実験に取り組むと，さまざまな計測上の問題が生じるが，それを解決することで新しい計測法や新規実験テーマを提案していくことも本グループの役割であると考えている．

3.3.1. 流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムの構築

(1) 目標・計画

流体-構造連成解析手法を検証するための実証試験として、低速風洞試験を行う。図1は風洞試験装置システムの概要図である。風路内部に実験模型を設置して試験を行い、数値解析の検証用データを提供する。また本研究を通じて、新しい計測手法、解析手法の提案を目指す。

(2) 意義・国際社会との比較

流体-構造連成問題について数値計算、実験は多数行われているが、その殆どが単独に行われたものである。そのため文献ではいずれかの結果が引用される場合が多く、両者の信頼性を保証した上で、結果を議論した例が見られないのが現状である。本研究では、数値計算結果の信頼性を検証するためのデータを提供することを主眼として、様々な実験に取り組む。これまで行われていなかった数値計算と実験の両方を実施することで、計算上の問題点、実験上の問題点を明らかにする。

(3) 研究内容

2012年度は風洞試験装置システムの整備期間であり、2013年度は基礎試験、2014年度以降は応用的な実験を検討している。基礎試験ではシートフラッタ実験を行い、応用的実験では航空機模型のフラッタ実験、フラッタの工学的利用や弾性皮膜による流体抵抗低減を目指した研究を行う予定である。図1は風洞試験装置の概要図である。実証試験では実験模型の運動解析、空気力計測、PIV流れ解析を組み合わせた流体実験を行う。

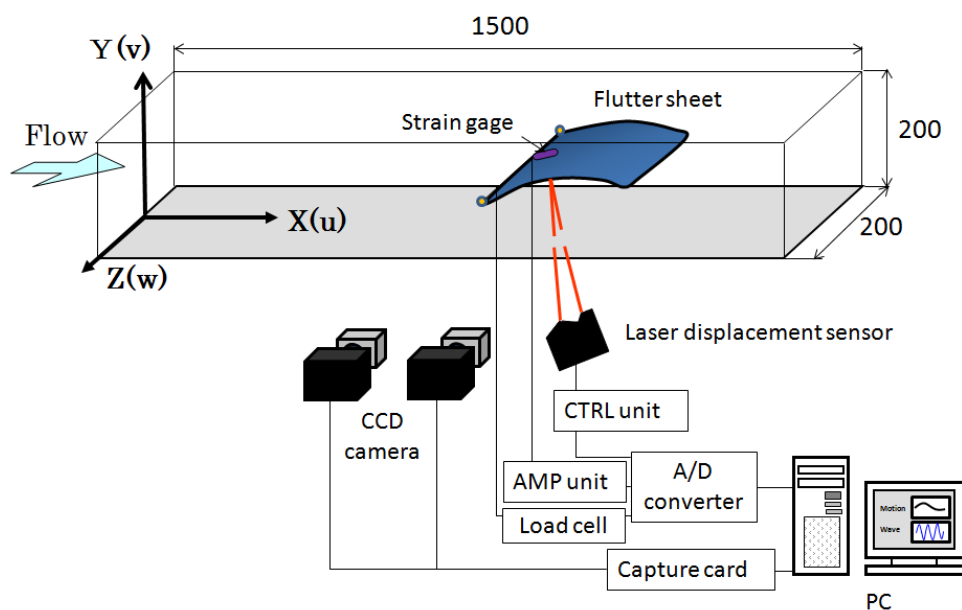


図1 風洞試験装置

本風洞試験装置により実施できる試験内容は以下の通りである。

- (1) 高速度カメラによる 3 次元運動解析
- (2) レーザ変位計による変位測定
- (3) 6 分力天秤による空気力・モーメント測定
- (4) ひずみゲージ測定
- (5) 煙発生器による流れの可視化
- (6) P I V 解析による流れの可視化

(4) 平成 25 年度進捗状況

昨年度末までに風洞試験装置と計測システムを導入した。風洞装置の移設を 8 月に終えた後、風洞試験を開始した。風洞装置の検定を行い、回転数と風速の関係がほぼ比例すること、風路断面積 $0.3 \times 0.3 \text{m}^2$ の断面内において、試験領域では一様流を保つことが出来ることを確認した。

風洞装置の検定と併行して、流体構造連成実験の試験装置として、シートフラッタ装置を製作した。図 2 は風洞装置に設置した試験装置を示している。回転軸にシート材を固定して、風洞装置で気流を発生させて、シートフラッタを発生させる機構になっている。様々な種類のシート材を調達し、予備実験でシート材を選定した。シート材はポリプロピレン、シリコンゴム、PVC などの材料を用いて実験を行った。



図 2 フラッタ試験装置

図 2 のフラッタ試験装置には、シート材を水平に設置するとフラッタが発生する前に、空気力により浮き上がる必要があるため、垂直に設置することで、重力の影響をあまり受けずにフラッタが開始するようになっている。

フラッタ開始後のシート材の変位量は、レーザ変位計を用いて測定した。レーザ変位計は、株式会社キーエンス製の LK-G シリーズを使用した。レーザヘッドは CCD レーザ式の LK-G500、コントローラは LK-G3000、電源ユニットは KZ-U3 を用いた。レーザヘッドは三脚に固定して、シート材から水平距離 500 mm 離れた位置から測定した。

シートフラッタを発生させて、レーザ変位計を用いて変位を測定した結果を周波数解析して得られたフラッタ特性が図3である。風速を上げていくとシートはフラッタし始めるが、一旦フラッタが発生すると、風速を下げたときフラッタが終了する風速は、開始速度とは異なる。本装置を用いて得られたフラッタ特性は、他者の実験結果と比較して良好に一致しており、シート取付冶具が良好であることを確認している。

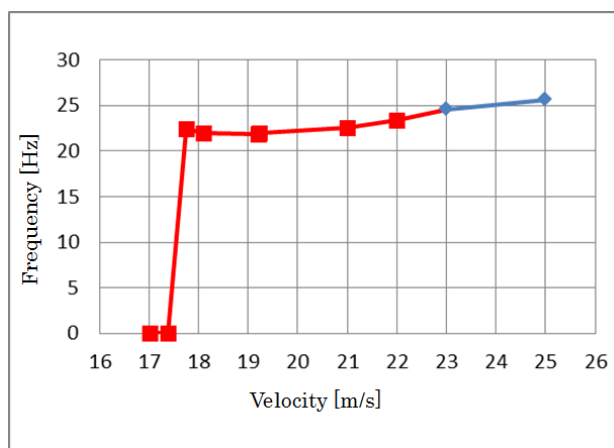


図3 シートフラッタの周波数特性

図4は3次元運動解析システムを示している。シート材料がフラッタする様子を、シート材の左右に2台ずつ設置したハイスピードカメラを用いて測定することができる。カメラは株式会社ディテクト製 HAS シリーズの HAS-L1 を使用した。画像データはパソコン上のメモリに記憶され、その後、データ解析が行われる。パソコンに 16GB のメモリを実装した場合、VGA 形式で約 37000 枚の画像データが記録可能であり、約 75 秒録画することができる。シート材の表面にマーキングを施し、カメラでステレオ撮影することにより、シート材がフラッタする様子を運動解析することができる。



図4 3次元運動解析システム

図5は、動画像中におけるフラッタの軌跡を示している。シート材の表面に9点のマーキングを施してあり、画像中では白丸で表示されている。レーザ変位計の結果と比較した結果、良好に一致することを確認した。

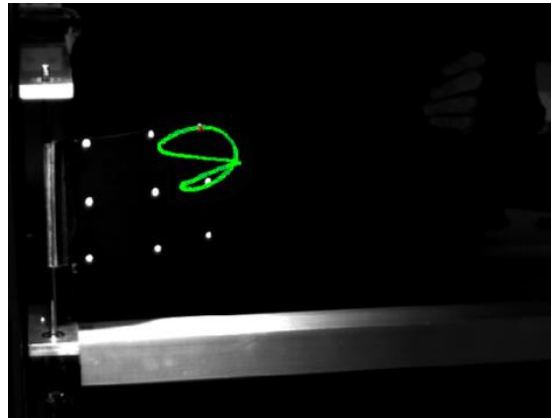


図5 シートフラッタの軌跡

3.3.2. 境界層特性評価のための普遍関数構築

(1) 目標・計画

乱流境界層の速度分布を表わす普遍関数を構築する．これまで境界層速度分布を表現した様々な関数が提案されているが，乱流境界層の速度分布全体を記述することはできていない．本研究では，速度境界層の内層から外層，後流域を記述する関数を提案する．本手法は流体摩擦力の推算や境界層特性を算出するために適用できると考えられる．

(2) 意義・国際社会との比較

流体力学において摩擦抵抗低減は主要な研究の一つであることから，摩擦抵抗を高い精度で測定することが求められている．しかし，その大きさは一般的に小さいことから，定量計測が困難である．信頼性のある計測法として，浮動片を用いた直接計測法があるが，セッティングのための時間的コストが掛かること，平面以外の計測に不適當であることから，殆ど実施されていない．本研究では，速度分布から推算する間接計測に着眼している．摩擦係数を推算するために，速度境界層を記述する様々な関数が定義されているが，乱流境界層が複雑な形をしていることから，単一の関数で記述することは出来ない．本研究の目的である乱流境界層の速度分布を表す普遍関数を構築できれば，高精度に摩擦抵抗を計測するだけでなく，境界層特性を求めることもできると考えられる．

(3) 研究内容

乱流境界層の速度分布を表わす普遍関数を，物理的考察に基づいて導出する．内層を表わす定せん断層と外層を表わす速度欠損則を組み合わせると乱流境界層の速度分布を表現することができる．そのため，異なる関数を接続することが重要となる．提案する普遍関数と風洞試験結果，実験式と比較して，普遍関数の信頼性を評価する．

(4) 平成 25 年度進捗状況

実験は吹き下ろし式風洞装置を用いて行った(Fig. 1)．風路断面は $600 \times 600 \text{ mm}^2$ ，風路長は 3000 mm である．流れ計測は単位長さ当たりのレイノルズ数で $\text{Re} [1/\text{m}]$ で 3×10^5 で実験を行い，速度計測には I 型の熱線流速計を使用した．

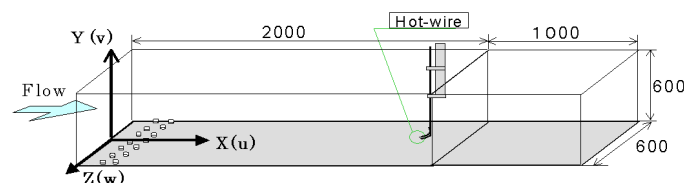


Fig.1 Schematic of test section in the wind tunnel.

乱流境界層を記述する速度分布関数を Spalding 則と Cole の後流関数を組み合わせることで，陰的に速度分布を表現できる式を提案する．

$$y^+ = u^+ + e^{-\kappa B} \left(e^{\kappa u^+} - 1 - \kappa u^+ - \frac{(\kappa u^+)^2}{2} - \frac{(\kappa u^+)^3}{6} \right) + \frac{2\delta^+}{\pi} \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{\kappa u^+}{2\Pi}} \right) \quad (1)$$

境界層を表わす関数は、Spalding 則+後流関数の形となっている．層流のときは $B = 0$ であり，層流境界層と乱流境界層を同時に記述できる．各係数 κ, B, π, δ は実験データを元に，Newton 法により算出できる．実験値は内層から外層までのすべての測定データを使用した．

Figure 2 は式(1) を適用して得られた結果を実線で示している．比較のため，実験値(○) も示している．提案した普遍関数は乱流境界層全体を表現できており，また実験データをよく再現できている．

Table 1 は提案した普遍関数で得られた摩擦係数と White の経験式を比較した結果である．提案した関数により，良好に C_f 値を推算できている．

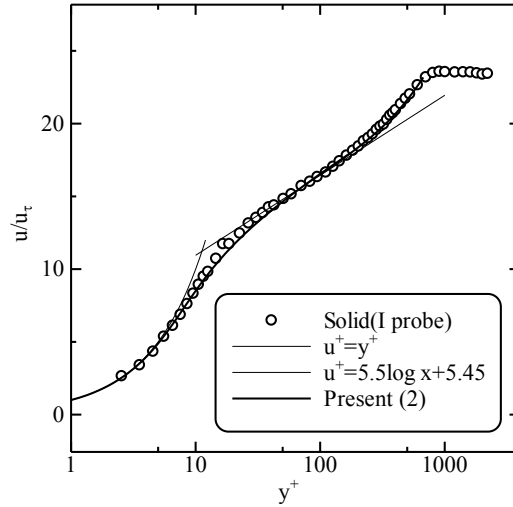


Fig.2 Logarithmic velocity profile (Eq. (1)).

Table. 1 Comparison of skin friction coefficient.

	$C_f \times 10^3$	Error (%)
White's formula	4.175	—
Present (1)	4.178	0.072

3.3.3. 弾性体による空気抵抗低減効果に関する検討

(1) 目標・計画

本研究の目標は、弾性体を用いた空気抵抗低減法を提案することである。2013年度は弾性体に作用する空気力計測を行い、空気力特性を調べる。複数の計測法で空気力測定を行い、抵抗低減効果の確認を行う。2014年度以降は材料特性と空気力低減効果の関係を調べ、気流条件により効率的に抵抗低減効果が得られる材料特性の提案を目指す。

(2) 意義・国際社会との比較

流体力学において摩擦抵抗低減は主要な研究課題の一つである。リブレット、マイクロバブル、粘弾性をこれまで様々な摩擦抵抗低減法が提案されており、その効果が研究されている。本研究は、弾性体を用いた摩擦抵抗低減法の研究に着目している。水棲生物の中には、表皮の柔らかい生き物が存在し、皮膚の表面近傍に発生する乱流渦構造を弱めることで、摩擦抵抗が低減して高速で遊泳できるとされるものがある。イルカはその代表例とされている。欧州を中心に研究されているが、その殆どが理論的研究であり、実験的研究は数少ない。本研究では、弾性体に作用する空気力測定を行い、金属やアクリル材のように硬い材料に作用する空気力との比較を行う。また、弾性体の材料特性に対する空気力特性を調べ、抵抗低減デバイスとしての可能性を検討する。

(3) 研究内容

本研究では、イルカの柔らかい表皮に着目して弾性皮膜による抵抗低減効果に関する研究を行う。弾性体の材料特性と弾性体に作用する空気力抵抗特性を調べ、航空機などに適用可能な抵抗低減法を提案する。

(4) 平成 25 年度進捗状況

実験は図1のような大気吸込み式風洞を用いて行った。風路断面積は $0.2 \times 0.2 \text{m}^2$ である。実験模型の上流と下流の速度分布を測定するために、ピトー管を2本同時に設置している。風洞装置には4基の送風ファンが取り付けられており、風速はインバータで調節を行うことができる。

実験模型は直径30mm、長さ200mmのアクリル円柱とシリコンゴム丸棒（デュロメータ硬さ50, 60, 70）を使用した。上流部と下流部の圧力分布はデジタルマノメータを用いて測定した。本実験では圧力差が最大となるように回転数50Hzに固定した。このときのレイノルズ数は13000である。上流部は側壁から20, 50, 100, 150, 180mmの位置で圧力計測を行い、その平均値を測定値とした。実験模型後流部は側壁から20, 40, 60, 80, 100mmの位置で圧力計測を行った。

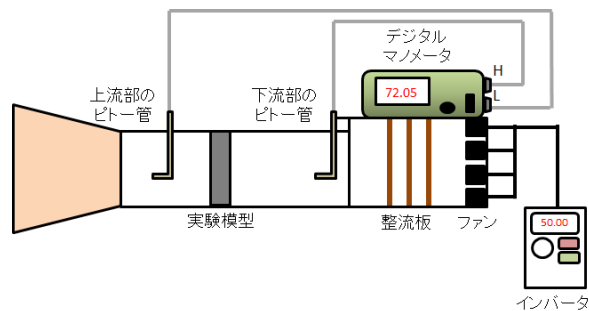


図1 風洞試験装置

空気抵抗の測定はジョーンズの方法を用いた。その原理は、運動量保存則に基づいており、上流と下流の圧力差から空気抵抗を測定できる。風洞実験では、実験模型の上流と下流でピトー管を用いて圧力差の空間分布を測定して、以下の式を数値積分することで抵抗係数を測定する。

$$C_D = 2 \int_{-h}^h \sqrt{\frac{\rho_{0T} - \rho_T}{\rho_{0\infty} - \rho_{\infty}}} \left(1 - \sqrt{\frac{\rho_{0T} - \rho_T}{\rho_{0\infty} - \rho_{\infty}}} \right) d \left(\frac{y_T}{L} \right) \quad (1)$$

圧力 P に添え字 0 が付いたものは全圧，ないものは静圧を意味しており， ∞ は上流， T は下流を意味する。

図2は風路内における単位面積当たりの空気抵抗分布である。円柱の背後 (100mm) は流体の運動量が最も減少するため、空気抵抗が最大となり、測定位置が風洞側壁に近づくにつれて空気抵抗は小さくなる。また、シリコーンゴムの硬度が低下するにつれて、円柱後流部分の流体抵抗が次第に減少している。

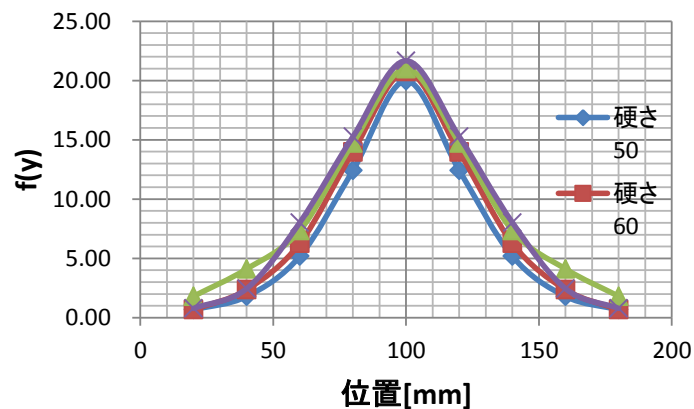


図2 円柱後流の抗力分布

表1は材質ごとの抵抗係数を示している。風洞壁面に摩擦抵抗が作用するため、模型挿入前の圧力分布から壁面摩擦力を測定して、実験値との差を取り補正している。シリコーンゴムの硬度が増すにつれて空気抵抗が減少しており、抵抗低減率(D.R.)は最大 22.6%となった。

表 1 材質と抵抗係数の違い

材質	アクリル	硬度 50	硬度 60	硬度 70
C_D	1.278	0.989	1.233	1.303
D.R.(%)	—	22.6	3.5	-2.0

ピトー管計測以外の方法でも，抵抗低減効果が確実に生じていることを確認するために，新たに実験装置として回流式低速風洞装置を製作し，熱線流速計による計測システムを製作した（図 3）．試験装置内で，ピトー管と熱線流速計による同時計測が可能な計測システムである．測定位置は，トラバース装置で移動できるようにしている．現在，本試験装置による実験を行っており，抵抗低減効果を確認中である．

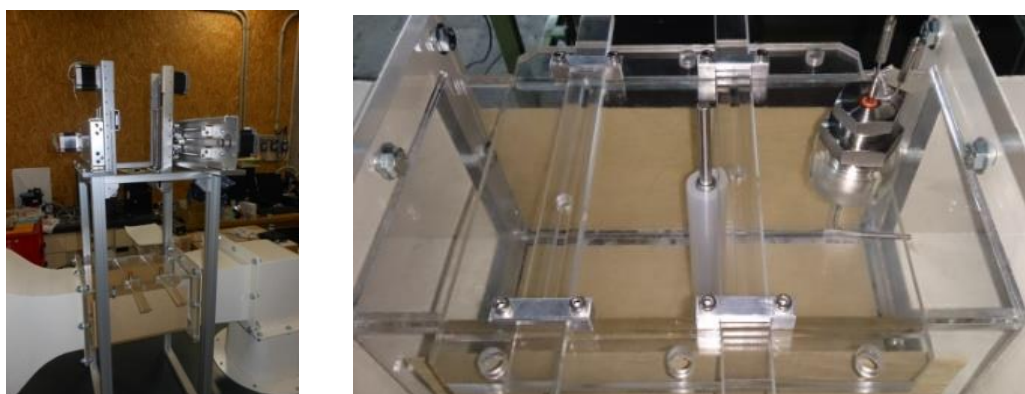


図 3 弾性体の空力特性試験装置（左：移動装置，右：円柱模型（中央））

3.4. 精度・妥当性検証グループ

本グループでは、シミュレーションと実験の精度・妥当性を検証する技術および精度・妥当性を向上させるための技術の研究を行っている。シミュレーションも実験も誤差を含んでおり、精度の検証および改良は重要なテーマである。具体的には、(1) 効率的で精度のよい解析技術の開発、(2) 実験とシミュレーションの融合、(3) 材料データベースの開発、(3) 精度の改良技術の開発、などを目標に研究を行っている。研究対象としては、段ボールおよびフラクタル構造の効率的かつ高精度な解析のための基礎的研究を行った。また、段ボールを対象にして実験とシミュレーションの融合のための予備的实验も開始した。

3.4.1. 段ボールにおける構造解析手法の開発と精度の検証

(1) 目標・計画

段ボールはその特性が製造環境、使用環境などに大きく左右される為、主だった解析手法が確立されていない。そこでまず初期設計に活用できるレベルの構造解析手法の確立を目指す。その後、解析精度を高め、より活用出来る手法に洗練していく予定である。

(2) 意義・国際社会との比較

(1) でも述べたように段ボールに関しては主だった解析手法が確立、公開がされていない。また100%リサイクル可能な段ボールを使用する技術手法であることから環境面から考えても地球環境保全に貢献できるものとする。

(3) 研究内容

等価モデルの構築のため、ANSYS 用に開発されたマルチスケール解析ソフト MultiScale.sim を用いて段ボールの均質化解析等の解析を行っている。また、LS-DYNA を用いて段ボール緩衝材の落下衝撃シミュレーションを行う。平行して段ボールの特性実験の装置を開発し、シミュレーションの精度を実験に近づけることを行う。また、段ボールの実落下試験を行い、実落下試験と落下衝撃シミュレーションの結果を比較し、シミュレーションと実験の精度・妥当性検証を行い、改良するための技術開発を行う。

(4) 平成 25 年度進捗状況

ANSYS 用に開発されたマルチスケール解析ソフト MultiScale.sim を用いて段ボール解析を行った。当初段ボールの検討素材数は 50 以上と多めを検討していたが、全体の工程を考慮し、1 素材 (BF・K180/scp120/K180) をベースに集中的に検討していくこととした。

下記に現在までのシミュレーション結果等の画像を示す。図 1 は段ボールの一部を切り出したものをモデル化したものである。これから図 2 のような等価モデルを生成し、等価解析を行っている。

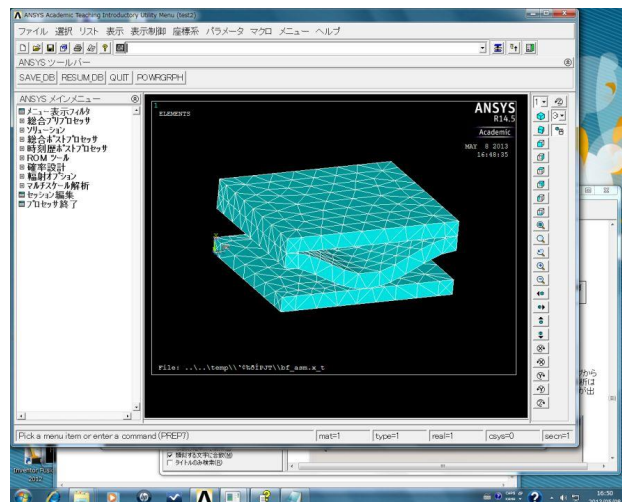


図 1 段ボール詳細モデル (MultiScale.sim)

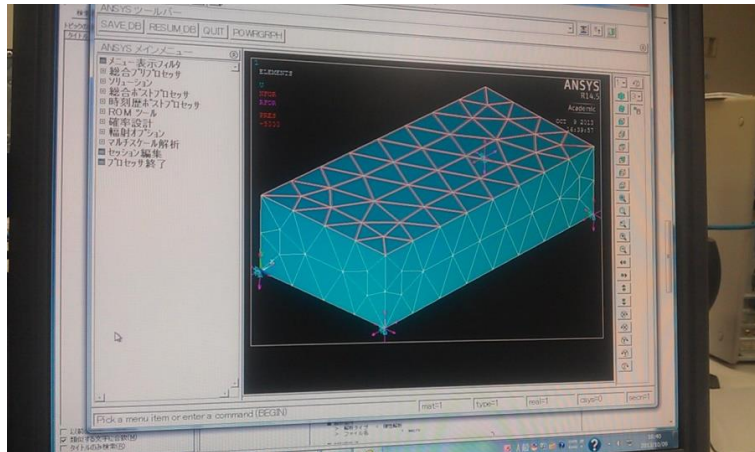


図 2 段ボール等価モデル (MultiScale.sim)

また、段ボールで重要な段ボールの衝撃シミュレーションも開始した。図 3 は LS-DYNA を使って行った解析結果である。

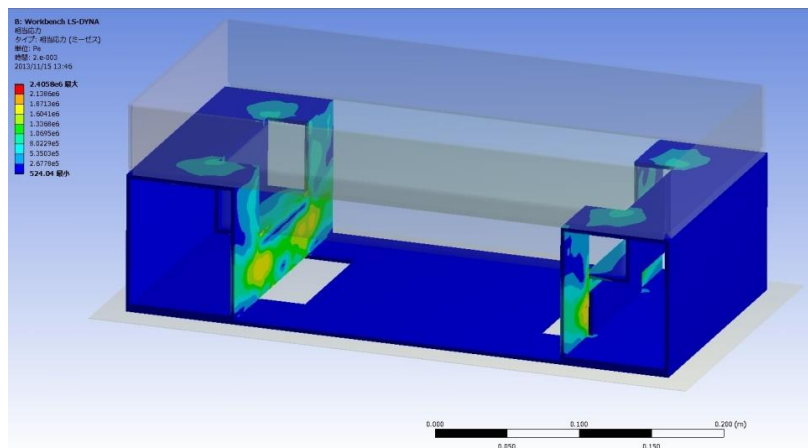


図 3 LS-DYNA 解析結果画面

図 3 では、ライナー、中芯に仮の材料特性値を与え、実際の梱包を想定した解析を行った。実際はほぼ動かないであろう部位が応力による反力で跳ね上がり、本来力が掛ると思われる部位に応力が出ないという結果が生じた。これは材料特性値の問題ではなく、使用した緩衝材の解析モデルに問題があったと考える。そこでモデルの作り込みをさらにする必要が明らかになった。

段ボールの力学的特性はこれまで十分な研究がなされていない。そこで、図 4 に示すような試験装置を開発した。



図4 段ボール試験装置

これを使って行った予備実験の結果が図5である。

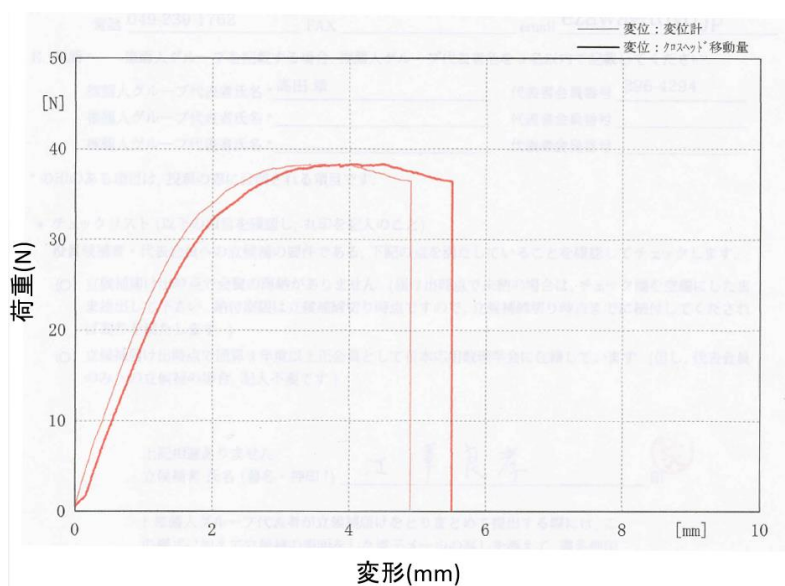


図5 段ボール変形試験の結果

本実験は変形指定（5mm/min）の条件で行ったものである．太線はクロスヘッドの移動量，細線は変位計の値である．本実験から段ボールは非線形の挙動を示すことがわかった．したがって高精度なシミュレーションのためにはこの非線形挙動を正確にモデル化することが要求される．今後は段ボールの含水率も考慮にいれた実験を行い，シミュレーションのモデル化の精度と妥当性の検証を行う予定でいる．さらに，段ボールの材料特性を調査する為，国内外から材料サンプルを取り寄せ，本実験装置にて試験を行う．その結果から各試験片の材料特性値を求める予定である．

3.4.2. 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式開発

(1) 目標・計画

数値シミュレーションのために基本的な物性値は必須のものであるが、材料の物性値を収めたデータベースにおけるデータ表現は統一されておらず、多くの材料データベースがインターネット上に存在する現在でも、必要なデータは事実上手作業で値を入力する必要がある。本研究では、材料データの標準データ交換形式を開発し、数値シミュレーションのシステムと物性データベースの連携を行うことを目的とする。

(2) 意義・国際社会との比較

材料物性に関するデータベースは各所で開発されているが、統一されたフォーマットは無く、データを交換するための標準を作成する試みは NIST などによって行われてきたが現在のところ定まった標準がない。データ交換のためのフォーマットが統一されることにより、分散したデータベースの統合利用に加え、数値計算システムなどからの利用も容易になる。

2012年には、NSFの資金によりアメリカでマテリアルズ・ゲノム・イニシアティブが立ち上がり、実験・数値計算などから得られるデータを活用して材料設計の効率化を図るためのマテリアルズ・インフォマティクス研究開発が本格的になった。これを受けて、我が国でも2013年に入り、JSTがマテリアルズ・インフォマティクスのワークショップを開催するなどの動きがあった。マテリアルズ・インフォマティクスでは多くの情報資源から得られた材料情報を共有する必要があるため、当センターにおいて実施しているような材料データの共有フォーマットやメタデータの辞書についても課題に挙っており、米国では本格的に開発が始まっている。

また、欧州標準規格委員会では、製造業において材料の試験データを電子的に共有するための規格策定に継続的に取り組んでおり、2012年から2014年にかけてワークショップ、WS/SERES (Standards for Electronic Reporting in the Engineering Sector)を開催している。マテリアルズ・インフォマティクスが新材料の開発を目的とするのに対し、CENのワークショップは、エンジニアリング材料を対象とするものであり、ISO6892のTechnical Annexとしての採択を目指している。

研究データ全般の電子的な交換に関しては、2013年、NIST、EUの協同により、NSFが資金援助したRDA (Research Data Alliance)が活動を開始した。現在我が国からは地球科学情報を扱うWDSのグループが参加しているだけである。材料についてはまだワーキンググループが設置されていないが、元NISTのJohn Rumble、EU JRCのTim Austinらとともに材料に関するワーキンググループ設置について検討している。

芦野らのグループは、2006-2007年度、NEDO知的基盤創成・利用促進開発事業の採択を得て、材料に関する基本的な辞書である材料オントロジーの開発を行い、先駆的な開発を行ったが、その後、拡張を本格的に進めることは困難な状況となった。また、2011-2013年度科研費基盤(C)の採択により、産総研などと材料に関する数学的知識のデータベース化

についての研究開発を進めているが、上述した欧米のプロジェクトと比べて格段に規模が小さい。我が国では産業技術総合研究所、物質・材料研究機構が世界的にも評価の高い材料データベースを提供しているが、標準的なデータフォーマット・データ交換技術の開発を情報学の専門家と共同して行うことはしておらず、欧米に対して遅れを取りつつある。

(3) 研究内容

2012 年度より継続して、産業技術総合研究所と協力して材料の標準計測データを Linked Open Data として活用することが出来るようにするための検討を行っている。2011-2013 年度は科研費科学研究費助成事業 基盤(C)「材料オントロジーの拡張と国際化による材料データ交換手法の確立」の採択を得て、CEN の材料データに関するワークショップ SERES に参画し、材料データ記述の標準化に関与するとともに、材料物性に関する経験式や理論から実験値に基づいて導き出された関係式について、OpenMath を用いたデータベース開発を引き続き行っている。

材料の物性値などは温度・圧力などによって変化するものであるが、実験で得られるのは特定条件下での値であり、これを補完するための経験式・理論式などが多く整備されており、本来、数値シミュレーションなどにはこれらに基づいて計算された物性値が用いられなくてはならない。現状、こうした数学的な知見はデータベース中で係数のリストなどとして保存されており、数式処理システムや、LOD で用いられるセマンティック・ウェブにおけるデータ表現との連携が困難である。

本研究では、一般化した数式を OpenMath Content Dictionary として整備し、これに実験データセットを適用して得られたパラメータの値を RDF の形式で表現することで他のシステムとの連携を可能とする方法を開発している。材料に関する数学的な知見の記述については、現在のところ上述のマテリアル・インフォマティクスや RDA でのトピックとして挙がっていないが、今後確実に必要とされる先駆的な研究と考えている。

(4) 平成 25 年度進捗状況

本年度は、CEN ワークショップに参加し、3 月のワークショップ最終ミーティングにおける CWA (CEN Workshop Agreement)作成へ向けて議論を行った。また、科研費科学研究費助成事業 基盤(C)「材料オントロジーの拡張と国際化による材料データ交換手法の確立」最終年度の取りまとめへ向けて、引き続き産総研熱物性データベースに収録された数式データベースの開発を行い、得られた問題点についてとりまとめと検証を行い、適宜熱物性学会などで報告している。6 月には、JST 研究開発戦略センターが開催した第二回のマテリアルズ・インフォマティクスワークショップに出席、材料データベース、材料データ交換のための試みと国際的な標準基盤整備の活動について述べた。

3.4.3. 確率的大域的最適化

(1) 目標・計画

我々の目標は実数値最適化の一般理論を整えることである．これまでにその土台となる各種定式化と数値実験環境の整備を行ってきた．今後もこの作業を継続する予定である．

(2) 意義・国際社会との比較

現在，最も包括的といえる枠組みは局所・非線形凸最適化理論までであり，これからはみ出た大域的最適化の理論といえるものは存在しない．この局所最適化を包括する大域的最適化理論を作ることは，最適化に関する統一的視点を得ることを意味する．またこの枠組みを基にした各種実験の結果から有意義な定量的・漸近的議論が可能となる．

(3) 研究内容

目的関数の単峰・多峰を問わず，関数中で最小となる値とその設計変数をそれぞれ最適値 y^{**} ，最適解 x^{**} と呼ぶことにし，また $(x^{**}, y^{**}) = D^{**}$ とする．

(甲) 要請：最適化とはユーザー I の損失関数 $\lambda_I = \lambda_I(y^{**})$ の期待値 $\mathbb{E}\lambda_I(y^{**})$ を最小化する行動である．

これによりライバル製品との競合状態や限界効用逓減の法則といった人間と現代社会の業が最適化プロセスに反映される．(甲) の計算には，ある時点までに集まった観測値 D と先験情報 I を基にした D^{**} のベイズ的な事後分布 $p(D^{**}|D, I)$ が必要となる．そしてこれを基に次の評価点を決定・観測のループを繰り返す．つまり，

(乙) 事実：最適化ループとはベイズ更新である．

このような最適化におけるベイズ更新を EGO フレームワークと呼ぶことにする．また，世界中の過去・現在・そして未来の最適化手法はこのフレームワークに属すると強引に解釈することは可能である．(甲) を達成するには明らかに D^{**} の良い推定が必要であり，

(丙) 事実：最適化アルゴリズムとは D^{**} を推定する EGO フレームワークである．

実は次が言える：

(丙') 定理：良い最適化アルゴリズムとは局所解 $\{D_j^*\}_j$ のモデルから D^{**} を推定する EGO フレームワークである．

「良い」とは (甲) の意味においてである．またここで局所解 \mathbf{x}_j^* とその値 y_j^* について $(\mathbf{x}_j^*, y_j^*) = D_j^*$ ($j = 1, \dots, n$) とした． n は目的関数中の局所解の数である．(丙') より $p(D^{**}|\{D_j^*\}, D, I)$ を求めるには局所解のモデル $p(D|\{D_j^*\}, I)$ が必要となる．あらゆる解は，(∇) 勾配が 0，(⊥) 不連続の端，(∂) 制約の上，(Υ) V 字形の底，のいずれかであり，これで局所解が定義される：

$$p(D|\{D_j^*\}, I) = \sum_{e \in \{\nabla, \perp, \partial, \Upsilon\}} p(D|\{D_j^*\}, e, I) p(e|\{D_j^*\}, I)$$

これらによるモデル混合・モデル比較によって (甲) を達成する．

(丙') の証明：仮想実験 e のたとえ話

(∇) を考慮すべきであることを示す．「(∇) を考慮する」を「費用が c の実験 e を実施した結果，観測値 ∇ を得る」と読み替える．ある行動 \mathbf{x}^{**} の結果として y^{**} が起きる状況において，実験家 I の損失 λ_I の期待値を最小化する問題を考える．実験を行わなかった場合 (e_0 とする) の最適な行動 $\hat{\mathbf{x}}_0$ を

$$\hat{\mathbf{x}}_0 = \operatorname{argmin}_{\mathbf{x}^{**}} \int \lambda_I(\mathbf{x}^{**}, e, y^{**}) p(y^{**}|e_0, \mathbf{x}^{**}, D) dy^{**}$$

とし，実験結果を考慮した最適な行動 $\hat{\mathbf{x}}_\nabla$ を

$$\hat{\mathbf{x}}_\nabla = \operatorname{argmin}_{\mathbf{x}^{**}} \iint \lambda_I(\mathbf{x}^{**}, e, \nabla, y^{**}) p(y^{**}|e, \nabla, \mathbf{x}^{**}, D) dy^{**} p(\nabla|e) d\nabla$$

とする．実験 e の価値 $v(e)$ を

$$v(e) = \int \{ \lambda_I(\hat{\mathbf{x}}_0, e_0, y^{**}) - \lambda_I(\hat{\mathbf{x}}_\nabla, e, \nabla, y^{**}) \} p(y^{**}|e, \nabla, \hat{\mathbf{x}}_\nabla, D) dy^{**}$$

とする．このとき実験 e は $\mathbb{E}v(e) \geq c$ となるときに行うべきで，それ以外は費用に見合わずやるべきではない．ところが仮想実験 e は単なる頭の体操でありコスト c はゼロである．よって $\mathbb{E}v(e) \geq 0$ を示せばよい． λ_I の形が

$$\lambda_I(\hat{\mathbf{x}}_0, e_0, y^{**}) = -A \ln p(y^{**}|e_0, \hat{\mathbf{x}}_0, D) + B(y^{**}), A > 0$$

$$\lambda_I(\hat{\mathbf{x}}_\nabla, e, \nabla, y^{**}) = -A \ln p(y^{**}|e, \nabla, \hat{\mathbf{x}}_\nabla, D) + B(y^{**}), A > 0$$

であるとする，

$$v(e) = A \int \ln \frac{p(y^{**}|e, \nabla, \hat{\mathbf{x}}_\nabla, D)}{p(y^{**}|e_0, \hat{\mathbf{x}}_0, D)} p(y^{**}|e, \nabla, \hat{\mathbf{x}}_\nabla, D) dy^{**}$$

となるがこれは KL 情報量である．よって常に非負なので $\mathbb{E}v(e) = \int v(e) p(\nabla|e) d\nabla \geq 0$ であり， $p(\nabla|e)$ によらず常に勾配を考慮すべきである．他の (⊥) (∂) (Υ) も同様...証明終．

これには状況証拠もある．たとえば遺伝的アルゴリズムや焼きなまし法の定義を読んでも局所解 $\{D_j^*\}$ を考慮するかのような言及は無い．一方これらのパフォーマンスは事前の各

種パラメータ設定次第で大きく変化することが知られる．そして良いパラメータ設定とは「早熟な収束」を避けるものであるとされるがこれは $D_j^*(\neq D^{**})$ への収束に他ならない．

以上からモデルの超パラメータベクトルを θ とすれば,

$$\iiint \lambda_l(D^{**})p(D^{**}|\{D_j^*\}, \theta, D, I)p(\{D_j^*\}|\theta, D, I)p(\theta|D, I)d\theta d\{D_j^*\}dy^{**}$$

を最小にする $\{x^{**}\}$ が次回の評価点集合となる．また「ユーザー I が局所最適化を行う」とは $n = 1$ と確信している状態 $p(n = 1|I) = 100\%$ であり, $D_1^* = D^{**}$ となる特別な場合と見なせる．

(4) 平成 25 年度進捗状況

モデル誤りが存在する状況におけるパフォーマンス低下の調査

「単峰だと思って最適化してみたら実は多峰だった」というシチュエーションはしばしば遭遇する．そこでこのような状況を再現しその実態を探った．具体的には, (丙) より多峰性の目的関数においては関数中の局所解の数 $n(\geq 2)$ を推定しながら $\{D_j^*\}_{j \in \{1, \dots, n\}}$ から D^{**} を推定しなくてはならないが, その代わりに先述の $p(n = 1|I) = 100\%$ としたアルゴリズムと, 比較用に既存のアルゴリズム Expected Improvement (EI)との2つを用いて, それぞれ目的関数 4000 ケースを最適化した．結果は EI の方が勝った．

遺伝的アルゴリズム(GA)のような大域的手法であっても, 悪いパラメータ設定 (e.g. 交叉率や突然変異率が小さすぎる) では先述のような早熟な収束によって局所解しか見つからない．しかしこれでも理論上は十分な反復回数後に大域的解にたどり着くが, このような場合はむしろ局所最適化をしたと言う方が現実的に即しており, このような場合を「狭義に大域的」な最適化をしたと呼ぶことにすれば, 比較実験における単峰を仮定したアルゴリズムは狭義に大域的であったといえる．

3.4.4. 複雑構造物の軽量化設計技術の開発

(1) 目標・計画

近年、複雑な形状をした大規模な建築物や構造物が多くなるに伴いそれらの健全性評価や安全性を考慮した設計は極めて重要である。実構造物の詳細なモデルを作成し大規模なメッシュ分割を用いて数値解析を行うことは非常に困難であり、実用的ではない。そこで大規模なメッシュ分割を用いることなく高精度かつ解析時間の高速化の手法を開発する。

(2) 意義・国際社会との比較

大規模で複雑な形状を解析する手法としてミクロ・マクロ解析など様々な既存の手法の研究がなされている。それらの既存の手法の多くの問題点は精度の向上や、解析時間の高速化、解の収束などが挙げられる。それらをより高度化するアルゴリズムを開発することは非常に重要である。また環境問題の一つにヒートアイランド現象対策として普及しつつある京都大学・人間環境学科、酒井敏教授らによって考案されたフラクタル日除けを解析対象として題材に挙げている。フラクタル日除けは砂漠など植物の育たない地域や大雪の降る地域など様々な環境で使うことが出来るがゆえ、環境問題にも貢献できると思われる。

(3) 研究内容

本研究では実構造モデルを近似モデルである要素（四面体要素）で近似して解析を行う。解析対象としてシェルピンスキー四面体を組み合わせて作成されたフラクタル日除けを題材に挙げている。近似モデルを作成するために実構造モデルから近似モデルの節点に適応するサンプル点より反力を求め、 $\{f\}=[k]\{u\}$ より直接、等価な剛性マトリックスを得る。この等価な剛性マトリックスより近似モデルを作成し近似モデルを組み合わせて全体構造のモデルに拡張することにより全体解析が非常に困難であるシェルピンスキー構造体を等価な要素に置き換えて全体構造の解析をすることで大規模な複雑構造物を、要素数、節点数を大幅に減少することができ、解析時間の高速化、計算コストの減少が期待できる。またこのアルゴリズムを繰り返すことにより効率の良い最適化も期待できる。

(4) 平成 25 年度進捗状況

等価モデルでは近似に起因する誤差は避けられないため、実構造モデルと等価モデルの両モデル間における解析誤差を確認し実用性を検証した。その結果、最大約 5 % 程度の誤差が生じていた。そこで等価モデル解析の精度をあげるために、剛性マトリックスの対角項を修正し高精度化を行った結果が図 6 である。図 6 は等価モデルの 1 点に単位荷重をかけてほかの自由度は拘束したときの解析結果を詳細モデルの結果と比較したものである。図から分かる様に、改良した結果（CorrectionTerm）は詳細モデルと等価モデルの解析結果は同じになった。なお、Symmetry と書いてある結果は剛性マトリックスが完全な対称

行列になるように $([K]+[K]^T)/2$ としてみた結果であるが効果はほとんどなかった. 高精度化にはほかにもいろいろ手法が考えられるので, 検討をさらに進める予定である.

この等価モデルを組み合わせ全体構造モデルに拡張し全体構造における解析を行いこのアルゴリズムを用いて最適化を行った.

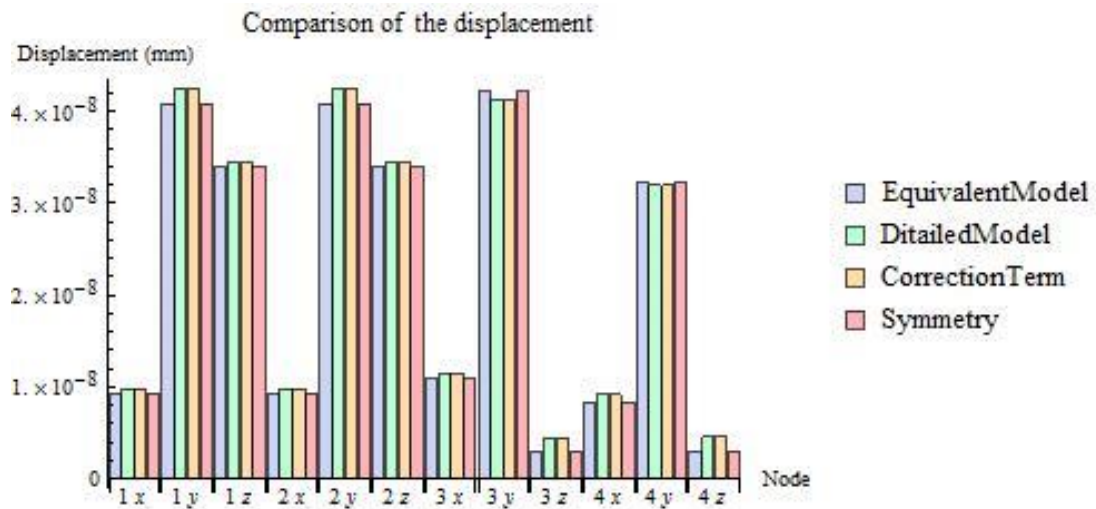


図 6 等価モデルの精度検証と改良

3.5. 可視化検証グループ

本プロジェクトでは、流体-構造連成解析の品質保証に特に重点を置いている。その中でも、

- ・解析結果を正しく理解し、評価すること
- ・実験結果等と公正な比較を行うこと

は重要な要素であると考えられる。そのためには、可視化は必須である。特に、連成解析は現象が複雑であり、限られた数値データのみでこれを評価することは困難である。実験における可視化技術やその応用は実験による検証の項目に譲り、ここでは、解析結果の可視化および、比較のための実験の可視化結果の表示を中心に研究を行う。解析は、当面簡単のため2次元および3次元でもそれほど3次元性が強くない問題を対象とするが、そうであっても特に流れ場は3次元であり、また今後のより一般的な問題に対応するためにも、3次元の可視化が本質である。そこで、ここでは連成解析において3次元データを如何に可視化するかを中心に研究を進める。1つは以下に述べるような立体視あるいはVR（バーチャルリアリティ）を用いた可視化であるが、これに限らず、3次元データの可視化方法を検討していく。

3.5.1. 3次元画像による定量的・定性的検証

(1) 目標・計画

本研究の目標は、流体構造連成問題について、数値解析の精度検証を支援するための、画像による定量評価、定性評価の手法やシステムを開発し、本プロジェクトで開発される連成解析手法の評価に供することである。特に、バーチャルリアリティ（VR）技術を利用した3次元可視化システムを中心に3次元画像による可視化評価を中心に研究を進める。

大きな計画としては、

平成24年度：

表示装置となるVR装置の導入を行い、ハードウェアの準備を行う。

平成25年度：

VR装置の上でソフトウェアを開発し、PCクラスタと結合してこの上での解析結果の表示を行う。

平成26年度：

画像による検証に利用するための可視化システムをVR装置上で開発する。

平成27年度：

積極的に可視化による比較・検証を行う。特に、（立体）画像を用い、実験と解析の可視化画像を重ねたり、並べたりして効果的な比較・検証方法について検討する。

平成28年度：

研究をまとめ、その公開方法について検討する。

としている。これらにより、従来とは異なる、多彩な可視化により、直感的・効果的な比較・検証が可能となり、開発される連成解析手法をより多面的に評価できると考える。

(2) 意義・国際社会との比較

連成解析は、複数の物理が関連するため、その妥当性の評価は単一の物理に対する解析よりも難しい。ここでは、流体-構造連成を中心に研究を行っているが、流体・構造それぞれ単独で妥当性を示すことができて、それらを組み合わせただけで連成問題が正しく解けるということでは必ずしもない。2つの物理をやり取りするものがあり、それが正しく評価されているかが、重要であるが、実験的に測定できるもの、できないもの等あり、単純ではない。ここでは、可視化、特に3次元画像を利用することで、実験と解析を出来る限り直接的に比較することを考えており、流体-構造連成解析の精度検証・妥当性検証のテンプレートとなることを期待している。

国際的に見ると、連成解析は計算力学における重要な研究テーマの1つであるが、必ずしも検証については進んでおらず、信頼できるとされる過去の解析例と比較したり、パラメータスタディによって、実験で見られる現象と、解析で得られる現象の範囲が等しい（あるいは近い）といったことを示すにとどまっている場合がほとんどである。連成解析手法を評価する手法の1つとして3次元画像を用いる方法は、ほとんど例がなく、その成果は

重要なものとなるを考える。

(3) 研究内容

本研究の中心となる装置は、図1の2面没入型ディスプレイ装置である。大きさは正面のスクリーンが $2.8 \times 2.1\text{m}$ 、下のスクリーンが同じく $2.8 \times 2.1\text{m}$ でここに2台のプロジェクターにより、それぞれ 1400×1050 の解像度の画像を表示する。画像は時分割方式で立体映像を投影できるようになっており、液晶シャッター眼鏡によって立体映像を観察する。立体映像は3台のグラフィックスワークステーションで生成する。1台はマスタで、あとの2台が正面と下面の映像を担当する。これとは別に観察者や観察者が持つコントローラの位置を赤外線カメラで取得するシステムがあり、1台のトラッキングワークステーションで制御する。グラフィックスワークステーションのマスタはトラッキングワークステーションから逐次データを取得して観察者（やコントローラ）の位置を計算する。

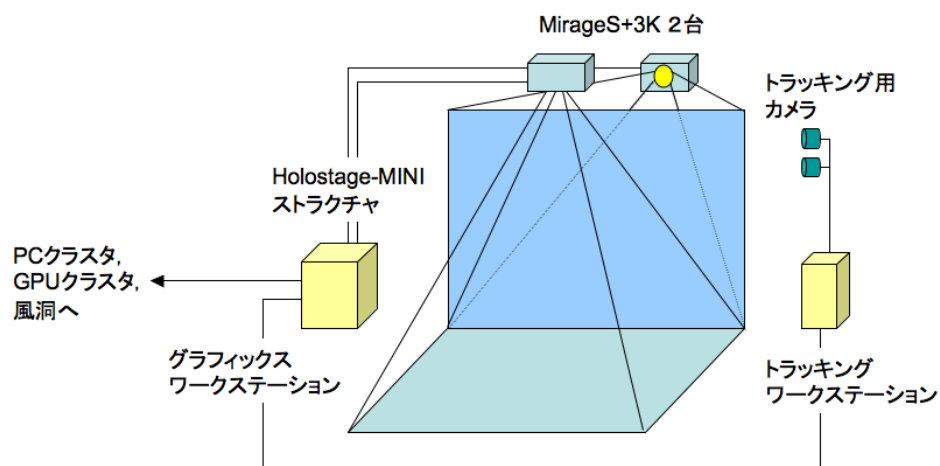


図1 システム構成図

このシステムに、流体-構造連成の3次元画像を表示する。表示する画像は大きく分けると、実験の画像と解析の画像の2種類である。これらを同時に、あるいは交互に表示することで直接的な比較を行う。

実験の画像については、物体の変位等、直接得られるものから、PIVで可視化した流れの速度分布やPSP（感圧塗料）で可視化した物体面上の圧力分布、画像解析により得られる応力分布等が考えられる。これらを得ることは、実験班の研究に委ねられるが、その3次元化や、本装置での表示にはデータの転送等も含めてさまざまな検討と技術的課題の克服が必要である。

解析結果については、単独の物理に基づく解析では多くの知識と経験があるものの、連成問題については、それぞれの物理に関する量を可視化表示するにとどまっており、まず

は何を可視化することで連成解析の精度や妥当性評価につながるかの検討が重要となる。そのため、まず、さまざまな物理量の 3 次元可視化を可能とするシステムを開発する。解析は大規模となることが前提なので、そのデータをどのように転送し、また可視化するかも課題となる。

次に、実験と解析の比較である。たとえば、視点・スケールを合わせて交互に表示する／重ねて表示する、などが考えられるが、それには時間的・空間的な位置合わせ等、技術的な課題が多くある。また、必ずしも同じ量を表示できる訳ではないので、何を見るか、比べるかも問題となる。また、実験については、取得した画像（動画）をそのまま見るのか、あるいはデータを抽出して、解析結果と同じように CG で表示するのかといったアプローチもありうる。これらについても時間をかけて検討し、システムを構築することで新しい可視化法・評価法につなげたい。

最終的には、システム化できるところはまとめたい。実験データも、標準的で精度の高いものが得られれば、標準問題として公開したいが、その際に 3 次元画像もその 1 つとできればよいと考えている。

(4) 平成 25 年度進捗状況

平成 25 年度の主な目的は可視化のためのソフトウェアの開発であった。本報を記している平成 25 年 12 月現在、すべてのソフトウェアの開発が終了してはいないが、以下、計画も含めて可視化システムの現状を述べる。

図 2 にシステムの全体構成（案）を示す。実験および数値解析の両者を同時にあるいは個別に表示し、比較・検証を行うことができるように考えている。AVS-MPE および 3dsmax, VR4MAX は既に導入されたソフトウェアであり、これらを有機的につなぐこと、データの表示や制御を可視化や CG の専門家でなくともできるようにすることが目的である。

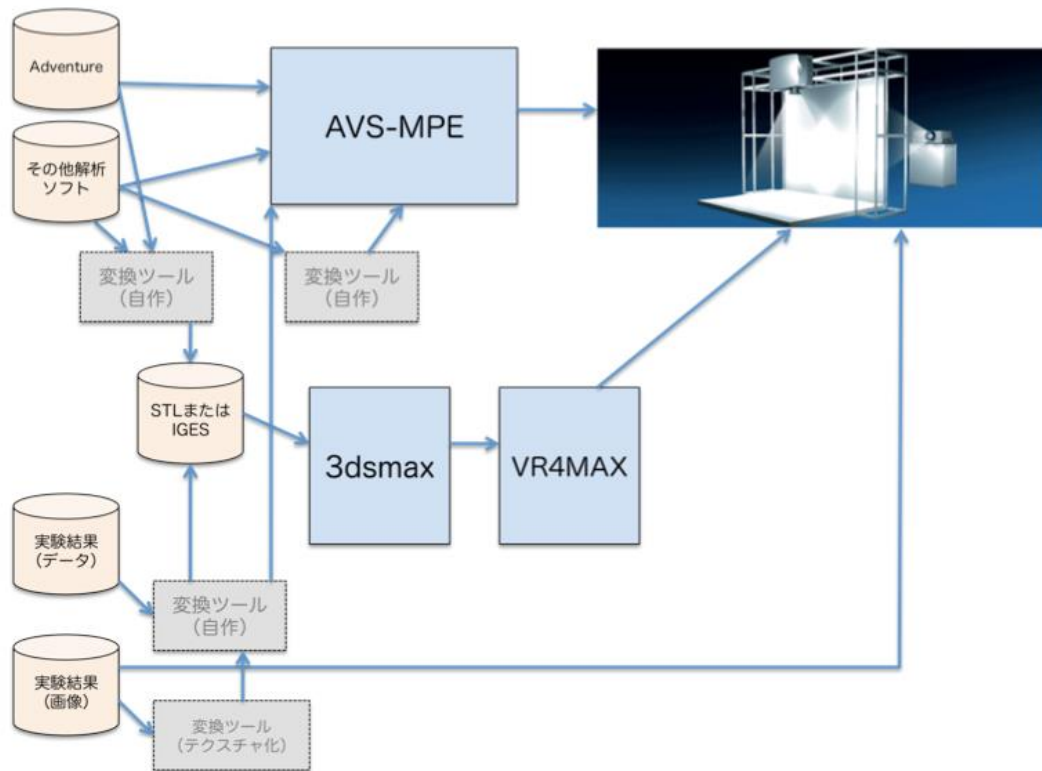


図2 可視化システム全体構成図（案）

図2から分かるように、数値解析結果は AVS-MPE を通して表示するパスがいくつか確立しているので、現在は実験結果を AVS-MPE に送るソフトウェアを準備している．そのイメージを図3に示す．

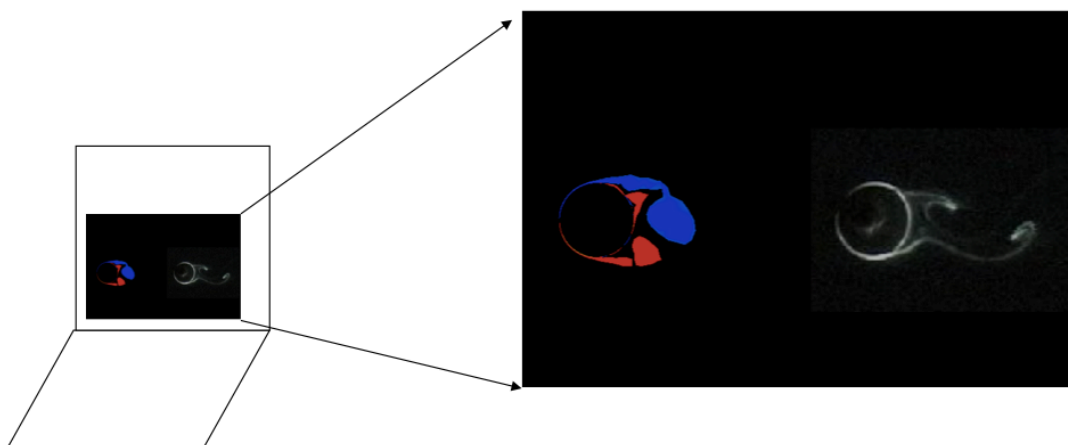


図3 実験と可視化の同時表示のイメージ

解析は2次元であれ、3次元であれ問題なくVR空間で表示できる。実験については、多くの場合、2次元計測（面計測）が多いので、まず、データの面を指定し、そこに取得した画像（PIV等）をマッピングする。解析と実験との位置や向き、大きさを合わせることで、動画であれば時間を揃えることが必要となるのが、動画についてはそのための前処理を設計中で、年度内には完成する予定である。

予定通りに進まなかったこととしては、装置を都合で平成25年5月、川越キャンパス6号館に移設した。近くにPCクラスタも移設されたが、まだネットワーク環境は完全には整備されておらず、PCクラスタとVR装置とはネットワークで直結されてはいない。これは今年度末から来年度早々には実現させる予定である。

3.6. 横断的研究会

前述の5つの研究テーマは、本プロジェクトの柱となるものであるが、それぞれを横断的につなぐ研究や、それぞれの成果から派生した研究もまた重要であると考え。そこで、計算力学研究センターでは、そのときどきで研究会を立ち上げ、5つの柱とは別のグループで研究を進めようと考えている。研究テーマごとの活動と重複する部分もあるが、ここでは今年度に活動のあった研究会の概要をあらためて記す。

3.6.1. 連成標準問題検討会

連成解析の精度を高め、実用的な手法として育てるのには標準問題が必要であろうと考える。流体解析・構造解析などではそれぞれ手法を開発するとまず解くべき問題があり、それによって手法の精度や有効性等が確認できる。残念ながら連成問題にはそのような標準問題が少ない。そこで、ここでは流体—構造連成に関し、当センターで実験を行い、詳細なデータを取って標準問題として提案できるものを検討する。最終的には、実験・解析を行い、比較するとともに、それらを標準問題として公開する。平成25年度は、具体的なターゲットとして一様流れ中に置かれた一端固定の円柱の連成挙動に着目し、数値解析が比較的容易なレイノルズ数10,000程度になるように流速や円柱の大きさを決めた後、連成解析として適当な規模の変形量になるように材料定数を決定し、標準問題の最初の一つとして提案した。

3.6.2. 計算力学と（材料）データベースの会

計算力学に現在用いられている物性データの信頼性の確認と、今後必要とされるデータの所在についての検討が必要と考えられる。また、数値計算とデータベースのより緊密な連携のためには、データアクセスのためのAPIについて検討する必要がある。現在、欧州標準規格委員会のワークショップにおいて、機械試験の試験データを電子的に記述するための標準についての検討が行われている。三次元CADデータなども含む製造物データ管理のための規格であるISO10303 (STEP)との連携も視野に入っており、計算力学による設計と個別の材料の試験データを共通のデータフォーマットを用いて連携させるための規格として今後検討の必要がある。

3.6.3. 楽器音響と流体構造連成研究会

音楽や楽器に関する研究は、他の研究領域に比べまだまだ未知なことが多いわりには研究が進んでいない。その理由には、芸術至上主義ともいわれるように音楽になにか科学的なものや現実的な効果を測ることに、ある種のアレルギーが世の中にはまだあることが挙げられ、また研究対象として理解されなかったり予算が組まれなかったりするからである。しかし、本研究会では、音響工学や計算工学の立場から科学的に楽器の音響特性や構造、音色、その先には芸術の科学的解明を目的とする。そもそも音楽は楽器本体から発せられ

る空気振動現象を脳の聴覚野で知覚するプロセスであり，楽器の振動と周辺流体の連成は計算工学としても困難であるが興味深い対象である．現在は，弦楽器の音響特性のスペクトル解析やハイスピードカメラを用いた弦の振動の可視化，操作性やヴィブラートのような演奏技術などの調査を行っている．

3.6.4. タイヤ研究会

もともとは，米国科学基金（NSF）により 2011 年度に設立された産学協同研究センターである，タイヤ研究センターとの連携を模索する中で，当センターでもそれとは別にタイヤに関する研究をすべきであろうとの結論に達し，平成 25 年 12 月に 1 回目の研究打ち合わせを行った．目的は，タイヤ（やその周辺）解析に当センターの大規模解析技術，連成解析技術を適用し，タイヤに関連するものづくりに資することであるが，今回のプロジェクトのメインテーマである，妥当性検証はここでも重要であることから，解析のみならず，実験も同時に行うことを考えている．そのため，当センター／プロジェクトのメンバーにこだわらず，本学理工学部から協力いただける研究者を募った．本稿執筆時点では，まだ 1 回目の打ち合わせが終わったばかりで具体的な研究は始まっていないが，年度内に第 2 回の会合を持ち，少し具体的な研究テーマ設定を行う予定である．

4. 共同研究

4.1. JST CREST プロジェクト

H23 年 10 月より JST CREST 研究領域「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」において、研究課題名「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」が採択され、研究拠点を当センターに置き、研究を実施している。

4.1.1. 研究実施体制

ポストペタコンなど次々世代の並列計算機アーキテクチャにおいて、大規模な数値計算データ処理を必要とする実アプリケーション分野が高い演算効率を得るためには、マイクロプロセッサやメモリの階層構造を考慮したプログラミングモデルが必要である。特にそれは、入力データ生成や可視化などのプレ・ポスト処理から数値解析手法などのソルバー処理に至るまで、統一的に提供される必要がある。つまり、一般的な実アプリケーションはプレ／ソルバー／ポスト処理など目的に応じたモジュール群で構成されていることが多いが、ポストペタコンの利用が想定される大規模シミュレーションでは、全ての処理がポストペタコン上で行われ、モジュール間のデータ受け渡しを最小限にするようなプログラミングモデル、並びにそれに基づく大規模数値計算データ処理システムの基盤技術が不可欠と言える。

ここで、ポストペタコンのアーキテクチャとしては、SIMD 拡張命令、GPGPU, FPGA など何らかのアクセラレータを搭載したヘテロジニアスメニーコアで構成される計算ノードをネットワーク接続した、分散メモリ型アーキテクチャになると予想され、計算ノード内はチップ上／ボード上問わずに異種の演算装置が NUMA 型で搭載されることを想定する必要がある。また、演算性能と通信性能の向上比を考慮すると、マイクロプロセッサにとって計算ノード間ネットワークというのは、現在で例えると WAN 並みに遅く感じるネットワークとなる可能性があり、ポストペタコンはそれらを数十万から数百万ノード規模で接続して構築されると予想される。さらに、ポストペタコン利用が想定されるシミュレーションにおいて生成されるデータのファイルサイズはペタバイトオーダーになるが、ハードディスクなどの外部記憶装置の記憶容量やアクセス性能の大幅な改善にはまだ時間を要すると考えられる。つまり、ポストペタコンを利活用できるアプリケーションは、ヘテロジニアスな分散メモリ並列かつ数百万計算ノード環境において高い並列効率と演算効率を示す必要があるが、その高いハードルを突破できたとしても、大規模な入出力データを効率的に処理できない限り、本当の意味での利活用は不可能である。この問題を解決するためには、並列ファイル入出力システムの効率化やデータ圧縮展開アルゴリズムの高速化などだけではなく、根本的なデータ量削減に関する解決策が求められる。

そこで本プロジェクトでは、ポストペタコン上における大規模数値計算データ処理システムに関する基盤技術として、申請者らがこれまで主に数値解析手法向けに研究開発してきた階層型領域分割法の技術を応用した、階層型領域分割法による大規模数値計算データ処理システムの研究開発を目指す。この基盤技術にはアプリケーション分野に依存する箇所があることが予想されるため、本提案では連続体力学向けアプリケーションを対象としながら、具体的には以下の基盤技術開発をターゲットとする。

- A) マルチレベル領域分割法による連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列化ライブラリ
- B) マルチレベル領域分割法による多階層計算格子データの生成、操作および I/O ライブラリ
- C) 多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成と言語拡張機能

これらの技術に基づいて開発されるアプリケーションでは、核となるモジュール間のデータ受け渡し量を従来のものより 3 桁削減することが可能となり、ピーク演算性能比 20% 以上のシステム開発の実現を目指す。

4.1.2. 研究実施内容

(1) 「東洋大学」グループ

- ① 研究代表者：塩谷 隆二（東洋大学総合情報学部，教授）
- ② 研究項目
 - ・ 階層分割型数値計算ライブラリの基礎研究並びに設計とその応用

(2) 「名古屋大学」グループ

- ① 主たる共同研究者：荻野 正雄（名古屋大学情報基盤センター，准教授）
- ② 研究項目
 - ・ 階層型ソルバーライブラリの基礎研究とその応用

(3) 「東京大学」グループ

- ① 主たる共同研究者：越塚 誠一（東京大学大学院工学系研究科，教授）
- ② 研究項目
 - ・ 階層分割型入出力ライブラリ並びに連続体力学向け問題領域専用言語の基礎研究とその応用

5. 国際協力

5.1. TU-LHU student workshop (龍華科技大学 / 台湾)

日時：2013 年 2 月 25 日（金）

場所：龍華科技大学

主催：龍華科技大学

2013 年 2 月 25 日に台湾の龍華科技大学で行われた，2013 Japan-Taiwan (Toyo University and Lunghwa University) Joint Student Workshop on Nano and Computational Mechanics へ東洋大学計算力学研究センターのポスドク，大学院の学生の計 8 名が参加・講演を行った．

東洋大学側の講演は主に計算力学を用いた応用研究についての発表がなされ，龍華科技大学側は主にナノテクノロジーを応用した研究内容で 5 件の発表がされた．

東洋大学と龍華科技大学とは，研究分野が異なる部分もあったものの，各 20 分の発表に対して 5 分間の質疑応答の為の時間には多くの議論がされ，双方の大学の学生にとって，今後の研究に多くの影響を得ることが出来たと考えられる．

次回は，9 月に日本での開催を予定しており，その際にも数多くの有意義な意見交換ができることが期待できる．

5.2. LHU-SKKU-TU 若手ワークショップ（白山 / 日本）

日時：2013 年 9 月 6 日（金）

場所：東洋大学白山キャンパス 2 号館 スカイホール

主催：東洋大学計算力学研究センター

2013 年 9 月 6 日(金)，計算力学研究センター主催で，本校との提携校である，台湾の龍華大学，韓国の成均館大学を招いて，白山キャンパス 2 号館のスカイホールにて，**The 1st LHU-SKKU-TU Joint Student Workshop on Nano and Computational Mechanics** と題した 3 大学合同学生ワークショップを開催した．

当日のプログラムは 3 構成で行われ，第 1 部では，韓国，日本の教授らによる特別講演が 3 件行われた．第 2 部，第 3 部では，台湾，韓国の大学院生により，それぞれ 4 件の講演が行われ，日本からは大学院生，研究助手らにより 7 件の講演が行われた．短い講演時間ではあったが，それぞれの講演に対する質疑応答が数多くなされ非常に有意義なワークショップとなった．

本 3 大学合同学生ワークショップは，今後，年に 1 度，各大学持ち回りで開催されることが決まっており，研究の観点のみならず，国際交流の観点からも今後の発展が期待できる．



ワークショップの様子

5.3. SSME 2013 (墾丁 / 台湾)

日時：2013 年 11 月 10 日（金）～12 日（日）

場所：東洋大学白山キャンパス 2 号館 スカイホール

主催：龍華工科大学（台湾）

2013 年 11 月 10 日から 12 日にわたって、台湾の墾丁、Haward Beach Resort にて、台湾龍華工科大学の主催で行われた **The 2nd Student Seminar on Mechanical Engineering (SSME2013)** に本センターより博士前期課程の学生 2 名が参加・発表した。

SSME2013 には、台湾、日本のみならず、中国、韓国から 4 カ国 7 大学の学生が参加し 26 の講演が行われた。各講演の後に行われた質疑応答の際も、各々の持ち時間を超過する程、多くの議論がなされ、各自の研究の今後の更なる発展に繋がる非常に有意義なワークショップとなった。



会場の様子

6. 情報発信

6.1. 第 18 回計算力学フォーラム (JSME-CMD / 佐賀)

2013 年 11 月 2 日から 4 日の 3 日間に亘り佐賀大学で行われた CMD2013 にて、第 18 回計算力学フォーラムを行った。

第 18 回計算力学フォーラムとして、佐賀県・佐賀大学で開催された JSME 26rd Computational Mechanics Division Conference 2013 (CMD2013)内で、計算力学フォーラムとして、オーガナイズドセッション「大規模並列・連成解析と関連話題」を開催した。本フォーラムは 3 つのセッションから構成され以下の 12 件の講演が行われた。

- ・ Diagonal-scaled BDD 法を用いた複合材料の並列有限要素解析
- ・ 多数の MPC を含む大規模構造解析への BDD 法の適用
- ・ Isogeometric 解析における階層型接触探索
- ・ 振動現象の連成解析及び自己組織化マップによるその分類
- ・ 大規模複合構造物のマルチスケール解析
- ・ 開発中の ADVENTURE 固有値解析モジュールによる並列解析
- ・ 機構-非線形有限要素法の連成解析を用いたサスペンション挙動シミュレーションの高度化に関する一考察
- ・ 連続体力学向け DSL の開発
- ・ 領域分割法ソルバーの性能ベンチマーク
- ・ 3 次元有限要素解析コードのための並列領域分割法ライブラリに関する研究
- ・ 複素数を用いる並列有限要素法解析ソルバの実装と高速化
- ・ 超大規模解析のための高精細可視化ライブラリの並列化
- ・ 大規模解析のためのレイキャスティング可視化技術の検討

これらの講演と議論を通し、大規模計算並びに連例解析手法を中心とした現状と今後の課題に関する議論が行われた。

7. 教育活動

センター研究員らの指導のもとで，東洋大学総合情報学部卒論学生，工学研究科大学院学生がセンターにおいて研究活動を行っている．

7.1. 教育活動風景

田村研究室

田村研究室では，学部生 6 名の卒業研究および大学院生 2 名の修士研究を行っている．

週 1 回のセミナーでは，大学院生 1 名，学部生 2,3 名が研究発表を行う．またそれ以外の学生は 1 週間の進捗を報告する．また，学部生は週 1 回の輪読で専門書を読み，大学院生は週 1 回の輪読で学術論文紹介を行っている．図 1 はセミナーの様子である．



図 1. セミナー風景

江澤研究室

江澤研究室では、学部学生 12 名卒業研究および大学院生 4 名の修士研究および博士研究を行っている。学部学生は毎週 1 回セミナーを開き、勉強会や進捗状況報告をしてもらっている。大学院生は、月に数回各自の研究の進捗状況報告および勉強会を実施している。学部学生はまず汎用構造解析プログラム ANSYS を習得してもらい、つぎに 3 次元 CAD の勉強をもらっている。大学院生は独自に開発したプログラム等を使って研究を行っている。図 2 はセミナーでの勉強会風景である。図 3 は ANSYS を使って解析をしている様子である。



図 2. セミナー風景



図 3. 卒業論文の研究風景

塩谷研究室

塩谷研究室では、学部学生 12 名の卒業研究を行っている。毎週 1 回開催されるセミナーでは学生が研究進捗状況についての発表などを行っている。図 4 は携帯端末解析の可視化システムの様子であり、図 5 は研究室の様子である。

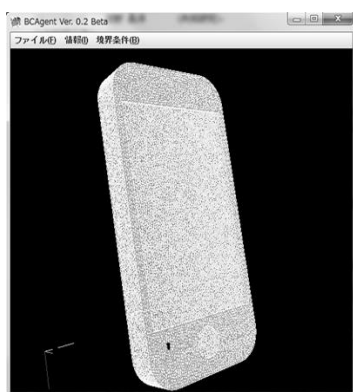


図 4. 携帯端末上での可視化の様子



図 5. 研究室の様子

中林研究室

中林研究室では、学部学生 15 名とポスドク 1 名が研究活動を行っている。毎週 1 回開催されるセミナーでは各回とも 5 名が研究発表を行い研究の進捗状況の報告や内容について議論する。また、卒業論文提出締切が近くなると全員が週 1 回の進捗状況を行うことになっている。卒論発表会は研究内容の近い塩谷研究室や田村研究室と合同で行っている。図 6 は研究室の様子であり、図 7 は研究発表会の様子である。



図 6. 研究室の様子



図 7. 研究発表会

7.2. 卒業論文・修士論文の紹介

田村研究室

(1) 画像に基づく流体解析手法の開発

複雑な実形状まわりの流れを解析するには、物体形状に関する詳細な 3 次元データが必要であり、またそれを元に計算格子（要素）を生成するには専用のツールやプログラムをもってしてもかなりの時間と手間を要することが知られている。そこでここではそのような詳細なデータがない場合でも流体解析ができるようにするための手法として、画像をベースとしてその流れ場を解く方法を研究している。

(2) 医療分野での流体解析技術の利用

コンピュータによる流体解析、いわゆる CFD (Computational Fluid Dynamics) の進歩は目覚ましいが、まだまだ実用分野は限られている。ここでは、CFD の適用範囲を広げることを目的として、特に医療分野への応用について研究を行っている。具体的には、超音波による治療について解析を行っている。

(3) 混相流の解析手法の開発

気液 2 相流など混相流の数値解析にはいまだ様々な問題がある。ここでは、1 個の気泡が変形あるいは崩壊する問題や、多数の小気泡が液体中に存在する気泡流など問題ごとに手法を開発し、解析を行っている。

江澤研究室

(1) 震災時における機の最適化

機に震災時に荷重が掛かった場合の強度を評価し、強度を高くすることを検討した。

(2) 位相最適化を用いたローラーチェーンのプレート形状最適化

自転車のローラーチェーンのプレートの形状最適化を行った。

(3) ゲームプログラミングの最適化

オセロゲームの強さを高めるために、各種パラメータの最適化を行った。

(4) 圧力容器の効率的解析技術と最適化技術の開発

燃料電池車の圧力容器を題材として、最適化の効率化技術の開発を行った。まず、遺伝的アルゴリズムの適用を行い、問題点を抽出を行った。次に、Efficient Global Optimization の適用を行い、効率化できる見通しを得た。さらに先験情報を組み込むことにより、さらに効率的な最適化を実現した。

塩谷研究室

(1) マルチメディアデバイスを用いたシミュレーション

近年普及が進んでいるスマートフォンと呼ばれるポータブルマルチメディアデバイス端末について、その直感的かつ簡易な操作性に着目し、クラウド型 CAE システムの入出力端末としての利用を目的とし、マルチメディアデバイス上での可視化システムの構築を行った。

(2) ネットワーク型 CAE ソフトウェアの開発

本研究では、遠隔地で運用される並列計算機システムを、インターネットを介して利用するネットワーク型 CAE システムについて、九州大学と共同研究を行うことにより、関東と九州間での遠隔利用実験を行った。解析結果の可視化機能の拡張を行い、可視化可能な物理量の選択肢を広げることを実現した。

(3) Windows 版熱伝導解析モジュール開発

計算サーバ上で実行される大規模有限要素並列計算を、簡易に実現する Windows 版システムとして開発された構造解析のシステムに、熱伝導解析機能を追加することを目的として、モジュールの開発を行い、いくつかの問題に対して有効性の検討を行った。

中林研究室

(1) スマートフォン用アプリケーションの企画・デザイン・開発

Android 端末や iOS 端末など、近年、情報機器の主流になりつつあるスマートフォンをプラットフォームとして、従来 PC や大型の計算機で行っていたような数値シミュレーションを実現する手法について広く研究を行っている。

(2) ニューラルネットワークを用いた予測システムの開発

ニューラルネットワークを用いて過去のデータを学習させることにより、何らかの予測を行うシステムの開発を行っている。これまでには、ドーナツショップの販売個数予測や、パチスロ機の設定予測などを試してきたが、本年度は過去の天気変化のデータを用いて、24 時間後の天気をニューラルネットワークで予測するシステムの構築を行った。

(3) 自己組織化マップの応用に関する研究

ニューラルネットワークの一種で、教師なし学習が可能であることや、多次元データの 2 次元マップ上での分類などに特徴がある自己組織化マップを用いて、様々なデータの分類や予測を行っている。本年度は過去の音楽 CD の売り上げや、曲自体のテンポや調などのデータを自己組織化マップにより分類・整理することにより、音楽の流行の変遷や将来予測をするシステムの構築を行った。

8. 業績リスト

本章では、2013 年 1 月から 2013 年 12 月までの当センターに関する業績を記載する。

8.1. 総説・解説・エッセイ

1. 矢川元基, "巻頭言：2013 年を迎えて", 原安協だより, No.251, pp.1-2, 2013

8.2. 論文

1. K.MUROTANI, G.YAGAWA and J-B, CHOI, "Adaptive finite elements using hierarchical mesh and its application to crack propagation analysis", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.253, pp.1-14, 2013
2. K.SAKIHARA, H.MATSUBARA, T.EDO and G.YAGAWA, "Multi-dimensional Moving Least Squares Method Applied to 3D Elasticity Problems", Engineering Structures, Vol. 47, pp. 45-53, 2013
3. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, "粒状構造を有する脆性材料の離散き裂進展解析手法の開発および性能評価", 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.69, pp.31-45, 2013 年 1 月
4. 広瀬孝三郎, 江戸孝昭, 松原仁, "裂性岩盤の狭小領域構造を考慮した広大領域における物質移動シミュレーション", 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.69, No.3, pp.367-377, 2013 年
5. Taka-Aki Edo, Hitoshi Matsubara and Hisao Hara, "Comparison of Numerical and experimental results on Red soil muddy water flow in sand basin with filtration", 7th International Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, pp. 127-130, 2013.11
6. T Taka-Aki Edo, Hitoshi Matsubara and Hisao Hara, "Kita-Uebaru Landslide Analysis by using Material Point Method (MPM)", 7th International Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, pp. 39-42, 2013.11
7. Kosaburo Hirose and Hitoshi Matsubara, "Mudcrack patterns of Okinawa regional soils ", 7th International Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, pp. 35-38, 2013.11

8.3. 講演論文・口頭発表

1. N. FUJIMATSU, "Direct Numerical Simulation on Drag Reduction of Channel Flow with Visco-Elastic Wall", 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2013.1.7
2. 長岡慎介, 中林靖, 矢川元基, “EFMM の並列流体-構造連成解析への適用”, 第 62 回理論応用力学講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス, 2013.03.06-08
3. 芦野俊宏, “材料データベースの国際動向と今後の展望”, 科学技術未来戦略ワークショップ データを活用した設計型物質・材料研究(マテリアルズ・インフォマティクス)ワークショップ第 2 回, 東京, 2013.06.01
4. Shinsuke NAGAOKA, Yasushi NAKABAYASHI, Genki YAGAWA, “E Application of EFMM to Fluid-Structure Coupled Analysis and Its Parallelization”, SEECCM III, Kos Island, Greece, 2013.06.012-14
5. Hiroshi KAWAI, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, Shinobu YOSHIMURA “Performance Benchmark of Local Solvers on Supercomputers in Domain Decomposition Method”, The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS), Jeju, South Korea, 2013.06.09-13
6. Kaoru YODO, Ryuji SHIOYA, Yoshitaka WADA, Akio MIYOSHI , “Parallel CAE system based on HTML5, WebGL and offline visualization technology with domain decomposition method”, The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS), Jeju, South Korea, 2013.06.09-13
7. Itaru ISHIKAWA, Yosuke KOBAYASHI, Ryuji SHIOYA, Genki YAGAWA , “Vibration Analysis by an Eigenvalue Analysis Module of ADVENTURE System”, The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS), Jeju, South Korea, 2013.06.09-13
8. A.M.M. MUKADDES, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, “A Computational Study of Sparse Matrix Storage Schemes in Large Scale Thermal-Solid Coupling Analysis”, The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS), Jeju, South Korea, 2013.06.09-13

9. 荻野正雄, 塩谷隆二, “階層型領域分割法による 1000 億自由度並列有限要素解析”, 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21
10. 石川格, 小林陽介, 塩谷隆二, 矢川元基, “ADVENTURE 振動固有値解析モジュールの開発”, 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21
11. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 吉村忍, “コース行列の逆行列を用いた BDD 前処理”, 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21
12. 和田義孝, 河合浩志, 塩谷隆二, “超大規模解析のための高精細可視化ライブラリの開発”, 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21
13. 淀薫, 塩谷隆二, 和田義孝, 三好昭生, “領域分割法に基づくオフライン可視化と WebGL による大規模解析用ネットワーク CAE システムの開発”, 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21
14. 荒井皓一郎, 岡田裕, 河合浩志, 淀薫, 塩谷隆二, “地球シミュレータによる大規模有限要素法破壊力学解析と破壊力学パラメータの計算手法”, 第 18 回計算工学講演会, 東京, 2013.06.19-21
15. 田村善昭, 鶴見伸夫, 松本洋一郎, “集束超音波による気泡運動と温度上昇の可視化”, 可視化情報シンポジウム, 東京, 2013.06.19-21
16. Y. Yamashita, T. Baba and T. Ashino, “Semantic mathematical representation using OpenMath for equation”, The 10th Asian Thermophysical Properties Conference, Jeju, Kora, 2013.09
17. 長岡慎介, 中林靖, 矢川元基, “EFMM による並列流体-構造連成解析について”, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山大学津島キャンパス, 2013.09.08-11
18. Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi, Yoichiro Matsumoto, “Numerical Simulation Method of HIFU with Microbubbles”, ASME/FDA 2013 1st Annual Frontiers in Medical Devices: Applications of Computer Modeling and Simulation (FMD2013), Washington DC, U. S. A., 2013.09.11-13

19. 増田正人, 中林靖, 田村善昭, “振動現象の連成解析及び自己組織化マップによるその分類”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013.11.02-04
20. 山下雄一郎(産総研), 馬場哲也, 芦野俊宏, “分散型熱物性データベースの開発(10)-OpenMath を用いた数式データの表現-”, 第 34 回日本熱物性シンポジウム, 富山, 2013.11
21. Shisnuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Genki Yagawa, “Evaluation of Efficiency of New Fluid-Structure Coupled Analysis Method using Parallel Enriched Free Mesh Method”, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14
22. Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi, Yoshiaki Tamura, “Fluid-Structure Coupled Analysis of Vibration Phenomena and Its Classification and Prediction Using the modular network Self Organizing Map”, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14
23. Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi, Yoichiro Matsumoto, “Numerical Simulation of Nonlinear Acoustic Waves in Two-Phase Fluid”, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14
24. 石川 格, 河合浩志, 塩谷 隆二, “振開発中の ADVENTURE 振動固有値解析モジュールによる並列計算”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013.11.02-04
25. I. Ishikawa, M. Ogino, A. M. M. Mukaddes, Ryuji Shioya, “Trial Study of Multi-Level Domain Decomposition Method for Heat Transfer Analysis”, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14
26. 河合浩志, 塩谷隆二, “連続体力学向け DSL の開発”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013.11.02-04
27. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 山田知典, 吉村忍, “領域分割法ソルバーの性能ベンチマーク”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013.11.02-04

28. 和田義孝, 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, “超大規模解析のための高精細可視化ライブラリの並列化”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013.11.02-04
29. 淀薫, 塩谷隆二, 和田義孝, 河合浩志, 三好昭生, “大規模解析のためのレイキャスティング可視化技術の検討”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013.11.02-04
30. 武居周, 室谷浩平, 河合浩志, “並列有限要素法に基づく full-wave 電磁界解析ソフトウェアの HPCI における性能評価”, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013.11.02-04
31. A M M Mukaddes, Masao Ogino and Ryuji Shioya, “A new implementation of sparse matrix-vector multiplication in the parallel finite element”, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14
32. I. Ishikawa, M. Ogino, A. M. M. Mukaddes and R. Shioya, “Trial Study of multi-level domain decomposition method for heat transfer analysis”, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14
33. S. Sugimoto, M. Ogino and R. Shioya, “Implementation and acceleration of the domain decomposition method with complex data types”, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, 2013.12.11-14
34. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, “Material Point Method (MPM) におけるエネルギー変動問題とその抑制法”, 土木学会第 68 回年次学術講演概要集, pp.233-234, 2013.09
35. 広瀬孝三郎, 松原仁, “島尻粘土における乾燥き裂パターンに関する実験研究”, 土木学会第 68 回年次学術講演概要集, pp.463-464, 2013.09
36. 松原仁, 江戸孝昭, 原久夫, “不均質脆性固体における破壊形態の複雑性に関する数値解析的検討”, 第 26 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, pp.24-25, 2013.11
37. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, “Material Point Method(MPM)を用いた斜面崩壊発生時の土質強度の検討”, 第 26 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, pp.18-23, 2013.11

38. 江戸孝昭, 松原仁, 原久夫, “Material Point Method(MPM)を用いた斜面崩壊発生時の土質強度の検討”, 第 26 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, pp.18-23, 2013.11
39. 広瀬孝三郎, 松原仁, “Mud crack の形成メカニズムに関する実験的検討”, 第 26 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, pp.14-17, 2013.11
40. Hitoshi Matsubara, “Numerical Study on the Forming Mechanism of Honeycomb-weathering of Rock”, Proceedings of 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, December 2013.
41. Taka-Aki Edo, Hitoshi Matsubara and Hisao Hara, “High-accuracy Material Point Method based on the Moving Least Squares Method”, Proceedings of 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013) & 4th International Symposium on Computational Mechanics (ISCM2013), Singapore, December 2013.

9. 受賞

9.1. 日本機械学会計算力学部門賞第 91 期業績賞

2013 年 11 月 2 日（土）～4 日（月），佐賀大学にて日本機械学会第 26 回計算力学講演会が開催され，研究員の塩谷隆二教授が，日本機械学会計算力学部門賞第 91 期の業績賞を受賞した．



授賞式の様子

受賞理由は，超並列計算機を活用した計算力学研究の基盤となる理論を提唱した業績と，計算力学技術者試験認定事業に対する部門への貢献である．

9.2. 2013 JACM Fellows Award(日本計算力学連合フェロー賞)

2013 年 12 月 3 日(金), シンガポールにて JACM(日本計算力学連合)総会が開催され, 研究員の塩谷隆二教授が 2013 JACM Fellows Award(日本計算力学連合フェロー賞)を受賞した.



賞状

受賞理由は計算力学分野で顕著な業績を上げ, JACM へのサポート, および IACM(International Association for Computational Mechanics)関連国際学会への貢献である.

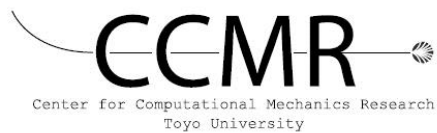
10. 結び

本報は、2013 年度の活動を取りまとめたものである。なお、2014 年 3 月に予定されているセンター評価委員会に間に合わせるために原稿締め切りを 2013 年 12 月 31 日とした。したがって、それ以降のデータについては掲載されていないことをお断りしたい。

社会が抱える問題、あるいは産業界が抱える問題を発掘しながらソリューションを見出していくことをセンターに関係する全ての研究者が使命として共有しながら今後の活動や研究開発を進めていきたい。

東洋大学計算力学研究センター

2014 年度 年報



2015 年 3 月

東洋大学計算力学研究センター

2014 年度年報 目次

1. まえがき.....	1
2. センターの概要	2
2.1. センター設置について	2
2.2. 組織	3
2.3. 構成メンバー	4
3. 研究成果	5
3.1. 解析手法開発グループ	5
3.1.1. 並列流体-構造連成解析手法の開発.....	6
3.1.2. 流体-構造連成解析の SOM を用いた分類及び予測技術の開発.....	13
3.1.3. 固体の表面性状を考慮したスプラッシュのシミュレーション	17
3.1.4. 損傷理論を導入したボクセル FEM を用いたアルカリシリカ反応の膨張解析の基礎研 究	21
3.1.5. Mudcrack の3次元数値シミュレーション	25
3.2. 大規模並列化グループ	28
3.2.1. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発	29
3.2.2. 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築	34
3.3. 新規実験計測グループ	37
3.3.1. 流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムを用いたフラッタ特性の確認実験 ..37	
3.3.2. 画像処理を用いた野球ボールに働く空気力計測	45
3.3.3. 運動する物体内部における流体挙動に関する実験的研究	50
3.4. 精度・妥当性検証グループ	57
3.4.1. データ同化技術を用いた効率的精度解析技術の開発	58
3.4.2. 工学における最適化プロセスの完全自動化	62
3.4.3. 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式開発.....	64
3.5. 可視化検証グループ	66
3.5.1. 3次元画像による定量的・定性的検証.....	67
3.6. 横断的研究会	72
3.6.1. 連成標準問題検討会	72

3.6.2.	計算力学と(材料)データベースの会.....	72
3.6.3.	楽器音響と流体構造連成研究会.....	72
4.	共同研究.....	74
4.1.	JST CREST プロジェクト.....	74
4.1.1.	研究実施体制.....	74
4.1.2.	研究実施内容.....	75
4.2.	(株)日立製作所機械研究所との連携.....	75
4.3.	独立行政法人 原子力安全基盤機構との連携.....	75
4.4.	東京理科大学との連携.....	75
4.5.	本田技術研究所との連携.....	76
5.	成果の広報および普及活動.....	77
5.1.	第3回 CCMR-HDDMPPS(CREST プロジェクト)の合同シンポジウム.....	77
5.1.1.	プログラム.....	77
5.2.	第10回機械工学国際会議.....	78
5.3.	第5回国際スーパーコンピューティングワークショップ.....	79
5.3.1.	実行委員会.....	79
5.3.2.	プログラム.....	79
5.4.	東京都北区主催「ものづくり夜間大学校」.....	82
6.	学術活動.....	83
6.1.	論文投稿.....	83
6.2.	総説・解説・エッセイ.....	84
6.3.	書籍.....	84
6.4.	学会発表.....	85
6.3.	招待講演.....	89
6.4.	受賞.....	90
7.	研究グループ紹介.....	91
8.	結び.....	92

1. まえがき

本年度はセンターが活動を開始してからちょうど 10 年目にあたる。過去 9 年間のうち、5 年間は私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」として活動を行ってきっていたが、その後、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に選定された。この報告書は、その3年目の活動を中心にとりまとめたものであり、いわば第 2 期の中間報告である。

今回の、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業はその題目を「大規模高精度流体構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」としている。これは、それまでの流体解析や構造解析といった個別の物理の解析から一歩進めてより複雑な、また現実的な問題に計算力学の手法を適用しようとするのと、単に研究として行うのではなく、精度や妥当性を十分に検証し、あるいはその検証方法を確立することで、実用に耐えうるものとするを目標としていることである。本年度は、その3年目であり、各メンバー、グループの研究もようやく結果が出始めたところかと思う。それぞれの進展については3章に詳しく述べられている。また、従来、韓国成均館大学、台湾龍華科技大学と開いてきた学生ワークショップは拡大され、この報告が出る3月には中国および国内の他大学も含めた形で開催される運びとなっている。さらに、戦略的研究推進事業 CREST やその他、センターに関連する研究についてもふれている。

本年度は文部科学省に中間報告を出しており、これまでの成果をまとめ、残りの期間で何ができるか、何をすべきかもう一度見直す時期である。その中で、ある程度の成果は本報に含まれているが、まだまだ、物足りなく感じられる向きもあろうかと思う。今後ともさらなるご批判とご指導を賜れば幸いである。

2015 年 3 月

東洋大学計算力学研究センター長
田村善昭

2. センターの概要

本センターは、わが国の私立大学学術フロンティア拠点のひとつとして文部科学省から設置が認められ、平成 17 年度に活動を開始した。その後、平成 23 年度に科学技術振興機構の戦略的研究推進事業 CREST の選定、続いて平成 24 年度に文部科学省の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け、今日に至っている。

本センターに参加する研究員は、東洋大学の複数学部・大学院の教員(工学研究科, 国際地域学部, 総合情報学部, 理工学部), 博士研究員, 大学院生などを中核とし, また客員研究員として関連分野の内外の研究者から構成されている。

各自の専門分野は、構造解析, 流体解析, 破壊解析, 逆問題・最適化, 大規模並列計算, 可視化など, 計算力学分野で必要とされるほぼ全ての分野に跨っており, この分野における専門家集団である。平成 23 年度に採択を受けた CREST では「京」コンピュータ利用のための超大規模解析技術に関して, また平成 24 年度からは, 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け, 連成解析や計算力学の精度検証・妥当性検証にも積極的に取り組んでいる。

さらに, 東洋大学 125 周年を契機とした国際化に合わせて海外の関連する大学と積極的に交流を進め, 若手の人材育成にも寄与したいと考えている。

2.1. センター設置について

東洋大学計算力学研究センター設置の経緯とこれまでの概要は以下の通りである。

- 平成 17 年 6 月文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」に研究題目「数値逆解析手法の開発とその構造健全性向上のための応用」で採択され, 計算力学研究センター発足
- 平成 17 年 12 月センター開所式開催のあと, 白山第 2 キャンパス内計算力学研究センター棟に入居し本格活動開始
- 平成 22 年 3 月「学術フロンティア推進事業」終了
- 平成 23 年 8 月科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」に研究題目「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」で採択される
- 平成 24 年 4 月文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に研究題目「大規模高精度流体構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」で採択される

2.2. 組織

計算力学研究センターの組織は以下の通りである。

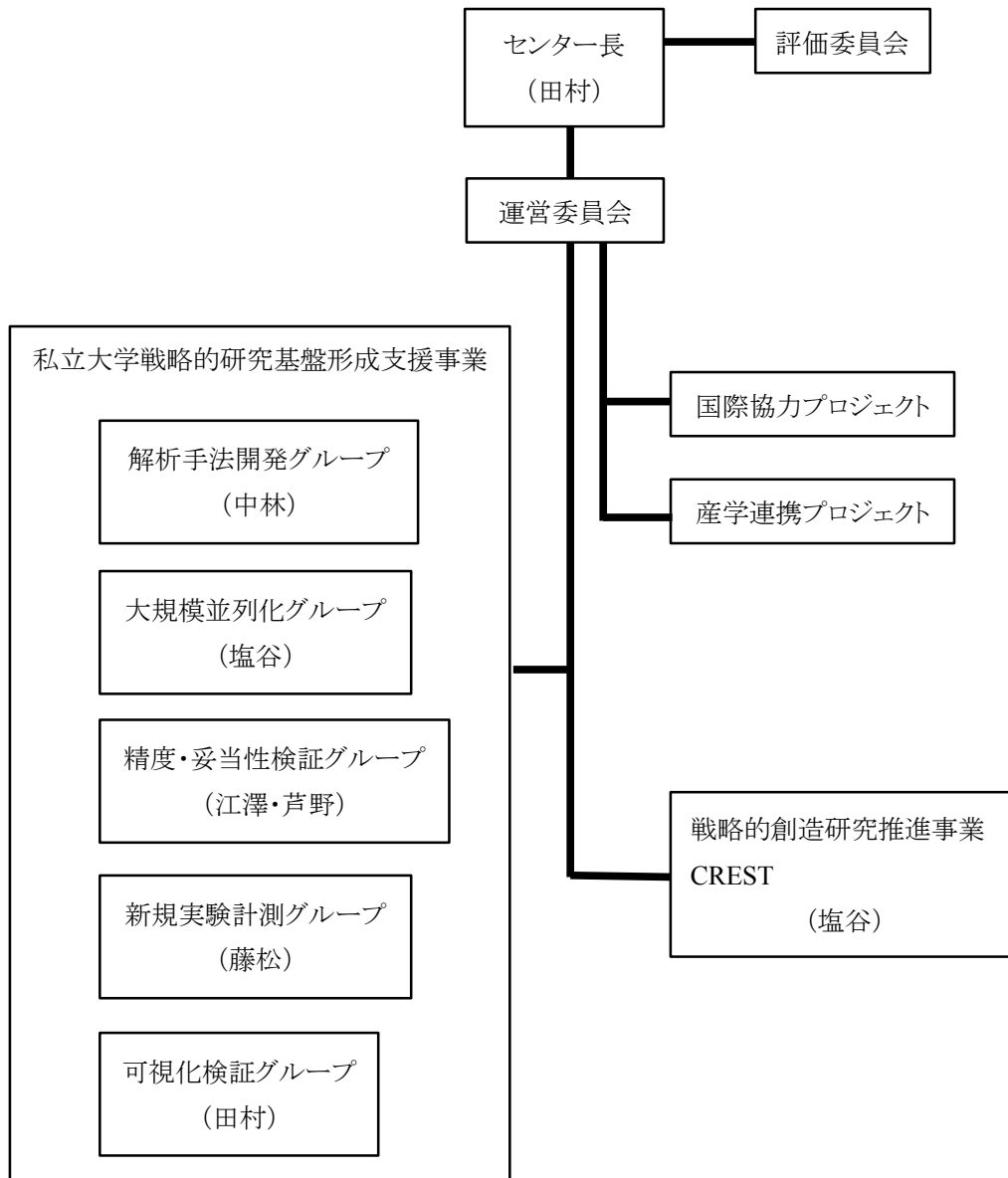


図 2.1. センターの組織

2.3. 構成メンバー

計算力学研究センターは以下のメンバーで構成されている。

センター長

田村 善昭(東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)

研究員

芦野 俊宏(東洋大学国際地域学部国際地域学科教授)

江澤 良孝(東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)

塩谷 隆二(東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)

中林 靖(東洋大学総合情報学部総合情報学科准教授)

藤松 信義(東洋大学理工学部機械工学科准教授)

研究助手

長岡 慎介(東洋大学計算力学研究センター)

増田 正人(東洋大学計算力学研究センター)

谷村 景貴(東洋大学計算力学研究センター)

学生

島村 雅彦(東洋大学大学院工学研究科機能システム専攻博士後期課程)

清水 聖(東洋大学大学院工学研究科機能システム専攻博士後期課程)

長尾 智(東洋大学大学院工学研究科機能システム専攻博士前期課程)

客員研究員

矢川 元基(前東洋大学計算力学研究センター長, 東京大学名誉教授, 東洋大学名誉教授)

金山 寛(日本女子大学特任教授, 九州大学名誉教授)

富山 潤(琉球大学工学部准教授)

古川 知成(バージニア工科大学工学部機械工学科教授)

松原 仁(琉球大学工学部助教)

横山 真男(明星大学情報学部情報学科准教授)

3. 研究成果

3.1. 解析手法開発グループ

解析手法開発グループでは、計算力学研究センターのプロジェクト名である「大規模高精度流体-構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」のうち、「高精度流体構造連成解析手法の開発」の部分に焦点を当てた活動を行っている。

流体-構造連成解析を高精度かつ安定的に実施するためには、まず、流体解析手法・構造解析手法そのものの精度や信頼性を高めた上で、それらを連成させるアルゴリズムについても十分に検討する必要がある。これまでのところ、計算力学研究センターでは流体解析に SUPG/PSPG 安定化有限要素法を用い、構造解析に EFMM を用いる手法を中心に連成解析を行ってきたが、このアプローチ以外にも例えば粒子法を用いた手法など様々な戦略が考えられる。

上記の事項を踏まえて、今年度は、以下の 5 項目について報告を行う。

- (1) 並列流体-構造連成解析手法の開発
- (2) 流体-構造連成解析の SOM を用いた分類及び予測技術の開発
- (3) 固体の表面性状を考慮したスプラッシュのシミュレーション
- (4) 損傷理論を導入したボクセル FEM を用いたアルカリシリカ反応の膨張解析の基礎研究
- (5) Mudcrack の 3 次元数値シミュレーション

3.1.1. 並列流体-構造連成解析手法の開発

(1) 目標・計画

本研究では、流体-構造連成現象を解く為の新しい解析手法を開発する事を目的としている。本研究で提案する Enriched Free Mesh Method (EFMM)^[1]を用いた構造解析手法と、SUPG/PSPG 安定化有限要素法^{[2][3][4][5]}を用いた流体解析手法を組み合わせた、新しい流体-構造連成解析手法^[6]は、各解析領域場を使用するメッシュ分割パターンが共に線形要素であることから、流体-構造境界面における整合性を完全に得ることが出来、その結果、流体-構造連成問題を解く際に、非常に重要となる、各解析場の境界面の連成効果を考慮する際に生じる問題を解消する事に成功している。さらに、前述の通り、各解析場に用いられるメッシュ分割パターンは、線形要素のみであるにも関わらず、その解析精度は、従来の線形要素を用いた解析結果と比較して向上すると云う結果を得られている。この特長から、本提案手法は、大規模問題を解く際に、問題になってくる計算機リソースと、計算時間の大幅な抑制を可能にする事を意味している。一方で、本手法は、近年の大規模解析の際に、必要不可欠となる並列処理を施す際に、大きな問題を有する手法であることが明らかとなった。この問題は、EFMM の解析アルゴリズムに起因するものであった。昨年度、本提案手法による大規模並列解析を行うために、EFMMの並列解析手法の提案と実装を行い、その並列化効率の検証を併せて行い、概ね良好な結果を得ることが出来た。

平成 26 年度は、昨年度確立をした EFMM の並列化手法を、我々が提案している流体-構造連成解析手法へ導入し応用研究へ着手した。その課程に於いて、昨年度提案した EFMM の並列解析手法のアルゴリズムに誤りがあることが明らかとなり、この点を修正した、EFMM の並列解析手法を確立した。

併せて、新規実験・計測グループとの共同研究として、新規実験・計測グループにより提案された流体-構造連成現象に関する実験結果と数値解析との比較を行った。

次年度以降は、本提案手法の定量的評価と、実験により得られた実現象との比較・検証を基に、本提案手法について纏める方針である。

(2) 意義・国際社会との比較

現在、国内外を問わずに、計算力学の分野において、流体-構造連成現象を対象とした研究は、非常に注目されており、積極的に行われている。この現象を解くために、多くの研究者が様々なアプローチを行い、沢山の新しい解析手法が提案され、多くの成果が発表されている。その一方で、現時点までに、決定的な解析手法は確立されていない。

提案されている多くのアプローチは、流体解析手法として、粒子法を用いているものが、非常に多い。メッシュ分割を必要としない粒子法を用いることで、解析場が大きく変動するような問題の解析も容易になることから、流体解析場において多くのアドバンテージが得られることが、その一因であると考えられる。しかし、我々の提案している手法は、流体解析場、構造解析場共に格子法を用いている。格子法をそれぞれの解析場に用いる事で、粒子法を用いた流体解析と比較して、解析領域の大きな変化に対しては、対応し難い面もあるが、解析精度の面では、粒子法を用いたアプ

ローチと比較して大きなアドバンテージを有していると考えられる。

本手法の確立により、数値シミュレーションにおいて、非常に重要な解析精度を損なう事無く、多くの流体-構造連成現象を解く事が可能になると考えられる。このことから、本研究は、格子法を用いた流体-構造連成解析手法の確立と云う観点からも、非常に意義のある研究であると言える。

(3) 研究内容

(a) 並列 EFMM

我々が提案した EFMM の並列化のアプローチは、下記の通りである。

初めに、解析領域(図 1[i])を、従来の要素ベースの領域分割法を用いて、複数の局所領域に分割する(図 1[ii])。

次に、分割された領域内にある節点が、それぞれ中心節点となる局所要素クラスターを生成する。この時、対象となる衛星節点は、分割された局所領域内の節点だけでなく、領域分割前の解析領域(図 1[i])の全ての節点が対象となる。この時、自身の領域内の節点のみを対象として、局所要素クラスターを生成すると、幾つかの局所要素クラスターは、不完全な形状となる為である。

具体的には、領域分割面上の節点は、正確な局所要素クラスターを作る事が出来ない。例えば、図 1[ii]の局所領域[a]内の節点 8 は、本来、図 2 中の左側に記すような局所要素クラスターが生成されるべきであるが、分割された局所領域内のみで、局所要素クラスターを生成すると、図 2 内、右側に記したような、衛星節点の一部が欠落した不完全な局所要素クラスターが生成されてしまう。つまり領域分割された領域内の節点が、局所要素クラスターを生成する際に、解析領域内全ての節点とその対象となるのは、EFMM を用いた解析を行う際、特に重要となる解析領域内全ての節点が、正確な局所要素クラスターを生成するという点を遵守するためである。

なお、この工程を行うと、複数の局所領域に分割された各領域の一部は、幾つかの局所領域間で重複する事になるが、ここまで得られた領域(図 1[iii])が、EFMM による並列解析を行う際の、各局所領域となる。但し、計算過程における局所剛性マトリックスの生成に関しては、最初に要素分割を行った際に、自身の領域内に含まれていた節点を中心節点に関する部分のみである、と云う点に、注意が必要である。具体的には、図 1[iii]の局所領域 1 内では、節点番号 1,2,3,6,7,8,11,12,13 を中心節点とした局所要素剛性マトリックスを計算する事になり、節点 4,9,14,16,17,18,19 を中心節点とした局所要素剛性マトリックスに関しては、不要となる。

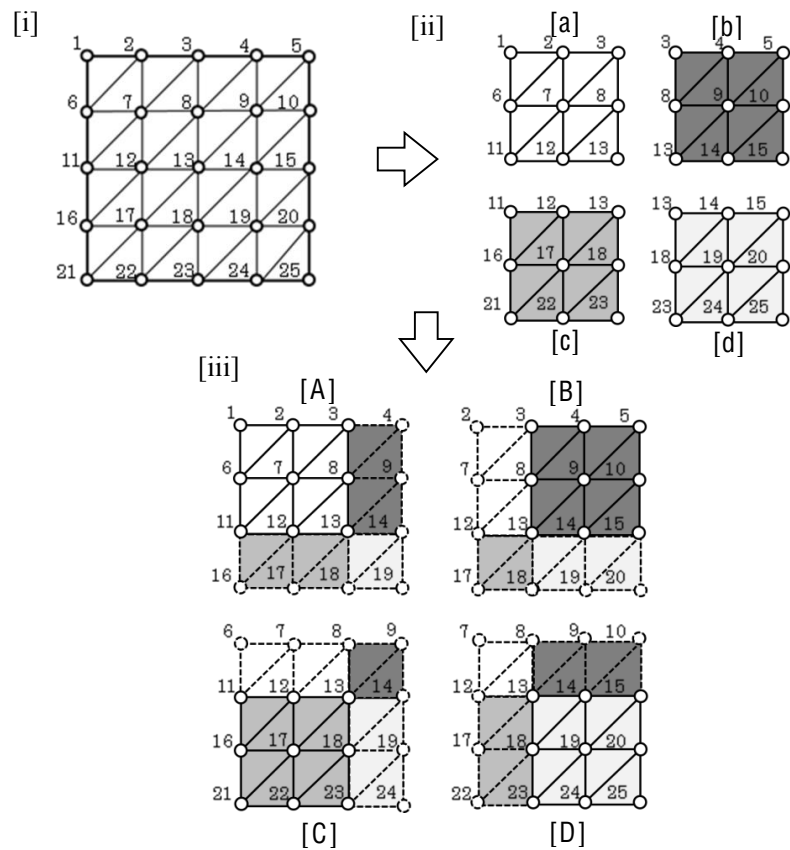


Fig. 1 The flowchart of parallelization method for EFMM

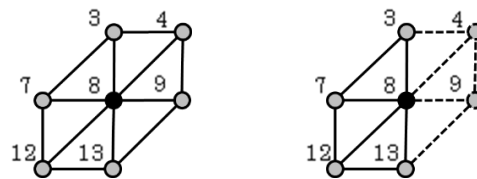


Fig. 2 Example of created local elements cluster (L : correct , R : incorrect)

さて、これら分割された局所領域間の通信方法であるが、前述の通り、並列 EFMM では、要素ベースの領域分割を行っているものの、局所領域間での重複領域もあることから、通信方法は、従来の FEM の並列解析手法とは異なったアプローチが必要となる。

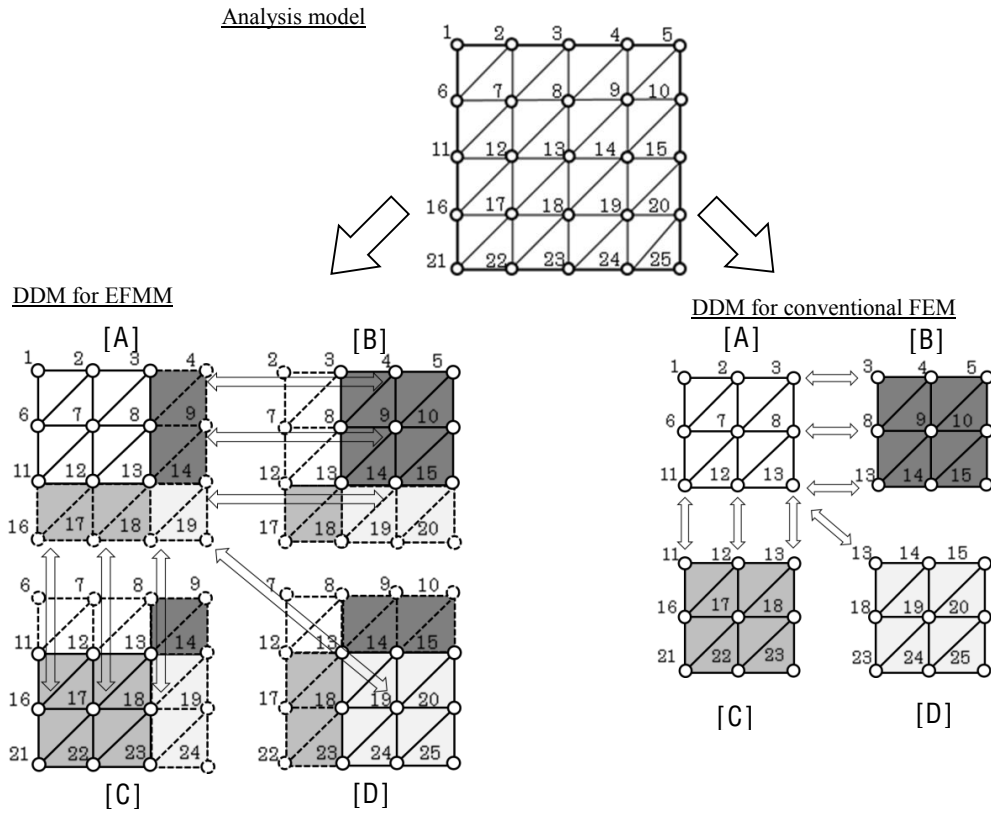


Fig. 3 The comparison of the communication cost

図3は、図1で示した領域分割手法により抽出された、局所領域を例に、本並列解析手法における通信方法を示したものである。本研究では、ソルバーに共役勾配法 (Conjugate Gradient Method) を用いるが、その際に、通信に必要となるのは、分割領域[A]では、節点番号 4,9,14,16,17,18,19 となる。つまり、前述の局所領域内にありながら、中心節点として局所剛性マトリックスを計算する必要が無い節点群に関して、他の局所領域から通信によってデータを受信する必要がある。具体的に受信するデータは、上記の受信すべき節点が生成する局所剛性マトリックス内の、最初に領域分割を行った際の境界面上の節点と、正確な局所要素クラスターを生成するために、後から追加された重複節点に付随するデータとなる。

なお、重複節点群が生成する局所剛性マトリックスのデータの、境界面上の節点群に関するデータは、自身の領域内の境界面状の節点に関する局所剛性マトリックスを生成した際にも一部計算されており、この部分を通信により足し合わせると、値が重複して、本来得られるべき全体剛性マトリックスの値と誤差が生じる。このデータの重複を防ぐために、重複節点群が生成する局所剛性マトリックスのデータの内、重複節点群に関する値に関しては、自身の領域内で計算された剛性マトリックスに上書きを行い、境界面上の節点に関する剛性マトリックスに関しては足し合わせる。具体的には、図3中、領域[A]を例にとると、領域[B]内の節点4,9,14を中心節点とする局所剛性マトリックスの節点4,9,14に関するデータを受信、上書きをし、3,8,13に関するデータは受信、足し合わせを

行う. 同様に, 領域[C]内の節点 16,17,18 を中心節点とする, 局所剛性マトリックスの節点 16,17,18 に関するデータを受信, 上書きをし, 11,12,13 に関するデータを受信, 足し合わせを行う. 最後に, 領域[D]内の節点 19 を中心節点とする局所剛性マトリックスの, 節点 19 に関するデータを受信, 上書きをし, 節点 13 に関するデータを受信, 足し合わせを行う. すると, 局所領域[A]内の, 剛性マトリックスを正確に作成することが出来る.

このように, データ通信を行う節点毎に, 境界面上の節点であるか, 重複節点であるかによって処理が異なる事に注意が必要である.

なお, 昨年度までに提案していた並列 EFMM のアルゴリズムにおいては, 上記の, 節点毎の処理の違いを考慮していなかった為に, 解析に誤りが生じていた.

本手法により, 昨年度提案していた並列化手法と同等の並列化効率を得る事が可能となった.

(b) 数値解析例(実験との比較)

本項では, 本提案手法を用いた数値解析と, 新規実験・計測グループが行った実験との比較について述べる.

実験モデルは, 図 4 に示した通りである. 図中, 円柱が弾性体であり, この弾性体上面を固定し, 図中左側から流速を与える. 本実験では, 与える流速と円柱の物性値の関係により生じる, 円柱の挙動の変化について明らかにする事を目的としている.

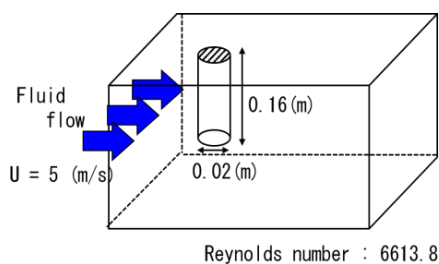


Fig. 4 The experimental model

図 5 は, 円柱のヤング率を 9MPa とした際の挙動を示しており, その際の下端最大変位は, 0.5mm であった.

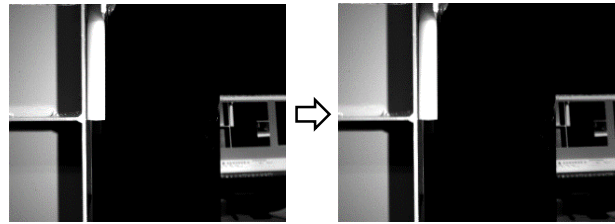


Fig. 5 Experimental result (Elastic modulus : 9MPa)

図 6 は, 解析に用いたメッシュモデルである.

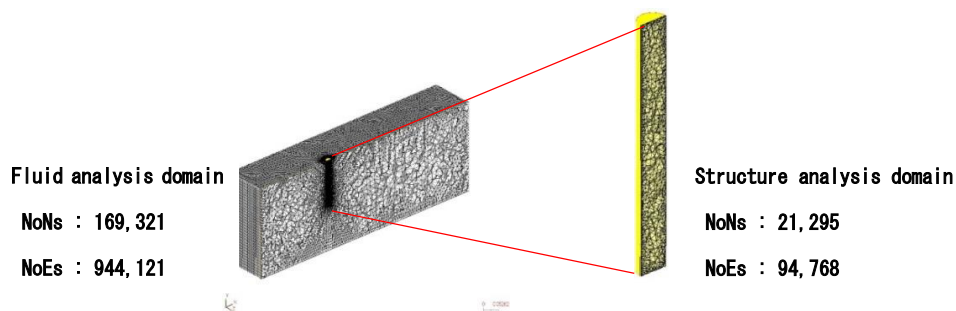


Fig. 6 Analysis model

上記の解析モデルを用いた数値解析結果では, 円柱底面の最大変位量が 0.15mm であり, 実験結果で得られた 0.5mm と比較して変位量が小さくなっている.

現在, 解析メッシュモデルの変更や, 解析手法の高精度化を取り入れ, 実験結果との誤差量の減少を試みている.

(4) 平成 26 年度進捗状況

今年度は, 昨年度までに提案してきた, EFMM の並列化手法における問題点を修正し, 並列流体-構造連成解析手法を確立した.

本手法を用いた数値解析と実験結果の間には, 大きな誤差がある為, 解析メッシュモデルの変更や, 解析手法の高精度化を行う必要がある.

来年度以降は, 現時点で定量的な評価による健全性の証明には至っていない本手法の高精度化を行い, 実験との比較から本手法の健全性の証明を行う.

参考文献

- [1] Yagawa, G. and Matsubara, H., “Enriched element method and its applications to solid mechanics”, *Proc. Computational Method In Engineering and Science EPMESC X*, pp. 15-18, 2006.
- [2] Tezduyar, T.E., “Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations”, *Advanced in Applied Mechanics*, 28, pp. 1-44, 1991.
- [3] Tezduyar, T.E., Mittal, S., Ray, S.E. and Shih, R., Incompressible flow computations with stabilized bilinear and linear equal-order-interpolation velocity-pressure elements, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 95 pp.221-242, 1992.
- [4] Franca, L.P., Frey, S.L. and Hughes, T.J.R., Stabilized finite element methods I. Application to the advective - diffusive model, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 95 pp.253-276, 1992.
- [5] Franca, L.P. and Frey, S. L., Stabilized finite element methods II. The incompressible Navier-Stokes equations, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 99 pp.209-233, 1992.
- [6] S. Nagaoka, Y. Nakagabashi and G. Yagawa, Accurate fluid-structure interaction computations using elements without midside nodes. *Comput Mech.*, Vol. 48, pp. 269-276, 2011.

3.1.2. 流体-構造連成解析の SOM を用いた分類及び予測技術の開発

(1) 目標・計画

本研究では、流体-構造連成解析を行い、自己組織化マップ(Self-Organizing Map : SOM)^[1]などの人工知能技術を用いて解析データの分類を行い、解析条件から解析結果を予測することができる技術を開発することを目的としている。分類と予測の両方を包括する mnSOM(modular network SOM)を用いて学習を行う。このときモジュールは MLP を用いる。しかし、連成問題は非線形性が非常に強く、mnSOM での予測には限界があると思われる。そこで、Deep Learning の考えを取り入れた予測技術の開発を目指す。これは Google を始め各企業や研究所でも注目されている技術で、画像認識や音声認識において、既存の技術よりも遥かに良い性能が得られることが知られている^{[2][3]}。

本研究の予測技術を確立すると、解析の大まかな結果を得ることで、詳細な解析をするための手がかりが提示できると考える。このことにより、機器や構造物設計における全体の解析時間を短縮できると期待できる。

今年度は、簡単のため、2次元円柱の振動解析を行い、解析条件と解析結果のデータを48パターン用いて mnSOM で学習し、予測と予測精度の検証を行った。mnSOM の学習は予測精度が不十分であった。そのため、Deep Learning 技術を用いた学習に着目した。まず、Deep Learning 技術を活用するためにコードを作成し、画像認識を行った。

平成 27 年度は、手書き文字認識の予測を CNN(Convolutional Neural Network)ではなく、AE(Auto-Encoder)やRBM(Restricted Boltzmann Machine)を用いた Deep Learning でを行い、予測精度を検証し、同様のネットワーク構造の Deep Learning を用いた解析結果予測を行い、その予測精度を検証し、ネットワーク構成や学習パラメータをチューニングする。

平成 28 年度は、SOM と Deep Learning を組み合わせた分類と予測を可能にする技術を開発し、研究成果をまとめる方針である。

(2) 意義・国際社会との比較

現在、解析対象の複雑化や大規模化から、計算時間がボトルネックにある。並列計算機を使うのは当然で、GPU を用いた解析方法も数多く見られる。しかしながら、計算量は膨大で、1ケース解くのに数日から数週間かかることもある。設計技術者は目的の解析結果を得るのに何度も解析を繰り返す必要がある。そこで、予めある程度の解析結果が分かれば試行回数を削減し、設計における全体の解析時間を短縮できると考えられる。ある事象を解析を行わないで解析結果を予測するという試みは、全く新しいものであり、学術的かつ実用的な側面を兼ね備えており、国際社会においても重要な位置づけとなる研究のひとつであると考ええる。

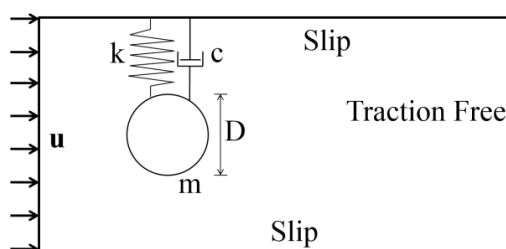
(3) 研究内容

SOM は、高次元のベクトルデータを低次元空間(マップ)に写像するものであり、高次元データの

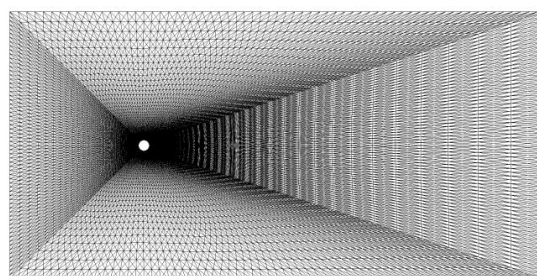
クラスタリングを行える。また、マップを見ることでデータの特徴抽出やマイニングを行うことができる。mnSOM は SOM のマップユニット部分をモジュールに置き換えたものである。モジュールは MLP(Multi Layer Perceptron)に置き換えたものが主で、入出力関係を保持することができる。この mnSOM を用いると、分類後に未知の入力から想起して意図する出力を提示することが可能であり、設計に用いることができる。

本研究での SOM に与える入力条件として、円柱質量とバネ定数、ダンパー係数、流速、レイノルズ数、バネの固有振動数、円柱振幅、円柱振動数、最大揚力係数、ストローハル数、平均抗力係数の 11 項目を与える。

流体-剛体連成解析は、ADVENTURE_Fluid を用いて数値解析した。移動境界問題を扱うために ALE 法を、円柱の移動を計算するために速度 Verlet 法を用いた。解析モデルを Fig.1 に示す。Table 1 に示した解析条件で計 48 通りの解析を行った。



(a) Model



(b) Mesh

Fig.1 Model of Analysis

Table 1 Input-Output Relationship of mnSOM

Input			Output	
Items	Unit	Ways	Items	Unit
Mass of Cylinder	[kg]	0.5 1.0	Amplitude of Cylinder	[m]
Spring Constant	[kg/s]	0.5 1.0	Frequency of Cylinder	[Hz]
Dumper Coefficient	[kg/s ²]	0.0 0.01	Maximum Coefficient of Lift	[-]
Flow Velocity	[m/s]	0.5 1.0	Strouhal Number	[-]
Reynolds Number	[-]	100 500 1000	Average Coefficient of Drag	[-]
Natural Frequency	[Hz]	-		

mnSOM の学習では、48 通りの学習データを円柱質量とバネ定数とダンパー係数($2 \times 2 \times 2 = 8$)で集約して 8 グループを作成し学習させた。このときマップサイズは 10×10 とし、MLP の入力に 6, 出力に 5, 中間層を 50 とした。学習後の予測精度を Table 2 に示す。予測精度は誤差で表し次式で定義する。

$$Prediction\ Error = \frac{\|Learned - Analysis\|}{Analysis} \quad (1)$$

Table 2 Prediction Error of mnSOM

	Minimum error		Maximum error		Average error	
Known Data (Hidden 50)	3.7	%	84.4	%	21.0	%
Unknown Data (Hidden 50)	3.3	%	214.1	%	51.3	%
Unknown Data (Hidden 100)	4.5	%	155.6	%	53.1	%

mnSOM の予測精度は既知のときで平均 21%, 未知の場合では 51.3%と、十分ではない。中間層の素子の数を倍に増やしたが、最大の誤差は現象したものの、平均誤差は改善しなかった。これは問題の非線形性が強いからだと考えられる。そこで、非線形性に対応するために階層を深くしたニューラルネットワークの学習法である Deep Learning を用いることを考えた。

Deep Learning の動作確認に為に手書き文字の認識を試験する。試験データは MNIST^[4]を用いる。MNIST の画像は 28×28 画素で、6 万枚の画像データ集である。Deep Learning は Auto-Encoder を階層的に積み上げたネットワークを用いる。ネットワーク構成は入力に 784, 中間層を 516, 256, 128, 64, 32 ニューロンとし、出力層を Logistic 関数として 10 個を出力とした。学習に使う画像を 1000 枚として、Pre-training を 10000 セット、Fine-tuning を 5000 とし、学習係数は Pre-training, Fine-tuning とともに 0.1 として学習を行った。検証には 20 枚の未学習データを与えた。画像の一例を Fig.2 に示す。学習結果を表 3 に示す。結果より学習はうまく行えていないことが分かる。まだ内部にバグが混在している可能性が高い。



Fig.2 Figures of Handwritten character

(4) 平成 26 年度進捗状況

mnSOM を用いて円柱振動の予測を行った。学習結果から非線形性が強いので、mnSOM だけでは予測性能を向上させるのは困難だと思われる。そこで、Deep Learning 技術に着目し、予測精度を向上させることを考えた。階層型 Auto-Encoder を構築し、Pre-training, Fine-tuning のコードを作成し、文字認識試験を行った。しかし、まだコードにバグが残っていると思われるため、バグの除去と学習パラメータ、ネットワーク構造の調節を行っている。

今後は Deep Learning による識字率の向上, 振動現象の予測に応用することを考える。

Table 3 Result of Character recognition

		Output Factors									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Input	7	0.03316	0.00472	0.00014	0.02211	0.17155	0.00517	0.00278	0.71413	0.00872	0.03751
	2	0.55421	0.00318	0.01372	0.01831	0.00737	0.00057	0.00014	0.39777	0.00356	0.00117
	1	0.16919	0.00044	0.00015	0.00935	0.00794	0.00013	0.00003	0.80467	0.00169	0.0064
	0	0.26226	0.00079	0.00031	0.02818	0.00358	0.0287	0.00094	0.66061	0.00708	0.00755
	4	0.50348	0.00303	0.00112	0.00306	0.0307	0.00121	0.0287	0.02189	0.01218	0.39463
	1	0.26795	0.0004	0.00013	0.00712	0.01918	0.00016	0.00006	0.68628	0.00276	0.01596
	4	0.07135	0.01364	0.00001	0.02078	0.00149	0.00912	0.00249	0.8643	0.01007	0.00675
	9	0.15664	0.00108	0.00011	0.00115	0.02759	0.00058	0.00297	0.67904	0.12504	0.00581
	5	0.38801	0.01473	0.00252	0.05407	0.06469	0.02302	0.00106	0.08305	0.07776	0.2911
	9	0.0035	0.0065	0.00001	0.00011	0.00011	0.0002	0.00001	0.98951	0.00002	0.00003
	0	0.35197	0.0329	0.00266	0.00917	0.07723	0.00685	0.02366	0.48356	0.00791	0.00409
	6	0.47125	0.11341	0.00046	0.00366	0.01642	0.0131	0.00268	0.36551	0.00111	0.0124
	9	0.1659	0.00747	0.00009	0.00447	0.42315	0.00037	0.04139	0.27618	0.07767	0.0033
	0	0.24693	0.01942	0.00109	0.05123	0.01304	0.0842	0.0117	0.53873	0.00513	0.02853
	1	0.09771	0.00022	0.03546	0.44935	0.00001	0.00002	0.00226	0.37547	0.03933	0.00017
	5	0.07339	0.00972	0.00339	0.01589	0.02465	0.03775	0.00083	0.81614	0.01778	0.00044
	9	0.0407	0.00076	0.00021	0.02306	0.63693	0.00024	0.02454	0.01933	0.16652	0.08769
	7	0.00952	0.0008	0.00053	0.02207	0.71052	0.00116	0.00288	0.23319	0.01519	0.00413
	3	0.02835	0.02553	0.00003	0.00403	0.0003	0.0142	0.00865	0.9082	0.00118	0.00954
	4	0.04753	0.00041	0.00003	0.0001	0.00009	0.00023	0.00054	0.95018	0.00084	0.00005

参考文献

- [1] T.Kohonen, "Self-Organizing Maps", pringer-Verlag, 1995.
- [2] Quoc V. Le, Marc'Aurelio Ranzato, Rajat Monga, Matthieu Devin, Kai Chen, Greg S. Corrado, Jeff Dean and Andrew Y. Ng, "Building High-level Features Using Large Scale Unsupervised Learning", Proceedings of the 29th International Conference on Machine Learning, 2012.
- [3] A.Krizhevsky, I.Sutskever, G.E.,Hinton, "ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks"
- [4] Yann LeCun, "The MNIST database of handwritten digits", <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/> (2015/1/12 現在)

3.1.3. 固体の表面性状を考慮したスプラッシュのシミュレーション

スプラッシュに関する最も古い研究は、1882 年の Worthington[1]が行ったスケッチによるスプラッシュの形状の実験観察であるが、その中で彼は落下する球体が水面に突入する際に発生するスプラッシュの形状が球体表面の粗さや濡れ性に依存することを示した。物体の材質の違いの例として Fig.1 に示すようにハイドロゲルとアクリル樹脂によって、観察されるスプラッシュの形状に差が生じることが実験により明らかになっている[2]。

しかし、これまでの数値シミュレーションにおいては、ほとんどが物体と液体の境界は滑りなし条件で設定されてきた。しかし、材質の表面性状の違いによって周囲の流れ場が変化する状況が、上述の観察のように落下物体が水面に衝突するときに生成されるスプラッシュ（飛沫）にみられることが分かっていることから、物体の表面性状の違いを数値シミュレーションにも導入する必要がある。つまり、同じ運動条件でも表面性状の違いによって周囲の流れ場は異なる現象になるため、この例のように表面に滑りがあるような物体と流れの相互作用をシミュレーションで計算するには、物体と流体の境界条件に表面性状の効果を記述するモデルを導入する必要がある。

スプラッシュのような自由表面を伴う流れ場の解析に有効な計算法として、粒子法の一つである MPS 法 (Moving Particle Semi-implicit 法[3], Fig.2) が近年盛んに利用されているが、既存の方法のままでは材質による差は表現できていない。本研究では、表面性状の考慮が必要なシミュレーションにおける物体壁面の取り扱いについて言及し、壁面の滑りや静電気などの特性を考慮して計算した粒子法シミュレーションを開発し、実験との比較によって評価・考察しその有効性を示すものである。

非圧縮粘性流体の流れ場を計算するにあたって、Navier-Stokes の支配方程式は次式の通りである。

$$\frac{Du}{Dt} = F - \frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 u \quad (1)$$

ここで、 u は流れ場の速度ベクトルで、 ρ は流体密度、 P は圧力、 ν は動粘性係数、そして F は外力項である。

本研究では、物体の表面性状を記述するモデルとして、Fig.1 の実験の違いを再現するために、両生類や爬虫類にみられる表皮のぬめりの成分であるハイドロゲルによる滑りと、アクリル樹脂のもつ静電気を Navier-Stokes 式に適用する。

一つ目のハイドロゲルの滑りを導入するには、粘性項の計算における重み関数 κ に実験より得られた滑り率を乗ずることとした (式 2)。つまり、ハイドロゲルの表面を構成するパーティクルから半径 r_c にある水粒子との粘性項計算についてのみ α を掛けた重み関数 κ_H で計算することで、壁面応力を α 分だけ小さくしハイドロゲル壁面近傍の滑りを表現した。また一方、アクリル樹脂のもつ静電気的な引力にはクーロン力を模擬したモデルを導入した (式 3)。

$$\nabla^2 \tilde{u} = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{i \neq j} [(\tilde{u}_j - \tilde{u}_i) \kappa_H(|\tilde{r}_j - \tilde{r}_i|)], \kappa_H(r) = \alpha \kappa(r) \quad (2)$$

$$F = C_{E,ij} \frac{d\varphi_{ij}(r)}{dr}, \quad \varphi_{ij}(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i q_j}{r_{ij}} \quad (3)$$

ここで α は滑りの程度を表す滑り率で, CE も引力の程度を調整する値でありそれぞれ材質や流体によって変化する値で実験との比較によって決定される.

さらに, 本研究では, クラウン状スプラッシュの先端形状 (finger / spike) の詳細なシミュレーションを行うために, 億単位の粒子数による高精度な 3D の大規模計算を行っている. その理由としては, クラウンの先端にみられる spike/finger は各水粒子が飛散する際にそれらが集まって液滴が形成されると考えられるからで, そのシミュレーションのためにはより小さい粒子径で計算を行う必要がある. また, そういった水分子同士の結合力の表現には, 表面張力を計算モデルに導入する必要もある.

Fig.5 はその表面張力モデル(ポテンシャルモデル[4])を導入した粒子法(陽解法)による大規模並列計算によるミルククラウンの計算結果である. 水粒子は互いに引き合い spike 状の先端がスプラッシュに見られるようになってはいるものの, クラウンの形状が網状になってしまっている点はこの点は今後の検討が必要である.

以上の研究結果については文献[5,6,7]に詳細を記している. 文献[5]は表面性状のうち固体の滑りについてであり, 文献[6]は電気的な引力について, 文献[7]はこれらの実験とシミュレーションについて概要を解説したものである. また計算手法については, 主要な計算力学と可視化情報に関する国際学会で発表している(文献[8]および[9]).

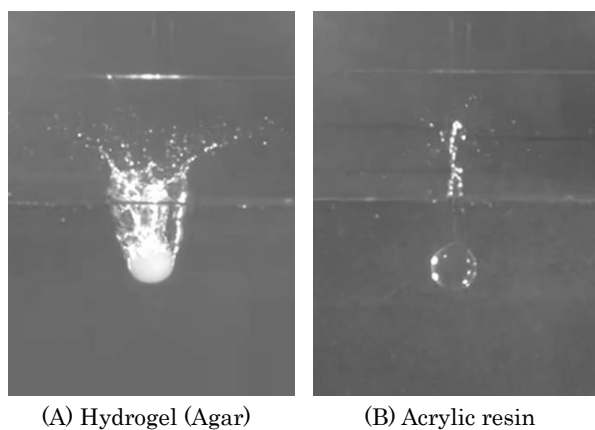


Fig.1 Difference of water splash by a sphere made of hydro-gel and a sphere made of acrylic resin. The picture at left is the splash of an agar sphere (Radius=10mm, $S = 100$), the picture at right is a splash of acrylic resin (Radius=10mm). The velocity impacting water surface in both photos was the same, but each splash's form was different.

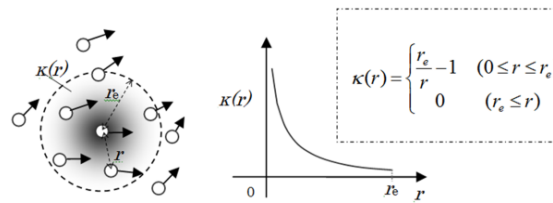


Fig.2 Schema of MPS method and weight function κ . The r is distance between particles. The range where the effect of weight function acts is r_e .

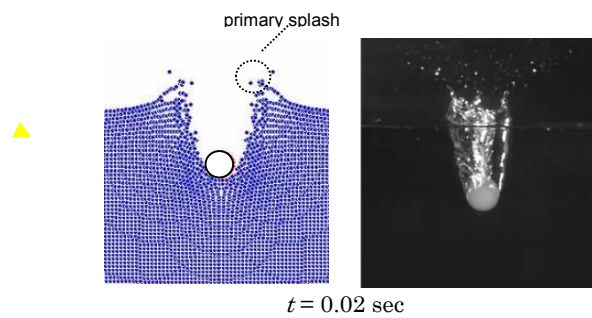


Fig.3 Simulation result with slip effect of crown-type splash by hydro-gel sphere.

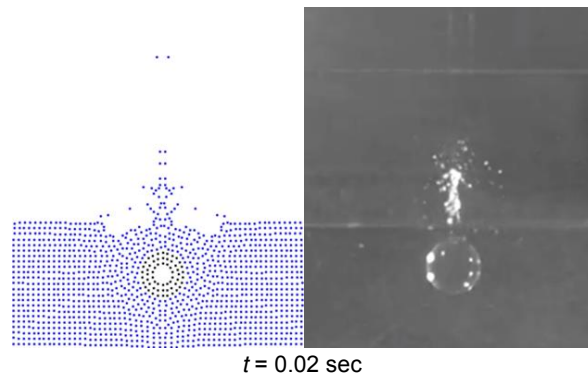


Fig.4 Simulation result with attractive force effect of column-type splash by acrylic resin sphere.

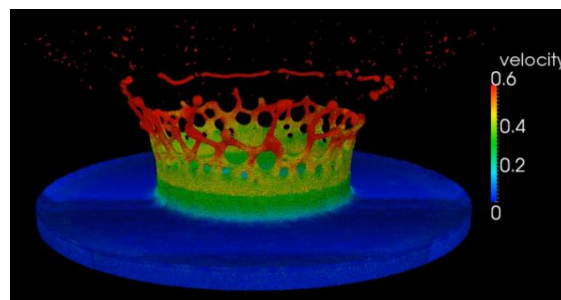


Fig.5 Simulation result of milk crown calculated by FX10. The number of particles is about 200 million.

参考文献

- [1] Worthington AM (1882) On Impact with a Liquid Surface. Proceedings of the Royal Society of London 34:217-230.
- [2] 横山真男, 菊地 謙次, 窪田 佳寛, 望月修, 物体壁面の表面性状を考慮した流れのシミュレーション, 日本流体力学会誌「ながれ」, Vol.32 (2013) pp.319-326
- [3] 越塚誠一, 粒子法 (2005), pp.10-29, 日本計算工学会.
- [4] 近藤雅裕, 越塚誠一, 滝本正人, MPS 法における粒子間ポテンシャル力を用いた表面張力, Transactions of JSCEs (2007)
- [5] Yokoyama M, Kubota Y, Kikuchi K, Yagawa G and Mochizuki O, Some remarks on surface conditions of solid body plunging into water with particle method, Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences Vol.1:1 (2014) pp.1-14
- [6] Yokoyama, M., Murotani, K., Yagawa, G., and Mochizuki, O., Some Considerations on Surface Condition of Solid in Computational Fluid-Structure Interaction. In Numerical Simulations of Coupled Problems in Engineering (2014) pp. 171-186, Springer International Publishing.
- [7] Yokoyama M., Mochizuki O., Yagawa G., Surface Condition of Solid in Splash Formation. IACM expressions No.34 (2014) pp.2-5.
- [8] Masao Yokoyama, Kohei Murotani, Genki Yagawa and Osamu Mochizuki, Fluid-Structure Interaction Analysis with Slippery Mucus Skin, 11th World Congress on Computational Mechanics, Barcelona, Spain, 2014.
- [9] M. Yokoyama, K. Murotani, K. Kikuchi, G. Yagawa, O. Mochizuki, How deal with slippery surface between fluid and structure in particle method?, 16th International Symposium on Flow Visualization, Okinawa, Japan, 2014.

3.1.4. 損傷理論を導入したボクセル FEM を用いたアルカリシリカ反応の膨張解析の基礎研究

(1) 目標・計画

社会基盤を支えるコンクリート構造物の劣化原因のひとつにアルカリシリカ反応(以下, ASR)がある。ASR は、コンクリート中のある種の反応性骨材(鉱物)とアルカリ性細孔溶液との化学反応により、ゲルを生じ、そのゲルが吸水することで、膨張圧が生じる現象をいう。ゲルの吸水膨張に伴う膨張圧により、コンクリートに有害なひび割れを生じるケースや、鉄筋破断が生じケースがあり、ASR 劣化は、コンクリートの耐久性、耐荷性の低下につながることから、本研究では、ASR の膨張挙動を精度よく予測するための数値解析手法を構築することを目標とする。

ASR の膨張挙動は、骨材寸法や形状に依存することが考えられるため、それらの膨張挙動を解析するために、本研究では、コンクリート中の骨材が考慮可能な損傷理論を導入したボクセル有限要素法を用いた。

今年度の計画では、1)粗骨材の寸法・形状をモデル化したボクセルデータ(以下、コンクリートモデル)の作成、2)コンクリートモデルを入力データとし、損傷力学モデルの概念を導入したボクセル有限要素法(以下、DM-VFEM: Voxel FEM incorporated with the Damage Mechanics)を用いた数値解析の基礎的な検討を行う。

(2) 意義・国際社会との比較

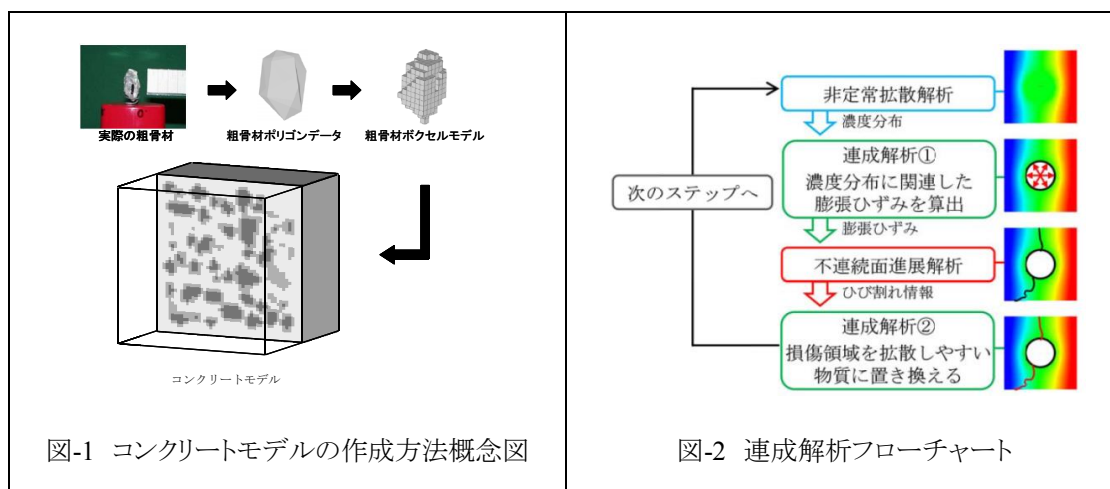
世界的にコンクリート材料は社会基盤を構成する多くの構造物に使用されており、コンクリート構造物の合理的でかつ効率的な維持管理を行うためには、コンクリート構造物の劣化現象を正しく理解し、精度良く再現する数値解析手法の開発が必要である。本研究の対象は、コンクリートの劣化現象の一つであるアルカリシリカ反応(ASR)の膨張予測である。世界的にも ASR の劣化現象を対象に数値解析的な予測手法の研究が行われているが、未だ決定な手法は構築されていない。したがって、本研究で対象としている ASR の劣化予測手法に対する数値解析的な取り組みは非常に意義のあることである。

(3) 研究内容

(3)-1 コンクリートモデル

ここでは、コンクリート中の粗骨材を考慮したコンクリートモデルの作成方法の概念を示す。

コンクリートモデルの作成は、まずはじめに、粗骨材の形状を画像として取り込み、画像から粗骨材の形状を考慮したポリゴンデータを作成する。つぎに、作成した粗骨材のポリゴンデータからボクセル要素で分割した粗骨材ボクセルモデルを作成し、これをコンクリートモデル内に配置し、2層系のコンクリートモデルを作成することができる。図-1 にその概念図を示す。



(3)-2 連成解析手法

本解析は、ボクセルFEMをベースとし、非定常拡散問題と非線形ひび割れ進展問題の両者を連成して行う。ひび割れは、損傷に応じてボクセル要素の剛性を現象させる損傷モデルを導入することで表現し、同時に得られる損傷パラメータを用いて拡散問題における物性値も段階的に変化させ、拡散問題と固体損傷の連成解析手法である。

図-2 に解析フローチャートを示す。連成解析では、最初に非定常拡散問題を解き拡散物質（アルカリイオン）の空間分布を予測する。そして、イオン濃度の空間分布から粗骨材の膨張力を決定する。この際、膨張力によって不連続面と判定される要素は、高い拡散係数に置換し、再び拡散問題を解く。これを繰り返すことで、浸透・拡散に伴う不連続面進展解析を実施する。

(3)-3 数値解析例

図-3 に解析に用いた $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}$ のモデルを示す。1 ボクセル 1 mm^3 であり、粗骨材量を 10% とした。表-1 に各種係数を示す。アルカリ量に応じた膨張ひずみを粗骨材に与え、ASR の膨張を表現した。境界条件は yz 面以外の面に対して面外方向の変位を拘束し、両 yz 面からアルカリを拡散浸透させている。

図-3 解析モデル(40×40×40mm)

表-1 各種係数

	モルタル	粗骨材
拡散係数	$1.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	$1.0 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$
弾性係数	20GPa	60GPa
引張強度	4.0MPa	破壊しない

次に解析結果を示す。図-4, 5 はそれぞれ中央断面の 1 日, 25 日, 30 日, 75 日のアルカリ浸透解析およびひび割れ進展解析の結果である。これよりアルカリの浸透とともに内部のひび割れの進展も確認できる。

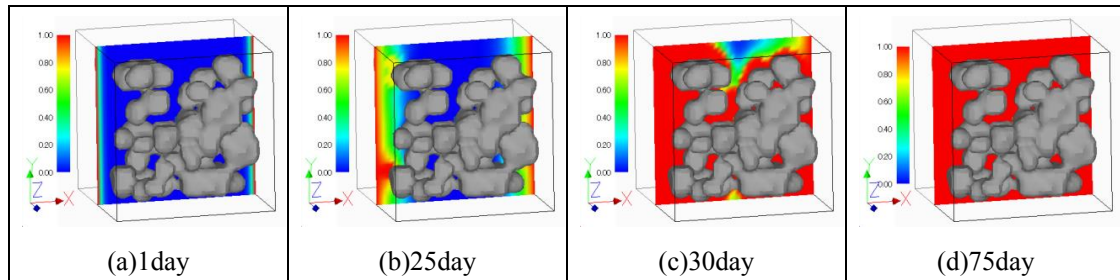


図-4 アルカリ浸透解析

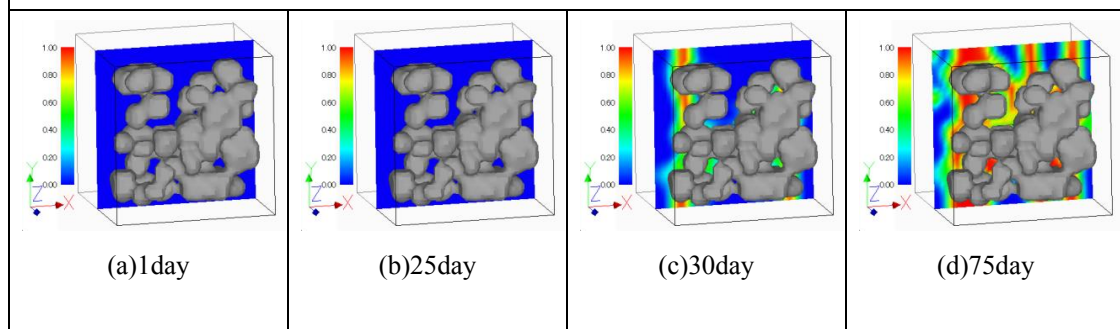


図-5 ひび割れ解析(損傷係数表示)

図-6 には表面ひび割れの状況を示す。反応した骨材の膨張に伴い、無拘束の X 方向に膨張が生じ、30 日で Y 軸に沿ったひび割れが入る。そこからひび割れが進展し、亀甲状のひび割れが確認できる。しかし、今回の解析ではアルカリの消費を考慮しておらず、無限に膨張し、ASR の収束が考慮されていない。化学反応モデルの高度化については、今後の課題である。

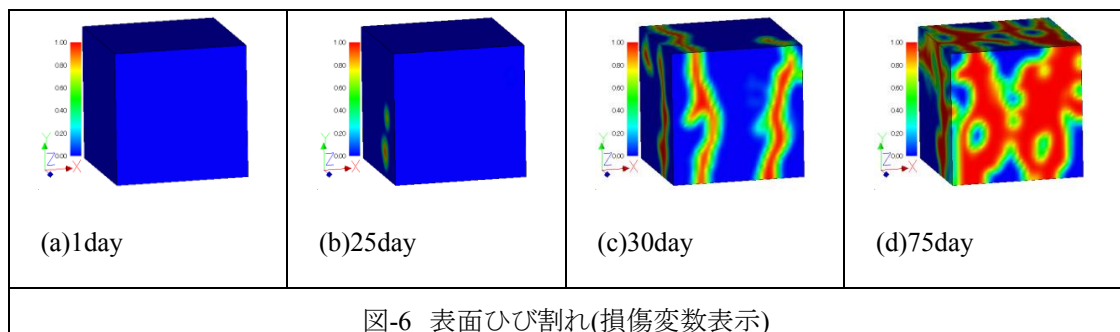


図-6 表面ひび割れ(損傷変数表示)

(4) 平成 26 年度進捗状況

(3)に示した通り、ASR 膨張予測のための数値解析手法の適用性が示された。今後は、大規模

な解析が予想されるため, 並列計算(MPI+OpenMP ハイブリッド)を用いた高速化および解析パラメータを求めるための, 実験をあわせて行う予定である.

なお, 本研究は九州大学工学部地球環境工学科 浅井光輝准教授との共同研究である.

3.1.5. Mudcrack の3次元数値シミュレーション

(1) 目標・計画

地盤の内部には大小様々な亀裂が存在し、それを成す材料は不均質かつ不確実なものである。特に、粘質土壌が乾燥する過程で生じる亀裂は、乾燥収縮亀裂と呼ばれ(以後、Mudcrack と呼ぶ)、田畑や干潟等の地表面だけでなく、地層中でも見ることができる。Mudcrack の進展現象は、極めて複雑な挙動を示すことから、亀裂発生 of 力学的メカニズムに関する系統的な研究例は多くなく、十分に理解されているとは言い難い状況がある。

そこで本研究では、Mudcrack を数値シミュレーションにて再現することを指向し、3次元有限要素法に基づく新たな数値解析手法を開発し、Mudcrack の亀裂進展解析を実施した。また、提案するモデルを検証するために、数値解析により得られた亀裂パターンのフラクタル次元を、実験値と比較することにより、本手法の妥当性を検討した。なお、前年度までに、深層崩壊や表層崩壊を誘発するような様々な形状を有する岩盤(岩山、連峰)や海底地すべり地層のモデル化技術、地盤の流動解析技術を構築したが、本研究は、地盤の内部構造に関する研究となっている。

(2) 意義・国際社会との比較

Mudcrack は、粘質土壌の乾燥過程で生じる乾燥収縮亀裂現象として知られており、不可逆性の非線形現象のひとつである。Mudcrack に関する工学的な問題としては、例えば、一般廃棄物や産業廃棄物、有害廃棄物等の最終処分場にて使用される土壌ライナーに Mudcrack が発生することにより汚染物質が拡散する等を挙げることができ、人間生活の安全・安心の観点からしても極めて重要な問題とされている。また、粘性土に乾燥－湿潤のサイクルを複数回繰り返すと、Mudcrack により発生したブロックが細分化されることが知られており、岩盤風化の本質的な力学的メカニズムのひとつとして考えられている。したがって、Mudcrack の発生メカニズムや亀裂パターンの評価手法を構築することは工学的にも重要な課題であると言える。しかしながら、その力学的メカニズム等の詳細は未だ解明されておらず、材料の種類や環境変数を考慮した検討が必要視されている。一方、破壊力学や流体力学等の様々な分野において、3次元数値解析や大規模解析が研究されているにもかかわらず、Mudcrack の亀裂進展現象の数値解析手法に関する研究は、単純モデルによる研究は存在するが、系統的な詳細モデルについては国際的に見ても見当たらず、未だ達成されていない。したがって、本研究の国際社会における意義は極めて大きい。

(3) 研究内容

本研究では、粘性土内部の水分の蒸発に伴って発生するひずみを乾燥収縮ひずみとし、次式にて定義した。

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^s \quad (1)$$

ここで、 $\boldsymbol{\varepsilon}$: 全ひずみテンソル、 $\boldsymbol{\varepsilon}^e$: 弾性ひずみテンソル、 $\boldsymbol{\varepsilon}^s$: 乾燥収縮ひずみテンソルである。なお、本研究では、 $\boldsymbol{\varepsilon}^s$ を次式にて仮定した。

$$\varepsilon_{ii}^s = - \left(\frac{\exp(-\beta t) - 1}{\exp(-\beta) - 1} \right) ; \quad t = \frac{z}{z_{\max}} \quad (2)$$

ここで、 z : 試料表面からの距離、 z_{\max} : 試料の厚さを意味する。本モデルでは、図-1.1.5-1 に示すように、 β 値が大きい程に表面乾燥が激しく、 β 値が小さい程に表面乾燥が穏やかである状況を模擬している。ポテンシャルエネルギー原理に、式(1), (2)で表される乾燥収縮ひずみを外力項として考慮すると、次式のようにになる。

$$\int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \mathbf{u} dV = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}^s dV \quad (3)$$

ここで V : 物体の体積、 \mathbf{B} : ひずみ-変位マトリックス、 \mathbf{D} : 応力-ひずみマトリックス、 \mathbf{u} : 節点変位ベクトルである。本研究では、これらの式を支配方程式として用い、亀裂進展解析を実施した。なお、亀裂進展解析では、全領域において最大主応力の最大値を静弾性解析にて求め、1 ステップごとに、最大主応力が得られた要素を亀裂要素として解析を進めた。

図-1.1.5-2 及び図-1.1.5-3 に、 $\beta=3.0$ 及び $\beta=-3.0$ の場合の亀裂進展の様子をそれぞれ示す。 β 値によらず、亀裂は約 90° で連結している様子が分かる。これは、実際の地盤でも観察できる現象である。また、 $\beta=3.0$ における亀裂は $\beta=-3.0$ の場合よりも多く分布している。これは、外気温が高い等の影響によって、土壌表面が乾燥し易い状況では、亀裂が多く発生し、多くの Mudblock が生成されることを示唆するものである。このことについては、実験などを組み合わせて本シミュレーション結果を検証していく必要がある。なお、詳細は割愛するが、本シミュレーションによって得られた亀裂パターンのフラクタル次元は約 1.45 次元であり、粘性土(ベントナイト)の実験値: 1.46 次元と近似していることを明記しておく。

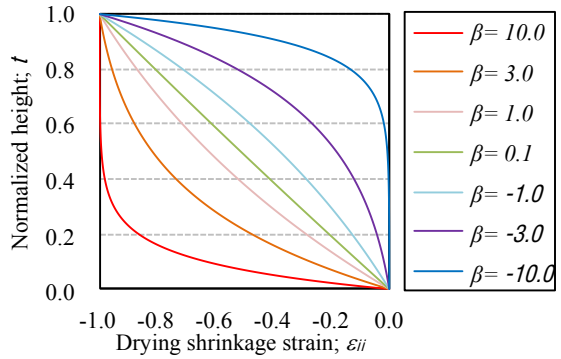
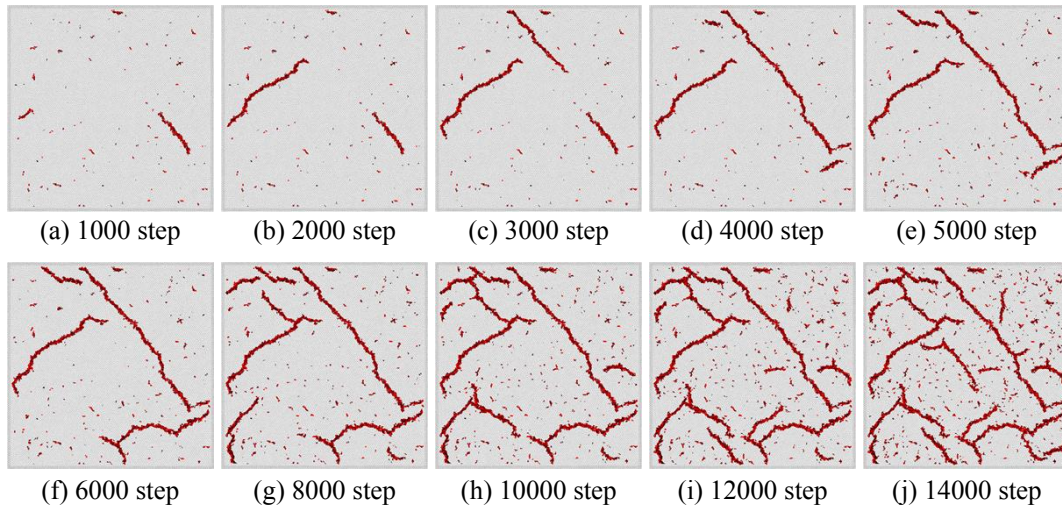
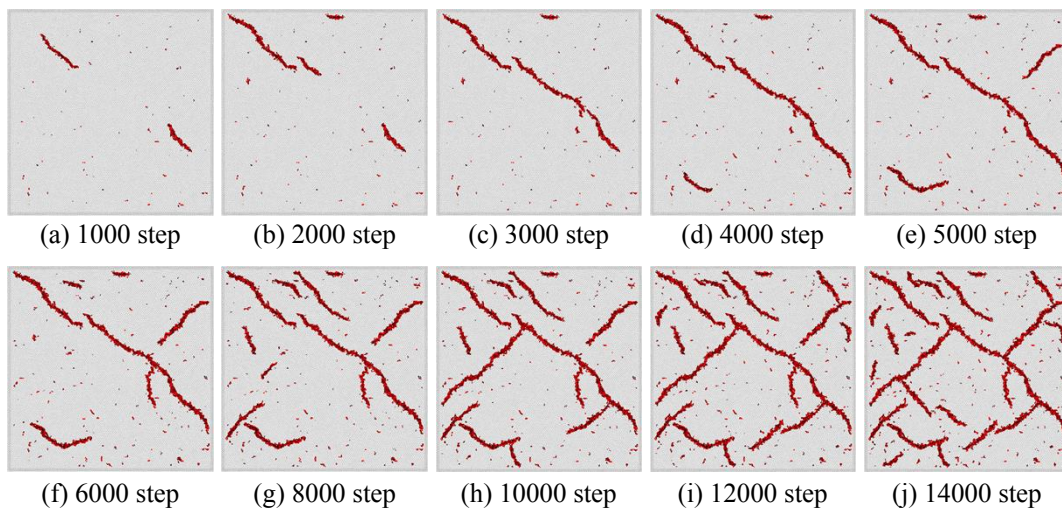


図 1.1.5-1 乾燥収縮ひずみの分布

図 1.1.5-2 亀裂進展パターン ($\beta=3.0$)図 1.1.5-3 亀裂進展パターン ($\beta=-3.0$)

(4) 平成 26 年度進捗状況

今年度は、地盤内部の亀裂分布や亀裂の生成メカニズムを評価できる手法の確立を目的とし、Mudcrack 現象が再現できる 3 次元数値シミュレーション技術を構築した。その結果、観測値と解析結果が同程度の値を示し、その有用性が検証された。今後は、実験値との比較など、更なる検証を進めて行く予定である。

3.2. 大規模並列化グループ

2011 年に京コンピュータが 10 ペタ(Peta: 1 京)フロップス(Flops: Floating Points per second)に達し, TOP500 では2回連続世界1位となり, 2013 年には中国の Tianhe-2 が 33 ペタにより1位を記録し, 次世代スーパーコンピュータは, ペタの次の世代, つまりエクサ(Exa)フロップスを指す時代へと突入している. このことからハードウェアとしてコンピュータの性能が向上するスピードがいかに速いかが分かる. その一方で, これらの大規模なコンピュータ上で動作する効率的なソフトウェアの開発に関しては, その開発スピードもソフトウェアの品質も十分とは言えず, 多くのソフトウェアが 20 世紀の主要なソフトウェアを修正し続けて用いられているのが実情である. 特に, 1970~1980 年台に既に確立されているアルゴリズムに対して, 並列化の実装のみを加えた物が多く見られる. このような背景のもと, 本プロジェクトでは様々な計算機プラットフォーム上で効率的に動作する, 次世代の大規模解析システムを構築するとともに, 常に最先端のスーパーコンピュータ能力を活用するシミュレーション実現を目指す.

今年度は, 以下の項目について報告を行う.

- (1) ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発
- (2) 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築

3.2.1. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発

(1) 目標・計画

本研究では対象問題をある程度限定することで高性能が得られるアプリケーション特化型システム開発を行っていく。対象問題は連続体力学とし、産業界で需要が高い非構造格子並びに自由表面や移動境界問題に重要なメッシュフリー（粒子法を含む）の取り扱いを可能とする。時間方向の非定常性や問題が持つ非線形性を考慮する必要があるが、陰解法ベースの数値解析手法を対象とする。これらに対し、3つの課題(A)DDM 入出力ライブラリ開発、(B)DDM ソルバーライブラリ開発、(C)連続体力学向け DSL 開発に取り組む。本研究で開発されたライブラリを用いて連続体力学系シミュレータの実装と評価も行う予定である。

(2) 意義・国際社会との比較

ポストペタスケール計算を見据えた新技術の開発について、これまで同様汎用向けのライブラリなども開発されるであろうが、それらの利用では、非構造格子問題では高々数パーセントの性能、あるいはそれ以下しか期待できず、連続体力学系シミュレーションに特化したシステム開発が必要と考えられる。そもそも数パーセントの性能でのソフトウェアはペタコンでの運用が認められないという制約もあり、これはポストペタコンについてはさらに厳しくなることも想定される。

連続体力学系シミュレーションは、従来からの FEM, FVM, BEM など非構造格子アプローチに加え、近年ではメッシュフリーや粒子ベース手法による大規模計算の台頭が目覚しく、これらにも対応させ、非構造格子および節点、粒子ベースモデルを統一的に扱えるようにすることで、連続体力学系シミュレーション向けライブラリとして整備されれば、ポストペタコンの連続体力学系シミュレーションでの利用の拡大に大きく貢献することが期待できる。

(3) 研究内容

(a) DDM(Domain Decomposition Method, 領域分割法)入出力ライブラリ

本研究項目は、マルチレベル領域分割法に基づく多階層計算格子データの生成、操作および I/O ライブラリ開発を行うものである。一般的なアプリケーションシステムは、プレ・ソルバー・ポスト処理に分けられるが、これまでは最も高負荷であるソルバー部のみがスパコン上に実装されてきた。ポストペタコンでは、全ての処理をスパコン上に実装し、並列化することが当然求められてくる。しかし、従来の枠組みで並列化したのみでは、それに伴い生成される大規模な数値計算データ処理に多くの時間が割かれてしまうことが予想される。そこで、これまで研究代表者らがソルバー部の並列化手法として圧倒的な高い並列効率を示してきた階層型領域分割法の技術を応用した、マルチレベル領域分割法によるデータ処理システムの開発を行う。

(b) DDM ソルバーライブラリ

本研究項目は、マルチレベル領域分割法に基づく連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メ

メモリ並列ライブラリ開発を行うものである。一般的な線形代数ソルバーは、アセンブリされた連立一次方程式を入力とするため、FEM におけるメッシュ情報など本来解析手法が持つ特徴を利用せずに実装されてきた。それらは共有メモリ環境及びその中で解くことができる解析規模では問題となりにくい、ポストペタコンで対象とする解析規模では入力データから解析手法まで含めた分散メモリ環境向け並列化技術が必要となることが予想される。そこで、提案するマルチレベル DDM による多階層型データ構造を活用した、大規模な線形代数ソルバーの分散メモリ環境に適したライブラリを開発を行う。

これは、

- ・多階層領域分割に基づく分散メモリ並列向け線形代数ソルバーの構築
- ・多階層領域分割に基づくマルチレベルコースグリッド修正法の開発
- ・構造・熱・流体・磁場などを対象とする物理現象毎に特化したコースグリッド修正法の開発

を含む。つまり、これまで FEM を対象に研究を進めてきた DDM をマルチレベルに拡張し、さらに FVM, BEM, メッシュフリー, 節点ベース FEM や粒子法など連続体力学全般に適用する技術開発である。また、マルチレベルな領域分割を利用し、線形代数ソルバーにおける前処理手法について、研究代表者らがこれまで研究を進めてきた高速かつ安定した収束性を持つ反復解法である BDD (Balancing Domain Decomposition) 法や BDDC (Balancing Domain Decomposition by Constraints) 法をマルチレベルに拡張し、さらに粒子法などへの応用も進める。開発システムは線形代数ライブラリとして整備していく。

(c) 連続体力学向け DSL (Domain Specific Language, 問題領域専用言語)

本研究項目は、連続体力学向け DSL の開発と、それに対応した多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成の開発を行うものである。ポストペタコンのアーキテクチャでは、計算ノード間の並列性だけでなく計算ノード内での効率も重視される。各計算ノードはメニーコアや GPU, SIMD 拡張命令といった多種多様なアクセラレータを有し、これらを有効利用することが望まれる。従来のプログラミング言語やコンパイラ最適化技術での対処は不十分であり、現状ではそれぞれのアクセラレータごとに人手で最適化された個別の実装が必要とされている。一方、数値シミュレーションコードの場合、特に連続体力学分野においては、そのアプリケーションロジックは物理現象や数値解析スキームであり、これは数学表現、特に行列やテンソルで表記されることが多い。よって、連続体物理モデルを DSL 化して、数学記述 (例えば、行列、テンソルの式を `tex` 形式で記述) から各アクセラレータタイプ向けに最適化されたライブラリを `call` するコードを生成するコードジェネレータあるいはトランスレータアプローチが有効であると考えられ、これを実現するシステムの開発を行う。

(4) 平成 26 年度進捗状況

(a) DDM 入出力ライブラリ

平成 26 年度は、次の研究項目の研究開発が進められた。

1. 多階層メッシュ・メッシュフリー対応 AdvIO

平成 26 年度は、本研究項目の開発を大幅に進めた。非構造格子向け領域分割ツールに、

多階層の領域分割を並列計算機上で行える機能を付け加えた[5]。多階層に領域分割されたメッシュをソルバーに受け渡すためのデータ仕様を検討し始め完成しつつある。また、大規模データ向け I/O ライブラリの開発に一定の成果がでたため、今後、本 I/O ライブラリは β 版公開を行う予定である。

2. メッシュ向け DDM 圧縮

平成 26 年度は、非構造格子向け DDM 圧縮技術の実装を開始し、FEM による熱伝導解析を対象に基本機能を開発した。今後、大規模解析への適用を開始する予定である。

3. 並列 IO・DDM 圧縮対応 AdvIO

平成 24 年度に開発開始した VSCG の β 版を完成させ、高精細可視化ライブラリ LexADV_VSCG として公開する準備を行った。さらに、粒子向け可視化機能を強化し、半透明可視化機能やポリゴンとの融合可視化機能の開発を進めている。また、LexADV_VSCG を高並列環境で実行するための、高精細並列オフライン可視化ツール LexADV_WOVis を開発し、公開する準備を行った。さらに、LexADV_WOVis の β テストとして、HPCI 戦略分野 3 で実施された 2 億自由度規模超高層ビル地震応答シミュレーション結果の京による並列可視化を行い、図 1 に示す 1 万×1 万ピクセルの高解像度可視化に成功した。

今後は「DDM 入出力ライブラリ」 β 版に対する、ユーザーによる性能評価を行う予定である。

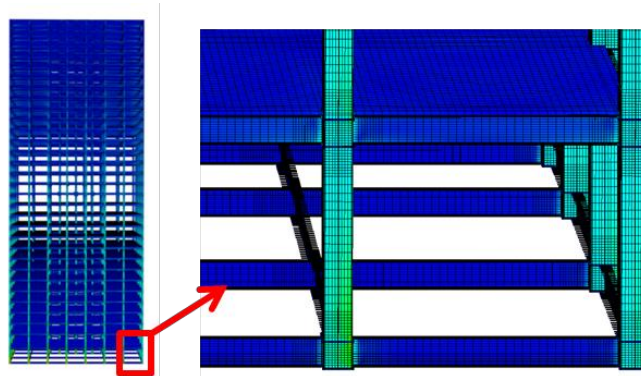


図 1 超高層ビル地震応答シミュレーションの高解像度可視化例

(b) DDM ソルバーライブラリ

平成 26 年度は、次の研究項目の研究開発が進められた。

1. メッシュ向け DDM ソルバー

非構造格子向け DDM 反復法ライブラリを開発を継続して進め、DDM に基づいた 2 種類の反復法(DDM-CR 法, DDM-MINRES 法)と 1 種類の前処理(N-N 前処理)の実装を完成させた。LexADV_IsDDM として、 β 版公開を行う予定である。また、DDM ソルバーライブラリ LexADV_TryDDM の β 版を完成させ、公開する準備を行った。本ライブラリは、既存の反復

法ライブラリユーザーに対して DDM 反復法の試験環境を提供するものであり、ユーザーニーズのフィードバックを可能とする仕組みでもある。本ライブラリを用いることで、これまで困難であった DDM 向け前処理と ILU や SSOR などの一般的な前処理との性能比較も可能となった。

また、電磁場ソルバー等で需要がある複素数への対応を進めた。C 言語における複素数型に関して複数の実装を行い、性能評価を行った。さらに、アルゴリズムの見直しによって DDM-COCG 法の部分領域問題ソルバーに直接法を適用可能とするなど、最適化を行った。これにより、時間調和渦電流問題解析において、東京大学 FX10 の 96 ノードでピーク性能比 0.9%から 7%へ向上させることに成功した。

2. 熱・構造 FEM 向け多階層前処理

平成 24 年度に提案した異種材料混在モデルに適した BDD 前処理法について、複数のモデルで追加実験を行い、モデルによらずに性能改善の効果が得られることが分かった。また、BDD 前処理の多階層化について継続的に開発を行っている。

3. 流れ・電磁界 FEM 向け多階層前処理

平成 26 年度は、電磁界問題向けに BDD 前処理の統一的構築方法を提案し、開発を継続的に行った。

4. メッシュ・メッシュフリー向け多階層 DDM

平成 24 年度から開発を続けていた MPS 陽解法(粒子法)向けライブラリが完成した。流体と多数の剛体との連成解析が新たな機能として追加された。本粒子法ライブラリは、LexADV_EMPS として β 版公開を行う予定である。また、粒子型解法の基礎となる近似作用素に関して、数学的な打ち切り誤差評価や、より高精度な近似手法の提案を行った。

(c) 連続体力学向け DSL

平成 26 年度は、次の研究項目の研究開発が進められた。

1. DSL トランスレータ

平成 24 年度から引き続き、豊田中央研究所や東京理科大学、理化学研究所、JAMSTEC、JAXA、JAEA、東京大学生産技術研究所、東京大学地震研究所や国内スパコンセンターなどへの普及活動を積極的に行い、理化学研究所 京コンピュータ、東京大学 FX10、T2K 及び GPU クラス、九州大学 FX10、JAMSTEC ES2、筑波大学 T2K、名古屋大学 FX1、名古屋大学 CX400、名古屋大学 FX10、京都大学 XE6、九州大学 CX400、九州大学 FX10 などの利用実績を築きつつある。更に、HPC 技術の産業界向け応用に関する国際ワークショップに参加し、韓国 KiSTi における HPC クラウド開発への協力を行うことで、海外スパコンセンターへの普及活動も継続して行っている。この活動の一環として、5th International Industrial Supercomputing Workshop が平成 26 年 10 月 2-3 日に東洋大学で開催された。

2. SIMD・GPU 向け最適化 AutoMT

平成 26 年度は、マルチコア及び SIMD 命令セット向け最適化ライブラリを開発を更に進め

た. 開発中の①構造解析・要素剛性, ②非線形材料構成則, ③熱伝導解析・要素剛性のそれぞれの行列テンソルライブラリでは, Intel (Sandy Bridge)でピーク性能比①60%, ②27%, ③50%を達成し, 東大 FX10 ではピーク性能比①35%, ②14%, ③38%を達成することに成功した. また, GPU・MIC 向けの開発を重点的に行った. パフォーマンスはまだ出せていないが, GPU では CUDA 及び OpenACC, MIC ではネイティブ実装及びオフロード実装での実装に成功した.

3.2.2. 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築

(1) 目標・計画

(A) 静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装

磁場解析の分野ではこれまで約20年近く、東京大学の菊地文雄名誉教授が線形静磁場問題で確立した独創的な混合法的定式化を自然な形で3次元渦電流問題や3次元非線形静磁場問題に独自の工夫を加えて拡張し、ADVENTURE_Magneticを公開してきた。ごく最近部分領域問題を直接法で解くことにより1億実自由度や約5,000万複素自由度の大規模解析を可能にした魅力を次世代計算機で更に活かすためにはもう1桁程度の計算速度の改善が望ましい状況がある(速ければ速いほど、実際の設計に用いる計算モデルを更に詳細化できる)。本研究では、この高速化に対応する研究を行い、もう1桁高速化したソフトウェアを公開していく。ここに述べた手法に基づく磁場解析ソフトウェアは、国産市販ソフトウェアは言うまでもなく国際的に見てもあまり例がない。また現在数百万自由度規模程度で留まっている電磁場解析の規模の拡大によって現時点ですでにブレークスルーを引き起こした研究になっている。実際、大規模解析では我々の現時点のレベルを目標にする研究チームもいくつか現れているが、本研究では得意とする大規模化に更に高速性を加味することにより、追随者の上を行くPerfect Only Oneを目指す。

(B) 熱対流解析コードの機能強化

非圧縮性粘性流解析・熱対流解析の分野では現時点のADVENTURE_sFlowをもとに計算サービスを行っているベンチャー企業も現われている。ADVENTURE_sFlowでは磁場解析や構造解析と同様な手法で計算しているので、高速化の検討を共通の課題として行え、入力データの共有化がしやすく連成解析が行いやすいという特長がある。低炭素社会向けシミュレーション技術に応用分野を特化し解析機能を限定してでも、この特長を早く引き出したいと考えている。

(2) 意義・国際社会との比較

3次元電磁場の有限要素解析はこれまでやや試行錯誤的に行われており、信頼のおける数値解法が未だ十分確立されていない状況にある。このようななかで、我々は菊地理論をベースに、工学的応用を展開するという形を採っており、国際的に見ても極めてユニークな注目すべき研究を展開している。これまでに開発されてきた文部科学省支援研究による電磁場解析ソフトウェアの骨格を一貫して提供してきたという自負もある。今後の低炭素社会に向けて電気自動車の利用が推進されているが、電磁環境適合性(EMC)のためにも電磁場解析の有用性は増している。非圧縮性粘性流・熱対流や固体力学の大規模解析も統一的な手法で研究を進めているので、それらとの連成解析が有利に行えるという利点も持っている。

(3) 研究内容**(A) 静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装**

3次元磁場の有限要素法による解析, 特に3次元渦電流解析(複素自由度4,355万の問題が32台のPCクラスタを用い5時間弱で解けている)並びに1億自由度を最近可能にした3次元非線形静磁場解析に対しては, 領域分割法を用いる際の数値計算上の諸問題を以下の更なる高速化に関する課題に焦点を絞って研究する.

「離散化に伴い生じる超大規模(1億自由度以上)の疎な対称連立1次方程式と連立非線形方程式に対する領域分割法を意識した効率的な数値解法を確立し, 特にもう1桁の高速化を可能にする前処理方法を確立する.」

(B) 熱対流解析コードの機能強化

3次元非圧縮性粘性流解析についてはこれまでの内容を発展させた新アルゴリズムの導入を図る. 2006年7月に公開したモジュールADVENTURE_sFlowはその後水素利用社会向けシミュレーション技術でも応用があったので, 熱対流解析の基本機能が非定常解析機能も含めて追加され, 前処理機能の強化による高速化が実現されたため, 実用レベルの有効性をチェックする段階になっている. 非定常解析機能ではStokes問題のみならず, Navier-Stokes問題に対しても特性曲線法の活用により対称な連立1次方程式ソルバーを活用できることがポイントになっている.

(4) 平成 26 年度進捗状況**(A) 静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装**

今年度はBDD 前処理の実装実現のために1コア処理に限定して三つの課題を設定した. 一つはシュアコンプリメント行列 S とベクトル p の積 q を計算する部分を独立して利用可能にすること, 二つ目はノイマンノイマン前処理を実装させること ADVENTURE_sFlow, 三つ目はコース行列を作成し, それを既存の平行ソルバーで解くことである. この三つが実現できれば, BDDの実装はほとんど実現できると言ってよいほどの重要な3項目になる. ノイマンノイマン前処理は2005年に一度成功した実績があるが当時の記録が紛失しており, 新たな開発を行うことになった. 現時点ではコードの骨格はできたが, 残念ながら効果が全く出していない. 部分領域数が大きくなると手法自体の特徴として効果が出ないのか, 何かミスをしているのかを見極める必要がある. 3番目のコース行列作成もテストランは行えるようになったが, 今後もう少し検討が必要と思われる. 予想外に時間がかかっているのは最初の $q=Sp$ の計算であり, いくつか試みたがまだうまくいっていない. 年度末までに LexADV の TryDDM を試して, 1 コアの BDD 前処理に見通しをつけたいと考えている.

(B) 熱対流解析コードの機能強化

このテーマは今年度の課題として公開用ドキュメントの整備以外に以下の4課題を設定した. す

なわち ADVENTURE_sFlow への機能強化として

- ・熱方程式部分への DDM フレームワークの適用
- ・熱流束境界条件入力機能の追加
- ・熱伝達境界条件入力機能の追加
- ・BDD 前処理における通信処理改善の検討

を図るものである。最初の DDM フレームワークの適用は(1)のテーマの A)の研究テーマと連携しながら、開発ライブラリのプロトタイプ (LexADV の TryDDM) のテストを兼ねたものであり、一応利用可能になった。2 番目, 3 番目のテーマは 1 番目のテーマが可能になった時点で, DDM フレームワークでの実現が可能になった。4 番目は派生した問題を解決しながら検討を続けた結果, これも可能になった。以上の成果を踏まえて ADVENTURE_sFlow の Ver.1.0 の年度内公開に向けて準備を進めている

3.3. 新規実験計測グループ

3.3.1. 流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムを用いたフラッタ特性の確認実験

(1) 目標・計画

流体-構造連成解析手法を検証するための実証試験として、低速風洞試験を行う。図1は風洞試験装置システムの概要図である。風路内部に実験模型を設置して試験を行い、数値解析の検証用データを提供する。また本研究を通じて、新しい計測手法、解析手法の提案を目指す。

(2) 意義・国際社会との比較

流体-構造連成問題について数値計算、実験は多数行われているが、その殆どが単独に行われたものである。そのため文献ではいずれかの結果が引用される場合が多く、両者の信頼性を保証した上で、結果を議論した例が見られないのが現状である。本研究では、数値計算結果の信頼性を検証するためのデータを提供することを主眼として、様々な実験に取り組む。これまで行われていなかった数値計算と実験の両方を実施することで、計算上の問題点、実験上の問題点を明らかにする。

(3) 研究内容

2012 年度は風洞試験装置システムの整備期間であり、2013 年度は基礎試験、2014 年度以降は応用的な実験を検討している。基礎試験ではシートフラッタ実験を行い、応用的実験では航空機模型のフラッタ実験、フラッタの工学的利用や弾性皮膜による流体抵抗低減を目指した研究を行う予定である。Figure 1 は風洞試験装置の概要図である。実証試験では実験模型の運動解析、空気力計測、PIV流れ解析を組み合わせた流体実験を行う。

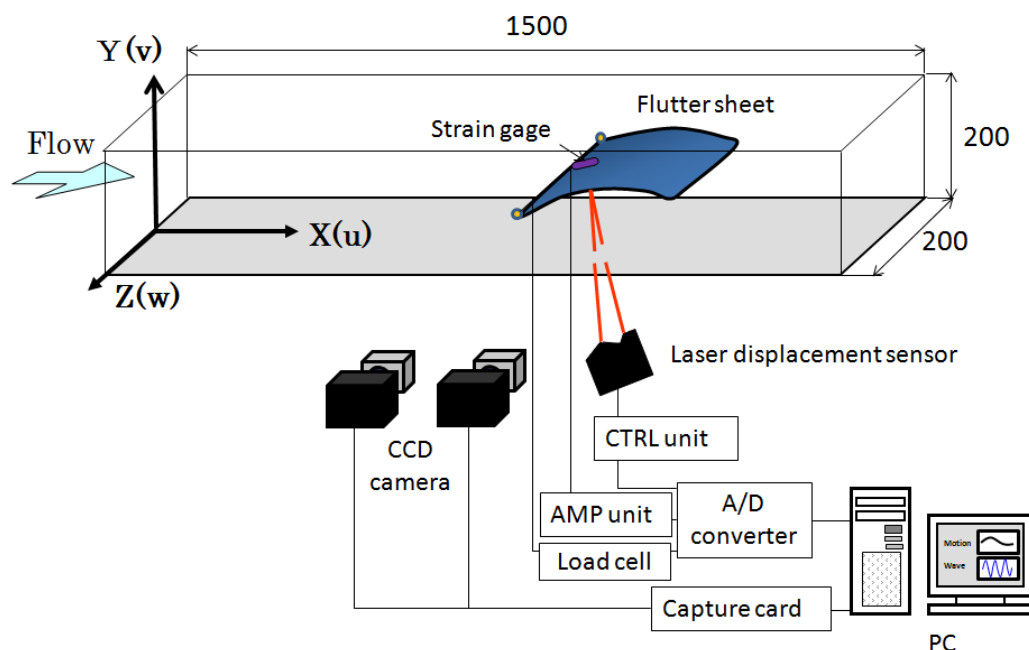


Fig. 1 Low-speed wind-tunnel system.

本風洞試験装置により実施できる試験内容は以下の通りである。

- [1] 高速度カメラによる3次元運動解析
- [2] レーザ変位計による変位測定
- [3] 6分力天秤による空気力・モーメント測定
- [4] ひずみゲージ測定
- [5] 煙発生器による流れの可視化
- [6] PIV解析による流れの可視化

(4) 平成 26 年度進捗状況

昨年度はフラッタ試験装置を製作し、シートフラッタの周波数特性と3次元運動解析システムの動作試験を行った。今年度はシート材の材質、サイズに対する周波数特性の詳細を調べた。また数値計算と比較するための実験も行った(この内容については解析手法開発グループの報告でまとめている)。

(4)-1 フラッタ限界風速(シート材の長さ L の影響)

風速の上昇時と下降時で、フラッタ現象は発生する速度と終了する速度が異なる。本節では、シート材の長さ L と風速の関係について、ウレタンゴムとネオプレンゴムの結果を考察する。Tables 1, 2 はシート材の長さに対するフラッタ開始風速と終了風速を示している。これらの結果から、シート材の長さが短いほどフラッタ開始と終了の風速が増すことがわかる。Figs.2, 3 は Tables 1, 2 の結果を

グラフ化したものである。シート材の長さが長くなるにつれて、フラッタが発生しやすくなる。またシート材の長さを 100mm から 150mm に変化させるとフラッタ限界風速が大きく変化し、それ以降はシート材が長くなるにつれて速度の変化率は鈍化していくことがわかる。Fig. 2 からウレタンゴムのフラッタ限界風速は単調減少しているが、ネオプレンゴムのフラッタ限界風速はある一定速度に漸近しており、一様にフラッタが発生しやすくなるとは限らないことが分かる。

Table 1 Critical flutter speed (urethane-rubber). Table 2 Critical flutter speed (neoprene rubber).

Sheet length [mm]	Start speed [m/s]	End speed [m/s]	Sheet length [mm]	Start speed [m/s]	End speed [m/s]
100	21.40	19.95	100	15.77	8.32
150	15.60	11.22	150	8.83	5.39
200	10.48	7.75	200	7.14	3.67
300	7.04	4.04	300	6.27	4.79

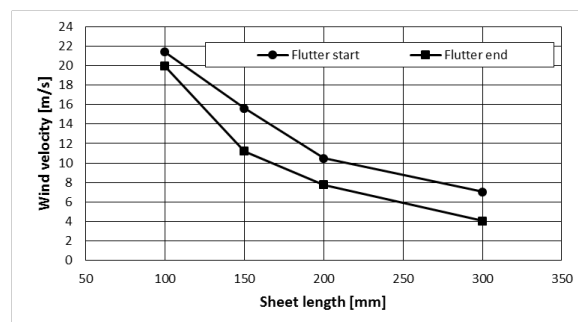


Fig.2 Critical flutter speed of urethane rubber.

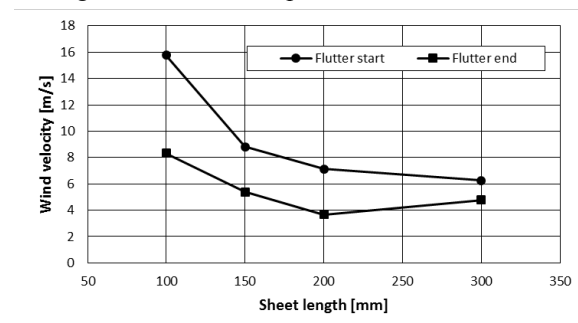


Fig.3 Critical flutter speed of neoprene rubber.

(4)-2 フラッタ限界風速(シート材の厚さ t の影響)

Table 3, Fig.4, 5 はネオプレンゴムに関するシート材の厚さ t とフラッタ限界風速の関係を示している。シート材の厚さは 0.3mm から 1.0mm まで変化させた。

Table 2 を見ると、シート材の厚さが増すとフラッタ限界風速が増加する傾向にあることが分かる。また、シート材の長さが増すと 100, 150, 200mm ではフラッタ限界風速は減少する傾向にある。すなわち、シート材の長さが長いほどフラッタが発生しやすいことが伺える。Fig. 4, 5 はシート材の厚さに対するフラッタ限界風速の変化を、シート材の長さについて整理している。長さ 100mm の場合は厚さが増すとフラッタ限界風速の増加が顕著であるが、それ以外の長さでは厚さが増すと一定の風速に近づいているように見える。Fig. 5 は 100mm 以外の $t = 0.8\text{mm}$ の結果が読み取りにくい、

Fig. 4 と同様に一定の風速に近づいているように考えられる. シート材の $L = 300\text{mm}$, $t = 0.3\text{mm}$ の結果は擾乱の影響を受けやすくなるため, フラッタが発生しやすくなる. そのため, $L = 150, 200\text{mm}$, $t = 0.3\text{mm}$ の結果と比べるとフラッタ限界風速が低下している.

Table 3 を見て分かるように, シート材の厚さが薄く, 長さが長いほどフラッタが開始しやすくなり, また, フラッタ開始風速と終了風速の差も小さくなる. つまり, フラッタが発生しやすいと言える. すなわち, 以上の結果からフラッタ現象を抑えるには, シート材の厚さを増して, 長さを短くすると良いと考えられる.

Table 3 Comparison of flutter velocities with different thickness for increasing and decreasing flow speeds.

	100mm		150mm		200mm		300mm	
thickness	Start	End	Start	End	Start	End	Start	End
0.3mm	5.53	3.67	2.97	2.59	2.22	1.28	4.25	3.34
0.5mm	10.62	5.49	7.55	4.65	6.23	2.80	5.70	4.28
0.8mm	12.47	6.94	7.89	3.98	7.51	3.74	6.17	4.11
1.0mm	15.77	8.32	8.83	5.39	7.14	3.67	6.27	4.79

Table 4 Comparison of flutter velocities with different thickness for increasing and decreasing flow speeds.

	100mm		150mm		200mm		300mm	
thickness	Start	End	Start	End	Start	End	Start	End
0.3mm	5.53	3.67	2.97	2.59	2.22	1.28	4.25	3.34
0.5mm	10.62	5.49	7.55	4.65	6.23	2.80	5.70	4.28
0.8mm	12.47	6.94	7.89	3.98	7.51	3.74	6.17	4.11
1.0mm	15.77	8.32	8.83	5.39	7.14	3.67	6.27	4.79

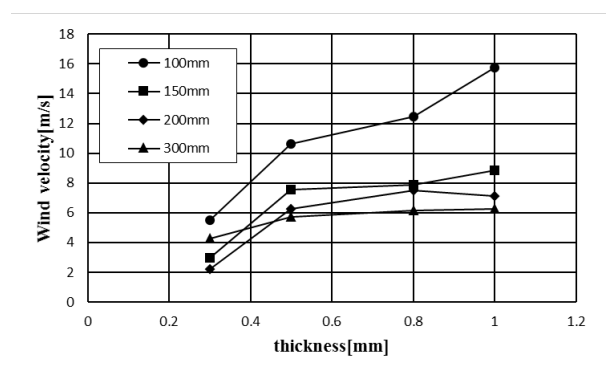


Fig.4 Flutter velocity with different thickness for increasing flow speed.

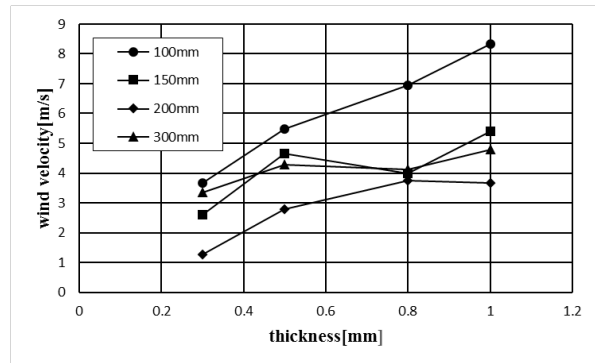


Fig.5 Flutter velocity with different thickness for decreasing flow speed.

(4)-3 フラッタ周波数特性(材質による比較)

Fig. 6 は $L = 150\text{mm}$, $t = \text{mm}$ のウレタンゴムの周波数特性を示している. 回転軸から 25mm, 40mm, 55mm, 70mm, 85mm 下流の5点について, レーザ変位計を用いてシート材の変位を測定し, FFT 解析を行った. 場所によらず, どの位置でも同じ周波数でピークが得られていることから, 計測しやすい 25mm の位置で測定を行った.

シート材の材質と大きさを変化させて, 風速と振動数の関係を比較した結果を Fig. 10 に示す. 一般に塩化ビニルは黒天然ゴムに比べ硬度, ヤング率が高い. そのため, 塩化ビニルはフラッタしにくく, フラッタ開始速度と終了速度の幅が大きい. 一方, 天然ゴムやネオプレンはフラッタ開始速度が塩化ビニルの $L=300\text{mm}$ の結果よりも低くなっている. これはヤング率が低いため, フラッタが発生しやすいからと考えられる. 材質が等しい場合, シート材の長さが長くなるとフラッタ限界風速と振動数が減少していくと共に, フラッタ開始速度と終了速度の幅が狭まることが分かる. また, ヤング率の高い塩化ビニルやウレタンゴムの方が, ヤング率の低い天然ゴム, ネオプレンゴムよりも振動数が増しており, ゴムの硬さがフラッタの振動数に関係していることが分かる.

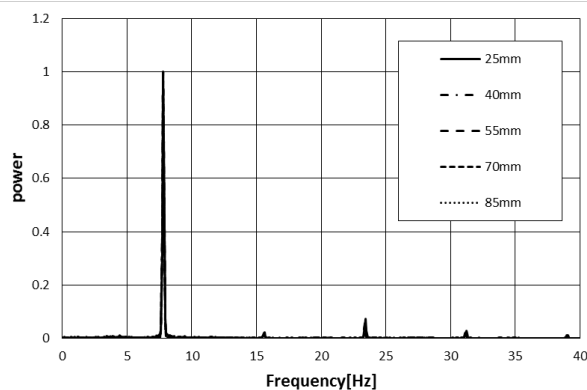


Fig.6 Power spectrum with different length.

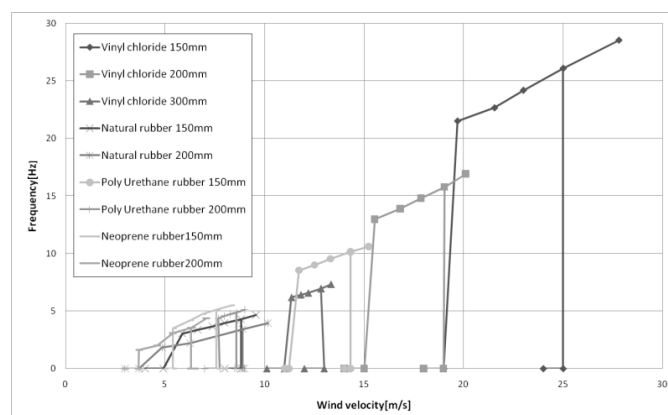


Fig. 7 Characteristics of flutter frequency with different sheet materials.

(4)-4 シート材のフラッタ運動

Fig. 8 はフラッタ運動しているシート材の瞬間画像を示している. シート材の材質は塩化ビニル ($L=150\text{mm}$) を PVC, フッ素ゴム ($L=150, 200\text{mm}$) を FPM で示した. フッ素ゴムに関しては風速によるシート材の運動の違いも示した. Fig. 8 からシート材の材質により, 風速, シート長により振動パターンが異なることがわかる. シート材のフラッタ周波数も同様に風速, シートサイズ, 材質によって異なっている.

実験に使用したシート材のうち代表的なものについて, 3 次元運動解析を行った(Fig.9). シート材の表面には 13 個のマーキングを施しており, ステレオ撮影によりフラッタ運動の軌跡を追跡した. シート材の材質は塩化ビニル, シート材の大きさは $L = 300\text{mm}$, $t = 0.5\text{mm}$ であり, 振動モードを調べるために異なる風速 ($U = 10.8, 13.3[\text{m/s}]$) で追跡を行った.

風速が増すと振動モードと振幅が変化する. 回転軸から最も下流の 3 点の軌跡を比較すると, 顕著な違いを確認できる. 3 次元運動解析の結果から, 軸から離れるにつれ規則的な軌道を描いている. さらに風速を上げるとシート材の変位が増すため, 軌跡は大きくなる. また固定点から離れるに従い 8 の字を描いて周期的に振動していることがわかる.

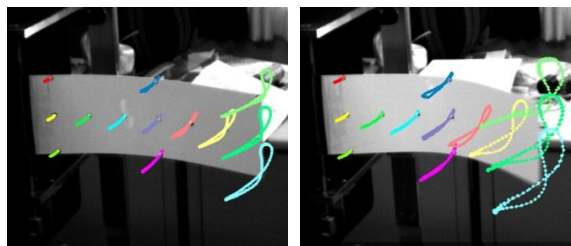


(a)PVC 150[mm],U=18.2[m/s]. (b) FPM200[mm],U=15[m/s].



(c) FPM 150[mm],U=15[m/s]. (d) FPM 150[mm],U=5[m/s].

Fig.8 Comparison of flutter mode.



(a) $U=10.8$ [m/s]. (b) $U=13.3$ [m/s].

Fig. 9 Trajectory of the marker point of the sheet material.

(4)-5 無次元周波数特性

Fig.10 は塩化ビニル(PVC)と天然ゴム(NR)のフラッタ周波数を、レイノルズ数 Re とストローハル数 St によって無次元化して整理したグラフを示している. 流れ方向のシート長さ L を代表長さとして 150, 200, 300mm と変化させ, その時における振動数と流速の関係を示している.

Fig.10 を見ると塩化ビニルの値はレイノルズ数に対してストローハル数は一定である. また天然ゴムの結果も 300mm を除いて一定である. これはフラッタ周波数と流速の増加が比例することを意味する. $L=300mm$ の結果に関してはシート長さが長すぎたため, フラッタが不規則であったため, 一定値になっていない. しかし, どちらの結果もレイノルズ数に対してストローハル数が一定となる範囲が存在することが分かる.

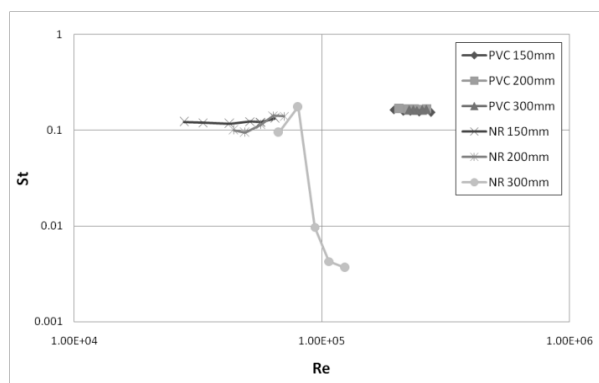


Fig. 10 Non-dimensional characteristics of flutter frequency.

(4)-6 まとめ

シート材の特性によりフラッタ発生条件は以下のように整理できる。シート長さを長くする、もしくはシート材を薄くすると、フラッタが発生しやすくなることが確認できた。また、シート材の剛性を下げていくとフラッタが発生しやすくなる傾向があることが分かった。風速を増すことにより、フラッタ周波数は上昇し、振幅も大きくなる。フラッタ発生時は無次元周波数 St が Re によらず一定になることから、風速の上昇に伴いフラッタ周波数も比例して増すことがわかった。

参考文献

- 1) 黒川雄太, フラッタを生じる旗に作用する風荷重測定: その 2 重量比およびアスペクト比が風荷重に与える影響(膜構造:風洞,構造 I), 日本建築学会学術講演梗概集, B-1, (2007).
- 2) 伊藤憲一, 剛体と弾性体を用いた翼のフラッタ特性に関する研究(GS 流体力学(流体計測,翼など)), 日本機械学会, 東海支部総会講演会講演論文集,(2009).
- 3) 小河利行, フラッタを生じる旗に作用する風荷重測定, 日本建築学会構造工学論文集, B, (2007)
- 4) 吉村友里, フラッタを生じる旗に作用する風荷重測定, 日本建築学会学術講演梗概集, B, (2006).

3.3.2. 画像処理を用いた野球ボールに働く空気力計測

(1) 目標・計画

運動する物体に作用する空気力特性を把握することは流体－構造連成解析問題の課題の一つである。風洞試験では一定風速で実験が行われることが殆どであるため、定風速下での空気力特性は系統的に整理されているが、加速度運動する物体に作用する空気力特性は調べられていない。そこで、本研究では、加速度運動する物体に作用する空気力を測定し、定速度下における空気力特性と比較することで、加速度運動する際の効果を系統的に整理することを目的としている。2014年度は実験システムの構築を行い、ボールなどの単純形状で実験を行う。2015年度以降はロケット模型に対して作用する空気力特性を調べ、その特徴を明らかにする。

(2) 意義・国際社会との比較

物体に作用する空気力特性を調べる風洞実験、数値計算は多数行われているが、殆どの研究が一定速度での解析であり、本研究で目的としている加速度運動時の空気力特性を調べた研究例は数少ない。本研究では、加速度運動する物体に作用する空気力を実験的に測定し、その特性を明らかにすることが目的である。本研究の成果は、移動するビークルを設計する上で、渋滞とは異なる新機体形状を提案するために活かされるものと考えられる。

(3) 研究内容

球技で使用されるボールに働く空気力特性やボール周りの流れの特性を調べることは、流体力学において興味深い研究対象の一つであり、これまでに球技で使用されているボールについて多くの研究例がある。特に、野球ボールにおいては実験的研究、数値的研究が盛んに行われている。しかし、実験的研究の多くは風洞装置を使用して行われたものであり⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾、一定風速の下で試験されている。野球ボールは投手の手を離れると空気抵抗や重力、ボールの回転により発生する空気力によって軌道が変化する。ボールの抵抗係数は、球速により変化するが、実際に投手が投げる軌道の球速変化の効果を空気力パラメータに考慮した研究例は、著者らが調べた限り数少ない^(6,7)。このような背景から、実際の投球時における野球ボールについて加速度依存性を考慮した空気力特性を明らかにする必要がある。

2014年度は基礎試験としてピッチングマシンによるボールの射出実験を行い、加速度運動する物体の空気力特性を調べる。2015年度以降は宇宙機模型の射出実験を行い、機体に作用する空気力を加速度と速度をパラメータとして調べ、機体設計に応用するための指針を得る。

(4) 平成 26 年度進捗状況

2014年度はピッチングマシンにより野球ボールとラクロスボールを射出して、その運動の画像解析から空気力特性を調べる。2015年度以降はロケット模型の射出実験を行い、加速度運動する機体の空気力特性を把握することで、新機体形状の提案に活かしたいと考えている。

(4)-1 実験装置の概要

本実験では、投手の投球軌道を再現するために、日本 JUGS 社のオールラウンドピッチングマシンを使用した。実験の概要図を Fig.1 に示す。ピッチングマシンからボールを打ち出し、その軌道を 2 台のハイスピードカメラで撮影した。打ち出されたボールの並進運動の撮影にはノビテック社の

Phantom Miro M/LC310, 回転運動の撮影にはノビテック社の Phantom V4.2 を使用した. フレームレートはそれぞれ 1000[fps]に設定し撮影を行った. ハイスピードカメラはそれぞれパソコンに接続されており, 撮影した動画はパソコンに保存される.

実験条件はピッチングマシンの2つのホイールを地面と垂直になるようにし, 上のホイールのダイヤル設定を 40~60, 下のホイールのダイヤル設定を 100 に固定し, ボールにバックスピがかかるよう設定した. ボールを打ち出す際は日本において最も一般的なストレートであるフォーシームの回転になるよう縫い目の角度を調整した.

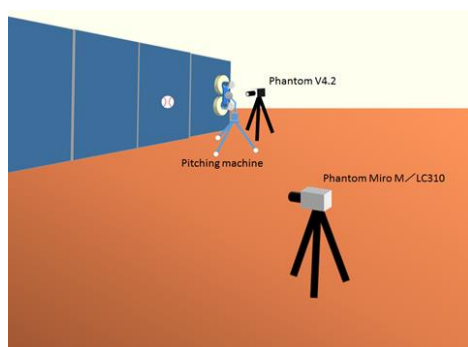


Fig. 1 Schematic picture of experimental setup.



Fig. 2 Painted baseballs.

使用したボールは, ミズノ社の硬式野球ボール(大学試合用), ナガセ・ケンコー社の軟式野球ボール(A 号球)である. また, 野球ボールの縫い目の影響を調べるために, ラクロスボールを真球と仮定し使用した. Fig.2 のようにそれぞれのボールには, ボールの回転運動を読み取りやすくするため, ラッカーズプレーとサインペンで塗装した.

(4)-2 解析手法及び実験結果

野球ボールに作用する空気力を解析するために, ボールの並進運動をとらえた動画をフレームごとに画像に分割した. 分割した画像から 10 フレームごとに画像を抽出し, 抽出した画像から, 画像内にあるボールの中心座標を目視により求めた. この中心座標をもとに, 野球ボールの並進運動の時間変化を調べた. Fig.3 はホイールのダイヤル設定が上 40, 下 100 の硬式野球ボールの並進運動のグラフを示している. 時間はフレームレートより求めた.

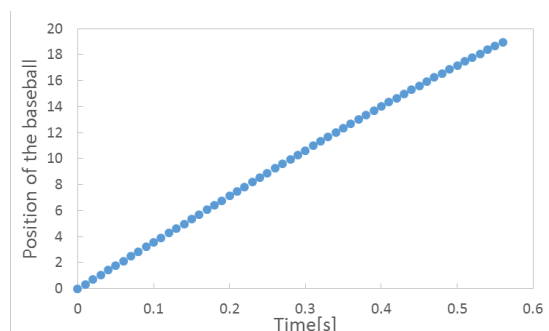


Fig. 3 Time history of the translational motion.

座標点から得られた並進運動の軌道を最小二乗法により4次関数で近似した。近似した4次関数を時間微分することにより速度と加速度を容易に求めることができる。Fig.4 は速度の時間変化、Fig.5 は加速度の時間変化を表している。速度は時間が経過するにつれて減速し加速度は負の方向に増加していることがわかる。このことから抵抗係数は一般的に定速で計算されるが、速度と加速度をパラメータとして扱う必要があることが予測できる。

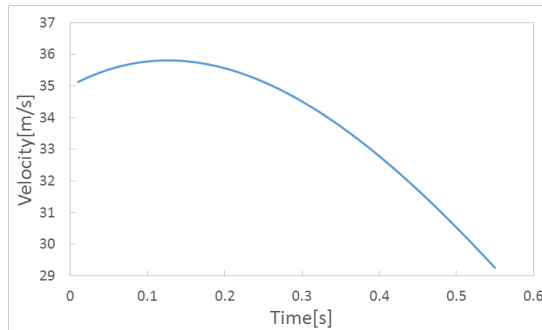


Fig. 4 Time history of the velocity.

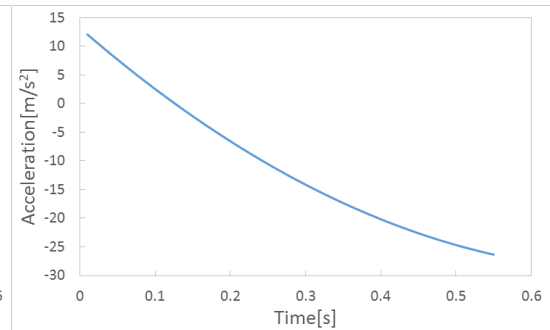


Fig. 5 Time history of the acceleration.

得られた速度と加速度の近似関数から、0.01[s]間隔で速度と加速度の値を取り出し、(1)式の運動方程式から野球ボールに作用する抵抗係数を求めた。

$$m \frac{du}{dt} = -C_D \frac{1}{2} \rho u^2 A \quad (1).$$

抵抗係数の値を求める上では、ボールが加速している時間帯での計算は行わず、減速し始めた時間から計算を行った。

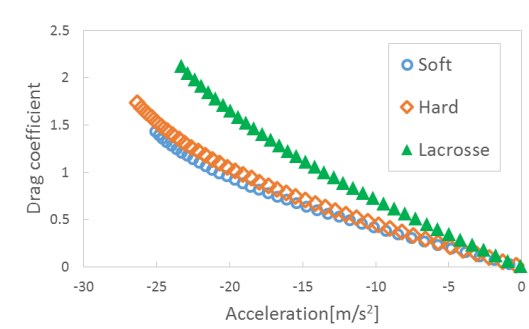


Fig. 6 Time history of the acceleration.

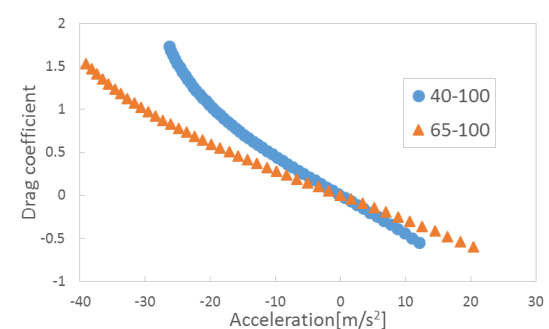


Fig. 7 Enlarged view of the drag coefficient.

Fig.6 は実験で使用した 3 種類のボールの抵抗係数と加速度の関係を表している。軟式野球ボールと硬式野球ボールの結果は、よく類似していることが分かる。ラクロスボールは両者と比べ傾きが大きくなっていることがわかる。これはラクロスボールに縫い目が無いことが影響していると考えられる。

次に、抵抗係数の速度と加速度の関係を明らかにするために、同じボールに対して球速を変えて同様に比較を行った。硬式野球ボールでの比較結果を Fig.7 に示す。球速が速い場合、加速度に対する抵抗係数の変化が緩やかであることが確認できる。この特性は軟式野球ボールとラクロス

ボールで比較した場合でも同様の結果であった。すなわち、抵抗係数は速度だけでなく加速度にも依存していることが分かる。

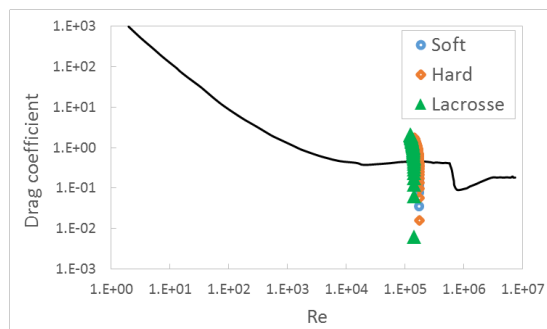


Fig. 8 Drag coefficient.



Fig. 9 Enlarged view of the drag coefficient

Fig.8 は抵抗係数とレイノルズ数 Re の関係を示している。実線は流体力学のテキストなどに掲載されている球体に作用する抵抗係数の値である。レイノルズ数は(2)式から求めた。本研究では流体の密度、粘性係数を気温 20[°C]として与えた。

$$Re = \frac{\rho U d}{\mu} \quad (2).$$

Fig. 8 から加速度運動中のボールに作用する抵抗係数は一定値ではなく、幅広い値を持つことが分かる。また、ボールが減速する、すなわちレイノルズ数が低下するにつれて、静止状態の球に作用する抵抗係数よりも抵抗係数が増していくことが確認できる。Fig. 9 は Fig. 8 の実験結果を拡大して示している。軟式野球ボール(Soft)と硬式野球ボール(Hard)の値はよく類似している。ラクロスボール(Lacrosse)に関してはボールの大きさと打ち出し速度が両者と比べて遅くなったこと、また縫い目が無いことから野球ボールとは異なる値を示している。

(4)-3 まとめ

運動中の野球ボールの空気力特性を調べるためにピッチングマシンを用いた打ち出し実験を行った。打ち出されたボールに作用する空気抵抗は、減速時に変化していることを確認した。この結果から運動中の野球ボールに作用する抵抗係数は速度だけでなく、加速度にも依存することを確認した。今後、ボールの軌道解析を行う場合、抵抗係数を速度と加速度の関数として扱うことで正確な軌道が再現されると予測される。

参考文献

- 1) 横山佳之, 高見圭太, 田中潤一郎, 宮寄 武, 姫野龍太郎, 硬式野球ボールの空力特性に対する縫目の影響, 「境界層遷移の解明と制御」研究会講演論文集(第 41 回・第 42 回), pp.71-74.
- 2) 坂本誠馬, 長谷川淳哉, 田多輝洋, 鳴尾丈司, 溝田武人, "統一球と日米硬式野球ボールの空力特性", スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011, (2011).

- 3) 長谷川淳哉, 坂本誠馬, 田多輝洋, 鳴尾丈司, 溝田武人, "風洞実験による硬式野球ボールの空力特性(回転軸の方向の違い)", スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011, (2011).
- 4) 木下康浩, 青木克己, 長瀬二郎, "軟式野球ボールのデザインと空気力特性", CD-ROM 論文集 329, (2001).
- 5) 谷口哲也, 宮崎 武, 清水鉄也, "硬式野球ボールに働く空気力の測定", ながれ, 25, (2006), pp.257-264.
- 6) 今野友博, 市川誠司, 窪田佳寛, 望月 修, "水中を落下する球の抵抗係数", 日本機械学会論文集(B編), 79 巻 798 号, (2013), pp.151-1.
- 7) 野球ボールの軌道解析に基づく空気力モデルに関する実験的研究, 野崎 崇史, 藤松 信義, スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2013, 242, (2013).

3.3.3. 運動する物体内部における流体挙動に関する実験的研究

(1) 目標・計画

運動する物体に作用する流体の運動特性を把握することは流体－構造連成解析問題の課題の一つである。3.3.2 節では加速度運動する物体に作用する空気力特性を調べる研究について述べたが、運動する構造物内での流体挙動や飛行する航空宇宙機の燃料タンク内部での液面挙動について理解することは重要である。本研究では、落下試験塔を製作して試験容器を落とし、一定の加速度下で試験容器内部の液面の運動を調べることで、加速度運動する際の液面挙動と流体の粘性、表面張力との関係を系統的に整理することを目的としている。2014年度は実験システムの構築を行い、工業用油を用いて落下実験を行う。2015年度以降は応用的実験として揺動するカプセル内部の液面挙動を調べるようなロケットの燃料タンクを模擬した実験を検討している。

(2) 意義・国際社会との比較

運動する物体内部における流体挙動に関する研究は、スロッシングや微小重力環境における液面挙動に代表されるような事例がある。スロッシングに関する研究は、宇宙機の燃料タンク内部における液体燃料の挙動解析や地震時における高層構造物の揺動を流体で抑制する流体式精神装置の開発がある。研究内容は実問題が殆どであり、基本形状を用いて液体挙動を解析した事例は数少ない。本研究は円筒形状、矩形形状の容器に対して、粘度や表面張力の異なる流体に対する落下時、揺動時の液面挙動を系統的に整理することが目的である。

(3) 研究内容

運動する物体内部における流体挙動を調べるために、液体を封入したカプセルの落下試験、液体のスロッシング運動解析を行う。2014年度は落下試験塔を用いて、液体の粘度と表面張力により液面の挙動特性を調べた。2015年度以降は液体のスロッシング運動を調べるために、揺動装置の製作を行い、実験を行う。本実験を通じて、揺動速度・加速度と液体の物性値に対する液面の運動特性を明らかにすることが目的である。

(4) 平成 26 年度進捗状況

2014年度は落下試験塔を製作して、実験を行った。落下試験塔の全体図を Fig.1 に示す。落下試験塔の高さは 4150mm、内径 200mm である。落下試験塔は下から試験カプセルを入れる構造になっている。試験カプセルはワイヤーで繋がっており、電磁石で固定された状態で滑車を介して、上に上げる仕組みになっている。また、最上部まで試験カプセルを上げた際に、錘で試験カプセルの位置を固定できるようになっている。

塔内部を真空ポンプで粗挽きして、ゲージ圧で -0.1MPa まで圧力を下げる。真空中を試験カプセルが落下すると、微小重力状態となる。このとき、内部にある液面の挙動をデジタルカメラで撮影し観察する。Fig.2 は試験カプセルの内部を示している。試験カプセル内部の透明容器には液体が封入されており、その挙動をデジタルカメラで撮影できる。液面の変位を計測するためメジャーを設置してある。デジタルカメラは SONY サイバーショット DSC-TX30 を使用した。このカメラの最短撮影距離は 1cm (拡張マクロ) であり、動画撮影サイズは 1920×1080 のフル HD、フレームレートは 60fps である。また防水であるため液体を使う本研究に適している。落下試験塔内は、ULVAC 社

製の油回転真空ポンプ VD401 を用いて減圧した。この真空ポンプは設計排気速度が $40\text{m}^3/\text{h}$ であり、落下試験塔を真空引きするのに約 10 分かかる。

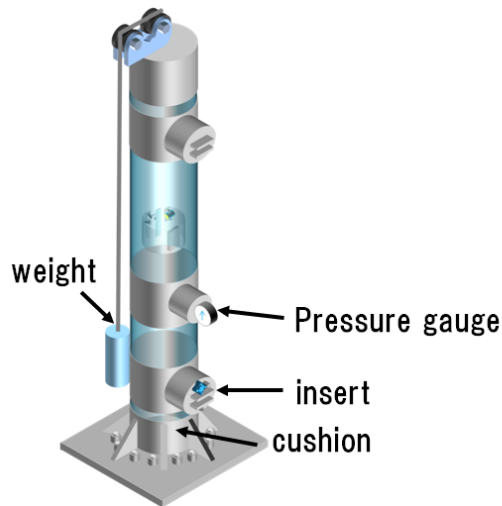


Fig. 1 Free fall tower.

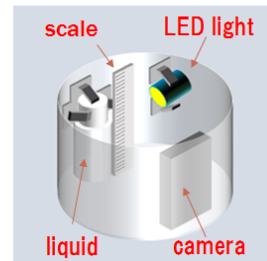


Fig. 2 Falling capsule.

実験で使用した液体は全てニュートン流体を使用しており、主に工業用油を使用した。今回は液体 A,B,C の三種類の液体のパラメータを調べ、運動解析を行った。Table 1 は油の粘性係数と表面張力を示している。粘性係数は Brookfield 社の回転粘度計 DV-I Prime を用いて計測した。表面張力は、液体に作用する重力と表面張力の関係を用いて⁽²⁾、透明容器内のメニスカス部分を画像解析することで計測した。液面の運動解析には DITECT 社の運動解析ソフトである DIPP-Motion PRO を使用した。

Table 1 Physical properties of liquid.

Liquid	Viscosity ($\times 10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$)	Surface tension ($\times 10^2 \text{ N/m}$)
A	46.2	6.7
B	64.9	6.4
C	2.12	5.7

以下に、実験結果および考察を示す。

(4)-1 試験カプセルの落下時間

試験カプセルが真空中を落下する際、空気抵抗を受けないため自由落下状態となる。落下時間は、 x を落下距離、 g を重力加速度、 t を落下時間として、(1)式から計算できる。

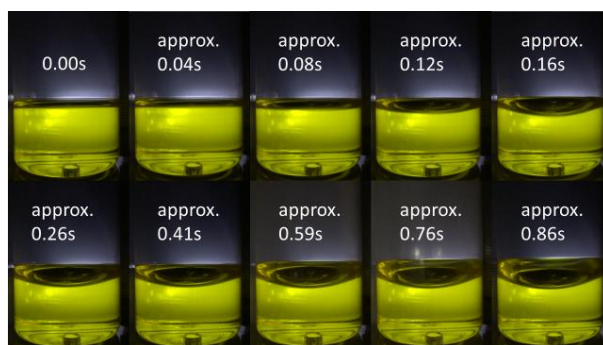
$$x = \frac{1}{2} g t^2 \quad (1)$$

本実験の落下試験塔の落下距離は 4000mm であるので、重力加速度を 9.81m/s^2 とすると落下時間は 0.90 sec となる。実際の試験カプセルの落下時間を計算するために、動画を画像に分割し、

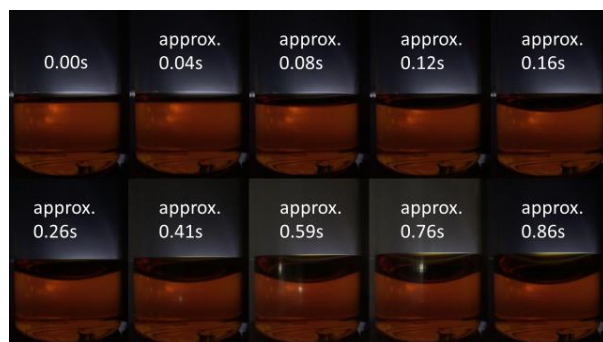
液面が動き始めた瞬間から試験カプセルが落下し終わった瞬間までの画像枚数を調べた。試験カプセルが落下し終わるまでの枚数は 54 枚であり、デジタルカメラのフレームレートは 60 fps であることから落下時間は 0.9s となった。実験による落下時間と解析結果はよく一致することから、落下中の試験カプセルは自由落下状態にあり、本実験装置は無重力環境を模擬できるといえる。

(4)-2 液面の時間変化

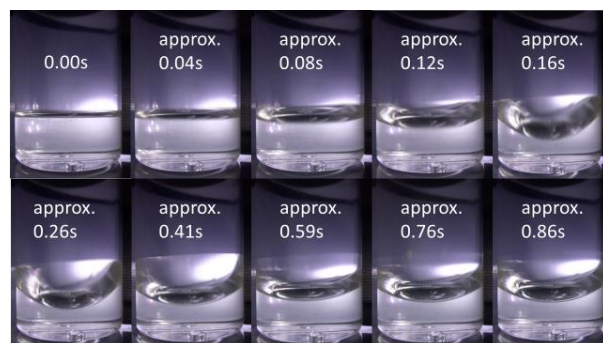
Figs. 3-(a), (b), (c) は液体 A, B, C の液面の時間変化を示している。液体ボトルが落下中の様子をできるだけ等分割して示した。



(a) Liquid A.



(b) Liquid B.



(c) Liquid C.

Fig. 3 Time histories of surface behavior of liquid.

液体 A は 0.12 秒以降、液面の中央付近が下がり始め、ボトル壁面に接したメニスカス部分が上昇し始める。その後、中央のくぼみが大きくなり、ボトル壁面に接した流体は上昇していく。試験カプセルが落下している間、液体 A の液面運動は上記の傾向を示した。

液体 B の液面は、液体 A の液面と同様の運動をしており、運動開始時の特徴も類似している。0.59 秒以降は、液面中央のくぼみに高さの変化があまり見られないように見える。

液体 C の液面は、液体 A, B に比べると落下開始直後から顕著である。落下開始後、0.04 秒のときには液面の動きを目視で確認することができており、0.26 秒で液面の中央が最も低くなり、透明容器壁面に接する液面の高さも最大となる。液体 C は液体 A, B に比べると粘度が低いことから、液面の動きが顕著であり、その動きが落下時の擾乱影響を受けやすいため非対称な液面の分布になっている。その後、0.59 秒まで液面の中央の高さは復元し、再び液面の高さが低くなっていくように見える。

液体 A, B の表面張力はほぼ同じ値であるが、粘度は液体 C に比べて高い値である。そのため、表面張力がほぼ等しく、粘度が $46.2 \sim 64.9 \times 103 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ の範囲であれば、同様の傾向を示すと考えられる。液体 C の表面張力は液体 A, B の表面張力に比べて、約 11~15% 小さい。一方で、液体 C の透明容器壁面のメニスカス部分の液面高さは液体 A, B のそれらの高さより高くなっている。透明容器と液体が接する部分では表面張力の影響を顕著に受けるので、液体 C の高さは低くなるはずである。しかし、液体 C の粘度は液体 A, B に比べて低いので、液面の動きが減衰しにくくなっており、液体 C の表面張力がやや低くても、最も液面が高くなったと考えられる。

(4)-3 液面座標の時間変化

無重力状態での液体の挙動に対する、粘度や表面張力の影響を調べるために、実験画像から液面の座標を読み取り、その位置や速度の時間変化を調べる。Fig. 4 は液面を読み取る座標を示している。画像中に座標軸 x, y を取り、液面を 9 つに均等に分割した点上の動きを画像処理した。

Figs.5-(a), (b), (c) は液体 A, B, C の液面座標の時間変化を示している。落下時の 54 枚の画像の中から 9 枚を選択し、液面の座標をプロットしている。画像の単位はピクセルのため、液体ボトルの隣に設置してあるメジャーから 1mm 当たりのピクセル数を計算し、単位を変換した。液面が上昇する位置は透明容器に接する 1, 9 番目の点だけであり、それ以外の位置では下降する結果となった。Figs.5-(a), (b), (c)において、液面がボトルに接している部分は上昇しており、中心付近では下降していることが分かる。また、液体ボトルの中心に近づくにつれて下降する距離が大きくなる結果を得た。また、ボトル壁面に接する液面の最大上昇値は液体 A が 3.1mm, 液体 B が 2.3mm, 液体 C が 10mm となり中心の最大下降値は液体 A が -6.8mm, 液体 B が -6.8mm, 液体 C が -12mm となった。

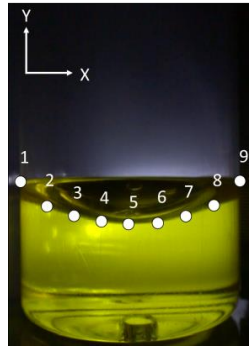
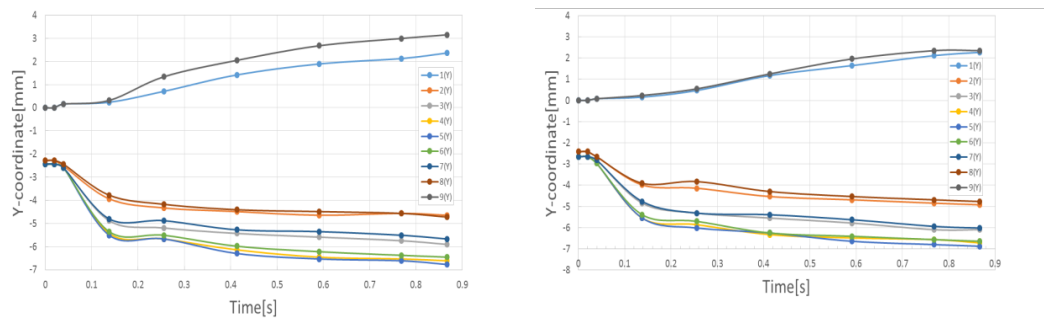
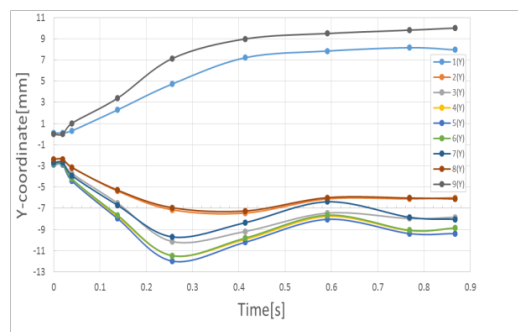


Fig. 4 Location of liquid surface used in the image processing.



(a) Liquid A.

(b) Liquid B.



(c) Liquid C.

Fig.5 Time histories of coordinates over liquid surface.

液体 C は液面上昇, 下降する高さが最も大きくなっている。また, 液体 A, B に比べて, 液体 C は 3(Y)～7(Y) の位置で, 液面の上下運動が顕著であることも確認できる。4.2 節でも述べたように, 液面の高さの違いは液体の粘度が最も影響していると考えられる。これは, 液体 A の液面上昇値が粘度の高い液体 B よりも大きいことから説明できる。また, 液体が透明容器に接するメニスカス部分 (1(Y), 9(Y)の位置) の高さは, 液体 B は共に等しいが液体 A, C は最大上昇値が異なっている。

(4)-4 液面速度の時間変化

画像処理で得られた液面座標から, 2次精度中心差分法を用いて液面の速度を求めた。Figs.

6-(a), (b), (c) に液面速度の時間履歴を示す。

Figs. 6-(a), (b) を見ると、透明容器に接するメニスカスの部分 (Fig.6-(a), (b) の 1(Y), 9(Y) の位置) は約 0.04 秒で液面上昇速度が最大となり、それ以外の位置では約 1.6 秒で液面の下降速度が最大となる。その後、緩やかに下降していく速度履歴の傾向が一致している。これは 4.2, 4.3 節で述べたように、液面の動きがよく類似していたことに対応する。

液体 C は液体 A, B と比べ粘度が極端に低いため、液面の挙動が異なっている。外部からの擾乱の影響が強いため、メニスカス部分 (Fig.6-(c) の 1(Y), 9(Y) の位置) での液面速度は非対称となっている。それ以外の部分では約 0.04 秒で液面の下降速度は最大となり、その後、緩やかに下降している。Fig. 6-(c) の 2(Y), 8(Y) の位置では、約 0.41 秒で液面が上昇に転じている。

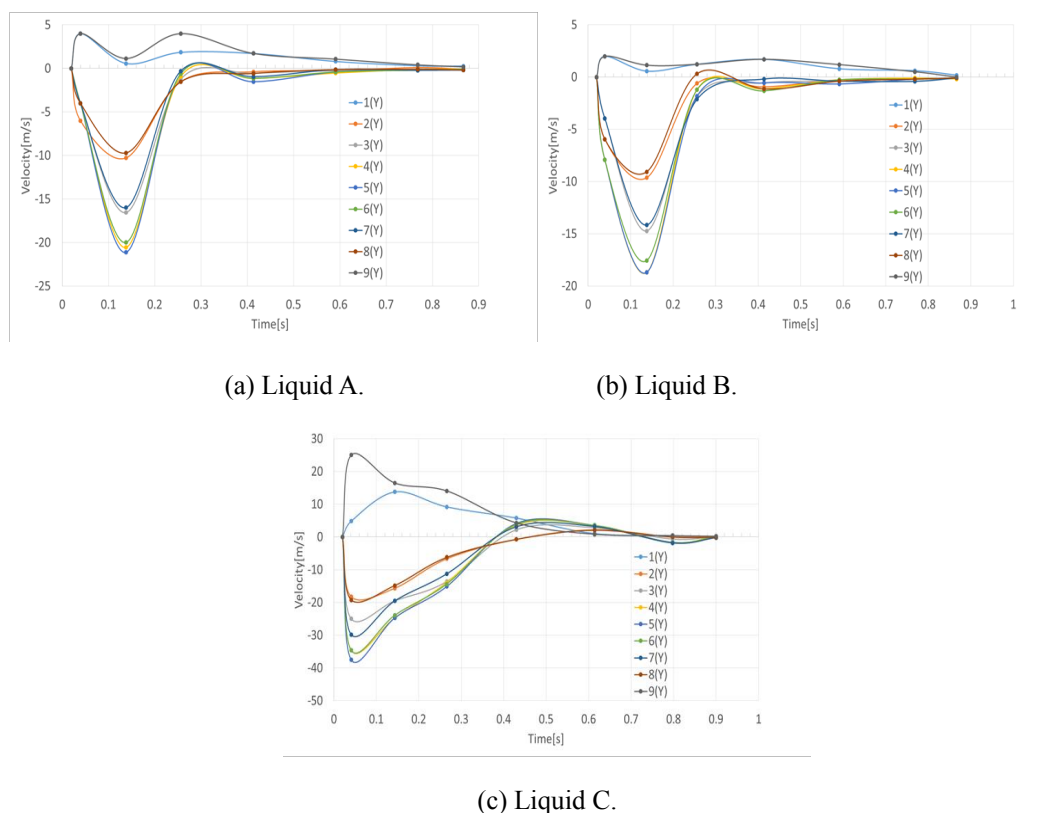


Fig.6 Time histories of velocity of liquid surface.

液体 A, B, C の表面張力は最大で 15% の違いである一方、粘度は 20～30 倍の違いがあるため、本研究の液面速度の傾向の違いは粘度に依存する結果であると考えられる。液体 C の液面が非対称となる擾乱の原因として、電磁石により試験カプセルを切り離す際に影響を与えていると予想される。

(4)-5 まとめ

本研究で製作した試験装置により, 液体の自由落下状態を模擬できることを確認し, 無重力環境下における液面の運動を確認することができた. 比較的高粘度の液体の場合, 液面の運動が類似することを示し, 粘度が低い液体は, 落下中に液面の上下運動が顕著となることを確認した.

今後, 液体の種類を増やし系統的にデータを整理して, 物性値と液面運動の関係を明らかにしたいと考えている.

参考文献

- 1) 望月栄徳, 藤松信義, 落下試験塔を用いた微小重力環境下における液面挙動の運動解析, 日本実験力学会 2014 年次講演会, (2014).
- 2) 今井良二, 落下等を利用した流体制御実験, 日本マイクロ重力応用学会誌, Vol. 18, No.3, pp.145-149, (2001).
- 3) 中山泰喜著, 改訂版 流体の力学, 養賢堂, (1998).

3.4. 精度・妥当性検証グループ

本グループでは、シミュレーションと実験の精度・妥当性を検証する技術および精度・妥当性を向上させるための技術の研究を行っている。シミュレーションも実験も誤差を含んでおり、精度の検証および改良は重要なテーマである。具体的には、(1)効率的で精度のよい解析技術の開発、(2)実験とシミュレーションの融合、(3)材料データベースの開発、(3)精度の改良技術の開発、などを目標に研究を行っている。昨年度は特に一番目のテーマを重点的に研究を行ったが、本年度は昨年の成果に基づき、二番目のテーマである、実験とシミュレーションの融合技術の研究を行った。研究対象としては、段ボールの解析と実験を例題として取り上げている。その結果、本研究における提案手法と実験値の比較を行い未知の材料物性値の推定の有効性を検証した。今後、実験のばらつきを考慮した実験、シミュレーションの妥当性検証を引き続き行っていく。テーマ(1)については、効率的で精度の良い最適化を目的として、最適化プロセスの完全自動化を目指した研究を行っており、本年度はその理論的構築を開始するとともに、最適化アルゴリズムを生成・比較実験する環境の一部を整備した。また、材料データベースに関しては、材料データの標準データ交換形式を開発し、数値シミュレーションのシステムと物性データベースの連携を行うことを目的として研究を行っており、今後、各研究グループにおける要素技術に必要とされる入出力・データ構造について調査・検討を進める。

3.4.1. データ同化技術を用いた効率的精度解析技術の開発

(1) 目標・計画

本研究ではデータ同化により実際に計測できない物性値を数値シミュレーションに実験データを取り込むことにより推定することを目的としている。本研究で扱う段ボールは、巾目、流れ目において材料特性に異方性を有しており数値シミュレーションの対象として考える場合にはその材料特性を十分考慮して解析に取り入れていく必要があるため、材料特性を把握することは重要な課題である。従来段ボールの設計は過去の経験や、試行錯誤に依存する傾向にあり有限要素法を用いた力学的特性の解析は浸透しておらず本研究で開発した手法を用いることで効率的な設計に役立てることができる。

本年度は万能試験機により段ボールの巾、流目におけるそれぞれの変位データ測定を行い、測定データの変位と等価な値を取得するように FEM により材料特性の同定を行い、同定の妥当性を検討するため推定した材料物性値において任意の荷重を与え測定データと比較を行った。また FEM による段ボール製品において解析を行う場合、対象とする段ボールの段が周期的に並んでおり、これらの段をすべてモデリングするには手間がかかる。またそれぞれの段に対してメッシュを切らなければならず計算コストが非常に大きくなり効率的ではない。そこで本研究では均質化法を用いて解析を行うことで計算コストを大幅に削減した。

(2) 意義・国際社会との比較

段ボールは外装容器のみならず製品を衝撃から保護する緩衝材、固定材としての使用法が多くなり、またリサイクルといった環境面からも注目され、段ボールの用途が広がりつつある。近年、製品開発において正確な強度設計が必要とされ FEM を用いて強度解析等の数値シミュレーションを行い、開発の効率化を図るという手法は定着している。しかしながら段ボールにおいて現状ではまだ一般的な解析手法が確立しているとは言い難く、その非効率さがコストの上昇を招いていると考えられる。本手法は未知であった材料物性値を把握することで迅速かつ、高精度に解析を行うことが可能になると考えられる。このことから、非常に意義のある研究内容であると言える。

(3) 研究内容

本研究では数値シミュレーションに実験データを馴染ませるにあたり、万能試験機による圧縮試験を行い計測された実験データの任意の変位を目的関数とし FEM による数値シミュレーションにおいて材料物性値を変数として探索を行う。本研究では数値シミュレーションにおいて直接モデルを作成し、解析を行うことは計算コストが大きくなる問題が避けられない、そこで本研究では段ボールが周期性の特性を持った構造体であることに着目し、このような特徴を持った構造体に対して計算精度を損なうことなく計算コストを削減できるという観点からマルチスケール解析を用いて解析を行った。

(a) 圧縮試験機による変位量の計測と推定

圧縮試験により変位量の測定を行うため、250×250 の段ボール片を作成し巾、流れ目において複数回試験を施行し計測を行った。試験結果を Fig1, Fig2 に示す。またこれらの圧縮試験においてバイアス、バラツキが0の真値の測定は不可能であることからこれらの誤差を考慮する為に本研究では非線形範囲は扱わずまず線形範囲のみを扱うものとし最小二乗法によりそれぞれの目において変位の推定を行った結果を Fig3, Fig4 に示す。

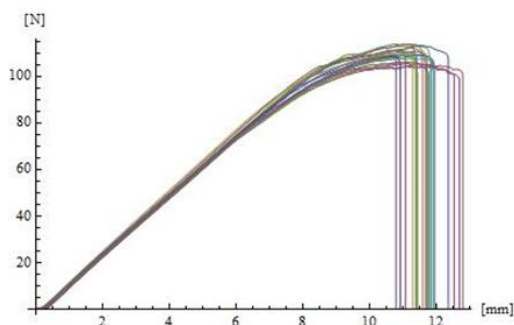


Fig1. 測定値(巾目)

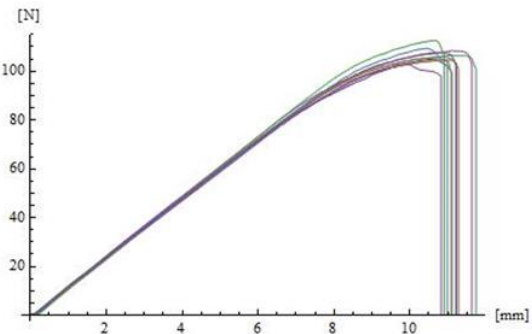


Fig2. 測定値(流れ目)

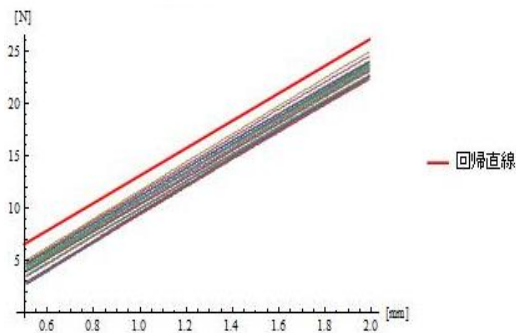


Fig3. 回帰直線(巾目)

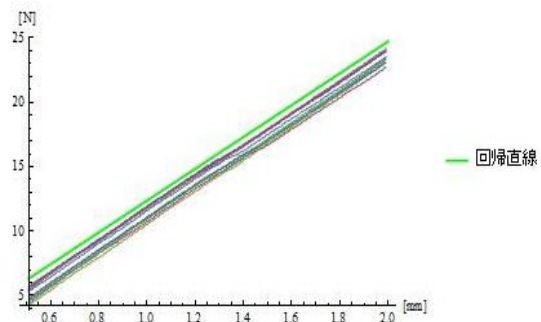


Fig4. 回帰直線(流れ目)

(b) マルチスケール解析

解析対象領域が、ある微視構造を単位として規則的に繰り返されることによって構成され、解析対象を均質な等価モデルで代用して全体を解析するというものである。具体的には均質化領域に対して、周期性の見出せるユニットセル(マイクロモデル)を取り出し材料物性値を算出する第1ステップと、均質化領域をfig 簡略化モデル(マクロモデル)作成し算出した等価物性値をマクロモデルに適応して解析を行う第2ステップからなる。マイクロモデルとマクロモデルを fig6, fig7 に示す。

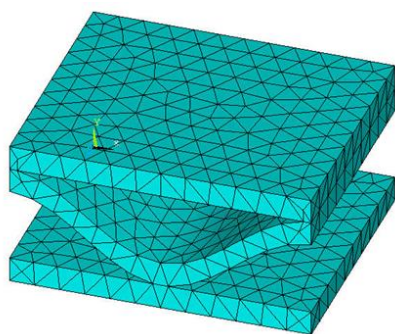


Fig6. ミクロモデル

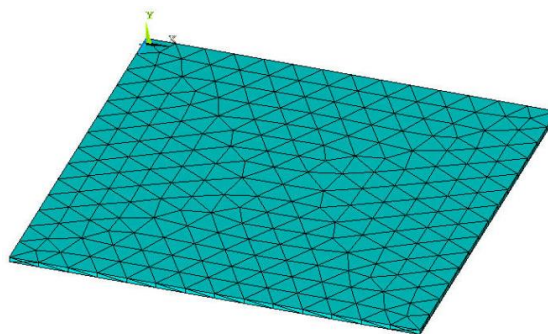


Fig7. マクロモデル

(c) 材料物性値の探索

一般に段ボールはライナと中芯を貼り合わせた構造体であり、それぞれの強度に異方性を有している。本研究ではライナ、中芯に対しそれぞれに材料定数を与え、最小二乗法により推定した回帰直線において、任意の荷重における変位にあうように巾目、流れ目において材料定数を探索し巾目と流れ目の材料定数を変数とする変位の応答局面をそれぞれ求め、巾目と流れ目の交点により材料特性の推定を行った結果を fig8 に示す。縦軸と横軸はそれぞれ中芯とライナ材料定数を示し、赤の曲線は巾目、青の曲線は流れ目の変位を示す。

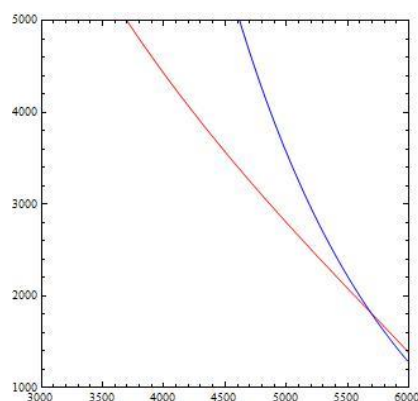


Fig8. 材料定数の推定

(d) 材料定数の検証

推定した材料特性の有効性を調べるため、境界条件として 10N, 15N, 20N, 25N の荷重において解析を行い、回帰直線との比較の結果を Fig9, Fig10 に示す。

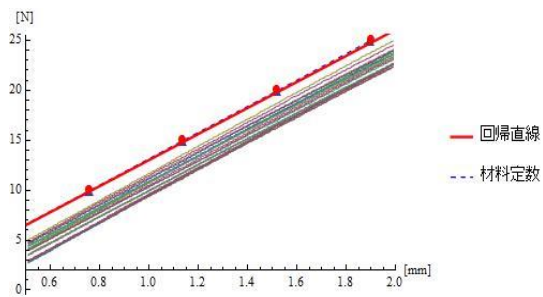


Fig9. 実験値との比較(巾目)

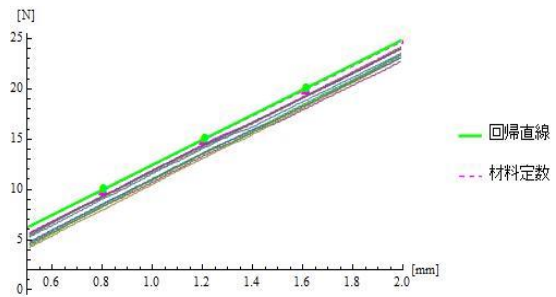


Fig10. 実験値との比較(流れ目)

(4) 平成 26 年度進捗状況

本年度は本研究における提案手法と実験値の比較を行い未知の材料物性値の推定に有効性のあることを検証した。その結果巾目、流れ目における回帰直線の値と本手法により推定した材料物性値を与え数値シミュレーションを行った解析結果において同程度の値を示すことができた。今後ベイズ推定による線形回帰モデルの応用に取り組む予定である。

3.4.2. 工学における最適化プロセスの完全自動化

(1) 目標・計画

現在、最適化アルゴリズム同士を比較する方法は存在しない。ある対象をエンジニアが最適化したいならば、まずしなくてはならない事は既存のアルゴリズム(共役勾配法・遺伝的アルゴリズム・焼き鈍し法・等々)から、その問題に最も適したものを選ぶことであるが、こんなことは不可能であるため、しょうがないのでエンジニアはその日の気分ですれかを選擇しているのが実情である。このような非生産的な状況から抜け出すためには、アルゴリズム間を比較するための方法を見つけなくてはならない。

もしアルゴリズム間を比較する方法が完成すれば、それは同時に最適化における他の工程間も比較できることを意味する。つまり、最適化の工程<目的関数 f の設計>→<アルゴリズム alg の選択>→<アルゴリズムのパラメータ θ の設定>、の3つについて、2つ目が比較できるようになれば、残りの2工程も比較できるようになるのである。たとえば3つ目の工程の自動化は次のようになる。ある f と alg と θ について、「 θ に設定した、 f を最適化するための alg 」を「 f しか最適化できない、パラメータは θ で固定の、ある最適化アルゴリズム $alg_{f,\theta}$ 」と解釈する。そして「パラメータ $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ のなかでどれが良いか?」という問題を、「 $alg_{f,\theta_1}, alg_{f,\theta_2}, \dots, alg_{f,\theta_N}$ のなかでどれが良いか?」という問題に置き換え、比較する。

このように各工程間が比較できるようになれば、それを基に最適化の全工程が自動化できることは明らかである。そうなれば、例えばある新商品の試作品を最適化したいなら、そのエンジニアが使用しているシミュレーションソフトウェアのどこかにあるであろう「最適化する」というボタンをクリックし、じっと待つだけである。

このような最適化の完全自動化を実現するために、まずはその土台部分を完成させることを計画している。

(2) 意義・国際社会との比較

最適化が全自動化されれば社会の様々な場面において最適化が手軽に使われるようになりエコに貢献する。

(3) 研究内容

ある集合 X, Y, Z について、これらからなる可測空間をそれぞれ $(X, \Sigma_X), (Y, \Sigma_Y), (Z, \Sigma_Z)$ と書くとする。ここで Σ_X は、 X 上の σ 加法族である。また今後 (X, Σ_X) は X と略せるとする。正則条件付き確率(マルコフ基底) k を、引数を2つとる次のような関数と定義する:

$$X \ni x \mapsto k(\cdot | x) \in [0,1]$$

$$\Sigma_Y \ni B \mapsto k(B|\cdot) \in \mathbb{R}$$

$$(X \times \Sigma_Y) \ni (B|x) \mapsto a \in [0,1]$$

また、2つのマルコフ基底 $X \xrightarrow{r} Y, Y \xrightarrow{k} Z$ の合成関数 $(k \circ r): X \xrightarrow{r} Y \xrightarrow{k} Z$ を、

$$(k \circ r): (\Sigma_Z \times X) \ni (C|x) \mapsto \left(\int_{y \in Y} k(C|y) dr(\cdot|x) \right) \in [0,1]$$

で定義する. また

$$k_f(A|x) := k(f^{-1}(A)|x) = k(A|f(x))$$

とする. 可測空間を対象, 可測関数を射とする対称モノイド圏 **Meas** から, 可測空間を対象, マルコフ基底を射とする対称モノイド圏 **P** への共変関手 δ を

$$\begin{aligned} \delta: \mathbf{Meas} &\rightarrow \mathbf{P} \\ (X, \Sigma_X) &\mapsto (X, \Sigma_X) \\ f &\mapsto \delta_f \end{aligned}$$

とする. このとき, 工学最適化における様々な概念, すなわち単目的最適化・多目的最適化・ロバスト最適化・ノイズ最適化・実数値最適化・組み合わせ最適化は, まとめて次の式で表現することができる:

$$\begin{aligned} X \otimes \bigotimes_{j=1}^J Y^X &\xleftarrow{M \otimes \bigotimes_{j=1}^J 1} X \otimes \bigotimes_{j=1}^J Y^X \xrightarrow{1 \otimes \bigotimes_{j=1}^J N} X \otimes \bigotimes_{j=1}^J Y^X \\ &\xrightarrow{1 \otimes \bigotimes_{j=1}^J \delta_{\Gamma}} \bigotimes_{j=1}^J (X \otimes (X \otimes Y)^X) \xrightarrow{\bigotimes_{j=1}^J \delta_{ev}} \bigotimes_{j=1}^J (X \otimes Y) \end{aligned}$$

ここで J は目的関数の数, また Γ は, 任意の $f: X \ni x \mapsto f(x) \in Y$ について,

$$\Gamma_f: X \ni x \mapsto (x, f(x)) \in X \otimes Y$$

と定義される **Meas** の射である.

(4) 平成 26 年度進捗状況

前述の工学最適化の表現から, 最適化アルゴリズムを生成・比較実験する環境の一部を整備した.

3.4.3. 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式開発

(1) 目標・計画

数値シミュレーションのために基本的な物性値は必須のものであるが、材料の物性値を収めたデータベースにおけるデータ表現は統一されておらず、多くの材料データベースがインターネット上に存在する現在でも、必要なデータは事実上手作業で値を入力する必要がある。本研究では、材料データの標準データ交換形式を開発し、数値シミュレーションのシステムと物性データベースの連携を行うことを目的とする。

(2) 意義・国際社会との比較

材料物性に関するデータベースは各所で開発されているが、統一されたフォーマットは無く、データを交換するための標準を作成する試みは NIST などによって行われてきたが現在のところ定まった標準がない。データ交換のためのフォーマットが統一されることにより、分散したデータベースの統合利用に加え、数値計算システムなどからの利用も容易になる。

米国マテリアルズ・ゲノム・イニシアティブの影響を受け、2014 年には我が国においてもマテリアルズ・インフォマティクスに関連する研究プロジェクトが注目され、物質・材料研究機構にプラットフォームが設置されるなどしている。内閣府戦略イノベーション創造プログラムでは、テーマの一つである革新的構造材料にマテリアルズインテグレーションが取り上げられた。

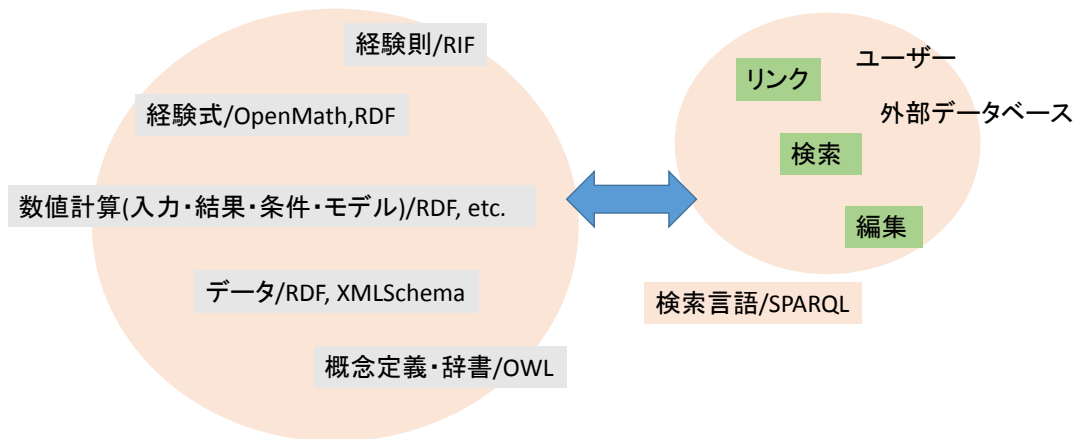
マテリアルズインテグレーションには東大・小関教授を代表者とするテーマが採択され、平成 26 年度より 5 年間で構造物溶接部の性能評価を例題としてシステム開発を行うこととなり、芦野はここに分担者として参画し、セマンティック・ウェブ技術を用いた材料に関する数式・データ・シミュレーションを連携させるためのデータ構造開発を行うこととなった。

海外でのマテリアルズ・インフォマティクス研究では機能性の材料や鋳造などが主たる対象であり、構造材料、特に鉄鋼材料の溶接部はミクロ組織も複雑であり計算による物性の推定が困難であることから対象となっていない。我が国では産業界での必要性などからあえて困難な対象を選んで研究対象とすることとなった。

(3) 研究内容

セマンティック・ウェブの一連の規格である RDF (Resource Description Framework), OWL (Web Ontology Language), RIF (Rule Interchange Format), および数式の意味内容を記述する OpenMath など XML を用いた記法を用いて、既にある程度知見の整備されている機械試験に関連した経験式、推論規則、データを記述してリンクし、検索言語 SPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language)を用いて検索する。

溶接の計算機支援は従来から溶接学会などにおいて多くの研究があるが、本研究では単一の知識ベース、あるいは計算ソフトではなく、それぞれの要素をリンクして相互参照できるようにし、ユーザや研究者のノウハウや知識を集合知として連携してゆくことのできる構造を目指す。



(4) 平成 26 年度進捗状況

SIP 初年度として、既にある程度計算式などが整備されている機械試験などを例として経験式、推論規則、データをセマンティック・ウェブの規格をベースにしてリンクしたプロトタイプを開発し、データ構造を検証する。また、各研究グループにおける要素技術に必要とされる入出力・データ構造について調査・検討を進める。

3.5. 可視化検証グループ

本プロジェクトでは、流体-構造連成解析の品質保証に特に重点を置いている。その中でも、

- 解析結果を正しく理解し、評価すること
- 実験結果等と公正な比較を行うこと

は重要な要素であると考えられる。そのためには、可視化は必須である。特に、連成解析は現象が複雑であり、限られた数値データのみでこれを評価することは困難である。実験における可視化技術やその応用は実験による検証の項目に譲り、ここでは、解析結果の可視化および、比較のための実験の可視化結果の表示を中心に研究を行う。解析は、当面簡単のため2次元および3次元でもそれほど3次元性が強くない問題を対象とするが、そうであっても特に流れ場は3次元であり、また今後のより一般的な問題に対応するためにも、3次元の可視化が本質である。そこで、ここでは連成解析において3次元データを如何に可視化するかを中心に研究を進める。1つは以下に述べるような立体視あるいは VR (バーチャルリアリティ) を用いた可視化であるが、これに限らず、3次元データの可視化方法を検討していく。

3.5.1. 3次元画像による定量的・定性的検証

(1) 目標・計画

本研究の目標は、流体構造連成問題について、数値解析の精度検証を支援するための、画像による定量評価、定性評価の手法やシステムを開発し、本プロジェクトで開発される連成解析手法の評価に供することである。特に、バーチャルリアリティ（VR）技術を利用した3次元可視化システムを中心に3次元画像による可視化評価を中心に研究を進める。

大きな計画としては、

平成 24 年度：

表示装置となる VR 装置の導入を行い、ハードウェアの準備を行う。

平成 25 年度：

VR 装置の上でソフトウェアを開発し、PC クラスタと結合してこの上での解析結果の表示を行う。

平成 26 年度：

画像による検証に利用するための可視化システムを VR 装置上で開発する。

平成 27 年度：

積極的に可視化による比較・検証を行う。特に、（立体）画像を用い、実験と解析の可視化画像を重ねたり、並べたりして効果的な比較・検証方法について検討する。

平成 28 年度：

研究をまとめ、その公開方法について検討する。

としている。これらにより、従来とは異なる、多彩な可視化により、直感的・効果的な比較・検証が可能となり、開発される連成解析手法をより多面的に評価できると考える。

(2) 意義・国際社会との比較

連成解析は、複数の物理が関連するため、その妥当性の評価は単一の物理に対する解析よりも難しい。ここでは、流体-構造連成を中心に研究を行っているが、流体・構造それぞれ単独で妥当性を示すことができて、それらを組み合わせただけで連成問題が正しく解けるということでは必ずしもない。2つの物理をやり取りするものがあり、それが正しく評価されているかが、重要であるが、実験的に測定できるもの、できないもの等あり、単純ではない。ここでは、可視化、特に3次元画像を利用することで、実験と解析を出来る限り直接的に比較することを考えており、流体-構造連成解析の精度検証・妥当性検証のテンプレートとなることを期待している。

国際的に見ると、連成解析は計算力学における重要な研究テーマの1つであるが、必ずしも検証については進んでおらず、信頼できるとされる過去の解析例と比較したり、パラメータスタディによって、実験で見られる現象と、解析で得られる現象の範囲が等しい（あるいは近い）といったことを示すにとどまっている場合がほとんどである。連成解析手法

を評価する手法の1つとして3次元画像を用いる方法は、ほとんど例がなく、その成果は重要なものとなると考える。

(3) 研究内容

本研究の中心となる装置は、図1の2面没入型ディスプレイ装置である。大きさは正面のスクリーンが $2.8 \times 2.1\text{m}$ 、下のスクリーンが同じく $2.8 \times 2.1\text{m}$ でここに2台のプロジェクターにより、それぞれ 1400×1050 の解像度の画像を表示する。画像は時分割方式で立体映像を投影できるようになっており、液晶シャッター眼鏡によって立体映像を観察する。立体映像は3台のグラフィックスワークステーションで生成する。1台はマスタで、あとの2台が正面と下面の映像を担当する。これとは別に観察者や観察者が持つコントローラの位置を赤外線カメラで取得するシステムがあり、1台のトラッキングワークステーションで制御する。グラフィックスワークステーションのマスタはトラッキングワークステーションから逐次データを取得して観察者（やコントローラ）の位置を計算する。

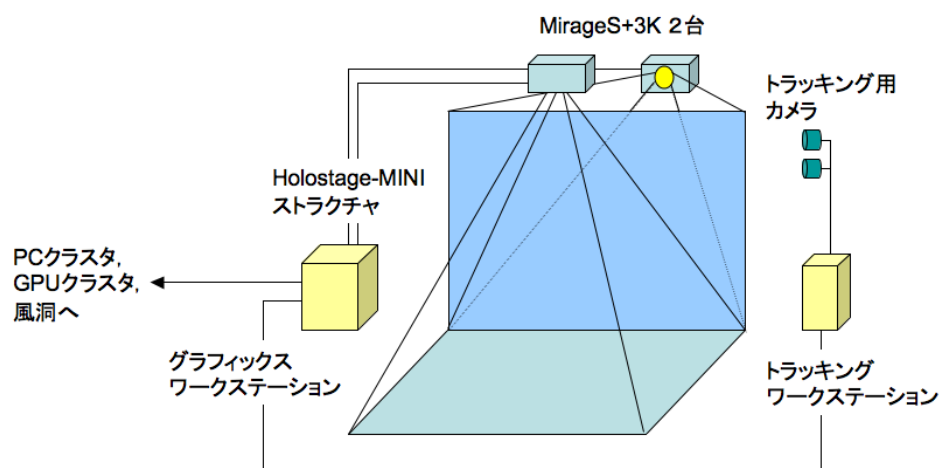


図1 システム構成図

このシステムに、流体-構造連成の3次元画像を表示する。表示する画像は大きく分けると、実験の画像と解析の画像の2種類である。これらを同時に、あるいは交互に表示することで直接的な比較を行う。

実験の画像については、物体の変位等、直接得られるものから、PIVで可視化した流れの速度分布やPSP（感圧塗料）で可視化した物体面上の圧力分布、画像解析により得られる応力分布等が考えられる。これらを得ることは、実験班の研究に委ねられるが、その3次元化や、本装置での表示にはデータの転送等も含めてさまざまな検討と技術的課題の克服が必要である。

解析結果については、単独の物理に基づく解析では多くの知識と経験があるものの、連

成問題については、それぞれの物理に関する量を可視化表示するにとどまっており、まずは何を可視化することで連成解析の精度や妥当性評価につながるかの検討が重要となる。そのため、まず、さまざまな物理量の3次元可視化を可能とするシステムを開発する。解析は大規模となることが前提なので、そのデータをどのように転送し、また可視化するかも課題となる。

次に、実験と解析の比較である。たとえば、視点・スケールを合わせて交互に表示する／重ねて表示する、などが考えられるが、それには時間的・空間的な位置合わせ等、技術的な課題が多くある。また、必ずしも同じ量を表示できる訳ではないので、何を見るか、比べるかも問題となる。また、実験については、取得した画像（動画）をそのまま見るのか、あるいはデータを抽出して、解析結果と同じようにCGで表示するのかといったアプローチもありうる。これらについても時間をかけて検討し、システムを構築することで新しい可視化法・評価法につなげたい。

最終的には、システム化できるところはまとめたい。実験データも、標準的で精度の高いものが得られれば、標準問題として公開したいが、その際に3次元画像もその1つとできればよいと考えている。

(4) 平成 26 年度進捗状況

まず、2013 年度計算力学研究センター年報の本稿執筆時点ではできていなかったが、図 2 に示す全体構成図において、AVS-MPE を用いて解析結果と実験結果を同時表示するシステムを構築した。データはそれぞれ時系列で用意されているとし、1 時刻目から同時に進めて表示するようになっている。

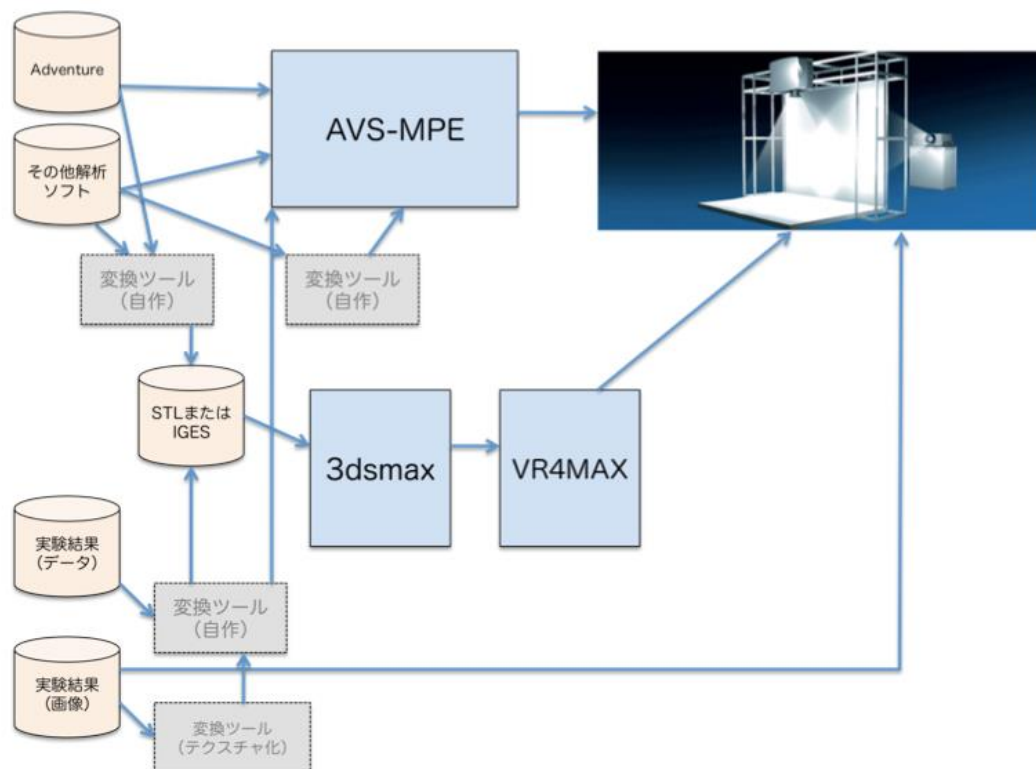


図 2 可視化システム全体構成図(案)

図 3 は AVS の可視化の仕組みを示すネットワークエディタである．ここにはいくつかのモジュールが示されており，それぞれのモジュールが可視化においてなんらかのまとまった役割を果たしている．実際にはここにあるモジュールのいくつかはさらに複数のモジュールからできている．ここでは，解析結果は物体形状と流れの流線および断面の圧力，実験は 2 次元の動画 1 種類を表示するようになっているが，表示内容はネットワークの構成を変えたりモジュールを追加／変更したりすることで，変えることができる．

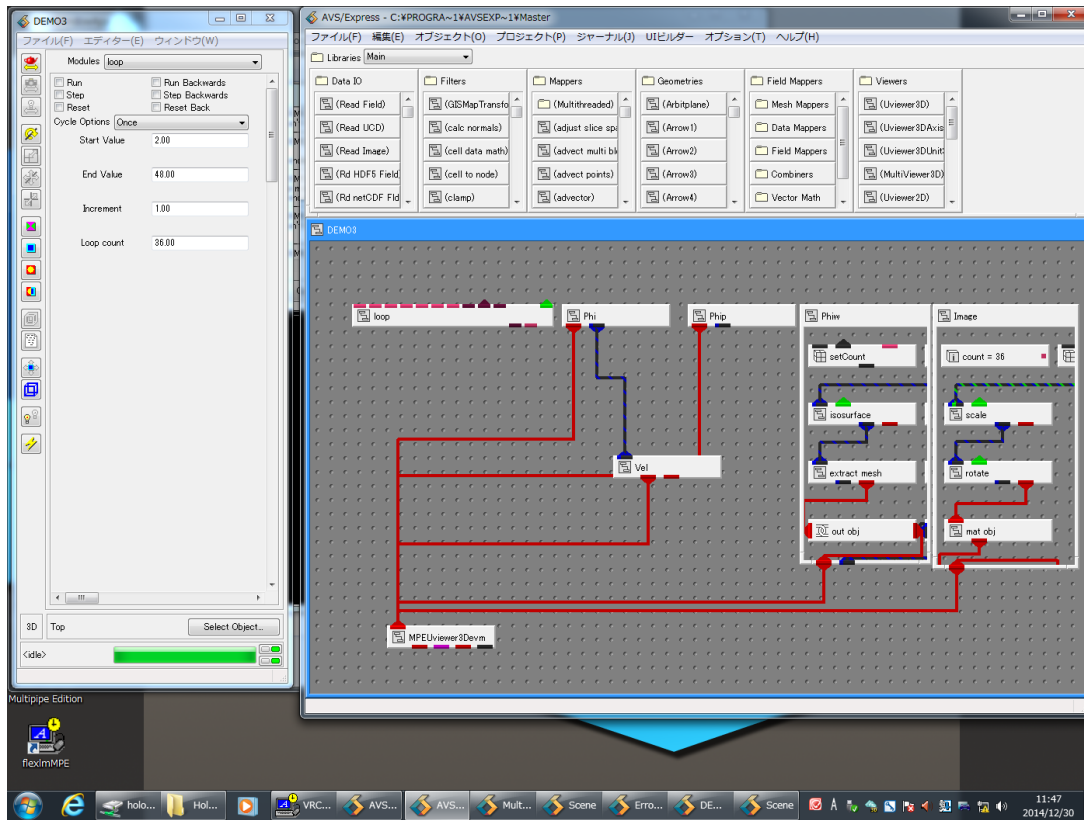


図3 実験と可視化の同時表示のための AVS ネットワークエディタ

当面は、標準問題に対する、解析結果および実験結果の同時表示を試みている。

予定通りに進まなかったこととしては、図2の3dsmax→VR4MAXのパスについては、解析結果（や実験結果）をCADデータにするところできていないので実現していないが、3dsmaxで作成したCGデータ自体は表示できるようになっているので、これは年度内にも実現したい。また、PCクラスとVR装置とのネットワーク接続はできているが、活用できていないので、これも早々に整備したい。

3.6. 横断的研究会

前述の 5 つの研究テーマは、本プロジェクトの柱となるものであるが、それぞれを横断的につなぐ研究や、それぞれの成果から派生した研究もまた重要であると考え。そこで、計算力学研究センターでは、そのときどきで研究会を立ち上げ、5 つの柱とは別のグループで研究を進めようと考えている。研究テーマごとの活動と重複する部分もあるが、ここでは今年度に活動のあった研究会の概要をあらためて記す。

3.6.1. 連成標準問題検討会

連成解析の精度を高め、実用的な手法として育てるのには標準問題が必要であろうと考える。流体解析・構造解析などではそれぞれ手法を開発するとまず解くべき問題があり、それによって手法の精度や有効性等が確認できる。残念ながら連成問題にはそのような標準問題が少ない。そこで、ここでは流体—構造連成に関し、当センターで実験を行い、詳細なデータを取って標準問題として提案できるものを検討する。最終的には、実験・解析を行い、比較するとともに、それらを標準問題として公開する。平成 25 年度は、具体的なターゲットとして一様流れ中に置かれた一端固定の円柱の連成挙動に着目し、数値解析が比較的容易なレイノルズ数 10,000 程度になるように流速や円柱の大きさを決めた後、連成解析として適当な規模の変形量になるように材料定数を決定し、標準問題の最初の一つとして提案したが、今年度はこの問題を解析手法開発グループにおいて解析・比較検討を行っている。

3.6.2. 計算力学と(材料)データベースの会

計算力学に現在用いられている物性データの信頼性の確認と、今後必要とされるデータの所在についての検討が必要と考えられる。また、数値計算とデータベースのより緊密な連携のためには、データアクセスのための API について検討する必要がある。現在、欧州標準規格委員会のワークショップにおいて、機械試験の試験データを電子的に記述するための標準についての検討が行われている。三次元 CAD データなども含む製造物データ管理のための規格である ISO10303 (STEP)との連携も視野に入っており、計算力学による設計と個別の材料の試験データを共通のデータフォーマットを用いて連携させるための規格として今後検討の必要がある。

3.6.3. 楽器音響と流体構造連成研究会

音楽や楽器に関する研究は、他の研究領域に比べまだまだ未知なことが多いわりには研究が進んでいない。その理由には、芸術至上主義ともいわれるように音楽になにか科学的なものや現実的な効果を測ることに、ある種のアレルギーが世の中にはまだあることが挙げられ、また研究対象として理解されなかったり予算が組まれなかったりするからである。しかし、本研究会では、音響

工学や計算工学の立場から科学的に楽器の音響特性や構造, 音色, その先には芸術の科学的解明を目的とする. そもそも音楽は楽器本体から発せられる空気振動現象を脳の聴覚野で知覚するプロセスであり, 楽器の振動と周辺流体の連成は計算工学としても困難であるが興味深い対象である. 現在は, 弦楽器の音響特性のスペクトル解析やハイスピードカメラを用いた弦の振動の可視化, 操作性やヴィヴラートのような演奏技術などの調査を行っている.

4. 共同研究

4.1. JST CREST プロジェクト

平成 23 年 10 月より JST CREST 研究領域「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」において、研究課題名「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」が採択され、研究拠点を当センターに置き、研究を実施している。

4.1.1. 研究実施体制

ポストペタコンなど次々世代の並列計算機アーキテクチャにおいて、大規模な数値計算データ処理を必要とする実アプリケーション分野が高い演算効率を得るためには、マイクロプロセッサやメモリの階層構造を考慮したプログラミングモデルが必要である。特にそれは、入力データ生成や可視化などのプレ・ポスト処理から数値解析手法などのソルバー処理に至るまで、統一的に提供される必要がある。つまり、一般的な実アプリケーションはプレ／ソルバー／ポスト処理など目的に応じたモジュール群で構成されていることが多いが、ポストペタコンの利用が想定される大規模シミュレーションでは、全ての処理がポストペタコン上で行われ、モジュール間のデータ受け渡しを最小限にするようなプログラミングモデル、並びにそれに基づく大規模数値計算データ処理システムの基盤技術が不可欠と言える。

ここで、ポストペタコンのアーキテクチャとしては、SIMD 拡張命令、GPGPU、FPGA など何らかのアクセラレータを搭載したヘテロジニアスメニューコアで構成される計算ノードをネットワーク接続した、分散メモリ型アーキテクチャになると予想され、計算ノード内はチップ上／ボード上問わずに異種の演算装置が NUMA 型で搭載されることを想定する必要がある。また、演算性能と通信性能の向上比を考慮すると、マイクロプロセッサにとって計算ノード間ネットワークというのは、現在で例えると WAN 並みに遅く感じるネットワークとなる可能性があり、ポストペタコンはそれらを数十万から数百万ノード規模で接続して構築されると予想される。さらに、ポストペタコン利用が想定されるシミュレーションにおいて生成されるデータのファイルサイズはペタバイトオーダーになるが、ハードディスクなどの外部記憶装置の記憶容量やアクセス性能の大幅な改善にはまだ時間を要すると考えられる。つまり、ポストペタコンを利活用できるアプリケーションは、ヘテロジニアスな分散メモリ並列かつ数百万計算ノード環境において高い並列効率と演算効率を示す必要があるが、その高いハードルを突破できたとしても、大規模な入出力データを効率的に処理できない限り、本当の意味での利活用は不可能である。この問題を解決するためには、並列ファイル入出力システムの効率化やデータ圧縮展開アルゴリズムの高速化などだけではなく、根本的なデータ量削減に関する解決策が求められる。

そこで本プロジェクトでは、ポストペタコン上における大規模数値計算データ処理システムに関する基盤技術として、申請者らがこれまで主に数値解析手法向けに研究開発してきた階層型領域分割法の技術を応用した、階層型領域分割法による大規模数値計算データ処理システムの研究開発を目指す。この基盤技術にはアプリケーション分野に依存する箇所があることが予想されるため、本提案では連続体力学向けアプリケーションを対象としながら、具体的には以下の基盤技術開発をターゲットとする。

A) マルチレベル領域分割法による連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列化ライブラリ

- B) マルチレベル領域分割法による多階層計算格子データの生成, 操作および I/O ライブラリ
- C) 多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成と言語拡張機能

これらの技術に基づいて開発されるアプリケーションでは, 核となるモジュール間のデータ受け渡し量を従来のものより3桁削減することが可能となり, ピーク演算性能比20%以上のシステム開発の実現を目指す。

4.1.2. 研究実施内容

(1) 「東洋大学」グループ

- ① 研究代表者: 塩谷隆二(東洋大学総合情報学部, 教授)
- ② 研究項目
階層分割型数値計算ライブラリの基礎研究並びに設計とその応用

(2) 「名古屋大学」グループ

- ① 主たる共同研究者: 荻野正雄(名古屋大学情報基盤センター, 准教授)
- ② 研究項目
階層型ソルバーライブラリの基礎研究とその応用

(3) 「東京大学」グループ

- ① 主たる共同研究者: 越塚誠一(東京大学大学院工学系研究科, 教授)
- ② 研究項目
階層分割型入出力ライブラリ並びに連続体力学向け問題領域専用言語の基礎研究とその応用

4.2. (株)日立製作所機械研究所との連携

(株)日立製作所機械研究所とは, (1)メッシュ生成技術, (2)構造健全性設計技術に関して連携を行っている。近年, 産業界では解析主導設計による製品開発のスピードアップと設計上流段階での品質作り込みが最重要課題として進められている。そのためのCAEシステム技術の開発をこれまで行い, 実用性の検証を実施した。そこで, 本年度は, テーマ(2)に関する, き裂進展解析を用いたCuコアはんだボールの接続信頼性評価メッシュ生成技術を中心に研究を行った。

4.3. 独立行政法人 原子力安全基盤機構との連携

当センターで開発を行っているフリーメッシュ法(以下 FMM)と仮想き裂開口積分法(以下 VCCM)を融合した構造健全性評価システム FMM-VCCM の信頼性の検証と実務への応用を目的として, 独立行政法人原子力安全基盤機構(以下 JNES)への技術支援を行う。また, JNES, 株式会社テクノスター, プロメテック・ソフトウェア株式会社と連携し世界最先端レベルの破壊力学ソフトウェアの構築も行っている。

4.4. 東京理科大学との連携

東京理科大学と共同で配管内の腐食同定問題について研究している。東京理科大学ではおもに

実験を、本センターではシミュレーション方法について研究を行っている。本年度は、逆問題の観測方程式のモデル化について検討することを目指した。中性環境における金属部材の腐食は、溶存酸素によるカソード反応が支配的であるので、溶存酸素の金属部材表面への拡散速度が、カソード反応の律速反応になっていると考えられる。そこで、金属部材近傍の流体の速度勾配および溶存酸素の濃度分布に着目

して、流れのある配管内の腐食を精度良くシミュレーションできるか考察を行った。更に、今年度から、これらの解析をアダプティブに行うために、階層メッシュを用いた手法も開発された。

4.5. 本田技術研究所との連携

本田技術研究所から、「ヘッドライト損傷解析手法の確立」と「永久変形量予測技術の開発」を依頼されている。従来は、衝突解析ソルバーRADIOSS を用いることによって、これらの解析していた。しかし、より詳細で正確な解析を求めたいという要望から RADIOSS にプリポスト処理を加えることによって、これらの問題を解決する。「ヘッドライト損傷解析手法の確立」に対しては、アダプティブな亀裂進展解析の機能を、「永久変形量予測技術の開発」に対しては、アダプティブな永久解析の機能を加えることになる。これらの機能を加えることによって、超大型の並列計算機や専用のソルバーで長時間かかった解析を、これまでと同じ計算機環境で一晩あれば解析できるようになる。

5. 成果の広報および普及活動

5.1. 第3回 CCMR-HDDMPPS(CREST プロジェクト)の合同シンポジウム

2014 年 3 月 10 日(月), 東洋大学白山キャンパス 2 号館 16 階スカイホールにて, 第 3 回 CCMR-HDDMPPS(CREST プロジェクト)の合同シンポジウムを開催した.

当日は, 計算力学研究センターと HDDMPPS グループから, 各 5 名が講演を行い, 1 年間の研究の進捗を報告すると共に, 来年度以降の研究方針についての議論が活発に行われた

また, 特別講演として, ヴァージニア工科大学の古川知成教授をお招きして, 「タイヤ研究に見る計算・計測工学」と題した講演も行われ, アメリカにおける最先端の計算・計測工学について知ることの出来る, 貴重な講演となった.

5.1.1. プログラム

13:00-13:10	開会の挨拶	矢川元基 東京大学名誉教授・東洋大学名誉教授
	セッション 1 (CCMR)	
	文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業: 「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」	
	プロジェクトリーダー: 田村善昭(東洋大学計算力学研究センター長)	
	「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」	田村善昭(東洋大)
13:10-14:50	「並列流体-構造連成解析手法の開発」	長岡慎介(東洋大)
	「流体-構造連成解析の SOM を用いた分類及び予測技術の開発」	増田正人(東洋大)
	「合理的な維持管理を目指したコンクリート構造物の塩害環境評価に関する数値解析的検証」	富山潤(琉球大)
	「ブロック構造を有する岩盤の 3 次元モデル生成および地すべり解析」	松原仁(琉球大)
14:50-15:00	休憩	
15:00-16:40	セッション 2 (HDDMPPS)	

科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業(CREST) :	
「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」	
プロジェクトリーダー:塩谷隆二(東洋大学)	
「ポストペタスケールシミュレーションのためのライブラリ開発」	塩谷隆二(東洋大)
「大規模粒子系シミュレーションのメニーコア向け開発と多数の浮遊物が伴う市街地津波解析」	室谷浩平(東京大)
「超大規模データ可視化ライブラリの開発」	和田義孝(近畿大)
「超大規模解析に向けた数値計算ライブラリの開発」	屋雄介(名大)
「高精度電磁界シミュレーション」	武居周(宮崎大)
16:40-16:50	休憩
16:50-17:20	特別講演
	古川知成 (Virginia Tech.)
17:20-17:30	「タイヤ研究に見る計算・計測工学」
	田村善昭 東洋大学計算力学研究センター長

5.2. 第 10 回機械工学国際会議

第 10 回機械工学国際会議 2014 年 6 月 19 日(木)から 21 日(土)にわたり, ダッカ(バングラデッシュ)のバングラデッシュ工科大学 (Bangladesh University of Engineering and Technology: BUET) にて行われた, 第 10 回機械工学国際会議 (10th International Conference on Mechanical Engineering: ICME2013) に, 東洋大学計算力学研究センターより 3 名が参加・講演を行った. ICME は 2 年に 1 度, バングラデッシュで開催される, 機械工学の分野を幅広く取り扱った国際会議である. 当日は, センター長の田村が Keynote speaker として講演を行った他, 研究員の塩谷, 研究助手の長岡が講演を行った. この地域で行われる会議に参加する機会は, 非常に少ない為, 同地域の機械工学や 計算力学の現状を知ることができる, 極めて有益な機会となった.



図 第 10 回機械工学国際会議の様子

5.3. 第5回国際スーパーコンピューティングワークショップ

5th International Industrial Supercomputing Workshop (IISW2014)

2-3 October 2014, Hakusan Campus, Toyo University, Tokyo, Japan

<http://www.toyo.ac.jp/site/ccmr/iisw2014.html>

2014年10月2日・3日、東洋大学白山キャンパス125周年記念ホールにて第5回国際スーパーコンピューティングワークショップ(5th International Industrial Supercomputing Workshop, IISW2014)が行われた。第5回国際スーパーコンピューティングワークショップはNCSA(アメリカ), KISTI(韓国), HLRS(ドイツ), そしてSURFsara(オランダ)に続くものである。このワークショップの主な目的は、スーパーコンピューティングに関連する技術的問題を共有することである。世界中から集まった優れた研究者たちにより活発な議論が行われた。参加者たちにとって、各々の研究活動をさらに推進するための幅広くかつ深い知識を得ることができた貴重な機会となった。

5.3.1. 実行委員会

Ryuji Shioya (Toyo University) - Chairman

Hiroshi Kawai (Tokyo University of Science Suwa)-Secretary General

Yoshiaki Tamura (Toyo University), Masao Ogino (Nagoya University), Kohei

Murotani (University of Tokyo), Yasushi Nakabayashi (Toyo University), and Akio

Miyoshi (Insight Inc.)

Supported by

CREST, Japan Science and Technology Agency (JST)

Center for Computational Mechanics Research (CCMR), Toyo University

Assisted by

Japan Association for Computational Mechanics (JACM)

Japan Society for Computational Engineering and Science (JSCES)

Joint Usage/Research Center for Interdisciplinary Large-scale Information

Infrastructures (JHPCN)

5.3.2. プログラム

Day 1, 2nd October, 2014

10:00 Welcome and introduction: Ryuji Shioya, Toyo University, Japan

10:15-11:15 Session 1 Chair: Ryuji Shioya, Toyo University, Japan

Lecture 1	Merle Giles, National Center for Supercomputing Applications (NCSA), University of Illinois, United States
Lecture 2	Bastian Koller, High Performance Computing Center Stuttgart (HLRS), University of Stuttgart, Germany
11:15-11:45	Coffee Break
11:45-12:45	Session 2 Chair: Yasushi Nakabayashi, Toyo University, Japan
Lecture 3	Sang Min Lee, Supercomputing Center, Korea Institute of Science and Technology Information (KISTI), South Korea
Lecture 4	Satoshi Itoh, Advanced Institute for Computational Science (AICS), RIKEN, Japan
12:45-14:15	Lunch
14:15-15:45	Session 3 Chair: Yoshitaka Ezawa, Toyo University, Japan
Lecture 5	Yoshinari Fukui, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Japan
Lecture 6	Atsushi Sasaki, Global Scientific Information and Computing Center (GSIC), Tokyo Institute of Technology, Japan
Lecture 7	Makoto Tsubokura, Division of Mechanical and Space Engineering, Hokkaido University, Japan
15:45-16:15	Coffee Break
16:15-18:15	Session 4 Chair: Hiroshi Kawai, Tokyo University of Science, Japan
Lecture 8	Hiroshi Akiba, Allied Engineering Corporation, Japan
Lecture 9	Hiromu Chiba, Numerical Algorithms Group, Japan
18:15	Closing: Hiroshi Kawai, Tokyo University of Science, Japan
18:30-20:30	Reception Party

Day 2, October 3rd, 2014

10:00	Opening: Yoshiaki Tamura, Toyo University, Japan
10:15-11:15	Session 5 Chair: Yoshiaki Tamura, Toyo University, Japan
Lecture 10	Walter Lioen, SURFsara, Netherlands
Lecture 11	Mariano Vazquez, Barcelona Supercomputing Center (BSC), Spain
11:15-11:45	Coffee Break
11:45-12:45	Session 6 Chair: Hiroshi Kanayama, Japan Women's University, Japan

Lecture 12	Leif Nordlund, KTH Royal University of Stockholm, Sweden
Lecture 13	Pankaj Shah, Ohio Supercomputer Center and OARnet, United States
12:45-14:15	Lunch
14:15-15:45	Session 7 Chair: Masao Yokoyama, Meisei University, Japan
Lecture 14	Takahiro Katagiri, Information Technology Center (ITC), University of Tokyo, Japan
Lecture 15	Ryouji Takagi, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Japan
Lecture 16	Masahiko Mizuno, Toyota Central R&D Labs., INC, Japan
15:45-16:15	Coffee Break
16:15-18:00	Session 8 Chair: Yoshitaka Wada, Kinki University, Japan
Lecture 17	Hiroshi Okuda, Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo, Japan
Lecture 18	Kenji Ono, Center for Research on Innovative Simulation Software (CISS), Institute of Industrial Science (IIS), University of Tokyo, Japan
18:00	Closing: Genki Yagawa, CCMR, Toyo University, Japan
18:30-20:30	Banquet



☒ IISW2014 の様子

5.4. 東京都北区主催「ものづくり夜間大学校」

10 月 23 日・30 日に東洋大学白山キャンパスにて東京都北区主催の「ものづくり夜間大学校」が開催された。本センターより塩谷隆二教授と中林靖准教授、研究助手三名が指導にあたった。“東洋大学による「スマートフォンアプリ開発講座」”という題名で、23 日は iPhone アプリ開発、30 日は Android アプリ開発についての講義と実習が行われた。本講座の対象は中小企業の方々に、両日とも約 20 名が受講した。

23 日の iPhone アプリ編では、Xcode という iPhone アプリ開発用ソフトを用いて、具体的にどのように開発するのかをレクチャーしたあと、受講者各自が実際に手を動かしてアプリ制作に取り組むという流れだった。Apple により最近開発された Swift という新しい言語を用いたこともあり、年配の受講者はやや苦戦しているようだったが、多くの受講者は簡単なアプリを制作できた。

30 日の Android アプリ編では、AppInventor2 というソフトを用いて、講義および実習を行った。通常、Android アプリは JAVA という言語を用いて開発されるが、AppInventor2 を用いれば、JAVA の知識が全くなくても、直感的な操作でアプリを制作することができる。プログラムコードを書く必要がなく操作がわかりやすかったので、ほとんどの受講者が簡単なアプリを制作することができた。

両日とも、受講者の皆様は熱心に講義に聞き入っていて、中小企業のスマホアプリ開発に対する強い興味と関心を感じた。



図 ものづくり夜間学校の様子

6. 学術活動

2014 年 1 月から 2015 年 1 月までの業績を掲載する.

6.1. 論文投稿

1. Yokoyama M., Mochizuki O., Yagawa G, "Surface Condition of Solid in Splash Formation", IACM expressions, No. 34,,pp2-5, 2014.02
2. Yokoyama M, Kubota Y, Kikuchi K, Yagawa G and Mochizuki O, "Some remarks on surface conditions of solid body plunging into water with particle method ", Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences, Vol.1.1,pp1-14, 2014.06
3. 郭永明, 堂脇徹朗, 矢川元基, 上谷俊平, "自然境界弱形式を有する選点法",計算工学講演会論文集, Vol.19, 2014.06
4. 郭永明, 吉田大祐, 矢川元基, 上谷俊平, "Over-Range 選点法における局所座標定数の最適値",計算工学講演会論文集, Vol.19, 2014.06.
5. 富山潤, “コンクリート橋上部工に付着する飛来塩分に関する数値解析的検討”, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.874-879, 2014.
6. 風間洋, 富山潤, 下地健, 小簇俊介, “沖縄県内陸部における FAC 利用に関する中性化耐久性検討”, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.850-855, 2014.
7. 福地啓太, 宮野伸介, 富山潤, 大城武, “防食 PC 鋼材の付着性能とプレテンション PC 桁のせん断耐力に関する研究”, プレストレスコンクリート学会, 第 23 回シンポジウム, pp.605-610, 2014.
8. 戸田勝哉, 楊威, 富山潤, 下村匠, “分光分析を用いたコンクリート構造物の塩分分布測定法の開発”, 非破壊検査, 2014.10

9. A. M. M. Mukaddes, Masao OGINO, Ryuji SHIOYA, “Performance Evaluation of Domain Decomposition Method with Sparse Matrix Storage Schemes in Modern Supercomputer”, International Journal of Computational Methods, Vol.11, Suppl. 1, 1344007, pp.1-14, 2014.
10. Itaru Ishikawa, Hiroshi Kawai, Yosuke Kobayashi, Ryuji Shioya, Genki Yagawa, “Simulation Results and its Performance by Using a Developing Eigenvalue Analysis Module of the ADVENTURE System”, Procedia Engineering, Volume90, 140-146, 2014.
11. A.M.M. Mukaddes, Masao Ogino, Ryuji Shioya, “The Study of Thermal-solid Coupling Problems Using Open Source CAE Software”, Procedia Engineering, Volume90, 147-153, 2014.
12. M.Yokoyama, K.Murotani, G.Yagawa, O.Mochizuki, “Some considerations on surface condition of solid in computational fluid-structure interaction”, in NUMERICAL SIMULATIONS OF COUPLED PROBLEMS IN ENGINEERING, pp. 171-186, 2014, Springer International Publishing.
13. Yong-Ming GUO, Kouji SHIOYA, Kei OOBUCHI, Genki YAGAWA, Shunpei KAMITANI , “Accuracy improvement of collocation method by using the over-range collocation points for 2-D and 3-D problems”, Mechanical Engineering Journal, Vol.1, No.2, pp.1-19, 2014.
14. Shinsuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Genki Yagawa, ”Parallelization of Enriched Free Mesh Method for Large Scale Fluid-structure Coupled Analysis”, Procedia Engineering, 90, pp. 288-293, 2014

6.2. 総説・解説・エッセイ

1. 横山真男, ヴァイオリンの音色研究, 可視化情報学会誌, vol.35, 136, (2014) pp.17-22.

6.3. 書籍

1. Yokoyama M., Murotani, K., Yagawa, G., and Mochizuki, O., “Some Considerations on Surface Condition of Solid in Computational Fluid-Structure Interaction”, In Numerical Simulations of Coupled Problems in Engineering (2014) pp. 171-186, Springer International Publishing.

6.4. 学会発表

1. N. FUJIMATSU, "Direct Numerical Simulation on Drag Reduction of Channel Flow with Visco-Elastic Wall", 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2013.1.7.
2. 長岡慎介, 中林靖, 矢川元基, “EFMM の並列流体-構造連成解析への適用”, 第 62 回理論応用力学講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス, 2013.03.06-08.
3. Shinsuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Genki Yagawa, "Parallelization of enriched free mesh method for large scale fluid-structure coupled analysis”, International Conference on Mechanical Engineering 2013 (ICME2013), Dhaka, Bangladesh, June 20-21, 2014.
4. Itaru Ishikawa, Yosuke Kobayashi, Ryuji Shioya, Genki Yagawa, "Simulation results and its performance by using a developing eigenvalue analysis module of the adventure system”, International Conference on Mechanical Engineering 2013 (ICME2013), Dhaka, Bangladesh, June 20-21, 2014.
5. Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi, Yoichiro Matsumoto, "Visualizations of Bubble Motions and Temperature Rises by Focused Ultrasound”, International Conference on Mechanical Engineering 2013 (ICME2013)", Dhaka, Bangladesh, 2014.06.20-21.
6. M. Yokoyama, K. Murotani, K. Kikuchi, G. Yagawa, O. Mochizuki, "How deal with slippery surface between fluid and structure in particle method?" The 16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16) , Okinawa Convention Center, June 26, 2014.
7. Takafumi Nosaki, Nobuyoshi Fujimatsu, "Experimental study of aerodynamic characteristics of baseball with accelerating motion”, The 16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16) , Okinawa Convention Center, June 26, 2014.
8. Naohiro Shinozaki, Nobuyoshi Fujimatsu. " Motion analysis and flow visualization of sheet flutter for various materials”, The 16th International Symposium on Flow Visualization (ISFV16) , Okinawa Convention Center, June 26, 2014.

9. Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi and Yoichiro Matsumoto, "Some Modifications of Bubble Model for Cavitating Flow Simulations", 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July, 2014.
10. Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi and Yoshiaki Tamura, "Fluid-Structure Interaction Analysis of Vibration Phenomena and Verification of its classification and Prediction Accuracy using Modular Network Self-Organizing Map", 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July, 2014.
11. Shinsuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Yoshiaki Tamura and Genki Yagawa, "The Comparison of the Experimental Result with the Numerical Analysis using the New Coupled Analysis Method based on the Enriched Free Mesh Method and the SUPG/PSPG Stabilized Finite Element Method", 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July, 2014.
12. Masao Yokoyama, Kohei Murotani, Genki Yagawa and Osamu Mochizuki, "Fluid-Structure Interaction Analysis with Slippery Mucus Skin", 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) and 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July, 2014.
13. 広瀬孝三郎, 松原仁, 粘性土における Mud crack 生成パターンに関する実験的検討, 土木学会第 69 回年次学術講演概要集, pp. 85-86, 2014.
14. 宮野伸介, 大城武, 富山潤, 福地啓太, “塗装 PC 鋼より線仕様のプレテンション PC 桁の付着性能に関する研究”, 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-013, pp.25-26, 2014.
15. 富山潤, 大城武, 大貫隆弘, “塩害環境化におけるエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた鉄筋コン

- クリートの防食に関する研究”，土木学会第69回年次学術講演会，V-439，pp.877-878，2014.
16. 松浦葵，富山潤，迫田泰治，“ASR 劣化したプレテンション PC 桁橋の劣化調査とモニタリング調査”，土木学会第 69 回年次学術講演会，V-484，pp.967-968，2014.
 17. 横山真男，野村和希，望月修，“水底の形状変化を用いた水滴落下による騒音の緩和”，日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集，2014.10.
 18. 新城達也，藍檀オメル，渡嘉敷直彦，富山潤，“ロックアンカー・ロックボルトの非破壊試験法の開発”，土木学会西部支部沖縄会，第 4 回技術研究発表会，pp.60-61，2014.
 19. 土屋憲一，藍檀オメル，渡嘉敷直彦，富山潤，“トンネル掘削における発破振動計測の試み，土木学会西部支部沖縄会”，第 4 回技術研究発表会，pp.62-63，2014.
 20. 福長友弥，藍檀オメル，渡嘉敷直彦，富山潤，“史的石積み構造物に対する多重パラメータ動態計測システムとその中城城址への適用”，土木学会西部支部沖縄会，第 4 回技術研究発表会，pp.64-69，2014.
 21. 亀川裕也，藍檀オメル，富山潤，山口順圭，屋我晃，神谷和志，上里尚也，“コンクリートブリズム(CPT)を用いた ASR 加速試験の遅延膨張性 ASR への適用性に関する研究”，土木学会西部支部沖縄会，第 4 回技術研究発表会，pp.128-129，2014.
 22. 外間賢伍，松浦葵，藍檀オメル，富山潤，“コンクリート橋上部工の付着塩分量に関する調査および塩害環境評価法に関する基礎研究”，土木学会西部支部沖縄会，第 4 回技術研究発表会，pp.130 -131，2014.
 23. 松浦葵，藍檀オメル，富山潤，迫田泰治，浅井光輝，“ASR 劣化したプレテンション PC 桁橋の調査および損傷理論を導入したボクセル FEM を用いた膨張予測の基礎検討”，土木学会西部支部沖縄会，第 4 回技術研究発表会，pp.132-135，2014.
 24. 平田淳貴，吉次優祐，松浦葵，藍檀オメル，富山潤，“コンクリート梁の振動特性に関する基礎研究，土木学会西部支部沖縄会”，第 4 回技術研究発表会，pp.170-171，2014.

25. 吉次優祐, 松浦葵, 平田淳貴, 松川博宣, 富山潤, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, “塩害劣化したコンクリート橋梁の振動特性評価に関する基礎研究”, 土木学会西部支部沖縄会, 第 4 回技術研究発表会, pp.172-173, 2014.
26. 松川博宣, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 富山潤, “モノレール駅の振動特性に関する基礎研究, 土木学会西部支部沖縄会”, 第 4 回技術研究発表会, pp.174-175, 2014
27. 増田正人, 中林靖, 田村善昭, “自己組織化マップを用いた解析結果の予測”, 日本機械学会第 27 回計算力学講演会, 盛岡, 2014 年 11 月
28. 長岡慎介, 中林靖, 田村善昭, 矢川元基, “EFMM を用いた流体-構造連成解析と実験結果との比較”, 日本機械学会第 27 回計算力学講演会, 盛岡, 2014 年 11 月
29. 後藤恵理子, 瀬田陽平, 矢川元基, 横山真男, “容器の口から流れる液だれの数値シミュレーション”, 日本機械学会第 27 回計算力学講演会, 盛岡, 2014 年 11 月
30. Toshihiro Ashino, Yuichiro Yamashita and Tetsuya Baba, “The Requirements for Permanent URI's of Reliable Constant Values and Unit Systems to Linked Measurement Data”, SciDataCon2014, Delhi, India, November 2014
31. 広瀬孝三郎, 松原仁, 原久夫, マッドペーストを用いた Mud crack 生成パターンに関する実験的検討, 第 27 回沖縄地盤工学研究発表会講演概要集, pp.32-33, 2014.
32. 河合浩志, 谷村景貴, 塩谷隆二, “アクセラレーター向け最適化コード自動生成 DSL 開発”, 日本機械学会第 27 回計算力学講演会, 講演番号 1604, 岩手大学工学部, 2014 年 11 月 22 日～24 日
33. Hirotaka Tanimura, Hiroshi Kawai, and Ryuji Shioya, "A Development of Domain Specific Language(DSL) for Continuum Mechanics", JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software, P40, KOBE, JAPAN, December 2-4, 2014

6.3. 招待講演

1. G. Yagawa, M. Yokoyama, K. Murotani, "High-Performance Computing for Fluid-Structure Interaction with Application to Splash Problem", International Conference on Computational Fluid-Structure Interaction and Flow Simulation ",Tokyo, JAPAN, 2014.03.20
2. Yasushi NAKABAYASHI, Shinsuke NAGAOKA and Genki YAGAWA, "An Efficient Approach for the Fluid-Structure Interaction Problems based on the Stabilized Finite Element Method and the Enriched Free Mesh Method", Advances in Computational Fluid-Structure Interaction and Flow Simulation, Tokyo, Japan, 2014.03.19-21
3. Yasushi NAKABAYASHI, Shinsuke NAGAOKA and Genki YAGAWA, "An Efficient Parallelization Method and Asymmetric Solver for the Fluid-Structure Interaction Problem", KSME-JSME Symposium on Computational Mechanics & CAE 2014, Jeju, Korea, 2014.05.01
4. 矢川元基, 流体構造連成問題について(その2), 東京理科大学特別講義, 2014.5.27(野田)
5. Yoshiaki Tamura, Nobuo Tsurumi, Yoichiro Matsumoto, "Visualizations of Bubble Motions and Temperature Rises by Focused Ultrasound", International Conference on Mechanical Engineering 2013 (ICME2013), Dahka, Bangladesh, 2014.06.20-21
6. Yasushi NAKABAYASHI, Shinsuke NAGAOKA, Yoshiaki TAMURA and Genki YAGAWA, "An Efficient Parallelization and Asymmetric Solver for the FSI Solver based on the SUPG/PSPG Method and the Enriched Free Mesh Method", The 5th International Conference on Computational Methods (ICCM2014), Cambridge, England, 2014.07.28-30
7. 矢川元基, 計算力学の最新動向, ヤンマー(株), 特別講演, 2014.9.29(米原)
8. 矢川元基, 計算科学, 計算力学シミュレーションの現状と課題, 新日鉄住金(株), 特別講演, 2014.10.8(富津)
9. G. Yagawa, Large scale fluid structure interaction considering the surface condition of the solid wall, ESI Forum2014, 2014.11.20(Tokyo)

6.4. 受賞

1. 松原仁, 平成 25 年度日本計算工学会論文奨励賞(論文タイトル: 振り外力を受ける環状切欠き丸棒におけるファクトリーループ状破断面の形成メカニズムに関する数値解析的検討), 平成 26 年 5 月

7. 研究グループ紹介



中林研究室



塩谷研究室



藤松研究室



江澤研究室

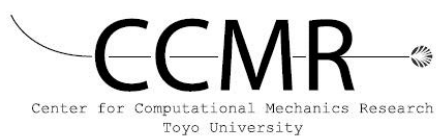


田村研究室

8. 結び

本報は、2014 年度の活動を取りまとめたものである。なお、2015 年 3 月に予定されているセンター評価委員会に間に合わせるために原稿締め切りを 2015 年 1 月 31 日とした。したがって、それ以降のデータについては掲載されていないことをお断りしたい。

社会が抱える問題、あるいは産業界が抱える問題を発掘しながらソリューションを見出していくことをセンターに関係する全ての研究者が使命として共有しながら今後の活動や研究開発を進めていきたい。



東洋大学 計算力学研究センター 2014 年度年報

この資料の転載, 引用などをご遠慮ください.

本資料に関するお問い合わせは下記へお願いいたします.

編集・発行 東洋大学計算力学研究センター

〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100

URL: <http://www.toyo.ac.jp/site/ccmr/>

TEL・FAX: 049-239-1475

2015 年 3 月発行

禁無断転載

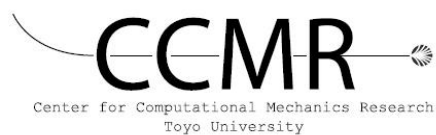
東洋大学計算力学研究センター

2015 年度 年報



2016 年 3 月

2015 Annual Report of
Center for Computational Mechanics Research
Toyo University



March 2016

目次

1. まえがき.....	1
2. センターの概要	2
2.1. センター設置について	2
2.2. 組織	3
2.3. 構成メンバー	4
3. 研究成果	5
3.1. 解析手法開発グループ	5
3.1.1. 超大規模並列流体－構造連成解析手法の開発	6
3.1.2. 流体－構造連成解析の mnSOM を用いた分類及び予測技術の開発	26
3.1.3. 粒子間インタラクションに着目した大規模粒子法シミュレーション	30
3.1.4. 損傷理論を導入したボクセル FEM によるアルカリシリカ反応の膨張挙動解析	35
3.1.5. Sinkhole の形成シミュレーション	45
3.2. 大規模並列化グループ	50
3.2.1. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発	51
3.2.2. 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築	55
3.3. 新規実験計測グループ	58
3.3.1. 標準問題のための弾性円柱の振動実験	59
3.3.2. 流体－構造連成解析の検証用風洞実験システムを用いたフラッタ特性の確認実験	61
3.3.3. 飛行物体に作用する空気力特性	64
3.4. 精度・妥当性検証グループ	66
3.4.1. ベイズ推定を用いた効率的精度解析技術の開発	67
3.4.2. 最適化の代数的構造の研究	72
3.4.3. 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式の開発	74
3.4.4. オープン CAE (固体の有限要素法)を用いた精度検証	76
3.5. 可視化検証グループ	82
3.5.1. 3次元画像による定量的・定性的検証	83
3.5.2. オールドバイオリンの音色とバイオリンの演奏法に関する可視化的研究	89
4. 共同研究	91
4.1. JST CREST プロジェクト	91
4.1.1. 研究実施体制	91
4.1.2. 研究実施内容	92
5. 成果の広報および普及活動	94
5.1. 第 4 回 CCMR-HDDMPPS (CREST プロジェクト) 合同シンポジウム	94

5.1.1.	プログラム.....	94
5.2.	第1回日韓中台学生ワークショップ Mechanical Engineering Seminar (MES) 2015	96
5.2.1.	プログラム.....	96
5.3.	台湾・龍華科技大學川越キャンパス見学	100
5.4.	東洋大学産学協同教育センター中核人材育成講座「スマホアプリ開発入門講座」.....	101
6.	学術活動	102
6.1.	論文投稿	102
6.2.	著書	103
6.3.	総説・解説・エッセイ	103
6.4.	学会発表	104
6.5.	招待講演	110
6.6.	受賞	110
7.	研究グループ紹介	111
8.	結び	112

1. まえがき

2012年に私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に選定されてほぼ4年が経過した。本事業はセンターとして二度目の大型事業であり、いわば第2期である。この報告書はその4年目の活動を中心にとりまとめている。

今回の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業はその題目を「大規模高精度流体_構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」としている。これは、それまでの流体解析や構造解析といった個別の物理の解析から一步進めてより複雑な、また現実的な問題に計算力学の手法を適用しようとする事と、単に研究として行うのではなく、精度や妥当性を十分に検証し、あるいはその検証方法を確立することで、実用に耐えうるものとする事を目指してのことである。本年度は、その4年目であり、各メンバー、グループの研究もほぼ収束に向かっているはずである。それぞれの進展については3章に詳しく述べられている。また、これまでアジアの大学を中心に研究交流を行ってきたが、この報告が出る直前には、英国カーディフ大学と合同学生ワークショップが開催されている予定である。さらに、戦略的研究推進事業 CREST やその他、センターに関連する研究についてもふれている。

昨年度、文部科学省に出した中間報告に対する評価からは、センターの特色・強みをどのように出していくかが課題であるとの指摘を受けたと思っている。残りの期間で何ができるか、何をすべきか見直しながら本年度の活動を行ってきた。ある程度の成果は本報に含まれているが、まだまだ、物足りなく感じられる向きもあるだろうと思う。今後ともさらなるご批判とご指導を賜れば幸いである。

2016年3月

東洋大学計算力学研究センター長

田村 善昭

2. センターの概要

本センターは、わが国の私立大学学術フロンティア拠点のひとつとして文部科学省から設置が認められ、平成 17 年度に活動を開始した。その後、平成 23 年度に科学技術振興機構の戦略的研究推進事業 CREST の選定、続いて平成 24 年度に文部科学省の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け、今日に至っている。

本センターに参加する研究員は、東洋大学の複数学部・大学院の教員（工学研究科，国際地域学部，総合情報学部，理工学部），博士研究員，大学院生などを中核とし，また客員研究員として関連分野の内外の研究者から構成されている。

各自の専門分野は，構造解析，流体解析，破壊解析，逆問題・最適化，大規模並列計算，可視化など，計算力学分野で必要とされるほぼ全ての分野に跨っており，この分野における専門家集団である。平成 23 年度に採択を受けた CREST では「京」コンピュータ利用のための超大規模解析技術に関して，また平成 24 年度からは，私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け，連成解析や計算力学の精度検証・妥当性検証にも積極的に取り組んでいる。

さらに，東洋大学 125 周年を契機とした国際化に合わせて海外の関連する大学と積極的に交流を進め，若手の人材育成にも寄与したいと考えている。

2.1. センター設置について

東洋大学計算力学研究センター設置の経緯とこれまでの概要は以下の通りである。

- 平成 17 年 6 月文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」に研究題目「数値逆解析手法の開発とその構造健全性向上のための応用」で採択され，計算力学研究センター発足
- 平成 17 年 12 月センター開所式開催のあと，白山第 2 キャンパス内計算力学研究センター棟に入居し本格活動開始
- 平成 22 年 3 月「学術フロンティア推進事業」終了
- 平成 23 年 8 月科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」に研究題目「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」で採択される
- 平成 24 年 4 月文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に研究題目「大規模高精度流体構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」で採択される

2.2. 組織

計算力学研究センターの組織は以下の通りである。

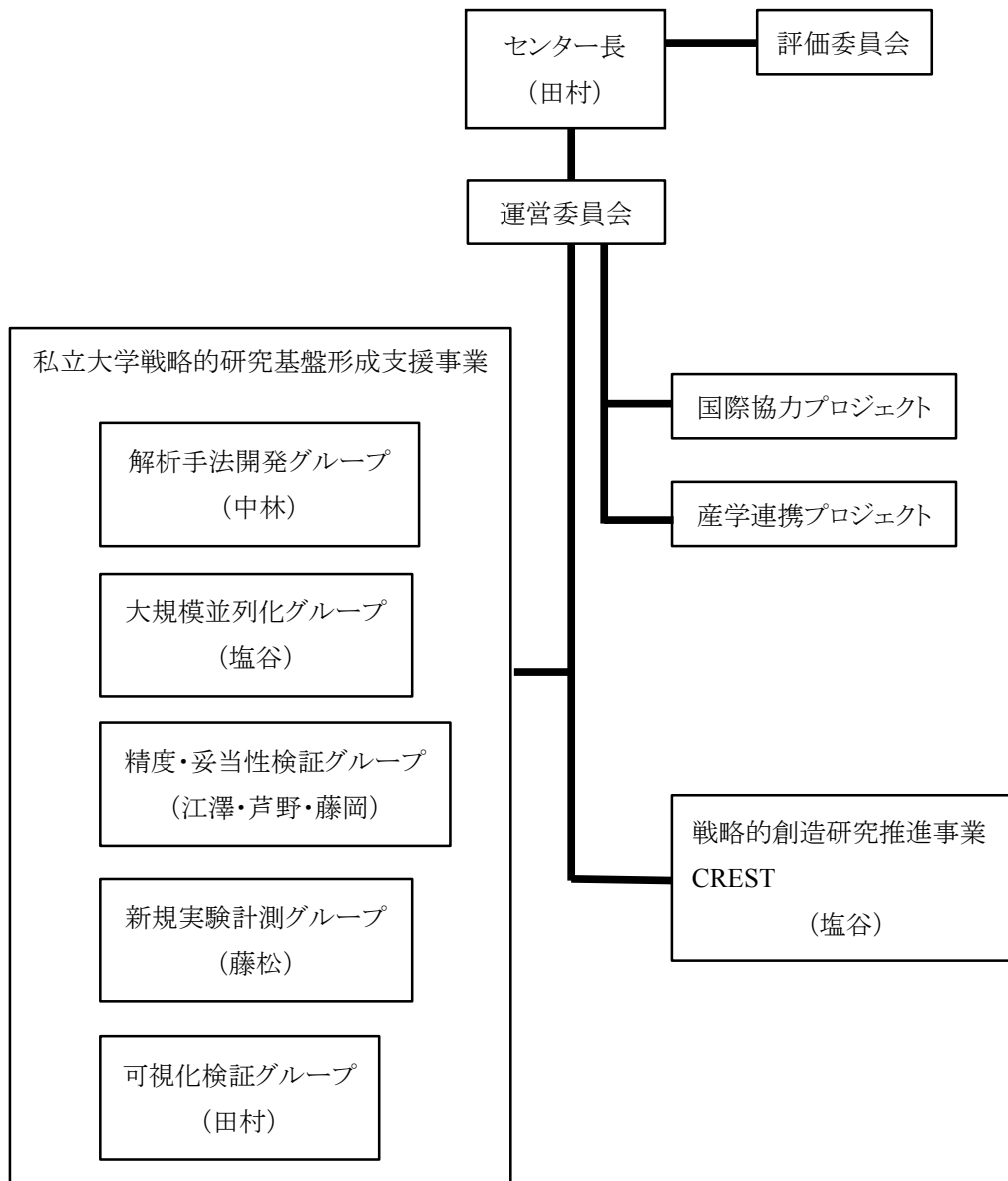


Fig.2.1. センターの組織

2.3. 構成メンバー

計算力学研究センターは以下のメンバーで構成されている。

センター長

田村 善昭(東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)

研究員

芦野 俊宏(東洋大学国際地域学部国際地域学科教授)

塩谷 隆二(東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)

中林 靖(東洋大学総合情報学部総合情報学科准教授)

藤岡 照高(東洋大学理工学部機械工学科教授)

藤松 信義(東洋大学理工学部機械工学科准教授)

研究助手・研究支援者

長岡 慎介(東洋大学計算力学研究センター)

増田 正人(東洋大学計算力学研究センター)

鄭 宏杰(東洋大学計算力学研究センター)

谷村 景貴(東洋大学計算力学研究センター)

学生

島村 雅彦(東洋大学大学院工学研究科機能システム専攻博士後期課程)

高清水 聖(東洋大学大学院工学研究科機能システム専攻博士後期課程)

客員研究員

矢川 元基(前東洋大学計算力学研究センター長, 東京大学名誉教授, 東洋大学名誉教授)

金山 寛(日本女子大学特任教授, 九州大学名誉教授)

富山 潤(琉球大学工学部准教授)

古川 知成(バージニア工科大学工学部機械工学科教授)

松原 仁(琉球大学工学部助教)

横山 真男(明星大学情報学部情報学科准教授)

江澤 良孝(元東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)

3. 研究成果

3.1. 解析手法開発グループ

解析手法開発グループでは、計算力学研究センターのプロジェクト名である「大規模高精度流体-構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」のうち、「高精度流体構造連成解析手法の開発」の部分に焦点を当てた活動を行っている。

流体-構造連成解析を高精度かつ安定的に実施するためには、まず、流体解析手法・構造解析手法そのものの精度や信頼性を高めた上で、それらを連成させるアルゴリズムについても十分に検討する必要がある。これまでのところ、計算力学研究センターでは流体解析に SUPG/PSPG 安定化有限要素法を用い、構造解析に EFMM を用いる手法を中心に連成解析を行ってきたが、このアプローチ以外にも例えば粒子法を用いた手法など様々な戦略が考えられる。

上記の事項を踏まえて、今年度は、以下の 5 項目について報告を行う。

- (1) 超大規模並列流体-構造連成解析手法の開発
- (2) 流体-構造連成解析の mnSOM を用いた分類及び予測技術の開発
- (3) 粒子間インタラクションに着目した大規模粒子法シミュレーション
- (4) 損傷理論を導入したボクセル FEM によるアルカリシリカ反応の膨張挙動解析
- (5) Sinkhole の形成シミュレーション

3.1.1. 超大規模並列流体－構造連成解析手法の開発

(1) 目標・計画

本研究では、超大規模問題にも適用可能な流体－構造連成現象を解く為の新しい解析手法を開発する事を目的としている。本研究で提案する Enriched Free Mesh Method (EFMM)を用いた構造解析手法と、SUPG/PSPG 安定化有限要素法を用いた流体解析手法を組み合わせた、新しい流体－構造連成解析手法は、各解析領域場を使用するメッシュ分割パターンが共に線形要素であることから、流体－構造境界面における整合性を完全に得ることが出来、その結果、流体－構造連成問題を解く際に、非常に重要となる、各解析場の境界面の連成効果を考慮する際に生じる問題を解消する事に成功している。さらに、前述の通り、各解析場に用いられるメッシュ分割パターンは、線形要素のみであるにも関わらず、その解析精度は、従来の線形要素を用いた解析結果と比較して向上すると言う結果を得られている。この特長から、本提案手法は、大規模問題を解く際に、問題になってくる計算機リソースと、計算時間の大幅な抑制を可能にする事を意味している。一方で、本手法は、近年の大規模解析の際に、必要不可欠となる並列処理を施す際に、大きな問題を有する手法であることが明らかとなった。この問題は、EFMM の解析アルゴリズムに起因するものであった。

昨年度までに、本提案手法による大規模並列解析を行うために、EFMM の並列解析手法の提案と実装を行い、その並列化効率の検証を併せて行い、概ね良好な結果を得ることが出来たが、本研究で対象とするような超大規模問題へ適用した際に、アルゴリズムに若干の改良とそれに伴う、コードのチューニングが必要となる事が明らかとなった。

また、提案している流体－構造連成解析手法を用いた並列化解析を行う過程で、現行のメッシュコントロール手法では、今後の超大規模解析を行う際の計算時間が莫大なものとなるという問題も明らかになった。

そこで平成 27 年度は、並列計算を行う際に分割する局所領域ベースでのメッシュのスムージング手法を新たに導入し、さらに昨年度までに提案している並列 EFMM を 1 兆自由度規模の問題へ適用し、その解析精度と並列化効率の検証を行った。

また、これらの手法の健全性を証明するために、提案手法を用いた数値解析結果と実験結果との比較を行った。

(2) 意義・国際社会との比較

現在、国内外を問わずに、計算力学の分野において、流体－構造連成現象を対象とした研究は、非常に注目されており、積極的に行われている。この現象を解くために、多くの研究者が様々なアプローチを行い、沢山の新しい解析手法が提案され、多くの成果が発表されている。その一方で、現時点までに、決定的な解析手法は確立されていない。

提案されている多くのアプローチは、流体解析手法として、粒子法を用いているものが、非常に多い。メッシュ分割を必要としない粒子法を用いることで、解析場が大きく変動するような問題の解析も容易になることから、流体解析場において多くのアドバンテージが得られることが、その一因で

あると考えられる。しかし、我々の提案している手法は、流体解析場、構造解析場共に格子法を用いている。格子法をそれぞれの解析場に用いる事で、粒子法を用いた流体解析と比較して、解析領域の大きな変化に対しては、対応し難い面もあるが、解析精度の面では、粒子法を用いたアプローチと比較して大きなアドバンテージを有していると考えられる。

本手法の確立により、数値シミュレーションにおいて、非常に重要な解析精度を損なう事無く、多くの流体-構造連成現象を解く事が可能になると考えられる。このことから、本研究は、格子法を用いた流体-構造連成解析手法の確立と云う観点からも、非常に意義のある研究であると言える。

(3) 研究内容

今年度の研究内容は下記の3つに大別される。

1. 領域分割型ラプラシアンスムージングの開発
2. 超大規模並列 EFMM の開発
3. 標準問題との比較

1のテーマでは、流体-構造連成問題を対象とした数値解析を行う際に、多くの現象で見られる構造物の移動、変形に伴うメッシュの再構築、スムージングを全体領域で行うと、様々な問題が生じるので、この点を考慮した局所領域毎のメッシュスムージング手法を開発した。

2のテーマは、昨年度までに提案した並列 EFMM のアルゴリズムを1億自由度規模の超大規模問題へ適用した際の、並列化効率について検証を行った。

3のテーマは、我々のグループで提案している数値解析手法の健全性の評価を行う為に、「新規実験・計測グループ」が実施している、流体-構造連成現象の発生メカニズムを明らかにする新しい標準問題を確立する為の実験結果と数値解析結果との比較を行った。

(3.1) 領域分割型ラプラシアンスムージングの開発

流体-構造連成解析を行う際には、流体と構造の間に生じる相互間作用により生じるメッシュの再構築、スムージングが必要不可欠である。また、多くの場合、流体-構造連成解析を行う際には、並列解析を用いるが、その際、解析モデルは複数領域に分割される。その分割された領域全体に対して一貫性のあるメッシュの再構築が求められるが、解析領域全体に対して、メッシュの再構築を行うと、解析の規模にもよるが、膨大な計算量が求められ、解析のボトルネックとなる。

そこで、本節では、局所領域毎のメッシュスムージング法について述べる。

はじめに、下記の図1に示すように、解析モデルを複数の領域に分割する。

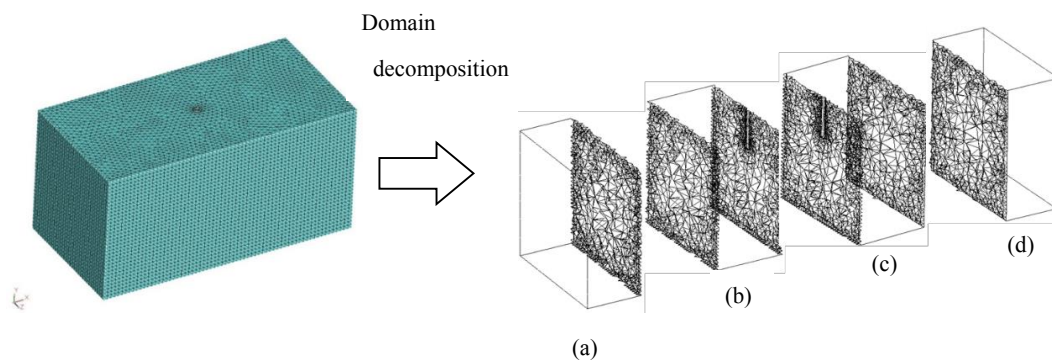


Fig.1. Domain decomposition

この領域分割された局所領域の節点を下記の 4 つのグループに分類する.

1. 流体-構造境界面上の節点
2. 局所領域共有面上の節点
3. 解析モデル表面上の節点
4. 内部の節点

具体的に, 図 1 に示した局所領域(b)(c)の節点群をグループ分けすると下記のようなになる.

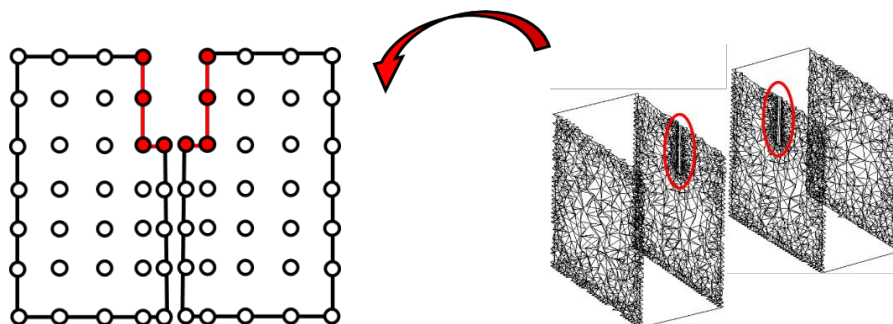


Fig.2. Nodes on fluid-structure common face

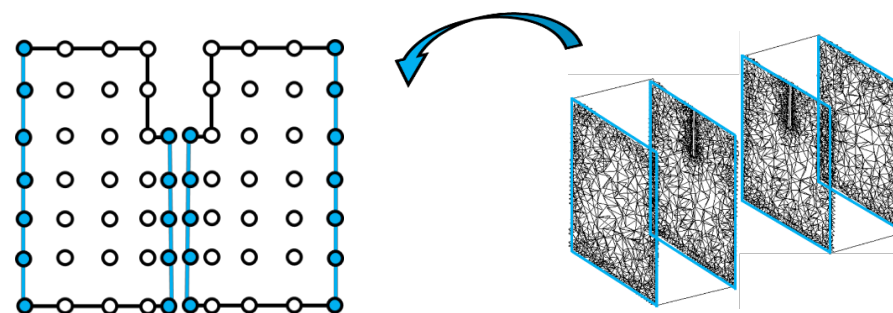


Fig.3. Nodes on common face of local domain

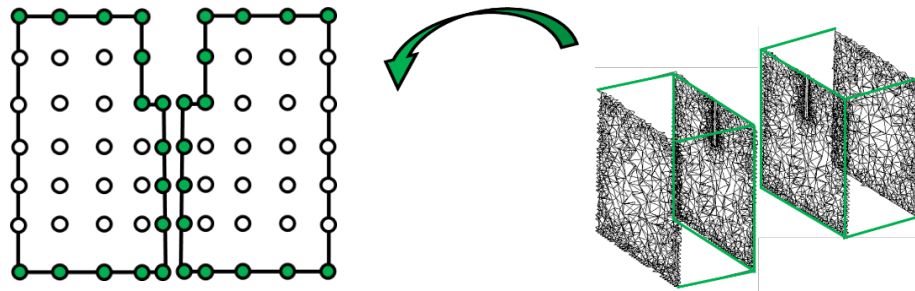


Fig.4. Nodes on surface of original model

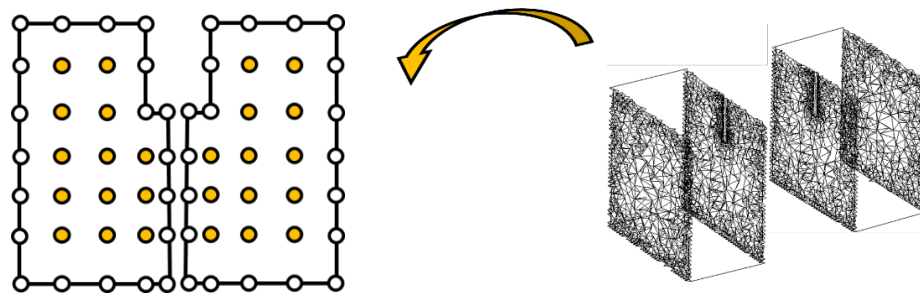


Fig.5. Inner nodes

これら分類された節点のメッシュスムージング時の働きは下記の通りである。

1. 流体-構造境界面上の節点 : 流体解析の結果にしたがって移動
2. 局所領域共有面上の節点: 1 の移動量を基に移動
3. 解析モデル表面上の節点: 固定
4. 内部の節点: メッシュコントロール

ここで、局所領域面上の節点の移動方法について述べる。

流体-構造境界面上の節点のみを移動させると、解析対象によって異なるが、多くの場合メッシュが大きく歪み、解析の精度が著しく低下するだけでなく、場合によってはメッシュが破綻をして、解析を行うことが出来なくなってしまう。

例えば、図 6 に示すように、流体-構造境界面上の節点が、構造解析の結果に伴い移動したとする。

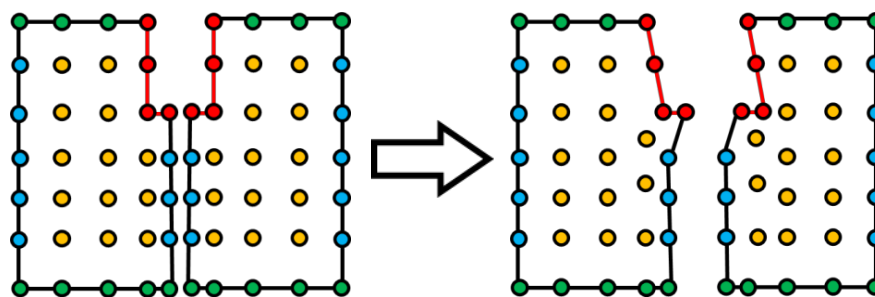


Fig.6. Example of movement of node on fluid-structure common face

上図のように、流体-構造境界面上の節点のみ、解析結果に伴って移動をさせると、対象の変位量によっては、流体-構造境界面上の節点と、それらの節点の最も近傍にある節点を含む要素計上が大きく歪み、前述の問題が生じる。

そこで、局所領域共有面上の節点で且つ流体-構造連成面に近い節点に関しては、流体-構造共有面上の節点同様、移動をさせる。本研究では、流体-構造連成面上のある節点を基準に、その節点からある一定の長さを検索半径として、その検索半径内に含まれる節点を、基準とした節点の移動量を基に移動をさせる事で、メッシュの破綻を防ぐ事とした。

図 7 は、この処理を導入する前後での、モデルの違いを図示したものである。

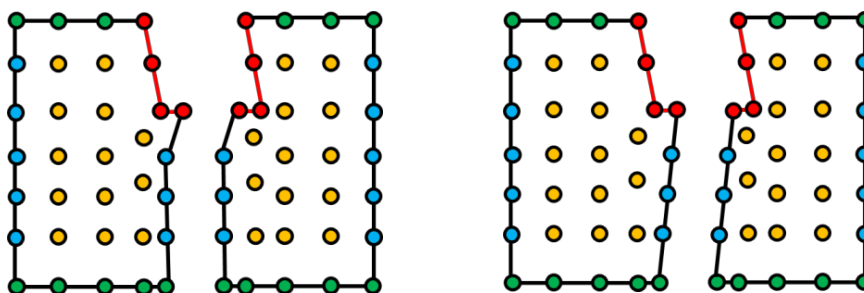


Fig.7. Example of difference of movement of node

実際に 3 次元解析に導入すると下記の図 8 に示したように、円柱の移動に伴う円柱周辺のメッシュの変化に違いが生じる。

図中左側に示した、流体-構造連成面上の節点のみを移動させた場合、近傍の節点が移動しない為、流体-構造連成面上の節点を含む要素が大きく歪んでいる。

一方、検索半径を導入して、ある流体-構造連成面周辺の節点の移動も同時に行った図中右側の例では、円柱近傍節点も移動している為、流体-構造連成面上の節点を含む要素も、大きく歪むことは無く、メッシュを制御することが出来ている。(図中のコンターは節点の移動量を示している。)

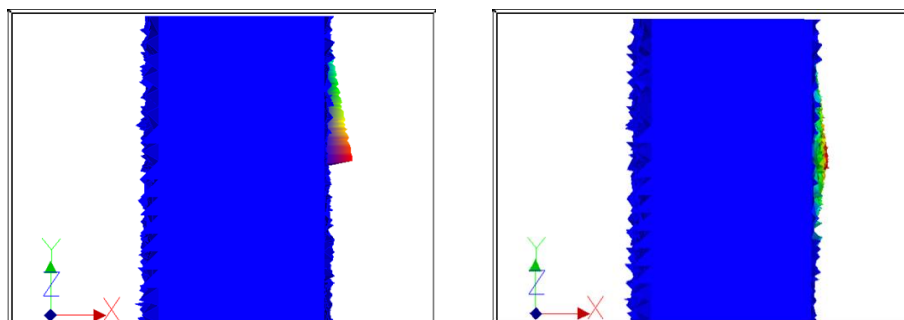


Fig.8. Example of difference of model after mesh control

このような制約の下，局所領域の境界を移動させた後，ラプラシアンスムージングによるメッシュのスムージングを行うことで，メッシュの破綻を防ぐことが可能となった．

(3.2) 超大規模並列 EFMM の開発(大規模並列化グループとの連携)

本節では, 昨年度までに提案をした, Enriched Free Mesh Method (EFMM)の超大規模並列化について述べる.

本プロジェクトで対象とする流体-構造連成現象を解く為には, 流体解析場のみならず, 構造解析場の大規模並列化は必須である. 流体解析手法として用いる SUPG/PSPG 安定化有限要素法に関しては, 既に様々な解析事例もあり, 解析精度, 並列化効率共に非常に良好な結果が得られることが証明されている.

昨年度までに提案した並列 EFMM の並列化効率も良好な結果であったが, 今年度は 1 億自由度規模の問題に対応できるようにチューニングを行った.

並列 EFMM の為の領域分割は下記の図 9 の手順で行う.

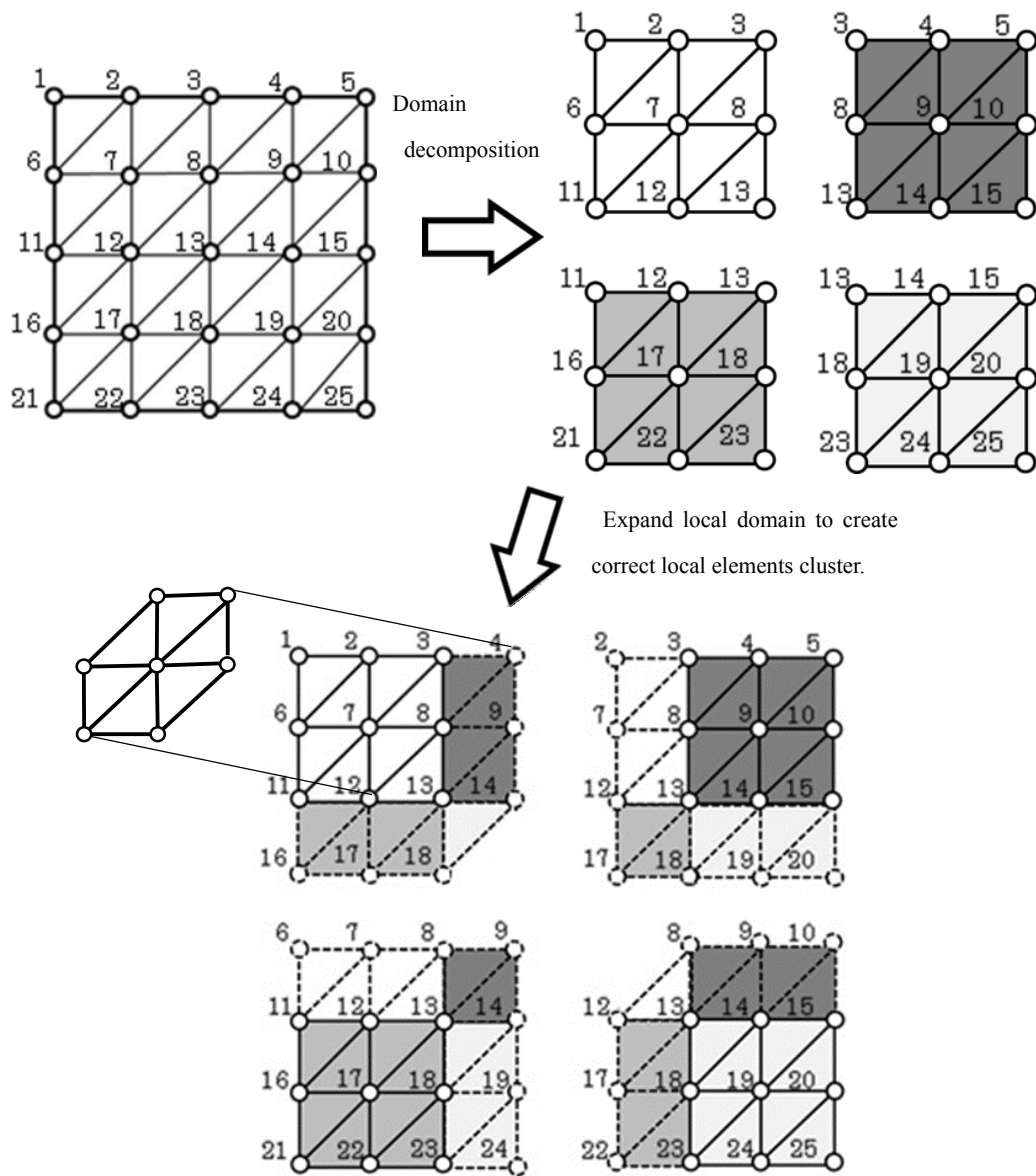


Fig.9. Domain decomposition method for parallel EFMM

領域分割を行った局所領域毎の計算手順は下記の通りである。

1. 各領域で行列ベクトル積計算(全ての節点がいずれか1つの計算領域のみで評価されること)
2. 領域境界の1層内側の節点について、正しい値を計算すべき領域に対して、自身の領域で計算された寄与分を送信して足し込む。
3. 領域境界上の節点について、共有する領域間で値を送受信し、それぞれ互いの値を足し込む。
4. 領域境界の1層外側の節点について、正しい値を計算すべき領域から値を受け取り上書き。

精度検証

はじめに、並列 EFMM の通信テーブルは、従来の FEM と比較すると若干複雑になる為、アルゴリズム及びコードの健全性を示すために下記の 3 つの解析モデルを使用して、単一解析の場合と解析結果が一致するか確認を行った。

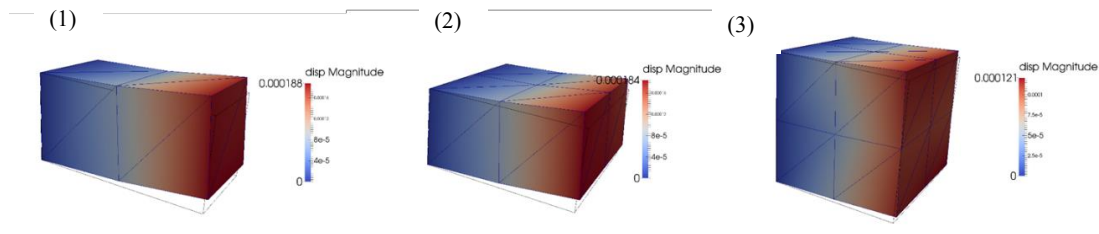


Fig.10. Analysis models

各解析モデルの詳細は下記の通りである。

- (1). 2 領域が隣接する 12 節点モデル
- (2). 4 領域が隣接する 18 節点モデル
- (3). 最大で 8 領域が隣接する 27 節点モデル

得られた解析結果は、それぞれ単一解析の結果と完全に一致したことから、解析アルゴリズムとコードの健全性は証明された。

次に、本解析手法と理論解とを比較して、解析精度が十分良好であるかの確認を行った。

解析には、図 11 に示す単純な片持ち梁の問題を用いて、単一解析、10 並列、20 並列の 3 ケースと理論解とを比較した。各解析結果はそれぞれ完全に一致し、理論解との誤差は 0.49%であった。解析結果例を図 12 に示す。

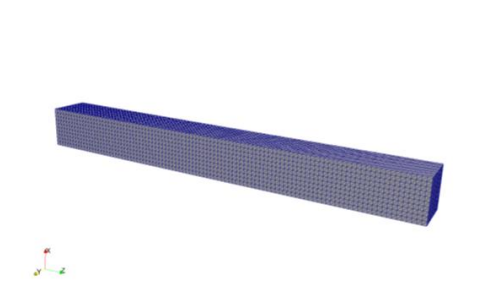


Fig.11. Analysis model

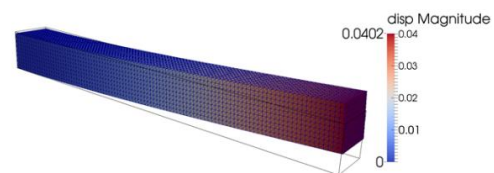


Fig.12. Analysis result

並列性能測定

次に、並列 EFMM の並列化効率について述べる。解析に用いるモデルは、図 13 に示すような 1 辺の長さが 1 の立方体の $z=0$ 面を完全固定し、 $z=1$ のせん断方向に荷重を加える。

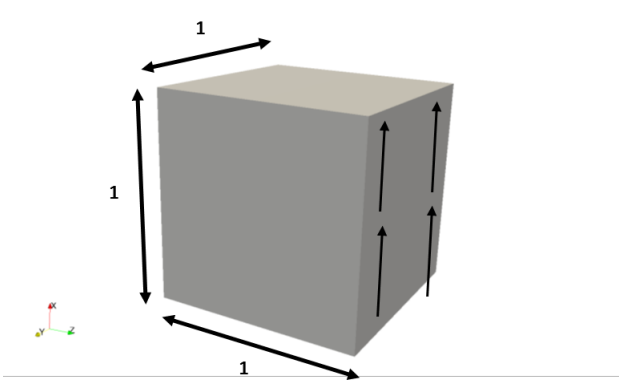


Fig.13. Analysis model

並列性能の測定方法は、各辺の分割数、プロセスへの分割数を変え、ストロングスケーリングとウィークスケーリングによる測定を行う。

ストロングスケーリングによる検証結果

ストロングスケーリングは、解析に用いるモデルの自由度数を一定として、領域分割数を増加させていく測定方法である。測定に用いるモデルの詳細を表 1 に示す。

Table.1. Detail of analysis model

立方体の各辺の分割数	108
要素数	7,558,272
節点数	1,295,029
自由度数	3,885,087

並列化効率の測定の為に、上記の表 1 に示したモデルを 16, 54, 144, 432 並列の 4 パターンで解析を行い、16 並列と比較をして並列化効率の検証を行った。

各解析ケースのモデルの詳細を表 2 に示す。

Table.2. Detail of each analysis model

#PE	各プロセスへの 全体モデルの分割			各プロセスが担当する直方体ブロック					
	x	y	z	各辺の分割数			要素数	節点数	自由度数
				x	y	z			
16	2	2	4	54	54	27	472,392	84,700	254,100
54	3	3	6	36	36	18	139,968	26,011	78,033
144	4	6	6	27	18	18	52,488	10,108	30,324
432	6	6	12	18	18	9	17,496	3,610	10,830

測定は下記の 3 項目に対して行った.

- ・ 加速率の推移
- ・ 並列化効率の推移
- ・ 計算時間(解析全体, 行列ベクトル積)

表 3 は測定結果の詳細を示している.

Table.3. Detail of each analysis result

#PE	Elapsed [s]		#CG Iter	Speed-Up over 16PE			Parallel Efficiency	
	All	mat_vec		All	mat_vec	Ideal	All	mat_vec
16	1,944	1,273	1,375	1.00	1.00	1.00	100.0%	100.0%
54	639	416	1,375	3.04	3.06	3.38	90.1%	90.6%
144	237	151	1,375	8.21	8.41	9.00	91.2%	93.4%
432	90	55	1,375	21.54	23.02	27.00	79.8%	85.3%

以下の図 14~16 に上記の測定結果を示す.

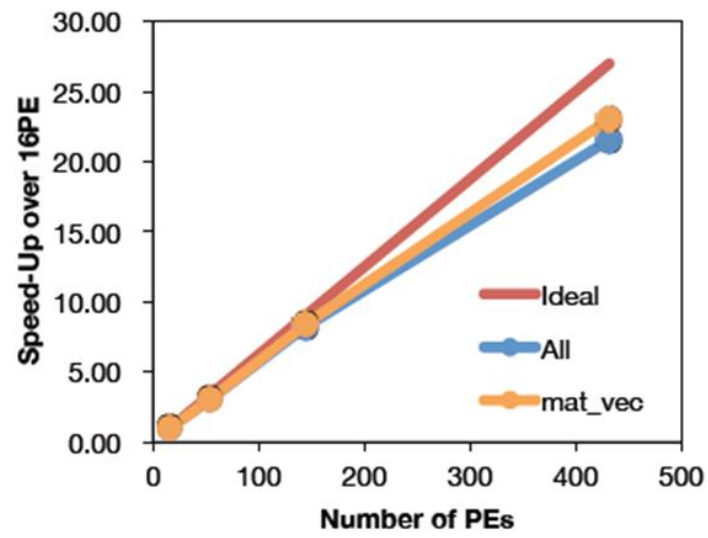


Fig.14. Speed-up

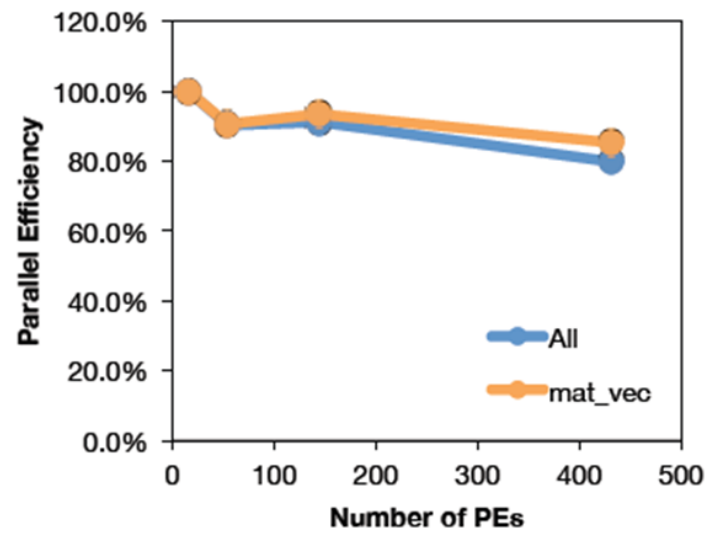


Fig.15. Parallel efficiency

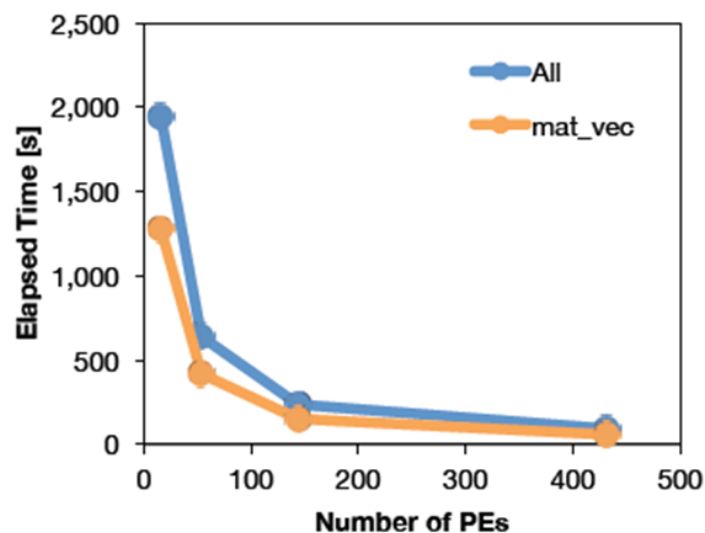


Fig.16. Computing time

これらのストロングスケーリングによる並列性能測定結果から、本手法は十分良好並列性能が得られていることが確認された。

ウィークスケーリングによる検証結果

次に、ウィークスケーリングによる本並列解析手法の並列化効率の検証結果を示す。ウィークスケーリングは、各プロセッサが担当するモデルの自由度数を一定として、並列化効率を検証する方法である。その為、解析に用いるモデルの全体の自由度数は、並列数に伴って増加していく。

各プロセッサが担当するモデルの詳細を表 4 に示す。

Table.4. Detail of each analysis model

立方体の各辺の 分割数	x	54
	y	54
	z	27
要素数		472,392
節点数		84,700
自由度数		254,100

並列化効率の測定の為に、1 領域あたりを上記の表 4 に示した自由度として、16, 54, 144, 432 並列の 4 パターンで解析を行い、並列化効率の検証を行った。

各解析ケースのモデルの詳細を表 5 に示す.

Table.5. Detail of each analysis model

#PE	全体モデル				各プロセスへの 全体モデルの分割		
	立方体の 一辺の分割	要素数	節点数	自由度数	x	y	z
16	108	7,558,272	1,295,029	3,885,087	2	2	4
54	162	25,509,168	4,330,747	12,992,241	3	3	6
128	216	60,466,176	10,218,313	30,654,939	4	4	8
432	324	204,073,344	34,328,125	102,984,375	6	6	12

測定は下記の 3 項目に対して行った.

- ・ 計算時間(解析全体, 行列ベクトル積)
- ・ CG 法の収束までの反復回数
- ・ 行列ベクトル積 1 回あたりの計算時間の推移

表 6 は測定結果の詳細を示している.

Table.6. Detail of each analysis result

#PE	Elapsed [s]			#CG Iter	Memory Max [MiB]
	All	mat_vec	1 mat_vec		
16	1,944	1,273	0.926	1,375	1,538
54	2,304	1,614	0.935	1,726	1,561
128	2,813	2,115	0.929	2,276	1,602
432	3,286	2,568	0.935	2,747	1,769

以下の図 17~19 に上記の測定結果を示す.

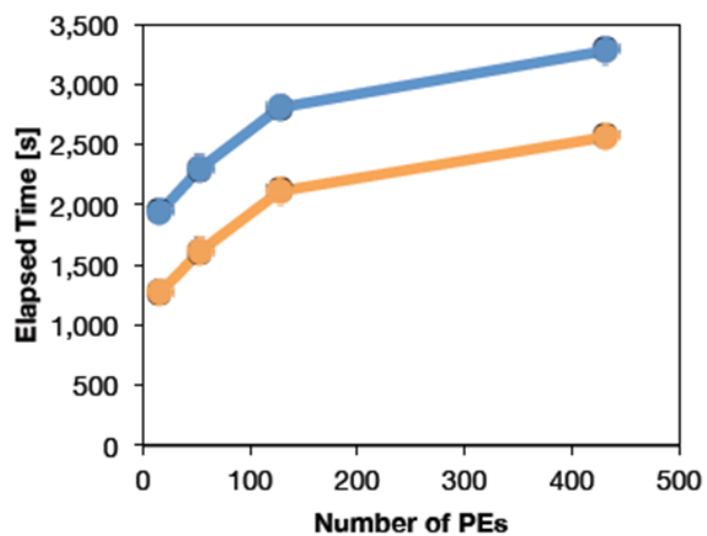


Fig.17. Speed-up

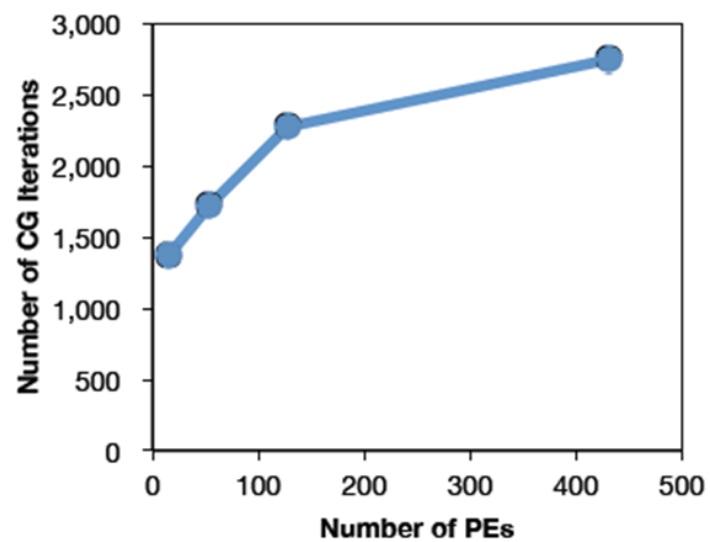


Fig.18. Changes in the number of iterations

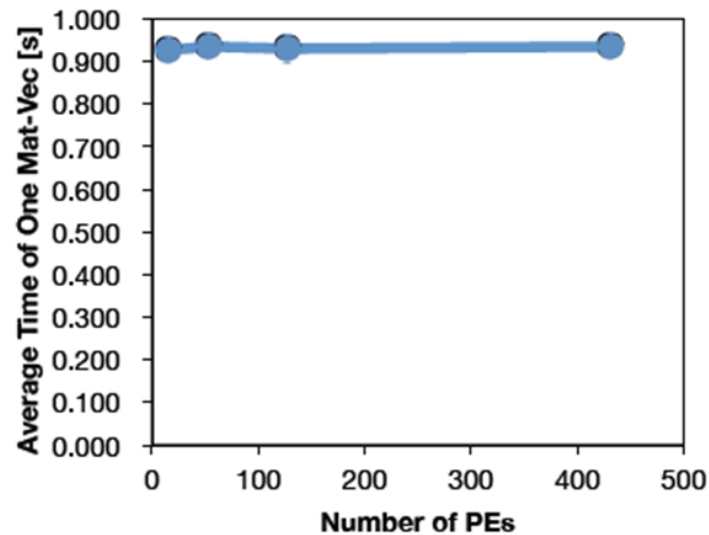


Fig.19. Changes in an once computing time of matrix vector product.

並列プロセッサ数の増加に伴って、全体の解析モデルの自由度数が増加する為、CG法の収束までの反復回数が増加するので、計算時間も同時に増加していくが、行列ベクトル積1回あたりの計算時間はほぼ一定に保たれており、ウィークスケーリングの性能としては十分な性能が得られている。

これらの結果から、提案したEFMMの為の超大規模並列アルゴリズムは、1億自由度程度の問題を対象とした超大規模解析にも十分適用可能であることが示された。

(3.3) 標準問題との比較(新規実験・計測グループとの連携)

ここでは、本提案手法の健全性を証明する為に行った、標準問題と数値解析との比較結果について示す。

図20は実験に用いた風洞装置の写真である。

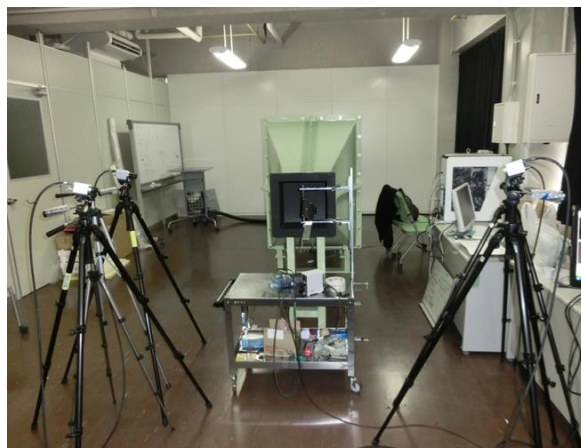


Fig. 20. Experimental device

写真中央に示された風洞の中に、弾性体で精製された円柱が設置されている。この円柱は上面が固定されており、この弾性体に対して風を与える。この時、円柱の物性値と風速を変化させ、その際に生じる円柱の振る舞いの関係について明らかにする。

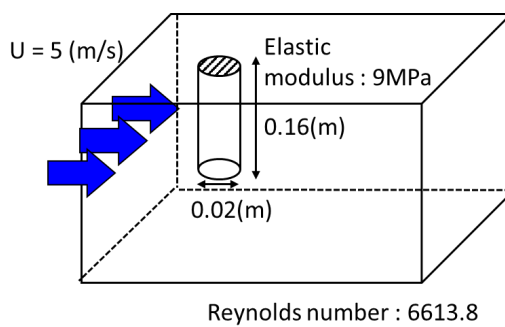


Fig. 21. Experimental model

次に、図 22 は解析に用いるメッシュモデルである。図 22 に示したメッシュモデルの詳細を表 7 に示す。

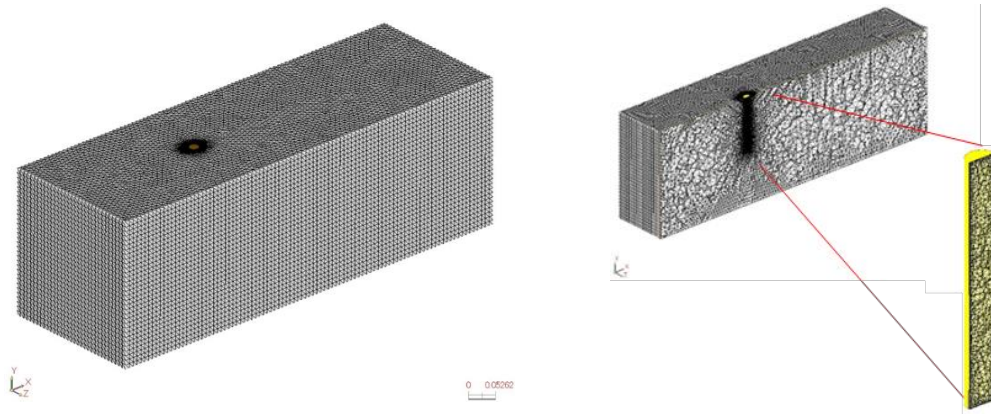


Fig. 22. Analysis mesh model

Table.7. Detail of analysis mesh model data

	Fluid	Structure
Number of Nodes	944,121	94,768
Number of Elements	169,321	21,295

実験により得られた結果を図 23,24 に示す.

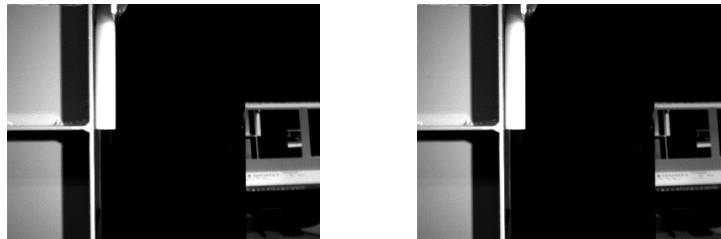


Fig.23. Experimental result (side)



Fig.24. Experimental result (Upper side)

図 22, 23 に示したように, 上述の実験条件下で行った実験では, 弾性体は振動する事無く, 単純に変形するだけの結果となった. 円柱下端の最大変形量も 0.0005m となり, 円柱の底面直径 0.02m に対して非常に小さい変形量となった.

次に数値解析結果を図 25 に示す. 図は構造解析場(円柱)の変位を示している.

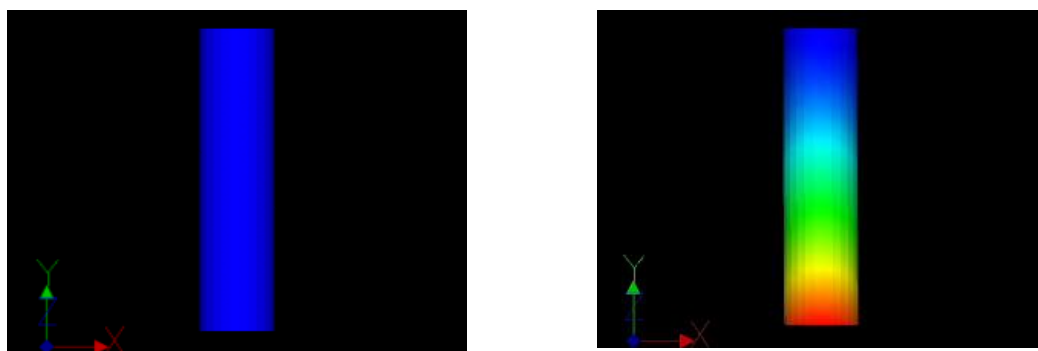


Fig.25. Experimental result (Upper side)

数値解析によって得られた円柱底面の最大変位量は 0.00063m となり, 実験結果よりも大きく変形する結果となった. 実験と結果の誤差は 20.6% となり, この結果からは, 本手法の健全性を証明するには至らなかった.

数値解析の健全性の証明に関しては, 数値解析手法のみならず, 実験条件の見直しを含め最終年度の課題とする.

(4) 平成 27 年度進捗状況

今年度は, 前節で述べた通り, 下記の 3 つのテーマについて主に研究を行った.

1. 領域分割型ラプラスアンスムージングの開発
2. 超大規模並列 EFMM の開発
3. 標準問題との比較

局所領域分割型ラプラスアンスムージングによるメッシュスムージングは, 超大規模並列流体-構造連成解析の際に, 必要不可欠であるが同時にボトルネックになるメッシュの再生成を局所領域単位で行うことで, 計算時間の増加を大幅に抑制する事が期待できる.

超大規模並列流体-構造連成解析への拡張は, 1 億自由度規模の問題でも解析精度面は勿論, 並列化効率の面でも非常に良好な結果を得ることが可能となった.

標準問題との比較では, 数値解析結果により得られる変位量が実験結果よりも大きくなり, 誤差も 20.6% と若干大きなものであった. これは, 問題の設定が構造体に単純な曲げが発生するものであり, 実験条件を厳密に一致させなければ, 変位量を一致させることは非常に困難であると考えられる.

これらの点を鑑みて, 最終年度は構造体の変形(振る舞い)が時々刻々と変化する問題を対象と

して、本年度までに開発した、超大規模並列 EFMM と SUPG/PSPG 安定化 FEM とを組み合わせ、超大規模並列流体-構造連成解析手法による数値解析と実験との比較を行い、本数値解析手法の健全性を証明する。

3.1.2. 流体－構造連成解析の mnSOM を用いた分類及び予測技術の開発

(1) 目標・計画

本研究では、流体－構造連成解析を行い、自己組織化マップ(Self-Organizing Map : SOM)^[1]などの人工知能技術を用いて解析データの分類を行い、解析条件から解析結果を予測することができる技術を開発することを目的としている。分類と予測の両方を包括する mnSOM(modular network SOM)を用いて学習を行う。このときモジュールは MLP(Multi Layer Perceptron)を用いる。しかし、連成問題は非線形性が非常に強く、mnSOM での予測には限界があると思われる。そこで、Deep Learning の考えを取り入れた予測技術の開発を目指す。これは Google を始め各企業や研究所でも注目されている技術で、画像認識や音声認識において、既存の技術よりも遥かに良い性能が得られることが知られている^{[2][3]}。

本研究の予測技術を確立すると、解析の大まかな結果を得ることで、詳細な解析をするための手がかりが提示できると考える。このことにより、機器や構造物設計における全体の解析時間を短縮できると期待できる。

今年度は、Deep Learning 技術を活用するために Autoencoder(AE)を作成し、簡単な2つの数の積算を学習させた。また、同様の手法で画像認識を行った。Deep Learning の技術を mnSOM で活用するためのアルゴリズムについても考えた。

平成 28 年度は、SOM と Deep Learning を組み合わせた分類と予測を可能にする技術を開発し、研究成果をまとめる方針である。

(2) 意義・国際社会との比較

現在、解析対象の複雑化や大規模化から、計算時間がボトルネックにある。並列計算機を使うのは当然で、GPU を用いた解析方法も数多く見られる。しかしながら、計算量は膨大で、1ケース解くのに数日から数週間かかることもある。設計技術者は目的の解析結果を得るのに何度も解析を繰り返す必要がある。そこで、予めある程度の解析結果が分かれば試行回数を削減し、設計における全体の解析時間を短縮できると考えられる。ある事象を数値解析を行わないで解析結果を予測するという試みは、全く新しいものであり、学術的かつ実用的な側面を兼ね備えており、国際社会においても重要な位置づけとなる研究のひとつであると考えられる。

(3) 研究内容

Deep Learning は入力次元の大きいデータ(ex.ビッグデータなど)を学習したり、非線形性の強い問題を学習したりするものに非常に効果的であり、流体－構造連成解析などの複雑な問題にも応用可能と期待できる。

本研究で使用する Deep Learning 技術は Deep Autoencoder である。これは AE を複数重ねたネットワーク構造を持ち、出力層では通常の Back Propagation を用いて学習する。

Deep AE は各層の AE は独立で処理を行い、手前の層(入力層に近い層)の中間層を次の層の入力層として用いることで、ネットワーク全体が結合する(Fig.1)。各層の出力層は入力層と同じ次元を持ち、入力ベクトルを再現するように学習を行う。このときに中間層を入力層より小さいサイズ

にすることにより、入力データを圧縮し、入力データを再構成するための最低限必要な特徴量を抽出することができる。この特徴抽出により、大規模データを効率良く学習することが可能となる。

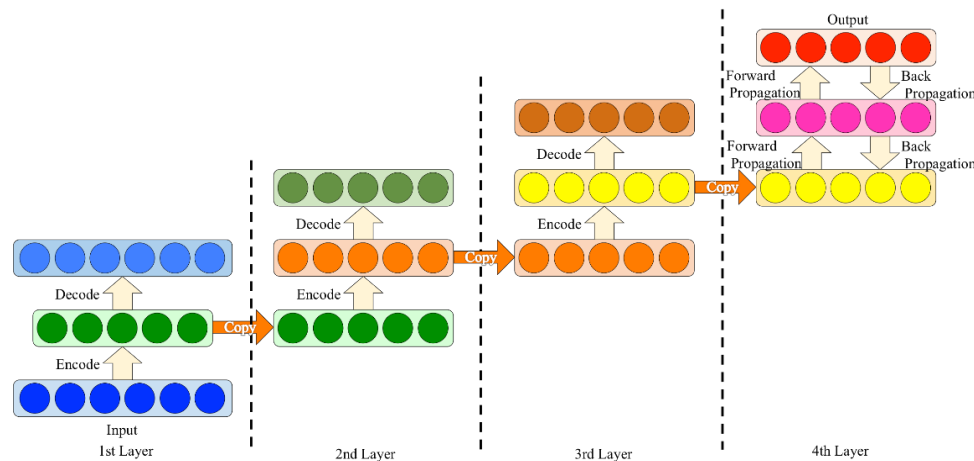


Fig.1. Example of Deep Autoencoder

Deep Learning では上記の AE 部の学習を pre-training と呼び、教師なし学習による入力データの圧縮、特徴抽出を目的とした。教師あり学習部分を fine-tuning と呼び、主に Back Propagation(BP)法を用いて教師データの入力ベクトルと出力ベクトルを補間する。この fine-tuning は最終層でのみ行う場合や、ネットワーク全体で行う場合など、多種多様に処理される。最終層でのみ fine-tuning を行う場合は事前の層で必要な特徴が抜き出せると仮定して、入力ベクトルを圧縮し、最終層の BP 法を効率良く行うための方法である。一方、ネットワーク全体を fine-tuning する方法は、AEはMLPの結合荷重の適切な初期値を得るために用い、MLPの学習を効率化させる。どちらの方法も学習は効率化され、単純な MLP 学習より学習精度の大きな向上が見込める。

本研究で作成した、Deep AE を用いて簡単な積算を学習させた。このとき最終層でのみ fine-tuning を行った場合とネットワーク全体で行った場合の2通りを試行した。入力には 1~9, 1~9 の正数を与え、出力にはその2つの正数の積を与えた。ネットワークは2入力1出力となる。ネットワーク全体の fine-tuning を行った場合、最終出力層の1に集約される部分の decode がうまく行えず、学習は失敗する結果となった。これは1つの変数から2つ以上の独立変数を導けないので、入出力関係を考えた上で AE を実行する必要があるとわかった。最終層をのみ fine-tuning する方法は学習に成功したが、設定した問題が簡単だったために、単純な MLP と同等の精度しか得られなかった。

次に手書き文字の認識を試験する。試験データは MNIST^[4]を用いる。MNIST の画像は 28×28 画素で、6万枚の画像データ集である。1画像に 0~9 のいずれかの数字が描かれている。ネットワーク構成は入力に 784, 中間層を 516, 256, 128, 300 ニューロンとし、出力層を 10 出力とした。入力層から 784-516-256-128 までは AE で圧縮し 128-300-10 を BP 法で教師あり学習を行う。学習に使う画像を 100 枚として、pre-training を 10000 セット、fine-tuning を 10000 とし、学習係数は

pre-training, fine-tuning とともに 0.1 として学習を行った. 検証には 20 枚の未学習データを与えた. 画像の一例を Fig.2 に示す. 1 層目の入力ベクトルの再現は良く一致し, 入力ベクトルの圧縮に成功している. 学習後の正解率は約 60%とある程度の学習ができた. まだ, 1, 7, 9 などの似たような文字の正解率は低いが, 学習セットを 6 万枚とし, 学習係数などのハイパーパラメータの調整により向上が見込める.

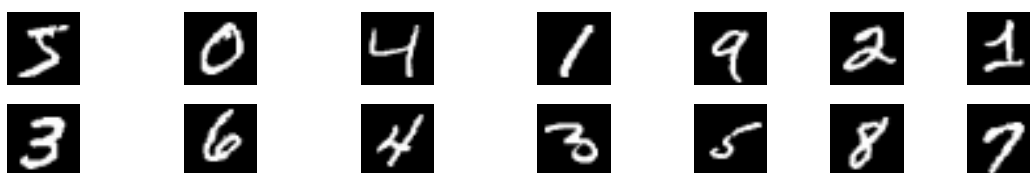


Fig.2. Figures of Handwritten character

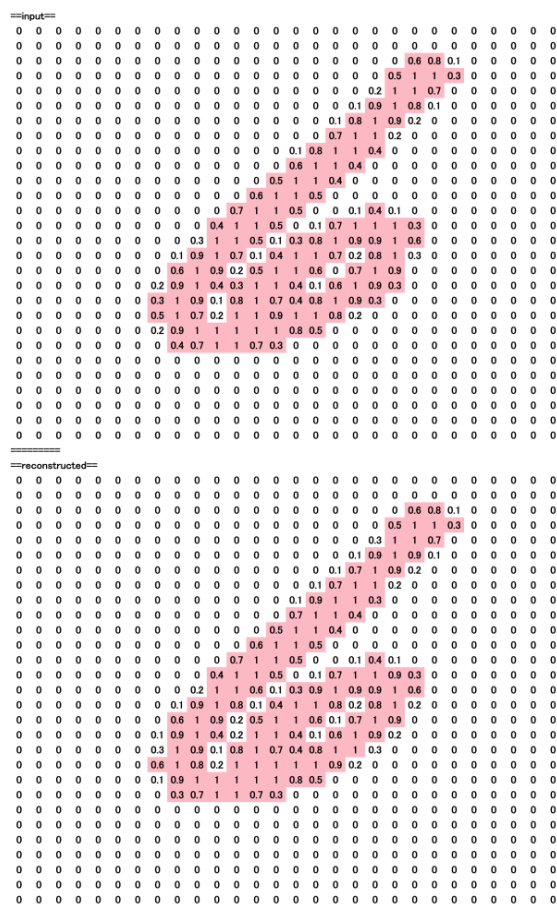


Fig.3. Example of Reconstructed Input Vector
(Upper figure is input vector and lower figure is reconstructed input vector.
High value place is painted the red.)

次に mnSOM のモジュール部を Deep Learning へ変更することを考える。Pre-training と fine-tuning はそれぞれ別々に行う。つまり pre-training の最後の層の中間層を fine-tuning の入力層として使う。mnSOM は競合学習により各モジュールの相対的な位置関係を獲得しながら、入出力関係を補間していく。競合学習をどのタイミングで行うのかを考える必要がある。AE から Back Propagation までを行ってからの出力(最終出力)で競合学習を行う方法と、AE 部でも競合学習させる方法が考えられる。通常の mnSOM では最終出力により競合学習を実行するが、AE を挟むことにより、fine-tuning 部分の入力がほぼ同じになることが予想され、そこからクラスタリングを行うことが効率的な学習であるのか、考慮する必要がある。AE 部における競合学習は入力を分類することに役立つと考えられる。ある程度の入力を分類して、下流の fine-tuning へ繋がれば、学習精度も向上すると期待できる。上記の2通りの mnSOM を作成し、効率的な学習ができる方を選択することを考える。

(4) 平成 27 年度進捗状況

Deep Learning による学習を行い、単純な積算の学習に成功した。文字認識も妥当な解答を得られた。mnSOM へ Deep Learning を適応するための競合学習方法を考え、コードの作成を開始した。

平成 28 年度では、mnSOM with Deep Learning の競合学習方法を確立させ、コードの完成を目指す。また、流体-構造連成解析結果を予測する問題を扱い、mnSOM や 3 層の MLP と比較して、より高精度で予測することができるかを検証し、本研究をまとめる。

参考文献

- [1] T.Kohonen, "Self-Organizing Maps", pringer-Verlag, 1995.
- [2] Quoc V. Le, Marc'Aurelio Ranzato, Rajat Monga, Matthieu Devin, Kai Chen, Greg S. Corrado, Jeff Dean and Andrew Y. Ng, "Building High-level Features Using Large Scale Unsupervised Learning", Proceedings of the 29th International Conference on Machine Learning, 2012.
- [3] A.Krizhevsky, I.Sutskever, G.E.,Hinton, "ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks"
- [4] Yann LeCun, "The MNIST database of handwritten digits", <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/> (2016/1/13 現在)

3.1.3. 粒子間インタラクションに着目した大規模粒子法シミュレーション

1.はじめに

これまでの数値流体シミュレーションにおいては、ほとんどが物体と液体の境界は滑りなし条件で解かれてきた。しかし、材質の表面性状の違いによって周囲の流れ場が変化する状況が、Fig.1のように、落下物体が水面に衝突するときに生成されるスプラッシュ（飛沫）にみられることが分かっている。つまり、粒子間のインタラクション（この場合は壁と液体粒子間）に物性を表すモデルを導入して計算しないと実現象とかけ離れることを示唆している。

本研究では、そういった物体の表面性状の違いを数値シミュレーションに導入するために、物体と流体の境界条件に表面性状の効果を記述するモデルを提案してきた[1]-[4]。現在は、自由表面を扱う流体現象のシミュレーションの応用例として、ミルククラウンとコップの縁から流れ落ちる液だれの現象について、粒子法(MPS)による大規模並列計算を行い、実験映像と比較して計算の妥当性について検証を行っている。

2. ミルククラウンの数値シミュレーション

ミルククラウンと呼ばれる水滴が落下し液相に衝突したときに発生するスプラッシュ現象を再現した。ミルククラウンは、表面張力が支配的な物理現象である。本研究では、流体解析に、MPS 陽解法を用い、表面張力モデルに近藤らの粒子間ポテンシャル力を用いた表面張力モデルを用いた。

計算点である粒子の直径を変化させ、直径 4 mm 液滴を、高さ 15 cm から落下させ、深さ 1mm の液体層に衝突させる解析を行った(Fig.2)。物性値は水とした。である。本節では、計算点である粒子直径を 0.2 mm, 0.1mm, 0.05mm, 0.025mm と変化させて、どの程度の粒子の直径が適切であるかを確認した。

Fig.3 から Fig.6 に示すように、粒子の直径 0.2 mm, 0.1 mm, 0.05 mm, 0.025 mm の解析結果であり、色は速度の大きさである。Fig.5 の粒子直径 0.05 mm の解析や Fig.6 の粒子直径 0.025 mm の解析では、ミルククラウンの発生に成功している。Fig.4 の粒子直径 0.1 mm の解析では、クラウンの側面の壁に穴が開くなどして、非物理的な現象が発生している。これは、粒子の直径が大きすぎて、クラウンの側面の壁の厚さ方向に十分な数の粒子を配置することができなくなったためである。Fig.3 の粒子直径 0.2 mm の解析では、粒子を繋ぎとめておくに必要な表面張力を発生させることができなくなっている。以上の結果から、最低でも粒子直径 0.1 mm、可能なら粒子直径 0.05 mm の解析を行うことが求められることが分かった。

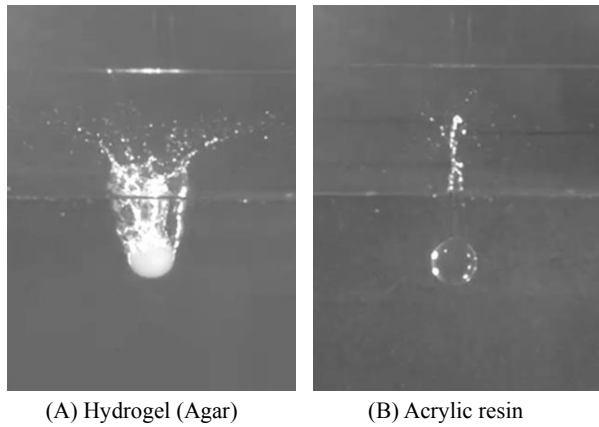


Fig.1. 材質の表面性状の違いによって周囲の流れ場が変化する状況:落下物体が水面に衝突するときに生成されるスプラッシュ(飛沫)の実験

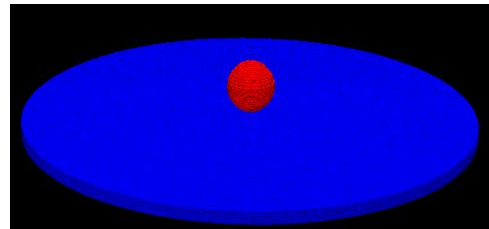
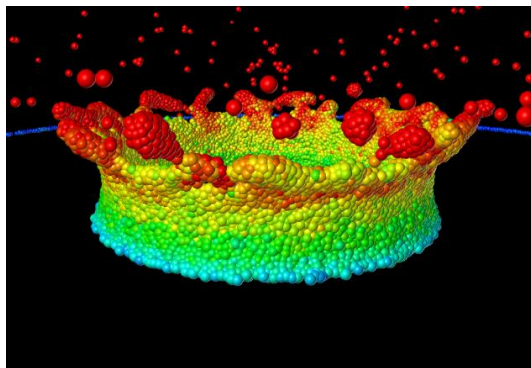
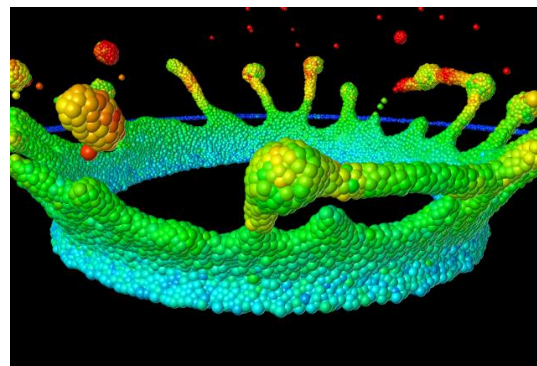


Fig.2. 液滴を液体層に衝突させる解析のモデル

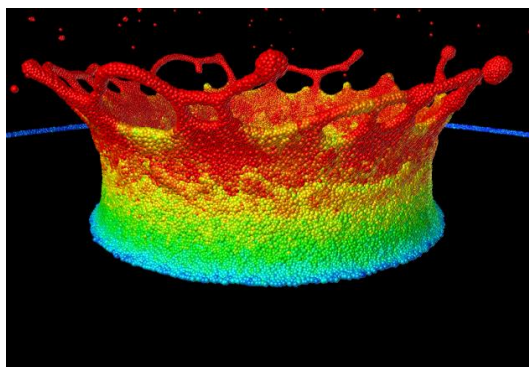


(a) 10 ms

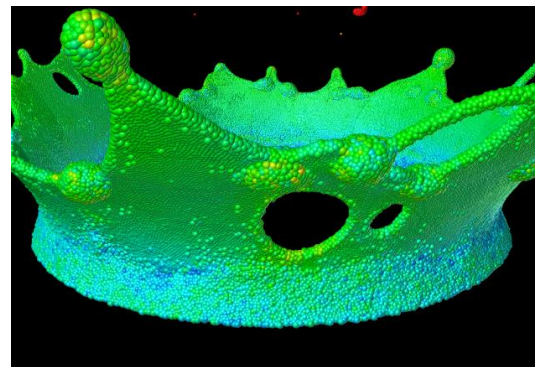


(b) 24 ms

Fig.3. 粒子直径 0.2 mm の解析



(a) 10 ms



(b) 24 ms

Fig.4. 粒子直径 0.1 mm の解析

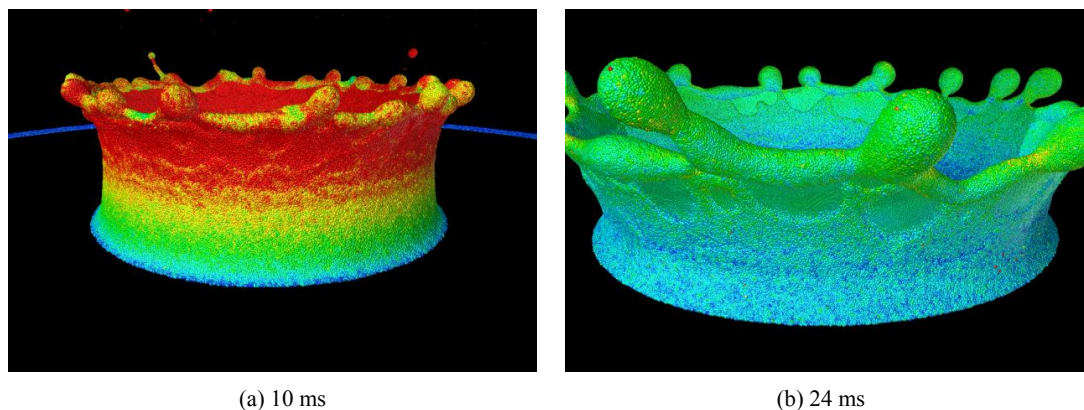


Fig.5. 粒子直径 0.05 mm の解析

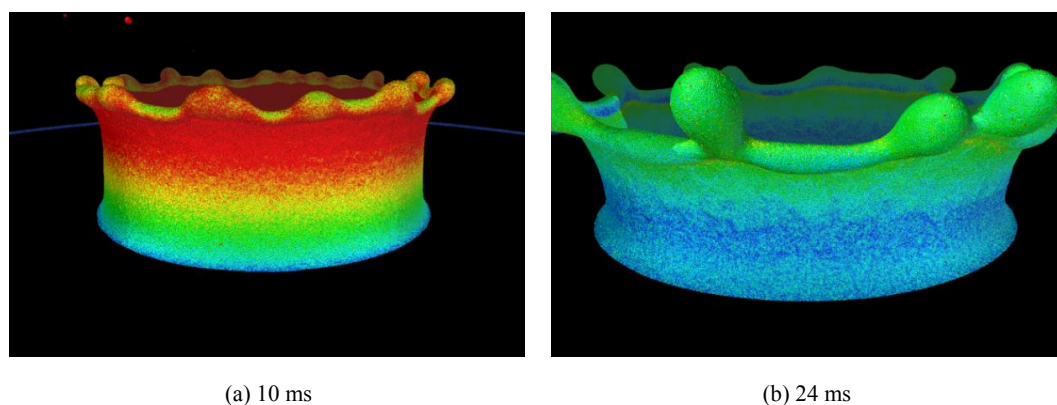


Fig.6. 粒子直径 0.025 mm の解析

3. 容器口から流れ落ちる液だれの数値シミュレーション

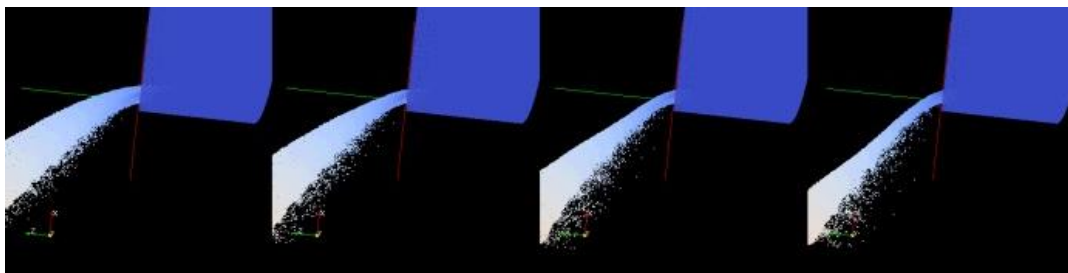
水や調味料などの液体容器の設計時において液だれの発生を抑制するための考慮は重要な課題である. 本研究では容器口の縁付近の形状やその表面性状の差異による流体挙動への影響を調査している. 3次元プリンタにより縁の形状と表面性状の異なる容器を複数作成し, それらの容器から液体が流れ出る際の縁付近の流れを撮影した. また作成した容器から液体が流れ出る際と同様な条件下における数値シミュレーションを行い実験映像との比較を行っている.

既存の MPS の手法では界面の濡れ性や接触角を用いた方法が提案されているが, 決定的な精度よい計算結果は出てきていない. 本研究でも, それらのモデルを導入しても物体に付着するような流動現象をシミュレーションすることはできなかったため, 新たにクーロン力に似せた距離に反比例する引力モデルを導入した. よって, 本章で紹介するような液だれ現象を発生させるためには, 流体粒子と容器壁面を構成する粒子との間にクーロン力のような引力を生じる計算モデルの導入することで液だれ挙動を表現可能であると考えた, クーロンによる模擬した疑似的な静電気モデルの力は下記である

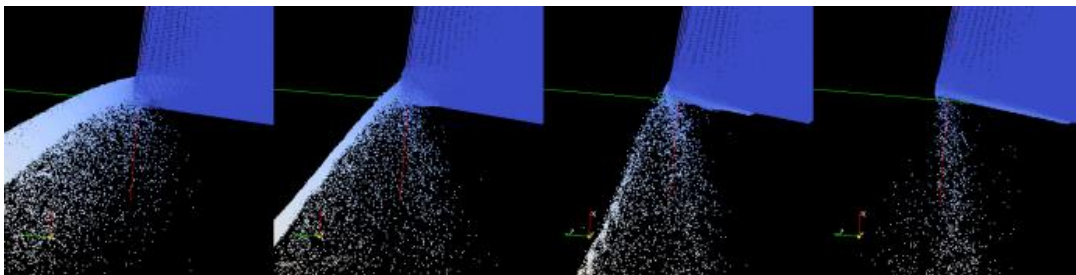
$$F_c = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1)$$

ここで k , q_1 , q_2 , r はそれぞれ比例定数, 流体粒子の電荷, 壁面粒子の電荷, 粒子間の距離を表す. 求めた F_c をナビエーストークス式の外力項へ加え陽的に計算することで流体粒子と壁面粒子の引力を表現する.

数値シミュレーション結果を Fig.7 に示す. Fig.7 (A), (B) はそれぞれクーロン力モデル導入前, 導入後の角縁容器の数値シミュレーション結果である. クーロン力モデル導入前の数値シミュレーション結果では角縁の実験時に見られた流れの容器壁面方向への湾曲は見られず, 容器外壁の壁面粒子への付着は発生しなかった. クーロン力モデル導入後の数値シミュレーション結果では容器外へ向かう流体粒子の主な流れから壁面へ湾曲する流れが僅かに分かれる様子を確認し, また流体粒子が容器外壁を伝い落ちる様子を確認した.



(A) 角縁 クーロン力モデル導入前



(B) 角縁 クーロン力モデル導入後

Fig.7. 角縁容器の数値シミュレーション結果

4. おわりに

本研究は, 粒子法における界面張力や表面張力といった粒子間のインタラクションに着目し, 自由表面を伴う流れをより現実に近い手法について提案するものである. まだ実現象を再現するには固体・流体それぞれの物性についてパラメータ調性をする必要があり, さらに今後の実験結果との比較検証をしていく予定である.

謝辞

本研究は, 文部科学省私学助成金東洋大学研究拠点 CCMR, JST-CREST「ポストペタスケール

シミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」, JSPS 科研費 26390127 の助成を受けた。

また, 革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ(課題番号: hp140199, hp150189)と学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点(課題番号: 14-NA07)名古屋大学 HPC 計算科学連携研究プロジェクトの支援を得た。

参考文献

- [1] Yokoyama M, Kubota Y, Kikuchi K, Yagawa G and Mochizuki O, Some remarks on surface conditions of solid body plunging into water with particle method, Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences Vol.1:1 (2014) pp.1-14
- [2] Yokoyama, M., Murotani, K., Yagawa, G., and Mochizuki, O., Some Considerations on Surface Condition of Solid in Computational Fluid-Structure Interaction. In Numerical Simulations of Coupled Problems in Engineering (2014) pp. 171-186, Springer International Publishing.
- [3] Yokoyama M., Mochizuki O., Yagawa G., Surface Condition of Solid in Splash Formation. IACM expressions No.34 (2014) pp.2-5.
- [4] Masao Yokoyama, Kohei Murotani, Genki Yagawa and Osamu Mochizuki, Fluid-Structure Interaction Analysis with Slippery Mucus Skin, 11th World Congress on Computational Mechanics, Barcelona, Spain, 2014.

3.1.4. 損傷理論を導入したボクセル FEM によるアルカリシリカ反応の膨張挙動解析

(1) 目標・計画

社会基盤を支えるコンクリート構造物の劣化原因のひとつにアルカリシリカ反応(以下, ASR)がある。ASR は、コンクリート中のある種の反応性骨材(鉱物)とアルカリ性細孔溶液との化学反応により、ゲルを生じ、そのゲルが吸水膨張することで、膨張圧が生じる現象をいう。ゲルの吸水膨張に伴う膨張圧により、コンクリートに有害なひび割れを生じるケースや、最悪な場合は、鉄筋破断が生じるケースがあり、ASR 劣化は、コンクリートの耐久性、耐荷性の低下を引き起こす原因のひとつである。

ASR の膨張挙動において、最も興味深い現象として、ペシマム現象がある。ペシマム現象とは、反応性骨材と非反応性骨材のある一定の混合割合によって最も大きな膨張を示す現象をいう。ペシマム現象は、反応性鉱物の種類やアルカリ環境条件などにも影響を受けるため、膨張挙動を予測するのが極めて困難な問題である。

ASR のペシマム現象に対する膨張挙動は、骨材寸法や形状に加え、反応性骨材と非反応性骨材の混合割合に依存するため、本研究では、コンクリート中の反応性骨材および非反応性骨材の混合割合を考慮可能な損傷理論を導入したボクセル有限要素法の開発を行うことを目的とする。

今年度は、1)反応性粗骨材と非反応性粗骨材の混合率を考慮可能なボクセルデータ(以下、コンクリートモデル)の作成、2)反応性粗骨材と非反応性粗骨材の混合率を考慮したコンクリートモデルを入力データとし、損傷力学モデルの概念を導入したボクセル有限要素法(以下、DM-VFEM: Voxel FEM incorporated with the Damage Mechanics)を用いて、ペシマム現象の再現可能な解析手法の基礎検討を行った。

(2) 意義・国際社会との比較

世界的にコンクリート材料は社会基盤施設を構成する多くの構造物に使用されており、コンクリート構造物の合理的かつ効率的な維持管理を行うためには、コンクリート構造物の劣化現象を正しく理解し、精度良く再現する数値解析手法の開発が必要である。本研究の対象は、コンクリートの劣化現象の一つであるアルカリシリカ反応(ASR)の膨張予測である。世界的にも ASR の劣化現象を対象に数値解析的な予測手法の研究が行われているが、未だ決定な手法は構築されていない。したがって、本研究で対象としている ASR の劣化予測手法に対する数値解析的な取り組みは非常に意義のあることである。

(3) 研究内容

(a) コンクリートモデル

ここでは、コンクリート中の粗骨材を考慮したコンクリートモデルの作成方法の概念を示す。

コンクリートモデルの作成は、はじめに、粗骨材の形状を画像として取り込み、画像から粗骨材

の形状を考慮したポリゴンデータを作成する。つぎに、作成した粗骨材のポリゴンデータからボクセル要素で分割した粗骨材ボクセルモデルを作成し、これをコンクリートモデル内に配置し、2層系のコンクリートモデルを作成することができる。粗骨材を配置する際に、反応性粗骨材と非反応性粗骨材の混合率を指定し、その割合に従い、粗骨材を配置する。図-1 にその概念図を、図-2 に反応性骨材、非反応性骨材の分布の例を、それぞれ示す。

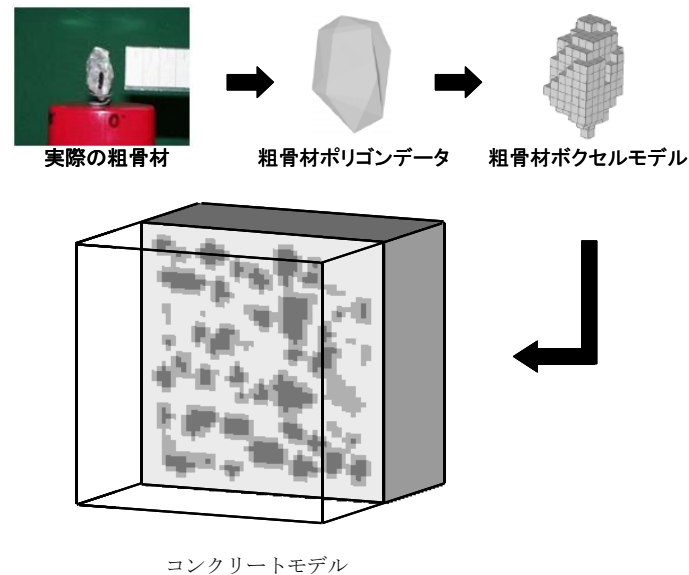


図-1 コンクリートモデル作成の概念図

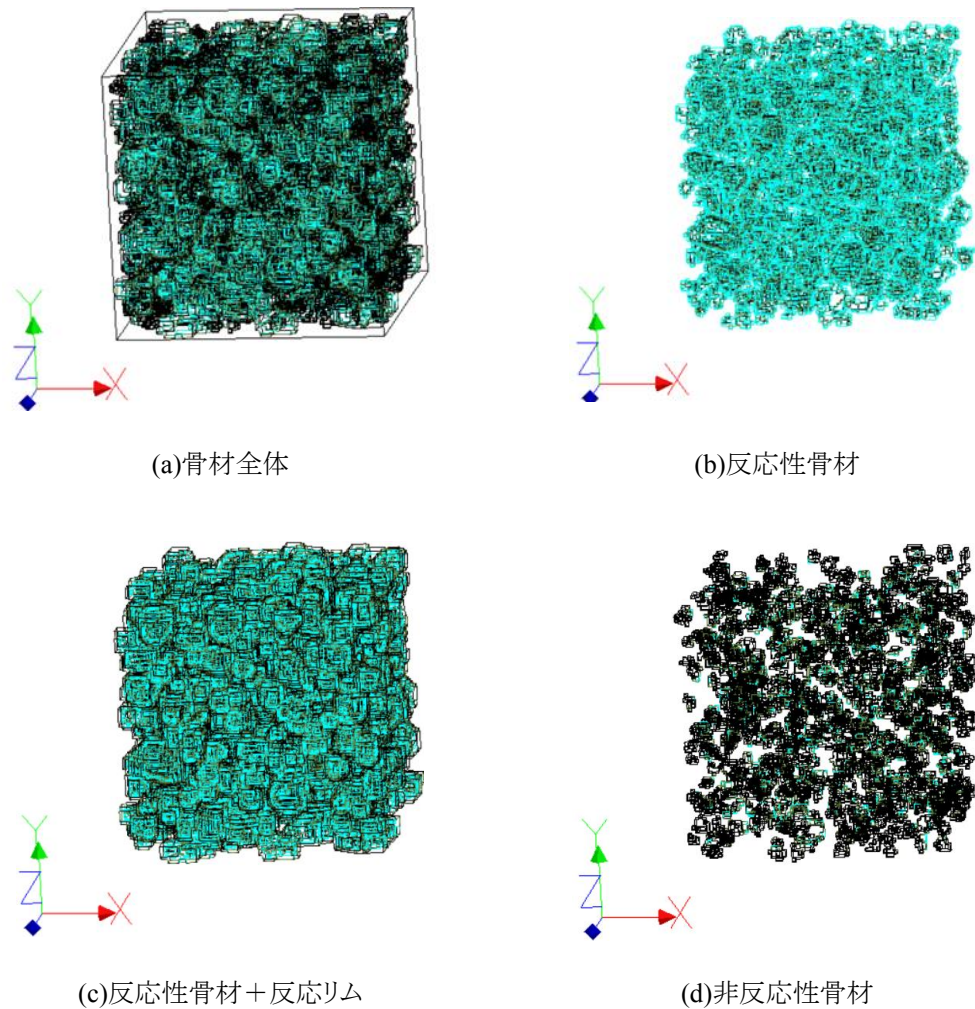


図-2 反応性骨材と非反応性骨材の分布の例

(b) 連成解析手法

本解析は、ボクセルFEMをベースとし、非定常拡散問題と非線形ひび割れ進展問題の両者を連成して行う。ひび割れは、損傷に応じてボクセル要素の剛性を現象させる損傷モデルを導入することで表現し、得られる損傷パラメータを用いて拡散問題における物性値(拡散係数)も段階的に変化させるイオン拡散-固体損傷の連成解析手法である。

図-3 に連成解析フローチャートを示す。連成解析では、最初に非定常拡散問題を解き拡散物質(アルカリイオン)の空間分布を予測する。そして、イオン濃度の空間分布から粗骨材の膨張力を決定する。この際、膨張力によって不連続面と判定される要素は、高い拡散係数に置換し、再び拡散問題を解く。これを繰り返すことで、イオン拡散に伴う不連続面進展解析を実施する。

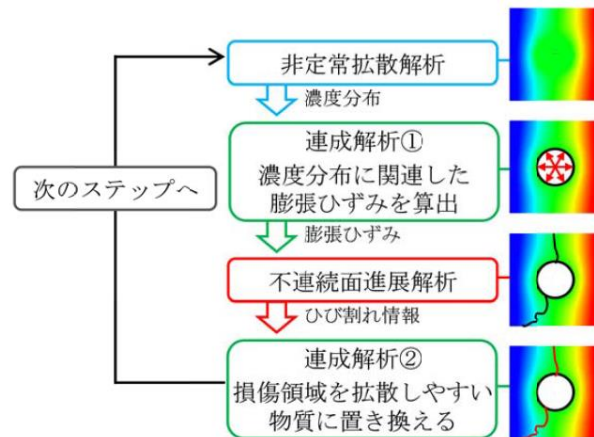


図-3 連成解析フローチャート

損傷力学モデルの概要

損傷モデルでは連続体損傷力学を導入し、損傷変数 D を用い、要素剛性を段階的に減少させるモデルである。

損傷変数は $0 \leq D \leq 1$ であり、 $D=0$ のときには健全な状態を示し、 $D=1$ は最終的な破壊状態を表す。損傷に伴う微小空間の発達は材料の剛性低下を引き起こすため、本研究では弾性係数の低下によって損傷状態を表す。

$$D = (E_0 - E) / E_0 \quad (1)$$

ここで、 E_0 は非損傷状態の弾性係数、 E は損傷後の弾性係数である。具体的な損傷変数は Mazars らによる損傷進展式を用いている。 \mathbf{C}^e を等方弾性テンソルとすると、損傷を考慮した材料構成則は以下のように規定される。

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - D) \mathbf{C}^e \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2)$$

ひび割れた要素の拡散係数モデル

ひび割れた要素の拡散係数 k は、損傷パラメータに応じ大きくし、ある一定量 α になると収束するとして式(3)のモデルを提案する(図-4(a) 参照)。

$$k = k_0 + \alpha \{1 - \exp(-\beta \times D)\} \quad (3)$$

ここで、 k_0 は健全時の拡散係数、 α は拡散係数の収束値を表現する係数、 β は拡散係数の最

大値への収束速度を表現する係数、 D は損傷係数である。

膨張モデル

ASR膨張は、反応生成物であるASRゲルの吸水膨張によるものであるが、本研究では、ASRゲル量がイオン濃度に比例すると仮定し、また、ASRゲル生成後、吸水膨張までの潜伏期を考慮した式(4)に示す等方ひずみ ε を膨張モデルとして提案する(図-4(b)参照)。

$$\left. \begin{array}{l} C_{alkali} < C_{TL} \quad \varepsilon = 0 \\ C_{alkali} \geq C_{TL} \quad \varepsilon = \alpha \{1 - \exp(-\beta(C_{alkali} - C_{TL}))\} \end{array} \right\} \quad (4)$$

ここで、 α は膨張量の最大を表現する係数、 β は膨張速度を表現する係数、 C_{alkali} はアルカリイオン濃度、 C_{TL} は閾値である。なお、反応を起こし、膨張した要素を構成する節点のアルカリイオン濃度 C_{alkali} は、反応で消費されたとして、次の式を用いて減少させている。

$$C_{alkali} = C_{alkali} - \gamma C_{CT} \quad (5)$$

ここで、 γ は、アルカリ消費率を表す係数であり、本解析は、 $\gamma=0.001$ とした。

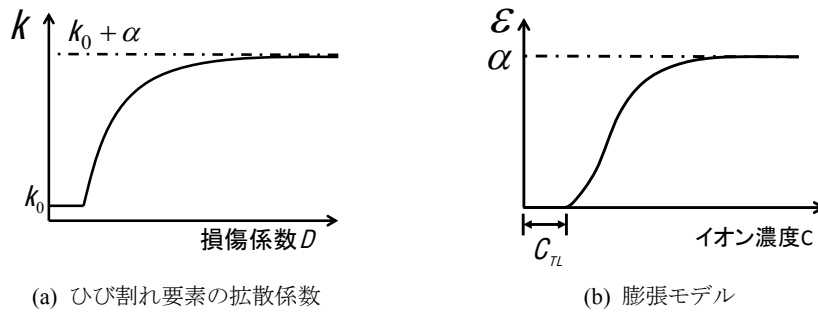


図-4 拡散モデルおよび膨張モデル

数値解析例

解析には $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ のコンクリートモデルを用いた。1 ボクセル 3 mm^3 とし、粗骨材量を 5% とし、反応性粗骨材は粗骨材量の 10 %、50% の 2 水準とした。図-5 および図-6 に 2 水準のコンクリートモデルを示す。図中の反応性骨材周辺には膨張層(反応リムモデル)も同時に示している。表-1 に各種係数を示す。なお、時間刻みは 0.5 日とした。

アルカリ量に応じた膨張ひずみを粗骨材に与え、ASR の膨張を表現した。境界条件は yz 面以外の面に対して面外方向の変位を拘束し、アルカリは粗骨材以外(モルタル)に初期値として 1 kg/mm^3 を与えた。

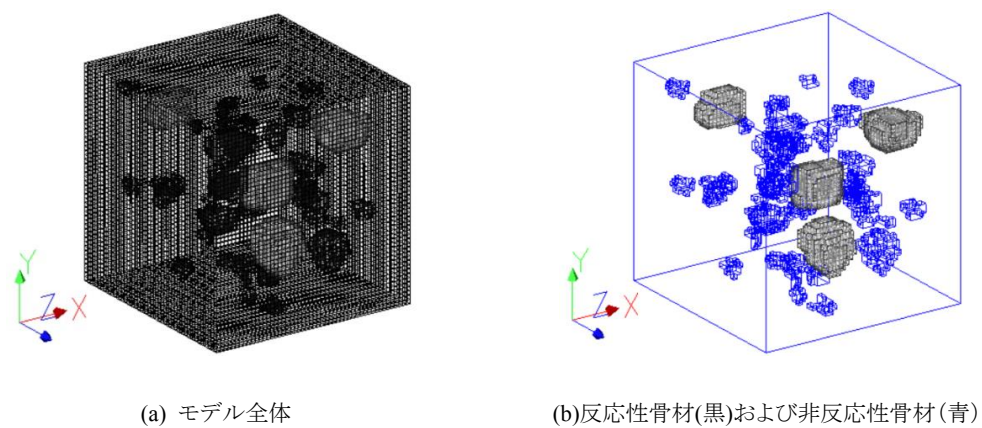


図-5 コンクリートモデル(反応性粗骨材 5%)

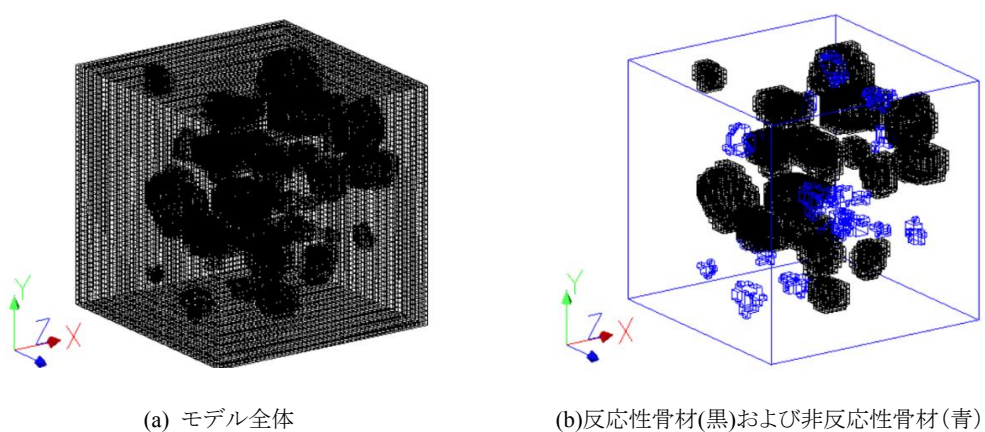


図-6 コンクリートモデル(反応性粗骨材 50%)

表-1 解析に用いた材料特性

	モルタル	反応性粗骨材	非反応性粗骨材
拡散係数(mm ² /day)	1.0	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-6}
弾性係数(GPa)	20.0	60.0	60.0
引張強度(MPa)	4.0	破壊しない	破壊しない

図-7, 図-8 にそれぞれ内部ひび割れおよび表面ひび割れの解析結果(損傷係数表示)を示す. この結果より, 両ケースとも, ひび割れは反応性粗骨材の周辺のもルタルから生じ, コンクリート表面に進展しているのがわかる. また, 反応性骨材と非反応性骨材の混合率によるひび割れ発生の違いを表現できていることがわかる. しかし, 膨張量の評価は行っていないため, 今後は, 内在アルカリ量や反応に伴うアルカリ消費量を考慮に入れたモデルを開発し, ペシマム現象による膨張量の詳細な検討を行う予定である.

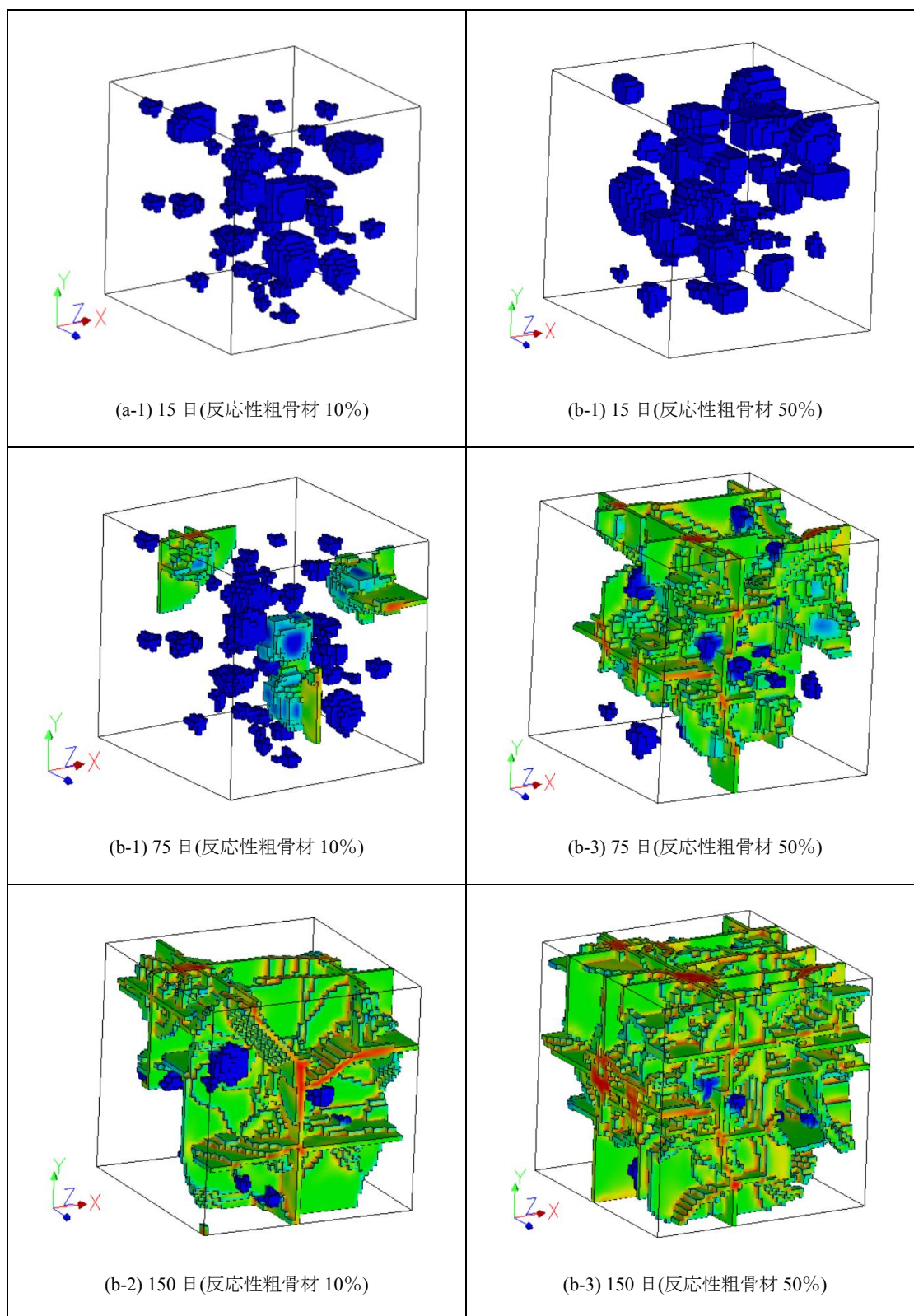


図-7 内部ひび割れ進展(損傷係数表示)

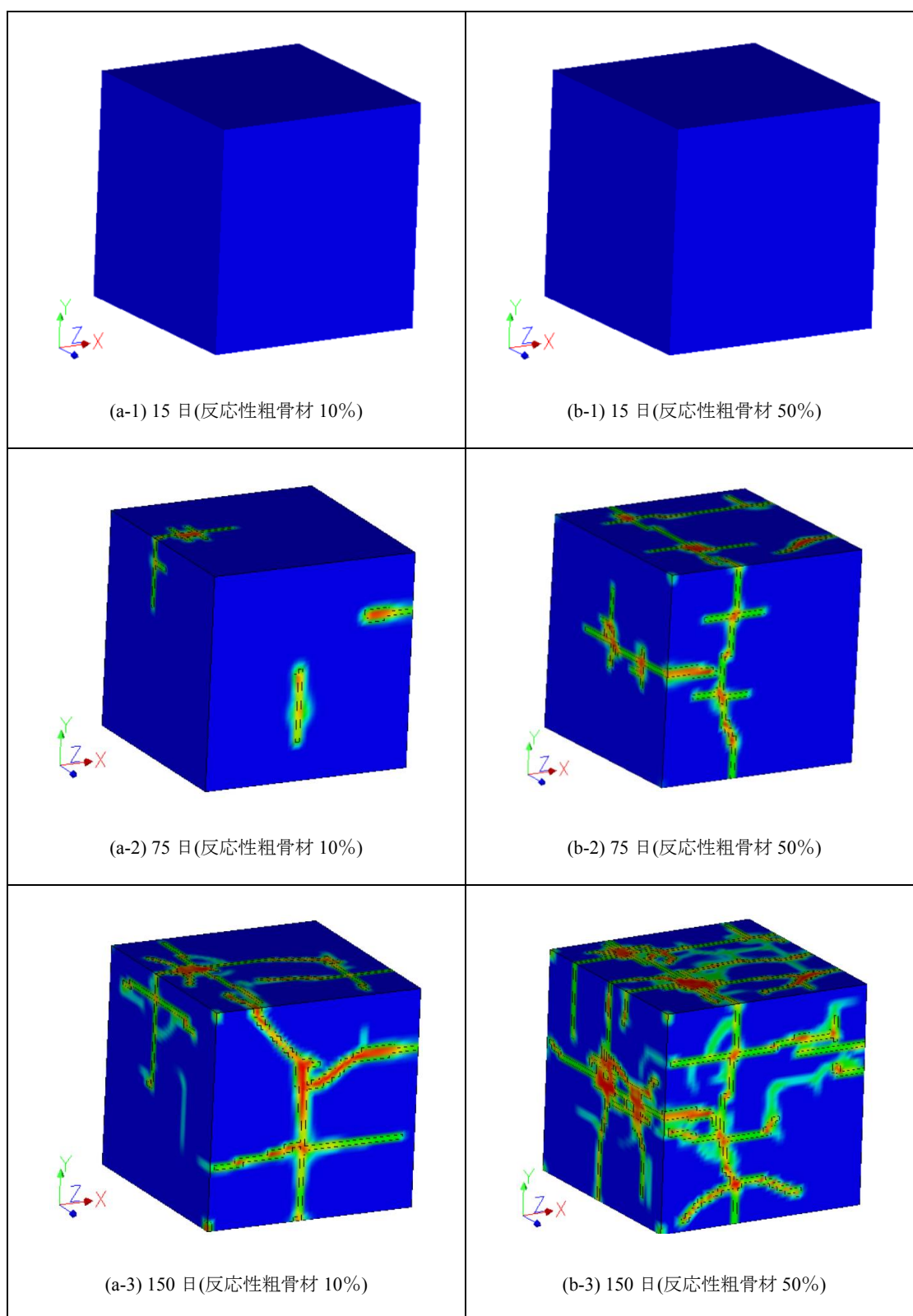


図-8 内部ひび割れ進展(損傷係数表示)

(4) 平成 27 年度進捗状況

(3)に示した通り, 反応性骨材と非反応性粗骨材の混合率を変えた ASR 膨張解析が実施可能であることを示した. 今後は, 解析パラメータを求めるための実験をあわせて行い, ペシマム現象を再現可能な解析手法の構築を目指す. また, 大規模な解析が予想されるため, 並列計算 (MPI+OpenMP ハイブリッド)を用いた高速化を行う.

なお, 本研究は九州大学工学部地球環境工学科 浅井光輝准教授との共同研究である.

3.1.5. Sinkhole の形成シミュレーション

(1) 目標・計画

Sinkhole は、カルスト地形にて多く形成される地盤陥没現象を意味し、雨水や地下水などによって石灰岩の固い層が溶解することで発生する。この溶解現象は、地盤内部だけでなく、地表面にも影響を及ぼすことがあり、例えば、数十メートルを超える大きな地盤陥没が、前兆もなく突然に発生した事例も数多く存在している。したがって、Sinkhole の発生メカニズムの解明および予測等は工学上極めて重要な課題となっている。しかしながら、石灰岩の溶解に伴う Sinkhole の発生機構を実験的に模擬した上で地盤の陥没過程を観察することは、時間的制約や現象自体の複雑さから極めて困難であり、災害後の調査などに頼らざるを得ない現状がある。このような現状を考慮すると、Sinkhole の形成メカニズムや発生後の被害を想定する際には、数値シミュレーション技術が強力なツールになると考えられる。

そこで本研究では、石灰岩の溶解過程を反応拡散系にて数値モデル化し、Sinkhole の形成過程を計算機上で再現した。なお、本研究は、最終的には地盤陥没現象のメカニズム解明に挑むものとなっている。なお、前年度までに、地盤の幾何モデリング技術、地盤の流動解析技術、地盤内表面における破壊パターン解析技術として、力学をベースとした解析手法を展開してきたが、本年度は更に踏み込み、地盤の化学的風化現象の数値モデル化に挑んだものとなっている。

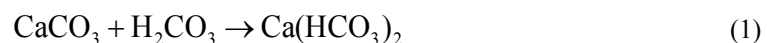
(2) 意義・国際社会との比較

Sinkhole 現象に関しては、アメリカ合衆国やアラブ首長国連邦、大韓民国等の都市部においても多くの被害が確認されており、特に、フロリダ半島においては、半島全体を覆う石灰岩が全体的に溶出した影響で、多数の Sinkhole が発生しており、物理的な被害のみならず人的な被害も発生していることから、緊急な対策が必要とされている。しかしながら、本現象は力学的な理論のみでは解決することが困難な問題であり、また、時間的な制約も重なって、明確な解決の緒は未だ見つかっていない。数値解析的な検討については、若干の先行研究があるものの、ダルシー則等の単純化されたモデルがあるのみである。したがって、本研究の国際社会における意義は極めて大きい。

(3) 研究内容

1) 石灰岩の溶解過程の定式化

石灰岩の溶解は次式にて表すことができる。



したがって、石灰岩の溶解に対する化学反応速度式は、次式にて表すことができる。

$$\frac{d[A]}{dt} = -k_1(A-a)(B-a) \quad (2)$$

$$\frac{d[B]}{dt} = -k_1(A - a)(B - a) \quad (3)$$

$$\frac{d[C]}{dt} = k_1(A - a)(B - a) \quad (4)$$

ここで, A: CaCO_3 , B: H_2CO_3 , C: $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, k_1 : 反応速度定数, t : 時間, a : 溶解反応した物質
量である. また, この反応は可逆性を有しており, これも考慮しなければならない. このとき, 化学反
応速度式は 1 次の反応速度式になり, 次式にて表すことができる.

$$\frac{d[A]}{dt} = k_2(C - b) \quad (5)$$

$$\frac{d[B]}{dt} = k_2(C - b) \quad (6)$$

$$\frac{d[C]}{dt} = -k_2(C - b) \quad (7)$$

ここで, k_2 : 反応速度定数, b : 生成反応した物質, C: $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ の濃度である. 一方, 各物質
は岩盤内部で拡散していることが考えられるから, 式(2)~(7)に拡散項を導入することを仮定する.
具体的には, 各物質濃度の時間に伴う変化量を反応拡散系にて定義し, 次式にて仮定した.

$$\frac{d[A]}{dt} = D_1 \nabla^2 A - k_1([A]_0 - a)([B]_0 - a) + k_2([C]_0 - b) \quad (8)$$

$$\frac{d[B]}{dt} = D_2 \nabla^2 B - k_1([A]_0 - a)([B]_0 - a) + k_2([C]_0 - b) \quad (9)$$

$$\frac{d[C]}{dt} = D_3 \nabla^2 C + k_1([A]_0 - a)([B]_0 - a) - k_2([C]_0 - b) \quad (10)$$

ここで, D_1 : CaCO_3 の拡散係数, D_2 : H_2CO_3 の反応係数, D_3 : $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ の拡散係数である.

2) 数値解析例: Sinkhole の形成シミュレーション

① 解析モデル

解析領域は, 損傷部位を含んだ矩形領域で 2×2 の 2 次元モデルを仮定した. このモデルにおける
総格子点数は 40401 であり, 境界条件としてモデルの上下左右端に Neumann 条件を設定した. ま
た, 化学反応量にばらつきを持たせるために, 毎ステップごとに化学反応する量が, 正反応および逆
反応共にランダムに変化するよう設定した. さらに, 異なる環境下・条件下での反応を観察するた
めに, 石灰石の形状や炭酸水の流入場所を変化させ, より実際の状況に近い条件を設定した. な
お, 石灰岩の表面では, ± 0.1 の範囲の濃度をランダムに設定した. 以下に, 本研究で用いた2つ
の解析モデルの詳細を記す.

■ 解析モデル 1

本モデルは, Sinkhole の形成過程を観察するためのモデルであり, 図-3.1.5-1 に示すように, モデル上部の穴から一定量の炭酸水が供給される. これは, 正方形の石灰岩の上部に穴をあけ, そこから炭酸水が供給されて石灰岩が溶けていく様子を再現したものである.

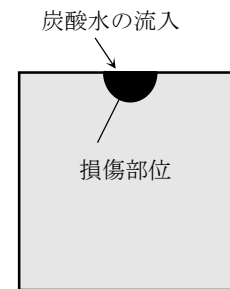


図-3.1.5-1 解析モデル 1

■ 解析モデル 2

本モデルは, Sinkhole が岩石の内部損傷部位から発達していく様子を観察するためのモデルであり, 図-3.1.5-2 に示すように, 石灰岩の濃度として層状に3つの値を設定した(上段: 0.5 ± 0.1 , 中段: 0.9 ± 0.1 , 下段: 0.1 ± 0.1).

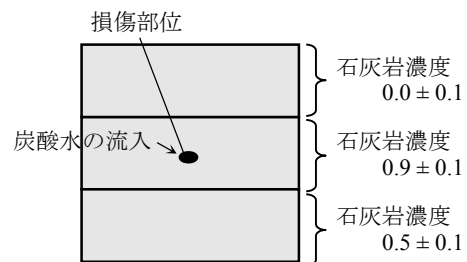


図-3.1.5-2 解析モデル 2

② 解析モデル 1 の結果と考察

解析モデル 1 の解析結果として, 石灰石の濃度, 炭酸水の濃度および炭酸水素ナトリウムの濃度を, それぞれ, 図-3.1.5-3, 図-3.1.5-4 および図-3.1.5-5 に示す. 図中のカラーグラデーションは各物質の濃度の大きさを示しており, 青から緑, 赤に変わるにつれて低濃度から高濃度に変化したことを意味する. 図-3.1.5-3 より, 本解析結果は, 炭酸水が石灰岩を溶かし Sinkhole が形成されていく様子を示している. さらに, 一部の炭酸水素カルシウムがそれぞれ石灰岩と炭酸水に変化している様子も確認される. また, 炭酸水は, 図-3.1.5-4 より, 解析の初期段階では上部の穴から供給され, そこから step 数が増加していくに伴って, 拡散していくことが分かる. また, 図-3.1.5-5 より, 炭酸水と石灰岩が接触している様子が見受けられることから, 炭酸カルシウムが徐々に増加し続け, その後拡散していることが分かる. さらに, モデルの下部には炭酸カルシウムが発生していないことから, 炭酸水と石灰岩が接触していなければ, 炭酸水素カルシウムは生成されないことが分かる.

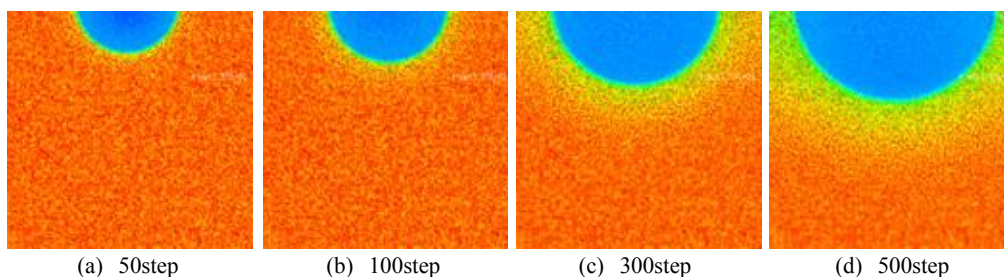


図-3.1.5-3 石灰石の濃度パターン(a)～(d):経時変化 (解析モデル 1)

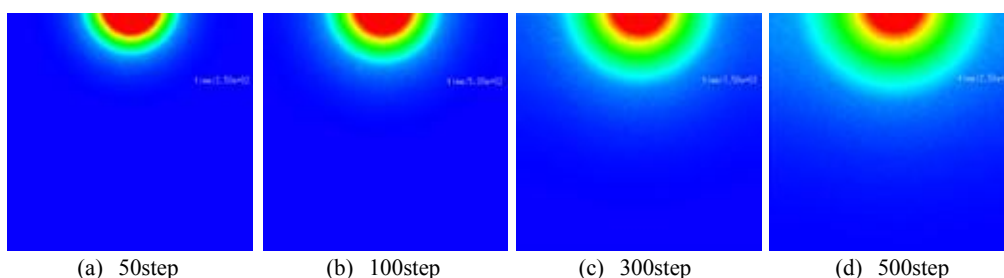


図-3.1.1.5-4 炭酸水の濃度パターン(a)～(d):経時変化 (解析モデル 1)

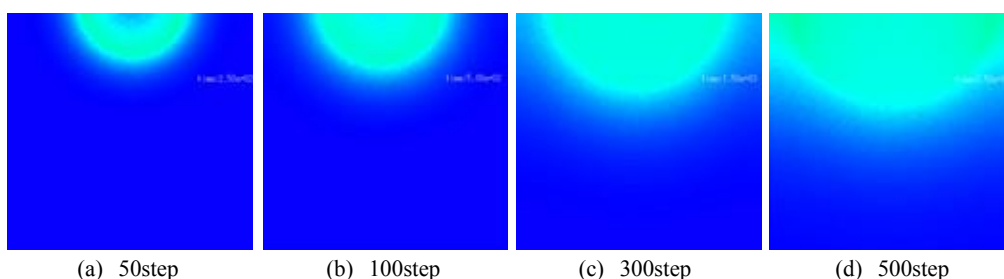


図-3.1.5-5 炭酸水素ナトリウムの濃度パターン(a)～(d):経時変化 (解析モデル 1)

③ 解析モデル 2 の結果と考察

解析モデル 2 の解析結果として、石灰石の濃度、炭酸水の濃度および炭酸水素ナトリウムの濃度を、それぞれ、図-3.1.5-6、図-3.1.5-7 および図-3.1.5-8 に示す。図-3.1.5-6 より、石灰岩では、水が流入している箇所から徐々に穴が大きくなっていき、最終的には上下の層を貫き、縦穴をあけている。これらの層を地層として想定すると、中間の層が炭酸水によって破壊されることにより、上段にある層の比較的柔らかい層が、Sinkhole の内部になだれ込む、と考えられることができる。このような現象は、実地盤においても確認されていることであり、本手法が定性的には妥当であることが分かる。また、図-3.1.5-7 より、炭酸水が石灰岩の濃度の低いところに残っていることが分かる。さらに、図-3.1.5-8 より、炭酸水素カルシウムが一定には拡散せず、層の境目で異なった拡がりを示していることから、炭酸水素カルシウムは石灰岩濃度の高い箇所に集中すると考察できる。

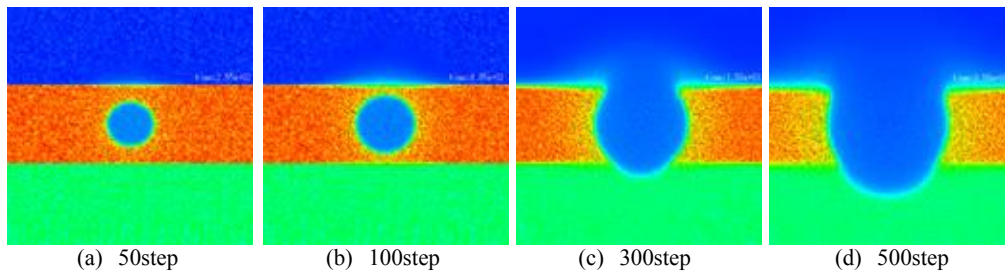


図-3.1.5-6 石灰岩の濃度パターン(a)～(d):経時変化 (解析モデル 2)

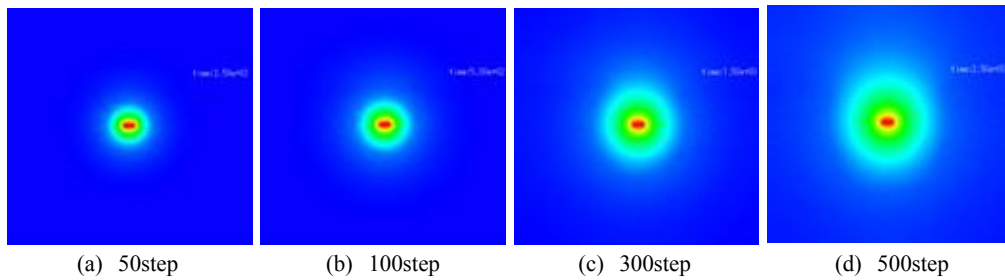


図-3.1.5-7 炭酸水の濃度パターン(a)～(d):経時変化 (解析モデル 2)

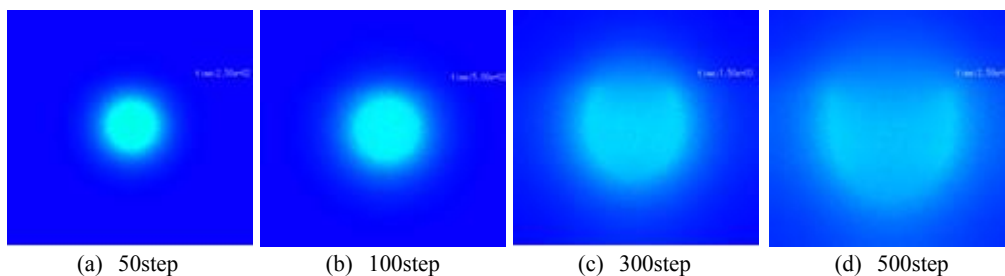


図-3.1.5-8 炭酸水素カルシウムの濃度パターン(a)～(d):経時変化 (解析モデル 2)

本研究で定式化した数理モデルは極めて単純である一方、多くのパラメータを含む。したがって、今後の展開としては、多くのパラメータサーベイを実施し、実地盤の状態を加味した数値シミュレーションを実施していくことが望ましい。また、実際の災害状況や石灰岩の溶解実験結果などと比較し、本手法の妥当性を検討するとともに、本モデルの精度向上を図る必要がある。

(4) 平成 27 年度進捗状況

今年度は、地盤内部における化学反応に伴う岩石溶解現象に対して、反応拡散系理論をベースにした数理モデルを構築し、2次元領域における数値解析技術を構築した。その結果、Sinkholeの発生過程のシミュレーションに成功し、定性的には良好な結果を得ることができた。今後は、実験値との比較など、更なる検証を行う必要がある。

3.2. 大規模並列化グループ

2011 年に京コンピュータが 10 ペタ(Peta: 1 京)フロップス(Flops: Floting Points per second)に達し, TOP500 では 2 回連続世界 1 位となり, 2013 年には中国の Tianhe-2 が 33 ペタにより 1 位を記録し, 次世代スーパーコンピュータは, ペタの次の世代, つまりエクサ(Exa)フロップスを指す時代へと突入している. このことからハードウェアとしてコンピュータの性能が向上するスピードがいかに速いかが分かる. その一方で, これらの大規模なコンピュータ上で動作する効率的なソフトウェアの開発に関しては, その開発スピードもソフトウェアの品質も十分とは言えず, 多くのソフトウェアが 20 世紀の主要なソフトウェアを修正し続けて用いられているのが実情である. 特に, 1970~1980 年台に既に確立されているアルゴリズムに対して, 並列化の実装のみを加えた物が多く見られる. このような背景のもと, 本プロジェクトでは様々な計算機プラットフォーム上で効率的に動作する, 次世代の大規模解析システムを構築するとともに, 常に最先端のスーパーコンピュータ能力を活用するシミュレーション実現を目指す.

今年度は, 以下の項目について報告を行う.

- (1) ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発
- (2) 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築

3.2.1. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発

(1) 目標・計画

本研究では対象問題をある程度限定することで高性能が得られるアプリケーション特化型システム開発を行っていく。対象問題は連続体力学とし、産業界で需要が高い非構造格子並びに自由表面や移動境界問題に重要なメッシュフリー（粒子法を含む）の取り扱いを可能とする。時間方向の非定常性や問題が持つ非線形性を考慮する必要があるが、陰解法ベースの数値解析手法を対象とする。これらに対し、3つの課題(A)DDM 入出力ライブラリ開発、(B)DDM ソルバーライブラリ開発、(C)連続体力学向け DSL 開発に取り組む。本研究で開発されたライブラリを用いて連続体力学系シミュレータの実装と評価も行う予定である。

(2) 意義・国際社会との比較

ポストペタスケール計算を見据えた新技術の開発について、これまで同様汎用向けのライブラリなども開発されるであろうが、それらの利用では、非構造格子問題では高々数パーセントの性能、あるいはそれ以下しか期待できず、連続体力学系シミュレーションに特化したシステム開発が必要と考えられる。そもそも数パーセントの性能でのソフトウェアはペタコンでの運用が認められないという制約もあり、これはポストペタコンについてはさらに厳しくなることも想定される。

連続体力学系シミュレーションは、従来からの FEM, FVM, BEM など非構造格子アプローチに加え、近年ではメッシュフリーや粒子ベース手法による大規模計算の台頭が目覚しく、これらにも対応させ、非構造格子および節点、粒子ベースモデルを統一的に扱えるようにすることで、連続体力学系シミュレーション向けライブラリとして整備されれば、ポストペタコンの連続体力学系シミュレーションでの利用の拡大に大きく貢献することが期待できる。

(3) 研究内容

A) DDM (Domain Decomposition Method, 領域分割法) 入出力ライブラリ

本研究項目は、マルチレベル領域分割法に基づく多階層計算格子データの生成、操作および I/O ライブラリ開発を行うものである。一般的なアプリケーションシステムは、プレ・ソルバー・ポスト処理に分けられるが、これまでは最も高負荷であるソルバー部のみがスパコン上に実装されてきた。ポストペタコンでは、全ての処理をスパコン上に実装し、並列化することが当然求められてくる。しかし、従来の枠組みで並列化したのみでは、それに伴い生成される大規模な数値計算データ処理に多くの時間が割かれてしまうことが予想される。そこで、これまで研究代表者らがソルバー部の並列化手法として圧倒的な高い並列効率を示してきた階層型領域分割法の技術を応用した、マルチレベル領域分割法によるデータ処理システムの開発を行う。

B) DDM ソルバーライブラリ

本研究項目は、マルチレベル領域分割法に基づく連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列ライブラリ開発を行うものである。一般的な線形代数ソルバーは、アセンブリされた連立一

次方程式を入力とするため、FEM におけるメッシュ情報など本来解析手法が持つ特徴を利用せずに実装されてきた。それらは共有メモリ環境及びその中で解くことができる解析規模では問題となりにくい、ポストペタコンで対象とする解析規模では入力データから解析手法まで含めた分散メモリ環境向け並列化技術が必要となることが予想される。そこで、提案するマルチレベル DDM による多階層型データ構造を活用した、大規模な線形代数ソルバーの分散メモリ環境に適したライブラリの開発を行う。これは、

- ・多階層領域分割に基づく分散メモリ並列向け線形代数ソルバーの構築
- ・多階層領域分割に基づくマルチレベルコースグリッド修正法の開発
- ・構造・熱・流体・磁場など物理現象毎に特化したコースグリッド修正法の開発

を含む。つまり、これまで FEM を対象に研究を進めてきた DDM をマルチレベルに拡張し、さらに FVM, BEM, メッシュフリー, 節点ベース FEM や粒子法など連続体力学全般に適用する技術開発である。また、マルチレベルな領域分割を利用し、線形代数ソルバーにおける前処理手法について、研究代表者らがこれまで研究を進めてきた高速かつ安定した収束性を持つ反復解法である BDD (Balancing Domain Decomposition) 法や BDDC (Balancing Domain Decomposition by Constraints) 法をマルチレベルに拡張し、さらに粒子法などへの応用も進める。開発システムは線形代数ライブラリとして整備していく。

C) 連続体力学向け DSL (Domain Specific Language, 問題領域専用言語)

本研究項目は、連続体力学向け DSL の開発と、それに対応した多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成の開発を行うものである。ポストペタコンのアーキテクチャでは、計算ノード間の並列性だけでなく計算ノード内での効率も重視される。各計算ノードはメニーコアや GPU, SIMD 拡張命令といった多種多様なアクセラレータを有し、これらを有効利用することが望まれる。従来のプログラミング言語やコンパイラ最適化技術での対処は不十分であり、現状ではそれぞれのアクセラレータごとに人手で最適化された個別の実装が必要とされている。一方、数値シミュレーションコードの場合、特に連続体力学分野においては、そのアプリケーションロジックは物理現象や数値解析スキームであり、これは数学表現、特に行列やテンソルで表記されることが多い。よって、連続体物理モデルを DSL 化して、数学記述(例えば、行列、テンソルの式を `tex` 形式で記述)から各アクセラレータタイプ向けに最適化されたライブラリを `call` するコードを生成するコードジェネレータあるいはトランスレータアプローチが有効であると考えられ、これを実現するシステムの開発を行う。

(4) 平成 27 年度進捗状況

A) DDM 入出力ライブラリ

平成 27 年度は、次の研究項目の研究開発が進められた。

1. メッシュ向け多階層領域分割

2 層領域分割アルゴリズムについて、非構造格子向け並びにメッシュフリー向けの機能強化を行った。MPI-OpenMP ハイブリッド並列化とリスタート機能を追加することで、現時点で最終目的である 2,260 億要素 (0.9 兆自由度) の非構造四面体メッシュ生成に名大 FX10 の 96 ノー

ドを 56 時間用いることで達成できた。ポストペタコンで想定される超大規模シミュレーションのプレ処理に有効なライブラリであることが示された。

2. メッシュ向け DDM 圧縮

非構造格子向け DDM 圧縮技術の実装を開始し、FEM による熱伝導解析を対象に基本機能を開発した。平成 26 年度には、大規模解析への適用を開始するとともに、新たに多階層精度圧縮数値記録技術に基づいた FEM データ圧縮ライブラリを開発し、大規模解析において約 8 割の圧縮率を得ることに成功した。

3. メッシュフリー向け DDM 圧縮

多階層精度圧縮数値記録技術に基づいた粒子データ圧縮ライブラリを開発し、大規模解析において約 5 割の圧縮率を得ることに成功した。

B) DDM ソルバーライブラリ

平成 27 年度は、次の研究項目の研究開発が進められた。

1. メッシュ向け DDM ソルバー

LexADV_TryDDM の開発を継続して行い、電磁界解析ソフトウェアからの利用に向けて Nédélec 要素対応などを行った。また、複素対称を係数に持つシステム向けに、DDM に基づく反復解法である MINRE-like_CS 法を開発した。さらに、DDM の計算アルゴリズム見直しによる高速化を進めており、平成 26 年度は時間調和渦電流問題において反復解法の収束性を大幅に改善することに成功した。これにより、従来の計算アルゴリズムでは 5,000 万自由度程度までしか求解できなかったが、東京大学 FX10 の 720 ノードで 35 億自由度モデルを 9 時間弱で求解することに成功し、ポストペタコンにおいて解くべき問題に対しても有効な計算手法であることが示された。

2. メッシュフリー向け DDM ソルバー

メッシュフリー向け DDM 解釈を数学的行い、加えて、メッシュフリー向け DDM アルゴリズムをインターフェースの選び方で 2 種類開発した。現在、検証用の実装を行っている。

3. 流れ・電磁界 FEM 向け多階層前処理

電磁界問題向けに BDD 前処理の統一的構築方法の開発と実装を行った[15]。また、LexADV_TryDDM による BDD 前処理研究開発フレームワークを開発中である。

4. ポストペタコン向けシミュレータ評価

評価環境として京コンピュータ、東京大学 FX10、東京工業大学 TSUBAME2.5 (GPU)、名古屋大学 CX400 (MIC) を主な開発計算機としてそれぞれのソルバーの性能向上をおこなった。有限要素法による構造解析機能と粒子法による流体解析機能を持った「連続体力学系シミュレータ」の開発を行い、ファイルベースの片方向連成機能のみの開発を完了した。図 1 では、LexADV_EMPS を用いて津波遡上解析を行った後、流体解析で出力されたファイルから、地上構造物に与える流体圧力を求め、構造解析の入力ファイルを作成する。この構造解析用の入力ファイルを用いて、ADVENTURE_Solid が応力解析を行う。このようにして

LexADV_EMPS の片方向連成機能の開発により、大規模分散メモリ環境で、粒子法による流体解析と有限要素法による構造解析の連成解析が可能となった。

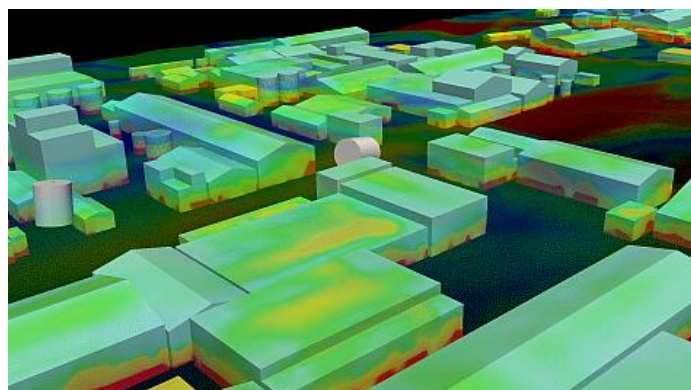


Fig.1. A Coupled Analysis with LexADV_EMPS and ADVENTURE_Solid

C) 連続体力学向け DSL

平成 27 年度は、次の研究項目の研究開発が進められた。

1. DSL トランスレータ

平成 24 年度から引き続き、豊田中央研究所や東京理科大学、理化学研究所、JAMSTEC, JAXA, JAEA, 東京大学生産技術研究所、東京大学地震研究所や国内スパコンセンターなどへの普及活動を積極的に行い、理化学研究所 京コンピュータ、東京大学 FX10, T2K 及び GPU クラスタ、九州大学 FX10, JAMSTEC ES2, 筑波大学 T2K, 名古屋大学 FX1, 名古屋大学 CX400, 名古屋大学 FX10, 京都大学 XE6, 九州大学 CX400, 九州大学 FX10 などの利用実績を築きつつある。更に、HPC 技術の産業界向け応用に関する国際ワークショップに参加し、韓国 KiSTi における HPC クラウド開発への協力を行うことで、海外スパコンセンターへの普及活動も継続して行っている。この活動の一環として、5th International Industrial Supercomputing Workshop が平成 26 年 10 月 2-3 日に東洋大学で開催された。

2. DSL 性能評価

需要の高いマルチコア及び SIMD 命令セット向けの最適化ライブラリの開発を延長して実施した。また GPU・MIC 向けの開発を更に重点的に行った。GPU 向け開発には、CUDA 及び OpenACC の利用を引き続き検討した。MIC 向け開発には、ネイティブ実装及びオフロード実装の利用を検討した。

3. SIMD・GPU 向け最適化 AutoMT

マルチコア及び SIMD 命令セット向け最適化ライブラリの開発を更に進めた。開発中の①構造解析・要素剛性、②非線形材料構成則、③熱伝導解析・要素剛性のそれぞれの行列テンソルライブラリでは、Intel (Sandy Bridge) でピーク性能比①70%、②31%、③50%を達成し、東大 FX10 ではピーク性能比①44%、②40%、③38%を達成することに成功した。

3.2.2. 超大規模領域分割計算の高速化手法の統一的構築

(1) 目標・計画

A) 静磁場解析におけるインターフェース問題のBDD前処理の実装

磁場解析の分野ではこれまで約20年近く、東京大学の菊地文雄名誉教授が線形静磁場問題で確立した独創的な混合法的定式化を自然な形で3次元渦電流問題や3次元非線形静磁場問題に独自の工夫を加えて拡張し、ADVENTURE_Magneticを公開してきた。ごく最近部分領域問題を直接法で解くことにより1億実自由度や約5,000万複素自由度の大規模解析を可能にした魅力を次世代計算機で更に活かすためにはもう1桁程度の計算速度の改善が望ましい状況がある(速ければ速いほど、実際の設計に用いる計算モデルを更に詳細化できる)。本研究では、この高速化に対応する研究を行い、もう1桁高速化したソフトウェアを公開していく。ここに述べた手法に基づく磁場解析ソフトウェアは、国産市販ソフトウェアは言うまでもなく国際的に見てもあまり例がない。また現在数百万自由度規模程度で留まっている電磁場解析の規模の拡大にとって現時点ですでにブレイクスルーを引き起こした研究になっている。実際、大規模解析では我々の現時点のレベルを目標にする研究チームもいくつか現れているが、本研究では得意とする大規模化に更に高速性を加味することにより、追随者の上を行くPerfect Only Oneを目指す。

B) 熱対流解析コードの機能強化

非圧縮性粘性流解析・熱対流解析の分野では現時点のADVENTURE_sFlowをもとに計算サービスを行っているベンチャー企業も現われている。ADVENTURE_sFlowでは磁場解析や構造解析と同様な手法で計算しているので、高速化の検討を共通の課題として行え、入力データの共有化がしやすく連成解析が行いやすいという特長がある。低炭素社会向けシミュレーション技術に応用分野を特化し解析機能を限定してでも、この特長を早く引き出したいと考えている。

(2) 意義・国際社会との比較

3次元電磁場の有限要素解析はこれまでやや試行錯誤的に行われており、信頼のおける数値解法が未だ十分確立されていない状況にある。このようななかで、我々は菊地理論をベースに、工学的応用を展開するという形を採っており、国際的に見ても極めてユニークな注目すべき研究を展開している。これまでに開発されてきた文部科学省支援研究による電磁場解析ソフトウェアの骨格を一貫して提供してきたという自負もある。今後の低炭素社会に向けて電気自動車の利用が推進されているが、電磁環境適合性(EMC)のためにも電磁場解析の有用性は増している。非圧縮性粘性流・熱対流や固体力学の大規模解析も統一的な手法で研究を進めているので、それらとの連成解析が有利に行えるという利点も持っている。

(3) 研究内容

A) 静磁場解析におけるインターフェース問題のBDD前処理の実装

3次元磁場の有限要素法による解析, 特に3次元渦電流解析(複素自由度4,355万の問題が32台のPCクラスタを用い5時間弱で解けている)並びに1億自由度を最近可能にした3次元非線形静磁場解析に対しては, 領域分割法を用いる際の数値計算上の諸問題を以下の更なる高速化に関する課題に焦点を絞って研究する.

「離散化に伴い生じる超大規模(1億自由度以上)の疎な対称連立1次方程式と連立非線形方程式に対する領域分割法を意識した効率的な数値解法を確立し, 特にもう1桁の高速化を可能にする前処理方法を確立する.」

B) 熱対流解析コードの機能強化

3次元非圧縮性粘性流解析についてはこれまでの内容を発展させた新アルゴリズムの導入を図る. 2006年7月に公開したモジュールADVENTURE_sFlowはその後水素利用社会向けシミュレーション技術でも応用があったので, 熱対流解析の基本機能が非定常解析機能も含めて追加され, 前処理機能の強化による高速化が実現されたため, 実用レベルの有効性をチェックする段階になっている. 非定常解析機能ではStokes問題のみならず, Navier-Stokes問題に対しても特性曲線法の活用により対称な連立1次方程式ソルバーを活用できることがポイントになっている.

(4) 平成 27 年度進捗状況

A) 静磁場解析におけるインターフェース問題の BDD 前処理の実装

昨年度はBDD 前処理の実装実現のために1コア処理に限定して三つの課題を設定した. 一つはシュアコンプリメント行列 S とベクトル p の積 q を計算する部分を独立して利用可能にすること, 二つ目はノイマンノイマン前処理を実装させること, 三つ目はコース行列を作成し, それを既存の平行ソルバーで解くことである. この三つが実現できれば, BDD の実装はほとんど実現できると言ってよいほどの重要な3項目になる. ノイマンノイマン前処理は2005年に一度成功した実績があるが当時の記録が紛失しており, 新たな開発を行うことになった. 現時点ではコードの骨格はできたが, 残念ながら効果が全く出していない. 部分領域数が大きくなると手法自体の特徴として効果が出ないのか, 何かミスをしているのかを見極める必要がある. 3番目のコース行列作成部分は既存技術の適用で今のところ問題がない. 予想外に時間がかかったのは最初の $q=Sp$ の計算であり, いくつか試みた結果, LexADV の TryDDM を適用することにより, ようやく1コアのBDD 前処理に見通しをつけることができた. ただし本来のBDD 前処理は内蔵しているノイマンノイマン前処理ともども依然として効果がでておらず, 唯一BDD 前処理を簡易化したBDD-DIAG 前処理のみが収束する. 前述のとおりLexADV の TryDDM を適用しているので, 現在の自由度規模が100万以内に抑えられている. この程度の規模ではBDD-DIAG 前処理の効果は芳しくなく, ADVENTURE_Magnetic のデフォルト前処理になっている簡易対角スケール前処理(diag)の反復回数を減らすことができない状態である. 現在, いくつかのベンチマーク問題でBDD-DIAG 前処理の効果をいろいろな視点からテストしているが, いずれの場合もほぼ同様な事情になっている. マルチコアでの処理を可能とし, シュアコンプリメント行列 S を陽に作成しないアプローチを可能にする等の今後の工夫が必要であると考えている.

B) 熱対流解析コードの機能強化

このテーマは昨年度の課題として公開用ドキュメントの整備以外に以下の 4 課題を設定した。すなわち ADVENTURE_sFlow への機能強化として

- 熱方程式部分への DDM フレームワークの適用
- 熱流束境界条件入力機能の追加
- 熱伝達境界条件入力機能の追加
- BDD 前処理における通信処理改善の検討

を図るものである。最初の DDM フレームワークの適用は(1)のテーマの B)の研究テーマと連携しながら、開発ライブラリのプロトタイプ (LexADV の TryDDM) のテストを兼ねたものであり、一応利用可能になった。2 番目, 3 番目のテーマは 1 番目のテーマが可能になった時点で, DDM フレームワークでの実現が可能になった。4 番目は派生した問題を解決しながら検討を続けた結果, これも可能になった。以上の成果を踏まえて ADVENTURE_sFlow の Ver.1.0 を公開した。今年度は自動販売機内の熱対流計算での実践を通して, Ver.1.0 の信頼性をチェックすると同時に, 燃料電池自動車の市場投入に同期させて水素漏洩時の拡散現象を熱対流のアナロジーで解く試みを本格化させる準備を行った。

今後の課題は静磁場解析同様, 熱解析の部分が LexADV の TryDDM を使っているための 100 万自由度の壁を突破することと ADVENTURE_Thermal を参考にしながらの BDD 前処理を導入することである。これらの課題をクリアしていくことにより, 自動販売機の熱対流解析, 燃料電池自動車からの水素漏洩時の拡散解析を核にして ADVENTURE_sFlow の産業界での応用を促進していく。

部分領域ごとの剛性行列の零空間の発見

(Finding of $\text{Null } K^{(i)}$)

Structural Analysis	Thermal Analysis	Stokes Flow Analysis	Magnetostatic Analysis
The rigid body motion	A constant vector	Translation like moving	$\text{grad } Q_h _{\Omega(\theta)}$



鍵になる包含関係 ($\text{Null } S^{(i)} \subset \text{Range } Z^{(i)}$)



局所問題の可解性 (Solvability of local problems)



BDD前処理の有効性 (Effectiveness of BDD)

Fig.2 A General Framework for a Unified Construction of the BDD Preconditioners.

3.3. 新規実験計測グループ

新規実験計測グループでは、計算力学研究センターのプロジェクト名である「大規模高精度流体－構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」のうち、「標準問題実験の検討」に焦点を当てた活動を行っている。

流体－構造連成実験を高い信頼性で実験するには、実験モデルの精度や実験装置の信頼性を高めた上で、それらを連成している物理量について考察する必要がある。そこで、標準問題実験に関する円柱周りの流れ実験だけでなく、シートフラッタ試験、飛行物体の空気力特性を中心に連成実験を行ってきた。

上記の事項について、今年度は以下の3項目について報告する。

- (1) 標準問題のための弾性円柱の振動実験
- (2) 平板翼モデルのフラッタ特性の系統的整理
- (3) 飛行物体に作用する空気力特性

3.3.1. 標準問題のための弾性円柱の振動実験

(1) 目標・計画

流体-構造連成解析手法を検証するための標準問題として、低速風洞を用いた円柱の振動試験を行っている。図1は風洞試験の概要図である。風路下流に実験模型を設置して試験を行い、数値解析の検証用データを提供する。また本研究を通じて、新しい計測手法、解析手法の提案を目指す。

(2) 意義・国際社会との比較

流体-構造連成問題について数値計算、実験は多数行われているが、その殆どが単独に行われたものである。そのため文献ではいずれかの結果が引用される場合が多く、両者の信頼性を保証した上で、結果を議論した例が見られないのが現状である。本研究では、数値計算結果の信頼性を検証するためのデータを提供することを主眼として、様々な実験に取り組む。数値計算と実験を実施することで、計算上の問題点、実験上の問題点を明らかにできると考えられる。

(3) 研究内容

Fig. 1 は風洞試験の概要図である。出口面積 $A=0.3\times0.3\text{ m}^2$ の風洞装置にシリコンゴム円柱を固定した。円柱の直径は $\phi=20\text{ mm}$ 、長さ $L=160\text{ mm}$ である。シリコンゴム円柱のヤング率で $E=9.0, 12\text{ MPa}$ である。気流速度を上昇させていくと円柱は気流に対して垂直に振動し始める。Fig. 2 は気流速度に対する円柱の変形量を示している。

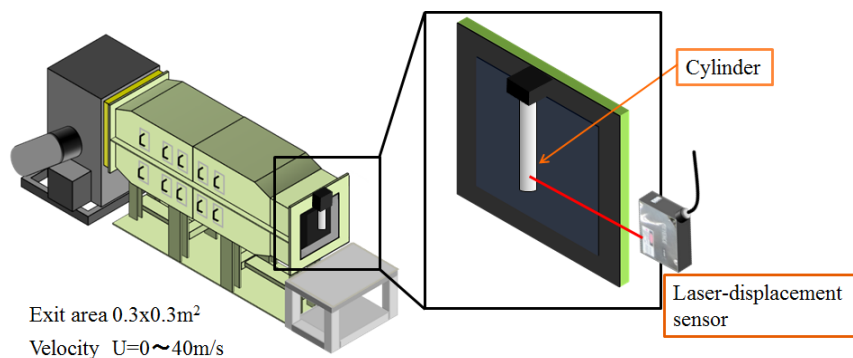


Fig.1. Schematic picture of experimental setup.

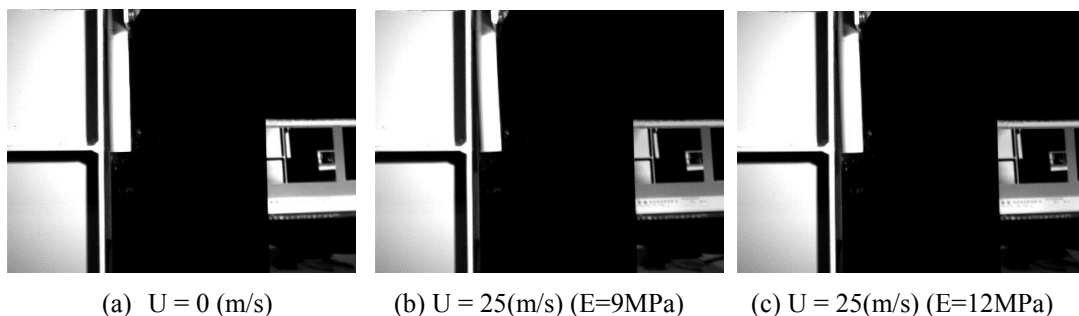


Fig.2. Deformation of cylinder at several flow velocity.

レーザ変位計を用いて、円柱の変位を測定し、FFT 解析により周波数特性を調べた。Fig. 2 はレイノルズ数とストローハル数の関係を示している。円柱は気流に対して垂直に振動しているが、レイノルズ数が上昇するにつれて St 数は緩やかに減少している。これは風速の上昇に伴い、ことが分かる。円柱は $St=0.01$ で振動していることが分かる。

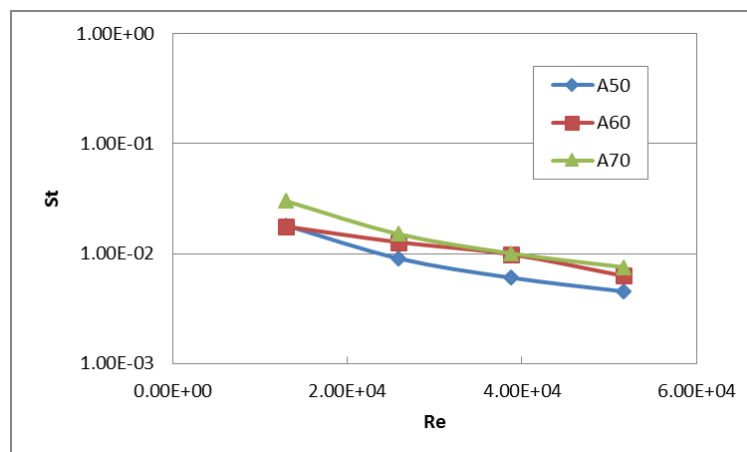


Fig.2. Frequency characteristics of oscillating cylinder.

(4) 平成 27 年度進捗状況

標準問題に関する実験を行い、様々なシリコンゴムの物性値について変形量を測定することができた。数値計算との比較、3次元可視化とのデータ共有を行うためにデータを整理している。

参考文献

- (1) R. D. Blevins: "Flow-induced vibration", Krieger publishing company (1990) .
- (2) R. King and M. J. Prosser and D. J. Johns, On Vortex Excitation of Model Piles in Water, Journal of Sound and Vibration, Vol.29 (2), pp.169-188 (1973) .
- (3) N, Kondo, Three-dimensional computation for flow-induced vibrations in in-line and cross-flow directions of a circular cylinder, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 70, pp.158-185, (2012).

3.3.2. 流体－構造連成解析の検証用風洞実験システムを用いたフラッタ特性の確認実験

(1) 目標・計画

フラッタ特性に関する理論的・実験的研究は、これまで多く行われてきた。しかし、系統的にデータを整理した成果は数少ない。本研究は様々なシート材のフラッタ特性を調べて、材料と流体力学の物理量を関連付けることで、フラッタ開始速度の予測を試みる。

(2) 意義・国際社会との比較

翼のフラッタに関する数値計算は流体－構造連成問題の主要課題の一つである。計算機性能の向上により、予測精度の信頼性は向上している一方で、数値計算結果の妥当性を確認するために参照となる実験データは数少ない。本研究ではフラッタに関する基礎的な実験を行うと共に、

(3) 研究内容

Fig.1 は実験装置の全体図である。風洞装置本体の吹き出し部分にフラッタ装置を設置し、試験片である平板翼模型も同様にフラッタ装置に取り付けた。水平に設置した試験片の変位を上方から測定するために、試験片とレーザ変位計の配置は Fig. 2 の様になっている。試験片はたわみに関して、片端固定、他端自由の状態である。固定端は二枚の板で上下方向から挟み、ボルトによって固定することで構成されている。自由端は自重でたわむ形になっている。翼弦長は 40mm で固定し、翼スパンを変化させ実験を行うこととした。これら翼厚と翼サイズの2つを考慮し、翼厚は 0.3mm から 0.5mm までの間で変化させ、翼スパンを 200mm から 300mm の間で変化させた。

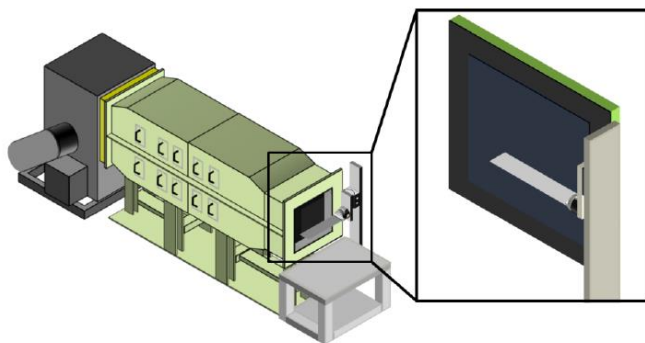


Fig. 1 Experimental setup of wind tunnel.

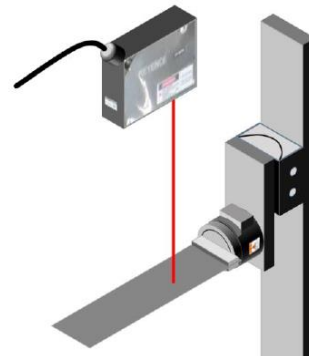


Fig. 2 Laser displacement sensor.

Fig.3 は平板翼模型をスパン、翼厚についてフラッタ開始速度を示した図である。平板翼のスパン長が短いほどフラッタ開始風速が増すことがわかる。また、平板翼の長さが長くなるにつれて、フラッタが発生しやすくなり、どの翼厚でもフラッタ限界風速は単調減少する。翼厚を 0.3mm から 0.5mm に変化させると一様にフラッタ限界風速が増加している。Fig.4 は材質に着目して翼厚

0.3mm, 翼弦長 40mm の平板翼について材質(ヤング率)を変えた実験を行い, スパン長とフラッタ開始速度を整理した結果である. 黄銅は 105 [GPa], アルミニウムは 70.6 [GPa], ステンレスは 205 [GPa]である. ヤング率が増すとフラッタ開始速度は高くなっている. これらの傾向は, 従来のフラッタ試験でも確認ができています.

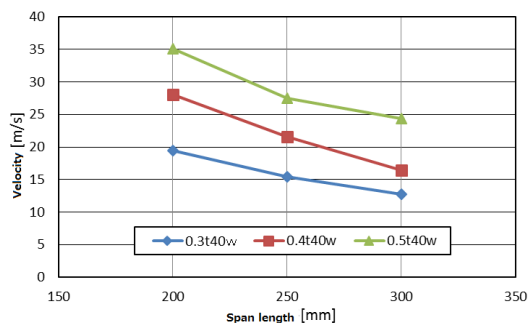


Fig.3. Comparison of flutter velocity
to span length.

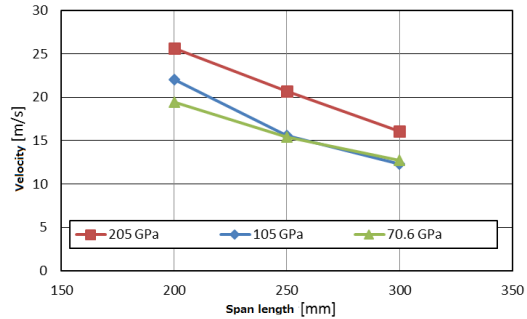


Fig.4. Characteristics of flutter velocity
to Young modulus.

Fig.5 はアルミ材のフラッタ開始速度について系統的に整理した結果である. 縦軸はフラッタ周波数を固有振動数で, 横軸は材料特性を流体特性で無次元化した結果である. アルミ板は概ね固有振動数でフラッタ振動しており, フラッタ開始速度は20~30の範囲内で始まることが判る. この結果は, ここで用いたパラメータで実験結果を整理すると, 横軸の値から材料毎によりフラッタ開始速度が予測できることを意味している. 現在, その他の材料についても実験に取り組んでおり, 同様の整理を試みている.

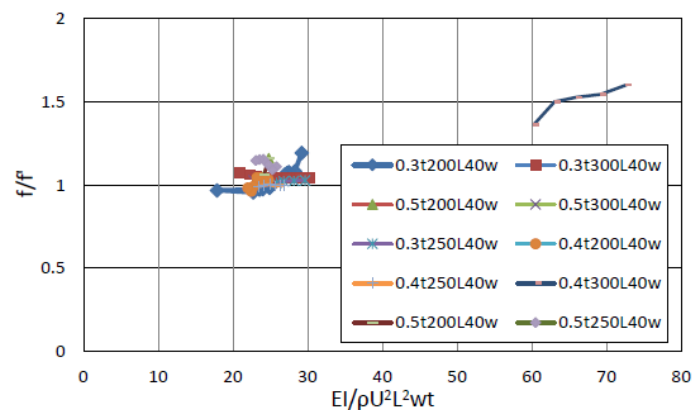


Fig.5. Characteristics of flutter frequency to FSI parameter.

(4) 平成 27 年度進捗状況

平板翼に関する実験を行い, フラッタ開始速度とフラッタ周波数を無次元化して整理した. その結果, 同じ材料であれば形状の違いによらず, フラッタ開始速度を予測できる可能性を示した. 材料特性の違いについても同様の整理を試みている.

参考文献

- (1) Eloy, C., Souilliez, C., Schouveiler, L., "Flutter of a rectangular plate", J. Fluids Struct., 23, 904-919 (2007).
- (2) 山口信行, 伊藤恵介, 緒方正幸, 柔軟ウェブ基礎形態のフラッタ限界とその挙動に関する研究(第 1 報, フラッタ限界の予測と風洞試験結果), 日本機械学会論文集(B 編), 67 巻, 663 号(2001-11), pp. 2738-2745
- (3) 黒川雄太, フラッタを生じる旗に作用する風荷重測定: その 2 重量比およびアスペクト比が風荷重に与える影響(膜構造:風洞,構造 I), 日本建築学会学術講演梗概集, B-1, (2007).
- (4) 伊藤憲一, 剛体と弾性体を用いた翼のフラッタ特性に関する研究(GS 流体力学(流体計測,翼など)), 日本機械学会, 東海支部総会講演会講演論文集,(2009).
- (5) 五十嵐保, 杉山均, 流体力学と伝熱工学のための次元解析活用法, 共立出版, (2013)
- (6) 小松敬治, 日本機械学会宇宙工学部門宇宙工学ガイド機械構造動力学, (2004)

3.3.3. 飛行物体に作用する空気力特性

(1) 目標・計画

運動する物体に作用する空気力特性を把握することは流体－構造連成解析問題の課題の一つである。風洞試験では一定風速で実験が行われることが殆どであるため、定風速下での空気力特性は系統的に整理されているが、加速度運動する物体に作用する空気力特性は調べられていない。そこで、本研究では、加速度運動する物体に作用する空気力を測定し、定速度下における空気力特性と比較することで、加速度運動する際の効果を系統的に整理することを目的としている。2014年度は実験システムの構築を行い、ボールなどの単純形状で実験を行う。2015年度以降はロケット模型に対して作用する空気力特性を調べ、その特徴を明らかにする。

(2) 意義・国際社会との比較

物体に作用する空気力特性を調べる風洞実験、数値計算は多数行われているが、一定速度での解析⁽¹⁾であり、加速度運動時の空気力特性を調べた研究は数少ない^(2,3)。本研究の目的は、加速度運動する物体に作用する空気力を実験的に測定し、その特性を明らかにすることである。研究成果は、航空機や宇宙機を設計する上で、従来とは異なる新機体形状を提案するために活かされるものと考えられる。

(3) 研究内容

物体に作用する空気力や物体周り流れの特性を把握することは、流体力学において主要な研究対象の一つである。ロケット等の空力特性を調べるための実験的研究は、模型を用いた風洞試験が数多く行われている。しかし、風洞試験は一定風速、同一の姿勢で行われるため、そこから把握できるのは定常状態の空力特性である。そのため、ロケットのように非定常運動する物体の空力特性を把握するには、風洞試験に代わる実験を行う必要がある。本研究の目的は、ロケット模型の射出試験を行い、画像解析により非定常運動時の空力特性を調べることである。

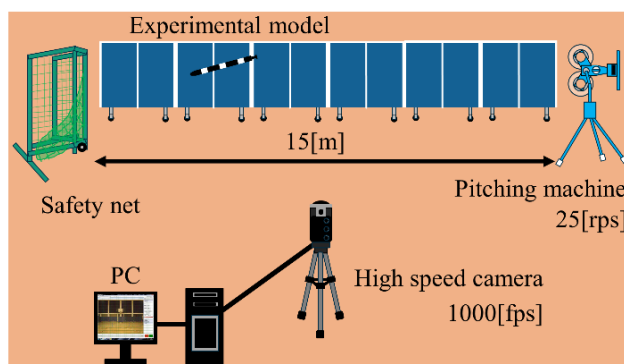


Fig.1. Experimental setup.

Fig.1 は実験の概要を示している。ロケット模型は CAD データを基に 3D プリンタで製作した。画像処理のために、模型の一部を白黒に塗装した。本実験では、日本 JUGS 社のオールラウンドピッチングマシンを使用して、模型を射出した。射出後の動画撮影にはノビテック社の高速度カメラ

Phantom Miro M310 を使用した。動画を画像に分割し、10 フレーム毎に抽出した。画像には歪み補正及び二値化処理を施す。3 点のピクセル座標を抽出し、模型の重心座標や角度の時間変化を調べた。得られたデータを最小二乗法により 4 次関数で近似し、時間微分することで重心位置での速度と加速度、重心回りの角速度と角加速度を求めることができる。画像解析によって求めた物理量を用いて、式(1)から抵抗係数 C_D を求めた。

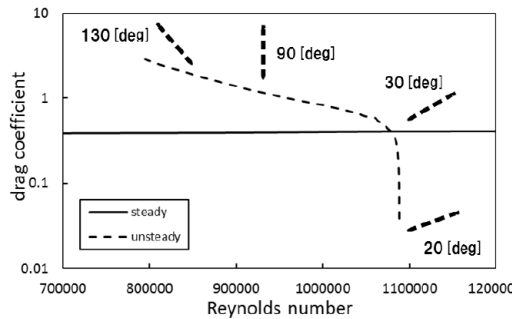


Fig. 2 Drag coefficient to Reynolds number.

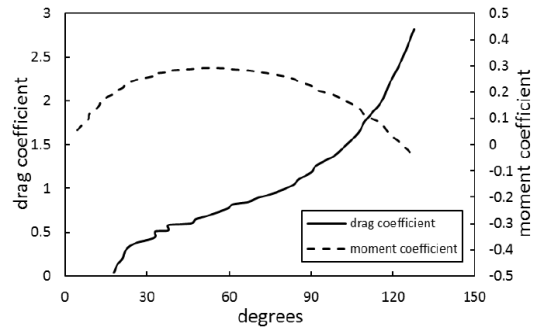


Fig. 3 Drag coefficient and momentum coefficient to pitch angle.

Fig.2 は抵抗係数とレイノルズ数の関係を示している。定常状態の抵抗係数は一定値を取るのに対して、非定常状態では様々な値を示すことが分かる。射出後の模型は投影面積を変化させるため、空気抵抗の作用が大きくなる。よって速度の減少と加速度の負の方向への増大から、抵抗係数は増加の傾向を示す。次に、モーメント係数 C_M を求め、Fig.3 の様に抵抗係数とともにピッチ角度で整理した。模型射出後、20～30[deg]付近では模型のノーズ周りで空気力の影響を強く受けるため、暫くの間加速し、90[deg]を過ぎるとノズル周りで空気力の影響が強くなるため角速度が小さくなると考えられる。このとき空気力を受ける面積が増すため、抵抗係数が増す。

(4) 平成 27 年度進捗状況

非定常状態時の空力係数は速度、加速度、角速度、角加速度などに依存することを確認した。これは、非定常状態時の空力特性を調べる際、従来の風洞試験の様に系統的な整理が出来ないことを示している。現在、新しいデータ整理の試みに取り組んでいる。

参考文献

- 1) 谷口哲也, 宮崎武, 清水鉄也, "硬式野球ボールに働く空気力の測定", ながれ, 25, (2006), pp.257-264.
- 2) 今野友博, 市川誠司, 窪田佳寛, 望月 修, "水中を落下する球の抵抗係数", 日本機械学会論文集(B編), 79 巻 798 号, (2013), pp.151-1.
- 3) T. Nosaki and N. Fujimatsu, Trajectory analysis based on aerodynamic characteristics of baseball with accelerating motion,, J. of Visualization, pp.1-8, (2015).

3.4. 精度・妥当性検証グループ

本グループでは、シミュレーションと実験の精度・妥当性を検証する技術および精度・妥当性を向上させるための技術の研究を行っている。シミュレーションも実験も誤差を含んでおり、精度の検証および改良は重要なテーマである。具体的には、(1)効率的で精度のよい解析技術の研究、(2)最適化の数学的構造の研究、(3)物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式の開発、(4)オープン CAE (固体の有限要素法) を用いた精度検証、などの研究を行っている。一番目のテーマは昨年に引き続き段ボールの解析の研究を行った。本年度は、実験のばらつきを考慮した精度・妥当性の検証に結びつけるため、ベイズ推定を用いた材料定数の設定手法を研究した。その結果、ベイズ推定の有効性を確認できた。また、最適化の理論的研究として、最適化理論の数学的構造の研究を行い、最適化の一般化と自動化に関する研究の端緒とした。材料データベースに関しては、昨年に引き続きデータベースの構築の研究を行っているが、昨年度設計したデータ構造を用いたプロトタイプ構築に着手した。複数の SPARQL エンドポイントを評価し、スケーラビリティには劣るもののオントロジー API などを持ち、セマンティック・ウェブに係るソフトウェア環境である Apache Jena の一環として開発されている Fuseki を今後の拡張性などの観点から採用することとした。オープン CAE を用いた精度検証については、オープン CAE の一例としてフランス電力 (EdF) が開発した Salome-Meca^[1] を取り上げ、引張試験機などユビキタスな試験装置を用いた試験や文献記載の構造モデル試験を例題として、精度検証例の蓄積を進めている。本年度は、最も単純で、材料非線形性と幾何学的非線形性とを同時に考慮する必要がある、延性材料の引張試験^[2] を取り上げた。今後は、接触と摩擦を伴う非線形問題となるスモールパンチ試験^[2] や、非定常熱伝導による熱疲労試験など^[3] 順次、難易度が高いベンチマークに取り組む。

3.4.1. ベイズ推定を用いた効率的精度解析技術の開発

(1) 目標・計画

物流のみならず近年、生活の身近なものとして段ボールは様々な用途で使用される。非常に多くの段ボール製品が社会の中に存在するが故、正確な強度設計が要求されるが段ボールの設計は過去の経験や試行錯誤に依存しており数値解析による設計は浸透していないのが現状である。その原因のひとつに段ボールが異方性特性を有する構造体であり、繊維方向において弾性的性質に依存性があるため材料特性等のパラメータを十分に考慮して取り扱わなければならないことが言える。本研究では異方性材料を解析する際、重要となる材料特性を万能試験による実験値と数値解析より効率良く推定する手法を確立する。また推定した材料特性は実験値と数値解析の不確定性因子を含むため一概に妥当性を保証できるとは言い難い。そのような不確定性の取り扱いについては Model Verification & Validation(V&V)^[1]に示されその中でベイズ推定^[2]が有効であり不確定性の低減が可能であるとされる。そこでベイズ推定を用いて推定した材料特性の妥当性を定量的に評価することを目的とする。

(2) 意義・国際社会との比較

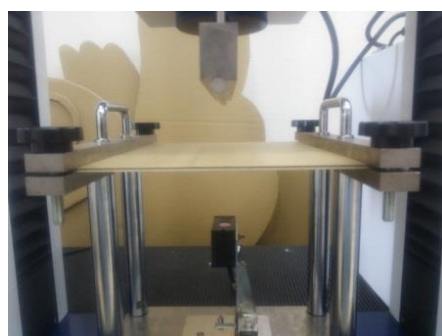
段ボールの用途は近年重要性を増し、リサイクル性の高さからも今後より注目されると期待できる。しかし段ボール構造の数値解析は動的シミュレーションによる設計^[3]、均質化法を用いた研究^[4]等の研究がなされているが一般的な手法は構築されておらず段ボール製品の効率的な生産を行うには精度の良い数値解析手法の開発が必要である。また、解析結果の妥当性・有効性を検証することは工学的視点から考えてみても重要な問題であり、その中でもベイズ統計学に基づいた信頼性評価は機器損傷率、原子力耐震工学等の原子力分野において数多く適応されその有効性が示され世界各国で行われている。本研究で提案した解析手法を有効に用いるためにモデル化、材料特性、境界条件等の潜在的な不確定性を把握し解析結果の妥当性を検証することは非常に意義のあることと言える。

(3) 研究内容

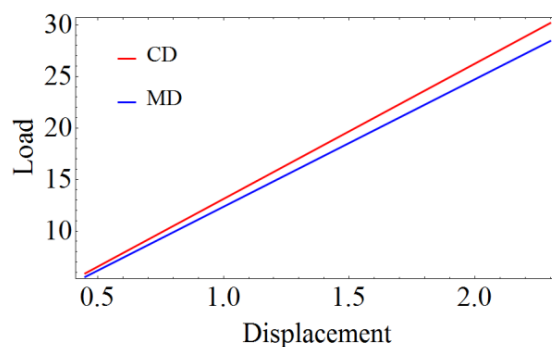
本研究では段ボールの材料特性を推定するため、曲げ強度試験による実験値と数値シミュレーション解析及び両者の結果を繋ぐための実験値と数値シミュレーションの融合から構成される。以下に提案手法による材料特性推定の流れを示す。

曲げ強度試験

段ボールは異方性を有する構造体であり垂直方向(CD)、抄造方向(MD)でそれぞれ弾性的性質が異なる。そこで本研究では実験毎に新たな試験片を使用するものとし図 1.(a)示す試験方法により CD, MD に対してそれぞれ 10 回曲げ強度試験を行った。また、本研究では実験値の線形範囲の一部を議論の対象とし解析を行う。解析範囲の実験値に対し最小二乗法により CD, MD の回帰直線を求めた。図 1.(b)に求めた CD, MD の回帰直線を示す。



(a) Bending test of corrugated cardboard

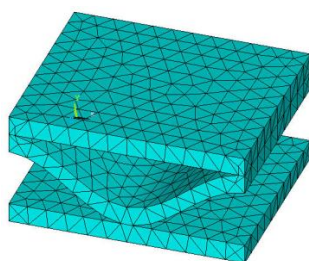


(b) Regression line of CD and MD

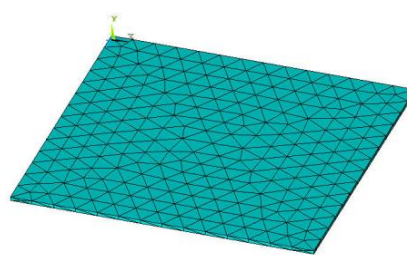
Fig.1. Testing by universal testing machine

均質化解析

段ボールの基礎を構成する段は波状に形成された中芯を 2 枚のライナと呼ばれる原紙で貼り合わせて作成される. 段ボールを元にした製品を対象に数値解析を行う場合, 段ボールを構成する段が非常に密であるためモデル化や境界条件の設定に手間がかかり, 各段に対してメッシュを切らなければならない通常の有限要素解析では離散化が困難であり計算コストと時間を必要とするため実用的ではない. そのような中で段のように周期性な微視構造を有する不均質体を効率よく解く解法として均質化法^[5]がある. 均質化法は単位周期である微視的基本構造単位(ユニットセル)と解析領域全体を対象とする全体構造の異なる 2 つの空間スケールから, 支配方程式を連立して解くことにより微視一巨視連成挙動解析を可能にするものである. 図 2. (a)段をユニットセルとするマイクロモデル, 図 2.(b)曲げ強度試験で用いた試験片を全体構造とするマクロモデルをそれぞれ示し, CD, MD それぞれ均質化法による数値解析を行った.



(a) Macro model



(b) Micro model

Fig.2. Finite element model

材料特性探索の定式化

回帰直線 CD, MD より一意にお決定した荷重から求めた, 変位にフィットするような材料特性の組み合わせをそれぞれ均質化法を用いて探索を行う. F_{20} を回帰直線 CD, MD の一意に決定した荷重 20N とし e_1, e_2 をそれぞれライナと中芯とすると式 1 に示すように定式化できる.

$$\text{im}(F_{20})((e_1, e_2) | e_1, e_2 \in \{1e^3, 2e^3, 3e^3, \dots, 1e^4\}) \quad (1)$$

応答局面モデル

前節による解析結果から CD, MD それぞれ応答曲面を作成し, 図 3 に示す応答曲面の解空間より交点の座標を材料特性の推定値とする.

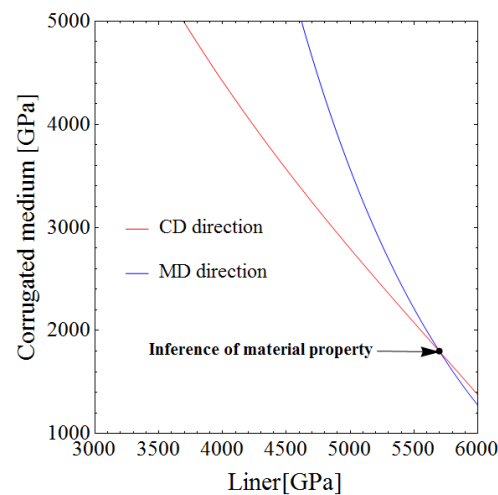


Fig.3. Intersection of coordinate by response surface of CD and MD

材料特性の検証

本研究で求めた材料特性が有効であるか検証を行う. 図 4 は均質化法を用いて線形範囲上の荷重を境界条件とし解析を行い, 回帰直線と比較した結果をそれぞれ示す. 比較結果より回帰直線の変位データを合理的に数値シミュレーションに取り込むことにより材料特性を求めた. したがって, CD, MD それぞれ回帰直線の値と概ね一致しており材料特性の有効性が確認できた.

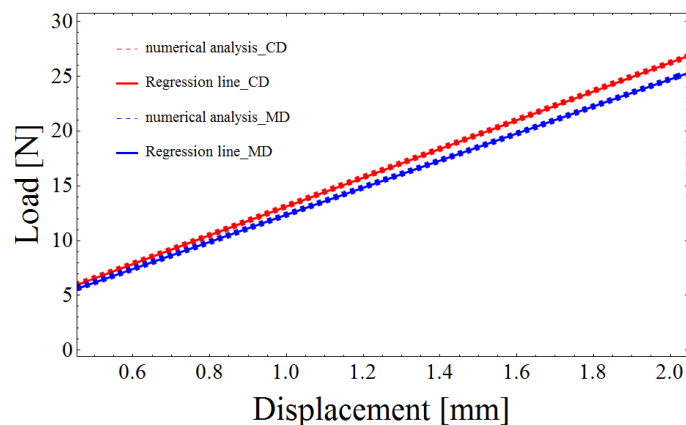


Fig.4. Comparison of numerical analysis and regression line

ベイズ推定による不確定性低減

ベイズ推定により提案手法により推定した材料特性の不確定性低減を図る。ベイズ推定は解析者の予備知識や現在得られている情報を事前分布とすることで事後分布を決定するものであり、ベイズの定理は式(2)に示すことができる。ここでモデルパラメータ θ を CD, MD の応答曲面, データ D を各々の実験値に対して回帰直線を求め, それらの回帰直線において 20N における変位, CD データ 10 個, MD データ 10 個, 計 20 データを用いた。

$$p(\theta|d) \propto f(d|\theta)p(\theta) \quad (2)$$

事前分布の設定

事前分布は解析者の主観的な情報を反省させることができる。本研究では以下に示す事前分布による不確定性低減の比較を行う。Case A では予備知識がない場合すべてのパラメータを一様と見なす一様分布, Case B では過去の経験から明確ではないがモデルパラメータの値の範囲をある程度把握している。よってできる限りモデルパラメータの不確定性に対して, 反映させるようにそれらの情報において工学的検討を行ったガウス分布, Case C では推定したモデルパラメータの値を用いた非常に詳細な情報を反映させた等方性ガウス分布を設定した。

事後分布の比較

図 5 は Case A, B, C の事後分布を示し, また事後分布を定量的に評価するために表 1 に平均と分散の値を示す。図 5 及び表 1 より Case A, B より本研究で用いたデータ数では材料特性の妥当性を保障できるほど不確定性が低減されたとは言いがたく, また Case B では平均値の推定に対し設定した事前分布の影響を受けたと考えられることが原因で設定した事前分布に偏る結果となり, 事前分布の設定に大きく影響を受けたことが示された。Case C ではより正確な事前分布を反省させたことで少ないデータ数においても不確定性を図られたといえる。

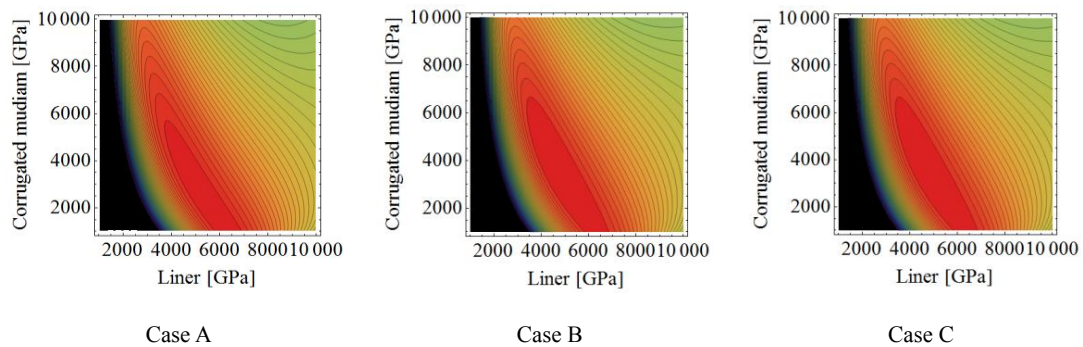


Fig.5. Prior Distribution

Table1. Comparison of average and covariance

		Case A	Case B	Case C
Average	Liner	5494.9	4760.53	5629.13
	Corrugated medium	2211.7	3491.87	2001.32
Covariance	Liner	6892.2	1046.41	2392.13
	Corrugated medium	1607.0	3342.29	5470.91

(4) 平成 27 年進捗状況

今年度は曲げ強度試験の実験値と均質化法による数値シミュレーションより応答曲面を用いて段ボールの材料特性を推定しベイズ推定による精度妥当性を検証した。本研究で示したベイズ推定では不確定性を十分に考慮できておらず、より高度な議論を行うために正確に不確定性を把握し反映させることが今後の課題である。

参考文献

- [1] Alvin, K. F., et al. "Uncertainty quantification in computational structural dynamics: a new paradigm for model validation." Society for Experimental Mechanics Inc, 16th International Model Analysis Conference. Vol 2. 1998.
- [2] 渡辺澄夫: ベイズ推定の理論と方法, コロナ社, 2012
- [3] 中川幸臣, 丹羽一邦, "包装設計の FEM 解析における段ボールのモデル化の検討", 日本包装紙学会誌, Vol.14, pp.317-327, 2005.
- [4] 立体紙製品の構造物に関する研究, 独立行政法人 産業技術研究所.
- [5] 寺田賢二郎, 弓削康平, 菊池昇, "均質化法を用いた複合材料の弾塑性解析 第一報 定式化", 日本機械学会集 A 編, 61(590), pp.2199-2205.

3.4.2. 最適化の代数的構造の研究

(1) 目標・計画

工学における最適化, すなわち不確実性の下での多峰性目的関数の最小化・最大化の, 代数的構造を明らかにする事が目的である.

(2) 意義・国際社会との比較

我々の研究の完成は, 「人の幸福とはなにか?」という難問に代数的側面から回答を与えることを意味する. 工学における最適化(以下, 工学最適化)はベイズ決定の枠組みをつかって良く表現することができるが, このベイズ決定はジェレミ・ベンサムから始まる功利主義の改良バージョン(不確実性に対応)と言える. 功利主義においては, 人々の幸福が大きくなるよう最適化された政策が良い政策である.

(3) 研究内容

最適化プログラムは階乗を求めるプログラムで喩えることができる. 引数の階乗を返すプログラム fac は,

$$\begin{aligned}\text{fac}(0) &:= 1 \\ \text{fac}(x) &:= x * \text{fac}(x - 1)\end{aligned}$$

と定義でき, たとえば $\text{fac}(3) = 6$ である. この 6 を fac の不動点と呼ぶ. この不動点を最適値にたとえれば, 大域的最適化とは複数の不動点を推定しつつ, 更にそれらの中から最も良い不動点を推定するプロセスに他ならない.

プログラミングにおける例外や副作用などの概念は普遍代数(cf. [Adámek et al. 10])や余代数(cf. [Rutten 00])を用いて表すことが出来る. たとえば[Moggi 91]のような普遍代数の文脈では, 例外と副作用はそれぞれ $TA = A + E$ および $TA = (S \times A)^S$ となる. また, interactive output と nondeterminism のモナドを組み合わせた $TA = \mu X. \mathcal{P}(A + (Act \times X))$ によって並列計算を表すこともできる[Benton et al. 02].

工学最適化とはこの並列計算のモナドに近い. なぜなら最適化プログラムは目的関数(物理実験や FEM)というシステムとインタラクティブにやり取りし(interactive output), また多峰性目的関数の最適化中はどの不動点が大域解なのか明らかではない(nondeterminism)ためである.

(4) 平成 27 年度進捗状況

確率的遷移システム[Larsen & Skou 91] [de Vink & Rutten 99]を工学最適化における目的関数と仮定し、そのシステム(余代数)をベイズ決定[Culbertson & Sturtz 14]の枠組みで最適化するシステムの代数的性質を調査した。

参考文献

- [Adámek et al. 10] Adámek, Jiří, Jiří Rosický, and Enrico Maria Vitale. "Algebraic theories: a categorical introduction to general algebra." Cambridge University Press, 2010.
- [Benton et al. 02] Benton, Nick, John Hughes, and Eugenio Moggi. "Monads and effects." *Applied Semantics*. Springer Berlin Heidelberg, 2002. 42-122.
- [Culbertson & Sturtz 14] Culbertson, Jared, and Kirk Sturtz. "A categorical foundation for Bayesian probability." *Applied Categorical Structures* 22.4 (2014): 647-662.
- [de Vink & Rutten 99] de Vink, Erik P., and Jan JMM Rutten. "Bisimulation for probabilistic transition systems: a coalgebraic approach." *Theoretical Computer Science* 221.1 (1999): 271-293.
- [Larsen & Skou 91] Larsen, Kim G., and Arne Skou. "Bisimulation through probabilistic testing." *Information and computation* 94 (1991): 1-28.
- [Moggi 91] Moggi, Eugenio. "Notions of computation and monads." *Information and computation* 93.1 (1991): 55-92.
- [Rutten 00] Rutten, Jan JMM. "Universal coalgebra: a theory of systems." *Theoretical computer science* 249.1 (2000): 3-80.

3.4.3. 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式の開発

(1) 目標・計画

数値シミュレーションのために基本的な物性値は必須のものであるが、材料の物性値を収めたデータベースにおけるデータ表現は統一されておらず、多くの材料データベースがインターネット上に存在する現在でも、必要なデータは事実上手作業で値を入力する必要がある。本研究では、材料データの標準データ交換形式を開発し、数値シミュレーションのシステムと物性データベースの連携を行うことを目的とする。

(2) 意義・国際社会との比較

材料物性に関するデータベースは各所で開発されているが、統一されたフォーマットは無く、NIST, NIMS などによってデータ交換のための標準を作成する試みが行われてきたが現在のところ定まった標準がない。データ交換のためのフォーマットが統一されることにより、分散したデータベースの統合利用に加え、シミュレーションソフトウェアなどからデータベースを直接参照できるようになる。

米国において始まったマテリアルズ・ゲノム・イニシアティブの影響を受け、2014 年から我が国においてもマテリアルズ・インフォマティクスに関連する研究プロジェクトが注目され、いくつかの国内プロジェクト、基盤整備が始まった。芦野はこのうちの一つである戦略イノベーションプログラム・革新的構造材料のマテリアルズインテグレーション(MI)に分担者として 2014 年度より参画している。MI の最初の目標は構造材料溶接部の特性評価のための統合システム開発であり、この中でセマンティック・ウェブ技術を用いた経験式などの数式・データ・シミュレーションを連携させるためのデータ構造開発を行っている。

海外でのマテリアルズ・インフォマティクス研究では機能性材料、Ni 基耐熱超合金、鋳造シミュレーションなどが主たる対象であり、構造材料、特に鉄鋼材料の溶接部はマイクロ組織も複雑であり計算による物性の推定が困難であることもあって対象となっていない。我が国では産業界での必要性などからあえて困難な対象を選んで研究対象とすることとなった。また EU では、Horizon 2020 プログラムの一環として原子炉材料の金属疲労について研究する INCEFA PLUS(INcreasing Safety in NPPs by Covering gaps in Environmental Fatigue Assessment)に関連して、疲労の試験データフォーマット標準化を検討するワークショップ CEN/WS INCEFA を 2016 年 1 月に立ち上げるとの案内を受け、参加を予定している。

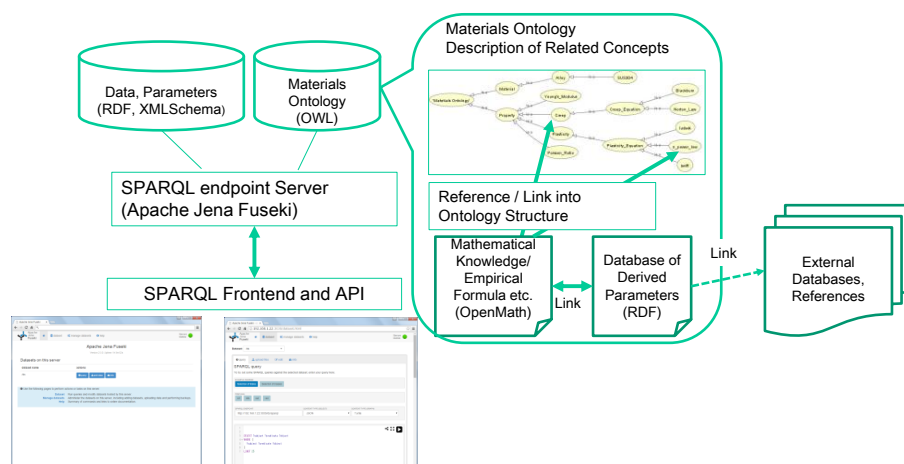
(3) 研究内容

セマンティック・ウェブの一連の規格である RDF (Resource Description Framework), OWL (Web Ontology Language) , RIF (Rule Interchange Format), および数式の意味内容を記述する OpenMath など XML を用いた記法を用い、既にある程度知見の整備されている機械試験に関連した経験式、推論規則、データを記述してリンクし、検索言語 SPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language)を用いて検索する。

溶接の計算機支援は従来から溶接学会などにおいて多くの研究があるが、本研究では単一の知識ベース、あるいは計算ソフトではなく、それぞれの要素をリンクして相互参照できるようにし、ユーザや研究者のノウハウや知識を集合知として連携してゆくことのできる構造を目指す。

(4) 平成 27 年度進捗状況

戦略イノベーションプログラムの一環として昨年度設計したデータ構造を用いたプロトタイプ構築に着手した。複数の SPARQL エンドポイントを評価し、スケーラビリティには劣るもののオントロジー API などを持ち、セマンティック・ウェブに係るソフトウェア環境である Apache Jena の一環として開



発されている Fuseki を今後の拡張性などの観点から採用することとした。

Prototype data structure for SIP data system.

サンプルデータとしては、クリープ・材料強度などに関する代表的な構成方程式と材料毎に作られたパラメータセットを RDF および OpenMath 形式で保存し、SPARQL により検索することが出来ることを確認した。また、溶接の際の冷却時における相変態を示す CCT 線図、TTT 線図を組成から予測するためのプログラムについてこれらのデータ標記形式を用いた記述についての検討を行った。

3.4.4. オープン CAE(固体の有限要素法)を用いた精度検証

(1) 目標・計画

製造業の設計現場をはじめとして広く用いられている固体の有限要素解析に対する「解析の品質確保」の重要性は広く認識されている通りである。企業でよく使用されている商用ソルバでは、ソルバ開発元によるソフトウェア品質管理とユーザ支援によってある程度の品質確保が図られており、ソースコードの秘匿化により、ユーザ自身がアルゴリズムを確認することはあまりない。近年、利用が広がりつつあるオープン CAE の場合は、ソースコードが公開されているためユーザ自身が確認、改変ができる一方で、ソフトウェア品質とユーザ技量の両方の検証がユーザに委ねられるため、V&V における新たな課題が提起されている。ただし、ソースコードが公開され、無償であることからアクセス性が高く、オープン CAE が商用ソルバよりも社会的受容性に優れている側面もある。

本研究では、固体の有限要素解析に対する精度検証の方法と事例を蓄積し、公開する上で、商用ソルバと並んでオープン CAE を取り上げることで、より幅広いユーザが自ら取り組み得る V&V 活動の実例として提示する。

(2) 意義・国際社会との比較

誰もがアクセスできるオープン CAE を取り上げることで、市民的目線での検証が可能になり、精度検証の客観性、計算力学に対する社会的受容性が高まる。安価な検証手段を提示することで新興国や小規模企業での普及にも貢献し得る。また、形状モデルデータや可視化ツールを製品開発・製造のための共通プラットフォームとしての利用が可能であることから、ものづくりのグローバル化に寄与する。ユーザ自身に対して高い技術力を要求することから、意欲のあるユーザの自己研さん(結果的に解析の品質確保につながる)のための利用でも有利になる。

(3) 研究内容

オープン CAE の一例としてフランス電力(EdF)が開発した Salome-Meca^[1] を取り上げ、引張試験機などユビキタスな試験装置を用いた試験や文献記載の構造モデル試験を例題として、精度検証例の蓄積を進める。本年度は、最も単純で、材料非線形性と幾何学的非線形性とを同時に考慮する必要がある、延性材料の引張試験^[2] を取り上げた。今後は、接触と摩擦を伴う非線形問題となるスモールパンチ試験^[2] や、非定常熱伝導による熱疲労試験など^[3] 順次、難易度が高いベンチマークに取り組む。

(4) 平成 27 年度進捗状況

(a) 解析対象

試験データとして文献^[2]記載の低合金鋼 2.25Cr-1Mo 鋼の室温引張試験データを取り上げた。解析対象は図 1 に示す平行部直径 10 mm, ひずみ計測部長さ 50 mm の標準引張試験片である。品質管理の目的で行われる通常の引張試験では, 0.2%耐力を決定できる程度までは低速度で引張り, その後は伸び計を外して, 引張速度を高めて破断させるが, この試験では最大荷重到達以降まで同一速度 0.2 mm/min で引張り, 伸び計測を行っているため, 破断前後の挙動を含めて検証が可能になっている。

(b) 解析方法

解析にはオープン CAE システム, Salome-Meca 2013.2 に内包されたソルバ Code_Aster Ver. 11^[1]を使用した。他のソルバとの比較を容易にするため, 解析モデルや方法をできるだけ単純化している。解析モデルは図 1 の平行部を取り出し, 図 2 の 1/4 軸対称モデルとした。ただし, くびれを生じやすい半径の 1/1000 だけ片側を小さくする初期不整を導入している。

要素分割は, 図 2 のように正方形均等分割とし, 要素分割のノウハウに起因する差異を排除した。下端(試験片の中央部)は軸方向変位固定(Code_Aster のキーワードでは DDL_IMPO), 上端(変位計測部末端)は軸方向変位従属(同, LIAISON_UNIF)とし, 1 点を変位制御で引っ張った。時間増分の影響を排除するため, 最大変位 10 mm までを均等 100 ステップ分割とした。商用ソルバでデフォルト値としてよく用いられる 0.1 では, 数値誤差によるくびれ位置の不整合が生じたため, 収束判定は厳しめにし, 相対残差力 100 万分の 1 以下に設定した。

材料特性の設定の設定にあたっては以下に 2 通りを想定した。市販の商用ソルバのいくつかで, マニュアル上は, Cauchy の応力で応力を定義する旨の記載があり, その記述から判断すると真応力が用いられているように読み取られる恐れがあるが, 剛性行列の生成に用いる変位-ひずみ行列(B Matrix)を解析ステップごとに更新する大変形解析では確かに真応力と真ひずみとが計算されるが, 更新しない微小変形解析では, 特別なデータ変換を行わない限り, 応力-ひずみ行列(D Matrix)で使用する関係に無関係に公称応力と公称ひずみが計算されることになる。ソースコードが確認できない商用ソルバでは, マニュアルの記述から推定せざるを得ないことから特に注意を要する。

ここでは, 引張試験データから最大荷重点より以前のデータをそのまま用いる公称応力-公称ひずみ曲線(nominal stress-strain curve)を作成し, 解析にあたっては, 最大荷重点よりも高ひずみ側は応力を一定(すなわち加工硬化係数がゼロ)とした。作成した曲線を試験データと比較して図 3 に示す。

大変形解析用の真応力-真ひずみ曲線(true stress-strain curve)には, 上記の最大荷重点よりも低ひずみ側の塑性ひずみデータをベキ乗則(Ramberg-Osgood 則)で近似し, 高ひずみ側は同則をそのまま外挿して用いることとした. 両社の比較は図 3 に示す.

解析ケースとしては, 微小変形解析(Code_Aster のキーワードでは PETIT)と大変形解析(同, SIMO_MIEHE)を行い, 両方で 2 つの応力-ひずみ曲線を用いることで 4 ケースを取り上げた.

(c) 解析結果

解析の結果得られた変形状態を図 4 に, 相当塑性ひずみのカラーコンターとともに示す. 典型的なくびれ形状が再現できていることが確認できる. 解析の結果得られた変位と変位制御エッジの荷重反力とから, 試験データと比較可能なみかけの公称応力-公称ひずみ曲線を算出して, 試験データと比較して図 5 に示す.

図 5 から, (b)にて指摘した通り, 微小変形解析(PETIT)を行う場合は, たとえ D マトリックスで Cauchy 応力を前提としていても, 公称応力-公称ひずみ曲線(Nominal SS Curve)を用いることで試験と整合する結果が得られることが確認された. また, この方法でも最大荷重を精度よく推定できる. 大変形解析(SIMO_MIEHE)を行う場合は, 真応力-真ひずみ曲線(True SS Curve)を用いることで, くびれ発生後を含めて試験と整合する結果が得られた.

マニュアルの記載を根拠に, 微小変形解析であっても真応力-真ひずみ曲線を用いると, 試験よりも高めの応力を算出するだけでなく, 最大荷重が推定できないことになる.

(d) 解析結果のまとめ

もっとも単純な非線形問題として延性材料の引張試験を取り上げたが, 応力-ひずみ曲線の決定方法や収束判定等において解析の品質を維持するためのノウハウが周知されていない部分があり, 微小変形解析を行う場合は公称応力-公称ひずみ曲線を用い, 大変形解析を行う場合は真応力-真ひずみ曲線を用いるべきことが, 本オープン CAE ソルバ, Code_Aster でも同様であることを確認した. 今後はスモールパンチ試験や非定常熱伝導-熱応力解析に対しても同様な検証を進める.

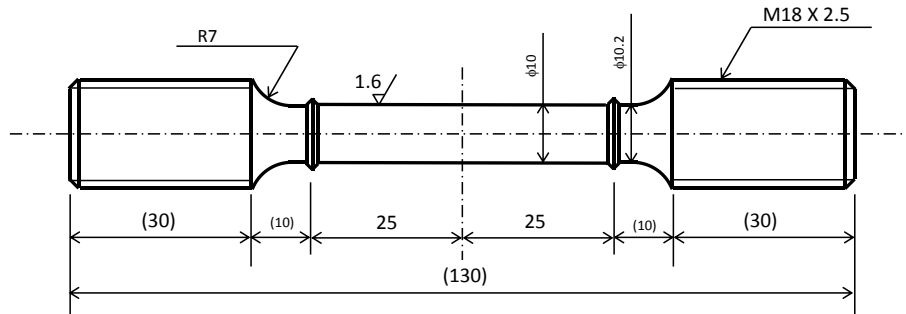


Fig.1. Dimensions of the tensile test specimen analyzed

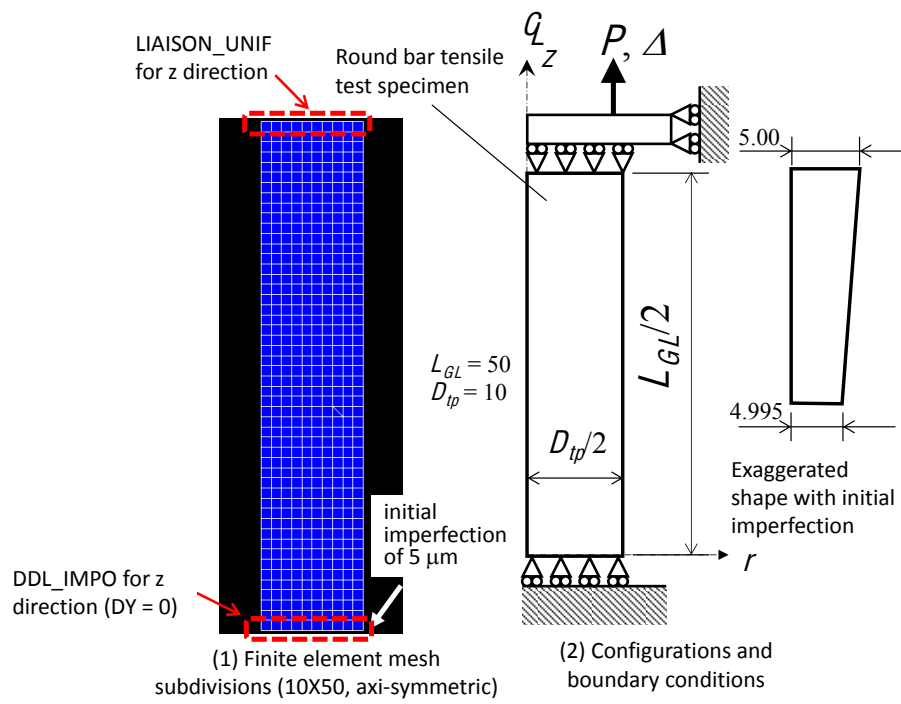


Fig.2. Analytical model of the tensile test specimen with initial imperfection

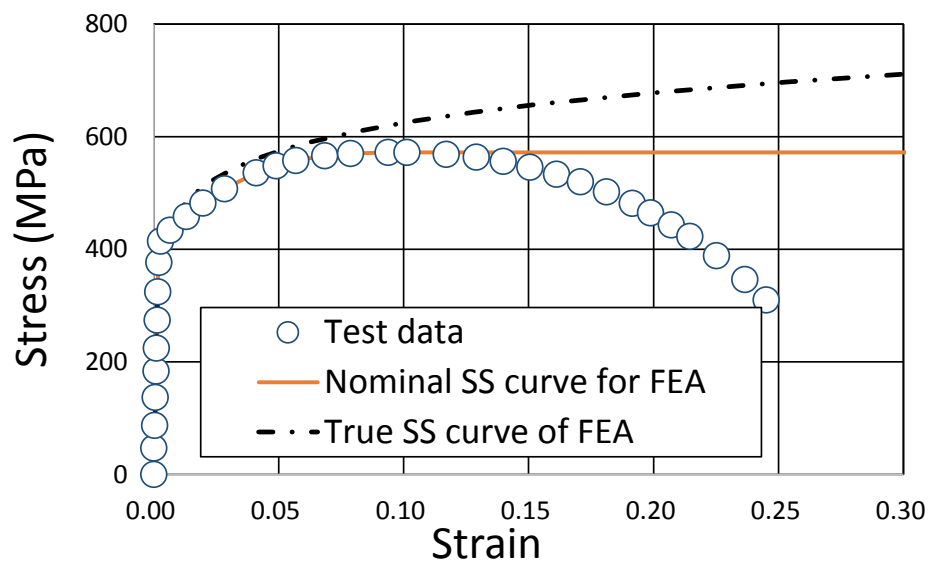


Fig.3. Non-linear stress-strain curves used in the analysis compared with the test data

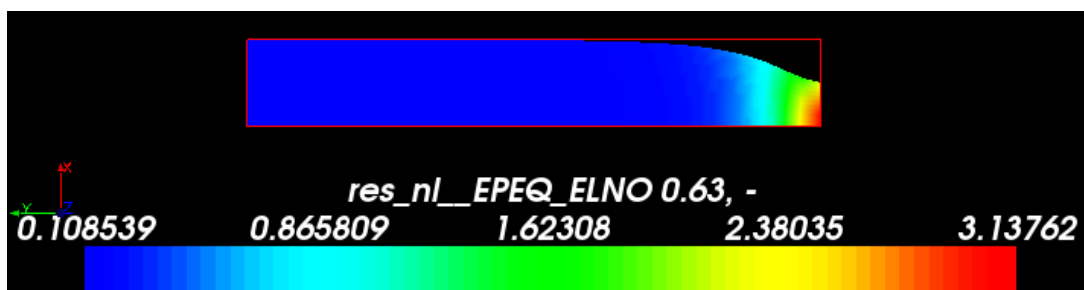


Fig.4. Deformed shape and equivalent plastic strain distribution at the increment producing 25% of nominal strain

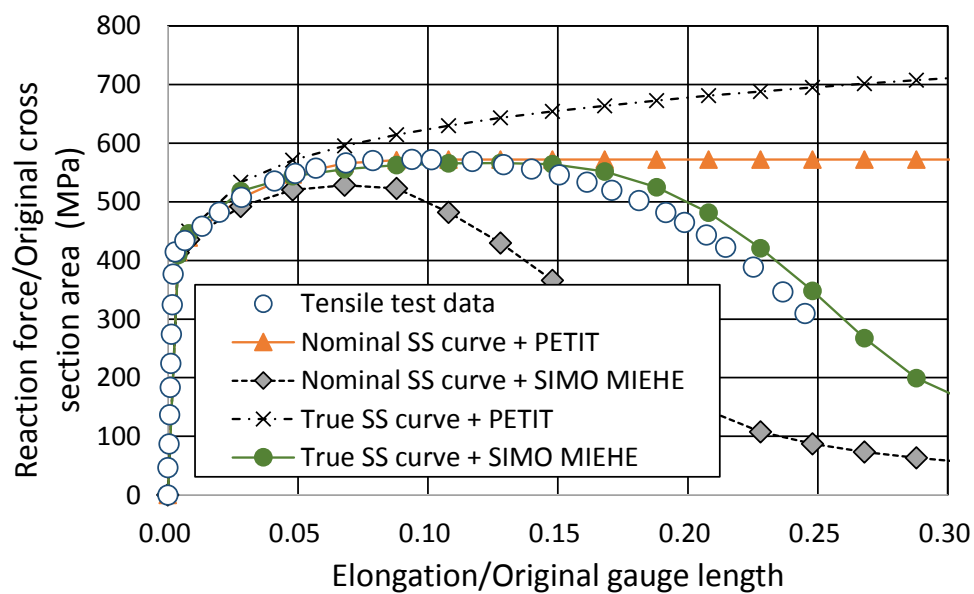


Fig.5. Nominal stress-strain curves obtained in the analyses compared with the test data

参考文献

- [1] EdF, Code-Aster.org, <http://www.code-aster.org/> (2016 年 1 月 25 日閲覧)
- [2] 藤岡, 他 3 名, 2.25Cr-1Mo 鋼 (STBA24) の室温スモールパンチ試験の再現解析とスモールパンチクリープ試験データの解釈 (荷重-応力換算) への応用, 第 61 学術講演会講演論文集, 77-78, 2012-05-25.
- [3] CSNI Integrity and Ageing Workd Group, FAT3D- An OECD/NEA Benchmark on Thermal Fatigue in Fuilid Mixing Areas, NEA/CSNI/R(2005)2, 2005. (http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/037/44037852.pdf) (2016 年 1 月 25 日閲覧)

3.5. 可視化検証グループ

本プロジェクトでは、流体-構造連成解析の品質保証に特に重点を置いてでも、

- ・解析結果を正しく理解し、評価すること
- ・実験結果等と公正な比較を行うこと

は重要な要素であると考えられる。そのためには、可視化は必須である。特に、連成解析は現象が複雑であり、限られた数値データのみでこれを評価することは困難である。実験における可視化技術やその応用は実験による検証の項目に譲り、ここでは、解析結果の可視化および、比較のための実験の可視化結果の表示を中心に研究を行う。解析は、当面簡単のため2次元および3次元でもそれほど3次元性が強くない問題を対象とするが、そうであっても特に流れ場は3次元であり、また今後のより一般的な問題に対応するためにも、3次元の可視化が本質である。そこで、ここでは連成解析において3次元データを如何に可視化するかを中心に研究を進める。1つは以下に述べるような立体視あるいは VR (バーチャルリアリティ)を用いた可視化であるが、これに限らず、3次元データの可視化方法を検討していく。

3.5.1. 3次元画像による定量的・定性的検証

(1) 目標・計画

本研究の目標は、流体構造連成問題について、数値解析の精度検証を支援するための、画像による定量評価、定性評価の手法やシステムを開発し、本プロジェクトで開発される連成解析手法の評価に供することである。特に、バーチャルリアリティ(VR)技術を利用した3次元可視化システムを中心に3次元画像による可視化評価を中心に研究を進める。

大きな計画としては、

平成24年度：

表示装置となるVR装置の導入を行い、ハードウェアの準備を行う。

平成25年度：

VR装置の上でソフトウェアを開発し、PCクラスタと結合してこの上での解析結果の表示を行う。

平成26年度：

画像による検証に利用するための可視化システムをVR装置上で開発する。

平成27年度：

積極的に可視化による比較・検証を行う。特に、(立体)画像を用い、実験と解析の可視化画像を重ねたり、並べたりして効果的な比較・検証方法について検討する。

平成28年度：

研究をまとめ、その公開方法について検討する。

としている。これらにより、従来とは異なる、多彩な可視化により、直感的・効果的な比較・検証が可能となり、開発される連成解析手法をより多面的に評価できると考える。

(2) 意義・国際社会との比較

連成解析は、複数の物理が関連するため、その妥当性の評価は単一の物理に対する解析よりも難しい。ここでは、流体—構造連成を中心に研究を行っているが、流体・構造それぞれ単独で妥当性を示すことができて、それらを組み合わせただけで連成問題が正しく解けるということでは必ずしもない。2つの物理をやり取りするものがあり、それが正しく評価されているかが、重要であるが、実験的に測定できるもの、できないもの等あり、単純ではない。ここでは、可視化、特に3次元画像を利用することで、実験と解析を出来る限り直接的に比較することを考えており、流体—構造連成解析の精度検証・妥当性検証のテンプレートとなることを期待している。

国際的に見ると、連成解析は計算力学における重要な研究テーマの1つであるが、必ずしも検証については進んでおらず、信頼できるとされる過去の解析例と比較したり、パラメータスタディによって、実験で見られる現象と、解析で得られる現象の範囲が等しい(あるいは近い)といったことを示すにとどまっている場合がほとんどである。連成解析手法を評価する手法の1つとして3次元画像を用いる方法は、ほとんど例がなく、その成果は重要なものとなると考える。

(3) 研究内容

本研究の中心となる装置は、図 1 の 2 面没入型ディスプレイ装置である。大きさは正面のスクリーンが $2.8 \times 2.1\text{m}$ 、下のスクリーンが同じく $2.8 \times 2.1\text{m}$ でここに2台のプロジェクターにより、それぞれ 1400×1050 の解像度の画像を表示する。画像は時分割方式で立体映像を投影できるようになっており、液晶シャッター眼鏡によって立体映像を観察する。立体映像は 3 台のグラフィックスワークステーションで生成する。1 台はマスタで、あとの2台が正面と下面の映像を担当する。これとは別に観察者や観察者が持つコントローラの位置を赤外線カメラで取得するシステムがあり、1 台のトラッキングワークステーションで制御する。グラフィックスワークステーションのマスタはトラッキングワークステーションから逐次データを取得して観察者(やコントローラ)の位置を計算する。

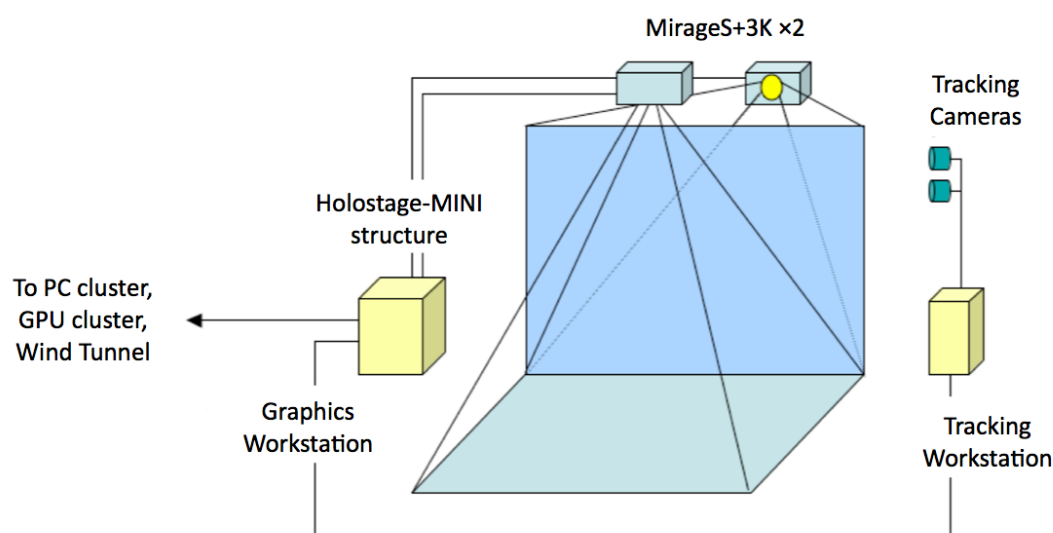


Fig.1. Hardware configuration

このシステムに、流体—構造連成の 3 次元画像を表示する。表示する画像は大きく分けると、実験の画像と解析の画像の 2 種類である。これらを同時に、あるいは交互に表示することで直接的な比較を行う。

実験の画像については、物体の変位等、直接得られるものから、PIV で可視化した流れの速度分布や PSP(感圧塗料)で可視化した物体面上の圧力分布、画像解析により得られる応力分布等が考えられる。これらを得ることは、実験班の研究に委ねられるが、その3次元化や、本装置での表示にはデータの転送等も含めてさまざまな検討と技術的課題の克服が必要である。

解析結果については、単独の物理に基づく解析では多くの知識と経験があるものの、連成問題については、それぞれの物理に関する量を可視化表示するにとどまっており、まずは何を可視化することで連成解析の精度や妥当性評価につながるかの検討が重要となる。そのため、まず、さまざまな物理量の 3 次元可視化を可能とするシステムを開発する。解析は大規模となることが前提なので、そのデータをどのように転送し、また可視化するかも課題となる。

次に、実験と解析の比較である。たとえば、視点・スケールを合わせて交互に表示する／重ねて表示する、などが考えられるが、それには時間的・空間的な位置合わせ等、技術的な課題が多くある。また、必ずしも同じ量を表示できる訳ではないので、何を見るか、比べるかも問題となる。また、実験については、取得した画像(動画)をそのまま見るのか、あるいはデータを抽出して、解析結果と同じように CG で表示するのかといったアプローチもありうる。これらについても時間をかけて検討し、システムを構築することで新しい可視化法・評価法につなげたい。

最終的には、システム化できるところはまとめたい。実験データも、標準的で精度の高いものが得られれば、標準問題として公開したいが、その際に3次元画像もその1つとできればよいと考えている。

(4) 平成 27 年度進捗状況

平成 27 年度の目標は、上記に述べた通り、実際に本システムで可視化による比較・検証を行うことである。先に完成した図 2 のシステムにおいて、Adventure Fluid や Adventure Solid などの Adv I/O 形式で出力されたデータについては、Adventure で示されたデータファイルを直接 AVS-MPE が読み込み、Holostage-MINI に表示する。一方、実験の画像については、図2の Exp. (Image)のデータ(基本的には動画ファイル)を Data conversion のところで連番の静止画ファイルに分割し、AVS-MPE に渡す。昨年度はあくまで仮のデータでこの動作を確認しただけであったが、今年度は実際に連成手法解析グループと新規実験計測グループが行った、連成解析の標準問題のデータを用いて可視化を行っている。

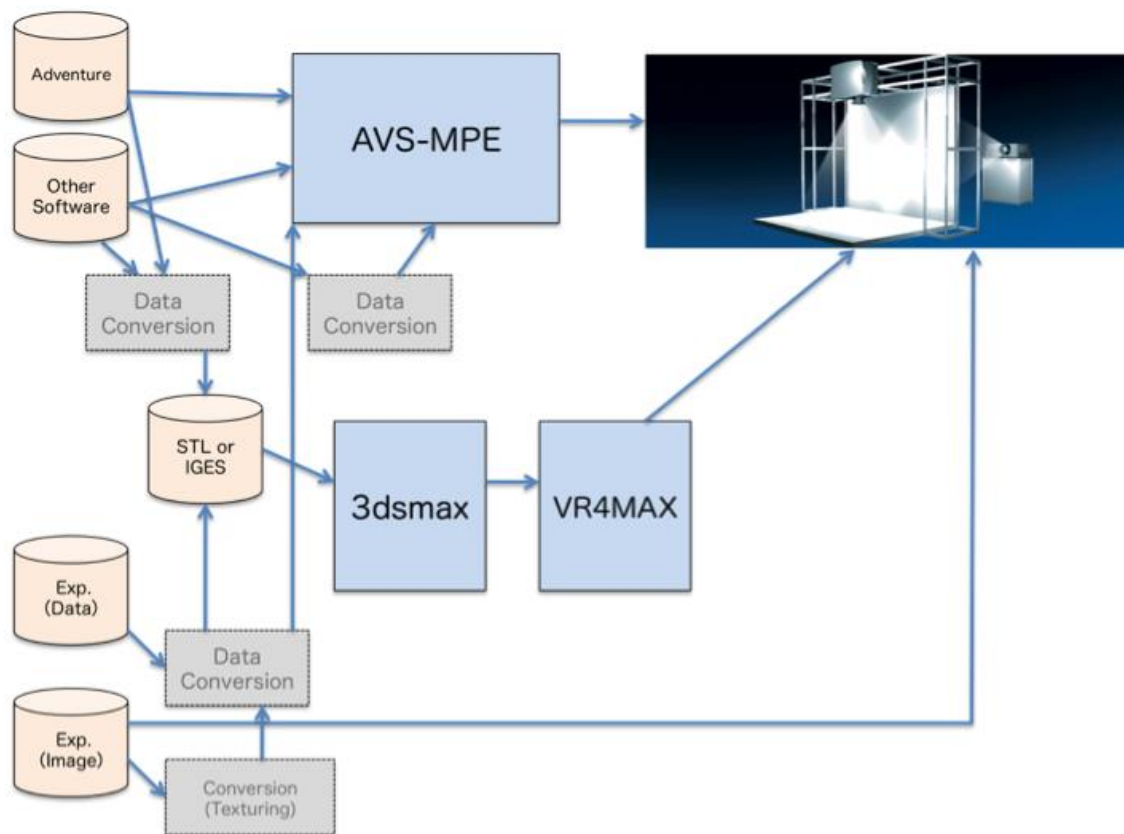


Fig.2. Visualization system

細かい操作手順を記すことは本報の目的ではないので、ここでは行っていることの概要のみ示す。詳細は、「可視化システム操作手順書(仮)」として次年度に完成させる予定である。

図 3 は可視化の仕組みを示すネットワークエディタである。ここにはいくつかのモジュールが示されており、それぞれのモジュールが可視化においてなんらかのまとまった役割を果たしている。実際にはここにあるモジュールのいくつかはさらに複数のモジュールからできている。これらのモジュールを変えたり、あるいはモジュールのパラメータを変えることで表示内容を変更できる。まず、計算結果の読み込みは、流体と構造の 2 つがあることから、複数のデータを同期を取って読み込めるようモジュールを追加・変更している(図 4)。

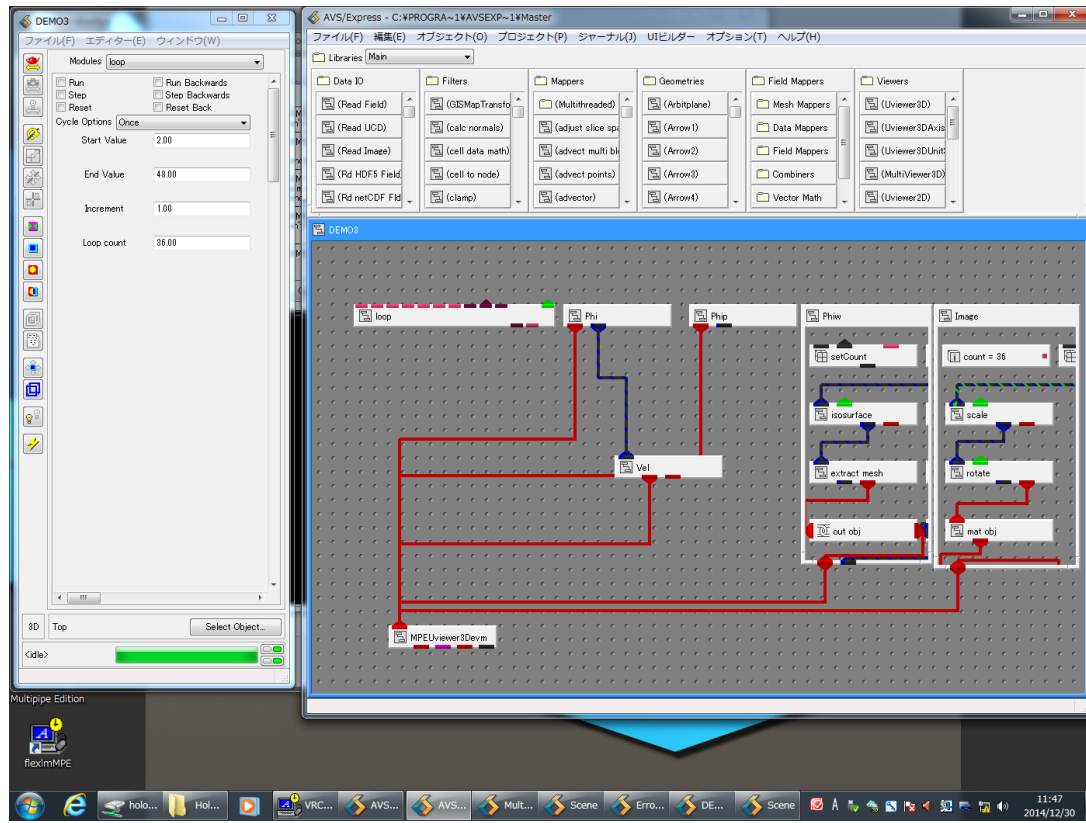


Fig. 3 AVS network editor for simultaneous visualization of experimental and computational results

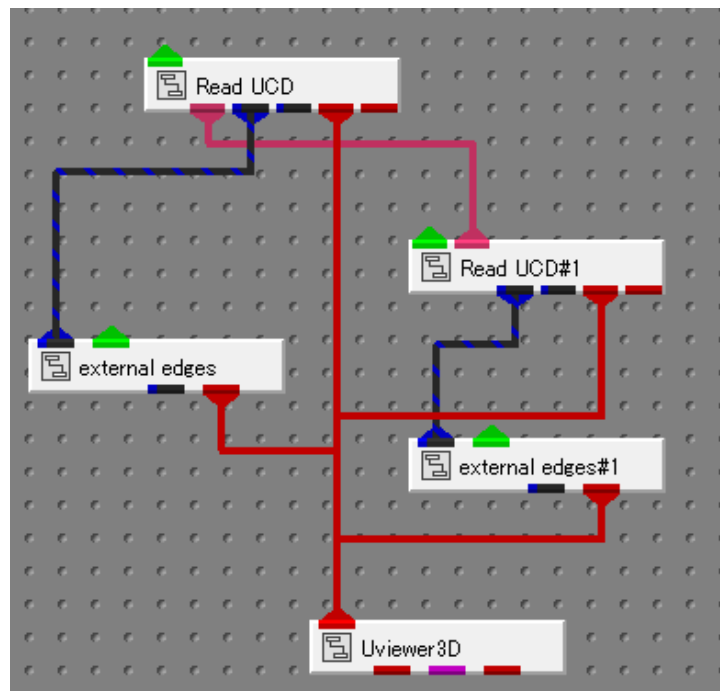


Fig. 4. The way of two “Read UCD” modules synchronizing

実験画像については、いまのところ 2 次元(立体映像ではない)なので、昨年度に作ったものをそのまま用いることができる。

今年度は、これらのデータを、

- (a) 並べて表示する。
- (b) 重ねて表示する。

の 2 つについて比較・検証を行った。まず、並べるにしても、重ねるにしても、それぞれのデータの大きさに違いがあるため、正確な縮尺と位置合わせが必要になる。そこで、計算結果、実験結果のそれぞれのスケーリングと位置合わせを行い、またそれらをまとめてスケーリングができるよう、モジュール構成を変更した。この詳細は略す。

今回用いたデータは上端を指示した弾性円柱の流体力による変形の解析であるが、Holostage-MINI による立体視では、並べて見ることはもちろんそれなりに比較ができるが、重ねても立体視を行っているため、両者を分離して見ることもできる(図 5 では分かりにくいですが、解析結果は 3D になっており、一方、実験の動画は円柱の中心を通る面に投影されるように表示されている)ので、より効果的であることが分かった。

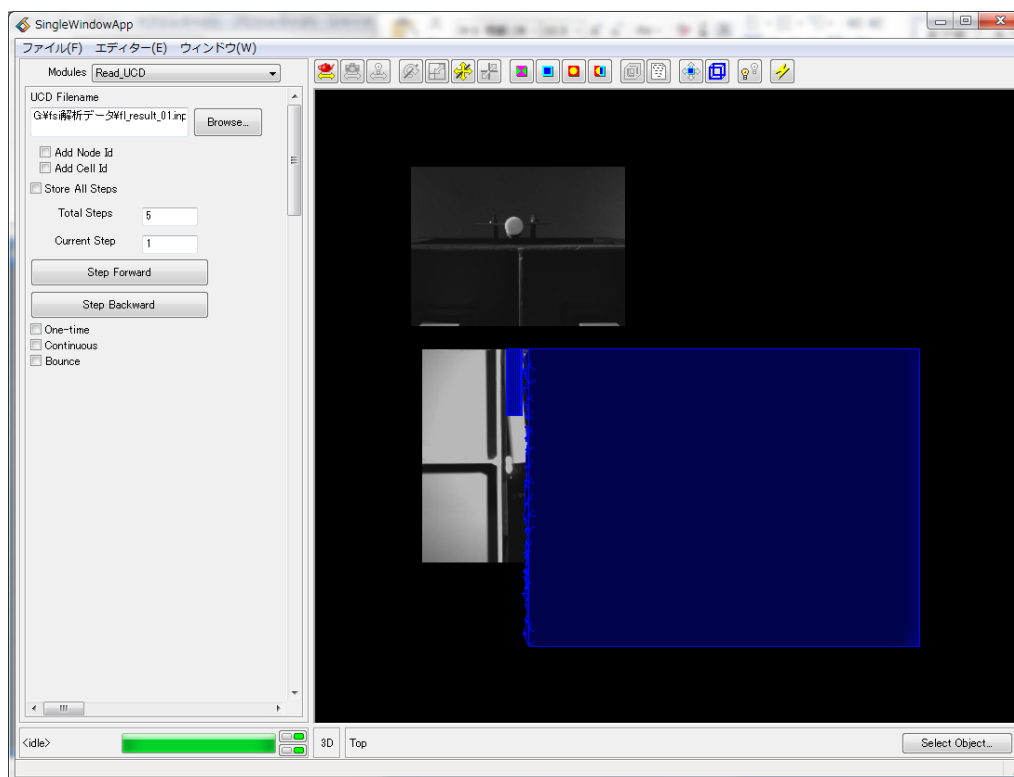


Fig.5. Simultaneous and overset display of experimental and computational results

次年度は、より多くのデータで本システムの有効性を検証することと、システムの公開方法について検討する予定である。

3.5.2. オールドバイオリンの音色とバイオリンの演奏法に関する可視化的研究

(1) 目標・計画

本研究では、古来よりしばし注目されてきた二つのバイオリンに関する研究を行っている。

一つはオールドバイオリンと新作バイオリンの音色の違いについてであり、FFT による音響解析とアンケート評価による分析を行っている。オールドバイオリンの音色の特徴量を見だし、現代の技術を用いてアンティークバイオリンに近い音色を出すための楽器製作への一助となるような音響モデルの構築を目指す。

もう一つは、バイオリンの演奏法に関してプロフェッショナルのプレイヤーの運動モデルの解析である。例えば、ピッチを振動させるビブラート奏法やアゴーギングといわれる機械的でないヒューリスティックなテンポのゆらぎなどである。これらを録音された音響データからの解析とモーションキャプチャを用いた解析がある。

(2) 意義・国際社会との比較

これまでいくつかのバイオリンの音響に関する研究はあるが、オールドバイオリンの音色もプロフェッショナルの演奏もどちらも満足な解析結果が得られているわけではない。

(3) 研究内容

1. FFT と印象評価の多変量解析によるオールドバイオリンの音色解析

楽器店との協力によりオールドバイオリン(表 1)をプロの演奏家に演奏してもらい、バイオリン毎に曲中の同じ音符の部分抜き出し FFT で周波数スペクトルの音圧ピークを得る。倍音に鋭いピークが得られるのでその倍音の配合の違いから音色の違いの比較を行っている。

2. バイオリン演奏におけるビブラートの運動解析

Table 1 Violins for analysis

Old violin (5)
Stradivari, Catenari, Gragnani, Balestrini, Santo Serafin
Semi-old violin (7)
Pressenda, Faniola, Scaranpella Michetti, Guerra, Fablis, Genovese
Modern violin (2)
Bisiachi Garimberti
Contemporary violin (7)
Pygumarius (Advance A, B, Exelent A, B),Pygumarius (Stradivari copy, Guarneri copy, Del Gesu copy ※ (株)文教楽器製)

ビブラート(vibrato)とは、弦を押さえる左指を弦に平行な方向に周期的に動かすことで、ピッチを振動させる表現方法であるが、この奏法は聴衆を魅了する技術的なコツが必要でそれがうまくできない奏者は多い。本研究では一流のプロフェッショナル演奏家の演奏音の音響的解析、およびビ

ブラート運動をモーションキャプチャにより「上手な」ビブラートのかけ方とはどうすれば良いのかを解明する。

(4) 平成 27 年度進捗状況

1. バイオリンの音色に関して

図 1 は, FFT アナライザ (OR30 シリーズ) によるスペクトル解析をして, さらに x 軸は, 周波数を基音の周波数 f_0 で割って正規化したもの, y 軸は, 倍音の音圧を基音の音圧で割って正規化した無次元化したものである. オリジナルの Stradivari とコピー製品(株文京楽器提供)の比較を Fig.1 に示す. このコピー製品による D 音は, 倍音構造が比較的傾向が似ているので音色も近いと思われるが, 現在評価実験として音色に関するアンケートを取り相関を調査することを試みている. また, 本来, 名器のパフォーマンスはプロの演奏者によって十分鳴らされた演奏音においてその真価が発揮できるのでと考え, 本研究では, これまでのタップ音やハンマー打による応答特性ではなく, プロによる演奏音での FFT 解析をしている. Fig.2 はその一例で開放弦の単純な発音と演奏音の違いを示しているが, これについても現在アンケート評価を行っている.

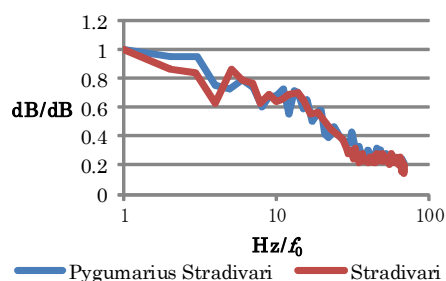


Fig. 1 Original Stradivari vs Copied Stradivari (D4)

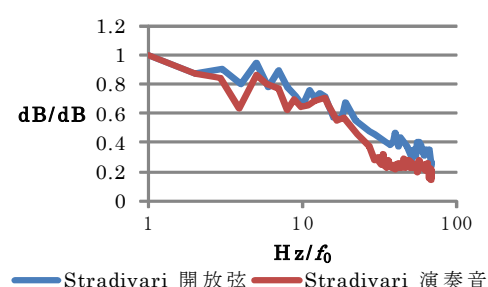


Fig.2 Tone analyze by open string vs by play(D4)

2. ビブラートの解析について

現段階では, モーションキャプチャシステムを用いていくつかの動きを撮影したまでである (Fig.3). 今後はプロの演奏による音響解析と運動解析の両方の面から解析をしていく予定である.



Fig.3. Motion capture and analyze of vibrato (violin:left, cello:right)

4. 共同研究

4.1. JST CREST プロジェクト

平成 23 年 10 月より JST CREST 研究領域「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」において、研究課題名「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」が採択され、研究拠点を当センターに置き、研究を実施している。

4.1.1. 研究実施体制

ポストペタコンなど次々世代の並列計算機アーキテクチャにおいて、大規模な数値計算データ処理を必要とする実アプリケーション分野が高い演算効率を得るためには、マイクロプロセッサやメモリの階層構造を考慮したプログラミングモデルが必要である。特にそれは、入力データ生成や可視化などのプレ・ポスト処理から数値解析手法などのソルバー処理に至るまで、統一的に提供される必要がある。つまり、一般的な実アプリケーションはプレ／ソルバー／ポスト処理など目的に応じたモジュール群で構成されていることが多いが、ポストペタコンの利用が想定される大規模シミュレーションでは、全ての処理がポストペタコン上で行われ、モジュール間のデータ受け渡しを最小限にするようなプログラミングモデル、並びにそれに基づく大規模数値計算データ処理システムの基盤技術が不可欠と言える。

ここで、ポストペタコンのアーキテクチャとしては、SIMD 拡張命令、GPGPU、FPGA など何らかのアクセラレータを搭載したヘテロジニアスメニーコアで構成される計算ノードをネットワーク接続した、分散メモリ型アーキテクチャになると予想され、計算ノード内はチップ上／ボード上問わずに異種の演算装置が NUMA 型で搭載されることを想定する必要がある。また、演算性能と通信性能の向上比を考慮すると、マイクロプロセッサにとって計算ノード間ネットワークというのは、現在で例えると WAN 並みに遅く感じるネットワークとなる可能性があり、ポストペタコンはそれらを数十万から数百万ノード規模で接続して構築されると予想される。さらに、ポストペタコン利用が想定されるシミュレーションにおいて生成されるデータのファイルサイズはペタバイトオーダーになるが、ハードディスクなどの外部記憶装置の記憶容量やアクセス性能の大幅な改善にはまだ時間を要すると考えられる。つまり、ポストペタコンを利活用できるアプリケーションは、ヘテロジニアスな分散メモリ並列かつ数百万計算ノード環境において高い並列効率と演算効率を示す必要があるが、その高いハードル

を突破できたとしても、大規模な入出力データを効率的に処理できない限り、本当の意味での利活用は不可能である。この問題を解決するためには、並列ファイル入出力システムの効率化やデータ圧縮展開アルゴリズムの高速化などだけではなく、根本的なデータ量削減に関する解決策が求められる。

そこで本プロジェクトでは、ポストペタコン上における大規模数値計算データ処理システムに関する基盤技術として、申請者らがこれまで主に数値解析手法向けに研究開発してきた階層型領域分割法の技術を応用した、階層型領域分割法による大規模数値計算データ処理システムの研究開発を目指す。この基盤技術にはアプリケーション分野に依存する箇所があることが予想されるため、本提案では連続体力学向けアプリケーションを対象としながら、具体的には以下の基盤技術開発をターゲットとする。

- A) マルチレベル領域分割法による連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列化ライブラリ
- B) マルチレベル領域分割法による多階層計算格子データの生成、操作および I/O ライブラリ
- C) 多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成と言語拡張機能

これらの技術に基づいて開発されるアプリケーションでは、核となるモジュール間のデータ受け渡し量を従来のものより 3 桁削減することが可能となり、ピーク演算性能比 20%以上のシステム開発の実現を目指す。

4.1.2. 研究実施内容

(1) 「東洋大学」グループ

① 研究代表者：塩谷隆二（東洋大学総合情報学部，教授）

② 研究項目

階層分割型数値計算ライブラリの基礎研究並びに設計とその応用

(2) 「名古屋大学」グループ

① 主たる共同研究者：荻野正雄（名古屋大学情報基盤センター，准教授）

② 研究項目

階層型ソルバーライブラリの基礎研究とその応用

(3) 「東京大学」グループ

① 主たる共同研究者:越塚誠一(東京大学大学院工学系研究科, 教授)

② 研究項目

階層分割型入出力ライブラリ並びに連続体力学向け問題領域専用言語の基礎研究とその応用

5. 成果の広報および普及活動

5.1. 第 4 回 CCMR-HDDMPPS(CREST プロジェクト) 合同シンポジウム

2015 年 3 月 10 日(火), 東洋大学白山キャンパス 2 号館 16 階スカイホールにて, 第 4 回 CCMR-HDDMPPS(CREST プロジェクト)の合同シンポジウムを開催した.

当日は, 計算力学研究センターと HDDMPPS グループから, 各 5 名が講演を行い, 1 年間の研究の進捗を報告すると共に, 来年度以降の研究方針についての議論が活発に行われた

また, 特別講演として, 2015 年度で退官される江澤良孝東洋大学総合情報学部教授による最終講義が行われ, 江澤教授のこれまでの研究について知ることの出来る, 貴重な講演となった.

5.1.1. プログラム

13:00-13:10	開会の辞	矢川元基 東京大学名誉教授・東洋大学名誉教授
13:10-14:50	セッション 1 (CCMR) 文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業: 「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」 プロジェクトリーダー: 田村善昭(東洋大学計算力学研究センター長)	
	「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」	田村善昭(東洋大)
	「流れと物体と音. 実験および数値シミュレーションの研究報告」	長岡慎介(東洋大)
	「並列流体—構造連成解析システムの開発及び実験との比較検証」	長岡慎介(東洋大)
	「人工知能技術を用いた解析結果予測」	増田正人(東洋大)
	「RAPL を用いた粒子法シミュレーションの消費電力制御」	谷村景貴(東洋大)
14:50-15:00	休憩	
15:00-16:40	セッション 2 (HDDMPPS) 科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業(CREST): 「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」	

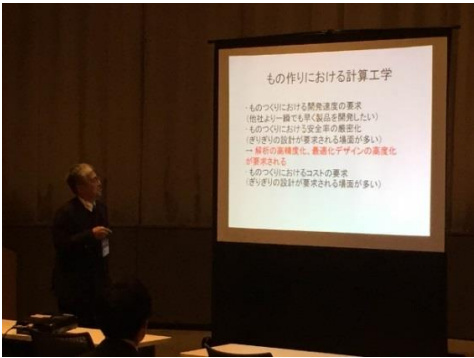
	プロジェクトリーダー:塩谷隆二(東洋大学)	
	「ポストペタスケールシミュレーションのためのライブラリ開発」	塩谷隆二(東洋大)
	「粒子法と有限要素法を用いた大規模流体構造連成解析システムの開発」	三目直登(東京大)
	「超大規模解析のための多階層型領域分割法ソルバーの開発」	淀薫(インサイト)
	「電磁場シミュレーションの大規模化・高効率化へ向けた理論的検討」	田上大助(九州大)
	「超大規模電磁場解析ライブラリ開発」	杉本振一郎(諏訪東京理科大)
16:40-16:50	閉会の辞	田村善昭 東洋大学計算力学研究センター長
16:50-17:00	休憩	
17:00-18:00	江澤良孝教授最終講義「研究を振り返ってー構造解析と最適化」	



矢川先生開会の辞



シンポジウムの様子



江澤先生最終講義



懇親会にて

5.2. 第 1 回日韓中台学生ワークショップ Mechanical Engineering Seminar (MES) 2015

2015 年 3 月 25～26 日に諏訪東京理科大学にて、日本・韓国・中国・台湾の学生による機械工学に関する第 1 回日韓中台学生ワークショップ Mechanical Engineering Seminar (MES) 2015 が開催された。講演はすべて英語で行われ、活発な議論が交わされた。本センターからは大学院生の島村雅彦さんが口頭発表を行った。また、諏訪周辺の観光やそば打ち体験も催され、各国の学生達が親睦を深めた。

5.2.1. プログラム

March 25th	Wednesday
09:00-09:20	Openning Ceremony

Oral Presentations:	
March 25th	Wednesday
Session 1 (4)	Chairoerson: Mamtimin Geni (Xinjiang University, China)
Time	Presentation
09:20-09:40	Investigation on Fatigue Crack Propagation Behaviour in Plate with Multiple Discontinuitier using XFEM
	<i>Yixiu Shu, Yazhi Li</i>
09:40-10:00	Development of Elastic Crack Opening Displacement Solutions for Circumferential Through-wall Cracks in Thin Elbows
	<i>Min-Kyu Kim, Han-Bum Surh, Min-Gu Won, Moon Ki Kim, Nam-Su Huh, Jae-Boong Choi</i>
10:00-10:20	Dislocation Dynamics Study on Influence of Elastic Anisotropy in Polycrystal Plastic Deformation
	<i>Yuya Suzuki, Akiyuki Takahashi</i>
10:20-10:40	(TBD)
	<i>Yong-Teng Zheng, Kuen Ting</i>
10:40-11:00	Coffee Break
Session 2 (3)	Chairperson: Yoshiaki Tamura (Toyo University, Japan)
11:00-11:20	Large Scale Fluid Structure Interaction Simulation with Smoothed Particle Hydrodynamics on Multi-core and -GPU Systems
	<i>Zhe Ji, Fei Xu, Akiyuki Takahashi</i>
11:20-11:40	Large-scaled Simulation on the Mixing Mechanism of Film Cooling based on Hybrid Thermal Lattice Boltzmann Method

	<i>Shangguan Yanqin</i>
11:40-12:00	Simulation of Droplet Impacting onto Elastic Solid with the SPH Method <i>Yinan Bie, Xiao-Jing Ma, Mamtimin Geni</i>
12:00-13:00	Lunch
Session 3 (5)	Chairperson: Moon Ki Kim (Sungkyunkwan University, Korea)
13:00-13:20	Experimental Observation of the Skeletal Adaptive Repair Mechanism and Bionic Topology Optimization Method by using Cross-Type Reaction-Diffusion <i>Kaysar Rahman, Mamtimin Geni</i>
13:20-13:40	Molecular Dynamics Modeling of Mixed Dislocations in BCC Metals <i>Kazuki Takahashi, Akiyuki Takahashi, Akiyoshi Nomoto</i>
13:40-14:00	Study on Band Structures of Layered Phononic Crystals with Flexoelectricity <i>Wenjun Yang</i>
14:00-14:20	(TBD) <i>Li-Hsuan Kung, Kuen Ting</i>
14:20-14:40	The Influence of Oxidation Parameters on Stress Development at the Phase Transformation Zone in Thermal Barrier Coatings <i>CHAI Yi-jun, LIN Chen, LI Yue-ming</i>
14:40-15:00	Coffee Break
Session 4 (4)	Chairperson: Kuen Ting (Lunghwa University of Science and Technology, Taiwan)
15:00-15:20	In-situ Observation of Fracture and Failure Behavior in Thermal Barrier Coatings under Three-point Bending <i>Peng Jiang, Xueling Fan, Dingjun Li, Tiejun Wang, Yacong Wu</i>
15:20-15:40	Analytical Study on Small Punch Creep Test for Creep Life Prediction <i>Taeksang Lee, Jae Boon Choi, Monn Ki Kim</i>
15:40-16:00	Compressive Response of Short Nomex Honeycomb <i>Wei Feng, Fei Xu, Xiangyang Gao</i>
16:00-16:20	Study of Pressure Characteristics of Sealing Pair Oil-Film for Bellows Mechanical Seal <i>Ning Li, Mutellip Ahmat, Guangpeng Wang</i>
March 26th	Thursday
Session 5 (4)	Chairperson: Shenping Shen (Xi'an Jiaotong University, China)
09:00-09:20	Material Strength Changes due to Spinodal Decomposition in Fe-Cr Ferric Steels <i>Takuya Suzuki, Akiyuki Takahashi, Akiyoshi Nomoto</i>
09:20-09:40	Normal Mode Guided Elastic Network Interpolation (NGENI) for Prediction of Conformational Pathway in Proteins <i>Byungho Lee, Jae Boong Choi, Moon Ki Kim</i>

09:40-10:00	(TBD) <i>Yan-Liaug Su, Kuen Ting</i>
10:00-10:20	Theoretical Prediction of Failure Envelopes for Composite Laminates including Nonlinear and In-situ Effect <i>Biao Li, Yazhi Li</i>
10:20-10:40	Coffee Break
Session 6 (4)	Chairperson: Fei Xu (Northwestern Polytechnical University, China)
10:40-11:00	Development of Efficient and Accurate Analysis Method for Cardboards <i>Masahiko Shimamura, Yoshitaka Ezawa</i>
11:00-11:20	Numerical Modeling and Simulation of Wind Blown Sand Morphology under Complex Wind-Flow Field <i>Mawsude Muhtar, Mardan Wali, Xamxinur Abdikerem, LeiWang, Afang Jin, Muhtar Sadir and Mamtimin Geni</i>
11:20-11:40	Development of Improver Integrity Assessment Standard Containing Axial and circumferential Multiple Through-wall Cracks <i>Jin Won Hong, Jae Boong Choi, Moon Ki Kim</i>
11:40-12:00	(TBD) <i>Chin-Hsing Wu, Kuen Ting</i>
Poster Presentations:	
3-minute presentation at Lunch time on March 25th. Poster presentation during coffee break and lunch time	
Order	Presentation
1	Flexoelectric Effects in Three-dimensional Eshelby's Nano-inclusion Problem <i>Shasha Yang, Shengping Shen</i>
2	SPH Numerical Simulation of Impact and Take-off of Sand Particles in Flat bed <i>Jin A Fang, Maimtimin Geni</i>
3	Research on Mechanical Characteristics of the Oblique Arch Roof in Turpan Traditional Houses <i>Abulikemu Touhet, Sawulet Bekey, Mutailipu Ruzeaiti, Aierken Haimudula</i>
4	Stress analysis multibody contact problem based on SPH Method <i>Muhtar Kerim, Rahmatjan Imin, Azhar Halik, Mamtimin Geni</i>
5	Numerical Simulations and Dynamic Contact Behavior Analysis of Ball Bearing Lubrication System by Adopting FEM and SPH Coupling Method <i>Yue WU, Mamtimin Geni</i>

5. 成果の広報および普及活動



島村さんの発表の様子 1



島村さんの発表の様子 2



表彰式



そば打ち体験

5.3. 台湾・龍華科技大學川越キャンパス見学

2015(平成 27)年 6 月 23 日午前、提携校である台湾・龍華科技大學の教員・学生 20 名が川越キャンパスを見学に訪れた。学外の賞などを受賞した学生に送られる「gold award」を受賞した学生が提携校を訪問するというもので、同大と関連の深い、計算力学研究センターが中心となって見学会を企画した。

まず、東洋大学から吉田善一研究推進部長と、川越キャンパスを代表して杉本富利総合情報学部長が歓迎の挨拶を行い、龍華科技大學の阮管理学院院長が歓迎に対する謝辞を述べた。続いて、田村善昭計算力学研究センター長の司会で参加者全員の紹介や東洋大学の概要説明などを行った。その後、生体医工学研究センターとバイオ・ナノエレクトロニクス研究センターの見学を行い、両大学の親睦を深めた。



Dr.Ruan 挨拶



1 号館前にて



見学の様子

5.4. 東洋大学産学協同教育センター中核人材育成講座「スマホアプリ開発入門講座」

2015 年 11 月 7 日(土), 14 日(土)

1307 実験室(1 号館 3 階)

10:00-16:00

2015 年 11 月, 川越キャンパスにて, 産学協同教育センターが「スマホアプリ開発入門講座」を開講した。本センターから塩谷研究員, 長岡研究助手, 増田研究助手が指導にあたった。

当講座では, 自社で活用可能なアプリ開発を検討している方や, 日頃 PC で利用しているソフトウェアの機能の一部を社外などで利用するためにスマートフォン用アプリとして開発を検討している方等を対象とし, スマートフォンの 2 大 OS となっている Android と iOS 両方のアプリ開発について, 基礎知識の習得(それぞれの特徴を理解, 比較すること)から, オリジナルアプリの作成実習までを行った。

11 月 7 日(土)には, 宮川大輔氏(株式会社 mokha・取締役)が, 「Android Studio による Android アプリ開発」をテーマとして, Android アプリ開発環境のセットアップにはじまり, Android の仕組みや UI の基礎知識についての講義を行なうとともに, 各参加者がオリジナルアプリの設計, 開発を目標に, 実習を行った。また, Google Play へのアプリ公開手順の紹介も行われた。

11 月 14 日(土)には, 本センターの塩谷隆二教授(東洋大学総合情報学部)が, 「Xcode による iOS アプリ開発」をテーマとして, Xcode Storyboard による画面遷移簡単アプリ開発や Swift の基礎知識について講義を行なうとともに, 各参加者がオリジナルアプリの設計・開発を目標に実習を行った。また, ハイブリッドアプリ開発ツールなどの紹介も行われた。



「スマホアプリ開発入門講座」の様子

6. 学術活動

2015 年 1 月から 2016 年 1 月までの業績を掲載する。

6.1. 論文投稿

1. Terutaka Fujioka, “Elastic-Route Estimation of Strain Range in Notched Components Under Thermal Loading Without Performing Stress Linearization”, Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, 137(2), 021205-1 to 021205-6, April 2015.
2. Shin-ichiro Sugimoto, Daisuke Tagami, Masao Ogino, Amane Takei, Hiroshi Kanayama, “Improvement of Convergence in Time-Harmonic Eddy Current Analysis with Hierarchical Domain Decomposition Method”, Transaction of the Japan Society for Simulation Technology, Vol.7, No.1, pp.11-17, 2015.
3. Hiroshi KAWAI, Kohmei SATOH, Yasunori YUSA, Takayuki UOMOTO, Ryuji SHIOYA, Hiroshi OKADA, “AutoMT a library for tensor operations and its performance evaluation for solid continuum mechanics applications”, Mechanical Engineering Letters Vol.1, No.15-00349, pp.1-10, 2015.
4. Kohei MUROTANI, Issei MASAIE, Takuya MATSUNAGA, Seiichi KOSHIZUKA, Ryuji SHIOYA, Masao OGINO, Toshimitsu FUJISAWA, “Performance Improvements of Differential Operators Code for MPS method on GPU”, Computational Particle Mechanics, Vol.2, Issue 3, pp.261-272, 2015.
5. Kazuo KONAGAI, Rama Mohan POKHAREL, Hitoshi MATSUBARA and Masataka SHIGA, “Geotechnical aspect of the damage caused by the April 25th, 2015 Gorkha earthquake of Nepal”, JSCE Journal of Disaster FactSheets, FS2015-E-0002, July 2015.
6. 富山潤, 羽渕貴士, 宮里心一, 中林靖, “コンクリート橋梁上部工に付着する塩分量分布に関する数値実験”, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.769-774, 2015.
7. T. Nosaki, N. Fujimatsu, “Trajectory analysis based on aerodynamic characteristics of baseball with accelerating motion”, Journal of Visualization, September 2015.
8. 富山潤, “コンクリート構造物を対象としたマイクロ・マクロ塩害環境に関する研究”, コンクリート構造物の補修, 補強およびアップグレードシンポジウム, Vol.15, pp.405-410, 2015 年 10 月.

9. Hitoshi Matsubara, Kosaburo Hirose, Taka-aki Edo, Kei-ichi Tamanaha, Hisao Hara and Tomonori Yamada, “Numerical modelling of mudcrack grows”, Proceedings of the 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ATC1-3-17, November 2015.
10. 広瀬孝三郎, 松原仁, 原久夫, “マッドペーストにおける乾燥収縮亀裂のフラクタル次元解析”, 土木学会論文集 C(地圏工学), 2016 (Accepted).
11. F Zhang, Y Zhu, T Furukawa, W Song, “Kinematic Analysis of a Partially Decoupled 3-DOF Parallel Wrist”, Journal of Robotics, 2015 (790414), pp.1-9, 2015.
12. K Takami, T Furukawa, M Kumon, D Kimoto, G Dissanayake, “Estimation of a nonvisible field-of-view mobile target incorporating optical and acoustic sensors”, Journal of Autonomous Robots, 40 (2), pp. 343-359, 2015.
13. B Li, T Furukawa, “Microtexture Road Profiling System Using Photometric Stereo”, Journal of Tire Science And Technology, 43 (2), pp.117-143, 2015.
14. Hiroshi Kanayama, “An Industrial Application of Thermal Convection Analysis”, International Journal of Computational Methods, Vol.13, No.2, 2016 (Accepted).

6.2. 著書

1. Hiroshi Kawai, Masao Ogino, Ryuji Shioya, Shinobu Yoshimura, “Fundamentals of High-Performance Computing for Finite Element Analysis”, High-Performance Computing for Structural Mechanics and Earthquake / Tsunami Engineering (Springer Tracts in Mechanical Engineering), Springer, pp.1-21, 2015.
2. Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, Eiichi Nagai, Toshimitsu Fujisawa, Akira Anju, Hiroshi Kanayama, Satoshi Tanaka, Kyoko Hasegawa, “Large-Scale Tsunami Run-Up Analysis Using Particle Method”, High-Performance Computing for Structural Mechanics and Earthquake / Tsunami Engineering (Springer Tracts in Mechanical Engineering), Springer, pp.157-177, 2015.

6.3. 総説・解説・エッセイ

1. 横山真男, “ヴァイオリンの音色研究”, 可視化情報学会誌, Vol.35, 136, pp.17-22, 2015.

2. 矢川元基, “福島原子力事故特集 PART2を企画して”“福島原子力事故特集 PART2”, 学術の動向, Vol.20, No.2, pp.33-35, 2015.
3. 矢川元基, “巻頭言:新年のご挨拶”, 原安協だより, No.269, pp.1-2, 2016.

6.4. 学会発表

1. 横山真男, 斉藤勇也, “ヒットチャートランキング上位に入る楽曲の特徴分析”, 情報処理学会研究報告音楽情報科学(MUS), 山梨, 2015 年 2 月.
2. 渡辺大樹, 瀬田陽平, 横山真男, “HMDと Leap Motion を用いた指差し天体観測システムの開発”, 情報処理学会第 77 回全国大会, 京都, Vol.1, pp.651-653, 2015 年 3 月.
3. 杉本振一郎, 田上大助, 荻野正雄, 武居周, 金山寛, “領域分割法を用いた時間調和渦電流解析の収束性改善(第 2 報), 静止器/回転機合同研究会・電磁界数値計算技術とその応用, 宮古島マリンターミナル, 2015 年 3 月 5-6 日.
4. 月川久義, 井上雅弘, 金山寛, 田島正喜, “屋上から排出した水素の建物周囲の流れ解析”, 日本機械学会九州支部第 68 期総会・講演会, 福岡大学工学部, 2015 年 3 月 13 日.
5. 金山寛, “自動販売機内部の熱対流解析”, 日本機械学会材料力学部門 2014 年度第 2 回「マルチフィジックスの実験／計算技術の高度化に関する研究会」, 東京大学山上会館 001 会議室, 2015 年 3 月 19 日.
6. Yoshiaki Tamura, Tomoki Matsuo, “Numerical Simulation Method of Compressible Gas-Liquid Two Phase Flow”, PANACM 2015 1st Pan-American Congress on Computational Mechanics, Buenos Aires, Argentina, April 27-29, 2015.
7. Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi, Shioya Ryuji, Fumihiko Hakuno, Hiroki Nishi, Shinichiro Takahashi, “Study of Effects of Blood Amino Acid and Hormone Level for Controlling Triglyceride Accumulation in the Liver of Rats using Self-Organizing Map”, 1st. Pan-American Congress on Computational Mechanics (PANACM 2015) & XI Argentine Congress on Computational Mechanics (MECOM 2015), Argentina, pp.885-891, April 27-29, 2015.
8. M. Yokoyama, Y. Seta, K. Murotani, G. Yagawa, “3D simulation considering surface condition of wall in particle method”, VI th International Conference on Computational Methods for

Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED PROBLEMS 2015), Venice, Italy, May 2015.

9. 横山真男, “黄金比による音律で調弦した音楽”, 情報処理学会研究報告音楽情報科学 (MUS), 東京, 2015 年 5 月.
10. 富山潤, 浅井光輝, 久保善司, “損傷力学ベースボクセル FEM を用いたアルカリシリカ反応の膨張挙動解析の基礎研究”, 土木学会第 18 回応用力学シンポジウム講演概要集, pp.199-200, 2015 年 5 月.
11. 室谷浩平, 越塚誠一, 塩谷隆二, 荻野正雄, 永井英一, 藤澤智光, 安重晃, “MPS 法を用いた福島第一原子力発電所 1 号機タービン建屋の津波浸水解析”, 第 20 回計算工学講演会, Vol.20, B-5-4.pdf, pp.1-2, 2015 年 6 月 8 日.
12. 和田義孝, 河合浩志, 荻野正雄, 室谷浩平, 塩谷隆二, “高精細可視化ライブラリ LexADV-VSCG へのポリゴン断面可視化の実装”, 第 20 回計算工学講演会, Vol.20, C-6-2.pdf, pp.1-2, 2015 年 6 月 9 日.
13. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 山田知典, 吉村忍, “領域分割法における局所 Schur 補元アプローチの性能予測モデルと評価”, 第 20 回計算工学講演会, Vol.20, C-7-1.pdf, pp.1-2, 2015 年 6 月 9 日.
14. 淀薫, 塩谷隆二, 荻野正雄, 室谷浩平, “大規模解析のための多階層領域分割法の基本設計と実装”, 第 20 回計算工学講演会, Vol.20, C-7-2.pdf, pp.1-2, 2015 年 6 月 9 日.
15. 杉本振一郎, 田上大助, 荻野正雄, 武居周, 金山寛, “階層型領域分割法における時間調和渦電流解析の収束性改善(第 2 報)”, 第 20 回計算工学講演会, つくば国際会議場, 2015 年 6 月 8-10 日.
16. Shinsuke NAGAOKA, Yasushi NAKABAYASHI, Yoshiaki TAMURA, Genki YAGAWA, “Efficient Approach for the Fluid-Structure Interaction Problems and the Comparison between Experiment and Computation”, ICCM2015, Auckland, New Zealand, July 14-17, 2015.
17. Hitoshi Matsubara, “Mathematical and numerical modelling for microbial rock weathering”, Proceedings of 13th US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM), San Diego, USA, July 2015.

18. S. Koshiyama, N. Fujimatsu, “Establishment of PSP Technique for Small-Scaled Model using the Supersonic Wind-Tunnel”, International Symposium on Space Technology and Science, Kobe International Conference Center, July 2015.
19. Kosaburo Hirose, Takaaki Edo and Hitoshi Matsubara, “Crack propagation simulation on mud pastes”, Proceedings of 13th US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM), San Diego, USA, July 2015.
20. Hiroshi Kanayama, Masao Ogino and Shin-ichiro Sugimoto, “Preconditioners in Domain Decomposition Method for Magnetostatic Problems”, ICCM2015, Pullman Hotel, Auckland, New Zealand, July 14-17, 2015.
21. Yoshiaki Tamura, “Development of Numerical Methods for Compressible Gas-Liquid Two Phase Flows”, The 13h Asian International Conference on Fluid Machinery 2015 (AICFM13), Tokyo, Japan, August 7-10, 2015.
22. 藤松信義, “摩擦係数評価のための乱流境界層の普遍関数構築”, 日本実験力学学会 2015 年度年次講演会, 新潟大学工学部, 2015 年 8 月.
23. M. Yokoyama, K. Murotani, O. Mochizuki, G. Yagawa, “Numerical and experimental study on splash formation with consideration of the surface condition of solid wall”, IV th Conference on Particle-Based Methods (PARTICLES 2015), Barcelona, Spain, September 2015.
24. 横山真男, “現代音楽のための黄金比を用いた新音律の提案と評価”, 日本音響学会 2015 年秋季研究発表会, 福島, 2015 年 9 月.
25. 富山潤, 藍檀オメル, 亀川裕也, 山口順圭, 屋我晃, “遅延膨張性細骨材に対するコンクリートプリズムを用いた ASR 加速試験の適応性に関する研究”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-547, pp.25-26, 2015 年 9 月.
26. 風間洋, 富山潤, 下地建, 小旗俊介, “コンクリート表面の含有塩分量 C0 調査方法の提案”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-70, pp.139-140, 2015 年 9 月.
27. 佐川康貴, 山田一夫, 合田寛基, 久保善司, 富山潤, 川端雄一郎, “共通試験結果に基づくコンクリートプリズムを用いた ASR 加速試験方法に関する考察”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-548, pp.1095-1096, 2015 年 9 月.

28. 広瀬孝三郎, 松原仁, “マッドペーストにおける乾燥収縮亀裂のフラクタル次元解析”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 岡山, pp.783, 2015 年 9 月.
29. 崎山将, 広瀬孝三郎, 松原仁, “粘質土壌における亀裂進展シミュレーション”, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 岡山, pp.573-574, 2015 年 9 月.
30. 室谷浩平, 越塚誠一, 塩谷隆二, 荻野正雄, 永井英一, 藤澤智光, 安重晃, “MPS 法を用いた福島第一原子力発電所 1 号機タービン建屋内部の津波浸水解析”, 第 28 回計算力学部門講演会, 130.pdf, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日.
31. 淀薫, 塩谷隆二, 荻野正雄, 室谷浩平, “大規模解析のための多階層領域分割法ソルバの開発”, 第 28 回計算力学部門講演会, 154.pdf, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日.
32. 鄭宏杰, 荻野正雄, 塩谷隆二, “京コンピュータにおける ADVENTURE_Solid 2.0 の性能評価”, 第 28 回計算力学部門講演会, 231.pdf, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日.
33. 増田正人, 塩谷隆二, 中林靖, 伯野史彦, 西宏起, 田村善昭, 高橋伸一郎, “自己組織化マップを用いたラットの血中アミノ酸量と肝臓脂肪の関係分類”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 321.pdf, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日.
34. 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, 鄭宏杰, 淀薫, “静磁場領域分割インターフェイス問題の前処理付き共役勾配法”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日.
35. Ryuji Shioya, Masao Ogino, Hiroshi Kawai, “Development of a Numerical Library based on Hierarchical Domain Decomposition and Extreme Large Scale FEM Simulation”, IWACOM-III, p93_OW4-3-2.pdf, Tokyo, Japan, October 12-14, 2015.
36. Hiroshi Kawai, Ryuji Shioya, “Domain specific language for continuum mechanics: translator from LaTeX to C/Fortran”, IWACOM-III, p94_OW4-3-3.pdf, Tokyo, Japan, October 12-14, 2015.
37. 島村雅彦, 江澤良孝, 田村善昭, 清水聖, 佐藤大亮, “ベイズ推定を用いた実験と数値シミュレーション融合による高精度予測”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 横浜, 2015 年 10 月 10-12 日.

38. 横山真男, 室谷浩平, 矢川元基, “粒子法によるミルククラウンの大規模数値シミュレーション”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 横浜, 2015 年 10 月.
39. 瀬田陽平, 横山真男, 牧野光則, 矢川元基, “容器の縁形状を考慮した液だれの数値シミュレーション”, 日本機械学会第 28 回計算力学講演会, 横浜, 2015 年 10 月.
40. 松原仁, “玄武岩質ガラスの微生物風化シミュレーション”, 計算工学会講演会, つくば, Vol.20, 2015.
41. 藤岡照高, “構造解析ソルバ検証用参照解の整備(低合金鋼引張試験の Code-Aster による再現)”, オープン CAE シンポジウム 2015, 富山国際会議場, 2015 年 11 月.
42. 広瀬孝三郎, 松原仁, “ベントナイトペーストに発生する乾燥収縮亀裂のフラクタル次元解析”, 第 28 回沖縄地盤工学研究発表会, 沖縄, pp.29-30, 2015 年 11 月.
43. 江戸孝昭, 松原仁, “格子ボルツマン法を用いた発破騒音場における防音壁の効果に関する数値解析的検討”, 第 28 回沖縄地盤工学研究発表会, 沖縄, pp.1-6, 2015 年 11 月.
44. 伯野史彦, 増田正人, 館野昌洋, 西宏起, 高橋伸一郎, 塩谷隆二, “機械学習による血中アミノ酸濃度から肝臓脂肪蓄積量の予測“, 第 38 回日本分子生物学会年会, 第 88 回日本生化学会大会合同大会(BMN2015), 神戸, 2015 年 12 月 1-4 日.
45. Yoshiaki Tamura, “Development of Numerical Simulation Method for Compressible Gas-Liquid Two-Phase Flows”, The 9th International Symposium on Cavitation (CAV2015), Lausanne, Switzerland, December 6-10, 2015.
46. Toshihiro Ashino, “Data and knowledge structure for materials integration”, Pacificchem 2015, The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, Honolulu, Hawaii, December 2015.
47. MA Hopkins, RJ Griffin, A Leonessa, BY Lattimer, T Furukawa, “Design of a compliant bipedal walking controller for the DARPA Robotics Challenge”, IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots(Humanoids), pp.831-837, 2015.
48. C Knabe, J Seminatore, J Webb, M Hopkins, T Furukawa, “A Leonessa, Design of a series elastic humanoid for the DARPA Robotics Challenge”, IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp.738-743, 2015.

49. K Takami, T Furukawa, M Kumon, LC Mak, “Non-field-of-view indoor sound source localization based on reflection and diffraction”, IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), pp.59-64, 2015.
50. B Li, T Furukawa, “Photometric stereo under dichromatic reflectance framework dealing with non-Lambertian surfaces”, IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), pp.139-144, 2015.
51. T Furukawa, L Dantanarayana, J Ziglar, R Ranasinghe, G Dissanayake, “Fast global scan matching for high-speed vehicle navigation”, IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), pp.37-42, 2015.
52. K Takami, T Furukawa, “High-Resolution Deformation Measurement System for Fast Rotating Tires”, ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp.V008T13A058-V008T13A058, 2015.
53. T Furukawa, K Takami, X Tong, D Watman, A Hamed, R Ranasinghe, G. Dissanayake, “Map-Based Navigation of an Autonomous Car Using Grid-Based Scan-to-Map Matching”, ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp.V003T01A005-V003T01A005, 2015.
54. B Li, T Furukawa, “Design and Calibration of a 3D High-Resolution Surface Profiling System Using Photometric Stereo”, ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp.V009T07A086-V009T07A086, 2015.
55. MJ Bender, H McClelland, G Bledt, A Kurdila, T Furukawa, R Mueller, “Trajectory Estimation of Bat Flight Using a Multi-View Camera System”, IN AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, SciTech, pp.5-9, 2015.
56. K Takami, T Furukawa, “Study of Tire Noise Characteristics with High-Resolution Synchronous Images”, EuroNoise 2015, pp.2113-2118, 2015.
57. 金山寛, 鄭こうけつ, 杉本振一郎, 荻野正雄, “Considerations of Preconditioners for Magnetostatic Domain Decomposition Analysis”, 静止器/回転機合同研究会「電磁界数値計算技術とその応用」, 富士通株式会社本社事務所 24 階大会議室, 2016 年 1 月 20-21 日.

6.5. 招待講演

1. Hiroshi Kawai, Masao Ogino, Ryuji Shioya, Tomonori Yamada, Shinobu Yoshimura, “Performance Tuning of Parallel Structural Analysis Code Based on Iterative Substructuring with BDD Pre-conditioner for Peta-scale Supercomputers”, The 18th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (FEF2015), Regent Taipei, Taiwan, March 16-18, 2015.
2. Hiroshi Kanayama, Masao Ogino, Shin-ichiro Sugimoto, “Preconditioners in Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems”, The 18th International Conference on Finite Elements in Flow Problems (FEF2015), Regent Taipei, Taiwan, March 16-18, 2015.
3. Genki Yagawa, “Views of Japanese Academia on Fukushima Daiichi Nuclear Accident”, World Engineering Conference and Convention 2015, Kyoto, December 1, 2015.

6.6. 受賞

1. 渡辺大樹, 瀬田陽平, 横山真男, 情報処理学会第 77 回全国大会, 学生奨励賞(論文タイトル:HMDとLeap Motionを用いた指差し天体観測システムの開発), 京都, 2015 年 3 月.
2. 矢川元基, 日本計算工学会名誉会員, 2015 年 5 月 22 日.
3. 金山寛, 2015 年日本計算力学連合賞, 2015 年 7 月 28 日.

7. 研究グループ紹介



解析手法開発グループ



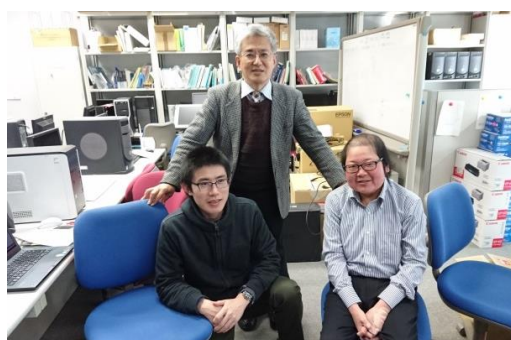
大規模並列化グループ



新規実験計測グループ



可視化検証グループ



精度・妥当性検証グループ

8. 結び

本報は、2015 年度の活動を取りまとめたものである。なお、2016 年 3 月に予定されているセンター外部評価委員会に間に合わせるために原稿締め切りを 2016 年 1 月とした。したがって、それ以降のデータについては掲載されていないことをお断りしたい。

今日、計算力学は製造業のみならず、社会の安心・安全をはじめさまざまな分野に大きく広がりをみせている。私立大学戦略的研究基盤形成支援事業としてはあと1年を残すのみであるが、より広い視点で計算力学の発展に資するようセンター研究員一同、努力していきたい。



東洋大学 計算力学研究センター 2015 年度年報

この資料の転載, 引用などをご遠慮ください.

本資料に関するお問い合わせは下記へお願いいたします.

編集・発行 東洋大学計算力学研究センター

〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100

URL: <http://www.toyo.ac.jp/site/ccmr/>

TEL・FAX: 049-239-1475

2016 年 3 月発行

禁無断転載

東洋大学計算力学研究センター

2016 年度 年報



2017 年 3 月

2016 Annual Report of
Center for Computational Mechanics Research
Toyo University



March 2017

目次

1. まえがき	1
2. センターの概要	2
2.1. センター設置について	2
2.2. 組織	3
2.3. 構成メンバー	4
3. 研究成果	5
3.1. 解析手法開発グループ	5
3.1.1. 超大規模並列流体-構造連成解析手法の開発	6
3.1.2. 深層学習を用いた連成解析結果予測	33
3.1.3. 粒子法による粒子間インタラクションに着目した大規模数値シミュレーション	43
3.2. 大規模並列化グループ	49
3.2.1. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発	49
3.3. 新規実験計測グループ	63
3.3.1. 標準問題のための弾性円柱の振動実験	64
3.3.2. 流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムを用いたフラッタ特性の確認実験	67
3.4. 精度・妥当性検証グループ	71
3.4.1. ベイズ推定を用いた効率的精度解析技術の開発	71
3.4.2. 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式開発	77
3.4.3. オープン CAE (固体の有限要素法)を用いた熱疲労試験の再現解析による精度検証	79
3.4.4. 人体膝関節モデルを用いた接触応力分布解析	88
3.4.5. 工学における最適化手法の進化計算を用いた最適化	93
3.5. 可視化検証グループ	96
3.5.1. 3次元画像による定量的・定性的検証	96
4. 共同研究	104
4.1. JST CREST プロジェクト	104
4.1.1. 研究実施体制	104
4.1.2. 研究実施内容	105
5. 成果の広報および普及活動	107
5.1. 英国カーディフ大学にて合同ワークショップ開催	107
5.2. 第 5 回 CCMR-HDDMPPS (CREST プロジェクト) 合同シンポジウム	108

5.2.1. プログラム.....	108
5.3. 台湾龍華科技大學にて合同ワークショップ開催.....	110
5.3.1. プログラム.....	110
5.4. 第 30 回数値流体力学シンポジウム.....	111
5.5. 第 6 回 CCMR-HDDMPPS (CREST プロジェクト) 合同シンポジウム.....	112
5.5.1. プログラム.....	112
6. 学術活動.....	114
6.1. 論文投稿.....	114
6.2. 著書.....	114
6.3. 学会発表.....	115
6.4. 招待講演.....	118
7. 研究グループ紹介	119
8. 終わりに	120

1. まえがき

2012 年に私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に選定されたプロジェクトも最終年度となった。本事業はセンターとして二度目の大型事業であり、いわば第 2 期である。この報告書はその最終年度の活動を中心にとりまとめている。

今回の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業はその題目を「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」としている。これは、それまでの流体解析や構造解析といった個別の物理の解析から一歩進めてより複雑な、また現実的な問題に計算力学の手法を適用しようとする事と、単に研究として行うのではなく、精度や妥当性を十分に検証し、あるいはその検証方法を確立することで、実用に耐えうるものとするを目標としていることである。本年度は最終年度であり、本報には今年度の成果とともに、5 年間のまとめも述べられている。また、戦略的研究推進事業 CREST やその他、センターに関連する研究についてもふれており、これらは本プロジェクト終了後もセンターとして活動を続けて行く予定である。

本プロジェクトの遂行にあたっては、学内外の研究者・技術者の方々、また、本学担当事務部にも多大なご支援・ご協力を賜った。各々名前を挙げることはしないが、ここにあらためて謝意を表す。プロジェクトは終了するが、センターとしては今後も活動を続け、計算力学の発展のために微力ながら力を尽くしたいと考えている。さらなるご批判とご指導を賜れば幸いである。

2017 年 3 月

東洋大学計算力学研究センター長

田村 善昭

2. センターの概要

本センターは、わが国の私立大学学術フロンティア拠点のひとつとして文部科学省から設置が認められ、平成 17 年度に活動を開始した。その後、平成 23 年度に科学技術振興機構の戦略的研究推進事業 CREST の選定、続いて平成 24 年度に文部科学省の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け、今日に至っている。

本センターに参加する研究員は、東洋大学の複数学部・大学院の教員（工学研究科，国際地域学部，総合情報学部，理工学部），博士研究員，大学院生などを中核とし，また客員研究員として関連分野の内外の研究者から構成されている。

各自の専門分野は，構造解析，流体解析，破壊解析，逆問題・最適化，大規模並列計算，可視化など，計算力学分野で必要とされるほぼ全ての分野に跨っており，この分野における専門家集団である。平成 23 年度に採択を受けた CREST では「京」コンピュータ利用のための超大規模解析技術に関して，また平成 24 年度からは，私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の選定を受け，連成解析や計算力学の精度検証・妥当性検証にも積極的に取り組んでいる。

さらに，東洋大学 125 周年を契機とした国際化に合わせて海外の関連する大学と積極的に交流を進め，若手の人材育成にも寄与したいと考えている。

2.1. センター設置について

東洋大学計算力学研究センター設置の経緯とこれまでの概要は以下の通りである。

- 平成 17 年 6 月文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」に研究題目「数値逆解析手法の開発とその構造健全性向上のための応用」で採択され，計算力学研究センター発足
- 平成 17 年 12 月センター開所式開催のあと，白山第 2 キャンパス内計算力学研究センター棟に入居し本格活動開始
- 平成 22 年 3 月「学術フロンティア推進事業」終了
- 平成 23 年 8 月科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 CREST「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」に研究題目「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」で採択される
- 平成 24 年 4 月文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に研究題目「大規模高精度流体構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」で採択される

2.2. 組織

計算力学研究センターの組織は以下の通りである。

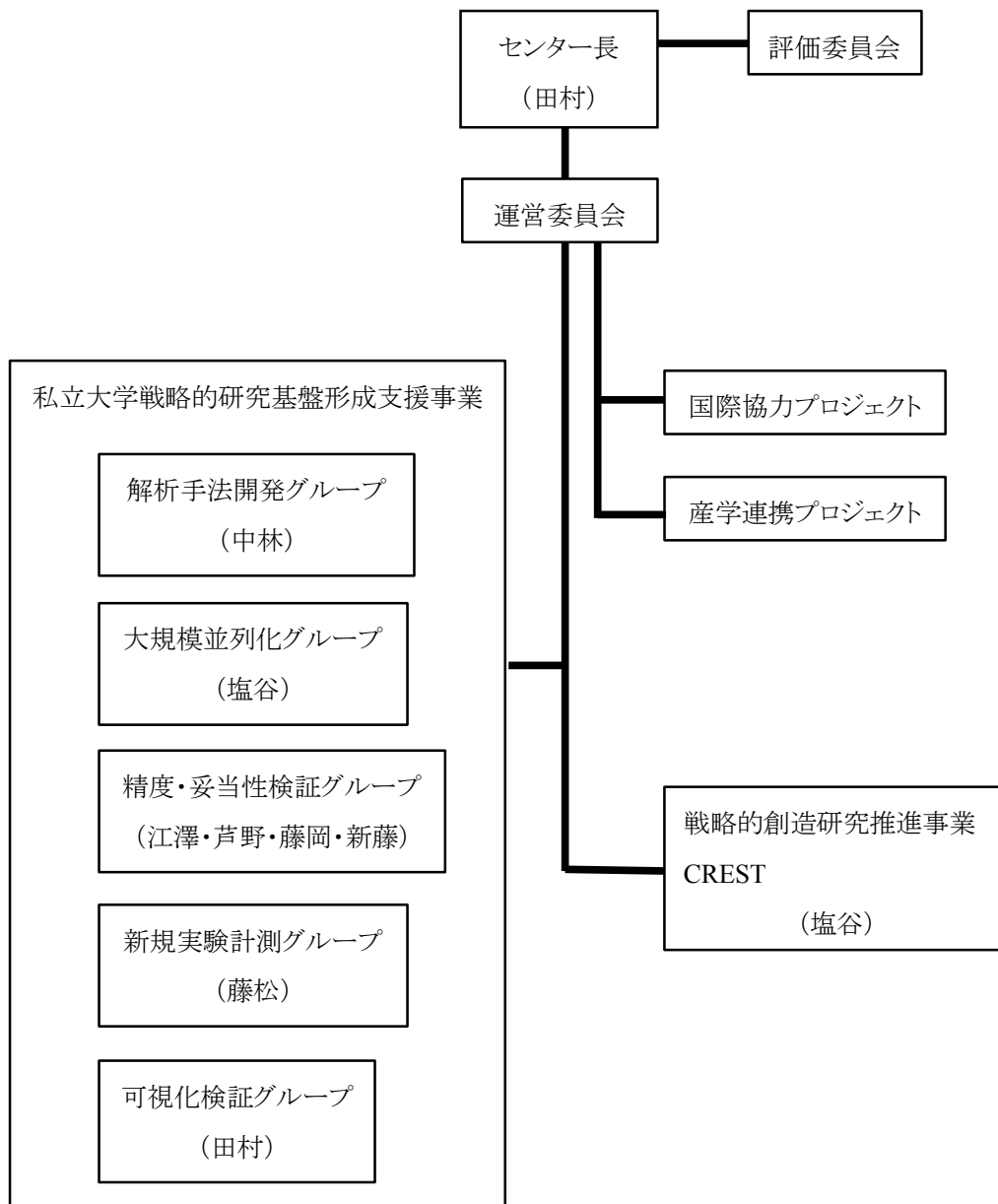


Fig.2.1. センターの組織

2.3. 構成メンバー

計算力学研究センターは以下のメンバーで構成されている。

センター長

田村 善昭(東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)

研究員

芦野 俊宏(東洋大学国際地域学部国際地域学科教授)

塩谷 隆二(東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)

新藤 康弘(東洋大学理工学部機械工学科助教)

中林 靖(東洋大学総合情報学部総合情報学科准教授)

藤岡 照高(東洋大学理工学部機械工学科教授)

藤松 信義(東洋大学理工学部機械工学科准教授)

研究助手・研究支援者

長岡 慎介(東洋大学計算力学研究センター, 2016 年 12 月より東京理科大学)

増田 正人(東洋大学計算力学研究センター)

鄭 宏杰(東洋大学計算力学研究センター)

谷村 景貴(東洋大学計算力学研究センター)

学生

島村 雅彦(東洋大学大学院工学研究科機能システム専攻博士後期課程)

清水 聖(東洋大学大学院工学研究科機能システム専攻博士後期課程)

客員研究員

矢川 元基(前東洋大学計算力学研究センター長, 東京大学名誉教授, 東洋大学名誉教授)

金山 寛(日本女子大学特任教授, 九州大学名誉教授)

富山 潤(琉球大学工学部准教授)

古川 知成(バージニア工科大学工学部機械工学科教授)

松原 仁(琉球大学工学部助教)

横山 真男(明星大学情報学部情報学科准教授)

江澤 良孝(工学院大学非常勤講師, 元東洋大学総合情報学部総合情報学科教授)

3. 研究成果

3.1. 解析手法開発グループ

解析手法開発グループでは、計算力学研究センターのプロジェクト名である「大規模高精度流体-構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」のうち、「高精度流体構造連成解析手法の開発」の部分に焦点を当てた活動を行っている。

流体-構造連成解析を高精度かつ安定的に実施するためには、まず、流体解析手法・構造解析手法そのものの精度や信頼性を高めた上で、それらを連成させるアルゴリズムについても十分に検討する必要がある。これまでのところ、計算力学研究センターでは流体解析に SUPG/PSPG 安定化有限要素法を用い、構造解析に EFMM を用いる手法を中心に連成解析を行ってきたが、このアプローチ以外にも例えば粒子法を用いた手法など様々な戦略が考えられる。

上記の事項を踏まえて、今年度は、以下の 3 項目について報告を行う。

- (1) 超大規模並列流体-構造連成解析手法の開発
- (2) 深層学習を用いた連成解析結果予測
- (3) 粒子間インタラクションに着目した大規模粒子法シミュレーション

3.1.1. 超大規模並列流体-構造連成解析手法の開発

(1) 目標・計画

本研究では、超大規模問題にも適用可能な流体-構造連成現象を解く為の新しい解析手法を開発する事を目的としている。

本研究で提案する Enriched Free Mesh Method (EFMM)を用いた構造解析手法と, SUPG/PSPG 安定化有限要素法を用いた流体解析手法を組み合わせた, 新しい流体-構造連成解析手法に用いるメッシュ分割パターンは共に線形要素(2次元解析では三角形要素, 3次元解析では四面体要素)であることから, 流体-構造境界面における整合性を得る事が出来, その結果, 流体-構造連成問題を解く際に, 非常に重要となる, 各解析場が及ぼし合う相互間作用を考慮する際に生じる様々な問題を解消する事に成功している。

さらに, 前述のとおり, 各解析場に用いられるメッシュ分割パターンは, 線形要素のみであるにも関わらず, 得られる解析精度は, 従来の同一要素を用いた解析結果と比較して向上するという結果を得ている。このことから, 本提案手法は, 解析向上させつつも, 大規模問題を解く際に問題になってくる計算機リソースと計算時間の大幅な抑制を可能にする事を意味している。

一方で, 本手法は, 近年の大規模解析の際に必要な不可欠となる並列処理を施す際に, 解消すべき大きな問題を有している事が明らかになった。具体的には, EFMM の大規模並列化が困難であるという点であり, 原因は, EFMM の解析アルゴリズムに起因する。

昨年度までに, EFMM の為の超大規模並列化アルゴリズムを提案・実装し, 京コンピュータによる並列化効率の検証により, 1億自由度規模の問題に対しても良好な並列化効率を得られる事を示した。

今年度は, 流体-構造連成解析を行う際に必要となる, 本手法の動的解析への拡張を行った。また, 昨年度までに提案してきた並列手法のアルゴリズムの変更に伴う改良を行った所, 明らかとなっていた問題点の解消と, 同手法の更なる高速化に成功した。

(2) 意義・国際社会との比較

近年, 国内外を問わずに, 計算力学の分野において, 流体-構造連成現象を対象とした研究は,

非常に注目されており, 積極的に研究が行われている。この現象を解くために, 多くの研究者が様々なアプローチを行い, 沢山の新しい解析手法が提案され, 多くの成果が発表されている。その一方で, 現時点までに, 決定的な解析手法は確立されていない。

提案されている多くのアプローチは, 流体解析手法として, 粒子法を用いているものが非常に多い。メッシュ分割を必要としない粒子法を用いることで, 例えば, ダムブレイク問題などの解析場が大きく変動するような問題の解析も容易になることから, 流体解析場において多くのアドバンテージ

が得られることが、その一因であると考えられる。

しかし、我々の提案している手法は、流体解析場、構造解析場共に格子法を用いている。格子法をそれぞれの解析場に用いる事で、粒子法を用いた流体解析と比較して、解析領域の大きな変化に対しては、対応し難い面もあるが、解析精度の面では、粒子法を用いたアプローチと比較して大きなアドバンテージを有していると考えられる。

本手法の確立により、数値シミュレーションにおいて、非常に重要な点である、解析精度を損なう事無く、多くの流体-構造連成現象を解く事が可能になると考えられる。このことから、本研究は、格子法を用いた流体-構造連成解析手法の確立と云う観点からも、非常に意義のある研究であると言える。

(3) 研究内容

今年度の研究内容は、下記の2つに大別される。

1. 超大規模並列 EFMM の高速化
2. 超大規模並列 EFMM の動的解析への拡張

1のテーマは、昨年度までに提案・実装した並列 EFMM のアルゴリズムは、十分な並列化効率を得る事が出来たが、一方では改善すべき問題を残していた。この問題を解決する為に、並列化アルゴリズムを改良し、問題の解消のみならず、解析に要する時間の更なる高速化に成功した。ここでは、具体的な解析アルゴリズムと並列化効率の検証結果を示す。

2のテーマは、流体-構造連成解析を実装する際に必要となる、並列 EFMM の動的解析への具体的な適用方法について述べる。

(3・1) 超大規模並列 EFMM の高速化

並列性能の改良にあたって、今年度は下記の2つの作業を実施した。

1. 行列ベクトル積における計算及び通信方法の変更
2. 入力データ形式の変更
3. アルゴリズムの健全性の評価
4. 並列化性能測定

(3・1・1)行列ベクトル積における計算順序および通信方法の変更

変更前のコードにおける計算及び通信の手順は以下の通りである。

1. 【計算】ベクトルの内積計算と同様に、全ての節点がいずれか1つの計算領域でのみ評価されるように、各領域で行列ベクトル積計算を行う。

2. 【通信 1】領域境界の 1 層外側の節点について、正しい値を計算すべき領域に対して、自分の領域で計算された寄与分を送信する。領域境界の 1 層内側の節点について、送られてきた値を足し込むことで、領域境界よりも内側の節点における正しい値が完成する。
3. 【通信 2】領域境界上の節点について、共有する領域間で値を送受信し、それぞれ互いの値を足し込む。これで、領域境界上の節点における正しい値が完成する。
4. 【通信 3】最後に、領域境界の 1 層外側の節点について、正しい値を計算すべき領域から値を受け取り、上書きすることで、領域境界の 1 層外側の節点における正しい値が完成する。
なお、ここでの通信は、プロセス 2 における通信の丁度逆の通信となる。

上記の手順において、計算の無駄はないが、3 回の通信および同期が必要となっており、通信が遅い環境においては、パフォーマンス低下の要因になると考えられる。

そこで、今年度は、下記データを予め準備をし、計算および通信手順を変更した。

- ・ 全ての節点について、主担当の領域を決めておく。
 - － 主担当となる節点をその領域の内部節点とする。
- ・ 主担当の節点と接続する他領域の節点を外部節点とし、リストに保存する。
- ・ 他領域の外部節点となっている内部節点をリストに保存する。

これによって、事実上、節点ベースの領域分割を行ったのと同等の状態となる。

上記のデータを用いた変更後の計算及び、通信の手順は以下の通りである。

1. 【通信 1】他領域と外部節点となっている内部節点の被演算ベクトル値を当該領域に送信すると共に、自領域の外部節点の被演算ベクトル値をそれらの節点を内部節点として保持する領域から受信し、上書きする。
2. 【計算】全ての内部節点において行列ベクトル積演算を行う。
3. 【通信 2】自領域の外部節点の演算結果ベクトル値をそれらの節点を内部節点として保持する領域に送信すると共に、他領域の外部節点となっている内部節点の演算結果ベクトル値を当該領域から受信し、足し込む。

上記のように計算及び通信手順を変更する事により、計算の無駄が無だけでなく、通信回数が 2 回に、通信量が約半分になっており、改良前と比較してパフォーマンスの向上が期待できる。

(3・1・2)入力データ形式の変更

昨年度までの解析コードにおいては、要素ベースの領域分割を行い、領域内の全ての節点において局所要素クラスターを生成出来るよう、1 層分外側の要素も保持していた。これによって、各領域間には、要素 2 層分のオーバーラップが生じていた。

今年度、修正したコードにおいても、要素ベースの領域分割を行う事は変わらないが、領域境界上の節点について、主担当の領域を決め、中心節点としての評価は主担当となる領域においてのみ行う事とした。これにより、必要なオーバーラップが1層のみとなった。

この変更に伴い、送受信する節点のリストが単純化され、通信テーブルのデータ量も削減された。

(3・1・3)アルゴリズムの健全性の評価

改良後の解析アルゴリズムの健全性を示す為に、8領域が隣接するモデルを用いて、単一計算時と並列計算時で計算結果が一致する事を確認した。

解析に用いるモデルを図1に概略を表1に示す。

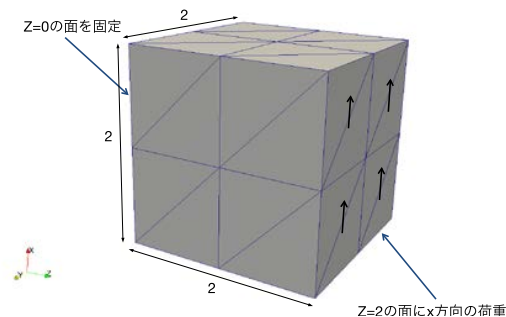


Fig 1. Analysis model

Table 1. Detail of analysis model

立方体の各辺の分割数	x	2
	y	2
	z	2
要素数		48
節点数		27
自由度数		81

図2は1PEによる計算結果で、図3は8PEによる計算結果を示している。

これらの計算結果は完全に一致しており、並列計算が正しく計算出来ている事が分かる。

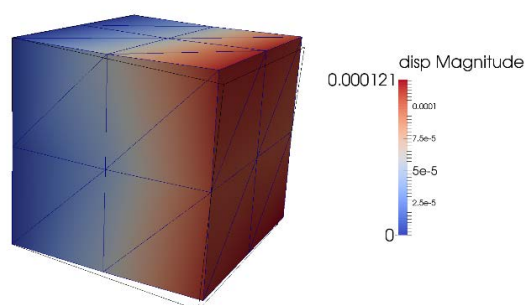


Fig 2. Analysis result (Case of 1PE)

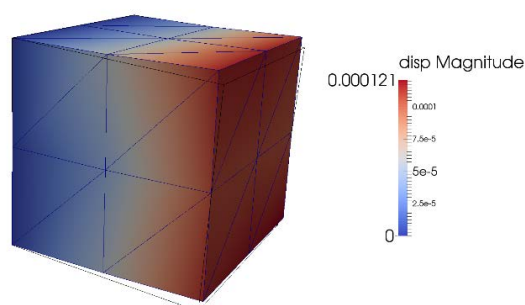


Fig 3. Analysis result (Case of 8PE)

なお、改良した並列アルゴリズムを用いた解析結果と理論解との比較検証も行っており、昨年度示した結果と同様の結果が得られる事を確認している。

これらの結果から、改良した本提案アルゴリズムの健全性を示す事が出来たと言える。

(3・1・4)並列化性能測定

図 4 に示すような、一辺の長さが 1 の立方体 $z=0$ 面を完全固定とし、 $z=1$ 面にせん断方向に荷重を加えるモデル(以下、立方体せん断モデルと呼ぶ)について、各辺の分割数やプロセスへの分割を変えることにより、ストロング・スケーリングおよびウィーク・スケーリングによる並列性能測定を行った。解析条件については、表 2 に示した通りである。

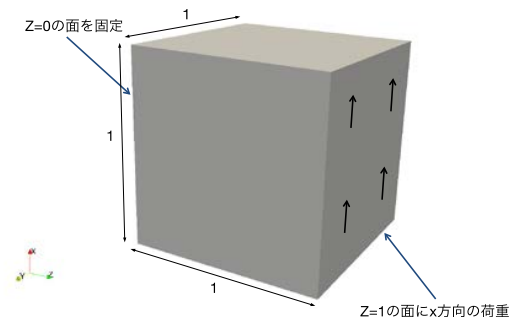


Fig 4. Analysis model

Table 2. Detail of analysis model

ヤング率	100,000
ポアソン比	0.2
単位面積あたりの荷重の大きさ	1
CG 法の収束判定	1.0e-6

なお、並列性能の測定は、東洋大学計算力学研究センター所有のクラスタ(CCMRクラスタ)を用いた。CCMR クラスタの各ノードのハードウェア概要は表 3 に示す通りである。

Table 3. Detail of CCMR cluster

CPU	Intel Core-i7 Extreme 980X
コア数	6 (HyperThreading: off)
動作周波数	3.33GHz
キャッシュ	12MB
メモリ	DDR3 PC-10600
容量	12GB (2GB x 6)

(3・1・4・1)ストロング・スケーリングによる性能測定

ストロング・スケーリングによる並列性能測定に用いたモデルの全体規模を表 4 に、また、各並列数における各プロセスが担当する直方体ブロックの規模を表 5 に示す。

Table 4. Detail of whole analysis model for evaluation of strong scaling

立方体の各辺の分割数	96
要素数	5,308,416
節点数	912,673
自由度数	2,738,019

Table 5. Detail of each analysis model for evaluation of strong scaling

#PE	各プロセスへの 全体モデルの分 割			各プロセスが担当する直方体ブロック					
				各辺の分割数			要素数	節点数	自由度数
	x	y	z	x	y	z			
16	2	2	4	48	48	24	331,776	60,025	180,075
54	3	3	6	32	32	16	98,304	18,513	55,539
144	4	6	6	24	16	16	36,864	7,225	21,675
432	6	6	12	16	16	8	12,288	2,601	7,803

なお、昨年度に報告をした改良前のコードでは、144 並列以上の計算で、ストロング・スケーリングの性能が大幅に低下した。

そこで、144 並列用のデータを用いて、通信の種類による計算性能の違いを調査したところ、ブロッキング通信が最速となった。

ブロッキング通信を用いる場合は、通信の待ち時間が生じる為、ノンブロッキング通信と比較して高並列において並列性能の低下が起りやすいと考えられるが、CCMR クラスタにおいては逆にノンブロッキング通信の性能低下が極めて大きい事が判明した。

この結果を受け、本検証では、通信にブロッキング通信のみを用いる設定で行うものとする。

改良前後の各コードを用いたストロング・スケーリングによる並列性能測定の結果をそれぞれ表 6, 7 に示す。

Table 6. Parallel efficiency before improvement

#PE	Elapsed [s]	#CG Iter	Speed-Up over 16PE		Parallel Efficiency
			Actual	Ideal	
16	605	1,228	1.00	1.00	100.0%
54	364	1,228	1.66	3.38	49.2%
144	526	1,228	1.15	9.00	12.8%
432	748	1,228	0.81	27.00	3.0%

Table 7. Parallel efficiency after improvement

#PE	Elapsed [s]	#CG Iter	Speed-Up over 16PE		Parallel Efficiency
			Actual	Ideal	
16	602	1,228	1.00	1.00	100.0%
54	299	1,228	2.01	3.38	59.7%
144	202	1,228	2.98	9.00	33.1%
432	231	1,228	2.61	27.00	9.7%

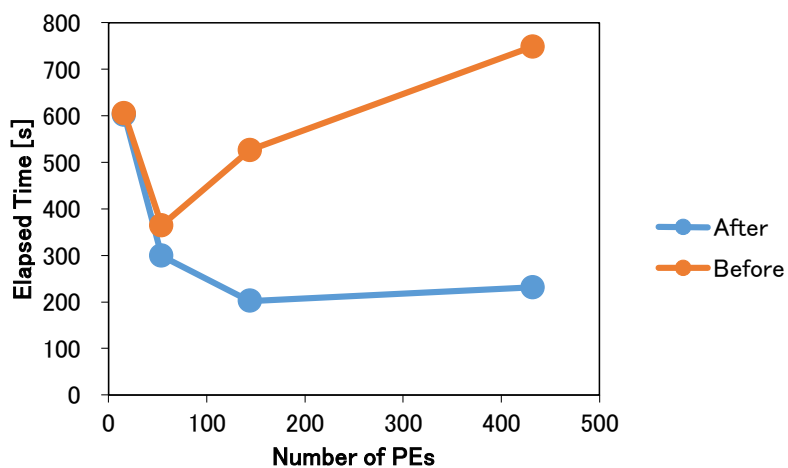


Fig 5. Comparison of computing time between before and after

また、並列数の増大に伴う計算時間の推移を図 5 に示す。改良前のコードでは、54 並列までは比較的良好な加速が得られているが、144 並列、432 並列では並列化効率が大幅に悪化し、十分な性能が得られていなかった。これに対して、改良後のコードでは、144 並列、432 並列での結果

が改良前と比較して大幅に改善されている。ただし、並列化効率としては、144 並列で 33.1%, 432 並列で 9.7%と、決して十分とは言えない結果となっている。

改良後のコードについて、計算時間の内訳を調査するために、剛性行列を作成する **efmm** の計算時間と、CG 法による線型方程式の求解を行う関数 **cg_mtd** の計算時間を測定した結果を表 8 に示す。また、並列数の増大に伴う計算時間の内訳の変化、16 並列を基準とした加速度の推移、並列化効率の推移をそれぞれ、図 6、図 7 及び図 8 に示す。

efmm (剛性行列作成) については良好な並列性能が得られていることが確認出来たが、**cg_mtd** (CG 法) については、やや物足りない性能となっている。これは、ブロッキング通信を用いることで、生じる通信の待ち時間による影響が大きいと推測される。

Table 8. Detail of computing time by new code

#PE	Elapsed [s]			Speed-Up over 16PE			Parallel Efficiency		
	All	efmm	cg_mtd	All	efmm	cg_mtd	All	efmm	cg_mtd
16	602	91	445	1.00	1.00	1.00	100%	100%	100%
54	299	27	204	2.01	3.37	2.18	60%	100%	65%
144	202	10	119	2.98	9.10	3.74	33%	101%	42%
432	231	4	121	2.61	22.75	3.68	10%	84%	14%

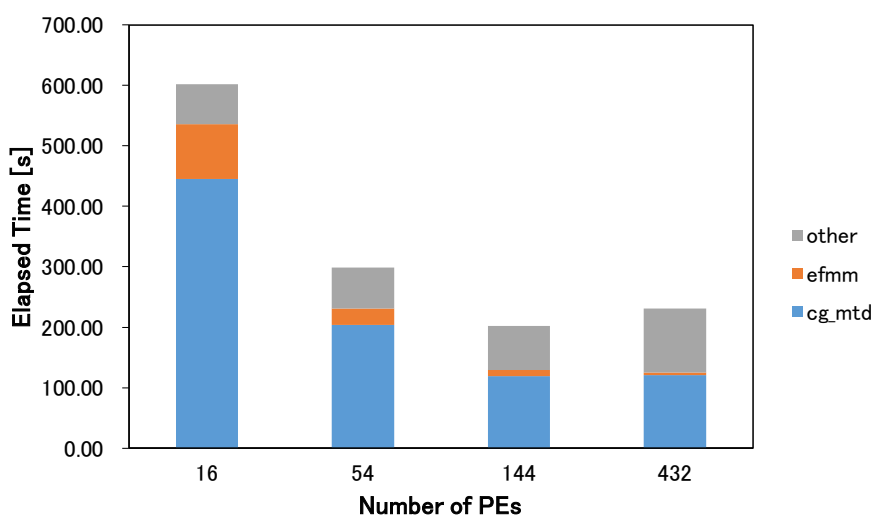


Fig 6. Classification of computing time by new code

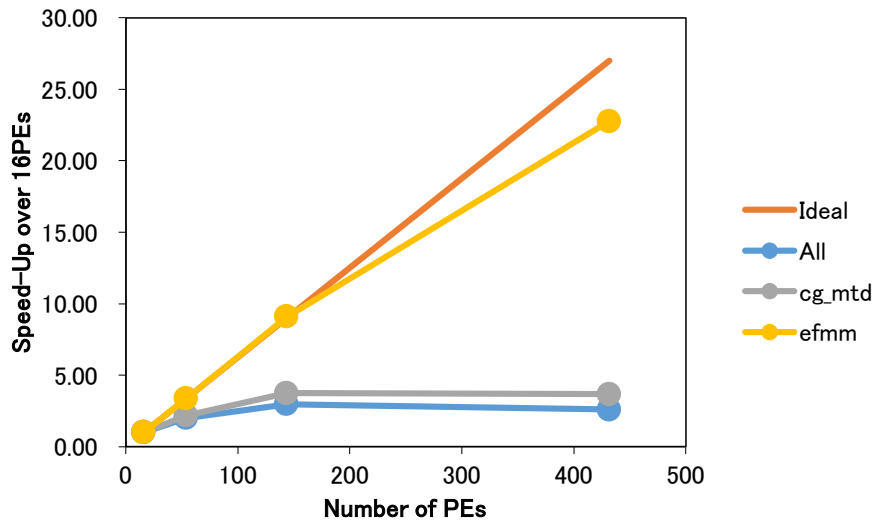


Fig 7. Change of accelerate ratio by new code compared with 16 PE

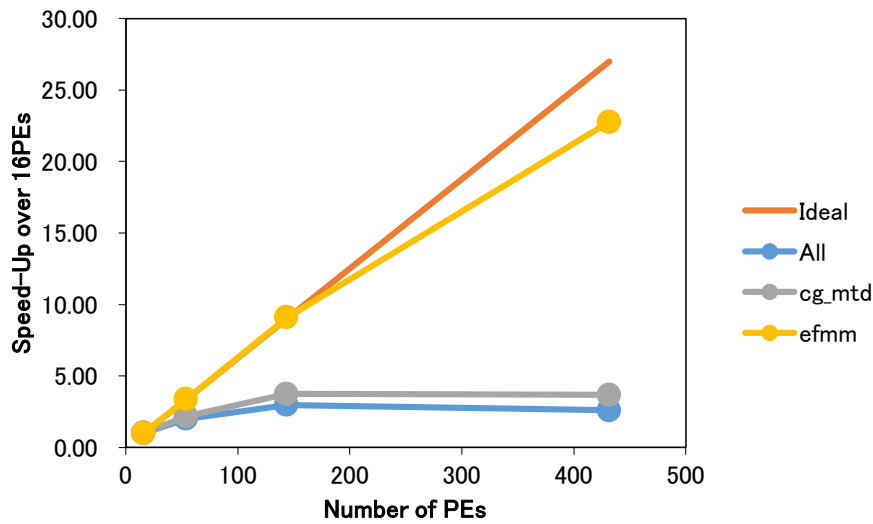


Fig 8. Change of parallel efficiency by new code

改良前後の各コードによるストロング・スケーリングにおける各プロセスのメモリ使用量の最大値、および、全ノードの総メモリ使用量をそれぞれ表 9 及び表 10 に示す。

また、これらのノード数の増加に伴う推移をそれぞれ図 9 及び図 10 に示す。改良前のコードでは、一定の規模の計算にも関わらず、並列数を 16 から 432 まで増やす事で総メモリ使用量が約 5 割増大していたが、改良後のコードでは、約 2 割の増大に抑えられている。

Table 9. Memory usage before tuning

#PE	Memory Max / Node [MiB]	Total Memory [GiB]
16	1,090	17.0
54	344	18.1
144	141	19.8
432	61	25.6

Table 10. Memory usage after tuning

#PE	Memory Max / Node [MiB]	Total Memory [GiB]
16	1,087	17.0
54	335	17.7
144	132	18.5
432	49	20.7

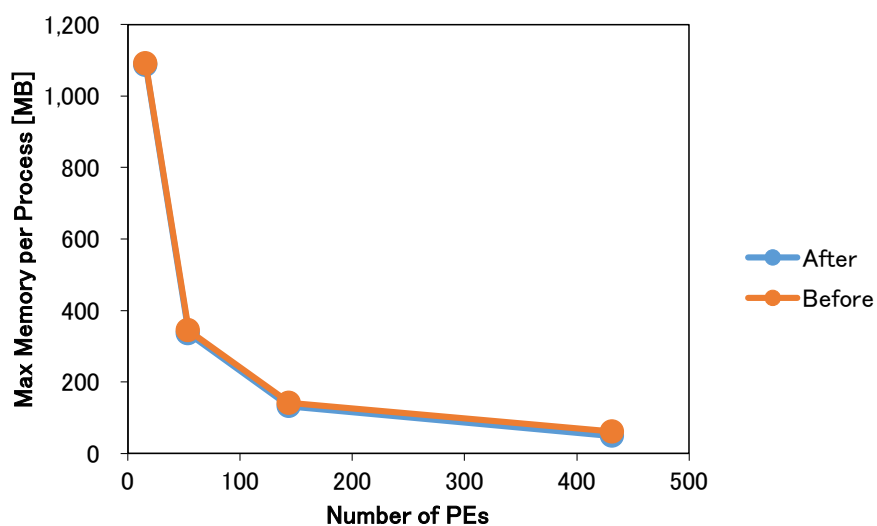


Fig 9. Change maximum memory usage compared with before and after

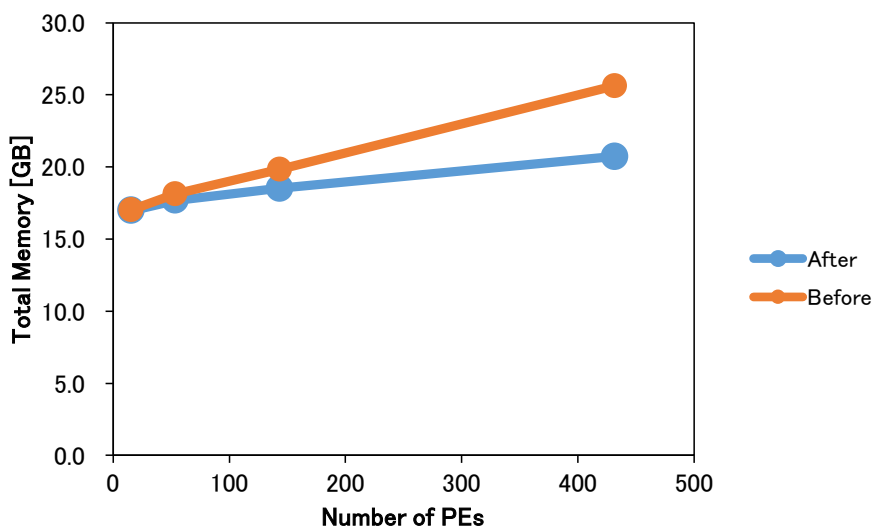


Fig 10. Change total memory usage compared with before and after

(3・1・4・2)ウィーク・スケーリングによる性能測定

ウィーク・スケーリングによる並列性能測定に用いたモデルの各プロセスが担当する直方体ブロックの規模を表 11 に、また、各並列数における全体モデルの規模と各プロセスへの分割の詳細を表 12 に示す。

Table. 11 Detail of analysis model for each domain

立方体の各辺の分割数	x	48
	y	48
	z	24
要素数		331,776
節点数		60,025
自由度数		180,075

Table. 12 Detail of whole analysis model

#PE	全体モデル				各プロセスへの 全体モデルの分割		
	一辺の分割	要素数	節点数	自由度数	x	y	z
16	96	5,308,416	912,673	2,738,019	2	2	4
54	144	17,915,904	3,048,625	9,145,875	3	3	6
128	192	42,467,328	7,189,057	21,567,171	4	4	8
432	288	143,327,232	24,137,569	72,412,707	6	6	12

改良前後の各コードを用いたウィーク・スケーリングによる測定結果をそれぞれ表 13 および表 14 に示す。また、並列数の増大に伴う計算時間の推移、CG 法の収束までの反復回数の推移、ノードあたり最大メモリ使用量の推移をそれぞれ図 11、図 12 及び図 13 に示す。

改良によって計算時間が短縮した事、また、オーバーラップ数の削減によって、メモリ使用量に関するウィーク・スケーリング性能が改善した事が確認された。

Table 13. Results by previous code

#PE	Elapsed [s]	#CG Iter	Memory Max [MiB]
16	605	1,228	1,090
54	1,177	1,699	1,108
128	2,223	2,028	1,138
432	I/O があまりにも遅いため、計算中止		

Table 14. Results by improved code

#PE	Elapsed [s]	#CG Iter	Memory Max [MiB]
16	602	1,228	1,087
54	1,060	1,699	1,087
128	1,779	2,028	1,087
432	I/O があまりにも遅いため、計算中止		

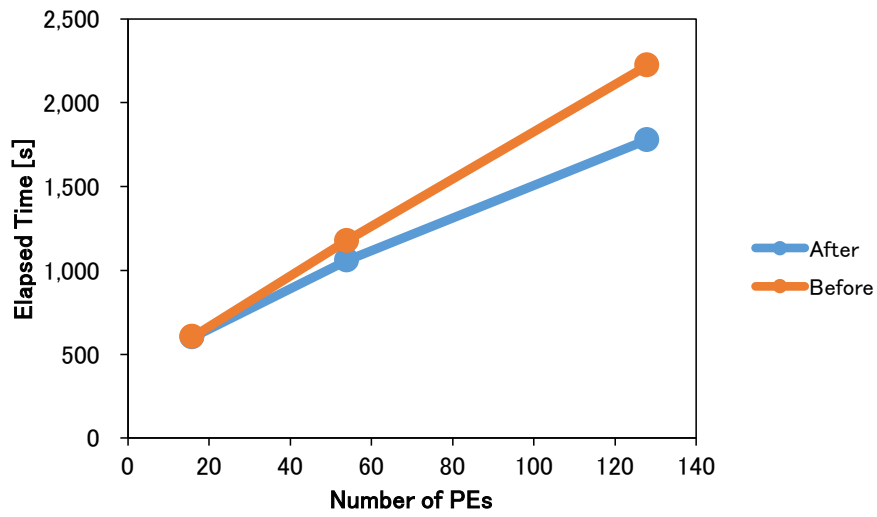


Fig 11. Change computing time compared with before and after

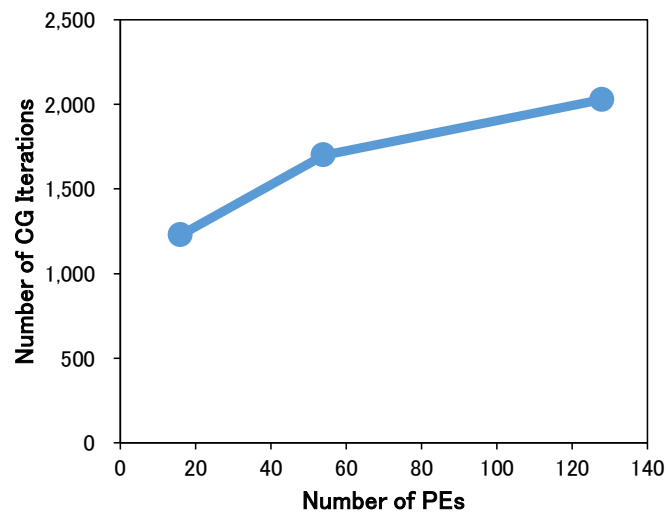


Fig 12. Number of iterations of CG method

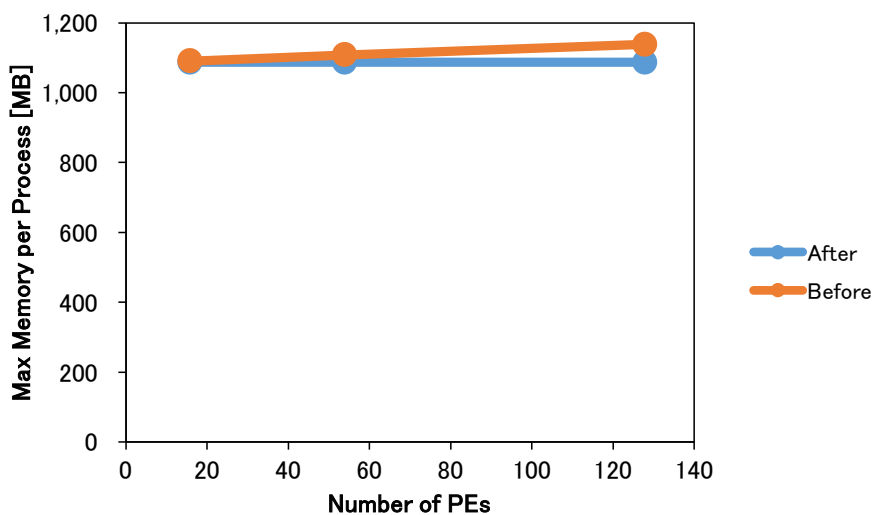


Fig 13. Change maximum memory usage compared with before and after

改良後のコードについて、計算時間の内訳を調査する為、剛性行列を作成する関数 `efmm` の計算時間と、CG 法による線型方程式の求解を行う関数 `cg_mtd` の計算時間を測定した結果を表 15 に示す。また、並列数の増大に伴う計算時間の内訳の変化、CG 法 1 反復あたりの計算時間の推移をそれぞれ図 14 及び図 15 に示す。

`efmm`(剛性行列作成)については良好な並列性能が得られている事が確認出来たが、`cg_mtd`(CG 法)についてはやや物足りない性能となっている。これは、ブロッキング通信を用いる事で、生じる通信の待ち時間による影響が大きいと推測される。

Table 15. Detail of computing time by new code

#PE	Elapsed [s]			
	All	efmm	cg_mtd	cg_mtd/iter
16	602	91	445	0.362
54	1,060	89	868	0.511
128	1,779	89	1,114	0.549
432	I/O があまりにも遅いため、計算中止			

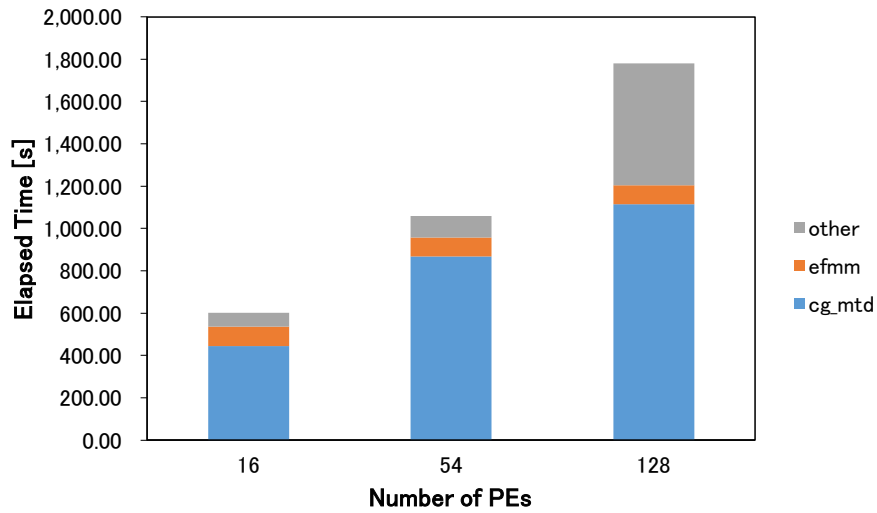


Fig 14. Classification of computing time by new code

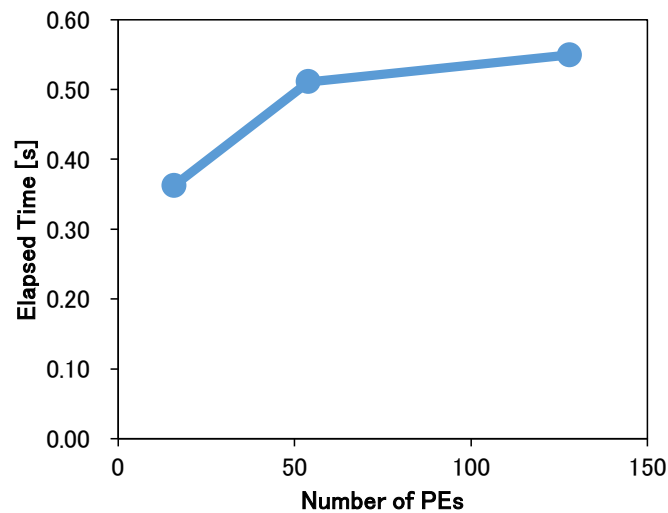


Fig 15. Computing time for each iteration of CG method by new code

(3・1・5)まとめ

並列 EFMM の為のアルゴリズムを改良し、且つ、通信方法をブロッキング通信とする事で、昨年度までのアルゴリズムでは、並列化性能が芳しくなかった CCMR クラスタにおいて、並列化性能が改善される事が分かった。

また、今回の改良により、ストロング・スケーリング、ウィーク・スケーリング共に、並列性能の改善が確認された。

この結果、CCMR クラスタにおいても、ある程度の規模の並列解析の実行をする事が可能とな

った。

なお、今回の検証は、CCMR クラスタにおける検証のみを行ったが、昨年度までに提案していたアルゴリズムで既に良好な並列化効率を得ていた京コンピュータで、ノンブロッキング通信による改善アルゴリズムを用いた今年度提案した並列化手法は、非常に良好な並列化効率を得られる並列解析手法となる事が期待できる。

(3・2) 超大規模並列 EFMM の動的解析への拡張

流体-構造連成現象を数値解析により明らかにする為には、構造解析に関しても動的解析へ拡張する必要がある。

提案している EFMM を用いた動的解析への実装は、本グループが既に行っているが、本手法の並列解析への適用を行われていないのが現状である。また、EFMM のアルゴリズムおよび、提案している並列 EFMM の解析アルゴリズムの特徴から、並列 EFMM を動的解析に適用する為には、これらのアルゴリズムの特徴を考慮した手法を用いなければならない。

具体的には、並列 EFMM を行う際に用いている高速化手法の一つである、Local elements cluster – by – Local elements cluster (Lec-by-Lec) 処理を施し、更に並列化アルゴリズムにより複数領域に節点がオーバーラップした場合にも対応できるように考慮した並列動的 EFMM のアルゴリズムを提案・実装をした。

本節では、初めに Lec-by-Lec 処理について述べ、その後、並列動的 EFMM のアルゴリズムについて述べ、その後、具体的な動的解析への拡張方法を述べる。

(3・2・1) Local elements cluster – by – Local elements cluster 処理について

EFMM 解析を行う場合も、従来の FEM と同様、連立一次方程式を解く必要がある。この連立一次方程式の解法は大きく分けて直接法と反復法に分けられるが、代表的な解法である反復法の一つである CG 法 (Conjugate Gradient Method) を用いる場合、必要となる計算は、ベクトルのノルム計算と行列とベクトルの掛け合わせ (行列・ベクトル積) である。そのうち、行列・ベクトル積の演算では、本来、左辺行列つまり全体剛性マトリックス を記憶しておく必要がある。しかし、問題の大規模化による自由度の増加に伴い、必要とされる記憶容量は増大する。その為、近年の要素ベースの解析手法では、記憶容量を削減するための方法として、Element-by-Element 処理を導入し、その記憶容量を削減する方法が取られるのが一般的である。

EFMM を用いた解析手法は、従来の要素ベースの解析手法とは異なり、節点ベースの解析手法であることから、従来の Element-by-Element 処理を施すことは不可能である。しかしながら、生成される全体剛性マトリックスは、従来の FEM と同じサイズになる為、全体剛性マトリックスを記憶しておくことは、記憶容量の点からも、計算時間の点からも避けるべきである。

そこで我々は, EFMM の為の記憶容量の増加を抑制, 計算時間の短縮を目的とした Local elements cluster-by-Local elements cluster(Lec-By-Lec)処理を提案した. ここで, Local elements cluster とは, 中心節点毎に生成される局所要素群の事を指す.

まず, Lec-By-Lec 処理の理解を容易にするため, 全体行列による計算を基に, 図 16 のモデルにおいて比較を行う. なお, 図 2 中の算用数字 1~4 は節点番号, a~d はそれぞれ中心節点 1~4 の局所要素群, 1~4 は局所要素内節点番号を表す.

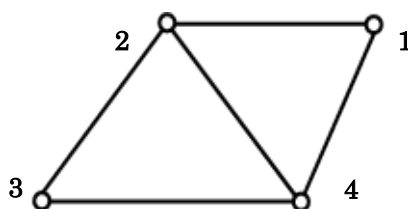


Fig 16. Finite element model

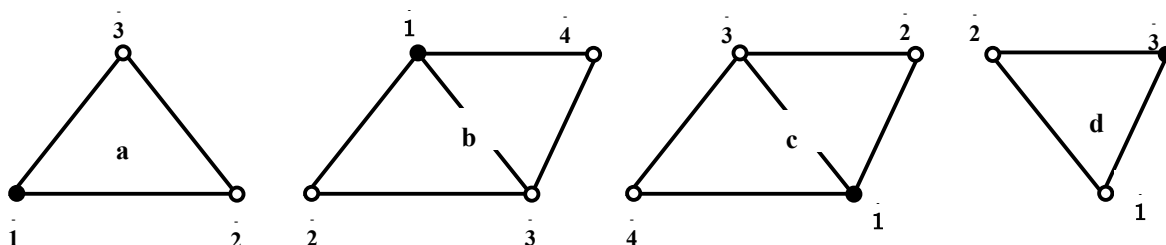


Figure 17. Local elements clusters

まず, 全体行列による計算について述べる. なお, 実際は 2 次元の場合は 2 自由度, 3 次元の場合は 3 自由度であるが, 簡単のため自由度は 1 と仮定した. 図 16 の有限要素モデルにおいて, 図 17 のように分割した各局所要素群での係数マトリックスは以下ようになる. なお, 図 17 中の黒丸は中心節点となる節点を表している.

$$\begin{bmatrix} a_{11}^a & a_{12}^a & a_{13}^a \\ a_{21}^a & a_{22}^a & a_{23}^a \\ a_{31}^a & a_{32}^a & a_{33}^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11}^b & a_{12}^b & a_{13}^b & a_{14}^b \\ a_{21}^b & a_{22}^b & a_{23}^b & a_{24}^b \\ a_{31}^b & a_{32}^b & a_{33}^b & a_{34}^b \\ a_{41}^b & a_{42}^b & a_{43}^b & a_{44}^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11}^c & a_{12}^c & a_{13}^c & a_{14}^c \\ a_{21}^c & a_{22}^c & a_{23}^c & a_{24}^c \\ a_{31}^c & a_{32}^c & a_{33}^c & a_{34}^c \\ a_{41}^c & a_{42}^c & a_{43}^c & a_{44}^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11}^d & a_{12}^d & a_{13}^d \\ a_{21}^d & a_{22}^d & a_{23}^d \\ a_{31}^d & a_{32}^d & a_{33}^d \end{bmatrix} \quad (1)$$

これを、全体系に重ね合わせると以下のような全体行列となる.

$$(2) \quad \begin{bmatrix} a_{11}^a + a_{22}^b + a_{44}^c & a_{13}^a + a_{21}^b + a_{43}^c & a_{12}^a + a_{23}^b + a_{41}^c & a_{24}^b + a_{42}^c \\ a_{31}^a + a_{12}^b + a_{34}^c & a_{33}^a + a_{11}^b + a_{33}^c + a_{22}^d & a_{32}^a + a_{13}^b + a_{31}^c + a_{23}^d & a_{14}^b + a_{32}^c + a_{21}^d \\ a_{21}^a + a_{32}^b + a_{14}^c & a_{23}^a + a_{31}^b + a_{13}^c + a_{32}^d & a_{22}^a + a_{33}^b + a_{11}^c + a_{33}^d & a_{34}^b + a_{12}^c + a_{31}^d \\ a_{42}^b + a_{24}^c & a_{41}^b + a_{23}^c + a_{12}^d & a_{43}^b + a_{21}^c + a_{13}^d & a_{44}^b + a_{22}^c + a_{11}^d \end{bmatrix}$$

ここで、という行列・ベクトル積を考えると、以下のような演算となる. ただし、ここでは $\mathbf{b}=\mathbf{A}\mathbf{x}$ という演算とする.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^a + a_{22}^b + a_{44}^c & a_{13}^a + a_{21}^b + a_{43}^c & a_{12}^a + a_{23}^b + a_{41}^c & a_{24}^b + a_{42}^c \\ a_{31}^a + a_{12}^b + a_{34}^c & a_{33}^a + a_{11}^b + a_{33}^c + a_{22}^d & a_{32}^a + a_{13}^b + a_{31}^c + a_{23}^d & a_{14}^b + a_{32}^c + a_{21}^d \\ a_{21}^a + a_{32}^b + a_{14}^c & a_{23}^a + a_{31}^b + a_{13}^c + a_{32}^d & a_{22}^a + a_{33}^b + a_{11}^c + a_{33}^d & a_{34}^b + a_{12}^c + a_{31}^d \\ a_{42}^b + a_{24}^c & a_{41}^b + a_{23}^c + a_{12}^d & a_{43}^b + a_{21}^c + a_{13}^d & a_{44}^b + a_{22}^c + a_{11}^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

これにより、ベクトル が求まる. 以上が全体行列による行列・ベクトル積の計算である.

この計算に Lec-By-Lec 処理を施す. まず、式(4)のように局所要素群毎の行列を作成し、それを記憶する. この際に、一般的な Element-by-Element 処理の場合と異なるのは、局所要素群を生成する要素数は中心節点毎に異なってくる点である. この部分はプログラミングを行う際には十分注意が必要となる.

次いで、行列・ベクトル積では、以下の演算を行う. まず、局所要素群毎の行列と局所要素群毎のベクトルを掛け合わせる.

$$\begin{bmatrix} b_1^a \\ b_2^a \\ b_3^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^a & a_{12}^a & a_{13}^a \\ a_{21}^a & a_{22}^a & a_{23}^a \\ a_{31}^a & a_{32}^a & a_{33}^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^a \\ x_2^a \\ x_3^a \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} b_1^b \\ b_2^b \\ b_3^b \\ b_4^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^b & a_{12}^b & a_{13}^b & a_{14}^b \\ a_{21}^b & a_{22}^b & a_{23}^b & a_{24}^b \\ a_{31}^b & a_{32}^b & a_{33}^b & a_{34}^b \\ a_{41}^b & a_{42}^b & a_{43}^b & a_{44}^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^b \\ x_2^b \\ x_3^b \\ x_4^b \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} b_1^c \\ b_2^c \\ b_3^c \\ b_4^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^c & a_{12}^c & a_{13}^c & a_{14}^c \\ a_{21}^c & a_{22}^c & a_{23}^c & a_{24}^c \\ a_{31}^c & a_{32}^c & a_{33}^c & a_{34}^c \\ a_{41}^c & a_{42}^c & a_{43}^c & a_{44}^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^c \\ x_2^c \\ x_3^c \\ x_4^c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} b_1^d \\ b_2^d \\ b_3^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^d & a_{12}^d & a_{13}^d \\ a_{21}^d & a_{22}^d & a_{23}^d \\ a_{31}^d & a_{32}^d & a_{33}^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^d \\ x_2^d \\ x_3^d \end{bmatrix}$$

ただし、

$$\begin{bmatrix} x_1^a \\ x_2^a \\ x_3^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x_1^b \\ x_2^b \\ x_3^b \\ x_4^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x_1^c \\ x_2^c \\ x_3^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x_1^d \\ x_2^d \\ x_3^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_4 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

である。続いて、以上の要素ごとに得られたベクトルを全体系に重ね合わせるにより、行列・ベクトル積は完了する。

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1^a + b_2^b + b_4^c \\ b_3^a + b_1^b + b_3^c + b_2^d \\ b_2^a + b_3^b + b_1^c + b_3^d \\ b_4^b + b_2^c + b_1^d \end{bmatrix} \quad (6)$$

以上の式(6)が式(1)とは等価になる。Lec-by-Lec 処理においては、行列を全体系で重ね合わせるのではなく、局所要素群毎のベクトルを計算し、それを全体系に重ね合わせる。つまり、自由度を n とすると、全体行列での計算では、 $n \times n$ の行列が必要であったのに対して、本提案手法においては、 $n_{\text{lecn}} \times n_{\text{lecn}} \times n_{\text{lecn}}$ の配列で良いことになる。

これは、大規模になればなるほど有利となる。これは使用メモリーの点でも全体剛性マトリックスを記憶する必要が無く、局所要素群毎の剛性マトリックスを記憶すれば良いので非常に効率的である。

図 18 に Lec-by-Lec 処理の健全性を示すために行った、簡単な片持ち梁を用いた数値解析結果である。

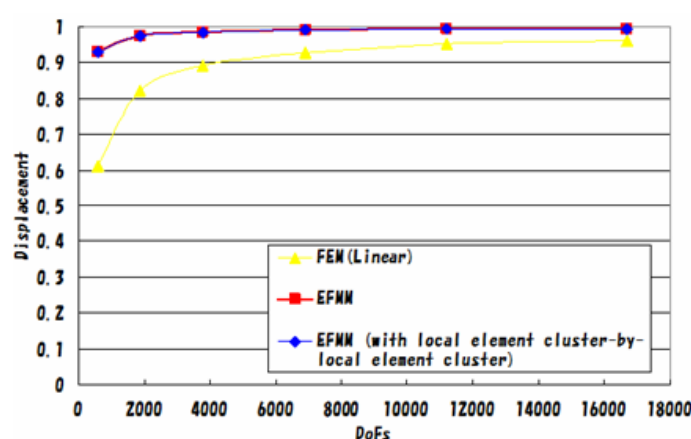


Fig 18. Accuracy comparison with FEM, EFMM and EFMM with present method

解析結果は Lec-by-Lec 処理の有無に関わらず全く同じ結果を得られていることが分かる。この結果は、Lec-by-Lec 処理の解析精度面での健全性を証明出来た事を意味している。

次に、本数値計算における EFMM 解析を 3 つのプロセスに分けた際の解析全体の計算時間を図 19 に示す。図中横軸に解析モデルの自由度数を、縦軸に計算時間全体における各プロセスの計算時間の割合を示している。つまり、図は解析モデルの自由度の増加と解析プロセスの割合の推移の関係を示している。

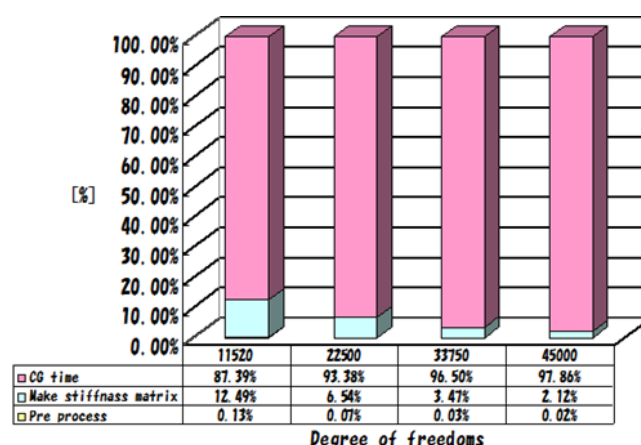


Fig 19. Percentage of computation time of each process in EFMM analysis.

具体的な解析プロセスは、節点データ等の解析条件を入力するプリプロセス、全体剛性マトリクスを生成するプロセス、そして連立一次方程式を解く為のプロセスの3つに分類をした。

図 19 から明らかなように、解析の際に最もネックとなっているのは、連立方程式を解くためのソルバー部分である事が分かる。わずか1万自由度程度の解析を行う場合にも、解析全体で連立一次方程式の開放の為に必要となる時間は、解析全体の87%を占めている。なお、連立一次方程式の解法の為に必要となる時間は、解析に用いるモデルの自由度数が上がれば上がるほど、解析全体の大部分を占めていく傾向にある事が分かる。

この問題に対して、Lec-by-Lec 処理を施すことで、このプロセスに要する時間をどの程度抑制することが可能となるのかについての検証結果を示す。

検証は先程示した数値解析と同様の解析を Lec-by-Lec 処理を施して行い、その際に必要となった解析時間を Lec-by-Lec 処理を施す前に必要であった時間で正規化した。

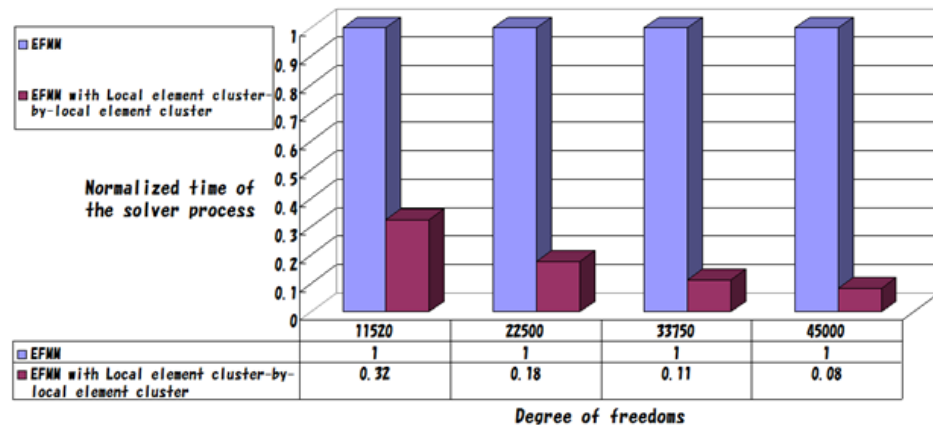


Fig 20. Computation time comparison with EFMM and EFMM with present method

図 20 から明らかなように、Lec-by-Lec 処理を施す事により、連立一次方程式の解法に必要な解析時間は大幅に減少させることが可能であることが分かる。

さらに、この解析時間の削減量は、解析対象の自由度が高くなれば高くなるほど、多くなる傾向になることが分かる。つまり、解析対象が大規模化すればするほど、本提案手法の効率は高くなり、より有効的な手法となる事を意味している。

更に、本提案手法には、従来の element-by-element 処理と同様、収束が速い方程式に変換してから反復解法を行う前処理を施す事が可能である。図 21 は、この前処理方法として、左辺行列の対角成分を前処理行列として対角スケーリング法を用いて、同様の解析を行った際の速度向上率を示したものである。

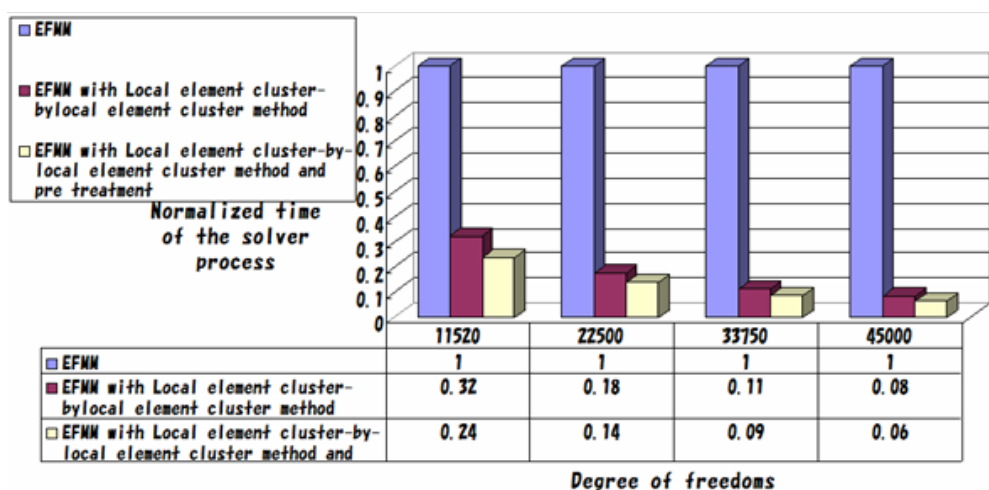


Fig 21. Computation time comparison with EFMM and EFMM with present method

図 21 が示すように, Lec-by-Lec 処理に前処理を施す事により, 連立一次方程式の解法に要する時間は更に短縮される.

これらの結果から, 本論文で提案した Lec-by-Lec 処理により, EFMM 解析プロセス中において最もネックとなる連立一次方程式の解法部分に要する時間を大幅に削減することが可能となることが示された. 特に, 本提案手法に対角スケーリング法等の前処理法を導入することでその速度向上率は, 更に高くなることも分かる.

この結果から, 従来の EFMM 解析では, わずか 11,520 自由度問題程度で, 解析全体の 85%以上の解析時間を占めていた CG 法による連立一次方程式の解法時間を, 本提案手法と前処理とを組み合わせて, 4 分の 1 程度に抑えることが可能となることが明らかとなった. この CG 法の為の時間は, 解析対象が大規模化すればするほど, よりその効果が顕著になる事は自明である.

つまり, Lec-by-Lec 処理は近年の大規模化が進む数値解析分野において EFMM 解析をより短時間で行う為, 非常に効果的且つ必要不可欠な手法である.

また, 使用メモリーについても, 当然全体剛性マトリクスを記憶する必要がなく, 細かい局所要素群の局所剛性マトリクスを記憶するのみであるので, こちらの観点からも非常に優れた手法といえる.

(3・2・2) 超大規模並列 EFMM コードの動的解析への拡張

本項では, 前項で述べた, Lec-by-Lec 処理を施した局所剛性マトリクスを考慮した並列 EFMM を動的問題へ拡張する際に用いる方法について述べる.

対象とする問題は, 剛性マトリクス $[K]$ が時間によって変化する非線形問題であるので, 微小区間 Δt で剛性マトリクスがほぼ等しいと仮定すると,

$$\begin{aligned} [M]\{\ddot{U}_n\} + [K(t_n)]\{U_n\} &= \{F_n\} \\ [M]\{\ddot{U}_{n+1}\} + [K(t_n)]\{U_{n+1}\} &= \{F_{n+1}\} \end{aligned} \quad (7)$$

上 2 式の差から, 増分表現をすると,

$$[M]\{\Delta\ddot{U}_n\} + [K(t_n)]\{\Delta U_n\} = \{\Delta F_n\} \quad (8)$$

ここに,

$$\begin{aligned} \{\Delta U\} &= \{U_{n+1}\} - \{U_n\} \\ \{\Delta\ddot{U}\} &= \{\ddot{U}_{n+1}\} - \{\ddot{U}_n\} \\ \{\Delta F\} &= \{F_{n+1}\} - \{F_n\} \end{aligned} \quad (9)$$

微小区間 Δt で、加速度が一定であると仮定すると、加速度は次式で示される.

$$\{\ddot{U}(t)\} = \frac{1}{2}(\{\ddot{U}_n\} + \{\ddot{U}_{n+1}\}) \quad (10)$$

上式を積分することにより、速度、変位が次式のように得られる.

$$\begin{aligned} \{\dot{U}(t)\} &= \{\dot{U}_n\} + \int_{t_n}^t \{\ddot{U}(t)\} dt = \{\dot{U}_n\} + \frac{1}{2}(\{\ddot{U}_n\} + \{\ddot{U}_{n+1}\})(t - t_n) \\ \{U(t)\} &= \{U_n\} + \int_{t_n}^t \{\dot{U}(t)\} dt = \{U_n\} + \{\dot{U}_n\}(t - t_n) + \frac{1}{4}(\{\ddot{U}_n\} + \{\ddot{U}_{n+1}\})(t - t_n)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

上式より、時刻 $n+1$ の速度と変位は次式になる.

$$\begin{aligned} \{\dot{U}_{n+1}\} &= \{\dot{U}_n\} + \frac{1}{2}(\{\ddot{U}_n\} + \{\ddot{U}_{n+1}\})\Delta t \\ \{U_{n+1}\} &= \{U_n\} + \{\dot{U}_n\}\Delta t + \frac{1}{4}(\{\ddot{U}_n\} + \{\ddot{U}_{n+1}\})\Delta t^2 \end{aligned} \quad (12)$$

増分変位で表すと、

$$\begin{aligned} \{\Delta \dot{U}\} &= \{\dot{U}_n\}\Delta t + \frac{1}{2}\{\Delta \ddot{U}\}\Delta t \\ \{\Delta U\} &= \{\dot{U}_n\}\Delta t + \frac{1}{2}\{\ddot{U}_n\}\Delta t^2 + \frac{1}{4}\{\Delta \ddot{U}\}\Delta t^2 \end{aligned} \quad (13)$$

また、式(8)から

$$\{\Delta \ddot{U}\} = -[M]^{-1}[K(t_n)]\{\Delta U\} + [M]^{-1}\{\Delta F\} \quad (14)$$

(13)式と(14)式を変位増分 $\{\Delta U\}$ について解けば、

$$\{\Delta U\} = [\bar{K}]^{-1}\{\Delta \bar{F}\} \quad (15)$$

ここに,

$$\begin{aligned} [\bar{K}] &= [K(t_n)] + \frac{4}{\Delta t^2} [M] \\ \{\Delta \bar{F}\} &= \{\Delta F\} + [M] \left(\frac{4}{\Delta t} \{\dot{U}_n\} + 2\{\ddot{U}_n\} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

式(15)から, $\{\Delta U\}$ が求まれば, 式(13)から次式により速度増分, 加速度増分が求められる.

$$\begin{aligned} \{\Delta \ddot{U}\} &= \frac{4}{\Delta t^2} \{\Delta U\} - \frac{4}{\Delta t} \{\dot{U}_n\} - 2\{\ddot{U}_n\} \\ \{\Delta \dot{U}\} &= \frac{2}{\Delta t} \{\Delta U\} - 2\{\dot{U}_n\} \end{aligned} \quad (17)$$

以上の計算を繰り返す事によって, 時々刻々の応答を求める.

さて, 式中の質量マトリックスの取り扱いについて, 並列動的 EFMM を用いた解析を行う際には, 以下のアルゴリズムを適用する.

全体の質量を M とする場合, 下記のように表す.

$$\frac{M}{NoEs} = m \quad (18)$$

本研究では, 質量マトリックス $[M]$ を全体集中質量マトリックスとするので, 下記の式(19)ように表し, 式(16)のように, $[K]$ マトリックスと $\{\Delta F\}$ ベクトルを変形する.

$$\begin{bmatrix} m & & & & & & \\ & m & & & & & \\ & & m & & & & \\ & & & m & & & \\ & & & & \ddots & & \\ & & & & & \ddots & \\ & & & & & & m \\ & & & & & & & m \\ & & & & & & & & m \\ & & & & & & & & & m \end{bmatrix} \quad (19)$$

この時, Lec-By-Lec 処理を施し, 且つ, 我々が提案している並列 EFMM のアルゴリズムを用いると, 上式のように単純に質量を当分布する事が出来ないので, 各局所要素クラスターの集中質量マトリックスを算出する場合には, 各節点がクラスター内で寄与するカウントし, 下記の式で各節点の質量を算出する.

$$\left(\frac{1}{3} \times \frac{m}{l}\right) \times n \quad (20)$$

ここで,

l: 全体のモデル中で寄与する回数(2次元:3回, 3次元:4回)

m: 各要素の質量

n: カウント数

で, ある.

すると, Lec-by-Lec 処理型の集中質量マトリックスは下記のようになる.

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{3} \times \frac{m}{l}\right) \times n & & & & & \\ & \left(\frac{1}{3} \times \frac{m}{l}\right) \times n & & & & \\ & & \left(\frac{1}{3} \times \frac{m}{l}\right) \times n & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & \left(\frac{1}{3} \times \frac{m}{l}\right) \times n \\ & & & & & & \left(\frac{1}{3} \times \frac{m}{l}\right) \times n \\ & & & & & & & \left(\frac{1}{3} \times \frac{m}{l}\right) \times n \\ & & & & & & & & \left(\frac{1}{3} \times \frac{m}{l}\right) \times n \end{bmatrix} \quad (21)$$

上記のように, Lec-By-Lec 処理型集中質量マトリックスを用いることで, 我々が提案した並列 EFMM アルゴリズムを動的解析に用いる事が可能となる.

なお, 解析精度の健全性の評価として, 単一解析時と同様の結果が得られる事を確認している.

(3・2・3) まとめ

前述のように, Lec-by-Lec 型の処理を施し, 且つ, 我々が提案している並列化手法による中心節点や衛星節点のオーバーラップを考慮したうえで, 質量マトリックスを変形させる事で, 並列 EFMM を動的解析へ拡張する事が可能となった.

(4) 平成 28 年度進捗状況

今年度は前章で述べた通り、下記の 2 つのテーマについて主に研究を行った。

1. 超大規模並列 EFMM の高速化
2. 超大規模並列 EFMM の動的解析への拡張

超大規模並列 EFMM の高速化に関しては、前年度までに明らかになっていた問題をある程度改善する事が出来、更なる高速化が可能となった。

本稿で示したような、簡単な試験しか行っていないが、1 億自由度規模の超大規模構造解析においても、十分に適用可能であり、従来の手法より様々な、利点を有することから、今後本手法により様々な問題の解明が行われる事が期待できる。

また、超大規模並列 EFMM の動的解析への拡張においては、我々が提案している並列 EFMM のアルゴリズムと、EFMM の高速化手法の一種である Lec-By-Lec 型の処理を施した際にも適用する事が可能となるアルゴリズムを提案・実装した。

本手法の導入により、超大規模並列動的 EFMM による 1 億自由度規模の超大規模動的構造解析も容易に行う事が可能となったと言える。

(5) まとめ

本稿は、2017 年 1 月に設定された原稿の締め切りの関係から、研究の目的として挙げていた本提案手法と、「新規実験・計測グループ」が行った実験結果との比較検証までを示す事が出来なかった。

しかしながら、本年度までに我々が得た研究成果である、EFMM の超大規模並列化及び、動的解析用のアルゴリズムの確立により、SUPG/PSPG 安定化 FEM との組み合わせによる、解析精度の健全性が保証されている格子法のための手法である本手法は、実験により得られた流体-構造連成現象の発生メカニズムを数値解析により明らかにする事は十分可能となる事が期待できる。

また、応用研究として、本解析手法を用いる事で、今後は未知の流体-構造連成現象を解明していく為のアプローチも十分可能であると考えられる。

より、高速な流体-構造連成解析手法を確立する為には、並列 EFMM の複数節点がオーバーラップする問題を考慮した領域分割手法が確立されれば、既存の並列解析手法における最大のボトルネックは解消される。

この問題を解消する事で、より幅広く、且つ、社会のニーズに答えられるような現象を対象とした研究に役立つ事が期待できる事から、我々はこの問題の解消が、今後の研究の重要な課題の一つであると考えられる。

3.1.2. 深層学習を用いた連成解析結果予測

(1) 目標・計画

本研究では、流体-構造連成解析を行い、自己組織化マップ(Self-Organizing Map : SOM)^[1]などの機械学習技術を用いて解析データの分類を行い、解析条件から解析結果を予測することができる技術を開発することを目的としている。分類と予測の両方を包括する mnSOM(modular network SOM)を用いて学習を行う。このときモジュールは MLP(Multi Layer Perceptron)を用いる。しかし、連成問題は非線形性が非常に強く、mnSOM での予測には限界があった。そこで、深層学習(Deep Learning)の考えを取り入れた予測技術の開発を目指す。これは Google を始め各企業や研究所でも注目されている技術で、画像認識や音声認識において、既存の技術よりも遥かに良い性能が得られることが知られている^{[2][3]}。

本研究の予測技術を確立すると、解析の大まかな結果を得ることで、詳細な解析をするための手がかりが提示できると考える。このことにより、機器や構造物設計における全体の解析時間を短縮できると期待できる。

今年度は、mnSOM のモジュールに Deep Learning の技術を組み込んだ Deep mnSOM を開発した。また、既存の MLP や mnSOM と Deep Learning による予測結果を比較検討し本研究の総括とする。

(2) 意義・国際社会との比較

現在、解析対象の複雑化や大規模化から、計算時間がボトルネックにある。並列計算機を使うのは当然で、GPU を用いた解析方法も数多く見られる。しかしながら、計算量は膨大で、1ケース解くのに数日から数週間かかることもある。設計技術者は目的の解析結果を得るのに何度も解析を繰り返す必要がある。そこで、予めある程度の解析結果が分かれば試行回数を削減し、設計における全体の解析時間を短縮できると考えられる。ある事象を数値解析を行わないで解析結果を予測するという試みは、全く新しいものであり、学術的かつ実用的な側面を兼ね備えており、国際社会においても重要な位置づけとなる研究のひとつであると考えられる。

(3) 研究内容

Deep Learning は入力次元の大きいデータ(ビッグデータなど)をマイニングしたり分類、学習したりする。また、強い非線形性を持つ問題の学習にも非常に効果的であり、流体-構造連成解析など

の複雑な問題にも応用可能と期待できる。

本研究で使用する Deep Learning 技術は Deep Autoencoder (Deep AE)である。これは Autoencoder (AE)を複数重ねたネットワーク構造を持ち、出力層では通常の Back Propagation (BP)法を用いて学習する。

Deep AE は各層の AE は独立で処理を行い、上位の層(入力層側の層)の中間層を下位の層(次の層)の入力層として用いることで、ネットワーク全体が結合する(Fig.1)。AE の各層は入力層と同じ次元の出力層を持ち、入力ベクトルを再現する出力ベクトルを学習によって獲得する。このときに中間層を入力層より小さいサイズにすることにより、入力データを圧縮し、入力データを再構成するための最低限必要な特徴量を抽出することができる。この特徴抽出により、大規模データを効率良く学習することが可能となる。

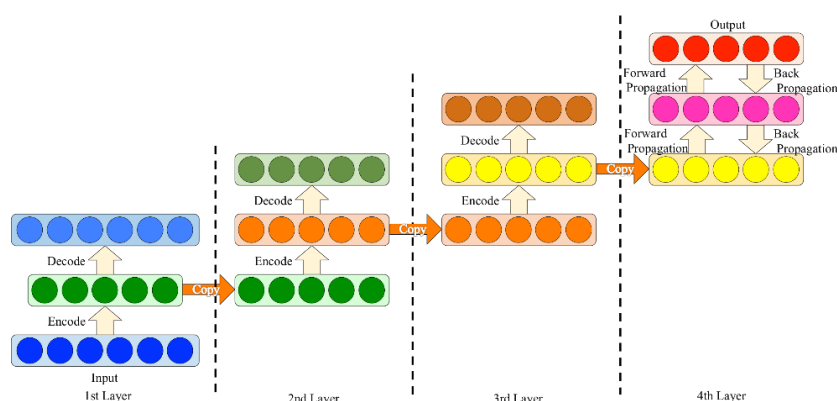


Fig.1 Example of Deep Autoencoder

この Deep Learning 手法では、上記の AE 部の学習を pre-training と呼び、教師なし学習による入力データの圧縮、特徴抽出を目的とした。教師あり学習部分を fine-tuning と呼び、主に BP 法を用いて教師データの入力ベクトルと出力ベクトルを補間する。この fine-tuning は最終層でのみ行う場合や、ネットワーク全体で行う場合など、多種多様に処理される。最終層でのみ fine-tuning を行う場合は、事前の層で必要な特徴が抜き出せると仮定して、入力ベクトルを圧縮し、最終層の BP 法を効率良く行うための方法である。一方、ネットワーク全体を fine-tuning する方法は、AE は MLP の結合荷重の適切な初期値を得るために用い、MLP の学習を効率化させる。どちらの方法も学習は効率化され、単純な MLP 学習より学習精度の大きな向上が見込める。

構築した Deep AE を用いてベンチマーク問題である MNIST^[4]の手書き数字認識を行った。MNIST のデータは 28×28pixels の画像で、6 万枚の学習データと 1 万枚の検証データが用意されたデータセットである。1 画像に 0~9 の数字が描かれていて、この数字の画像に対応している 0~9 のいずれかの数字がラベルとしてリンクされている。データセットの画像の一例を Fig.2 に示す。

使用したネットワーク構成は{784-500-300-10}の4層構造で、それぞれ、入力層のニューロン784、中間層を500, 300ニューロン、出力層を10ニューロンとした(Fig.3). 入力層から784-500-300までの3層をAEで圧縮し、500-300-10の3層でBP法を用いて教師あり学習を行った。ここでは、学習の可否を判断したいので、学習データ、検証データ共に1,000枚で学習を行った。学習後に検証データを用いて正答率を求めた結果をTable 1に示す。また、同じ学習データの3層型MLPの結果も同様に示す。Table 1より、Deep AEが明らかに予測精度を向上させていることがわかる。また、用いるニューロン数はMLPより少なくとも高い予測精度を実現することわかった。これはAEによる入力次元の圧縮による特徴量の抽出と、BPのための初期重みの最適化が行われた結果だと考えられる。

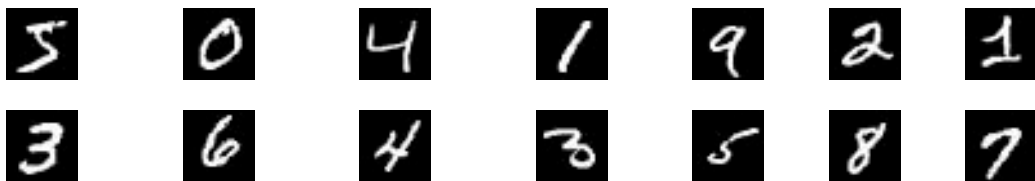


Fig.2 Figures of Handwritten character

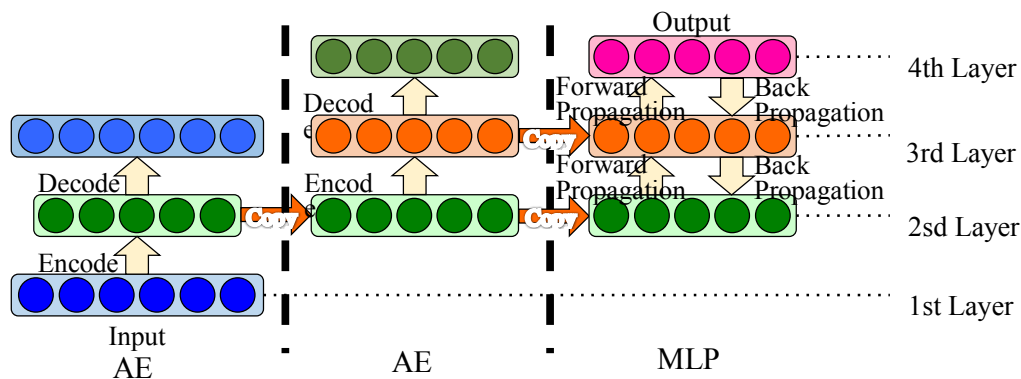


Fig.3 Schematic of Deep AE for MNIST

Table 1 Recognition Result of MNIST

	MLP	Deep AE
Recognition Rate	73.0%	85.1%
Number of Neurons (hidden)	1500	800

次に、本研究の予測対象である流体-構造連成解析について述べる。今回は簡単のため流体解析の移動境界問題を解くこととした。移動境界問題であっても、流体-剛体連成といえ、解の複

雑性, 非線形性は十分にある. 解析対象は 2 次元円柱の振動を対象とする(Fig.4). 円柱は流れと垂直方向にバネダンパモデルで弾性支持され, 流体解析より得られた流体力を用いて速度 Verlet 法により変位量を求める. また, メッシュスムーthingによりメッシュ制御を行った. 解析には ADVENTURE_Fluid^[5]を ALE 法用書き換えて用いる. メッシュは四面体要素を用いる. ADVENTURE_Fluid の四面体用コードは P1-P1 要素をベースとして SUPG/PSPG 法による安定化が施されている. 解析モデルのメッシュを Fig.5 に示す. メッシュは円周方向に 256 点, 法線方向に 64 点とした. 解析は定常状態になるまで計算した.

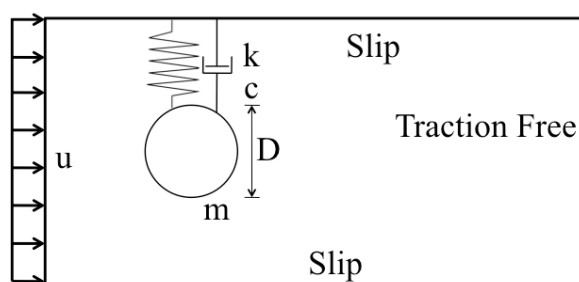


Fig.4 Schematic of Analysis Model

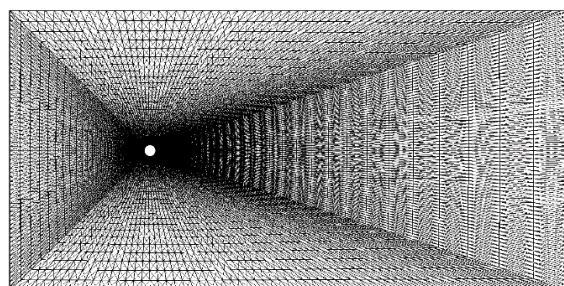


Fig.5 Mesh of Analysis Model

教師データとして, 解析の初期条件から流体力や円柱の変位量を導くようなデータセットを作成した. 機械学習の入力項目と出力項目を Table 2 に示す. データセットは学習用に 48 データ, 検証用に 22 データを用意した. データセットのそれぞれの値は最大値と最小値を用いて 0~1 で正規化した. 学習には上記に示した Deep AE を用いて学習させた. 用いた Deep AE の概略図を Fig.6 に示す. ここでは, 入力側から 6-50-50-50-5 の 5 層のネットワークになっている. AE は入力側の 2 層で用いて, 出力側 3 層で BP 法による教師あり学習を行う. また, 3層型 MLP と mnSOM との予測精度を比較した. MLP は中間層を 900 ニューロンと設定した. mnSOM はモジュール数を 10×10 の 100 とし, モジュールは中間層ニューロン数を 50 とした 3 層型 MLP とした. 学習係数は 0.01 とし, 繰り返し学習回数は 10,000 回とし, 全手法で同条件に設定した. 学習後のネットワークに検証

データを入力し得られた予測誤差を Table 3 に示す. 予測誤差は機械学習が出力した予測値と解析値(真値)との差の割合で, 次式で定義する.

$$error = \sum_o \left(\frac{|predict - correct|}{correct} \right) \quad (1)$$

$$average = \frac{\sum_n error}{N} \quad (2)$$

$$maximum = average_n(error) \quad (3)$$

ここで, O は出力ベクトルの次元, $predict$ は機械学習の予測値, $correct$ は解析値である. $average$ は誤差の総和をデータセット数 N で割った値で, 検証データにおける予測誤差の平均値を示している. $Maximum$ は検証データ内で最大の予測誤差を示す.

Table 2 Inputs and Outputs for Machine Learning

Inputs	Symbols [Unit]	Ways
Mass of Cylinder	m [kg]	0.5 1.0
Spring Constant	k [kg/s]	0.5 1.0
Dumper	c [kg/s ²]	0.0 0.01
Reynolds Number	Re [-]	100 500 1000
Natural Frequency of Cylinder	f _N [Hz]	-
Outputs	Symbols [Unit]	Ways
Amplitude of Cylinder	A _c [m]	-
Frequency of Cylinder	f _c [Hz]	-
Maximum Coefficient of Lift	C _L [-]	-
Strouhal Number	St [-]	-
Average Coefficient of Drag	C _D [-]	-

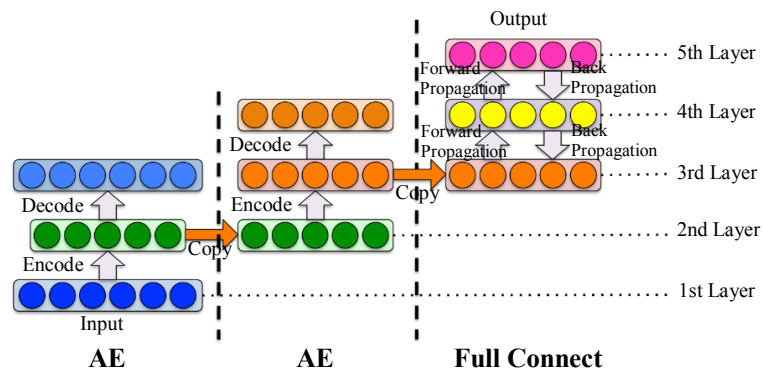


Fig.6 Schematic of Deep AE for FSI Analysis

Table 3 Error Rates of learning result

	MLP	mnSOM	Deep AE
Average error	73.5 %	51.3 %	53.1 %
Maximum error	230.3 %	214.1 %	227.3 %
Number of Neurons (hidden)	900 neurons	50 × modules (5000 neurons)	50 × Layers (150 neurons)

Table 3 より, 平均誤差は MLP より mnSOM と Deep AE は明らかに改善された. 最大誤差は 3 つの手法で大きな差異は見られなかった. 最大誤差を記録する検証データはどの手法でも同じデータで見られ, 問題特有の可能性も考慮する必要があると考えられる. 一方で, 中間層に使用するニューロン数と予測誤差を比較すると, MLP は 900 個のニューロンを用いても予測精度は他の手法と比べ低かった. 問題の非線形性が強いことにより, MLP では予測精度が上がらなかったと考えられる. mnSOM は平均の予測精度が一番高くなった. これは入力ベクトルをマップ上に分類し, 入力に適したモジュールを選択的に用いることで, 良い予測精度が得られたと考えられる. しかし, モジュール数を十分に用意する必要があり, その分中間層ニューロン数は増大する. Deep AE は 3 手法の中で最も少ないニューロン数で mnSOM と同等の予測精度を得られた. 階層を深くすることで MLP は解けないような非線形性の強い問題に対応でき, pre-training による入力ベクトルからの特徴量抽出により mnSOM のような予測精度を実現できることが確認できた. 今回用いた Deep AE の階層はさほど深くなく, ハイパーパラメータのチューニングも行っていない比較的単純な構成のネットワークである. より深い階層を構築しハイパーパラメータのチューニングを行うことで予測精度を向上させることが可能であると考えられる. また, 今回の入力項目は初期条件であったが, メッシュ情報やその物理量を入力に与えるなどの学習の方法も考えられる. このような比較的連続性のある情報を扱う場合 CNN (Convolutional Neural Network)を用いて学習したり, 時系列を考慮できる RNN(Recurrent Neural Network)を用いて学習したりすることができ, パラメータを用いる学習よりも情報量が増し, 予測精度が上がる場合もあると考えられる.

次に, mnSOM のモジュールを Deep AE に変更した Deep mnSOM を提案する. mnSOM による入力ベクトルの分類を行い Deep AE モジュールを選択的に用いることで予測精度が向上すると考えられる. 今回は前述のベンチマーク問題 MNIST を用いて, 学習精度を検証する. 前述と同様, 学習データ, 検証データにそれぞれ 1,000 データを用いる. 手書き数字認識のカテゴリ数は 10 なので, 5×5 の mnSOM 用のマップを用いた. mnSOM を持ちうるためモジュールのニューロン数を少し削減し, 代わりに階層を 1 層深くした 784-256-64-16-10 のネットワークとした. 入力層側から 4 層を AE で pre-training し, MLP の初期重みを決定し, ネットワーク全体を BP 法で学習させる. このとき,

SOM 同様に近傍学習法に基づき学習係数を決定する. 近傍学習の方法は 3 通り考えられ, それぞれを以下に示す.

- Case 1. 学習の1ステップごとに MLP の出力を求め, MLP の出力値を基に各モジュール間で近傍関数を設定する方法. (MLP)
- Case 2. Pre-training における入力ベクトル再現度を基に各モジュール間で近傍関数を設定する方法. (AE)
- Case 3. Case 2 のように Pre-training における入力ベクトル再現度を基に AE を近傍学習させ, Case 1 のように MLP の出力を基に MLP を近傍学習させる方法. (Both)

Case 1 は構造が一番単純で, 実装しやすく, mnSOM の考え方に忠実であるが, 入力のカテゴリ, 特徴抽出における近傍学習の効果が得られるかはわからない. Case 2 は pre-training で近傍学習係数を設定する方法であるため, 入力ベクトルの分類, 特徴抽出において効果が発揮されると期待できるが, pre-training の反復回数と fine-tuning の反復回数が異なると, MLP 学習時に近傍関数が使いまわさなく, なんらかの補間処理が必要となる. Case 3 は Case 1, Case 2 をそれぞれ独立に扱い, それぞれの場合で近傍関数を設定する方法である. それぞれのフローチャートを Fig.7 に示す. フローチャート中の BMM search を行う箇所がそれぞれで異なっていることがわかる.

今回は構成が一番単純な Case 1 を実装した. 学習は入力層側から 4 層を AE による pre-training を行い, MLP の初期重みを決定し, ネットワーク全体を BP 法で学習する. このとき SOM 同様に近傍学習法に基づき, 学習係数を決定する. 近傍学習は MLP の出力と正解のラベルとの平均二乗誤差を求め, 最小のモジュールを勝者モジュール(Best Matching Module: BMM)として, 勝者モジュールとその近傍のモジュールでネットワークの重みの修正を行う. 近傍学習の影響範囲を表す近傍半径は 3(勝者モジュールから半径 3 の距離)を初期値として, 学習ステップが進むにつれて単調減少させていき, 最終的には 1(勝者モジュールのみ)となるように設定した. mnSOM の学習の繰り返し回数は 1,000 回とし, モジュールの学習回数は 50 とした. つまり, フローチャートでいう BMM search が 1,000 回行われ, 各 mnSOM 学習ステップで決定された学習係数で 50 回 pre-training と fine-tuning を繰り返す.

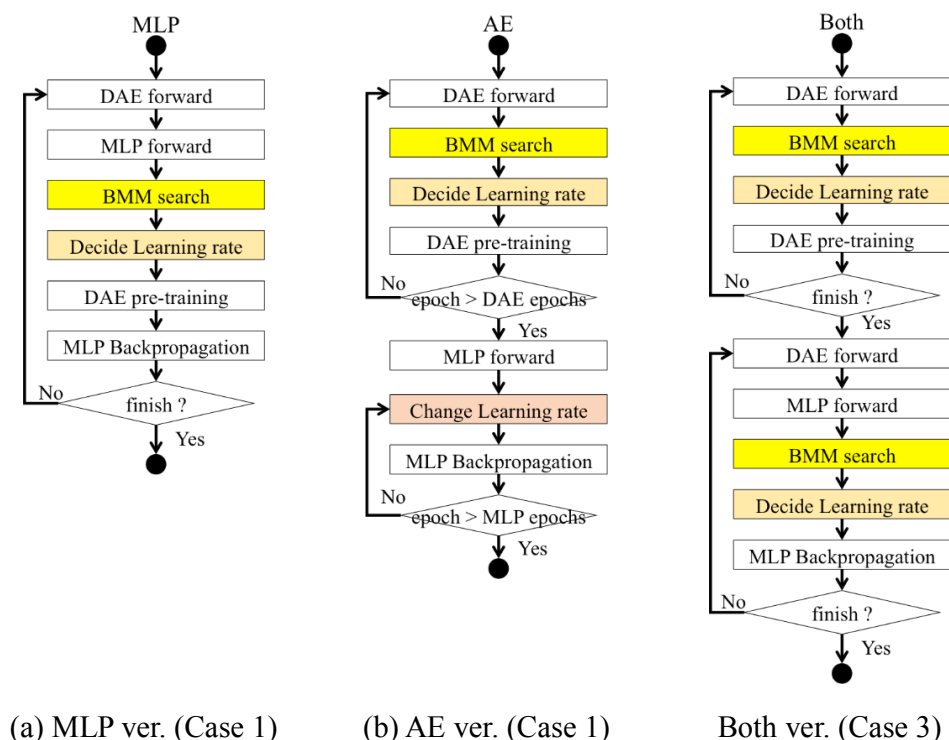


Fig.7 Flowchart of Deep mnSOM Algorithm

学習は途中であるが、学習成果が表れ始めてきている。Table 4 にその経過を示す。Table 4 は Deep mnSOM のモジュール出力の誤差を表示し、赤字は誤差が最小となるモジュール(勝者モジュール)の誤差値である。検証用データの“7”と“9”が似ている画像となるので近くに勝者モジュールが配置されていることがわかる。また、微妙な違いを認識していて、“7”が入力されたときには“9”で勝者に選ばれるモジュールの誤差は大きくなり、逆もまた同様である。“2”に関しては左下に勝者モジュールが配置され、“7”、“9”とは異なるものとして認識し、なおかつ遠い位置に配置することでマップ空間上でも“7”、“9”とは全くの別物として認識していることがわかる。また、SOM の特徴である、競合学習により勝者モジュールの周りのモジュールの誤差値も小さくなっている傾向が見られることから、判別しにくい画像が入力されても、ある程度の推論が可能であると期待できる。このことから、Deep mnSOM は手書き数字をマップ上に分類することができ、その数字がなんであるのかを認識することができると考えられる。

Table 4 Prediction errors of Deep mnSOM (epochs=60)

Handwritten Digit “2”

7.377	7.276	1.148×10	1.612×10	1.323×10
6.262	3.112	9.614	1.257×10	1.612×10
4.921	5.148	5.901	8.828	9.899
2.530	8.023	2.726	5.311	7.605
0.815	2.267	8.702	6.407	5.739

Handwritten Digit “7”

7.541	4.077	7.059	1.190×10 ⁻⁷	1.232×10
8.042	1.370	1.320×10	1.245×10	1.612×10
1.477×10	7.652	5.634	1.022×10	1.035×10
7.546	1.475×10	4.700	6.135	8.887
1.191×10	1.245×10	1.498×10	1.105×10	7.863

Handwritten Digit “9”

3.174	2.77	4.681	1.611×10	5.683
4.204	9.605	4.397	1.040×10	1.612×10
1.172×10	4.602	5.425	1.416×10	9.989
5.797	1.221×10	4.564	7.446	8.092
1.478×10	1.311×10	1.007×10	5.227	7.875

Deep mnSOM の学習はニューロン数の増大により、非常に計算時間がかかるため、本誌での学習後の予測誤差をまとめることは間に合わなかったが、学習傾向にあることは明らかである。

(4) 平成 28 年度進捗状況

Deep Learning 技術を用いた機械学習コードを作成し、ベンチマーク問題が解けることを確認した。同技術を用いて連成解析結果の予測を行い、従来手法である 3 層型 MLP と mnSOM との比較を行った。また、Deep mnSOM を提案し、その開発を行い、ベンチマーク問題を試行した。学習の途中ではあるが、学習傾向にあることが確認できた。

連成解析結果の予測精度は現段階では実用性には欠けるが、Deep mnSOM を持ちこすることで、より高精度な予測ができると期待できる。

(5) まとめ

本研究は、流体-構造連成問題の解析結果を予測することで、複雑な解析を用いない程度程度の妥当的な結果を導くことで、解析者を扶翼し、詳細な解析を行うための手助けを行うことができるシステムの開発を目的としている。その手段として、機械学習を用いて解析結果予測を行ってき

た。しかし、従来手法である 3 層型 MLP や mnSOM では十分な予測精度が得られなかった。そこで、深層学習(Deep Learning)技術に着目し、AE を用いた多階層型ネットワークを用いて解析結果予測を行った。

C 言語による Deep AE コードを作成し、ベンチマーク問題である MNIST の手書き数字認識を試行し、十分な学習精度が得られることを確認した。また、3 層型 MLP と予測精度の比較も行い、明らかに Deep AE の方が高い予測精度を有することが確認できた。

次に連成解析を行った。解析対象は 2 次元剛体円柱の振動問題とした。ADVENTURE_Fluid を移動境界問題に適応するように書き換えて解析を行った。メッシュはスムージングにより制御した。解析を 70 回行い、学習用データと検証用データを作成した。

作成した教師データを用いて 3 層型 MLP, mnSOM, Deep AE でそれぞれ学習させ、予測誤差を求めた。結果として mnSOM と Deep AE は同程度の予測誤差であったが、MLP よりは明らかに予測精度は向上していた。用いたニューロン数は Deep AE が最小となり、mnSOM が最大であった。このことより、階層を深くすることでネットワークの自由度が増し、非線形問題への対応力が向上したと考えられる。

mnSOM のモジュールを Deep AE に置き換えた Deep mnSOM を作成した。これは mnSOM の入力ベクトルの分類を行い、各モジュールに教師データを分配することで Deep AE の学習精度を向上させるというものである。このコードは Python 言語で作成し、Keras^[6]を用いて機械学習を実装している。今回はベンチマーク問題を解いている。学習には非常に多くの時間がかかるが、途中結果から学習傾向にあることがわかった。

この Deep mnSOM を用いて解析結果予測を行うことで、より高い精度の予測が可能となると期待でき、解析者をサポートするシステムになると考えられる。

参考文献

- [1] T.Kohonen, "Self-Organizing Maps", pringer-Verlag, 1995.
- [2] Quoc V. Le, Marc Aurelio Ranzato, Rajat Monga, Matthieu Devin, Kai Chen, Greg S. Corrado, Jeff Dean and Andrew Y. Ng, "Building High-level Features Using Large Scale Unsupervised Learning", Proceedings of the 29th International Conference on Machine Learning, 2012.
- [3] A.Krizhevsky, I.Sutskever, G.E.,Hinton, "ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks"
- [4] Yann LeCun, "The MNIST database of handwritten digits", <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/> (2017/01/19 アクセス)
- [5] ADVENTURE Project: <http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/> (2017/01/19 アクセス)
- [6] Keras: <https://keras.io/> (2017/01/19 アクセス)

3.1.3. 粒子法による粒子間インタラクションに着目した大規模数値シミュレーション

(1) 目標・計画

自由表面を扱う流体現象について粒子法(MPS 法)による大規模数値シミュレーションを行っている。特に、物体と流体の相互作用(FSI)に着目し物体および流体を形成する粒子間のモデル構築と検証を行っている。

2016 年度は応用例として、ミルククラウンとコップの縁から流れ落ちる液だれの現象について、粒子法(MPS)による大規模並列計算を行い、実験映像と比較して計算の妥当性について検証を行った。

(2) 意義・国際社会との比較

既存の数値流体シミュレーションにおいては、ほとんどが物体と液体の境界は滑りなし条件で解かれてきた。しかし、材質の表面性状の違いによって周囲の流れ場が変化する。例えば、落下物体が水面に衝突するときに生成されるスプラッシュ(飛沫)においては、同じ質量・体積で落下位置が同じ球であってもアクリル球とゲル球ではスプラッシュの形状や大きさが異なる^[1]。つまり、粒子間のインタラクション(この場合は壁と液体粒子間)に物性を表すモデルを導入して計算しないと実現象とかい離することを示唆している。本研究では、そのような物体の表面性状の違いを数値シミュレーションに導入するために、物体と流体の境界条件に表面性状の効果を記述するモデルを提案する。

(3) 研究内容

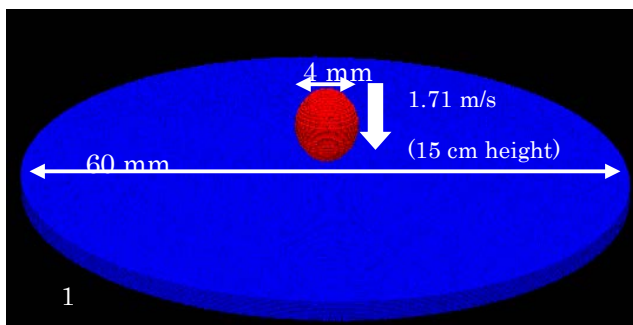
(i) ミルククラウンの大規模数値シミュレーション

ミルククラウンと呼ばれる水滴が落下し液相に衝突したときに発生するスプラッシュ現象を再現した。ミルククラウンは、表面張力が支配的な物理現象である。本研究では、流体解析に、MPS 陽解法を用い、表面張力モデルに近藤らの粒子間ポテンシャル力を用いた表面張力モデルを用いた。

計算点である粒子の直径を変化させ、直径 4 mm 液滴を、高さ 15 cm から落下させ、深さ 1mm の液体層に衝突させる解析を行った(Fig.1)。物性値は水とした。である。本節では、計算点である粒子直径を 0.2 mm, 0.1mm, 0.05mm, 0.025mm と変化させて、どの程度の粒子の直径が適切であるかを確認した。

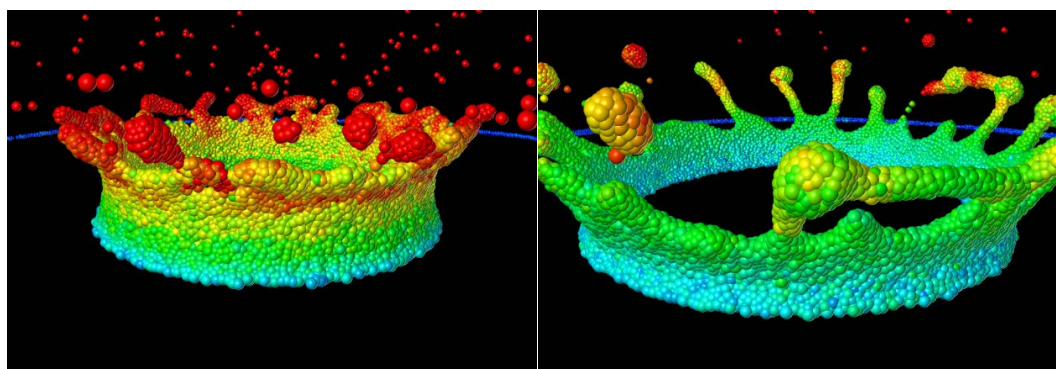
Fig.2 から Fig.5 に示すように、粒子の直径 0.2 mm, 0.1 mm, 0.05 mm, 0.025 mm の解析結果であり、色は速度の大きさである。Fig.4 の粒子直径 0.05 mm の解析や Fig.5 の粒子直径 0.025 mm の解析では、ミルククラウンの発生に成功している。Fig.4 の粒子直径 0.1 mm の解析では、クラウンの側面の壁に穴が開くなどして、非現実

的な現象が発生している。これは、粒子の直径が大きすぎて、クラウンの側面の壁の厚さ方向に十分な数の粒子を配置することができなくなったためである。Fig.3 の粒子直径 0.2 mm の解析では、粒子を繋ぎとめておくに必要な表面張力を発生させることができなくなっている。以上の結果から、最低でも粒子直径 0.05 mm, 可能なら粒子直径 0.025 mm の解析を行うことが求められることが分かった。



Kinematic viscosity	$1.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Surface tension contact angle	30°
Surface tension coefficient	0.04 N/m
Density	1030 kg/m^3

Fig.1 ミルクを想定したミルククラウンの計算条件



(a) 10 ms

(b) 24 ms

Fig.2 粒子直径 0.2 mm の解析結果

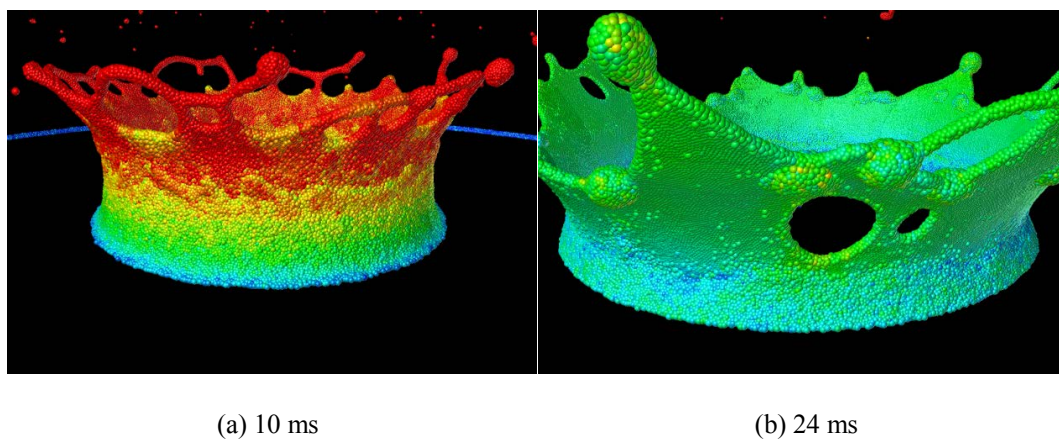


Fig. 3 粒子直径 0.1 mm の解析結果

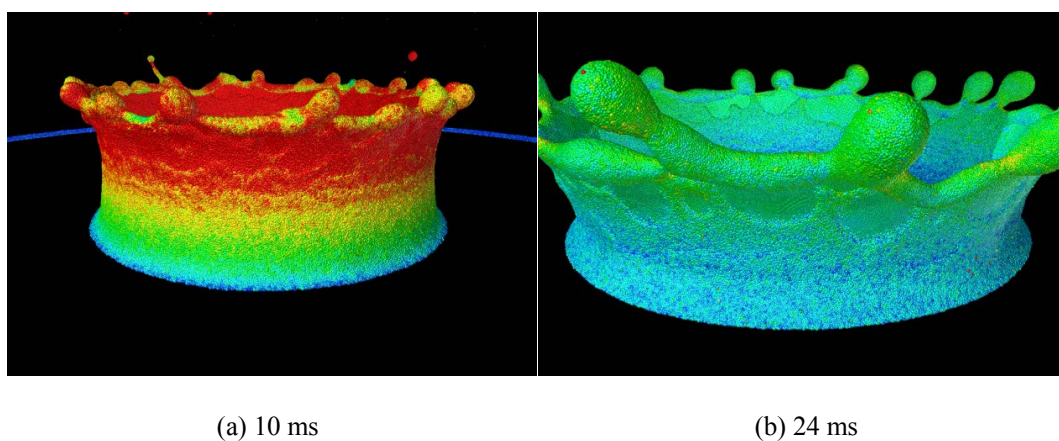


Fig.4 粒子直径 0.05 mm の解析結果

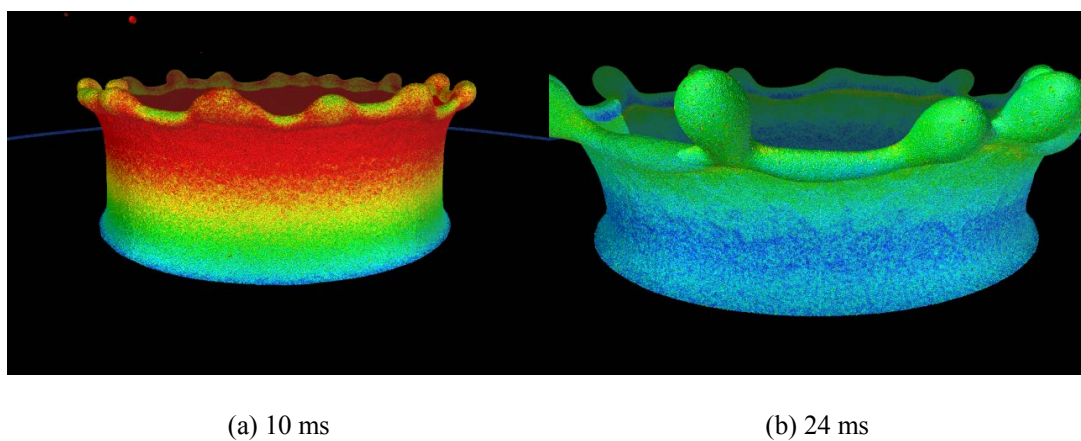


Fig.5 粒子直径 0.025 mm の解析結果

実験映像との比較については, Fig.6 にハイスピードカメラを用いた実験によるミルククラウン形成のスナップショットを示すが, Fig.5 のスパイクや全体形状としては似た結果が得られている. スパイクの数については, 実験では 4 回撮影したミルククラウンにおいて平均で 13.5 本であったが, Fig.4 では 14 本, また Fig.5 では 12 本であり, ほぼ同じ本数となった.

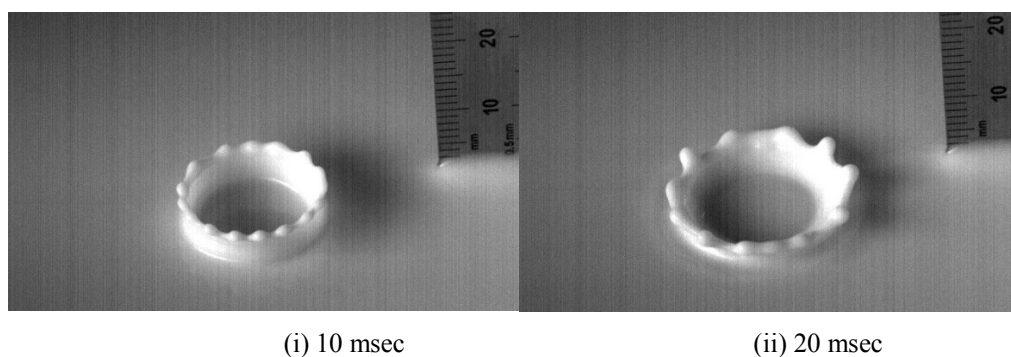


Fig. 6. ハイスピードカメラを用いたミルククラウンの実験映像.

Fig.6(i)はクラウンの根元における幅(直径)について, Fig.6(ii)はミルククラウンのスパイクの高さについて, 我々の解析結果と郡司ら^[2]の実験結果との比較を示す.

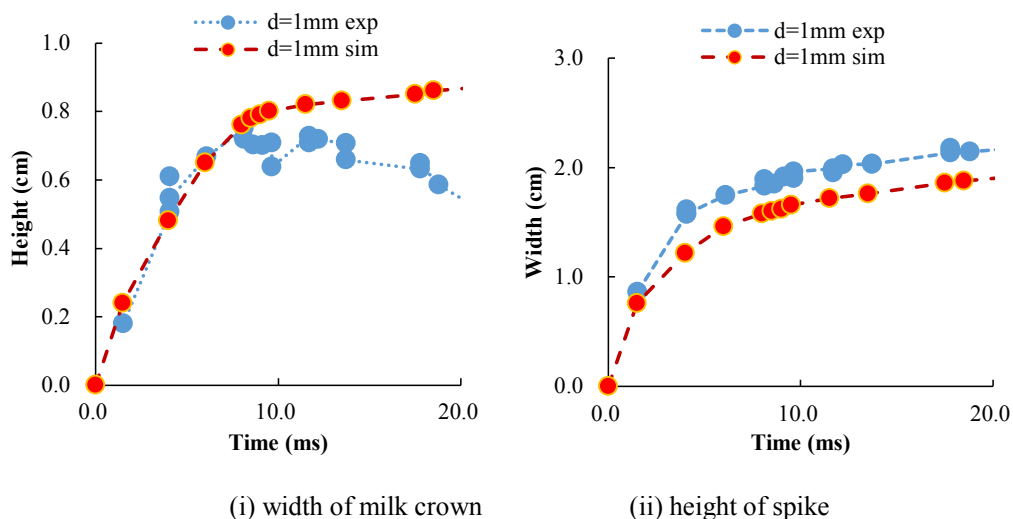


Fig.7 実験結果^[2]と計算結果の比較 (depth $d = 1$ mm).

(ii) 容器口から流れ落ちる液だれの大規模数値シミュレーション

水や調味料などの液体容器の設計時において液だれの発生を抑制するための考慮は重要な課題である. 本研究では容器口の縁付近の形状やその表面性状の差異による流体挙動への影響

を調査している. 液だれの現状の研究結果として, Fig.8 に実験結果と Fig.9 に数値シミュレーション結果の一例を示す.

実験に関しては, 3 次元プリンタにより縁の形状と表面性状の異なる容器を作成し, それらの容器から液体が流れ出る際の縁付近の流れを撮影した. 容器は, 開口部径 60mm, 深さ 50mm, 厚み 4mm で, 縁の断面形状は矩形であり, 素材は PLA 樹脂 (ポリ乳酸) である. 表面はなめらかに削ってある. 容器を水平に固定し, 内部にスポイトにより水を注入し容器から流出した液体の挙動をハイスピードカメラによって撮影を行った.

また作成した容器から液体が流れ出る際と同様な条件下における数値シミュレーションを行い実験映像との比較を行った. 本研究では界面張力モデルとして近藤ら^[3]の粒子間ポテンシャル力モデルを用いる. 粒子間ポテンシャル力は界面張力の要因となる分子間力を表現するもので MPS 法における各粒子へ近傍粒子との相互作用力を追加するものである. 実験容器において液垂れ挙動が確認された. また数値シミュレーションにおいて, 流線の湾曲と液滴の付着の液体挙動が確認できた.

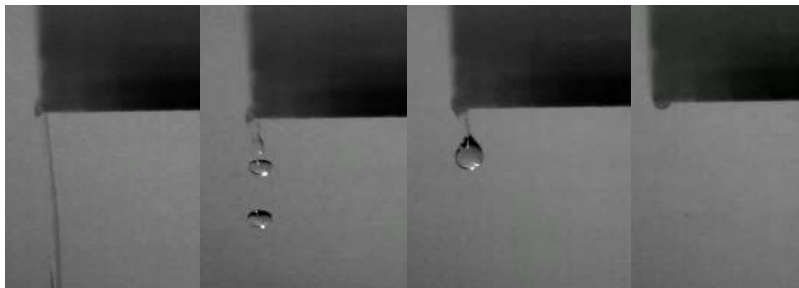


Fig.8 液だれの実験映像(四角縁, 水)

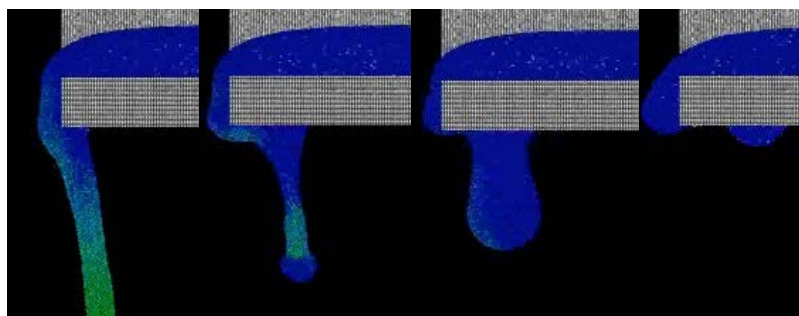


Fig.9 液だれの計算シミュレーション結果

(4) 平成 28 年度進捗状況

平成 28 年度はミルククラウンと液だれの計算結果の検証として実験との比較を行った. 現在, 論文を執筆中である.

(5) まとめ

本研究は、粒子法における界面張力や表面張力といった粒子間のインタラクションに着目し、自由表面を伴う流れをより現実近づける手法について提案するものである。まだ実現象を再現するには固体・流体それぞれの物性についてパラメータ調性をする必要があり、さらに今後の実験結果との比較検証をしていく予定である。

参考文献

- [1] Yokoyama M, Kubota Y, Kikuchi K, Yagawa G and Mochizuki O, Some remarks on surface conditions of solid body plunging into water with particle method, Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences Vol.1:1 (2014) pp.1-14
- [2] Gunji H., Ishii H., Saitoh A. and Sakai T., http://www2.nagare.or.jp/mm/2003/gunji/index_ja.htm, The Japan Society of Fluid Mechanics.
- [3] 近藤雅裕, 越塚誠一, 滝本正人, MPS 法における粒子間ポテンシャル力を用いた表面張力モデル(2007).

3.2. 大規模並列化グループ

2011年に京コンピュータが10ペタ(Peta: 1京)フロップス(Flops: Floating Points per second)に達し、TOP500では2回連続世界1位となり、2016年秋には中国のSunway TaihuLightが93ペタにより1位を記録し、次世代スーパーコンピュータは、ペタの次の世代、つまりエクサ(Exa)フロップスを目指す時代へと突入している。このことからハードウェアとしてコンピュータの性能が向上するスピードがいかに速いかが分かる。その一方で、これらの大規模なコンピュータ上で動作する効率的なソフトウェアの開発に関しては、その開発スピードもソフトウェアの品質も十分とは言えず、多くのソフトウェアが20世紀の主要なソフトウェアを修正し続けて用いられているのが実情である。特に、1970～1980年台に既に確立されているアルゴリズムに対して、並列化の実装のみを加えた物が多く見られる。このような背景のもと、本グループでは様々な計算機プラットフォーム上で効率的に動作する、次世代の大規模解析システムを構築するとともに、常に最先端のスーパーコンピュータ能力を活用するシミュレーションの実現を行ってきた。

3.2.1. ポストペタスケールシミュレーションのための数値解法ライブラリ開発

(1) 目標・計画

本研究では対象問題をある程度限定することで高性能が得られるアプリケーション特化型システム開発を行った。対象問題は連続体力学とし、産業界で需要が高い非構造格子並びに自由表面や移動境界問題に重要なメッシュフリー(粒子法を含む)の取り扱いを可能とする。時間方向の非定常性や問題が持つ非線形性を考慮する必要があるが、陰解法ベースの数値解析手法を対象とする。これらに対し、3つの課題(A)DDM入出力ライブラリ開発、(B)DDMソルバーライブラリ開発、(C)連続体力学向けDSL開発に取り組み、本研究で開発されたライブラリを用いて(D)連続体力学系シミュレータの実装と評価についても行った。

(2) 意義・国際社会との比較

ポストペタスケール計算を見据えた新技術の開発について、これまで同様汎用向けのライブラリなども開発されるであろうが、それらの利用では、非構造格子問題では高々数パーセントの性能、あるいはそれ以下しか期待できず、連続体力学系シミュレーションに特化したシステム開発が必要と考えられる。そもそも数パーセントの性能でのソフトウェアはペタコンでの運用が認められないという制約もあり、これはポストペタコンについてはさらに厳しくなることも想定される。

連続体力学系シミュレーションは、従来からのFEM, FVM, BEMなど非構造格子アプローチに加え、近年ではメッシュフリーや粒子ベース手法による大規模計算の台頭が目覚しく、これらにも対応させ、非構造格子および節点、粒子ベースモデルを統一的に扱えるようにすることで、連続体力学系シミュレーション向けライブラリとして整備されれば、ポストペタコンの連続体力学系シミュレーションでの利用の拡大に大きく貢献することが期待できる。

(3) 研究内容

A) DDM(Domain Decomposition Method, 領域分割法)入出力ライブラリ

本研究項目は、マルチレベル領域分割法に基づく多階層計算格子データの生成、操作および I/O ライブラリ開発を行うものである。一般的なアプリケーションシステムは、プレ・ソルバー・ポスト処理に分けられるが、これまでは最も高負荷であるソルバー部のみがスパコン上に実装されてきた。ポストペタコンでは、全ての処理をスパコン上に実装し、並列化することが当然求められてくる。しかし、従来の枠組みで並列化したのみでは、それに伴い生成される大規模な数値計算データ処理に多くの時間が割かれてしまうことが予想される。そこで、これまで当チーム研究者らがソルバー部の並列化手法として圧倒的な高い並列効率を示してきた階層型領域分割法の技術を応用した、マルチレベル領域分割法によるデータ処理システムの開発を行った。

B) DDM ソルバーライブラリ

本研究項目は、DDM に基づく連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列ライブラリ開発を行うものである。一般的な線形代数ソルバーは、アセンブリされた連立一次方程式を入力とするため、FEM におけるメッシュ情報など本来解析手法が持つ特徴を利用せずに実装されてきた。それらは共有メモリ環境及びその中で解くことができる解析規模では問題となりにくい。ポストペタスケールシステムで対象とする解析規模では入力データから解析手法まで含めた分散メモリ環境向け並列化技術が必要となることが予想される。そこで、DDM による多階層型データ構造を活用した、大規模な線形代数ソルバーの分散メモリ環境に適したライブラリを開発を行った。

C) 連続体力学向け DSL(Domain Specific Language, 問題領域専用言語)

本研究項目は、連続体力学向け DSL の開発と、それに対応した多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成の開発を行うものである。ポストペタスケールシステムのアーキテクチャでは、計算ノード間の並列性だけでなく計算ノード内での効率も重視される。各計算ノードはメニーコアや GPU, SIMD 拡張命令といった多種多様なアクセラレータを有し、これらを有効利用することが望まれる。従来のプログラミング言語やコンパイラ最適化技術での対処は不十分であり、現状ではそれぞれのアクセラレータごとに人手で最適化された個別の実装が必要とされている。一方、数値シミュレーションコードの場合、特に連続体力学分野においては、そのアプリケーションロジックは物理現象や数値解析スキームであり、これは数学表現、特に行列やテンソルで表記されることが多い。よって、連続体物理モデルを DSL 化して、数学記述(例えば、行列、テンソルの式を `tex` 形式で記述)から各アクセラレータタイプ向けに最適化されたライブラリを `call` するコードを生成するコードジェネレータあるいはトランスレータアプローチが有効であると考えられ、これを実現するシステムの開発を行った。

D) 連続体力学系シミュレータ

本研究項目は、研究項目 A から C で開発された基盤技術の性能評価を行うために、連続体力学系シミュレータの開発を行うものである。

(4) 平成 28 年度進捗状況

A) DDM 入出力ライブラリ

A-1) 多階層領域分割

演算処理装置や記憶装置の階層構造に適した負荷分散機能として、非構造格子向けの多階層領域分割アルゴリズムを開発した。特に、MPI-OpenMP ハイブリッド並列化、CAD データへの形状適合を伴った 4 面体・6 面体ソリッド要素の一樣メッシュ細分割機能(Fig.1)、リスタート機能、「京」や PRIMEHPC FX10 等が持つ Tofu 向けにネットワークポロジを意識したデータ配分の自動調整アルゴリズムの開発を行った。これにより、「京」の 8,196 計算ノードを用いて 258 億要素の非構造 4 面体メッシュ生成を約 94 分で成功するなど、ポストペタスケールシステムで想定される超大規模シミュレーションのプレ処理に有効であることが示された。また、世界トップクラスとなる 2,260 億要素(構造解析では 0.9 兆自由度)の非構造 4 面体メッシュ生成に名大 FX100 の 128 ノードを 16 時間用いることで成功した。これらの成果は、多階層領域分割ソフトウェア ADVENTURE_Metis2 として整備した。

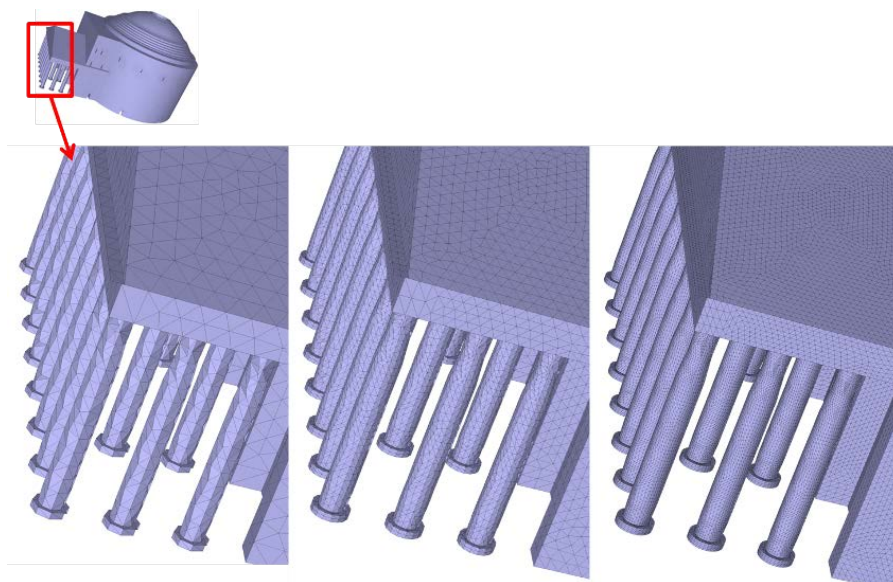


Fig.1 Parallel large scale mesh generation by subdivision with shape conformity to CAD data

A-2) DDM 圧縮技術

非構造格子向け DDM 圧縮技術の開発を行った。DDM 圧縮は、DDM における部分領域の境界上情報のみをファイル出力する対象とするものである(Fig.2)。復元は部分領域ごとの境界値問題を有限要素解析することによって行う。一般的な CG 法の演算量($O(n^3+n^2)$)を基準に試算を行った結果、全体剛性行列を解く計算量と領域ごとの小さな剛性行列を解く計算量の比が極めて大

きくなり、例えば 100 億自由度有限要素解析モデルの計算量の比は 10^{10} 以上の計算量比が生じることから、袖領域の変位量をもとに内部の変位、ひずみ、応力を再度計算することは現実的であることが分かった。FEM による熱伝導解析を対象に基本機能を開発した。

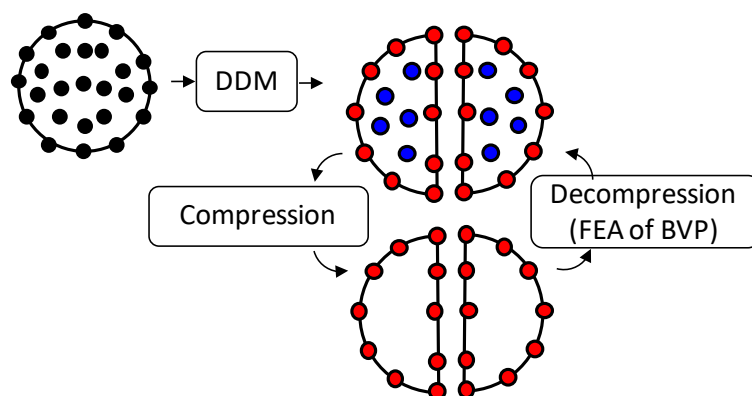


Fig.2 DDM compression by removing of internal degree of freedom

A-3) 標準 I/O ライブラリ

本研究ではオープンソースソフトウェア ADVENTURE をターゲットアプリケーションとしているが、同ソフトウェアでは独自の標準 I/O ライブラリ AdvIO が提供されている。そこで、「京」や FX100 などへの移植や超大規模データ生成などを通じて、ライブラリの問題点を調査し、解決した。また、当初計画を 1 年前倒してメッシュフリー向け標準 I/O ライブラリを開発を行った。AdvIO ライブラリをベースに開発を行い、粒子法への対応を行った。粒子法で用いられる物理量のラベルを定義し、本ライブラリを用いることで解析プログラムから接続するプレ・ポストまでの統一的な開発が可能となった。これらの成果は、AdvIO2 ライブラリとして整備した。

B) DDM ソルバーライブラリ

B-1) DDM 反復法

有限要素法向けに、多階層領域分割情報を利用した DDM 反復ライブラリを開発を行った。DDM の静的縮約によって得られる Schur 補元方程式を反復法で解くアルゴリズムとなっており、反復法としては実対称向けに共役勾配(CG)法、共役残差(CR)法、準最小残差(QMR)法、最小残差(MINRES)法、複素対称向けに共役直交共役勾配(COCG)法、共役直交共役残差(COCR)法、対称版 QMR(QMR_SYM)法を実装した。さらに、複素対称向けには MINRES-like_CS 法を新たに開発した。また、MPI-OpenMP ハイブリッド処理に適した 2 階層領域分割に基づく実装、線形代数演算のアプリケーション特化型最適化として節点自由度数に応じた手動ループ展開や SIMD 向け最適化を行った。さらに、メモリーコア化などに伴う B/F 値低下に対応するため、DDM 反復法の部分領域問題ソルバーとして Eisenstat 技法に基づく CG 法+SSOR 前処理を実装した。これにより、「京」の 8,196 計算ノードを用いて 1,040 億自由度規模有限要素解析(古代建築物パ

ンテオンモデルの自重解析)に 81.8 時間で成功した(Fig.3). 本手法は,「京」で強スケーリング性能として 85%以上の高い並列効率を示しており(Fig.4), ポストペタスケールシステムでは 1 千億自由度超の超大規模有限要素解析を実用化できる可能性が示された.

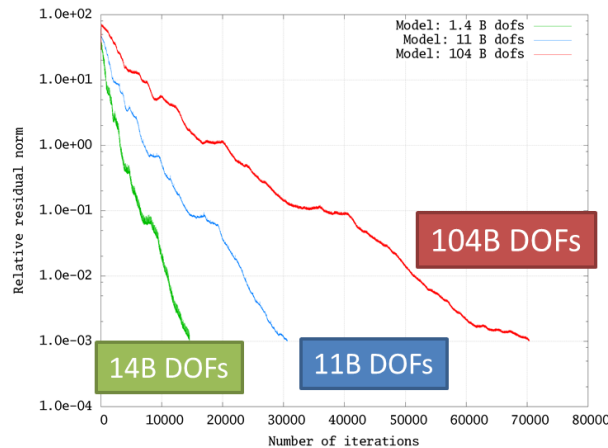


Fig.3 Convergence history of iterative method in 100 billion DOF finite element analysis

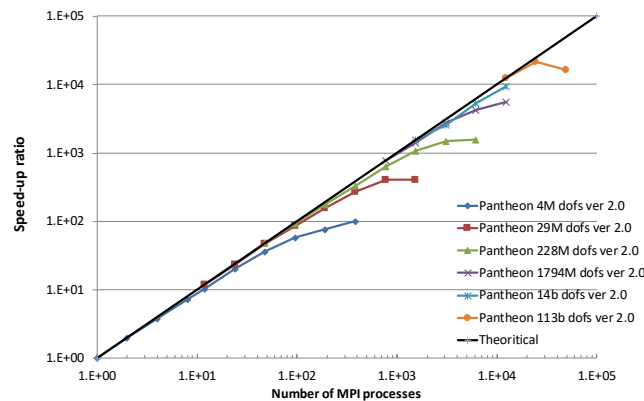


Fig.4 Parallel performance of strong scaling with K-computer

B-2) 多階層前処理技術

多階層前処理技術として, 有限要素法向け BDD 法の開発を行った. 既の実績がある構造解析向け BDD 法については超並列計算環境向け実装技術の開発を行い,「京」の 256 計算ノードで弱スケーリング 89 %, 強スケーリング 92 %の並列効率が得られた. また, 世界トップレベルの 112 億自由度有限要素解析への BDD 法適用実験を行い, 53 反復(収束判定値は相対残差が 3 桁小さくなった時点)で収束解を得ることに成功した.

また, 異種材料混在モデルにおける BDD 法の収束性を改善するために, DDM 反復法に対する簡易対角スケーリング処理法の新解釈を提案した. それに基づき, Scaled-BDD 法を新たに開発し, ヤング率の比が 100 倍以上となる複数部材で構成された構造物のシミュレーションにおいて,

オリジナルの BDD 法に比べて反復回数・計算時間を 1/2 以下にすることに成功した(Fig.5).

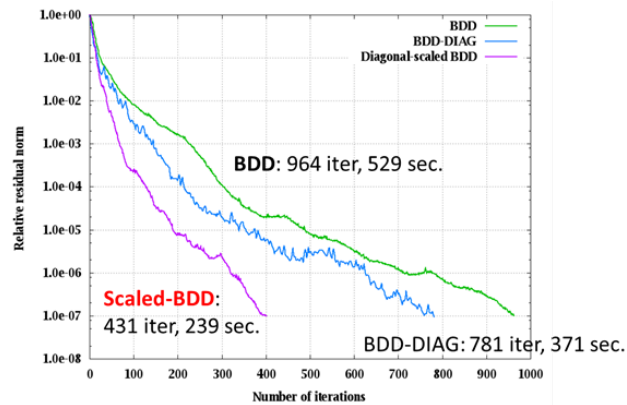


Fig.5 Convergence improvement with Scaled-BDD on multiple material model

また、電磁場解析向けに、BDD 前処理の統一的構築方法の開発と実装を行った。さらに、電磁場解析等 BDD 法が未確立分野に向けて、BDD 開発フレームワーク機能を追加開発した。これにより、静磁場問題に対する BDD 前処理アルゴリズム適用実験に成功した。さらにこの成果を応用して、構造解析において世界的にも事例が少なかった ILU(0), SSOR, BDD の収束性比較が可能となり、BDD によってどれだけ反復回数を削減できるかを定量的に示すことに成功した(Fig.6).

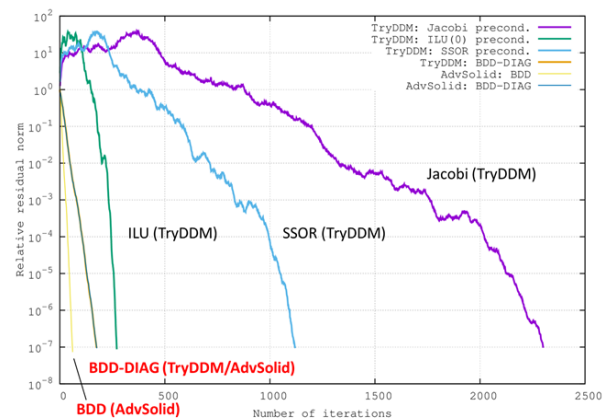


Fig.6 Convergence evaluation of BDD preconditioner

C) 連続体力学向け DSL

C-1) DSL 基本機能

連続体力学向け DSL である LexADV_AutoMT, およびその C 言語および Fortran へのトランスレータ開発を行った。DSL の文法構造としては、基本的に科学技術分野、特に数学分野で広く使われている TeX/LaTeX を参考とした。本研究が主な対象とする連続体力学分野、特に非線形

固体・構造力学分野においては、その物理現象や材料構成則を記述するために、テンソルあるいは行列・ベクトル演算に基づく数式が多用されている。特にテンソル演算として、連続体力学分野への応用を念頭に、3次元空間におけるスカラー、ベクトル、2階テンソルおよび4階テンソルに関する加減算および積演算などの各種演算子群に対応させる必要がある。ここではまず、こういった数式を記述可能な **LaTeX** のサブセットを設定し、またコード生成に必要な変数の型情報など補助的なデータをアノテーションとして追加する構造を採用した。なお言語仕様や文法などの詳細については、開発初期段階から研究グループ外の β テスターを獲得し、グループ内外のユーザーからのフィードバック情報を元にさまざまな検討を行った。

DSLとしての **AutoMT** をユーザーが利用する際には、前述の **LaTeX** サブセットのコードがコメントとして **C** または **Fortran** のソースコード内に挿入される形式をとる。そして、トランスレータによってそのコメント部分が、対応する **C** あるいは **Fortran** のコードに置き換えられる。このとき自動生成されるコード内において、同名のテンソルおよび小規模行列・ベクトル演算向けライブラリ **AutoMT** が備える各種ライブラリ関数がコールされる。さらに、ライブラリ実装内部について、各種 **HPC** プラットフォームごとに、特に **CPU** ベンダーごとの特殊命令や **GPU**、メニーコア等アクセラレータ向けに最適化することが可能である。DSL利用の流れを **Fig.7** に示す。

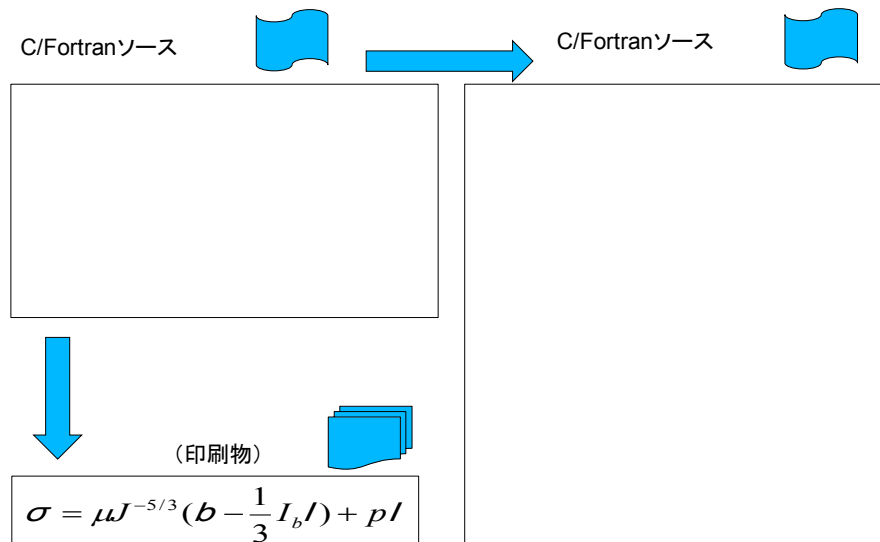


Fig.7 Flow of DSL for continuum mechanics

C-2) アクセラレータ対応コード自動生成

前述のように連続体力学分野向け DSL, **LexADV_AutoMT** では、その低レベル層に行列・テンソル演算向けライブラリ(同名の **AutoMT**)を配置している。この **LaTeX** をベースとする DSL は前記のトランスレータにより **C** や **Fortran** コードに変換されるが、このときトランスレータにより自動生成されたコード部分は主にこの **AutoMT** ライブラリ関数・サブルーチンをコールする。よって、こ

この部分を各種 HPC プラットフォームや特にアクセラレータ向けに最適化することで、結果としてユーザープログラムが高速に動作することになる。

ここでは、アクセラレータ対応コード自動生成として、近年のスカラーCPU の多くが装備する SIMD 命令セットおよび GPU 向けに性能最適化された AutoMT ライブラリの高速バージョンを開発した。Intel および富士通 CPU のマルチコア及び SIMD 命令セット向け実装、CUDA による GPU 向け実装、メニーコア Xeon Phi 向け実装などを行った。

これらの実装に関して特に、主要な各種 HPC プラットフォームにおけるベンチマークテストを通して、SIMD 機構を用いたコードはこれに対応しないコードに比べ実効性能で数倍程度の違いを有することがわかったため、SIMD 命令および GPU 向け最適化として SIMD 機構に対応する AutoMT ライブラリ実装を用意した。これは、あるテンソル式または小規模な行列・ベクトル式に対し、コンパイラによるベクトル化や GPU のスレッドを介し、同時に複数のデータを作用させるものである。通常これは連続体力学ベースの数値解析コードにおいて、複数の要素やセル、粒子データなどについて同じ一連の数式群を評価していくことに対応する。例えば、有限要素解析においてそのモデルデータは大量の有限要素から構成されるが、これら要素単位の演算は **element-by-element (EBE)** 演算と呼ばれる。シミュレーションプログラムの EBE 演算を行うコード部分のループ構成に関して、必ず要素ごとループをある多重ループの最内側に配置するようにしておく。その最内側ループボディにおいて、テンソルや小規模行列演算ごとに AutoMT ライブラリコールがなされる。このとき、これらのライブラリコールが実際にはプリプロセッサマクロで実装されている、あるいはコンパイラによって確実にインライン展開されることが保障されることにより、最終的にこの要素ループに関してコンパイラを通したベクトル化がなされることになる。

さらに、こういった最適コードが共通に有する特徴やパターンをまとめ、これをハイパフォーマンス・デザインパターンとして提案した。ハイパフォーマンス・デザインパターンでは、まずテンソルや小規模行列、ベクトルなどの数値計算分野向け抽象データ型について、それぞれの変数を1つの配列や構造体ではなく、複数のスカラー変数の束として表現する。また、抽象データ型が備える各種演算・操作について、これら関数やサブルーチンの代わりにプリプロセッサマクロで実装する。このとき、C プリプロセッサマクロのシンボル連結演算子`##`を利用している。ハイパフォーマンス・デザインパターンについてこれを Fig.8 に示す。

<3-Dベクトル>	
Cプリプロセッサマクロ による変数宣言	#define declare_vector(a)¥ double a##_0, a##_1, a##_2;
オリジナルコード	declare_vector(u);
Cプリプロセッサ出力	double u_0, u_1, u_2;
<対称テンソル>	
Cプリプロセッサマクロ による変数宣言	#define declare_tensor(a)¥ double a##_xx, a##_yy, a##_zz;¥ double a##_xy, a##_yz, a##_zx;
オリジナルコード	declare_tensor(B);
Cプリプロセッサ出力	double B_xx, B_yy, B_zz; double B_xy, B_yz, B_zx;

Fig.8 Implementation of vector and tensor by high performance design pattern

これらの成果をまとめ、行列およびテンソル演算ライブラリ **LexADV_AutoMT** として整備した。開発ライブラリを用いた有限要素解析で現れる特徴的な計算パターンに対する性能評価結果を Table 1 に示す。

Table 1 Benchmark results for finite element analysis

	Intel x86 (Sandy Bridge) + Intel Compiler		Fujitsu SPARC64 IXfx + Fujitsu Compiler	
	Original	Tuning	Original	Tuning
Stiffness Matrix of Structural analysis	21 %	70 %	8 %	44 %
Constitutive law of nonlinear material	16 %	31 %	6 %	40 %
Stiffness Matrix of heat conductive analysis	24 %	50 %	12 %	38 %

D) 連続体力学系シミュレータ

D-1) シミュレータ実装

DDM 反復法ライブラリの応用例として、構造 FEM ソフトウェア AdvSolid への組み込みを行った。「京」、名大 FX10・FX100, 名大 CX400, 名大 UV 2000, Xeon Phi マシン, GPU マシンなど様々なアーキテクチャにおいて性能評価を行った。特に、メニーコア環境においてスレッド並列効率が低下する傾向が観察され、DDM アルゴリズム見直しについて DDM 反復法ライブラリ開発側にフィードバックした。また、電磁場解析を重要アプリケーションの 1 つと位置づけ、計画を一部前倒して、電磁場シミュレータの実装を行った。また、実証問題例である数値人体モデルによる医療向け電磁場解析において、メッシュ形状が解析精度に与える影響について調査し、その結果を DDM 入出力ライブラリ側へフィードバックした。さらに、移動体を含む対象の並列計算を効率的

に行うため、階層型領域分割法をベースに新たなアルゴリズムを開発した。移動体を含む対象の解析ではタイムステップごとに移動体の位置が変化し、移動体とそれ以外の固定部との間でメッシュの接続関係が変化する。そのため固定部と移動体の接合部が 1 タイムステップ分ずれても要素面が一致するようにメッシュを生成することでこれに対応するといったことが広く行われている。本研究でもこの手法を踏襲するとともに、領域分割後の小領域表面に接合部の自由度が位置するよう固定部と移動体のメッシュを個別に領域分割することとした。個別に領域分割することで小領域表面に位置した接合部の自由度を **part** 間で共有されるインターフェース自由度として扱うことで、移動体の移動に伴うメッシュの接続関係の変化は、固定部側の **part** と移動体側の **part** の通信関係の変化へと置き換えられる。これにより、時間発展とともに変化する接合部の通信テーブルを事前に用意し、それぞれの時間ステップで使用する通信テーブルを替えることで効率的な手法を構築できた。この手法の利点は、時間ステップごとに異なる通信テーブルを使用する以外には従来の階層型領域分割法とアルゴリズムとして差異がないことである。そのため実装が非常に簡便であるとともに、これまで階層型領域分割法で積み上げられてきた効率化・高速化の成果がそのまま適用できる。さらに階層型領域分割法が適用できればこの手法も適用可能であり、高い汎用性を有する手法となっている。

粒子法向けライブラリは実問題解析に適用可能かが重要な評価指針であるため、当初計画を前倒しして、開発中の粒子法向けライブラリを用いたシミュレータ実装並び評価を並行して実施することとした。粒子法向けライブラリでは、関数ポインタを用いて利用者が粒子の物理量計算の関数を定義することができるので、解きたい物理モデルを自由に組み込むことができる仕様となっている。粒子の動的負荷分散機能(Fig.9)や大規模流体剛体連成解析機能(Fig.10)の実装を行った。これにより、多数の浮遊物(剛体)が津波で流される様子を計算することが可能となった(Fig.11)。また、直ぐに社会に役立つアプリケーションの構築を目指すために、3 段階の津波計算を行える機能を開発した。第 1 の解析では震源で発生する波源から沿岸部までの津波伝播計算(数十～数百キロ四方位程度)、第 2 の解析では沿岸部に押し寄せた津波が地上へ遡上する解析(数 km～10km 四方位程度)、第 3 の解析では、市街地に浮遊物が衝突しながら浮遊する市街地浸水解析(500m 四方位程度)である。この 3 段階の津波解析機能により、従来からある波源から沿岸部までの津波伝播計算を利用して津波の市街地解析を行うことが可能となった。

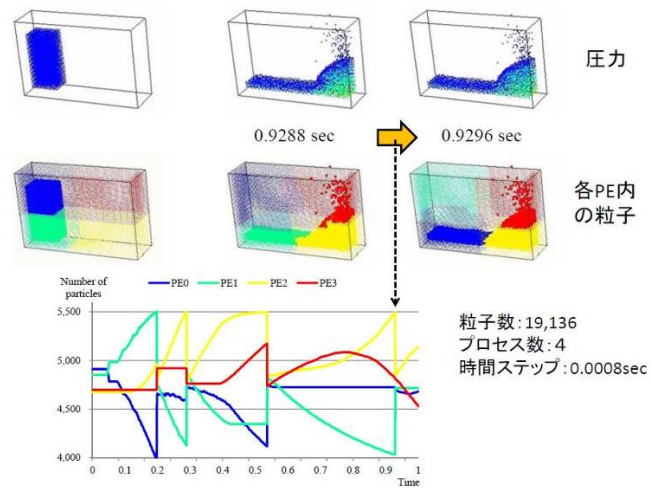


Fig.9 Dynamic load balancing for distributed memory parallel processing of particles

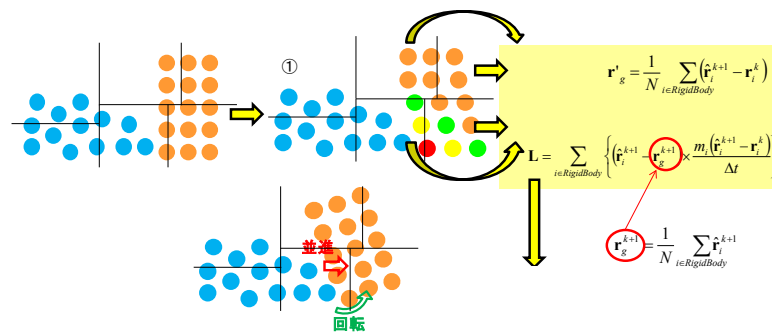


Fig.10 Calculation procedure of rigid body in LexADV_EMPS

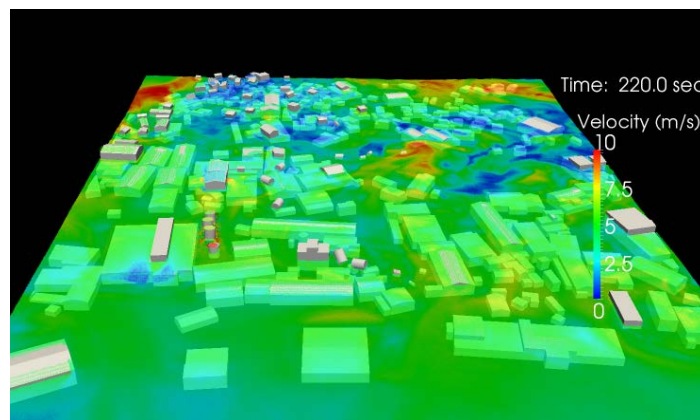


Fig.11 A result of simulation including many rigid bodies by LexADV_EMPS

また、有限要素法による構造解析機能と粒子法による流体解析機能を持った「連続体力学系シミュレータ」の開発を行った。ファイルベースの片方向連成機能のみの開発が完了している。

LexADV_EMPS を用いて津波遡上解析を行った後、流れ解析で出力されたファイルから地上構造物に与える流体圧力を求め、構造解析の入力ファイルを作成する。この構造解析用の入力ファイルを用いて、AdvSolid が応力解析を行う。このようにして LexADV_EMPS の片方向連成機能の開発により、大規模分散メモリ環境で、粒子法による流体解析と有限要素法による構造解析の連成解析が可能となった。

D-2) シミュレータ評価

有限要素法によるシミュレータとして、構造 FEM ソフトウェア AdvSolid に DDM 反復法ライブラリを組み込み、400 万自由度から 1,134 億自由度規模までのサイズの問題に対し、「京」の 12 ノードから 24,578 ノードを用いて、強スケーリングと弱スケーリングによる並列効率評価を行った。両指標において高い並列効率が示されたが、2 万ノード規模では効率の低下がみられ、ポストペタスケールシステムに向けての課題を見つけることができた。

また、電磁場 FEM ソフトウェア AdvMagnetic にライブラリを組み込んだ。時間調和渦電流問題において反復解法の収束性を大幅に改善し、東京大学 FX10 の 720 ノードで 35 億自由度の渦電流解析精度検証問題を 9 時間弱で求解することに成功した。また、移動体を含む対象の階層型領域分割法による並列計算手法を回転機の電磁界解析に適用し、FX10 上でストロングスケーリング評価を行った。6 ノードから最大 384 ノードまで使用し、96 ノードまで並列化効率 90% 以上という良好な結果を得た。96 ノードを超えるとノードあたりの割り当て演算量が著しく低下するため並列化効率が低下するが、それでも 384 ノードで 60% 程度であった。また、従来の有限要素法による逐次計算で 1 ヶ月以上かかっていた計算が、48 ノードで 8.39 時間、384 ノードで 1.60 時間と、大幅な高速化を達成した。さらに、高周波電磁波問題において境界平滑化による計算精度の向上に取り組み、2 億自由度の人体モデルにおいて電界の精度を大幅に向上させることに成功した (Fig.12)。

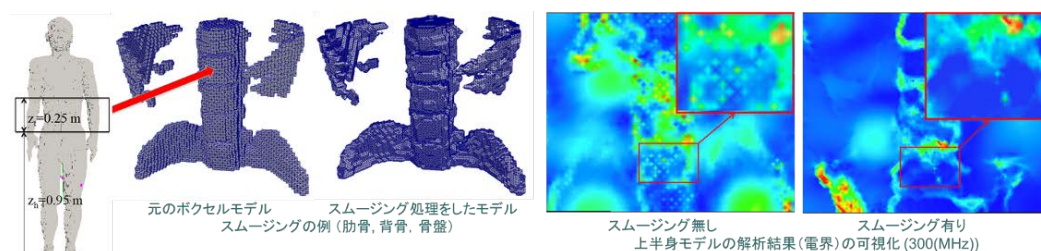


Fig.12 Thermal therapy simulation with AdvMetis2 and AdvMagneticHF

さらに、開発ライブラリを用いた粒子法シミュレーションソフトウェアの評価を行った。評価環境として「京」、東京大学 FX10、東京工業大学 TSUBAME2.5(GPU)、名古屋大学 FX100、名古屋大学 CX400(MIC)を主な開発計算機としてそれぞれのソルバーの性能向上をおこなった。東大 T2K では、64 計算ノード 1,800 万粒子から 1,024 計算ノード 2.6 億粒子へのウィークスケーリング

性能評価で 94%の並列効率が得られ、6,900 万粒子の 64 計算ノードから 1,024 計算ノードの強スケーリング性能評価において 93%の並列効率が得られた。10 億粒子モデルを用いて、「京」の 48 ノードから 12,288 ノードのスピードアップ値 225.8(理想値 256)を達成することができた。FX100 では、12 ノードから 864 ノードのスピードアップ値 65(理想値 72)を達成することができた(Fig.13)。LexADV_EMPS を用いて、3 段階の津波解析をシステム化した。その結果、福島第一原子力発電所1号機タービン建屋内浸水解析と気仙沼での第 18 共徳丸の遡上解析を行うことができた。昨年度までは 1 ヶ月程度掛かっていた解析を、「京」を用いることで 3 日程度に短縮することができた。観測データ等を用いて津波遡上シミュレーション結果の妥当性確認を行い、十分な精度で現象を再現できていることが示された(Fig.14)。

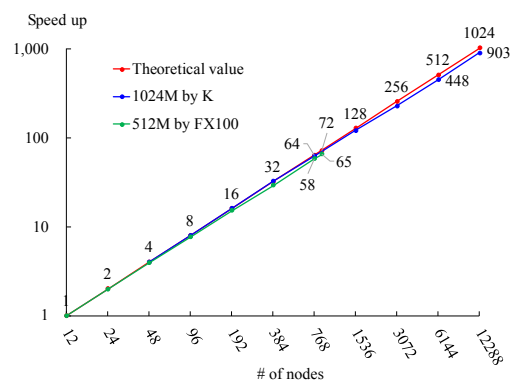


Fig.13 Parallel performance of strong scaling with uncompressed flow analysis

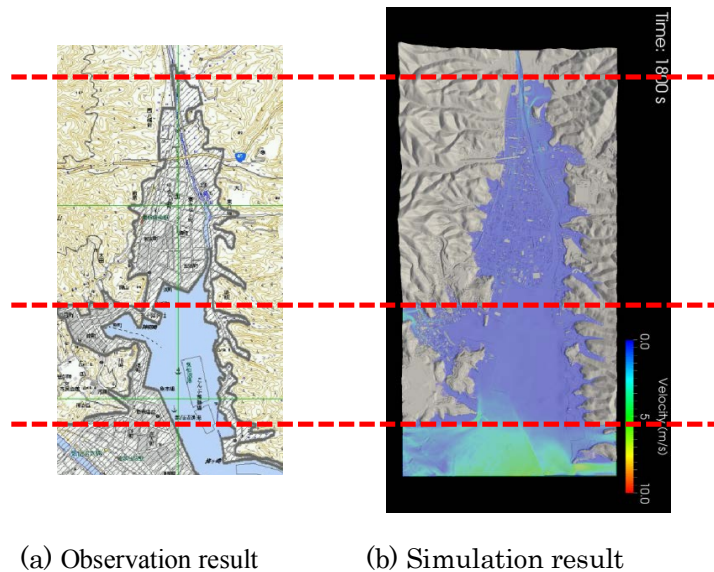


Fig.14 Validation of tsunami run-up analysis with LexADV_EMPS

(5) まとめ

当初の研究計画で掲げた目標はほぼ予定通り達成できた。ポストペタスケールシステムにおける超大規模な連続体力学系シミュレーションを実用化するために、1 兆自由度メッシュを並列生成可能な AdvMetis2, FEM や粒子法シミュレーションに対して 10 万×10 万ピクセルの超高精細な First Detail Image を描画可能な LexADV_VSCG, 1 千億自由度 FEM 解析に成功した LexADV_IsDDM, 数億粒子の分散メモリ並列計算を可能にする LexADV_EMPS, LaTeX 記述のテンソル表記構成式から高性能なコードを生成する連続体力学向け DSL を含んだ LexADV_AutoMT など、多くのソフトウェアを開発・公開することに成功した。これらのソフトウェアは、HPCI 戦略プログラムでの利用からポスト京重点課題での採用と、ペタスケールからポストペタスケールへの橋渡しを行っているシステムソフトウェアとしてその意義は大きいと言える。本研究期間では有限要素法と粒子法に特化して開発したが、得られた成果は連続体力学向けの他の数値解析方法にも応用できるものであり、計算科学全般での活用が期待できるものである。また、開発ソフトウェアを用いて実施した津波遡上・浸水シミュレーション結果の妥当性確認や写実的描画は、水害の予測や被害の低減のために有用であることを示しており、安全・安心社会基盤構築に貢献するものと言える。今後は、本研究成果を元に採択されプロジェクトが進行している、ポスト京重点課題やドイツ研究振興協会 (DFG) が実施している Software for Exascale Computing (SPPEXA) Phase 2 などを通じてポストペタスケールシステムへの展開を進めていくとともに、ポストペタ後も見据えた研究へと発展させていく予定である。

3.3. 新規実験計測グループ

新規実験計測グループでは、計算力学研究センターのプロジェクト名である「大規模高精度流体－構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」のうち、「標準問題実験の検討」に焦点を当てた活動を行っている。

流体－構造連成実験を高い信頼性で実験するには、実験モデルの精度や実験装置の信頼性を高めた上で、それらを連成している物理量について考察する必要がある。そこで、標準問題実験に関する弾性円柱の振動実験、シートフラッタ試験に取り組んできた。

上記の事項について、今年度は以下の2項目について報告する。

- (1) 標準問題のための弾性円柱の振動実験
- (2) ゴムシート材のフラッタ特性に関する系統的整理

3.3.1. 標準問題のための弾性円柱の振動実験

(1) 目標・計画

流体－構造連成解析手法を検証するための標準問題として，低速風洞を用いた円柱の振動試験を行った．風路下流に実験模型を設置して試験を行い，数値解析の検証用データを提供することを目的としている．

(2) 意義・国際社会との比較

流体－構造連成問題について数値計算，実験は多数行われているが，その殆どが単独に行われたものである．文献にはいずれかの結果が引用される場合が多く，両者の信頼性を保証した上で，結果を議論した例が見られないのが現状である．本研究では，数値計算結果の信頼性を検証するためのデータを提供することを主眼として実験に取り組んだ．そのため，計算結果の検証に使用しやすい問題を選定し，データを提供することを目的としている．

(3) 研究内容

Fig. 1 は風洞試験の概要図である．出口面積 $A=0.3\times0.3\text{ m}^2$ の風洞装置にシリコンゴム円柱を固定した．円柱の側面と下方から高速度カメラで変位量を計測した．円柱は片持ち梁の様に固定されており，上端は固定端，下端は自由である．Table 1 は円柱のサイズと材質を示している．ヤング率の右側に記載した数値はデュロメータ硬さである．

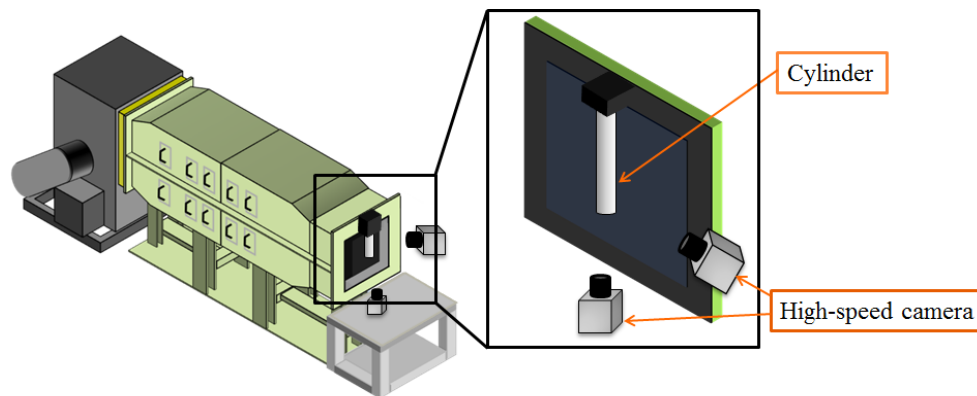


Fig.1 Schematic picture of experimental setup.

Table 1 Specifications of cylindrical cantilever.

Diameter d [mm]	20
Length L_c [mm]	160
Young modulus E [MPa]	2.9 (A50)
	4.9 (A60)
	6.8 (A70)

実験で動画を取得した後、連続画像に分割して 2 値化処理を行い、円柱領域の中心座標を取得した。中心座標の時間履歴から変位と周波数特性を調べた。添え字は x, y 方向を意味する。

Fig. 2 は Re 数に対する変位量 D を示している。Re 数と共に D_x は増加する傾向にある。A50 は最も柔らかい材質であり、Re 数と共に D_y が増している。ただし、 D_x の 1/10 程度である。A60, A70 はほぼ一定である。Fig. 3 は変位の時間履歴から算出した RMS 値を円柱の直径で無次元化した値を示している。Re 数と共に a_x, a_y も増加している。硬度が増すと、勾配は緩やかになる傾向が確認できる。流れに垂直方向に振動するため、 a_y の傾きが大きくなる。

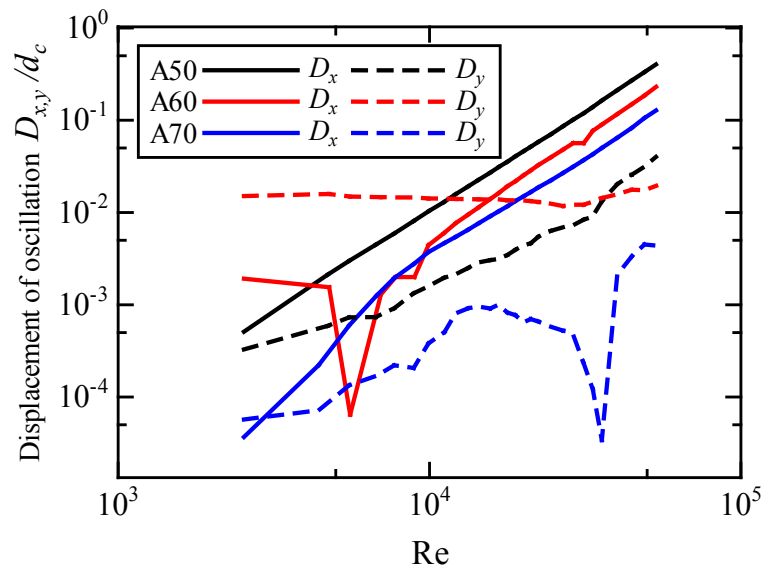


Fig. 3 Time-averaged displacement of oscillating cylinder.

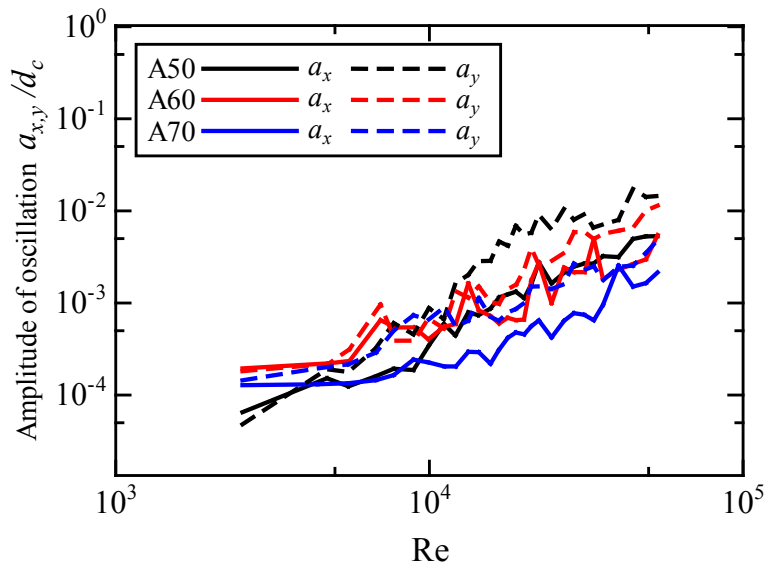


Fig. 4 R.M.S. amplitude of oscillating cylinder.

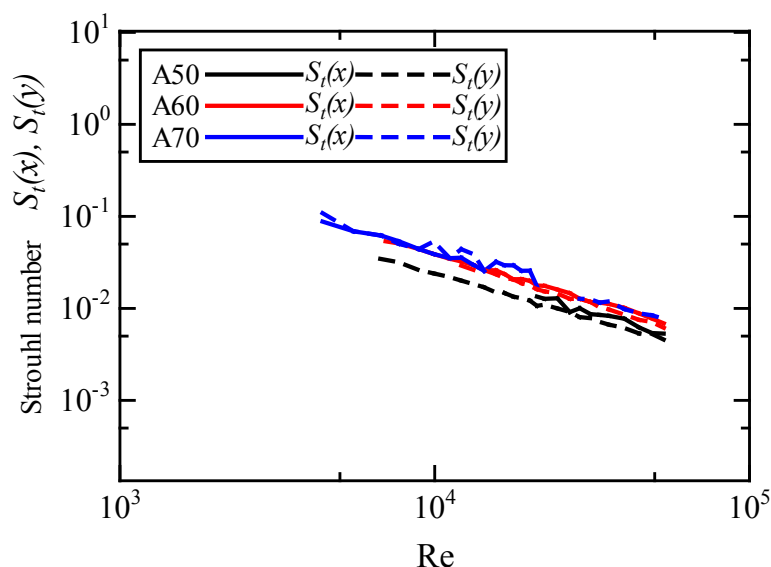


Fig. 5 Frequency characteristics of oscillating cylinder.

Table 2 Slope characteristics of oscillating cylinder.

	D_x	D_y	a_x	a_y	$S_t(x)$	$S_t(y)$
A50	2.164	-	1.626	1.988	-1.017	-0.985
A60	2.260	-	1.090	1.504	-1.005	-1.046
A70	2.442	-	1.052	1.125	-0.912	-1.042

Fig. 5 はシリコンゴム円柱の周波数特性を示している。St 数は Re 数と共に減少しており、その傾きは材質に依らず一定である。また方向にも依らないことが分かる。Table 2 は Fig. 3-5 の実験結果から、Re 数に対する変位、変位の RMS 値、St 数の勾配を示している。

(4) 平成 28 年度進捗状況

標準問題として弾性円柱の振動実験を行い、材料特性毎に実験結果を整理した。その結果、に対して 3 種類のヤング率について実験した結果、いずれも同様の傾向を示した。シリコンゴムの物性値について変形量を測定することができた。

(5) まとめ

流体構造連成解析のための標準問題を検討し、数値解析結果の妥当性を検証するために必要な実験データを示した。

参考文献

- (1) R. D. Blevins: "Flow-induced vibration", Krieger publishing company (1990) .
- (2) R. King and M. J. Prosser and D. J. Johns, On Vortex Excitation of Model Piles in Water, Journal of Sound and Vibration, Vol.29 (2) , pp.169-188 (1973) .
- (3) N, Kondo, Three-dimensional computation for flow-induced vibrations in in-line and cross-flow directions of a circular cylinder, Inter. J. for Num. Meth. in Fluids, 70, pp.158-185, (2012).

3.3.2. 流体-構造連成解析の検証用風洞実験システムを用いたフラッタ特性の確認実験

(1) 目標・計画

フラッタ特性に関する理論的・実験的研究は、これまで多く行われてきた^(1,2)。しかし、系統的にデータを整理した成果は数少ない^(3,4)。本研究は様々なシート材のフラッタ特性を調べて、材料と流体力学の物理量を関連付けることで、フラッタ特性を整理できる無次元パラメータの提案を試みる。

(2) 意義・国際社会との比較

翼のフラッタに関する数値計算は流体-構造連成問題の主要課題の一つである。計算機性能の向上により、予測精度の信頼性は向上している一方で、数値計算結果の妥当性を確認するために参照できる実験データは数少ない。本研究ではフラッタ現象に関する基礎的な実験を通じて、無次元数を提案する。

(3) 研究内容

Fig. 1 は風洞装置の全体図である。風洞装置は出口断面積が $0.3 \times 0.3 \text{ m}^2$ であり、気流速度は最大 40 m/s である。風洞装置の出口部分には Fig. 1 (b) に示したようなフラッタ装置を設置している。試験片であるゴムシート材は金属フレームで支持されており、片端固定、他端自由の状態である。固定端は二枚の金属板で挟まれており、実験中に外れない様にボルトを用いて固定されている。鉛直に設置したシート材の横方向変位を測定するために、レーザ変位計(LK-G500, KEYENCE Corp.)を用いた。風速を変化させて実験を行い、フラッタ開始時の風速を調べた。フラッタ時のシート材の変位をサンプリング周波数 5 kHz で約 13 秒間測定し、65000 点のデータを収録して周波数解析を行った。

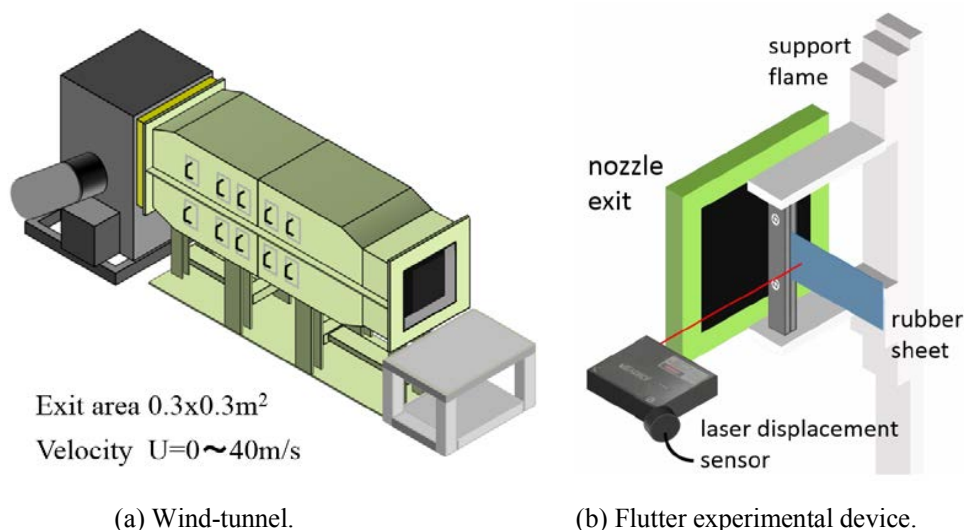


Fig.1 Experimental setup of wind-tunnel.

Table 2 はゴムシート材の種類とヤング率を示している。名称の横には、凡例に表記する略称を示している。Table 3 はゴムシート材のサイズを示している。幅広くフラッタ特性を調べるために、長さとは幅は 5 種類の条件とした。厚さは入手できるものを選び 2 種類とした。それぞれのサイズについて実験を行った。

Table 2 Young's modulus of rubber sheet.

Name	Young's modulus
Urethane rubber (UT)	46.20
Flexible polyvinyl chloride (EV)	31.60
Black natural rubber (BN)	9.90
Fluorine-containing rubber (FS)	8.30
Nitrile rubber (NBR)	7.60
Ethylene-propylene rubber (EPT)	7.10
Chloroprene rubber (CR)	5.60

Table 3 Dimensions of rubber sheet.

L [mm]	100, 110, 120, 130, 150
w [mm]	40, 50, 60, 70, 80, 90
t [mm]	0.5, 1.0

Fig. 3 は黒天然ゴムのシート長さに対するフラッタ開始速度の変化を示している。シート長が増すほどフラッタ開始風速が低下しており、フラッタ現象が発生しやすくなる。Fig. 4 は黒天然ゴムのフラッタ開始風速とフラッタ周波数の関係を示している。フラッタ開始速度が低いほどフラッタ周波数は低くなっている。この傾向は他の材料についても同様であった。

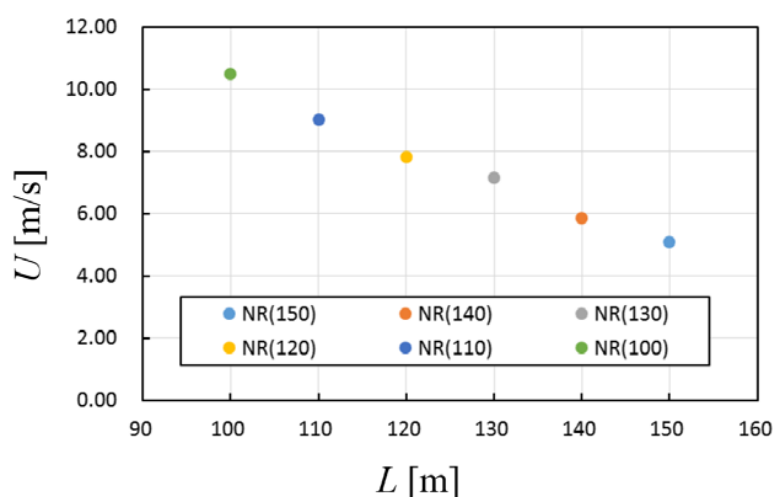


Fig. 3 Comparison of flutter velocity to sheet length (BN).

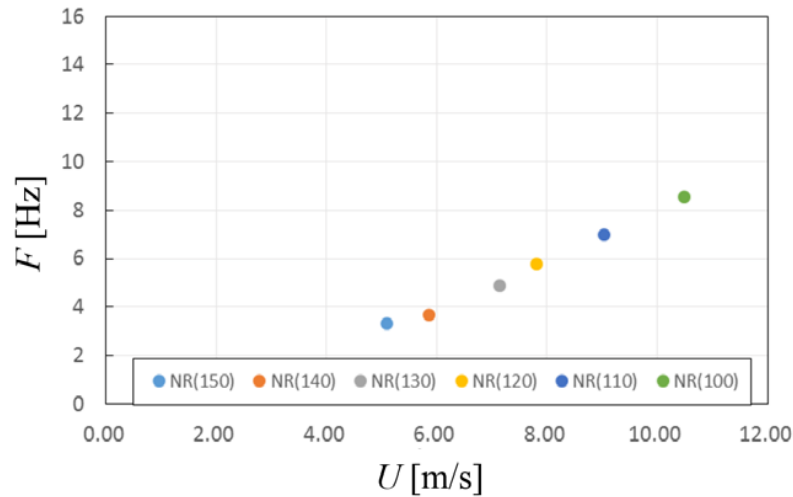


Fig. 4 Characteristics of flutter frequency to sheet length (BN).

本研究では様々なゴムシート材について実験した結果、一定の傾向が見られた。そこで次元解析を行い⁽⁶⁾、材料の曲げモーメントと流体力によるモーメントの比を表す無次元数を導出した。板材の単純形状であるが、単純な式で表されるものであり、材料力学のたわみの式から着想を得たものである。

Fig. 5 はゴムシート材のフラッタ開始速度とフラッタ周波数を系統的に整理した結果である。縦軸はフラッタ周波数を固有振動数で、横軸は提案した無次元数で整理した結果である。ゴムシート材のフラッタ周波数は材質によらず1本の線で結ばれることが判る。横軸の無次元数に対して概ね1未満でフラッタ現象が開始することが分かる。また提案した無次元数で整理すれば、材料によらずフラッタ開始速度が予測できることを意味している。

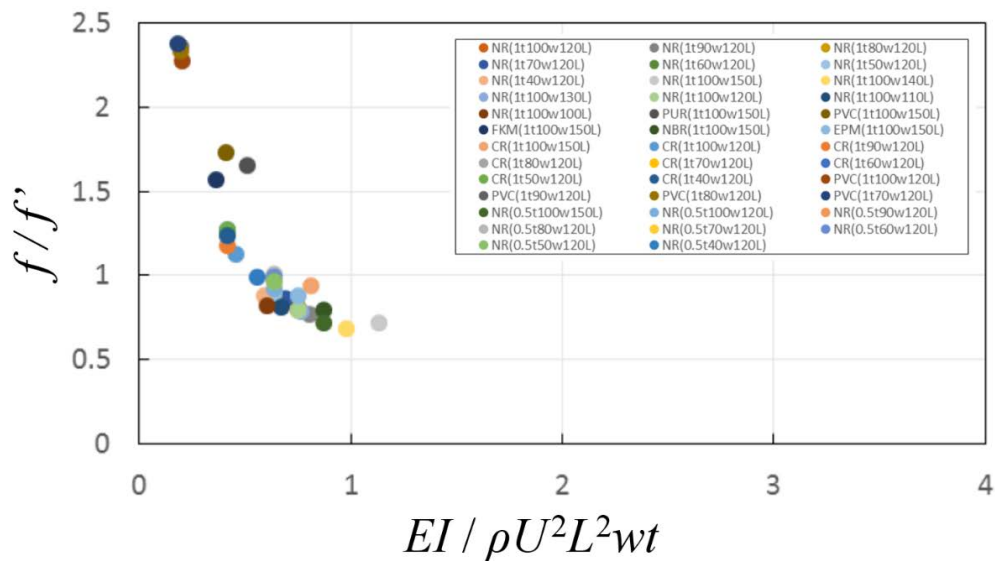


Fig. 5 Characteristics of flutter frequency to FSI parameter.

(4) 平成 28 年度進捗状況

ゴムシート材を用いてフラッタ実験を行った。ゴムシート材の大きさ, 材質, フラッタ開始速度を用いて表される無次元数を提案した。無次元数は材料の曲げモーメントと流体力によるモーメントの比を意味する。提案した無次元数は, シート材の大きさ, 材質によらず実験結果を系統的に整理できることを示した。

(5) まとめ

流体構造連成解析の検証に使用できる実験データを取得するために, フラッタ試験を行ってきた。金属材, ゴムシート材についてフラッタ開始速度を調べた結果, 系統的な傾向を確認することができた。その結果に基づき, 無次元数を導出した結果, 材料の材質, 大きさによらず, フラッタ周波数を整理できるパラメータであることを示した。矩形の板は検証計算に使用しやすい形の一つであり, 実験結果との比較に利用できるものと考ええる。

参 考 文 献

- (1) Eloy, C., Souilliez, C., Schouveiler, L., "Flutter of a rectangular plate", J. Fluids Struct., 23, 904-919 (2007).
- (2) 伊藤憲一, 剛体と弾性体を用いた翼のフラッタ特性に関する研究(GS 流体工学(流体計測, 翼など)), 日本機械学会, 東海支部総会講演会講演論文集, (2009).
- (3) 黒川雄太, フラッタを生じる旗に作用する風荷重測定: その 2 重量比およびアスペクト比が風荷重に与える影響(膜構造: 風洞, 構造 I), 日本建築学会学術講演梗概集, B-1, (2007).
- (4) 山口信行, 伊藤恵介, 緒方正幸, 柔軟ウェブ基礎形態のフラッタ限界とその挙動に関する研究 (第 1 報, フラッタ限界の予測と風洞試験結果), 日本機械学会論文集 (B 編), 67 巻, 663 号 (2001-11), pp. 2738-2745.
- (5) 五十嵐保, 杉山均, 流体工学と伝熱工学のための次元解析活用法, 共立出版, (2013).

3.4. 精度・妥当性検証グループ

本グループでは、シミュレーションと実験の精度・妥当性を検証する技術および精度・妥当性を向上させるための技術の研究を行っている。シミュレーションも実験も誤差を含んでおり、精度の検証および改良は重要なテーマである。具体的には、(1)効率的で精度のよい解析技術と実験のばらつきの解析精度への影響の研究、(2)物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式の開発、(3)オープン CAE(固体の有限要素法)を用いた精度検証などの研究を行っている。本年度から新藤先生がグループに加わり、(4)人体膝関節モデルを用いた接触応力分布解析を行った。また、(5)工学における最適化そのものの理論的研究も継続して行った。一番目のテーマは昨年に引き続き段ボールの解析の研究を行った。本年度は、実験のばらつきを考慮した精度・妥当性の検証に結びつけるため、ベイズ推定を用いて実験データのばらつきを考慮して、推定した材料の値の妥当性を検討した。これにより、解析結果の精度・妥当性の検証もできるようになった。材料データベースに関しては、昨年に引き続きデータベースの構築の研究を行っているが、SIPの開始から3年度目の中間評価にあたり、統合システムのプロトタイプ開発グループとの連携を中心に行った。プロジェクトで使用している共通鋼材について、分析データ、引張試験データなどをサンプルとしてXML Schemaを用いたスキーマ定義を開発し、OpenMathを用いて記述した構成方程式、拡張したオントロジーを用いてデータの統合に関わる検証のためのサンプルを開発した。オープンCAEを用いた精度検証については、ランス電力(EdF)が開発したSalome-Mecaを引き続き用いているが、2016年度は、詳細な試験データが報告書として公開されている非定常熱伝導繰り返しによる熱疲労試験を取り上げ、非定常熱伝導解析と弾性熱応力解析を行い、試験データのほか、商用CAEソルバMSC.Marcとも比較した。本年度から追加された人体膝関節モデルは、人体膝関節に着目し、その半月板に発生する接触応力分布および周辺の骨に生ずる応力分布について有限要素法を用いた構造解析(接触)を行った。工学における最適化手法のそのものの理論的研究では、進化計算を用いた協調ゲームとプログラム意味論を基にした言語との結合の可能性の理論的検討を行った。

3.4.1. ベイズ推定を用いた効率的精度解析技術の開発

(1) 目標・計画

段ボールは加工食品向けや、青果物の向けの食料品を主体に、電気、精密機械、ガラス・陶磁品、インターネット販売、引越など、多種多様な業界で用いられ物流には欠かせない梱包以外に緩衝材としての役割も果たす材料である。しかし段ボールは中芯形状が複雑であり、抄造機によって抄造された板紙は抄造方向に紙を構成する繊維が配列するため抄造方向と垂直方向で弾性率が異なる異方性材料であるため通常の数値シミュレーション解析は困難とされる。そこで、本研究では段ボールの中芯形状の周期性に着目し均質化法を用いて実験と数値シミュレーション解析から効率的に弾性率を算出する手法を提案する。また、提案手法により算出された弾性率は実験、数値シミュレーション解析など算出するまでの過程で不確定性含

み定量的に評価することは重要である. このアプローチとしてベイズ推定が有効であるとされる. したがって, ベイズ推定に用いられる異なる確率モデルを比較し, 不確定性を最低限考慮した確率モデルの構築を目指す.

(2) 意義・国際社会との比較

段ボールは梱包や緩衝材といった他, 近年, インターネット通販の発展により段ボールの市場は大きく物流を支える大きな要因となっている. しかし段ボールの設計は試行錯誤や過去の経験に依存している. 設計段階での数値シミュレーション解析を実施し設計の検討を行うことは支流となっているが現状では段ボールの決定的な解析手法は確立されておらず, 設計の非効率さを招いているといえる. 本研究で提案する手法は段ボール解析を効率的に行なう一つのアプローチとなる取り組みと考えられる. また, 妥当性のある解析結果の評価方法の概念として Model Validation and Verification (Model V&V)は国際的に重要な位置づけをされている. したがって, 提案手法によって算出されたパラメータを用いた解析結果の妥当性を検討することは国際的にも意義のあることである.

(3) 研究内容

曲げ試験

一層段ボールの平面曲げ特性を把握するため図 1(a)に示す試験機を作成し曲げ試験を行った. 測定は試験片の両端を治具で完全固定し圧子により圧縮速度 10mm/min で荷重を与え, 負荷をセンサーにより段が完全に潰れるまで行った. また, 本研究では図 2(b)に示す中芯の 2 方向に対して試験毎に新しい試験片を用いて同手順による測定を CD, MD それぞれ 10 回行う. また, 本研究では図 2 に示すように測定された測定値に対し回帰直線を求め解析領域を ($0.5 \leq x \leq 2.0$)に限定して議論を行う.

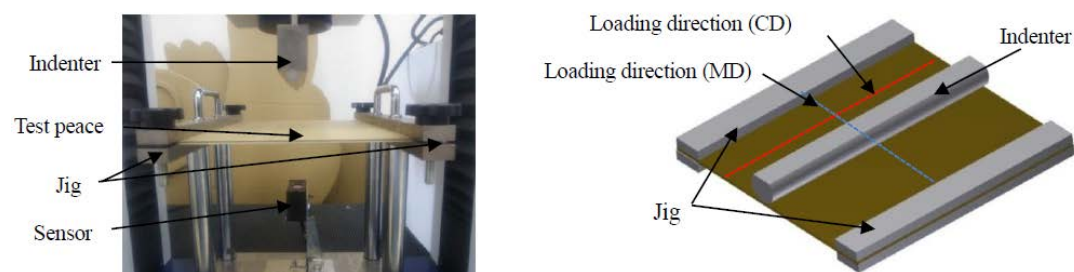


Fig.1 Bending test of corrugated cardboard

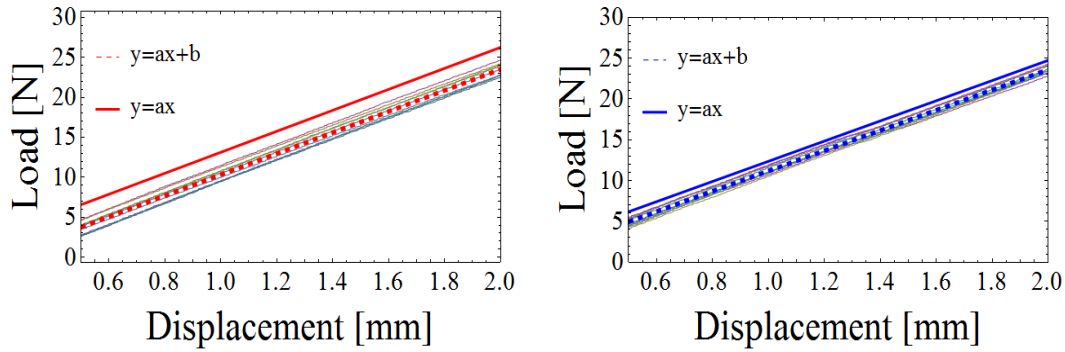


Fig.2 Load – distribution characteristic

均質化法

段ボールを対象に数値シミュレーション解析を行う場合、段ボールを構成する段が非常に密であるためモデル化や境界条件の設定に手間がかかる。また各段に対してメッシュを切る必要があるため通常の有限要素解析では離散化が困難であることや、非常に多くの節点数、要素数を有するため計算コストや時間が実用的ではない。そのため段ボールの詳細モデルを作成し解析を行なうのは非効率的である。そこで本研究では段ボールの段の周期性を活かし均質化法を用いて段ボールの数値シミュレーション解析を行なった。均質化法は周期的な微視構造を有する不均質体を効率よく解く解法として知られ単位周期である微視的基本構造単位(ユニットセル)と解析領域全体を対象とする全体構造の異なる 2 つの空間スケールから、支配方程式を連立して解くことにより微視—巨視連成挙動解析を可能にするものである。本研究では図 3(a)に示す段ボールの一つの段をモデル化したマイクロモデル図 3(b)に実験に用いた試験片度同寸法をモデル化したマクロモデルを示す。

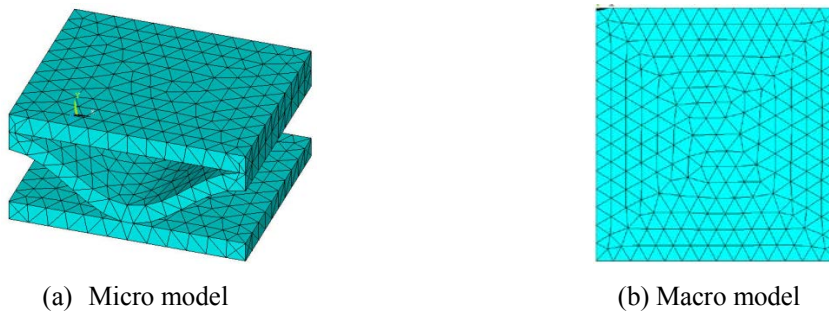


Fig3. Homogenization model

回帰直線 CD, MD より一意にお決定した荷重から求めた、変位にフィットするような材料特性の組み合わせをそれぞれ均質化法を用いて探索を行う。 F_{20} を回帰直線 CD, MD の一意に決定した荷重 20N とし e_1, e_2 をそれぞれライナと中芯とすると式 1 に示すように定式化できる。

$$\text{im}(F_{20})\left(\{(e_1, e_2) | e_1, e_2 \in \{1e^3, 2e^3, 3e^3, \dots, 1e^4\}\}\right) \quad (1)$$

材料特性の算出

前節による解析結果から CD, MD それぞれ応答曲面を作成し, 図 4 に示す応答曲面の解空間より交点の座標を材料特性の推定値とする.

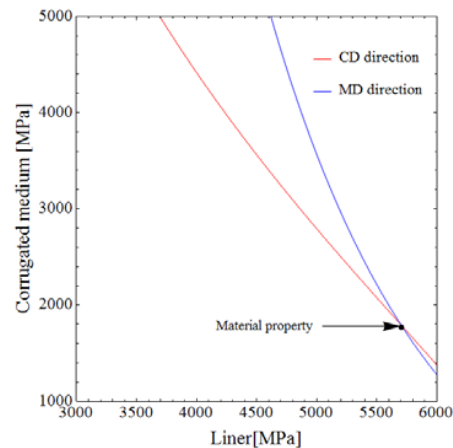


Fig.4 Inference of material property by intersection of coordinate

材料特性の検証

本研究で求めた材料特性が有効であるか検証を行う. 図 5 は均質化法を用いて線形範囲上の荷重を境界条件とし解析を行い, 回帰直線と比較した結果をそれぞれ示す. 比較結果より回帰直線の変位データを合理的に数値シミュレーションに取り込むことにより材料特性を求めた. したがって, CD, MD それぞれ回帰直線の値と概ね一致しており材料特性の有効性が確認できた.

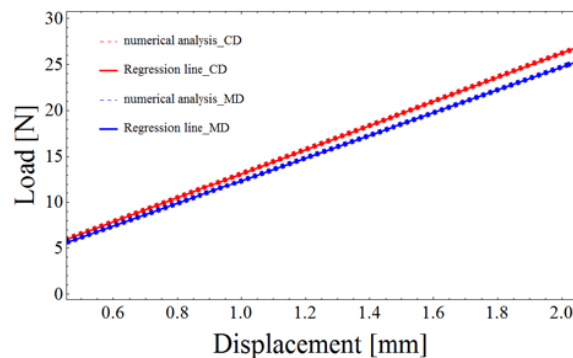


Fig.5 Comparison of between reduction regression line and numerical analysis

材料特性の検証

本来解析者はある事象に対して結果が得られたときの原因について推定する立場である. しかし現実問題として実際に知ることができるのはある原因がもとで得られた結果である事象の場合が多くを占める. ベイズの定理はこのような直接計算するのが困難である結果に対する原因を逆確率という形式で結果から原因を計算する公式を与えるもので式 2 に示すことができる.

$$p(\theta|D) \propto f(D|\theta)p(\theta) \quad (2)$$

ここで原因をデータ D 、結果をパラメータ θ と置き換えると $p(\theta|D)$ は事後確率でありデータ D のもとでパラメータ θ が得られる確率である。事後確率はパラメータに対する尤もらしさを示す尤度関数 $f(D|\theta)$ と文献、過去の知見やデータといった解析者の有する主観的な情報を反映させた事前確率 $p(\theta)$ を乗ずることで導き出している。

確率モデル

本研究では下記に示す確率モデルについて議論を行うため Case A では明瞭な因子を考慮しない従来型ベイズモデル、Case B, C では解析者が最低限把握している不確定性を考慮したパラメータの異なる最単純型階層ベイズモデルを作成した。

Case A: 従来型ベイズモデル

荷重条件 F 、段ボールの各方向 CD 、 MD における拘束条件 C のもとで得られた解析結果より作成した応答曲面の変位 u から弾性率 E (ライナ: E_{Liner} 、中芯: E_{CM})の弾性率を推定する。従って尤度は次式ようになる。

$$L(u|F, C) \quad (3)$$

Case B, C: 最単純化階層ベイズモデル

実験値の観測誤差の因子を加えた応答曲面の変位 u から弾性率を推定する。実験値 y は試験により測定された変位、 λ は圧子の初期位置、試験片の拘束など測定により生じる誤差、 $N[u, \lambda^{-1}]$ は正規分布を表す。従って実験値 y が正規分布に従うとすると分布は式4となる。

$$y|u, \lambda \sim N[u, \lambda^{-1}] \quad (4)$$

ここで実験精度 λ^{-1} は実験の正確さであり実験誤差の尺度を制御する、実験精度 λ^{-1} は式5に示すガンマ分布に従うとする。

$$\lambda^{-1} \sim Ga[\alpha, \beta] \quad (5)$$

ここで α 、 β はガンマ分布を支配するパラメータであり $\alpha > 0$ 、 $\beta > 0$ という制約条件が課せられる。従って尤度は次式となる。

$$L(y|F, C, E, \alpha, \beta) \quad (6)$$

推定結果

図に観測データ 20 データ(D_i^{CD}, D_i^{MD})、一様分布を用いてそれぞれの確率モデルに対してベイズ

推定を行なった結果の事後分布, 表 4 に平均と分散の定量値を示す.

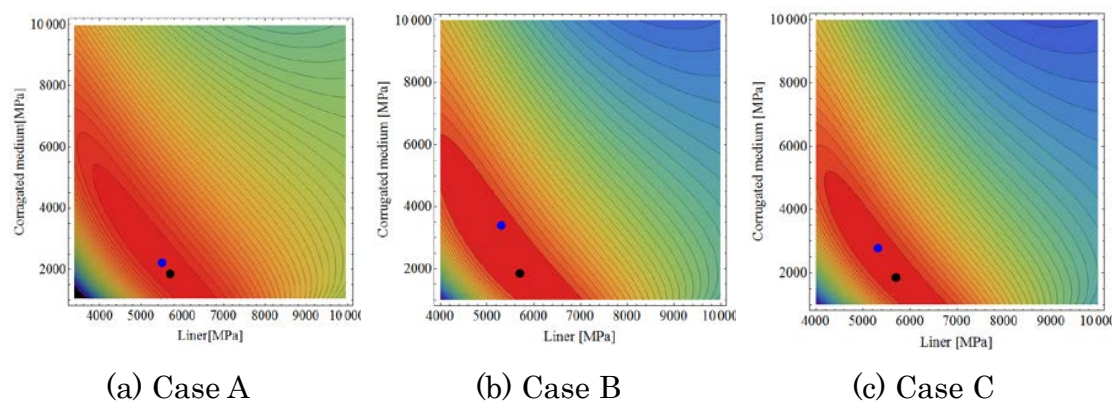


Fig.6 Posterior distribution

Table.1 Values of average and variance

Parameter	Case A		Case B		Case C	
	Ave	Var	Ave	Var	Ave	Var
Liner	5494	6892.2	5305	6825.8	5319	3673.7
Corrugated medium	2211	16070	3389	27392	2774	13396

結果と考察

通常の有限要素解析では段ボール構造が複雑であるためモデル化や境界条件の設定に手間がかかり非効率であるが, 段ボールの周期性構造に着目し均質化法を適用することで詳細なモデルによる解析を必要とすることなくマイクロモデルとマクロモデルから段を考慮した全体構造解析が可能となり, 効率的に解析を行えることが示された従来型ベイズモデルでは不確定因子の影響を明瞭に考慮しておらず, 最単純化階層ベイズモデルと比較するとよい推定結果であるが, 不確定性を妥当に表現しているとは言い難く, 一方で最単純化ベイズモデルでは明瞭な不確定因子を考慮することでより真の現象を表現することができ, 不確定因子のパラメータを設けることで推定の自由度が増ということがいえる.

(4) 平成 28 年度進捗状況

不確定性因子をすべて考慮した確率モデルは非常に複雑となるため, 最低限必要となる実験の不確定性を考慮し確率モデルを階層型へと拡張した. 実験精度のばらつきをガンマ分布で定義しガンマ分布を支配するパラメータ値に異なる値を設定した推定結果の比較を行った.

(5) まとめ

段ボールを対象に実験と数値シミュレーション解析からデータ同化により効率的に弾性率を算出

する手法を提案した。数値シミュレーション解析においては段ボールの中芯の周期性に着目し均質化法を用いることで段ボールの詳細モデルを作成することが避けられ計算コスト、計算時間を大幅に削減することができた。また、ベイズ推定による不確定性を評価するため、最低限必要となる因子を考慮した実用的な確率モデルを構築した。

3.4.2. 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式開発

(1) 目標・計画

数値シミュレーションのために基本的な物性値は必須のものであるが、材料の物性値を収めたデータベースにおけるデータ表現は統一されておらず、多くの材料データベースがインターネット上に存在する現在でも、必要なデータは事実上手作業で値を入力する必要がある。本研究では、材料データの標準データ交換形式を開発し、数値シミュレーションのシステムと物性データベースの連携を行うことを目的とする。

(2) 意義・国際社会との比較

材料物性に関するデータベースは各所で開発されているが、統一されたフォーマットは無く、データを交換するための標準を作成する試みは NIST などによって行われてきたが現在のところ定まった標準がない。データ交換のためのフォーマットが統一されることにより、分散したデータベースの統合利用に加え、数値計算システムなどからの利用も容易になる。

米国では従来からあった材料開発に計算機シミュレーション、データを活用しようという研究を統合する形でマテリアルズ・ゲノム・イニシアティブ(MGI)が国策として推進されるようになった。2014年には我が国においてもマテリアルズ・インフォマティクスに関連する研究プロジェクトが注目され、物質・材料研究機構にプラットフォームが設置されるなどしている。内閣府戦略イノベーション創造プログラム(SIP)では、テーマの一つである革新的構造材料分野が取り上げられた。

革新的構造材料分野には東大・小関教授を代表者として、関連するメカニズムに関わる複数のシミュレーション、データなどを統合して構造材料の性能評価を行うマテリアルズ・インテグレーション(MI)が採択され、平成 26 年度より 5 年間で構造物溶接部の性能評価を例題としてシステム開発を行うこととなった。芦野はここに分担者として参画し、セマンティック・ウェブ技術を用いた材料に関する数式・データ・シミュレーションを連携させるためのデータ構造開発を行っている。

中国では、やはり MGI の影響を受けた China MGI の活動が始まり、北京科学技術大学、上海大学に設置された MGI Institute などにおいて材料研究者、情報科学研究者などが連携して活発な活動を進めている。

(3) 研究内容

セマンティック・ウェブの一連の規格である RDF (Resource Description Framework), OWL (Web Ontology Language), RIF (Rule Interchange Format), および数式の意味内容を記述する OpenMath など XML を用いた記法を用いて, 既にある程度知見の整備されている機械試験, クリープなどを例題として関連した経験式, 推論規則, データを記述してリンクし, 検索言語 SPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language)を用いて検索する.

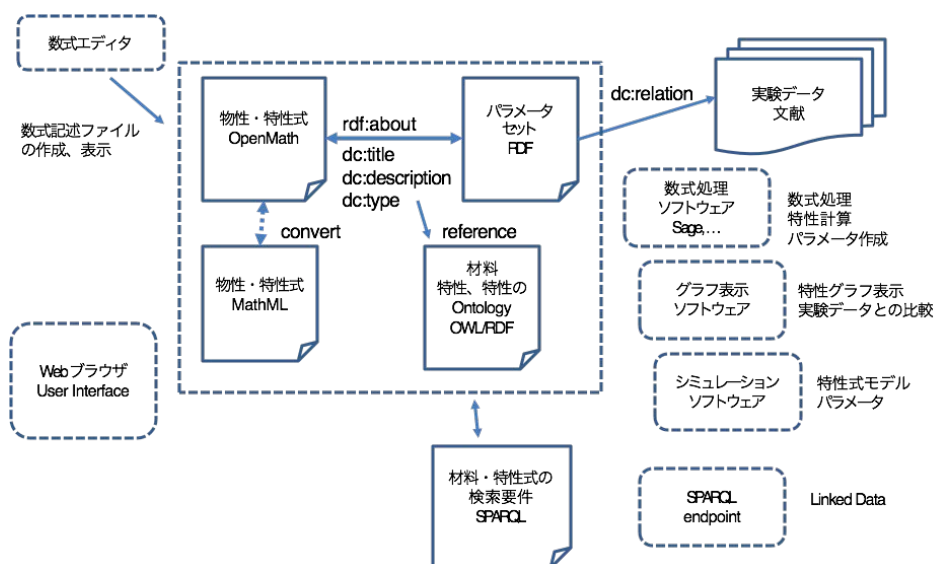


Figure 1. Application of the Semantic Web Framework for Materials Integration

共通のフレームワークを用いてデータ・計算結果・数式・オントロジーを記述することで, 材料に関わるデータと知識の連携のための共通基盤を構築し, MI プロジェクトにおいて開発されている統合システムのデータ基盤を構築する.

(4) 平成 28 年度進捗状況

SIP の開始から 3 年度目の中間評価にあたり, 統合システムのプロトタイプ開発グループとの連携を中心に行った. プロジェクトで使用している共通鋼材について, 分析データ, 引張試データなどをサンプルとして XML Schema を用いたスキーマ定義を開発し, OpenMath を用いて記述した構成方程式, 拡張したオントロジーを用いてデータの統合に関わる検証のためのサンプルを開発した. これらの結果は統合システムにおいて各段階のモデル計算結果, データなどを保存するデータベースの設計に反映されている.

9 月にはデンバーで開催された International Data Week において NIST をはじめとする米 MGI

のグループとの議論に加わった。また、10 月にはベトナム・ハノイで開催された AMDS2016 (The 5th Asian Materials Database Symposium) においてオントロジーを用いたデータ統合、SIP プロジェクトの統合システム開発などについてキーノート講演を行った。本シンポジウムでは参加していた中国 China MGI に関わる北京科学技術大学のグループとの間で材料オントロジーなどに関する議論を行った。

(5) まとめ

本研究では、インターネット上でのデータとメタデータ表記の標準であるセマンティック・ウェブの記述を用いることで、材料のマクロ特性の評価に必要な実験データ、シミュレーションの出力、経験式など異種のデータに統一的な記法とオントロジーによる共通の語彙を与え、MI の統合システムの基盤開発を行った。

3.4.3. オープン CAE (固体の有限要素法)を用いた熱疲労試験の再現解析による精度検証

(1) 目標・計画

製造業の設計現場をはじめとして広く用いられている固体の有限要素解析に対する「解析の品質確保」の重要性は広く認識されている通りである。企業でよく使用されている商用ソルバでは、ソルバ開発元によるソフトウェア品質管理とユーザ支援によってある程度の品質確保が図られており、ソースコードの秘匿化により、ユーザ自身がアルゴリズムを確認することはあまりない。近年、利用が広がりつつあるオープン CAE の場合は、ソースコードが公開されているためユーザ自身が確認、改変ができる一方で、ソフトウェア品質とユーザ技量の両方の検証がユーザに委ねられるため、V&V における新たな課題が提起されている。ただし、ソースコードが公開され、無償であることからアクセス性が高く、オープン CAE が商用ソルバよりも社会的受容性に優れている側面もある。

本研究では、固体の有限要素解析に対する精度検証の方法と事例を蓄積し、公開する上で、商用ソルバと並んでオープン CAE を取り上げることで、より幅広いユーザが自ら取り組み得る V&V 活動の実例として提示する。

(2) 意義・国際社会との比較

誰もがアクセスできるオープン CAE を取り上げることで、市民的目線での検証が可能になり、精度検証の客観性、計算力学に対する社会的受容性が高まる。安価な検証手段を提示することで新興国や小規模企業での普及にも貢献し得る。また、形状モデルデータや可視化ツールを製品開発・製造のための共通プラットフォームとしての利用が可能であることから、ものづくりのグローバル化に寄与する。ユーザ自身に対して高い技術力を要求することから、意欲のあるユーザの自己研さん(結果的に解析の品質確保につながる)のための利用でも有利になる。

(3) 研究内容

オープン CAE の一例としてフランス電力 (EdF) が開発した Salome-Meca^[1] を取り上げ、精度・妥当性検証を行う。2015 年度は、広く使用されている標準引張試験機を用いた引張試験を再現し、材料非線形、幾何学的非線形問題に対する精度・妥当性検証を行った^[2]。

2016 年度は、詳細な試験データが報告書として公開されている非定常熱伝導繰り返しによる熱疲労試験^[2] を取り上げ、非定常熱伝導解析と弾性熱応力解析を行い、試験データのほか、商用 CAE ソルバ MSC.Marc^[3] と比較した。

(4) 平成 28 年度進捗状況

(a) 解析対象

解析対象は図 1 に示す内径 53.5mm、最小肉厚 3.5mm、最大肉厚 30mm の軸対称、左右対称構造厚肉円筒試験体である。材料として、高い熱応力が生じやすい SUS304 が使用されている。また、試験方法として、試験体内部に温度の異なる 2 種類の液体金属ナトリウムが交互に流し込まれた。表 1 に SUS304 液体ナトリウムの物性値を示す。ナトリウムの温度差によって、試験体に繰り返し熱過渡応力が発生させられた。流量 100 リットル毎分の液体ナトリウム高速流により、温度 600℃で 40 分の急熱と温度 300℃で 10 分の急冷の繰り返しを 2000 回行われた。また、試験結果として試験体外表面の 2 点 (肉厚 16.75mm 部と肉厚 30mm 部) と入り口ナトリウム温度が計測され、試験後の試験体のき裂の発生状況が観測された。試験結果を図 2、図 3 に示す。

(b) 解析方法

解析にはオープン CAE システム、Salome-Meca 2015.1 に内包されたソルバ Code_Aster Ver. 11.7^[1] を使用した。解析モデルと要素分割、境界条件を図 4 に示す。他のソルバとの比較を容易にするため、解析モデルや方法をできるだけ単純化している。要素は四辺形 2 次要素を使用した。左端 (ナトリウム入り口側) は軸方向変位従属とし、右端は軸方向変位を 0 に設定した。熱伝導解析では、解析モデルの初期温度を 300℃とし、内面に、表 2 と図 2 の値を用いてナトリウムによる 50 分間の熱過渡を与えた。また、試験体の外面はすべて断熱とした。材料特性の設定として、各物性値はすべて報告書^[3]より引用した。

解析実行用のコマンドファイルとして、非定常熱伝導解析では温度依存のデータの読み込み (Code-Aster のキーワードでは DEFI_FONCTION) と非線形・非定常解析の境界条件 (同, AFFE_CHAR_THER_F) を設定し、解析を実行した。熱応力解析では、非定常熱伝導解析結果の

継承コマンド(同, POURSUITE)を使用した。

(c) 解析結果

外面評価点における, 非定常熱伝導解析結果と試験での温度計測結果の比較を図 5 に示す。厚肉部は温度追従が遅く, 薄肉部は温度追従が速いことが分かる。解析結果と温度計測結果において, 急熱と急冷ともに温度変化率がよく一致した結果が得られた。

Salome-Meca での解析結果より, ミーゼスの相当応力の瞬間値が最大となる 2 時刻点における解析モデル内の温度分布を図 6 に, ミーゼスの相当応力の分布を図 7 に示す。これらの図より, 内面と外面の温度差が大きいほど内面に大きな応力が発生している。

熱疲労の評価には, 瞬間のミーゼス相当応力ではなく, 熱荷重サイクル中の 2 時刻点の差に対するミーゼス相当応力範囲が用いられる^[4]。MSC.MarcTMと Salome-Meca において, 内面でのミーゼスの最大ピーク応力範囲を計算した結果を表 2 に示す。大きな熱応力の発生する厚肉部では, 2 つの解析ソフトにおいて計算結果が一致した。薄肉部での誤差の原因として, 非定常熱伝導解析の結果に若干の違いがあり, その結果, 応力に有意差を生じたものと考えている。Salome-Meca でのミーゼスの最大ピーク応力範囲計算結果と試験でのき裂の発生状況の比較を図 8 に示す。図 8 からわかるように, 厚肉になるほど, 深いき裂が観測された。

(d) 解析結果のまとめ

日本原子力研究開発機構で実施された繰返し熱過渡試験の再現解析による精度検証を行った。ミーゼスの最大応力範囲を計算すると, 厚肉部において, 2 つの解析ソフトで近い値が得られた。試験でのき裂の発生状況は, 解析結果とよく一致した。以上より, 本解析結果は V&V データとして有効であることを確認した。

今後は, 最新の火力発電機器に用いられている改良 9Cr-1Mo 鋼に対する日本原子力研究機構による同様な試験^[5]など, 検証事例を蓄積し, 数値解析に対する信頼性・社会的受容性を高めて行く所存である。

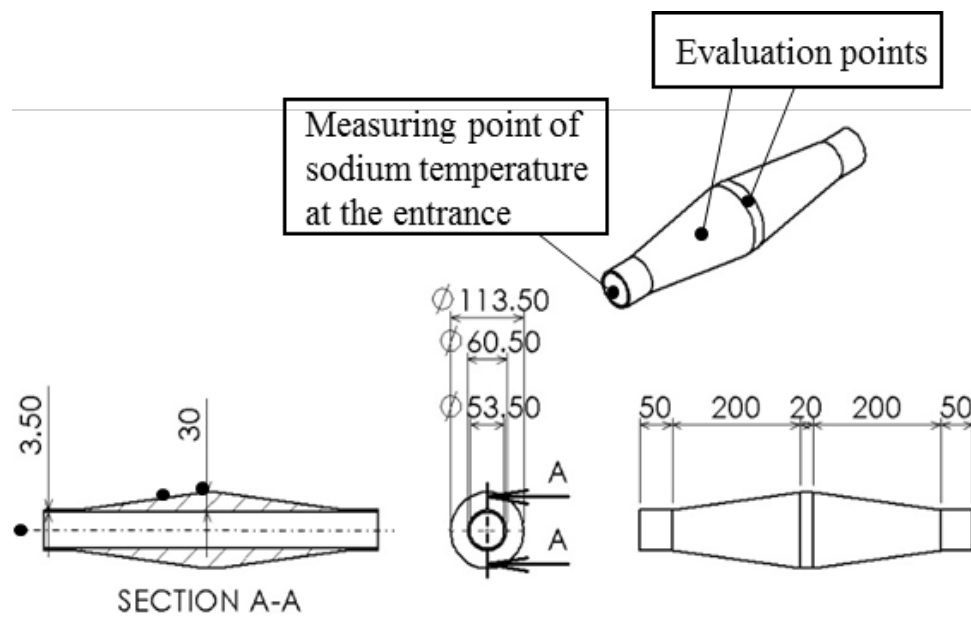


Fig. 1 Configuration of the specimen and temperature measuring points

Table 1 Material properties used the heat transfer analysis and the elastic analysis

$T (^{\circ}\text{C})$	λ (Kcal/m h $^{\circ}\text{C}$)	C_p (Kcal/kg $^{\circ}\text{C}$)	ρ (kg/m ³)	E (kg/mm ²)	ν	α (10 ⁻⁶ mm/mm $^{\circ}\text{C}$)
300	15.732	0.129	7900	18000	0.287	18.79
350	16.308	0.131	7880	17600	0.291	19.19
400	16.920	0.132	7860	17200	0.295	19.57
450	17.496	0.133	7830	16700	0.298	19.93
500	18.072	0.134	7810	16200	0.302	20.28
550	18.648	0.136	7790	15700	0.306	20.60
600	19.224	0.138	7760	15200	0.310	20.87

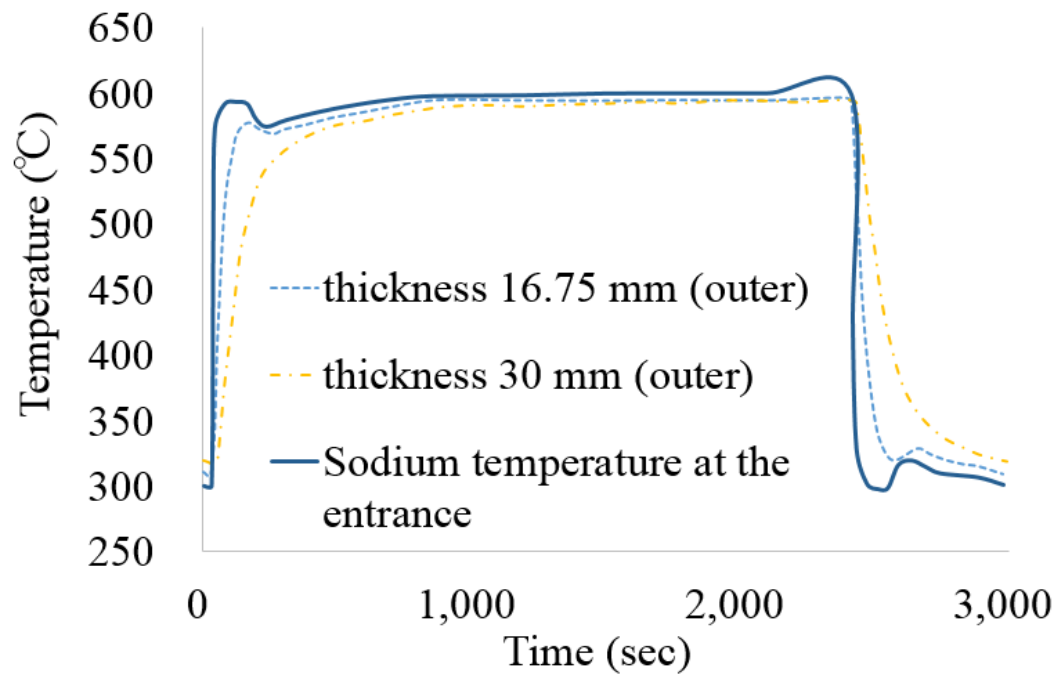


Fig. 2 Temperature histories at the evaluation points [2]

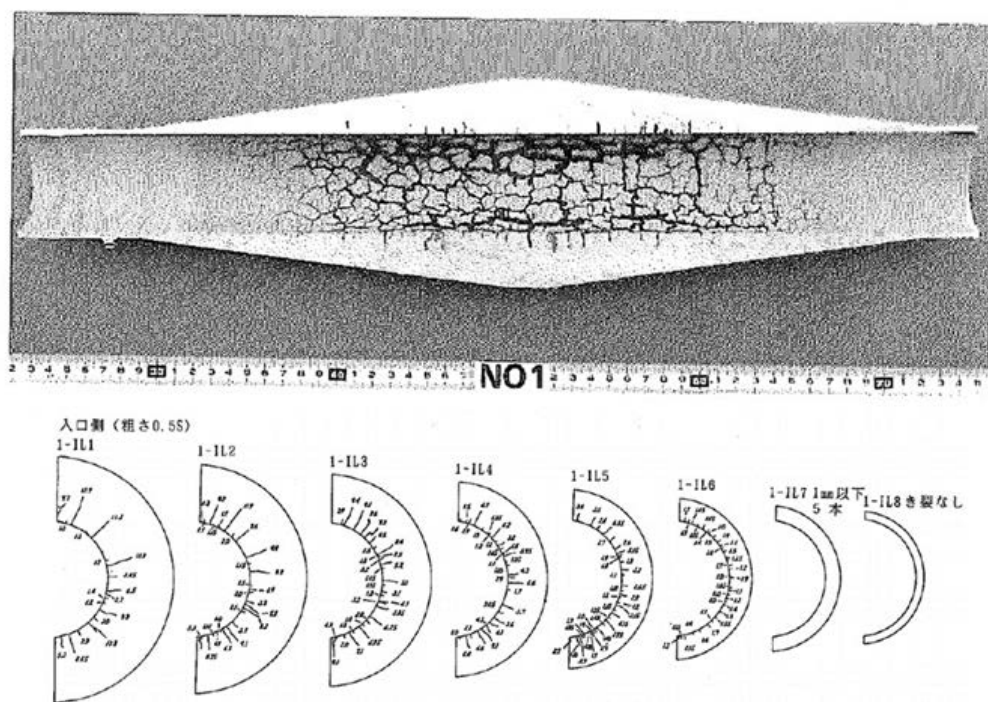


Fig. 3 Results of crack observation [2]

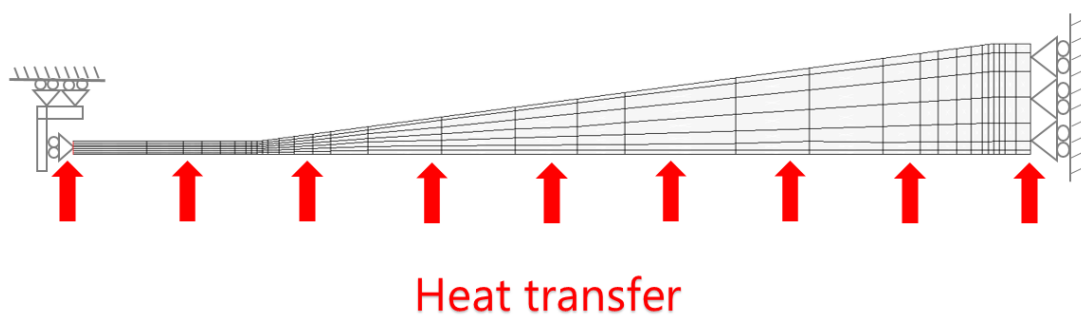


Fig. 4 The model used the simulation analysis and boundary conditions

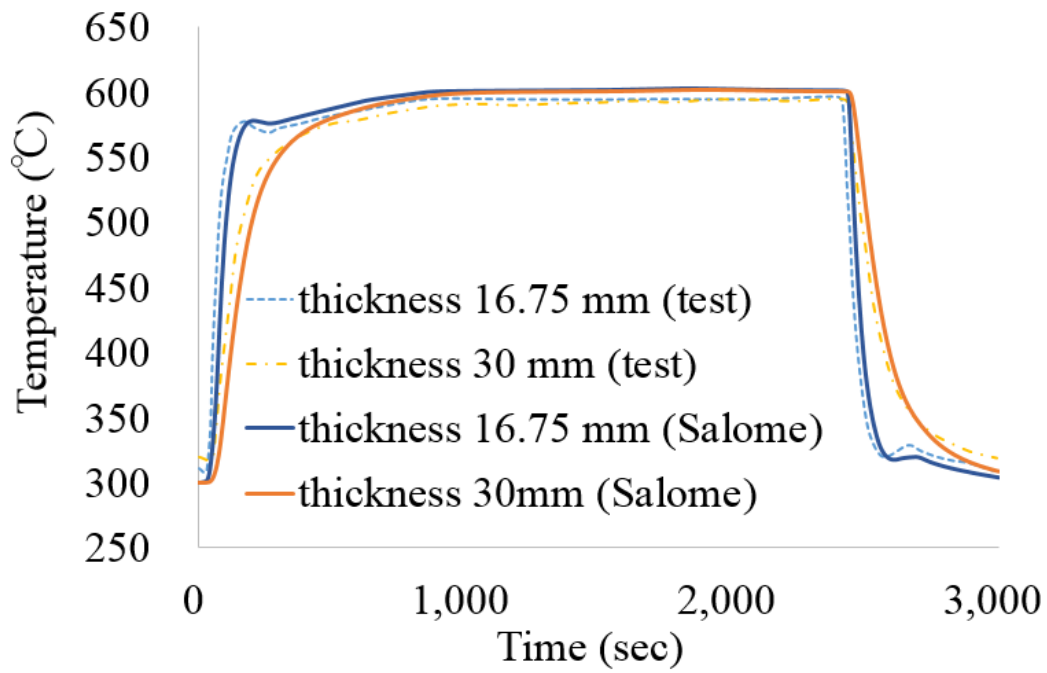


Fig. 5 Temperature histories at the evaluation points

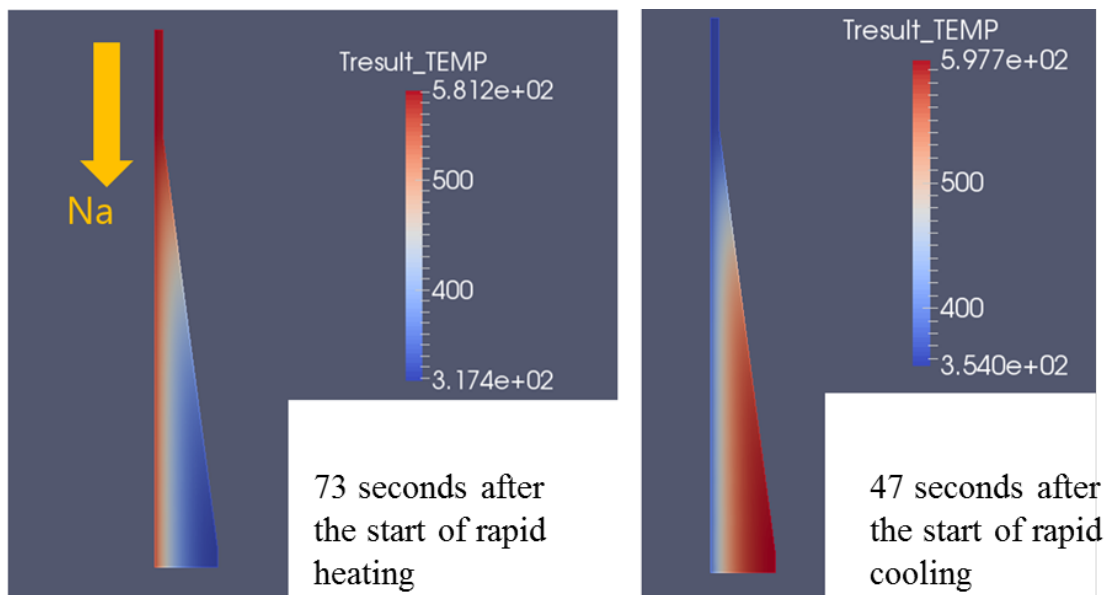


Fig. 6 Temperature distribution at time steps calculated maximum moment equivalent stress

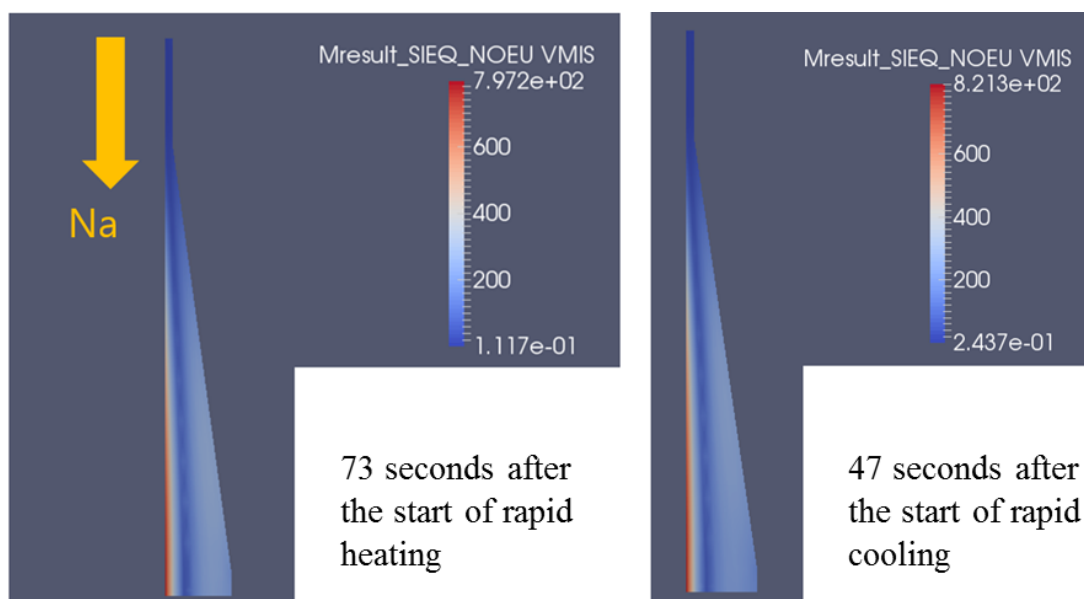


Fig. 7 Mises equivalent stress distribution at time steps calculated maximum moment equivalent stress

Table 2 Results of stress range calculation

Z coodinates of inner surface (mm)	Salome-Meca (MPa)	MSC.Marc™ (MPa)
0	40.48	140.6
10	134.7	211.1
110	1194	1213
250	1617	1630
260	1618	1640

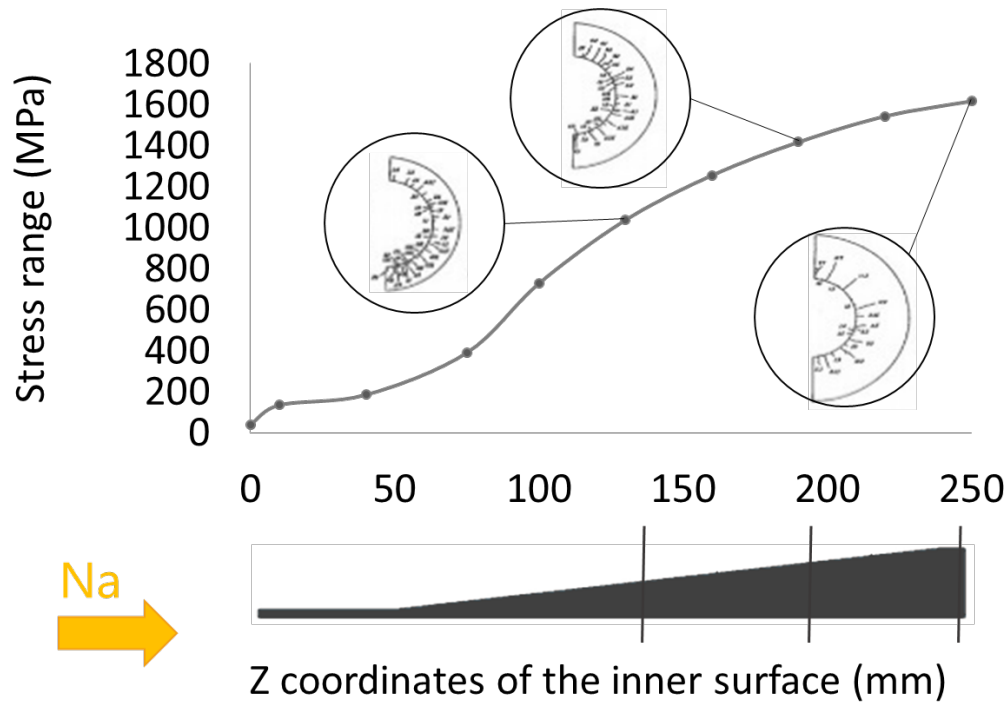


Fig. 8 Distribution of stress ranges compared with crack observations

参考文献

- [1] EdF, Code-Aster.org, <http://www.code-aster.org/>, (2016 年 12 月 23 日閲覧).
- [2] 藤岡照高, 構造解析ソルバ検証用参照解の整備(低合金鋼引張試験の Code-Aster による再現), オープン CAE シンポジウム 2015@富山, 富山, 2015(11).
- [3] MSC Software, <http://www.mscsoftware.com/>, (2016 年 12 月 23 日閲覧).
- [4] ASME, 2004, Boiler and Pressure Vessels Code, Section III - Rules for Construction of Nuclear Facility Components, Subsection NH - Class 1 Components Elevated Temperature Services.
- [5] M. Ando *et al.*, Thermal transient test and strength evaluation of a thick cylinder model made of Mod.9Cr-1Mo steel, Nuclear Engineering and Design 255, 2013, pp. 296-309.

3.4.4. 人体膝関節モデルを用いた接触応力分布解析

(1) 目標・計画

変形性関節症は潜在的なものを含めると、日本全国に 2400 万人の罹患者がいると推定されている。変形性関節症の進行に伴い、関節面に変性が生じるため、関節可動域の減少および日常的な歩行運動に伴う痛みが増幅するため、日常生活への影響も大きい。健康的で質の高い日常生活を送るためには、変形性関節症の病変発生・進行のメカニズム解明が必要不可欠である^{1,2)}。

しかしながら、現時点において、変形性関節症の発生・進行のメカニズムは数値的には解明されていない。特に、人体モデルのような複雑形状モデルを対象とした構造解析において、その解析精度および妥当性を検証することは、整形外科分野のみならずスポーツ科学分野やバイオメカニクス関連研究において重要な研究課題であるといえる^{3,4)}。

本研究では、3D スキャナを用いて再現した人体膝関節モデルを構造力学的観点から接触解析を行い、先行研究で実施された生体力学試験片の圧縮試験結果⁵⁾との比較検討を行うことで、本研究で実施する解析手法の解析精度・妥当性を検証し、その有用性を確認する。

(2) 意義・国際社会との比較

解剖学的生体モデルを用いた応力分布解析の精度妥当性検証を実施することで、本解析手法の有用性を示し、生体関節部分で発生する様々な整形外科的疾患の進行予測やそのメカニズムの解明に大いに役立つことが期待される。さらに将来的に、膝関節周りの運動解析結果との連成解析を実施することで、歩行や走行などの運動中の膝関節内部の精度の高い構造解析が可能となり、国内外のスポーツ・バイオメカニクス分野へ及ぼす影響は大きいと考えられる。^{3,4)}

(3) 研究内容

本研究では、人体膝関節に着目し、その半月板に発生する接触応力分布および周辺の骨に生ずる応力分布について有限要素法を用いた構造解析(接触)を行った。基礎検討として、体重 60kg の人間が立位時を想定して、片足に 30kg の荷重を加えたときの半月板周辺の応力分布について着目した。

(i) 解析モデルの作成

まず Fig. 1 に示すような、人体脚部標本から型取りされた、ナチュラルキャスト製の膝関節モデルを各組織ごとに分解し、DAVID Vision Systems 社製レーザースキャナ DL-SET01 を用いてモデルの 3 次元モデル化を実施した。スキャニングの様子を Fig. 2 に示す。

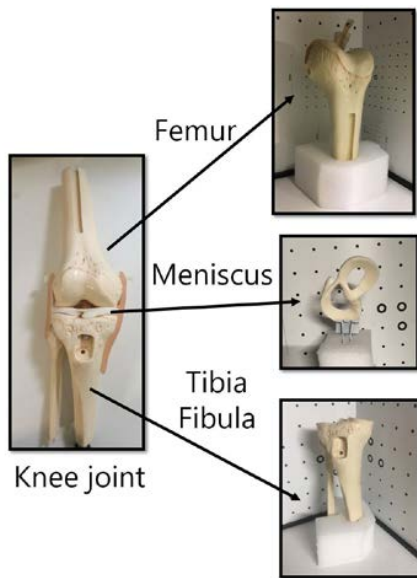


Fig.1 Functional model of the knee-joint

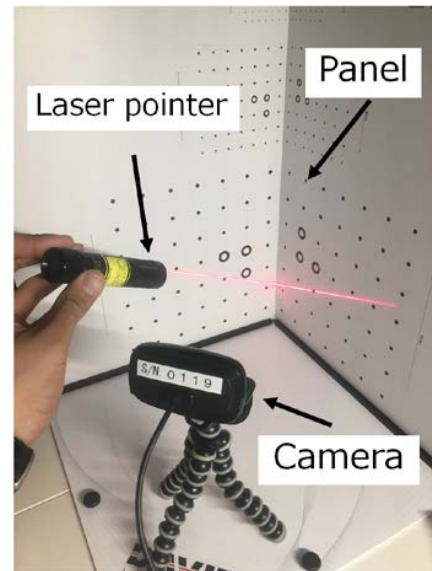


Fig.2 3D laser scanner

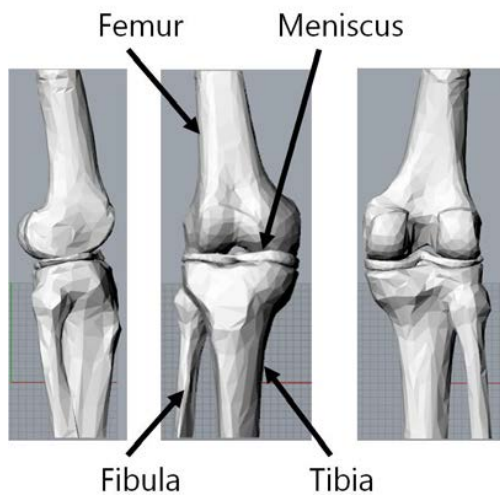


Fig.3 Scanned solid model in 3D-CAD

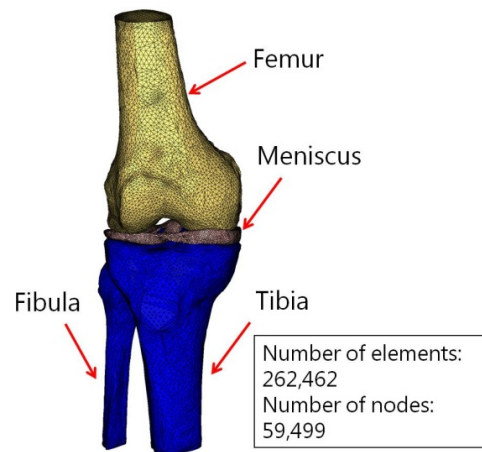


Fig.4 Finite element model of the knee

スキャンしたモデルデータを 3D-CAD ソフトにインポートし、ノイズを除去するためにスムージングしたうえでソリッドモデルを作成する。作成したソリッドモデルを Fig. 3 に示す。その後、プリプロセッサ Hyper Mesh を用いて要素分割を行い、有限要素モデルを作成した。有限要素解析モデルを Fig. 4 に示す。本解析モデルはテトラメッシュで構成されており、総要素数 262,462、総節点数 59,499 となった。本解析モデルを用いて接触解析を実施した。

(ii) 解析条件

解析には、有限要素法構造解析ソフト MSC.MarcTMを使用した。本解析では、体重 60kg の対象者の立位時状態を再現した。Fig.5 に設定した境界条件を示す。脛骨と腓骨の下端断面を完全固定し、片足に体重の半分の重さがかかると想定し、大腿骨上面に 30kgf の荷重を負荷した。各組織の物性値は、Table I に示すとおりである⁵⁾。また、大腿骨と半月板との間に接触条件を定義することで膝関節内を再現した。

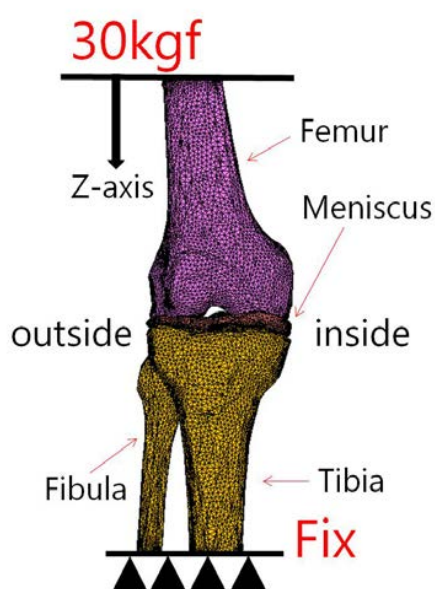


Fig. 5. Boundary conditions

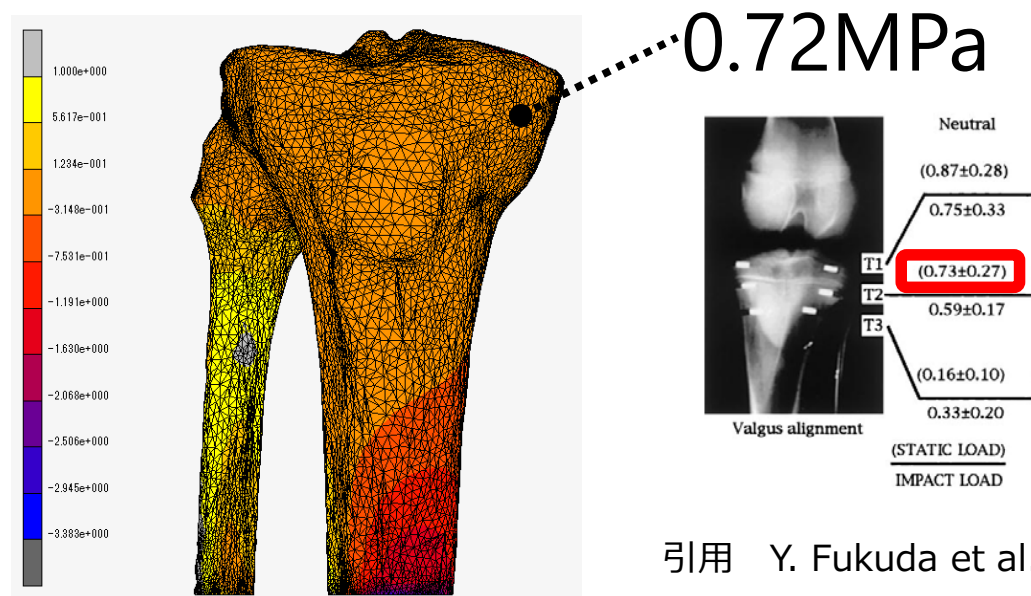
Table I. Material properties

	Young's modulus [MPa]	Poason's ratio
Femur	17700	0.3
Tibia	17700	0.3
Fibula	17700	0.3
Meniscus	10	0.49

(iii) 解析結果

Fig. 6 に脛骨の骨頭周辺の軸方向応力分布解析結果を示す. この解析結果では断面積の広い骨頭周辺に比べて細くなっている部分に応力が集中していることが確認できる. また, 先行研究との比較検討として, 2000年に福田らが人体の膝関節片を用いて実施した, 本解析条件と同条件の圧縮試験結果⁵⁾と比較すると, 実験では脛骨の骨頭周辺に挿入した圧力センサにおいて軸方向応力値として $0.73 \pm 0.27 \text{MPa}$ が計測されたのに対し, 本解析における同じ位置での応力値は 0.72MPa であり, この点の応力値において約 98.6%一致していることが確認できた.

また, Fig. 7 に全体のミーゼス応力分布解析結果および, Fig. 8 に半月板の大腿骨都の接触面のミーゼス応力分布結果を示す. Fig. 8 において内側半月板の中節から前角にかけて応力集中が確認できた. 本研究では正常アライメントの膝関節に関して立位時の解析を行ったが, 通常状態においてもこのように応力分布に不均一さがあり, 変形性関節症発生予測位置との因果関係が伺える結果となった.



引用 Y. Fukuda et al.

/Clinical Biomechanics

15,pp516-pp521,(2000)

Fig. 6 Estimated result of Z-axis stress distribution and experimental result with knee bone by Y. Fukuda *et. al* in 2000

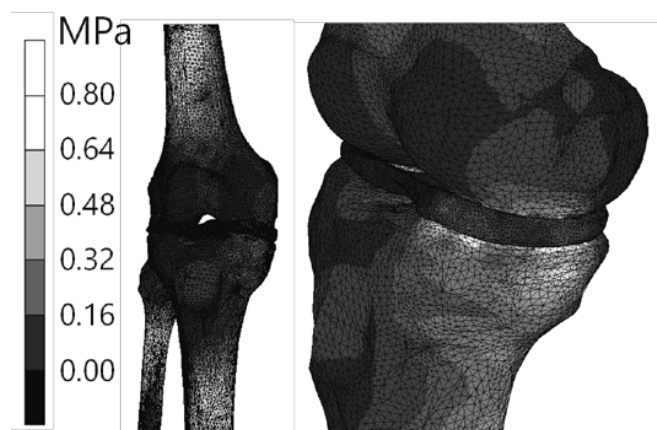


Fig. 7 Distribution of equivalent of Mises stress

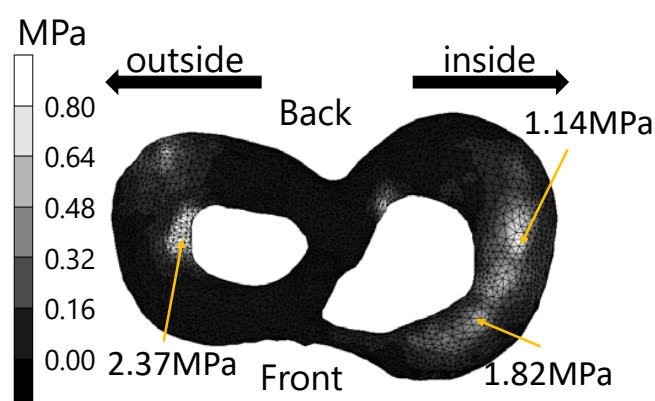


Fig. 8 Distribution of equivalent of Mises stress around the meniscus

(4) 平成 28 年度進捗状況

本年度よりプロジェクトに参画し、上記に示すようなバイオメカニクス分野における V&V を実施した。その結果、有限要素法解析結果と生体試験片を用いた力学試験結果との整合性を確認することができ、当該関連分野における有限要素法を用いた構造解析の有用性を示した。

(5) まとめ

変形性関節症をはじめとする様々な病変の進行メカニズム解明および発生位置の予測、効果的計画治療のためには人体内部の応力分布解析が必要不可欠である。本研究では、3D スキャナを用いて読み込んだ人体膝関節モデルから有限要素モデルを作成し、関節内部の構造解析を行った。その結果、先行研究において実施された生体力学試験結果と精度よく一致し、本解析手法の当該分野における有用性を示した。今後、運動解析結果との連成解析を実施し、運動中の膝関節内部の応力分布について解析を実施する予定である。

[参考文献]

- (1) 立花陽明:変形性膝関節症の診断と治療, 理学療法科学, Vol.20, No.3, pp. 235-240, (2005).
- (2) Kouhei MURASE, et. al. : Impact Load Transmission of Human Knee Joint Using in Vitro Drop-Tower Test and Three-Dimensional Finite Element Simulation , Journal of Biomechanical Science and Engineering, Vol.2, No4, pp. 218-227, (2007).
- (3) 新藤康弘, 市島泰人, 藤岡照高:大腿脛骨角が関節内応力に及ぼす影響についての数値的検討, 日本設計工学会 2016 年度秋季大会講演論文集, pp. 185-186, (2016).
- (4) 市島泰人, 新藤康弘, 藤岡照高:オープンソース CAE ソフト Salome-Meca を用いた膝関節半月板内における応力分布の数値的検討, オープン CAE シンポジウム 2016@東京講演会講演概要集, pp. 26, (2016)
- (5) Y. Fukuda *et. al.* : Impact load transmission of the knee joint -influence of leg alignment and the role of meniscus and articular cartilage, Clinical Biomechanics, Vol.15, No.7, pp. 516-521, (2000).

3.4.5. 工学における最適化手法の進化計算を用いた最適化**(1) 目標・計画**

T型フォード級のイノベーションを, 工学における最適化において実現することが目標である. 核分裂を予測・制御することで原子力発電が発明されたのと同様に, 本研究においては工学を予測・制御することで工学における最適化を最適化する.

(2) 意義・国際社会との比較

工学を工学によって良くすることで, その結果社会が良くなる. 数学や物理学, 哲学のような机上の空論とは対照的に, 工学は物事をより良くする学問だからである.

(3) 研究内容

不良設定問題を解決せずに自動車は作れない. そのため最小二乗法・ファジー論理・カルマンフィルタ・MP一般化逆写像・最尤法・最大事後確率推定などが工学では多用される.

一方, エンジニア同士の合意形成が関係するもう一つの「不良設定問題」がある. 工学においてよくある場面:『自動車を設計しているエンジニアA氏がある日, 不良設定問題に直面する. これを解決するため多くの仮定を積み重ねて1つの「解」を無事得ることができた. しかし同僚のエンジニアB氏がその仮定の一部に疑問を呈する』というものである. A氏の「解」とは異なる別の「解」があるのではないか?ということであり, 事実上この不良設定問題は解決していないといえる. 決定理論[決定理論]ではこのような「解」を決定と呼ぶ. このような人間間の合意を含む「不良設定問題」を進化ゲーム理論は扱うことが出来る.

かつてのVHS対ベータマックス戦争など、技術標準の選択問題は進化ゲームを用いて予測することができる[ゲーム, Chap.11.4]. ゲーム理論の枠組みにおいては技術標準の選択は秘密の握手[Robson90]が存在する協調ゲームの1つである.

協調ゲームはフォーカルポイント[Schelling60]で制御することができ[決定理論, Chap.6.4][行動ゲーム, Chap.6.2], 工学におけるフォーカルポイントの一つに意味がある. 過去の有名な例に, [Moggi91]のプログラム意味論を基にしたプログラミング言語[Wadler 92a,92b,95]の成功がある. 単純なプログラムではなく, 例外や入出力まで考慮した実用性の高いプログラムの意味を発見することでそれがプログラマーのフォーカルポイントとなり, その意味に基づいたプログラミング言語の Haskell という規格が普及した.

手法の性能・意味・秘密の握手を最適化することで最適化手法を最適化することが出来る.

参考文献

- [Schelling60]Schelling, Thomas C. "The strategy of conflict." Cambridge, Mass (1960).
- [Robson90]Robson, Arthur J. "Efficiency in evolutionary games: Darwin, Nash and the secret handshake." Journal of theoretical Biology 144.3 (1990): 379-396.
- [ゲーム]岡田章. ゲーム理論. 有斐閣, 2011.
- [行動ゲーム]川越敏司. 行動ゲーム理論入門. NTT 出版, 2010.
- [決定理論]松原望. "意思決定の基礎, シリーズ意思決定の科学 1." (2001).
- [Moggi91]Moggi, Eugenio. "Notions of computation and monads." Information and computation 93.1 (1991): 55-92.
- [Wadler 92a] Wadler, Philip. "Comprehending monads." Mathematical structures in computer science 2.04(1992): 461-493.
- [Wadler 92b] Wadler, Philip. "The essence of functional programming." Proceedings of the 19th ACM SIGPLAN-SIGACT symposium on Principles of programming languages. ACM, 1992.
- [Wadler 95] Wadler, Philip. "Monads for functional programming." Advanced Functional Programming. Springer Berlin Heidelberg, 1995. 24-52.

(4) 平成 28 年度進捗状況

「意味」という非工学的な概念を進化ゲームを使うことで目的関数に取り込み, それを最適化するための枠組みを開発した.

(5) まとめ

予測と制御は工学の両輪であり, 工学は社会と自然科学との架け橋である. 進化ゲームと意味論を用いる事でこの2つを予測・制御し, 工学における最適化が最適化される.

3.5. 可視化検証グループ

本プロジェクトでは、流体-構造連成解析の品質保証に特に重点を置いている。その中でも、

- ・解析結果を正しく理解し、評価すること
- ・実験結果等と公正な比較を行うこと

は重要な要素であると考えられる。そのためには、可視化は必須である。特に、連成解析は現象が複雑であり、限られた数値データのみでこれを評価することは困難である。実験における可視化技術やその応用は実験による検証の項目に譲り、ここでは、解析結果の可視化および、比較のための実験の可視化結果の表示を中心に研究を行う。解析は、当面簡単のため2次元および3次元でもそれほど3次元性が強くない問題を対象とするが、そうであっても特に流れ場は3次元であり、また今後のより一般的な問題に対応するためにも、3次元の可視化が本質である。そこで、ここでは連成解析において3次元データを如何に可視化するかを中心に研究を進める。1つは以下に述べるような立体視あるいは VR (バーチャルリアリティ)を用いた可視化であるが、これに限らず、3次元データの可視化方法を検討していく。

3.5.1. 3次元画像による定量的・定性的検証

(1) 目標・計画

本研究の目標は、流体構造連成問題について、数値解析の精度検証を支援するための、画像による定量評価、定性評価の手法やシステムを開発し、本プロジェクトで開発される連成解析手法の評価に供することである。特に、バーチャルリアリティ(VR)技術を利用した3次元可視化システムを中心に3次元画像による可視化評価を中心に研究を進める。

大きな計画としては、

平成 24 年度:

表示装置となる VR 装置の導入を行い、ハードウェアの準備を行う。

平成 25 年度:

VR 装置の上でソフトウェアを開発し、PC クラスタと結合してこの上での解析結果の表示を行う。

平成 26 年度:

画像による検証に利用するための可視化システムを VR 装置上で開発する。

平成 27 年度:

積極的に可視化による比較・検証を行う。特に、(立体)画像を用い、実験と解析の可視化画像を重ねたり、並べたりして効果的な比較・検証方法について検討する。

平成 28 年度:

研究をまとめ、その公開方法について検討する。

としている。これらにより、従来とは異なる、多彩な可視化により、直感的・効果的な比較・検証が可能となり、開発される連成解析手法をより多面的に評価できると考える。

(2) 意義・国際社会との比較

連成解析は、複数の物理が関連するため、その妥当性の評価は単一の物理に対する解析よりも難しい。ここでは、流体—構造連成を中心に研究を行っているが、流体・構造それぞれ単独で妥当性を示すことができて、それらを組み合わせただけで連成問題が正しく解けるということでは必ずしもない。2つの物理をやり取りするものがあり、それが正しく評価されているかが、重要であるが、実験的に測定できるもの、できないもの等あり、単純ではない。ここでは、可視化、特に3次元画像を利用することで、実験と解析を出来る限り直接的に比較することを考えており、流体—構造連成解析の精度検証・妥当性検証のテンプレートとなることを期待している。

国際的に見ると、連成解析は計算力学における重要な研究テーマの1つであるが、必ずしも検証については進んでおらず、信頼できるとされる過去の解析例と比較したり、パラメータスタディによって、実験で見られる現象と、解析で得られる現象の範囲が等しい(あるいは近い)といったことを示すにとどまっている場合がほとんどである。連成解析手法を評価する手法の1つとして3次元画像を用いる方法は、ほとんど例がなく、その成果は重要なものとなると考える。

(3) 研究内容

本研究の中心となる装置は、図1の2面没入型ディスプレイ装置である。大きさは正面のスクリーンが $2.8 \times 2.1\text{m}$ 、下のスクリーンが同じく $2.8 \times 2.1\text{m}$ でここに2台のプロジェクターにより、それぞれ 1400×1050 の解像度の画像を表示する。画像は時分割方式で立体映像を投影できるようになっており、液晶シャッター眼鏡によって立体映像を観察する。立体映像は3台のグラフィックスワークステーションで生成する。1台はマスタで、あとの2台が正面と下面の映像を担当する。これとは別に観察者や観察者が持つコントローラの位置を赤外線カメラで取得するシステムがあり、1台のトラッキングワークステーションで制御する。グラフィックスワークステーションのマスタはトラッキングワークステーションから逐次データを取得して観察者(やコントローラ)の位置を計算する。

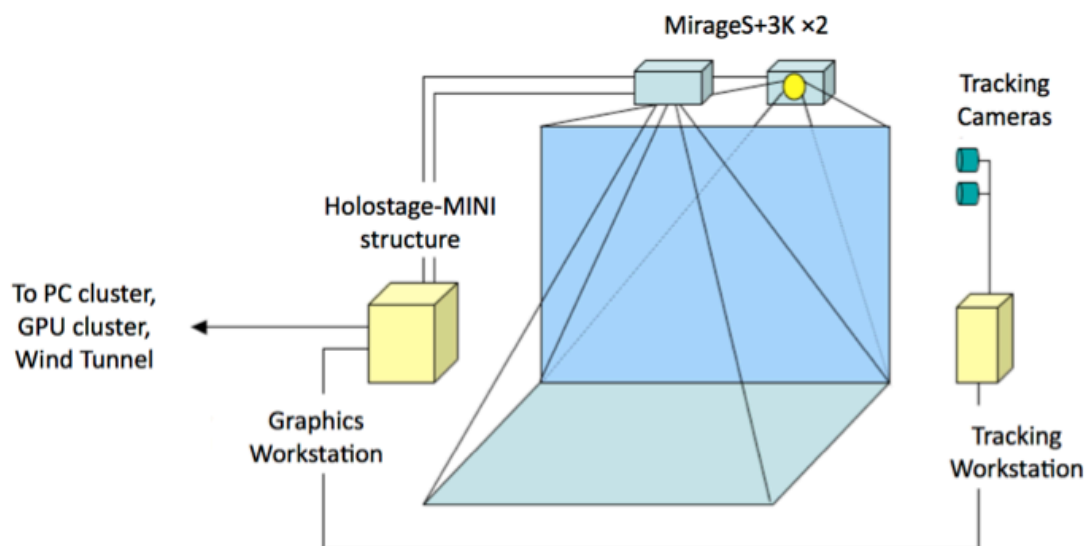


Fig. 1 Hardware configuration

このシステムに、流体—構造連成の3次元画像を表示する。表示する画像は大きく分けると、実験の画像と解析の画像の2種類である。これらを同時に、あるいは交互に表示することで直接的な比較を行う。

実験の画像については、物体の変位等、直接得られるものから、PIV で可視化した流れの速度分布や PSP (感圧塗料) で可視化した物体面上の圧力分布、画像解析により得られる応力分布等が考えられる。これらを得ることは、実験班の研究に委ねられるが、その3次元化や、本装置での表示にはデータの転送等も含めてさまざまな検討と技術的課題の克服が必要である。

解析結果については、単独の物理に基づく解析では多くの知識と経験があるものの、連成問題については、それぞれの物理に関する量を可視化表示するにとどまっており、まずは何を可視化することで連成解析の精度や妥当性評価につながるかの検討が重要となる。そのため、まず、さまざまな物理量の3次元可視化を可能とするシステムを開発する。解析は大規模となることが前提なので、そのデータをどのように転送し、また可視化するかも課題となる。

次に、実験と解析の比較である。たとえば、視点・スケールを合わせて交互に表示する／重ねて表示する、などが考えられるが、それには時間的・空間的な位置合わせ等、技術的な課題が多くある。また、必ずしも同じ量を表示できる訳ではないので、何を見るか、比べるかも問題となる。また、実験については、取得した画像(動画)をそのまま見るのか、あるいはデータを抽出して、解析結果と同じように CG で表示するのかといったアプローチもありうる。これらについても時間をかけて検討し、システムを構築することで新しい可視化法・評価法につなげたい。

このほか、VR でなくても新しい可視化の方法があれば検討をする。

最終的には、システム化できるところはまとめたい。実験データも、標準的で精度の高いものが得られれば、標準問題として公開したいが、その際に3次元画像もその1つとできればよいと考えている。

(4) 平成 28 年度進捗状況

まず、平成 27 年度に完成したシステムについて改めて記す。もともとの構想は図 2 の通りであった。

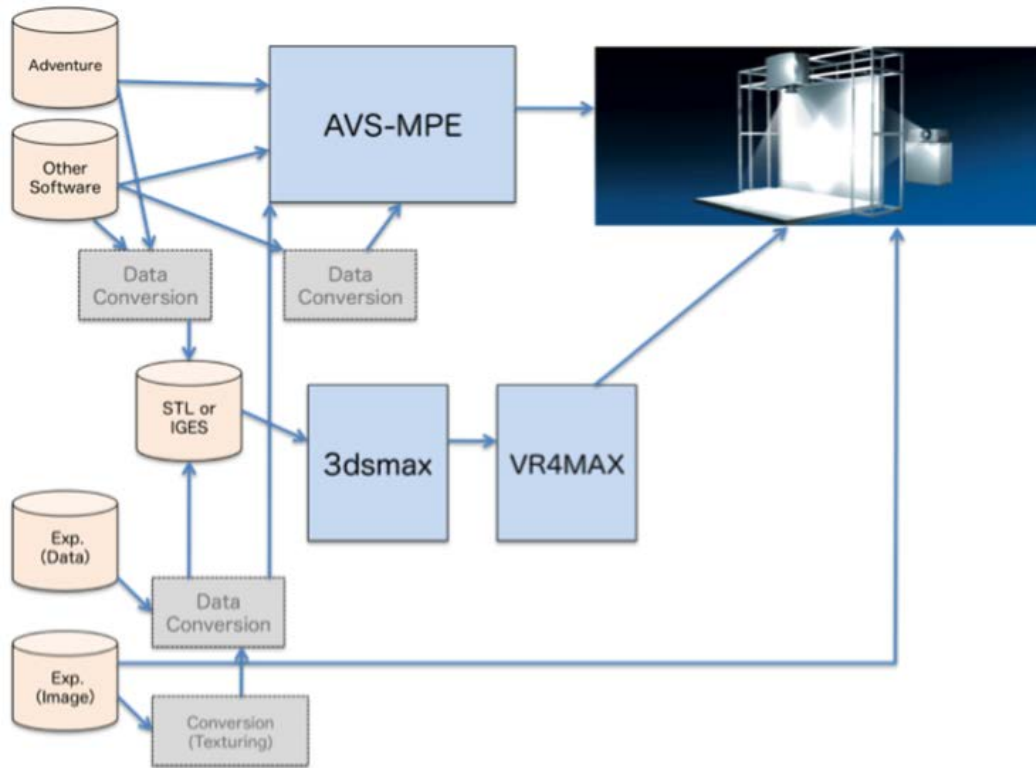


Fig. 2 Visualization system

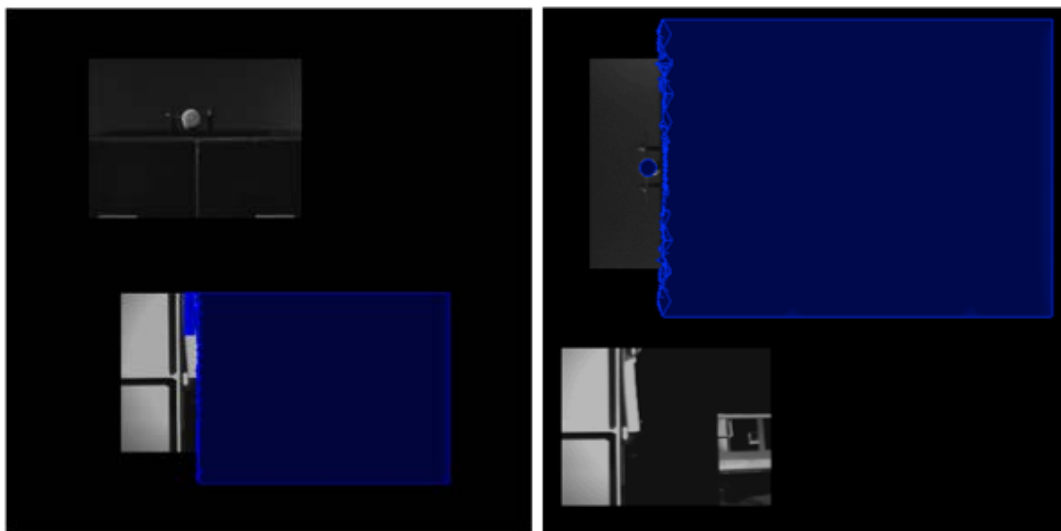


Fig. 3 Visualized image of the standard problem

ここでは、解析のソフトウェアとして ADVENTURE もしくは ADVENTURE の形式で出力されたデータを AVS-MPE に入力する方法で表示する。一方、実験画像は、データ変換を行った後、これも AVS-MPE に入力している。前報以降に行った可視化の例を図 3 に示す。写真では分かりにくいですが、青いところが解析結果で、白黒の写真は実験の 2 次元画像である。左の図では、横からの実験画像(動画)と解析結果を重ねて表示しており、右の図では上からの実験画像(動画)と解析結果の位置を合わせている。

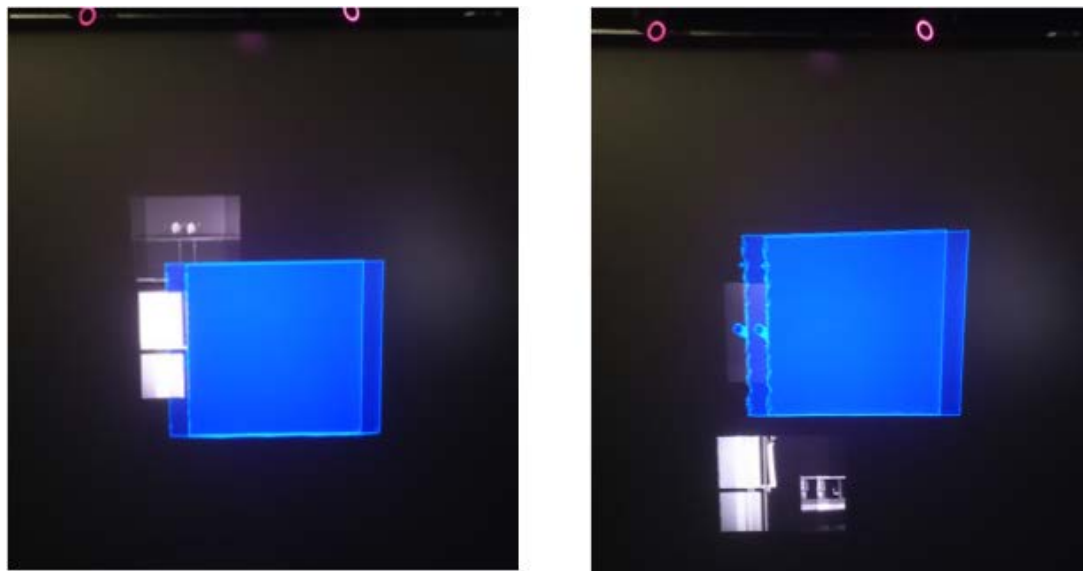


Fig. 4 Visualized image in VR system

これを VR 装置である HolostageMINI 内で見たイメージが図 4 になる。映像が二重に見えるのは、右目と左目用の映像を表示しているためである。これを立体眼鏡を通して見ることで立体視ができる。実験映像は 2 次元であるため、ある面に貼られているように見えている。図 4 の上に見えている赤い丸が観察者の位置を計測する赤外線カメラで、これにより視点位置を測定し、それに応じた右目・左目の映像が投影されている。図 3 や図 4 の写真では実験と解析の像が重なって見にくいですが、VR 装置内では、立体視により両者の区別は容易であり、分かり易い比較となっている。

平成 28 年度の目標の 1 つとして、このシステムの公開がある。このシステムは、AVS(-MPE)を使用しているため、AVS(-MPE)と VR 装置との組み合わせがハードウェア構成の前提となるが、そのような環境であれば、AVS のネットワークモジュールやサンプルのデータを提供することは可能であると考えられる。ただし、利用者が限られるであろうこと、データ量が大きいことなどを考えると、どこかのサイトで公開をするよりは個別の依頼に対応することになるかと思われる。

次に、この原稿を書く時点では完了していないが、現在進行中の研究について簡単に触れておく。昨年度あたりから VR がブームとなっており、HMD (Head Mounted Display) 型の VR 装置が民生用としても普及しつつある。そこで、そのうちの 1 つである Oculus Rift を購入し、これを表示装置とすることを検討している。Oculus に対応する AVS のライブラリを更に購入することも 1 つの方法で

はあるが、最近では、VRに限らずCGをUnityで作ることが多くなっており、OculusもUnityに対応しているので、まずはUnityで簡単なプログラムを書き、Oculusで表示することを試みている。



Fig 5. Oculus Rift

最後に、新しい可視化手法として検討していることを記す。従来、可視化においては、CGとして不必要なリアリティは避けるようになってきた。例えば、影付けはCGにおいて重要な処理であるが、計算時間が掛かる上、影によって画像が暗くなるため、可視化している部分が見にくくなるなどの弊害がある。光を当てることはその陰影から形状が分かるので重要であるが、金属光沢やそれによる反射などはこれも可視化している部分の色(色相)を見誤らせる可能性があるためむしろない方がよいと考えられてきた。一方で、2次元の映像からは3次元的な位置関係や時には相対的な大きさが分かりにくいために、物体を会話的に動かしたり、あるいは先に述べているような立体視やVRなどによって3次元物体の把握を容易にしてきた。近年、CGと計算機の進歩により、影付けや金属光沢、鏡面反射などが比較的容易にできるようになってくると、そのようなCG的な写実性を加味することで、逆に3次元形状の把握に有利なこともあるのではないかと考えるようになってきた。そこで、ここでは、CGソフトウェアの1つである3dsmaxの機能を活かし、可視化にCG的な写実性を導入することを試みている。図6にその1例を示す。左は著者らが開発した「ポスト君」で可視化した、デルタ翼上の渦崩壊の様子で、崩壊した渦の領域が等値面で示されている。一方、右はこのポスト君から可視化に用いたオブジェクトのデータ(CGのポリゴンデータ)を抜き出し、3dsmaxに入

れて表示したものである. ポスト君からのポリゴンデータは一旦 VRML に変換している(図7). 翼面を鏡面にしたことで, 写り込みにより, 崩壊渦の位置関係が分かり易くなっている.

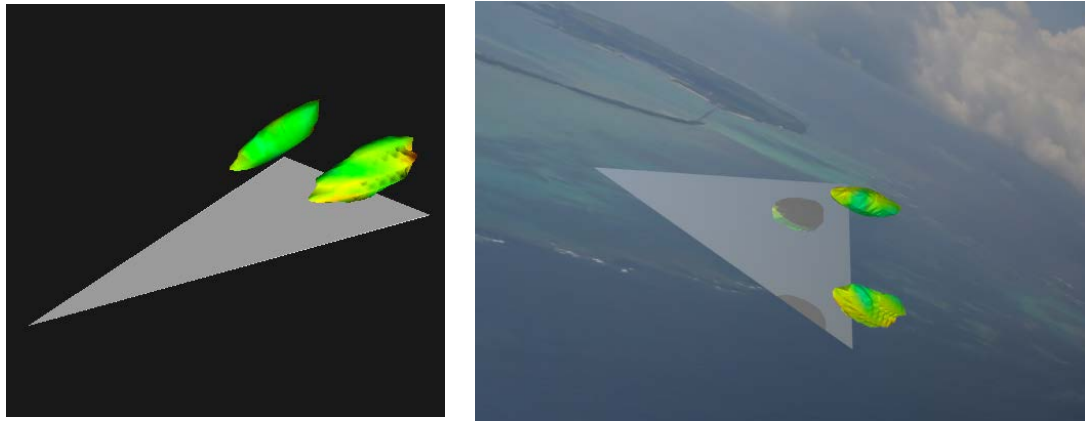


Fig. 6 Vortex breakdown on a delta wing (left) visualized by Post-kun (right) visualized by CG software

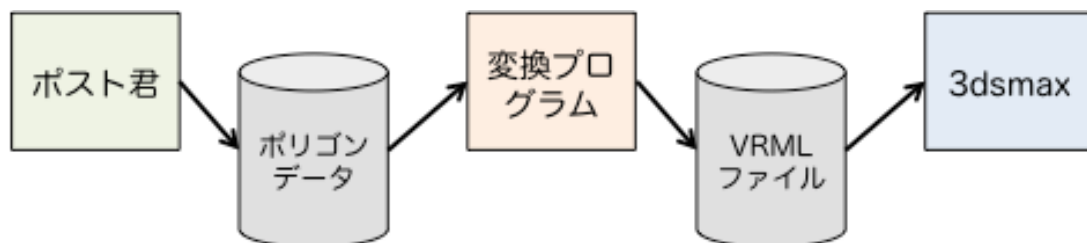


Fig. 7 Data conversion for photorealistic visualization

(5) まとめ

ここでは, 流体-構造連成解析を中心に, 実験と解析の画像を VR 空間で表示することにより, 比較・検証を行うシステムの開発を目指してきた. 5 年間の成果として,

- ・ 実験映像と解析結果を VR 空間に表示するシステムを構築した.
- ・ 実験と解析の時刻を同期させる機能を持たせた.
- ・ 実験と解析の映像の位置を合わせて重ねて表示する効果を確認した.

などが挙げられる. また, 現時点では完了していないが,

- ・ 没入型ディスプレイ方式の VR 装置以外での本システムの稼働 (HMD)

- ・ CG ソフトウェアの機能を利用した写實的表現を含んだ可視化の効果

等にも着手した. 本プロジェクトは今年度で終了となるが, これらのシステム(ハードウェア/ソフトウェア)は残るので, 今後も研究を進めて行く予定である.

4. 共同研究

4.1. JST CREST プロジェクト

平成 23 年 10 月より JST CREST 研究領域「ポストペタスケール高性能計算に資するシステムソフトウェア技術の創出」において、研究課題名「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」が採択され、研究拠点を当センターに置き、研究を実施している。

4.1.1. 研究実施体制

ポストペタコンなど次々世代の並列計算機アーキテクチャにおいて、大規模な数値計算データ処理を必要とする実アプリケーション分野が高い演算効率を得るためには、マイクロプロセッサやメモリの階層構造を考慮したプログラミングモデルが必要である。特にそれは、入力データ生成や可視化などのプレ・ポスト処理から数値解析手法などのソルバー処理に至るまで、統一的に提供される必要がある。つまり、一般的な実アプリケーションはプレ／ソルバー／ポスト処理など目的に応じたモジュール群で構成されていることが多いが、ポストペタコンの利用が想定される大規模シミュレーションでは、全ての処理がポストペタコン上で行われ、モジュール間のデータ受け渡しを最小限にするようなプログラミングモデル、並びにそれに基づく大規模数値計算データ処理システムの基盤技術が不可欠と言える。

ここで、ポストペタコンのアーキテクチャとしては、SIMD 拡張命令、GPGPU、FPGA など何らかのアクセラレータを搭載したヘテロジニアスメニーコアで構成される計算ノードをネットワーク接続した、分散メモリ型アーキテクチャになると予想され、計算ノード内はチップ上／ボード上問わずに異種の演算装置が NUMA 型で搭載されることを想定する必要がある。また、演算性能と通信性能の向上比を考慮すると、マイクロプロセッサにとって計算ノード間ネットワークというのは、現在で例えると WAN 並みに遅く感じるネットワークとなる可能性があり、ポストペタコンはそれらを数十万から数百万ノード規模で接続して構築されると予想される。さらに、ポストペタコン利用が想定されるシミュレーションにおいて生成されるデータのファイルサイズはペタバイトオーダーになるが、ハードディスクなどの外部記憶装置の記憶容量やアクセス性能の大幅な改善にはまだ時間を要すると考えられる。つまり、ポストペタコンを利活用できるアプリケーションは、ヘテロジニアスな分散メモリ並列かつ数百万計算ノード環境において高い並列効率と演算効率を示す必要があるが、その高いハードル

を突破できたとしても、大規模な入出力データを効率的に処理できない限り、本当の意味での利活用は不可能である。この問題を解決するためには、並列ファイル入出力システムの効率化やデータ圧縮展開アルゴリズムの高速化などだけではなく、根本的なデータ量削減に関する解決策が求められる。

そこで本プロジェクトでは、ポストペタコン上における大規模数値計算データ処理システムに関する基盤技術として、申請者らがこれまで主に数値解析手法向けに研究開発してきた階層型領域分割法の技術を応用した、階層型領域分割法による大規模数値計算データ処理システムの研究開発を目指す。この基盤技術にはアプリケーション分野に依存する箇所があることが予想されるため、本提案では連続体力学向けアプリケーションを対象としながら、具体的には以下の基盤技術開発をターゲットとする。

- A) マルチレベル領域分割法による連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列化ライブラリ
- B) マルチレベル領域分割法による多階層計算格子データの生成、操作および I/O ライブラリ
- C) 多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成と言語拡張機能

これらの技術に基づいて開発されるアプリケーションでは、核となるモジュール間のデータ受け渡し量を従来のものより 3 桁削減することが可能となり、ピーク演算性能比 20%以上のシステム開発の実現を目指す。

4.1.2. 研究実施内容

(1) 「東洋大学」グループ

① 研究代表者: 塩谷隆二(東洋大学総合情報学部, 教授)

② 研究項目

階層分割型数値計算ライブラリの基礎研究並びに設計とその応用

(2) 「名古屋大学」グループ

① 主たる共同研究者: 荻野正雄(名古屋大学情報基盤センター, 准教授)

② 研究項目

階層型ソルバーライブラリの基礎研究とその応用

(3) 「東京大学」グループ

① 主たる共同研究者:越塚誠一(東京大学大学院工学系研究科, 教授)

② 研究項目

階層分割型入出力ライブラリ並びに連続体力学向け問題領域専用言語の基礎研究とその応用

5. 成果の広報および普及活動

5.1. 英国カーディフ大学にて合同ワークショップ開催

2016年2月22日、23日に英国カーディフ大学にて、Cardiff University-Toyo University Joint Student Workshopと題した、合同ワークショップを開催し、当センターの研究員及び東洋大学総合情報学部 of 学生を含む15名が参加をした。

研究発表は、東洋大学総合情報学部 to 所属する学生6名と、計算力学研究センターに所属する博士課程の学生とポスドクそれぞれ1名ずつが行った。また、田村善昭計算力学研究センター長より、当センターのメインテーマである流体-構造連成解析に関する発表も行われた。

参加者の多くは、初めての海外での英語でのプレゼンテーションであったが、発表および質疑応答も活発に行われ、本合同ワークショップは非常に貴重な経験をする機会となった。

ワークショップ終了後の懇親会でも、研究内容を含む様々な議論を行い、両大学の親睦を深めた。



合同ワークショップの様子

5.2. 第 5 回 CCMR-HDDMPPS(CREST プロジェクト)合同シンポジウ

ム

2016 年 3 月 8 日(水), 東洋大学白山キャンパス 2 号館 16 階スカイホールにて, 第 5 回 CCMR-HDDMPPS(CREST プロジェクト)の合同シンポジウムを開催した。

当日は, 計算力学研究センターと HDDMPPS グループから, 各 5 名が講演を行い, 1 年間の研究の進捗を報告すると共に, 来年度以降の研究方針についての議論が活発に行われた。

5.2.1. プログラム

13:00-13:10	開会の辞	田村善昭 東洋大学・計算力学研究センター長
13:10-14:50	セッション 1 (CCMR) 文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業: 「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」 プロジェクトリーダー: 田村善昭(東洋大学計算力学研究センター長)	
	大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証～連成解析標準問題の成果を中心に～	田村善昭(東洋大)
	損傷理論を導入したボクセル FEM によるアルカリシリカ反応の膨張挙動解析	富山潤(琉球大)
	オープン CAE(固体の有限要素法)を用いた精度検証	藤岡照高(東洋大)
	フラッタ予測のための流体-構造連成パラメータに関する検討	藤松信義(東洋大)
	反応拡散系理論に基づく石灰岩溶解シミュレーション	松原仁(琉球大)
14:50-15:00	休憩	
15:00-16:40	セッション 2 (HDDMPPS) 科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業(CREST): 「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」 プロジェクトリーダー: 塩谷隆二(東洋大学)	
	Development of a Numerical Library based on HDDM for Post Petascale Simulation	塩谷隆二(東洋大)

5. 成果の広報および普及活動

	Three-dimensional Analysis Using Coupling-matrix-free S-version FEM	遊佐泰紀 (東京理科大)
	A study of Bio-heat Transfer Problem using Finite Element Approach	A. M. M. Mukaddes (シヤージャラル科学技術大)
	Run faster and larger – ADVENTURE for K computer	鄭宏杰 (東洋大)
	A. Continuum Approach for Detection of Corrosion	古川知成 (バージニア工科大)
16:40-16:50	閉会の辞	田村善昭 東洋大学・計算力学研究センター長
16:50-17:00	拡大運営委員会	
17:00-19:00	懇親会	



シンポジウムの様子

5.3. 台湾龍華科技大學にて合同ワークショップ開催

2016 年 12 月 1 日(木)~12 月 3 日にわたり、台湾の龍華科技大學を訪問し、龍華科技大學、東京理科大学、近畿大学、東洋大学による 4 大学合同学生ワークショップを開催した。ワークショップの後で、龍華科技大學の学内を見学し、懇親会で親睦を深めた。ワークショップのプログラムは次の通りである。



5.3.1. プログラム

Name	Organization	Title
Keishi Kumamoto	Kindai University	Development of crack propagation criteria for moderate-toughness pipes
Shuhei Watanabe	Toyo University	Investigation on the Uav for automatic flight system - Toward the sound source localization system
Chin-Chien Hung	Lunghwa University	Study on the optimum parameters of hydrophobic films prepared by Atmospheric Pressure Plasma Jet by Response Surface Methodology
Kensuke Yagi	Toyo University	Development of an application to make a group with image recognition
Yang Kui	Tokyo University of Science	Atomistic Modeling of Thermally Activated Process of Mixed Dislocations
You-Hao Jin	Lunghwa University	The Deposition of Siox Films on Polycarbonate for Super Hydrophobicity and High Transmittance by Atmospheric Pressure Plasma Jet
Hiromi Sekiguchi	Toyo University	Development of an application to record information in real time for sports
Yi-Cyuan Shih	Lunghwa University	Low Temperature Atmospheric Plasma Technology -Escalator Sterilization Device
Risa Ito	Toyo University	Development of an application to record a score of arcade game with image recognition
Satoshi Koshiyama	Toyo University	Construction of Aerodynamic Measurement System of Aerospace Vehicle Models by Functional Molecular Sensor

Hong-Ming Li	Lunghwa University	Effect of Atmospheric Plasma Surface Treatment of Carbon Fiber on Carbon Fiber-Reinforced Plastics (Cfrp) to Improve the Wettability and Tensile Strength
--------------	--------------------	---



ワークショップの様子



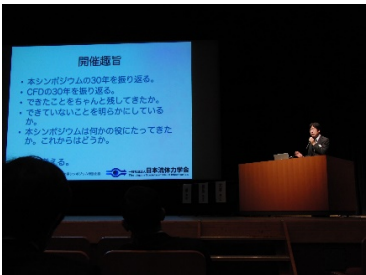
集合写真

5.4. 第 30 回数値流体力学シンポジウム

2016 年 12 月 12 日(月)～12 月 14 日(水)にかけて、東洋大学計算力学研究センターが共催する第 30 回数値流体力学シンポジウムをタワーホール船堀(東京都)にて開催した。400 名の以上の方がシンポジウムに参加し、大盛況のうちに終了した。



シンポジウムの様子



田村先生の講演



特別企画「数値流体力学シンポジウムの 30 年～できたこと、できなかったこと～」の様子

5.5. 第 6 回 CCMR-HDDMPPS(CREST プロジェクト)合同シンポジウ

ム

2017 年 1 月 21 日(土), 東洋大学白山キャンパス 6 号館 6203 教室にて, 第 6 回 CCMR-HDDMPPS(CREST プロジェクト)の合同シンポジウムを開催した。

セッション 1 では田村善昭計算力学研究センター長と 5 名の研究員によるプロジェクトの総括となる発表が行われた。そのあと, 上記 6 名と出席者の方々による今後の展望についてのディスカッションが行われた。

セッション 2 では HDDMPPS グループから, 塩谷プロジェクトリーダーより 1 年間の研究の進捗を報告すると共に, ドイツからの参加者を含む 4 名が講演を行い, 来年度以降の研究方針についての議論が活発に行われた。

5.5.1. プログラム

13:00-13:10	開会の辞	田村善昭 東洋大学・計算力学研究センター長
13:10-14:50	セッション 1 (CCMR) 文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業: 「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」 プロジェクトリーダー: 田村善昭(東洋大学計算力学研究センター長)	
	プロジェクトの総括と 今後の展望	江澤良孝(精度・妥当性検証グループ・リーダー) 塩谷隆二(大規模並列化グループ・リーダー) 田村善昭(可視化検証グループ・リーダー) 中林靖(解析手法開発グループ・リーダー) 藤松信義(新規実験計測グループ・リーダー)
14:50-15:00	休憩	
15:00-16:40	セッション 2 (HDDMPPS) 科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業(CREST): 「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」 プロジェクトリーダー: 塩谷隆二(東洋大学)	
	Parallel adaptive multigrid - an approach efficient large scale computing	Prof. Gabriel Wittum (Goethe University Frankfurt)

5. 成果の広報および普及活動

	Geometric multigrid on massively parallel systems with UG4 - approach and applications	Dr. sebastian Reiter (Goethe University Frankfurt)
	Analysis of Skin Burn Injuries Using Finite Element Method with Bio-heat equation	Prof. A. M. M. Mukaddes (Shahjalal University of Science and Technology)
	Development of A Distributed Parallel Explicit Moving Particle Simulation Method and Its Applications	Dr. Lijun LIU (Nagoya University)
16:40-16:50	閉会の辞	矢川元基 東京大学名誉教授・東洋大学名誉教授
16:50-17:00	拡大運営委員会	
17:00-19:00	懇親会(第1会議室・2号館3階)	



セッション1での田村先生



セッション2での塩谷先生とWittum先生



シンポジウムの様子



矢川先生の閉会の辞

6. 学術活動

2016 年 1 月から 2017 年 1 月までの業績を掲載する。

6.1. 論文投稿

1. H. Zhu, Q. Yao, H. Kanayama, “Large-scale computations of flow around two cylinders by a domain decomposition method”, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol.2016: 8 pages 2016, Article ID 4126123.
2. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 山田知典, 吉村忍, “領域分割法におけるローカル Schur 補元アプローチの性能評価”, *Transaction of JSCES*, Vol. 2016, 20160006, 2016 年 2 月 (DOI: 10.11421/jscs.2016.20160006).
3. H. Kanayama, “An industrial application of thermal convection analysis, *International Journal of Computational Methods*”, Vol.13, No.2:15 pages 2016.
4. Masahiko Shimamura, Yoshitaka Ezawa, Yoshiaki Tamura, Satoru Takashimizu, and Daisuke Satou, “High Accurate Analysis by Experiment and Simulation Using Bayesian Inference for Corrugated Cardboard”, *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 3, No. 4, 16-00072, August, 2016.
5. K. Tazoe, M. Oka and G. Yagawa, “Loading frequencies effects on the oxide induced crack closure in extremely low stress intensity factor range”, *International Journal of Fracture Fatigue & Wear*, Vol. 4, 153-157, 2016.
6. Yong-Ming GUO, Genki YAGAWA, “A meshless method with conforming and nonconforming sub-domains”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, DOI: 10.1002/nme.5431, 2016.
7. Masao Ogino, Hongjie Zheng, Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, Ryuji Shioya, Liu Lijun, “Tsunami Run-Up and Inundation Simulations Using LexADV_EMPS Solver Framework on Fujitsu FX100”, *SC16 Research Poster (Peer-reviewed International Conference)*, Salt Lake City, Nov. 13 - 18, 2016.
8. Masao Yokoyama, Genki Yagawa, “Relation between violin timbre and harmony overtone”, *Proceedings of Meetings on Acoustics (POMA)*, Honolulu, Hawaii, 28 Nov. - 2 Dec. 2016.
9. 小林謙一, 藤岡照高, “微小領域からサンプリングした試料による高経年ボイラーチューブの健全性評価とクリープ余寿命推定”, *ボイラ研究*, 400 号, pp.10-15, 2016 年 12 月.
10. Wada, Y., Murotani, K., Ogino, M., Kawai, H. and Shioya, R., “High resolution visualization library for exa-scale supercomputer”, *Mathe. Prog. Expressive Image Synth. III*, Springer, pp.83-94, 2016.
11. 杉本振一郎, 荻野正雄, 金山寛, “階層型領域分割法による回転機の解析”, *電気学会論文誌B*, Vol.137, No.3, in press.

6.2. 著書

1. 日本応用数理学会編, 矢川元基分担執筆, “応用数理の散歩道”, 岩波書店, pp.238-253, 2016 年 6 月.
2. 矢川元基, 酒井譲, “粒子法”, 岩波書店, 2016 年 11 月.
3. H.Kanayama, H. Dan, “Tsunami Propagation from the Open Sea to the Coast”, *Tsunami*, edited by M. Mokhtari, ISBN 978-953-51-2677-5, InTech: Chapter 4 (61-72) 2016.

6.3. 学会発表

1. 金山寛, 鄭宏杰, 杉本振一郎, 荻野正雄, “Considerations of Preconditioners for Magnetostatic Domain Decomposition Analysis”, 静止器/回転機合同研究会「電磁界数値計算技術とその応用」, 富士通株式会社本社事務所, 2016 年 1 月 20-21 日.
2. 横山真男, 室谷浩平, 瀬田陽平, 矢川元基, “粒子法による粒子間インタラクションに着目した大規模数値シミュレーション”, 粒子法コードユーザーグループ第 33 回会合, 本郷, 2016 年 2 月.
3. 齊藤克佳, 瀬田陽平, 横山真男, “HMD と LeapMotion を用いたネットワーク型バーチャルプラネタリウムの開発”, 情報処理学会第 78 回全国大会, 横浜, 2016 年 3 月 10-12 日.
4. T. Kadohira, T. Ashino, H. Ishiki, S. Minamoto, M. Watanabe, J. Inoue, M. Enoki and T. Koseki, “Establishment of descriptors-inventory for data-utilization in Materials Science and Engineering with collective intelligence”, ICME 2016, Second International Workshop on Software Solutions for Integrated Computational Materials Engineering, Barcelona, Spain, April 12-15, 2016.
5. 金山寛, 鄭宏杰, 杉本振一郎, 荻野正雄, “静磁場領域分割解析におけるインターフェイス問題”, 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 慶應義塾大学, 2016 年 5 月 18-20 日.
6. 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 山田知典, 吉村忍, “領域分割法における反復法に基づくローカルソルバーの性能評価”, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日-6 月 2 日.
7. 和田義孝, 荻野正雄, 室谷浩平, 河合浩志, 塩谷隆二, “高精細可視化ライブラリ LexADV_VSCG のビューア対応機能の実装”, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日-6 月 2 日.
8. 淀薫, 塩谷隆二, 荻野正雄, “大規模解析のための多階層領域分割法によるデータ圧縮効果”, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日-6 月 2 日.
9. 鄭宏杰, 塩谷隆二, Mukaddes Abul Mukid Mohammad, 「京」を用いた ADVENTURE_Thermal による大規模熱伝導解析, 第 21 回計算工学講演会, 朱鷺メッセ:新潟コンベンションセンター, 2016 年 5 月 31 日-6 月 2 日.
10. Kawai, H., Ogino, M., Shioya, R., Yamada, T., Yoshimura, S., “Performance tuning of subdomain local FE solver in domain decomposition method”, ECCOMAS2016, Crete Island, Greece, 5-10 June 2016.
11. T. Fujioka, “Analytical Expression of Elastic Follow-up Factors in Fully Plastic Situation for Creep-fatigue Damage Assessment of High Temperature Components”, Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2016-63031, Vancouver, July 17-21, 2016.
12. Kanayama, H., Ogino, M., Sugimoto, S., Zheng, H., Yodo, K., “Application of the BDD-DIAG Preconditioner to Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems”, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24-29 July 2016.
13. Mukaddes, A.M.M., Shioya, R., Kanayama, H., Ogino, M., “Storing Techniques for Sparse Matrices-A Study on Thermal-Convection Problems”, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24-29 July 2016.
14. Kawai, H., Ogino, M., Shioya, R., Yamada, T., Yoshimura, S., “Mixed Precision Implementation of Coarse Inverse Approach in BDD Pre-conditioner”, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24-29 July 2016.
15. Zheng, H., Mukaddes, A.M.M., Shioya, R., Ogino, M., “Performance Evaluation of ADVENTURE_Solid and ADVENTURE_Thermal on the K computer”, WCCM & APCOM 2016, Seoul, Korea, 24-29 July 2016.

16. Hongjie ZHENG, Ryuji SHIOYA, Abul Mukid Mohammad MUKADDES, Masao OGINO, “Performance Evaluation of ADVENTURE_Solid and ADVENTURE_Thermal on the K Computer”, The 12th World Congress on Computational Mechanics (WCCM 2016), 152041.pdf, July, 2016.
17. Hiroshi KANAYAMA, Masao OGINO, Shin-ichiro SUGIMOTO, Hongjie ZHENG and Kaworu YODO, “Application of the BDD-DIAG Preconditioner to Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems”, The 12th World Congress on Computational Mechanics and The 6th Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM XII & APCOM VI), online, 2016/07/24-29, Seoul, Korea.
18. Shinsuke NAGAOKA, Yasushi NAKABAYASHI, Yoshiaki TAMURA and Genki YAGAWA (Toyo University), “Parallelization of Enriched Free Mesh Method for Large Scale Fluid-Structure Interaction Analysis”, WCCM/APCOM 2016, 2016.7.26.
19. Shinsuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Yoshiaki Tamura, and Genki Yagawa, “Parallelization of Enriched Free Mesh Method for Large Scale Fluid-Structure Interaction Analysis”, WCCM XII & APCOM VI, Seoul, Korea, July 24-29, 2016.
20. Masato Masuda, Yasushi Nakabayashi, and Yoshiaki Tamura, “Prediction of Analysis Results with Deep Learning”, WCCM XII & APCOM VI, Seoul, Korea, July 24-29, 2016.
21. Yoshiaki Tamura, “Numerical Simulation Method of Gas-Liquid Two-Phase Flow for a Cavitation Bubble Collapse”, WCCM XII & APCOM VI, Seoul, Korea, July 24-29, 2016.
22. Masahiko Shimamura, Yoshitaka Ezawa, Yoshiaki Tamura, Satoru Takashimizu, and Daisuke Satou, “High Accurate Analysis by Experiment and Simulation Using Bayesian Inference”, WCCM XII & APCOM VI, Seoul, Korea, July 24-29, 2016.
23. Youhei SETA, Masao YOKOYAMA, Mitsunori MAKINO, Genki YAGAWA, “Application of Particle Method to Liquid Dripping”, WCCM XII & APCOM VI, Seoul, Korea, July 24-29, 2016.
24. Mukaddes, A.M.M., Shioya, R., Ogino, M., “Finite Element Approach with Unsteady Bioheat Equation for Human Skin Injury”, ICCM2016, Berkeley, USA, 1-4 August 2016.
25. Hongjie ZHENG, Ryuji SHIOYA, “Large-Scale Fluid-Structure Analysis for Tsunami Inundation into the Interior of a Building using MPS-FEM Coupling Method”, International Conference on Computational Methods (ICCM 2016), 1585, August, 2016.
26. Kawai, H., Ogino, M., Shioya, R., Yamada, T., Yoshimura, S., “Subdomain local FE solver implementation using iterative solver in domain decomposition method”, ICTAM2016, Montreal, Canada, 21-26 August, 2016.
27. K. Tazoe, M. Oka and G. Yagawa, “LOADING FREQUENCIES EFFECTS ON THE OXIDE-INDUCED CRACK CLOSURE IN EXTREMELY LOW STRESS INTENSITY FACTOR RANGE”, 5th International Conference on Fracture Fatigue and Wear FFW 2016, Kitakyushu, Japan, 24 August 2016.
28. 金山寛, 荻野正雄, 杉本振一郎, 淀薫, 鄭宏杰, 静磁場の領域分割解析におけるコース問題の解法について, 静止器/回転機合同研究会, 石垣市商工会館, 2016 年 9 月 8-9 日.
29. Toshihiro Ashino, “Reusable Equation Library for Materials Informatics and Integration based on Materials Ontology”, SciDataCon 2016, Denver, US, September 11-13, 2016.
30. 横山真男, 栗原義己, “バイオリンの音色に関する印象語と音響特徴の相関分析の試み”, 日本音響学会 2016 年秋季研究発表会, 横浜, 2016 年 9 月 14-16 日.
31. 島村雅彦, 江澤良孝, 田村善昭, 清水水聖, 佐藤大亮, “ベイズ推定を用いた実験とシミュレーションによる高精度解析”, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016 年 9 月 22-24 日.
32. 増田正人, 中林靖, 田村善昭, “深層学習を用いた連成解析結果予測”, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016 年 9 月 22-24 日.

33. 長岡慎介, 中林靖, 田村善昭, 矢川元基, “高精度フリーメッシュ法の並列解析手法について”, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016 年 9 月 22-24 日.
34. 瀬田陽平, 横山真男, 牧野光則, 矢川元基, “界面張力を考慮した粒子法による容器口から流れる液垂れの数値シミュレーション”, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016 年 9 月 22-24 日.
35. 小林陽介, 村上恭子, 稲葉正和, 矢川元基, “フリーメッシュ法を用いた計測データからの高精度 3D モデリングアプリケーション”, 日本機械学会第 29 回計算力学講演会, 名古屋, 2016 年 9 月 22-24 日.
36. 金山寛, 淀薫, 鄭宏杰, 杉本振一郎, 荻野正雄, “部分領域を直接法で解く場合のインターフェイス問題の反復法について”, 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22-24 日.
37. 鄭宏杰, 塩谷隆二, “スーパーコンピュータ京を用いた 3 次元大規模並列 MPS-FEM 流体構造連成解析”, 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22-24 日.
38. 和田義孝, 荻野正雄, 室谷浩平, 河合浩志, 塩谷隆二, “高精細可視化ライブラリ LexADV_VSCG のインタラクティブ可視化ビューア対応”, 第 29 回計算力学講演会, 名古屋大学, 2016 年 9 月 22-24 日.
39. 横山真男, 瀬田陽平, 矢川元基, “容器口の形状に着目した液だれ防止方法の提案”, 日本流体力学会年会 2016, 名古屋, 2016 年 9 月 26-29 日.
40. H. Hirayama, Y. Satoh, K. Takahashi and M. Yokoyama, “Multimedia Improvisation for brain waves, cello and live electronics”, iCLA Music and the Brain Symposium 2016, Yamanashi, Japan, October 2016.
41. 田添広喜, 岡正徳, 矢川元基, “酸化物誘起き裂閉口が無視できる場合の疲労き裂進展下限界特性の板厚依存性”, 日本機械学会材料力学カンファレンス, 神戸, 2016 年 10 月 8 日.
42. 松井陽平, 岡田満利, 高橋俊彦, 藤岡照高, “実機ガスタービン動翼から採取した試験片を用いたクリープ寿命評価手法”, 第 44 回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, 酒田, 2016 年 10 月 26-27 日.
43. H.Kanayama, “Balancing domain decomposition (BDD) related preconditioners in engineering including magnetostatic problems”, CoMfOS16:Mathematical Analysis of Continuum Mechanics and Industrial Applications II, Kyushu University, October 22-24, 2016.
44. Toshihiro Ashino, “Materials Information Integration Based on Ontology (Keynote)”, AMDS 2016 (The 5th Asian Materials Database Symposium), Hanoi, Vietnam, October 30-November 2, 2016.
45. 篠崎雅和, 瀬田陽平, 横山真男, “教育支援を目的としたネットワーク型バーチャルプラネタリウムの開発”, NICOGRAPH 2016, 富山, 2016 年 11 月 4-6 日.
46. Hongjie Zheng, Masao Ogino, Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, Ryuji Shioya, “Large-scale Tsunami Run-up and Inundation Simulation Using an Explicit Moving Particle Simulation Solver Framework”, Women in HPC workshop at SC16, Salt Lake City, Nov. 13, 2016.
47. Hongjie ZHENG, Ryuji SHIOYA, “Large-scale analysis of ADVENTURE system on the K computer”, オープン CAE シンポジウム 2016@東京, 2016 年 11 月 24-26 日.
48. 市島泰人, 新藤康弘, 藤岡照高, “オープンソース CAE ソフト Salome-Meca を用いた膝関節半月板内における応力分布の数値的検討”, オープン CAE シンポジウム 2016, 東京, 2016 年 11 月 24-26 日.
49. 三浦純哉, 藤岡照高, “Salome-Meca を用いた熱疲労試験の再現解析”, オープン CAE シンポジウム 2016, 東京, 2016 年 11 月 24-26 日.
50. Masao YOKOYAMA, Yoshiki Awahara, Genki YAGAWA, “Relation between violin timbre and harmony overtone”, ASA-ASJ Joint Meeting 2016, Honolulu, USA, November 28-December 2, 2016.
51. 増田正人, 中林靖, 田村善昭, “深層学習を用いた流体解析結果予測”, 第 30 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2016 年 12 月 12-14 日.

6.4. 招待講演

1. Genki Yagawa, “Reflection on Fukushima Daiichi Nuclear Accident”, ASINCO 2016, Nagasaki, April 12, 2016.
2. 矢川元基, “粒子法とその応用”, 東京理科大学特別講義, 野田, 2016 年 6 月 7 日.
3. Kanayama, H., Zheng, H., Sugimoto, S., Ogino, M., The BDD-DIAG Preconditioner in Domain Decomposition Analysis for Magnetostatic Problems (Keynote Lecture), ICCM2016, Berkeley, USA, 1-4 August 2016.
4. 矢川元基, “粒子法入門”, 徳島大学工学部特別講演, 徳島, 2016 年 8 月 17 日.

7. 研究グループ紹介



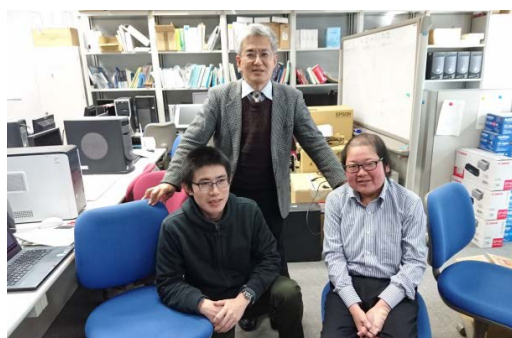
解析手法開発グループ



大規模並列化グループ



新規実験計測グループ



精度・妥当性検証グループ



可視化検証グループ

8. 終わりに

本報は、2016 年度の活動を取りまとめたものである。なお、2017 年 3 月に予定されているセンター外部評価委員会に間に合わせるために原稿締め切りを 2017 年 1 月とした。したがって、それ以降のデータについては掲載されていないことをお断りしたい。また、プロジェクトの最終年度ではあるが、これまでの報告と重複しないよう、前年度までの成果を繰り返し述べることはしていないので、ご了承願いたい。

詳細な記載は間に合わないが、2017 年 1 月 21 日(土)に第 6 回 CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウムを開催した。この中で、本プロジェクトの 5 年間の総括を行ったので、ここに簡単にまとめておきたい。まず、5 つのグループのリーダーからこの 5 年間の成果や達成度について発表いただき、その後、残った課題や問題点等について批判的に議論した。個別にはそれぞれ成果を挙げ、目標を達成できているものも多いが、精度検証・妥当性検証はもう少しできることがあるのではないか、またプロジェクト全体として何ができたのか分かりづらいなどの意見があった。連成問題に対する精度・妥当性検証については新しいデータに対して解析を進めているところであり、また、プロジェクト全体としては、プロジェクトの成果を中心とした英文の書籍を刊行予定である。プロジェクト終了まで一月余りあるので、少しでもこれら残された問題を解決すべく努力をする所存である。

今日、計算力学は製造業のみならず、社会の安心・安全をはじめさまざまな分野に大きく広がりを見せている。私立大学戦略的研究基盤形成支援事業は終了するが、より広い視点で計算力学の発展に資するようセンター研究員一同、今後とも努力していきたい。



東洋大学 計算力学研究センター 2016 年度年報

この資料の転載, 引用などをご遠慮ください.

本資料に関するお問い合わせは下記へお願いいたします.

編集・発行 東洋大学計算力学研究センター

〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100

URL: <http://www.toyo.ac.jp/site/ccmr/>

TEL・FAX: 049-239-1475

2017 年 3 月発行

禁無断転載

4.2.成果報告会

2012 年度より行われた成果報告会（CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム）のプログラムを添付する。

第2回CCMR-HDDMPPS(CRESTプロジェクト) 合同シンポジウム



平成25年3月28日(木) 13:00~16:30

東洋大学白山キャンパス 2号館16階スカイホール

13:00-13:10 開会挨拶 未定(学術研究推進センター長または工学研究科委員長)

13:10-14:40 セッション1(CCMR)

文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業:

「大規模高精度流体-構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」

プロジェクトリーダー: 田村善昭(東洋大学・計算力学研究センター長)

- 田村善昭(東洋大学) 「第2期プロジェクト~その狙いと展望」
- 藤松信義(東洋大学) 「流体-構造連成に関する詳細実験のための風洞実験システムの構築」
- 長岡慎介(東洋大学) 「流体-構造連成解析の為に並列EFMMについて」
- 横山真男(明星大学) 「表面性状の違いを考慮にいたした流体構造連成シミュレーション」
- 江澤良孝(東洋大学) 「効率的最適化技術と適用」
- 芦野俊宏(東洋大学) 「材料データの活用における課題」

14:40-14:50 休憩

14:50-16:20 セッション2(HDDMPPS)

科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業(CREST):

「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」

プロジェクトリーダー: 塩谷隆二(東洋大学)

- 塩谷隆二(東洋大学) 「ポストペタスケールシミュレーションのためのライブラリ開発」
- 荻野正雄(名古屋大学) 「超大規模解析に向けた数値計算ライブラリの開発」
- 河合浩志(諏訪東京理科大学) 「連続体力学分野向けDSLにおけるコード最適化」
- 室谷浩平(東京大学) 「大規模粒子系シミュレーションライブラリの開発と津波による市街地浸水解析」
- 和田義孝(近畿大学) 「超大規模データ可視化ライブラリの開発」
- A.M.M. Mukaddes(東洋大学) 「Study of Transient Heat Conduction Problems using HDDM」

16:20-16:30 閉会の辞 未定(学術研究推進センター長または工学研究科委員長)

※ シンポジウム終了後に東洋大学計算力学研究センター初代センター長の
矢川元基先生の最終講義を実施します。

17:00-18:00 矢川元基先生最終講義「応用力学と計算力学の半世紀」

18:00- 懇親会

参加は無料です。参加を希望される方は事前に
ccmr-adm@gmail.com までご連絡下さい。
ホームページはこちら <http://www.ccmr.toyo.ac.jp/>
奮ってご参加下さい。

〒112-8606 東京都文京区白山5-28-20

- 地下鉄三田線「白山」駅下車, 徒歩5分
- 東京メトロ南北線「本駒込」駅下車, 徒歩5分
- 東京メトロ千代田線「千駄木」駅下車, 徒歩15分



第3回CCMR-HDDMPPS(CRESTプロジェクト) 合同シンポジウム



平成26年3月10日(月) 13:00~17:30

東洋大学白山キャンパス2号館16階スカイホール

13:00-13:10 開会挨拶 矢川元基(東京大学名誉教授・東洋大学名誉教授)

13:10-14:50 セッション1(CCMR)

文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業:

「大規模高精度流体-構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」

プロジェクトリーダー: 田村善昭(東洋大学・計算力学研究センター長)

- 田村善昭(東洋大学)「大規模高精度流体-構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」
- 長岡慎介(東洋大学)「並列流体-構造連成解析手法の開発」
- 増田正人(東洋大学)「流体-構造連成解析のSOMを用いた分類及び予測技術の開発」
- 富山潤(琉球大学)「合理的な維持管理を目指したコンクリート構造物の塩害環境評価に関する数値解析的検証」
- 松原仁(琉球大学)「ブロック構造を有する岩盤の3次元モデル生成および地すべり解析」

14:50-15:00 休憩

15:00-16:40 セッション2(HDDMPPS)

科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業(CREST):

「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」

プロジェクトリーダー: 塩谷隆二(東洋大学)

- 塩谷隆二(東洋大学)「ポストペタスケールシミュレーションのためのライブラリ開発」
- 室谷浩平(東京大学)「大規模粒子系シミュレーションのメニーコア向け開発と多数の浮遊物が伴う市街地津波解析」
- 和田義孝(近畿大学)「超大規模データ可視化ライブラリの開発」
- 屋雄介(名古屋大学)「超大規模解析に向けた数値計算ライブラリの開発」
- 武居周(苫小牧工業高等専門学校)「高精度電磁界シミュレーション」

16:40-16:50 休憩

16:50-17:20 特別講演

- 古川知成(Virginia Tech.)「タイヤ研究に見る計算・計測工学」

17:20-17:30 閉会の辞 田村善昭(東洋大学・計算力学研究センター長)

参加は無料です。人数を確認する関係で、
参加を希望される方は事前に
nakabayashi@toyo.jp(東洋大学・中林)までご連絡下さい。

〒112-8606 東京都文京区白山5-28-20

- 地下鉄三田線「白山」駅下車, 徒歩5分
- 東京メトロ南北線「本駒込」駅下車, 徒歩5分
- 東京メトロ千代田線「千駄木」駅下車, 徒歩15分



第4回CCMR-HDDMPPS(CRESTプロジェクト) 合同シンポジウム



平成27年3月10日（火） 13:00～18:00

東洋大学白山キャンパス 2号館16階スカイホール

13:00-13:10 開会挨拶 矢川元基（東京大学名誉教授・東洋大学名誉教授）

13:10-14:50 セッション1 (CCMR)

文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業：

「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」

プロジェクトリーダー：田村善昭（東洋大学・計算力学研究センター長）

- 田村善昭（東洋大学）「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」
- 横山真男（明星大学）「流れと物体と音。実験および数値シミュレーションの研究報告」
- 長岡慎介（東洋大学）「並列流体-構造連成解析システムの開発及び実験との比較検証」
- 増田正人（東洋大学）「人工知能技術を用いた解析結果予測」
- 谷村景貴（東洋大学）「RAPLを用いた粒子法シミュレーションの消費電力制御」

14:50-15:00 休憩

15:00-16:40 セッション2 (HDDMPPS)

科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業(CREST)：

「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」

プロジェクトリーダー：塩谷隆二（東洋大学）

- 塩谷隆二（東洋大学）「ポストペタスケールシミュレーションのためのライブラリ開発」
- 三目直登（東京大学）「粒子法と有限要素法を用いた大規模流体構造連成解析システムの開発」
- 淀薫（インサイト）「超大規模解析のための多階層型領域分割法ソルバーの開発」
- 田上大助（九州大学）「電磁場シミュレーションの大規模化・高効率化へ向けた理論的検討」
- 杉本振一郎（諏訪東京理科大学）「超大規模電磁場解析ライブラリ開発」

16:40-16:50 閉会の辞 田村善昭（東洋大学・計算力学研究センター長）

16:50-17:00 休憩

17:00-18:00 江澤良孝教授最終講義 「研究を振り返って—構造解析と最適化」

参加は無料です。人数を確認する関係で、
参加を希望される方は事前に
nakabayashi@toyo.jp（東洋大学・中林）までご連絡下
さい

〒112-8606 東京都文京区白山5-28-20

- 地下鉄三田線「白山」駅下車、徒歩5分
- 東京メトロ南北線「本駒込」駅下車、徒歩5分
- 東京メトロ千代田線「千駄木」駅下車、徒歩15分



第5回CCMR-HDDMPPS(CRESTプロジェクト) 合同シンポジウム

日時：平成28年3月8日(水)

場所：東洋大学・白山キャンパス・2号館16階スカイホール

13:00-13:10 開会挨拶 田村善昭（東洋大学・計算力学研究センター長）

13:10-14:50 セッション1 (CCMR)

文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業：

「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」

プロジェクトリーダー：田村善昭(東洋大学・計算力学研究センター長)

○ 東洋大学 田村善昭, 大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証～連成解析標準問題の成果を中心に～

○ 琉球大学 富山 潤, 損傷理論を導入したボクセルFEMによるアルカリシリカ反応の膨張挙動解析

○ 東洋大学 藤岡照高, オープンCAE（固体の有限要素法）を用いた精度検証

○ 東洋大学 藤松信義, フラッタ予測のための流体-構造連成パラメータに関する検討

○ 琉球大学 松原 仁, 反応拡散系理論に基づく石灰岩溶解シミュレーション

14:50-15:00 休憩

15:00-16:40 セッション2 (HDDMPPS)

科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業(CREST)：

「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」

プロジェクトリーダー：塩谷隆二(東洋大学)

○ 東洋大学 塩谷隆二, Development of a Numerical Library based on HDDM for Post Petascale Simulation

○ 東京理科大学 遊佐泰紀, Three-dimensional Analysis Using Coupling-matrix-free S-version FEM

○ シャージャラル科学技術大学(Shahjalal University of Science and Technology), A.M.M. Mukaddes, A study of Bio-heat Transfer Problem using Finite Element Approach

○ 東洋大学 鄭宏杰, Run faster and larger - ADVENTURE for K computer

○ バージニア工科大学(Virginia Polytechnic Institute and State University) 古川知成, A Continuum Approach for Detection of Corrosion

16:40-16:50 閉会挨拶 矢川元基（東京大学名誉教授・東洋大学名誉教授）

16:50-17:00 拡大運営委員会

17:00-19:00 懇親会

参加は無料です。人数を確認する関係で、参加を希望される方は事前に fujimatsu@toyo.jp（東洋大学・藤松まで）ご連絡下さい。

〒112-8606 東京都文京区白山5-28-20

● 地下鉄三田線「白山」駅下車、徒歩5分

● 東京メトロ南北線「本駒込」駅下車、徒歩5分

● 東京メトロ千代田線「千駄木」駅下車、徒歩15分



第6回CCMR-HDDMPPS(CRESTプロジェクト) 合同シンポジウム

日時：平成29年1月21日(土)

場所：東洋大学・白山キャンパス・6号館6203教室

13:00-13:10 開会挨拶 田村善昭（東洋大学・計算力学研究センター長）

13:10-14:50 セッション1 (CCMR)

文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業：

「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」
プロジェクトリーダー：田村善昭(東洋大学・計算力学研究センター長)

「プロジェクト総括と今後の展望」

登壇予定者（敬称略，50音順）

江澤良孝，塩谷隆二，田村善昭，中林 靖，藤松信義

14:50-15:00 休憩

15:00-16:40 セッション2 (HDDMPPS)

科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業(CREST)：

「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」
プロジェクトリーダー：塩谷隆二(東洋大学)

○ Prof. Gabriel Wittum, Goethe University Frankfurt, Parallel adaptive multigrid - an approach efficient large scale computing

○ Dr. Sebastian Reiter, Goethe University Frankfurt, Geometric multigrid on massively parallel systems with UG4 - approach and applications

○ Prof. A M M Mukaddes, Shahjalal University of Science and Technology, Analysis of Skin Burn Injuries Using Finite Element Method with Bio-heat equation

○ Dr. Lijun LIU, Nagoya University, Development of A Distributed Parallel Explicit Moving Particle Simulation Method and Its Applications

16:40-16:50 閉会挨拶 矢川元基（東京大学名誉教授・東洋大学名誉教授）

16:50-17:00 拡大運営委員会

17:00-19:00 懇親会（第1会議室・2号館3階）

参加は無料です。人数を確認する関係で，参加を希望される方は
事前にfujimatsu@toyo.jp（東洋大学・藤松）までご連絡下さい。

〒112-8606 東京都文京区白山5-28-20

● 地下鉄三田線「白山」駅下車，徒歩5分

● 東京メトロ南北線「本駒込」駅下車，徒歩5分

● 東京メトロ千代田線「千駄木」駅下車，徒歩15分



4.3.シミュレーション学会誌特集記事

日本シミュレーション学会誌「シミュレーション」2017 年 3 月号に掲載予定の東洋大学計算力学研究センター小特集の入稿原稿を添付する。

シミュレーション学会誌「シミュレーション」

東洋大学計算力学研究センター小特集 原稿

東洋大学計算力学研究センターの研究紹介

田 村 善 昭

本小特集は、東洋大学に平成 17 年に設立された計算力学研究センター（以下、本センター）の最近の研究をまとめたものである。まずはこのように本センターの活動を紹介する機会を与えて下さった日本シミュレーション学会にお礼を申し上げたい。個々の研究については、学会発表や論文投稿等で公開できるが、まとめて紹介できることは稀である。本稿では、本センターの成り立ちやこれまでの活動、今後の方針などを紹介したい。

本センターは、平成 17 年、文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」の採択を受け、東洋大学白山第2キャンパス（当時）に設置された。初代センター長は、東京大学および東洋大学名誉教授である矢川元基先生で、平成 24 年3月まで務められた。その間、「数値逆解析手法の開発とその構造健全性向上のための応用」の研究題目の元、上記事業による5年間のプロジェクトを遂行した。その成果は毎年の年次報告書¹⁾に詳しいが、主な目的は、これまで当センターのメンバー（のべ東洋大学8名、学外25名；学生を除く）が個別に行ってきた計算力学分野の研究をまとめ、構造物の安全性評価に用いようとするものであった。次に、平成 23 年には、科学技術振興機構戦略的研究推進事業（CREST）に東洋大学塩谷隆二教授の「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」が採択され、今年度（平成 28 年度）まで続いている。これは、ますます大規模化する計算機に対応すべく、理化学研究所の京コンピュータや、さらにはその先のポスト京コンピュータまで見据えて、大規模・超大規模な計算機でも性能の出るライブラリを開発しようとするものである。この詳細については、本小特集の1つに記されている。さらに、平成 24 年に、文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業にも採択され、今年度まで活動が続けてきている。研究題目を「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」としており、このときから筆者がセンター長を務め、現在に至っている。本小特集はこのプロジェクトの内容が中心となっている。

流体—構造連成問題は、空力弾性（フラッタ）などを初めとして古くから知られており、コンピュータによるシミュレーションも 1990 年代から盛んに行われてきているが、未だに決定的な手法は見いだされていない。それには、いくつか理由があると思われるが、流体解析と

構造解析は同じような手法を用いながら、それぞれ独自に進化してきたこと、特に解析精度を向上させようとする場合取るべき手法や方向性が異なること、空間や時間の分割幅に対する要求が異なること、などなど、同じようできて両者を同時に解くことは簡単ではなかった。さらに、別の問題として、もともと現象が単独のものよりも複雑になっているため、解析手法や解析結果の妥当性を示すのが難しいということも挙げられる。そこで、このプロジェクトでは、以下の3つを大きな研究テーマとした。

1. （超）大規模問題にも対応できる流体—構造連成解析手法の開発
2. 流体—構造連成解析の基準となる問題（ここでは標準問題と呼んでいる）の提案とその詳細な実験データの取得
3. 流体—構造連成解析の精度・妥当性を検証する方法論の確立

この3つのテーマを5つのグループに分けて研究を行ってきた。本小特集の以下の記事はこの5つのグループの成果が中心となっている。その関係を図1に示す。

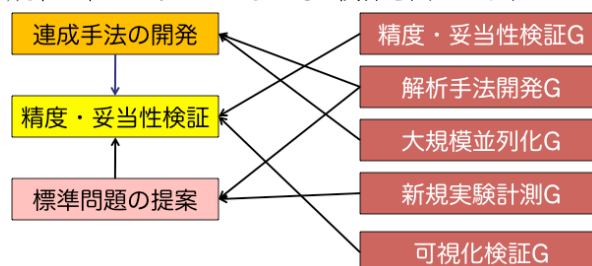


図1 研究テーマとグループの関係

この5つのグループについて、東洋大学のメンバーがのべ13名（博士研究員含む）、学外のべ7名で研究を行ってきた。CREST のプロジェクトが同時進行しているため、学外の協力者は前回よりも少なくなっている。記事では、それぞれのグループの研究紹介が中心となるので、ここでは3つのテーマについて簡単に述べておきたい。まず、解析手法の開発であるが、これは本稿の次の記事「Enriched Free Mesh Method と SUPG/PSPG 安定化有限要素を組み合わせた効率的な流体構造連成解析システムの構築」と4番目の「階層領域分割型数値解法ライブラリによる大規模並列計算」を組み合わせたものとなっている。解析手法のポイントは、流体・構造とも単純な要

シミュレーション 第〇〇巻第〇〇号

素形状で比較的精度の出る手法を組み合わせ、かつ、流体と構造でデータのやりとりをする（流体が構造に圧力を及ぼす、構造は変形・移動し、それにより流体の境界面もまた移動する、などを表現するために物理量が両者で交換される）際に、データの補間を必要としないよう、要素や節点を完全に一致させて、境界面で解析精度を維持していることが特徴である。これを、超大規模な解析にも対応するよう、階層型領域分割を用いて、規模が大きくなっても効率が出る手法を開発している。

次に、標準問題は、主に2番目の「流体構造連成コード検証のための標準問題の提案および実験」に詳しく記載されている。また、「Enriched Free Mesh Method と SUPG/PSPG 安定化有限要素を組み合わせた効率的な流体構造連成解析システムの構築」でも解析結果の例が示される予定である。流体—構造連成問題では、床に固定された弾性円柱に流れが当たる現象を標準問題として提案した。その理由は、流れの速さや円柱の大きさ、弾性率などによって、静的な変形をする場合、流れ方向に振動する場合、流れと垂直な方向に振動する場合、それらが組み合わさる場合など、1つの形状で様々な様相を示すことから、精度や妥当性を検証するためのデータとして有用なのではないかと考えたからである。ここで取得したデータはなんらかの形で公開し、多くの方に使っていただければと思っている。

精度・妥当性検証、いわゆる V&V (Validation & Verification) は、残念ながら、こうすれば必ず精度が分かる、妥当性が示せる、という統一的な方法を見いだしてはいないが、いくつかの手法や要素技術は提案できしており、それらを使った研究が3番目の「データ信頼性を考慮した実用的 CAE」に記載されているが、ここではむしろ本題の連成問題に対する精度・妥当性検証について少し述べておく。本プロジェクトにおける考え方は、実験もまたシミュレーションとは異なる意味で誤差を含んでおり、実験結果が真の解とは限らない。そこで、1つのアプローチとして、実験値とシミュレーション結果を同時に扱い、ベイズ推定等を用いることで、結果の信頼性を確率的に示そうとしている。また、本小特集には含まれないが、人工知能技術（ニューラルネットワークや

自己組織化マップ）を用いて結果を分類し、解析の定量的、あるいは定性的評価を試みている。著者の専門ということもあり、記事の5番目には可視化を利用した精度・妥当性検証についても触れている。プロジェクト終了まで入稿時点でまだ1月半ほどあるので、もう少しまとめた結果が示せればよいと思っている。さらに、学外の協力者も含めてこれまでの成果をまとめた英文の本も執筆中であり、これも年度内には発刊を予定している。

現在の文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業はこの3月末をもって終了となるが、CREST のプロジェクトは1年間の延長が決まっており、その他にもいくつかのプロジェクトが進行中で、センターとしての活動はしばらく続いていくと思われる。そのとき、本センターが何を指すべきか、まだはっきりとした答えを得ていないわけではないが、本小特集やここで述べたような話題の中にも、V&V、超大規模、人工知能、確立統計、データベース／ビッグデータ、データ融合、可視化、等々最近のキーワードが並んでおり、計算力学においてもこのような理論や技術が重要となってくると思われる。計算力学は、シミュレーションという大きな枠組みの中の1つであり、本センターはさらにその一部を担っているに過ぎないが、今後ともこの分野でなにがしかの貢献ができればと考えている。

最後に、これまで本センターに関わって下さった多くの研究者、学生、大学・研究機関の職員、企業の方々にセンターを代表してお礼申し上げると共に、本センターの活動が主に「文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業（平成17年度～平成21年度）」、「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業（平成24年度～平成28年度）」および「科学技術振興機構戦略的研究推進事業（平成23年度～平成28年度）」によるものであることをあらためて記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) CCMR 年次報告書,
<http://www.toyo.ac.jp/site/ccmr/report.html>

Enriched Free Mesh Method と SUPG/PSPG 安定化有限要素を 組み合わせた効率的な流体構造連成解析システムの構築

中 林 靖

1. 緒言

東洋大学計算力学研究センターで取り組んでいる「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」のプロジェクト「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」では、そのプロジェクト名が示す通り計算と実験の両面から連成解析問題に取り組み精度や妥当性を検証するものであるが、本稿ではそのうち計算の部分、すなわち数値流体解析及び数値構造解析を組み合わせた流体—構造連成解析手法について、新たに提案する効率的なアプローチについて解説する。

2. 連成解析手法

現在、有限要素法(Finite Element Method : FEM)や、境界要素法(Boundary Element Method : BEM)、差分法(Finite Difference Method : FDM)等を用いた数値計算技術の分野において様々な連成現象解析のアルゴリズムが提案されているが、アルゴリズムが複雑であること、対象となる解析領域が複雑かつ大規模になる為、解析に用いる節点数、要素数等が増加し、使用メモリー等の計算機リソースも大幅に増加し、それに伴い、計算量も増加し、連成結果を得るまでに必要な計算時間が大幅に増加する等の理由によって、まだまだ完全に効率的で標準的な手法が確立しているとは言えない状況である。従って、現状の多くは、この連成効果が非常に小さいとして、各々の現象間で及ぼし合う影響を考慮せずに単一の現象として解析を行う、もしくは、一方の現象に対する解析を行い、その結果を基に他方の現象に対する解析を行う等、物理現象間の相互作用を考慮せずに解析を行うことが多い。しかしながら、バイオ分野、ナノ分野、環境分野をはじめ、多くの分野においてこの連成効果を考慮した数値解析の需要が今後ますます増加していく事が予想される。

連成効果を考慮した解析を行なう為には、前述の様々な問題に対処する必要がある。これらの問題が、連成効果を考慮した数値解析を困難にする一因になっていると考えられる。本研究では、これら連成効果を考慮した際に生じる様々な問題の中で、特に解析領域の増加に伴う、計算時間、使用メモリーの大幅な増加という問題に着目

した。一般的に、FEM による数値解析を行う際には、中間節点を有する高次要素を用いて、その解析精度を向上させる。しかしながら、高次要素を用いた数値解析は、計算量と、使用メモリーが増加してしまうという短所もある。高次要素を用いる事無く、解析精度を向上させるには、解析領域をより細かく要素分割する必要があるが、領域全体の要素数を増加させると、結果的に、計算量、使用メモリーは増加してしまう。FEM による構造解析を行なう場合には、未だに優れた解析結果を得る為に、高次要素を用いる事が、一般的であるが、流体解析を行う際には、SUPG(Streamline Upwind / Petrov - Galerkin)法、PSPG(Pressure - Stabilizing / Petrov - Galerkin)法を導入することで、高次要素を用いる事無く、良好な解析結果を得ることが可能である。

連成効果を考慮した解析を行う際には、図1に示すように各解析領域の境界上の要素形状に整合性が取れている事が望ましいが、SUPG/PSPG 安定化FEMを用いた流体解析手法と、高次要素を用いた構造解析手法を用いると、図2に示すように、各解析領域の境界上の要素形状が一致しない。その結果、各解析場における影響を他方の解析場に与える際に、その結果を補間する作業が必要になり、この要素形状の不一致による補間作業は、計算過程を煩雑にするだけでなく、解析精度の低下の原因となる。つまり、SUPG/PSPG 安定化FEMの利点を生かした、流体—構造連成解析を行なう為には、構造解析手法においても、高次要素を用いる事無く、解析精度を向上させる手法を用いることが、前述の問題点を考慮した上で、理想的な手段であると言える。

そこで、本研究では、構造解析手法に、矢川らにより提案されたメッシュレス法の一つである高精度フリーメッシュ法(Enriched Free Mesh Method : EFMM)を使用する。このEFMMを使用した解析に用いる要素は、三角形一次要素もしくは四面体一次要素であるが、従来のFEMと比較して静的解析において、解析精度を向上させる事が可能である事が報告されている。これらの手法を組み合わせることで、図1に示すような構造場、流体場の境界間の要素形状の整合性が得られた連成解析を行うことが可能となる。

しかしながら、本研究で取り扱う流体—構造連成解析で

は、構造解析場に対しても、動的解析を行う必要があるが、EFMM の動的解析への適用とその有効性についての報告は未だにされていない。そこで、本論文では、EFMM の動的解析における有効性について示し、この動的解析へ適用した EFMM による構造解析手法と SUPG/PSPG 安定化 FEM を使用した流体解析手法を用いた流体-構造連成解析について述べる。

3. 構造解析

3.1. Free Mesh Method (FMM) ¹⁾

本研究で構造解析に使用する EFMM は、FEM を基本概念に置く同じくメッシュレス法の一つである FMM をベースとした手法である。本節では、この FMM の基本的な考え方について述べる。FMM では、FEM と異なり、入力情報として、基本的には、解析領域内の各節点の座標データのみが求められる。この与えられた節点の座標データを用いて、各節点毎に図 3 に示すような局所三角形要素群を生成する。この局所三角形要素群の作成方法として、対角線比較法、Voronoi 多角形と Delaunay 三角形の平面相対関係を基に、各中心節点毎に Delaunay 三角形を構築する方法、包装法など、様々な手法が提案されている。これらの手法を用いて生成される局所三角形要素群の中心の節点を中心節点と呼び、その局所三角形要素群を生成しているその他の節点を衛星節点と呼ぶ(図 3)。

この局所三角形要素群の剛性マトリックスを、従来の FEM と同様の方法で算出し、局所三角形要素群の中心節点の行成分のみを全体剛性マトリックスに足し合わせる。この作業を解析領域中の全ての節点に対して行うことで、解析領域全体の剛性マトリックスを得ることが出来る。その結果、解析精度は FEM と等価になる。しかしながら、FMM は、その自動要素生成アルゴリズムの特徴から、中間節点の利用が非常に困難であるという問題も含んでいる為、中間節点を有する FEM と比較すると、解析精度が低下してしまう。解析精度を向上させるには、節点数、要素数の増加が必要不可欠となる。

3.2. Enriched Free Mesh Method (EFMM) ²⁾

前節で述べた FMM の問題を解消する為に、EFMM では、**エラー! 参照元が見つかりません**。に示した局所三角形要素群内に FEM とは異なり、2 種類の場合を独立に仮定する。具体的には、EFMM では、図 4 に示したように、局所三角形要素群内に任意の応力場を、局所三角形要素内に従来の FEM/FMM と同様に変位場をそれぞれ独立に仮定する。このように、EFMM は従来の FEM では、変位とひずみを各要素内に同一の領域で仮定していたのに対して、変位とひずみをそれぞれ独立した領域で仮定し、これら独立に仮定した 2 種類の場合を

Hellinger-Reissner の原理 ³⁾を使用して関連付ける手法である。

変位 $\{u\}$ 、ひずみ $\{\varepsilon\}$ を独立変数とした Hellinger - Reissner の原理は以下の式(1),(2)で表される。

$$\begin{aligned} \Pi(\varepsilon, u) &= \int_{\Omega} \{\varepsilon\}^T [D] \{\partial u\} d\Omega - \frac{1}{2} \int_{\Omega} \{\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} d\Omega \\ &\quad - \int_{\Omega} \{u\}^T \{b\} d\Omega - \int_{S_{\sigma}} \{u\}^T \{\tilde{t}\} dS \\ \{\partial u\} &= [B] \{\bar{u}\}, \quad \{\varepsilon\} = [N^{\varepsilon}] \{\bar{\varepsilon}\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\{b\}$, $\{\tilde{t}\}$, Ω , $\{\bar{u}\}$, $\{\bar{\varepsilon}\}$ はそれぞれ、体積力、境界面 S_{σ} に働く表面力、解析領域、節点変位、節点ひずみを表す。また、 $[N^{\varepsilon}]$ は、局所領域のひずみを決定する任意関数であり、以下のように仮定する。

$$[N^{\varepsilon}] = \begin{bmatrix} p^T & 0 & 0 \\ 0 & p^T & 0 \\ 0 & 0 & p^T \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、

$$p^T = [1 \quad x \quad y] \quad (4)$$

である。

式(1)の停留条件は、以下の式(5)(6)のようになり、式(7)の近似方程式を得る。

$$\int_{\Omega} \delta \{\varepsilon\}^T [D] ([B] \{\bar{u}\} - [N^{\varepsilon}] \{\bar{\varepsilon}\}) d\Omega = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \delta \{u\}^T [B]^T [D] [N] \{\bar{u}\} d\Omega \\ - \int_{\Omega} \delta \{u\}^T \{b\} d\Omega - \int_{S_{\sigma}} \delta \{u\}^T \{\tilde{t}\} dS = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} -A & C \\ C^T & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\varepsilon} \\ \bar{u} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

ここで、

$$\begin{cases} A = \int_{\Omega} [N^{\varepsilon}] [D] [N^{\varepsilon}] d\Omega \\ C = \int_{\Omega} [N^{\varepsilon}] [D] [B] d\Omega \\ f_1 = 0 \\ f_2 = \int_{\Omega} [N^u]^T \{b\} d\Omega + \int_{\Gamma} [N^u]^T \{\tilde{t}\} d\Gamma \end{cases} \quad (8)$$

である。

次に、式(7)をローカル領域で縮約すると、式(9)を得る。この式(9)から、式(10)に示すローカル領域の剛性マトリックスを得る。

$$C^T (A^{-1} C \bar{u}) = f_2 \quad (9)$$

$$[k_{HR}] = C^T A^{-1} C \quad (10)$$

以上のように、ローカル領域全体で仮定されたひずみ場と、各要素で仮定された変位場を、一般的な混合形式の有限要素法の定式化と異なる手法で定式化することにより、節点自由度を増加する事無く新たな場の追加が可能となる。

このように、EFMMはFMMの局所三角形要素群を使用する手法であることから、使用する要素はFMMと同様、三角形もしくは四面体一次要素等の中間節点を持たない一次要素である。

4. 流体解析

本研究では、非圧縮性粘性流体の基礎方程式である Navier-Stokes 方程式と連続の式に対して、SUPG/PSPG 法に基づき離散化を行った安定化有限要素法を流体解析に用いる。非圧縮性粘性流体の基礎方程式として、無次元化された Navier-Stokes の運動方程式と、連続の式は (11),(12) で表される。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (11)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (12)$$

ここで、 u_i , p はそれぞれ無次元化された各方向の流速成分、圧力を表す。 Re は無次元化パラメータの Reynolds 数であり、また Ω は流体の占める解析領域である。基礎方程式(11),(12)に対して安定化有限要素法(SUPG/PSPG 法)⁴⁵⁾を適用すると以下の弱形式が導かれる。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} w_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) d\Omega - \int_{\Omega} \frac{\partial w_i}{\partial x_i} p d\Omega \\ & + \int_{\Omega} \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial w_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) d\Omega \\ & + \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{\Omega_e} \left(\tau_s \bar{u}_k \frac{\partial w_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) d\Omega \\ & = \int_{\Gamma_h} w_i h_i d\Gamma \end{aligned} \quad (13)$$

$$\int_{\Omega} q \frac{\partial u_i}{\partial x_i} d\Omega + \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{\Omega_e} \left(\tau_p \frac{\partial q}{\partial x_i} + \bar{u}_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) d\Omega = 0 \quad (14)$$

ここで、 w_i , q はそれぞれ式(11)(12)に対する Galerkin 項の重み関数であり、 Γ は、解析領域 Ω の境界を表す。なお、 \bar{u}_i は移流速度を表す。式(13)(14)中の τ_s , τ_p はそ

れぞれ、SUPG 法、PSPG 法に起因する安定化パラメータである。

式(13)(14)の未知変数である流速と圧力に対して、三角形一次要素による補間を行う。この組み合わせは、安定化有限要素法に基づく定式化を行っている為に可能である。更に、時間方向の離散化を行うと、 $U_{n+1}, V_{n+1}, P_{n+1}$ を未知変数とする連立一次方程式を得る。この連立一次方程式は非対称行列であるので、解法には、非対称行列に適用可能な反復解法の一つである GPBi-CG (Generalized Product-type method based on Bi-CG) 法を用いる。

5. 数値計算例

この章では、3 章及び 4 章で説明した構造解析手法及び流体解析手法を組み合わせを行った流体-構造連成解析結果をいくつか紹介する。既に説明している通り、3 章及び 4 章で説明した手法を組み合わせることにより、流体-構造界面での物理量の補間が必要のない極めて単純なアルゴリズムで連成解析を行うことが出来る。また、ここでは最も単純な弱連成解放を用いて、1 時間ステップ毎に構造解析と流体解析を 1 度ずつ繰り返す単純互い違い法を用いた結果を示す。

5.1. バネ支持された円柱のロッキング現象⁶⁾

連成解析の例として、まず、バネ支持された円柱のロッキング現象のシミュレーションした結果を示す。但し、この計算は構造物の変形がないために、正確に言うと流体-構造連成解析ではなく、流体-剛体連成解析になるが、連成解析手法の検証にしばしば用いられる。

図 5 に解析のモデルと各種パラメータを示す。モデルの左側から流入する流速 U を変化させることによりレイノルズ数を変化させると、通常は流速 U の増大に伴って円柱から放出される渦の放出頻度も増大するが、ある一定のレイノルズ数領域ではバネの固有振動数に引っ張られる形で渦の放出頻度が一定となる。この現象を数値解析して実験結果と比較したものが図 6 である。実験で報告されているレイノルズ数 105 から 125 の領域において、周波数が一定になっていることが分かる。

5.2. 血管を流れる赤血球の変形

次に、血管中を流れる赤血球の変形シミュレーションの結果を示す。図 7 に解析モデルと有限要素モデルを示す。赤血球は手足の先端などの毛細血管の太さに比べて非常に大きく、時にはパラシュート状に変形して流れることが知られている。この解析では血管部分を流体領域、赤血球の表面部分を薄肉の構造領域としてモデル化し、また赤血球内の体積一定条件を満たすために赤血球内部もまた別の流体領域としてモデル化して解析を行った。

図 8 に示された通り、流れが一番強い血管中心部が赤

血球に当たる部分を中心として、もともと回転楕円体をしていた赤血球の変形が始まっていることが分かる。また、同時に血液の流れに押し出されるように右側に流されていることも分かる。最終的にはパラシュート状に広がった赤血球が折り畳まるように潰れて毛細血管の細い部分を流れて行くことが実験的に確認されているが、本解析ではそのような大変形まで追いかけて連成解析することは出来なかった。

6. 結言

本稿では、流体-構造連成解析を行う際の高精度で高効率方法として、EFMMを用いた構造解析手法と、SUPG/PSPG安定化有限要素法を用いた流体解析手法とを組み合わせる手法を提案した。この組み合わせにより高次要素を使用せず、また、流体構造界面での物理量の補間が必要のない流体-構造連成解析手法を構築することが出来る。具体的には、以下のような結論が得られた。

- 1) 構造解析にEFMMを用いることにより、従来の四面体一次要素を用いた構造解析よりも精度の高い解析が行えることがわかった。
- 2) 流体解析において、高次要素を使用する事無く、高精度な解析を行う事が可能であるSUPG/PSPG安定化FEMとEFMMを組み合わせる事で、各解析境界間で整合性の得られた連成解析システムが構築出来た。
- 3) バネ支持された円柱のロックイン現象を実験と比較することにより、上記で示した連成解析システムの精度について検証を行った。
- 4) 流体-構造連成解析の例題として、毛細血管内の赤血球の血流による形状変形についての数値シミュレーションを行った。この解析は、実際の赤血球の両凹円板状態と若干異なる中央部付近の凹みを無視した形状で行ったが、その結果は、毛細血管内で実際に観測される赤血球のパラシュート型への形状変形を定性的に見て、計算できていると考えられる。

謝辞

本研究の一部は「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業（平成 24 年度～平成 28 年度）」およびJST-CRESTの研究課題「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」による。あらためてここに記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) Yagawa, G. and Yamada, T., Free Mesh Method A New Meshless Finite Element Method, Computational Mechanics, 18, (1996), pp. 383-386.
- 2) Yagawa, G. and Matsubara, H., Enriched Free Mesh Method: An Accuracy Improvement for Node-based FEM, Computational Plasticity, Computational Methods in Applied Sciences, Springer, 7, (2007), pp.207-219.
- 3) O.C.Zienkiewicz & R.L.Taylor., Matrix Finite Element Method I [Revision new publication](in Japanese), Kagaku Gijutsu Shuppan, Inc., (1996)
- 4) Tezduyar, T.E., Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations, Advanced in Applied Mechanics, 28, (1992), pp.1-44.
- 5) Tezduyar, T.E., Mittal, S., Ray, S.E. and Shih, R., Incompressible flow computations with stabilized bilinear and linear equal-order-interpolation velocity-pressure elements, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 95, (1992), pp.221-242.
- 6) P. Anagnostopoulos., P. W. Bearman., Response characteristics of vortex-exited cylinder at low Reynolds numbers, J. Fluids and Struct., (1967), 6 501-502
- 7) G. H. Koopman : The vortex wakes of vibrating cylinders at low Reynolds numbers, J. Fluid Mech., (1967)28 501-502

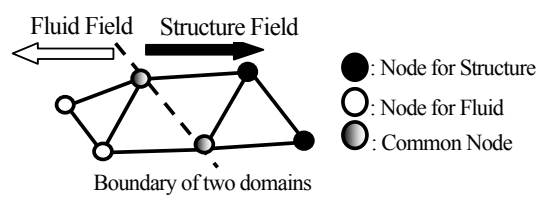


図1 節点整合性の取れた流体-構造界面

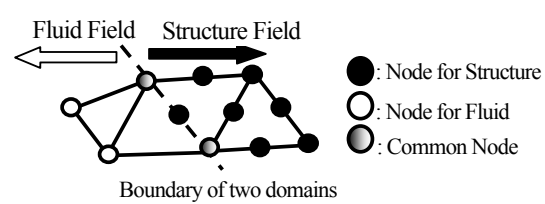


図2 節点整合性の取れていない流体-構造界面

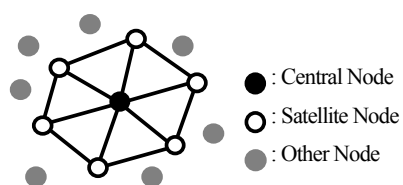


図3 局所要素クラスタ

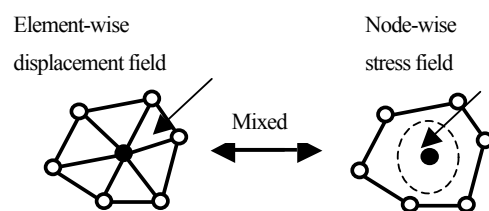


図4 変位場と応力場の計算領域

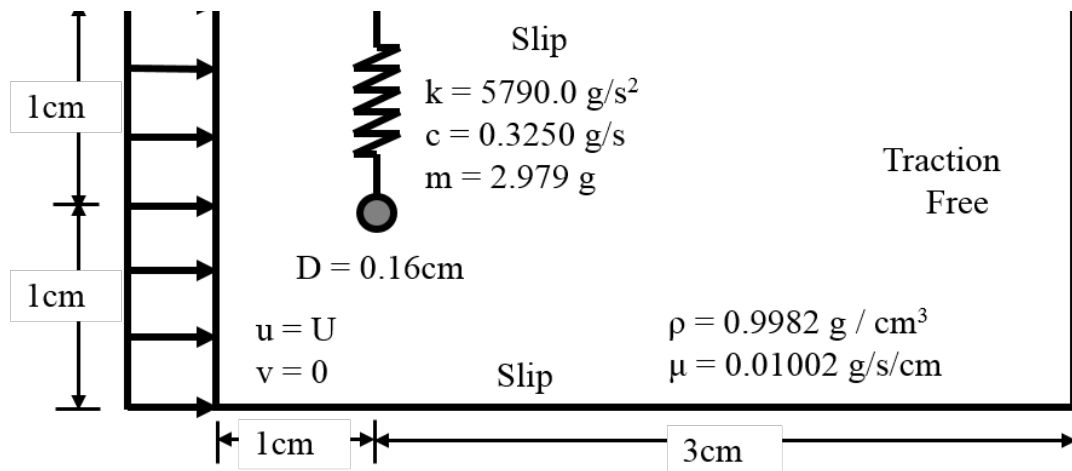


図5 バネ支持された円柱まわりの流れ解析モデル

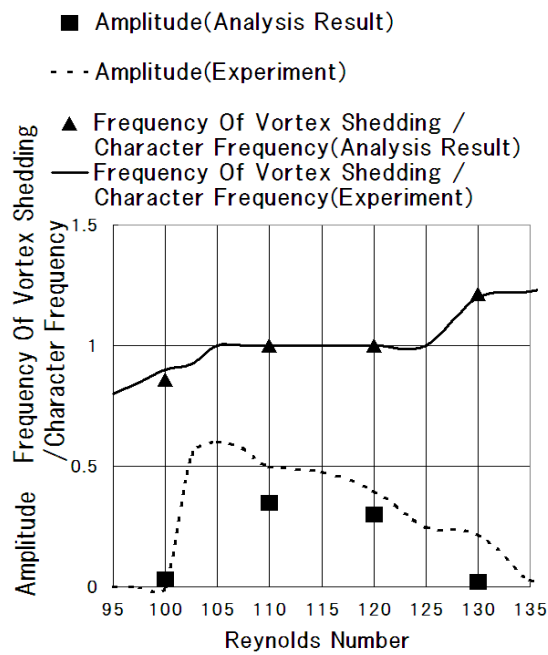


図6 ロッキング現象

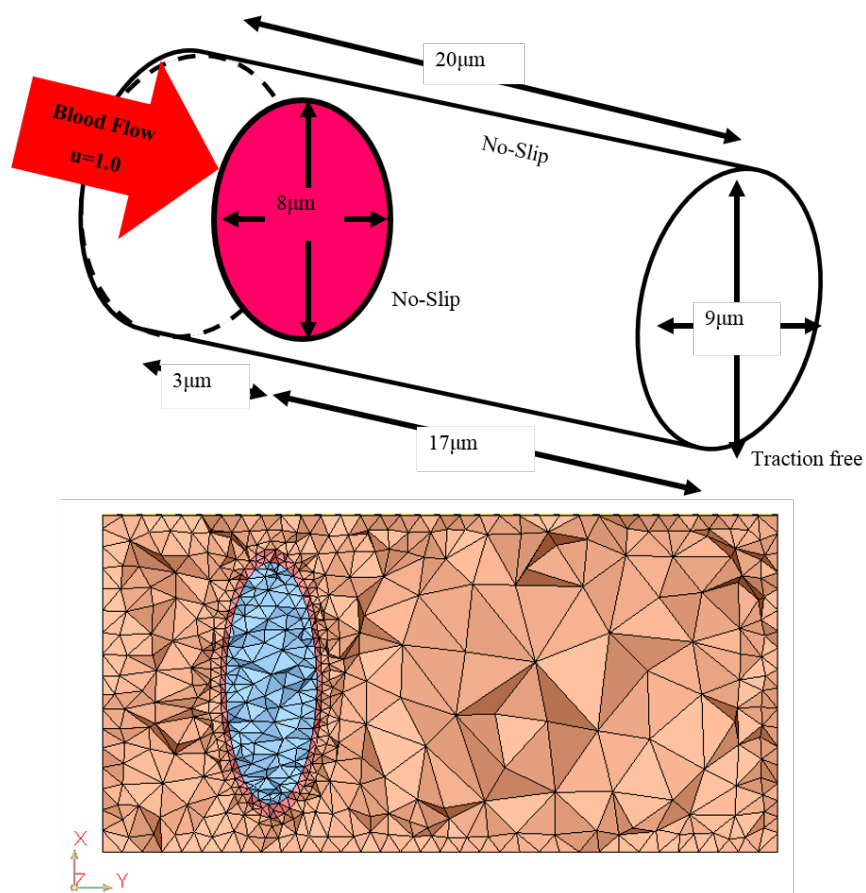


図7 解析モデルと有限要素モデル

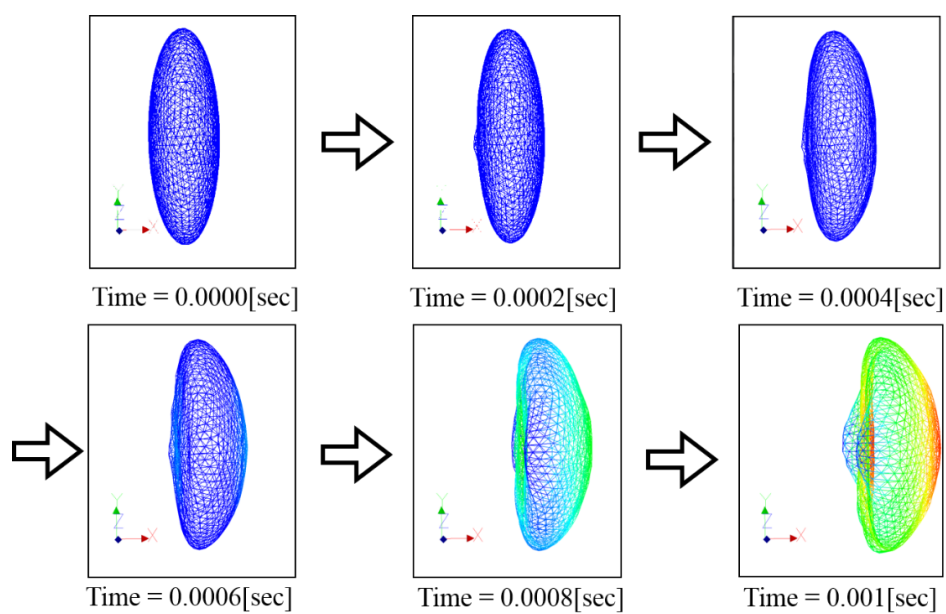


図8 赤血球の変形

流体構造連成コード検証のための 標準問題の提案および実験

藤 松 信 義

1 研究背景

流体構造連成問題の一つであるフラッタ現象は、旗のたためきの様に物体が空気力により振動する現象であり、構造物を破壊に至らせる場合がある¹⁾。フラッタ現象の発生は、空気力(物体に作用する空気の流れ)、弾性力(材料の剛性により元の形に戻ろうとする力)、慣性力(慣性による見かけの力)が連成する現象であり、それぞれの力が作用して動的不安定を引き起こす。そのため航空機を代表とする機器の設計開発において、製造コストと運用費を削減するためには構造重量を軽量化することが必須となっている。この軽量化において、材料の剛性が低下することからフラッタが発生しやすくなり、機器を安全に使用するためにはフラッタ現象の発生を精度よく予測することが重要課題である^{2,3)}。一方、フラッタ現象を積極的に利用する研究も行われており、物体の振動を利用して流体の混合促進や、翼フラッタを軸の回転振動に変えて発電するシステムにも応用されている^{4,5)}。フラッタ現象を防止することや、積極的に利用するためには、フラッタ現象の発生を予測する必要がある。機器の設計開発において実機で実験することが困難である一方で、計算機性能の向上により、フラッタ解析に利用する数値解析ツールは高精度かつ高効率であることが強く要求されている。

このような背景から、東洋大学計算力学研究センターのプロジェクト名である「大規模高精度流体-構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」の中では、新規実験計測グループという名称で流体-構造連成解析のための「標準問題実験の検討」に焦点を当てた活動を行ってきた。流体-構造連成問題に関する数値計算と実験は多数行われているが、その多くが単独に行われたものであり、文献にはいずれかの結果が引用されている場合が殆どである。

本研究では、数値計算結果の妥当性を検証するためのデータを提供することを主眼として実験に取り組んできた。数値解析のモデル化がしやすい問題を選定すること、解析結果が実験結果と比較しやすい様に実験条件を詳細に記述すること、参照しやすい実験結果を提供することを目的としている。そこで流体-構造連成解析手法を検証するための標準問題として、低速風洞を用いて下記の二種類の実験

を行った。

- (1) 弾性円柱の空力振動
- (2) シート材のフラッタ特性

円形、矩形は基本形状の一つであり、数値解析においても計算条件の設定が容易である。超音速風洞装置による試験も可能であったが、航空機産業に限られることから低速風洞装置を用いた試験のみを行った。

フラッタ現象に関する理論的・実験的研究は、これまで多く行われているが^{6,7,8,9)}、系統的にデータを整理できる例は数少ない^{10,11)}。プロジェクト内における本グループの目標として、材料と流体力学の物理量を関連付けて、シートフラッタ特性の実験結果を系統的に整理できる無次元パラメータの提案を試みた。

2 実験装置および計測方法

図1は弾性円柱の空力振動試験の概要図である。風洞の出口面積は $A=0.3 \times 0.3 \text{ m}^2$ であり、最大40m/sまで風速を上げることができる。風洞出口の直下にはシリコンゴム製の円柱が設置されており、サポート材で円柱の片端が固定されている。これは円柱の上端が固定端となっており、下端は自由であることを意味する。風路から放出される気流により、円柱が振動する様子を高速カメラ(HAS-L1, (株)ディテクト)を用いて、円柱の側面と下面から撮影を行った。動画はVGA形式であり、500fpsで記録される。円柱の運動を解析するために、運動解析ソフトウェアであるDIPP-Motion-Pro-N((株)ディテクト)を用いた。

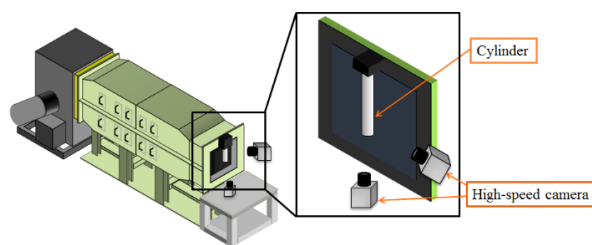


図1 低速風洞装置と弾性円柱の空力振動試験

図2はシートフラッタ試験の概要図である。弾性円柱の空力振動試験と同様に、風洞出口の直下にシートフラッタ装置を設置して実験を行った。試験片は金属製とゴム製のシート材を用いた。金属シート材は水平支持(図3(a))、ゴムシート材は鉛直支持(図3(b))されている。シート材は2枚のア

ルミフレームで挟まれた後、ボルト締めしており、実験中に外れない様に固定されている。またシート材に振れが発生しないようにしている。シート材は片端固定、他端自由の状態である。金属シートの自由端は自重でたわむことに注意して頂きたい。金属シート材を鉛直に設置したときは、本実験設備ではフラッタ現象が発生しなかった。

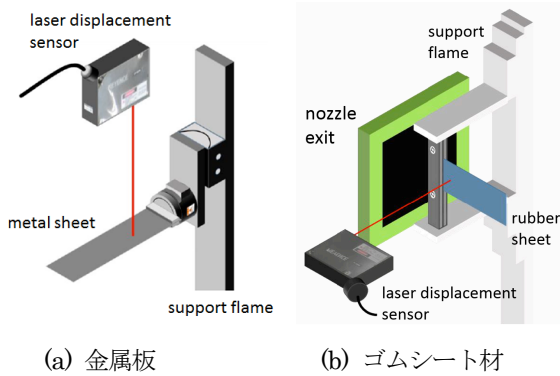


図2 シートフラッタ試験装置

表1 弾性円柱の仕様

直径 d_c [mm]	20
長さ L_c [mm]	160
ヤング率 E [MPa]	2.9 (A50)
	4.9 (A60)
	6.8 (A70)

表2 金属・ゴムシート材のヤング率

金属シート材	ヤング率 [GPa]
アルミニウム(アルミ)	70.6
ステンレス(ステン)	205
黄銅	105
ゴムシート材	ヤング率 [MPa]
ウレタンゴム (UT)	46.2
塩化ポリビニル (EV)	31.6
黒天然ゴム (BN)	9.90
フッ素ゴム (FS)	8.30
ニトリルゴム (NBR)	7.60
エチレンポリプロピレン (EPT)	7.10
クロロブレン (CR)	5.60

表3 金属・ゴムシート材のサイズ

金属シート材	
長さ L [mm]	100, 110, 120, 130, 150
幅 w [mm]	40
厚さ t [mm]	0.3, 0.4, 0.5
ゴムシート材	
長さ L [mm]	100, 110, 120, 130, 150
幅 w [mm]	40, 50, 60, 70, 80, 90
厚さ t [mm]	0.5, 1.0

設置したシート材の変位を測定するために、レーザ変位計(LK-G500, KEYENCE Corp.)を用いた。風速を変化させて実験を行い、フラッタ開始時の風速を調べた。フラッタ時のシート材の変位はサンプリング周波数 5kHz で約 13 秒間測定し、65536 点のデータを収録して周波数解析を行った。

表 1 は弾性円柱の空力振動試験に使用した円柱の大きさとヤング率を示している。直径と長さは 1 種類、硬さは 3 種類で実験を行った。ヤング率の右側に括弧書きした数値はゴムの硬さ試験法の一つであるデュロメータ硬さを意味している。表 2 は金属シート材とゴムシート材の種類とヤング率を示している。金属材料は 3 種類、ゴム材料は 7 種類使用しており、それぞれ大きさを変えて実験した。名称の横には、図の凡例に表記する略称を示している。表 3 に金属シート材とゴムシート材の長さ、幅、厚さを示している。実験に使用する弾性円柱、シート材は商用の材料を使用しており、容易に入手できるものとした。

3 実験結果および考察

3.1 弾性円柱の空力振動試験

本節では、弾性円柱の空力振動特性を調べるために、円柱の材質に着目して空力振動する際の振幅と振動周波数を調べて整理した結果を示す。

図 3 は空力振動している弾性円柱を側面と下面から撮影した画像を示している。材質は A50 であり、 $U=25\text{m/s}$ のときの結果である。円柱の側面と下方から高速度カメラで振動する円柱を撮影する。実験で動画を取得した後、連続画像に分割して 2 値化処理を行い、円柱領域の中心座標を円柱部分のピクセルの平均値として算出した。その後、中心座標の時間履歴を取得し、円柱の変位と周波数特性について調べた。図の添え字は x, y 方向を表しており、実線と破線を用いてそれぞれ示した。また x は流れに平行な成分、 y は垂直な成分を意味している。

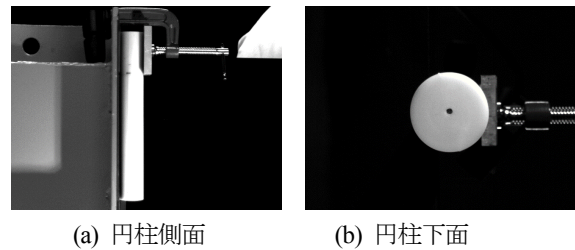


図3 空力振動する弾性円柱の瞬間写真 (A50, $U=25.2\text{m/s}$)

流体力学に関連する現象は無次元数で記述すると系統的に整理できることが多い。ここではレイノルズ数 $\text{Re}=Ud_c/\nu$ で整理する。 ν は流体の動粘性係数を表している。図 4 は時間平均した変位 D の Re 数に対する変化を示している。レイノルズ数の代表長さは円柱の直径 d_c である。 Re 数と共に D_x は増加する傾向にある。A50 は最も柔らかい材質であり、 Re 数に対する D_y の増加は明らかである。ただし、 D_x の

1/10 程度である。円柱の材質が A60, A70 のとき、変位 D_x は概ね一定である。このときの y 方向の変位 D_y は円柱の固定方法の影響などによる中心座標のずれであるが、直径の 3%未満であり大きくない。

図 5 は変位の RMS 値 a を円柱の直径で無次元化した値を示している。Re 数が増すと共に a_x, a_y は増加している。円柱後流に発生する渦による影響を受けており、流れに垂直方向に振動することから a_x よりも a_y の増加率が大きいことが確認できる。また円柱の硬度が増すと、勾配は緩やかになる傾向が確認できており、材料の性質が現れていることが分かる。

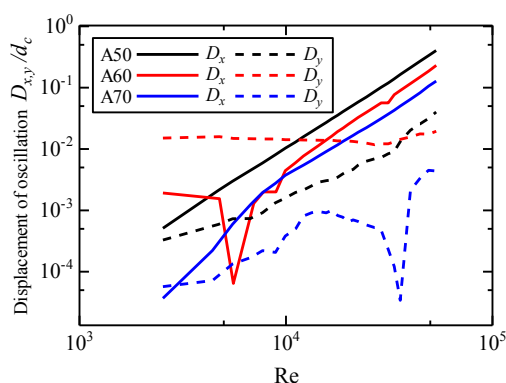


図 4 空力振動する弾性円柱の時間平均変位

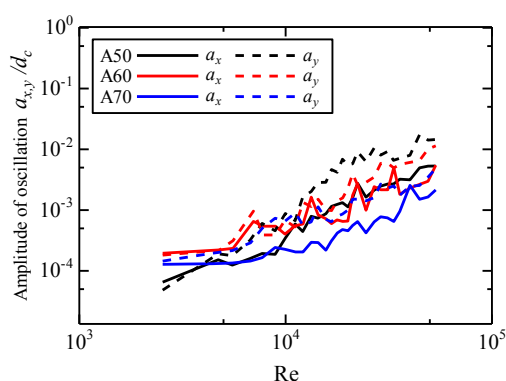


図 5 空力振動する弾性円柱の変位の RMS 値

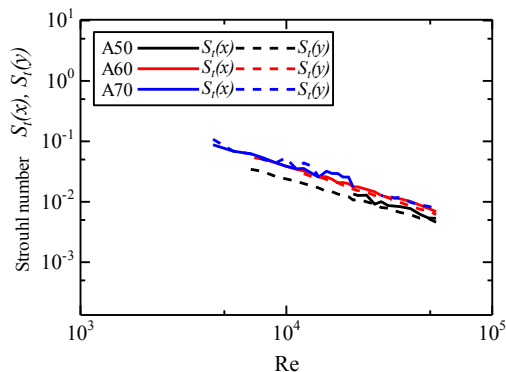


図 6 空力振動する弾性円柱の周波数特性

図 6 はシリコーンゴム円柱の周波数特性を示している。測

定結果から周波数スペクトルに明確なピークを確認できなかった場合は、実験結果から除外している。ストローハル数 $St=d_f/U$ は Re と共に減少しており、その傾きは材質に依らず概ね一定の値を示している。また振動の方向による影響も小さいことが分かる。

表 4 は図 4 から図 6 に示した時間平均した変位 D 、変位の RMS 値 a 、St 数の Re 数に対する勾配を一覧表にして示している。硬さが増すと D, a の値が減少していること、また図 6 に示したように周波数特性の傾きは概ね一定であることを確認できる。数値解析の検証のために、これらの結果と比較することができる。

表 4 弾性円柱の空力振動特性

	D_x	D_y	a_x	a_y	$St(x)$	$St(y)$
A50	2.442	-	1.626	1.988	-1.017	-0.985
A60	2.260	-	1.090	1.504	-1.005	-1.046
A70	2.164	-	1.052	1.125	-0.912	-1.042

3.2 シートフラッタ試験

本節では、シートフラッタ特性を調べるために、風洞試験で風速を徐々に上げていき、シート材が振動し始める速さを調べた。またこのときのシート材の変位をレーザ変位計で測定し、周波数特性を調べた。表 2, 3 に示したように、シート材の材質、その大きさを変えて実験を行った。

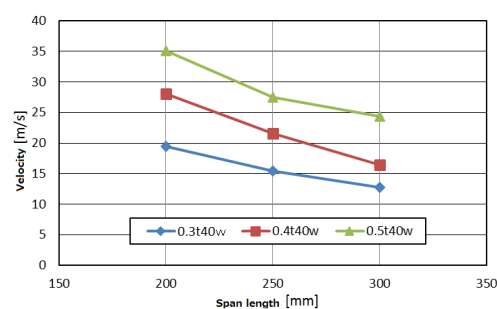


図 7 アルミシート材のフラッタ開始速度 (AL)

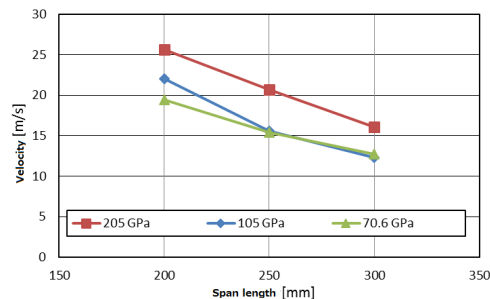


図 8 金属シート材のフラッタ開始速度

図 7 は金属シート材とゴムシート材のフラッタ開始速度を示している。横軸はシート材の長さであり、厚さ t を変化させた場合の結果である。厚みが 0.5mm から 0.3mm に薄くなると剛性が低下するためフラッタしやすくなり、フラッタ開始速度が低下している。また長さが

4 まとめ

流体構造連成解析のための標準問題として2種類の実験を検討した。標準問題として弾性円柱の空力振動実験、シートフラッタ実験を行った。実験結果を整理して、数値解析コードの検証に利用しやすい表記とした。新規実験計測グループの目標として、流体構造連成問題の指標を提案することがあった。シートフラッタ試験からフラッタ開始速度を調べた結果、材料の材質、大きさによらず、フラッタ周波数を整理できる無次元数を提示した。円形と矩形の形状は検証計算に適用しやすい形の一つであり、本実験結果は数値解析コードとの比較に利用できるものと考えられる。

謝辞：本研究の一部は「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業(平成24年度～平成28年度)」による。実験装置の製作、および、実験データの取得は、東洋大学大学院修士課程機能システム専攻の篠崎眞大君、東洋大学理工学部機械工学科の風巻勇君、石坂充君、坂本青葉君の協力によるものである。あらためてここに記し、謝意を表す。

引用文献

- 1) J. W. Duncan : The fundamentals of flutter, R&M, **2417**, 1/36 (1948)
- 2) J. Dugundji : Personal Perspective of Aeroelasticity During the Years 1953-1993, Journal of Aircraft, **40**, 809/812 (2003)
- 3) R. Yurkovich : Status of Unsteady Aerodynamic Prediction for Flutter of High-Performance Aircraft, Journal of Aircraft, **40**, 832/842 (2003)
- 4) W. McKinney and J. DeLaurier : The Wingmill: An Oscillating-Wing Windmill, Journal of Energy, **5**-2, 109/115 (1981)
- 5) K. Isogai, M. Yamasaki, M. Matsubara and T. Asaoka : Design study of Elastically Supported Flapping Wing Power generator, International forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics, 4/6 (2003)
- 6) 黒川：フラッタを生じる旗に作用する風荷重測定: その2 重量比およびアスペクト比が風荷重に与える影響(膜構造:風洞,構造 I), 日本建築学会学術講演梗概集, B-1, (2007).
- 7) 山口, 伊藤, 緒方：柔軟ウェブ基礎形態のフラッタ限界とその挙動に関する研究 (第1報, フラッタ限界の予測と風洞試験結果), 日本機械学会論文集 (B 編), **67**-663, 2738/2745 (2001)
- 8) R. D. Blevins : Flow-induced vibration, Krieger publishing company (1990)
- 9) R. King, M. J. Prosser and D. J. Johns : On Vortex Excitation of Model Piles in Water, Journal of Sound and Vibration, **29**-2, 169/188 (1973)
- 10) N. Kondo : Three-dimensional computation for flow-induced vibrations in in-line and cross-flow directions of a circular cylinder, International Journal for Numerical Methods in Fluids, **70**, 158/185 (2012).
- 11) C. Eloy, C. Souilliez and L. Schouveiler : Flutter of a rectangular plate, Journal of Fluids Structure, **23**, 904/919 (2007)
- 12) 五十嵐保, 杉山均, 流体工学と伝熱工学のための次元解析活用法, 6-17, 共立出版, (2013).

データ信頼性を考慮した実用的CAE

江澤良孝，芦野俊宏，藤岡照高

1 はじめに

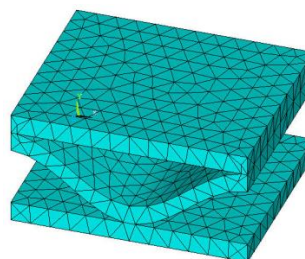
構造のシミュレーションを行う場合，まず材料定数などの実験データが必要となる．その実験データは常になんらかのばらつきを有している．したがって，その実験データを用いたシミュレーションもそのばらつきの影響を受けることになる．したがってそのばらつきを考慮したシミュレーションが必要になる．そこで，そのデータの信頼性を考慮した実用的 CAE を構築するための各種要素技術を検討した．まず第1は，データ信頼性を考慮してシミュレーションに必要な定数を算出するための技術，第2は，実用的な CAE に不可欠な，物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式の開発，第3は実用的 CAE として近年注目されているオープンソース CAE 技術を用いた V&V (Verification and Validation)．この3つにポイントを絞って紹介する．

2 データ信頼性を考慮してシミュレーションのための定数を算出する技術¹⁾

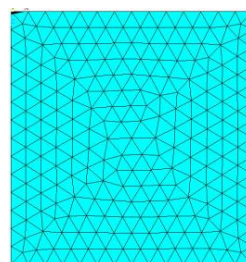
2.1 段ボールとシミュレーション

ここでは段ボールを例にとって検討を行った．段ボールは中芯形状が複雑であり，抄造機によって抄造された板紙は抄造方向に紙を構成する繊維が配列するため抄造方向と垂直方向で弾性率が異なる異方性材料であり，かつ形状が複雑であるため通常の数値シミュレーション解析は困難である．したがって設計段階での数値シミュレーション解析は普及していない．本研究ではこのような問題点に対し段ボール構造の周期性に着目し数値シミュレーション解析の一手法である均質化法^{2,3)}を用いた効率的な数値シミュレーション解析を行ない，実験と数値シミュレーション解析から効率的に弾性率を算出する手法を提案する．

まず，両面段ボールについて曲げ試験を行った．さらに均質化法を適用するため，本研究では，図 1(a)に示す段ボールの一つの段をモデル化したマイクロモデルと，図 1(b)に示す等価なマクロモデルを用いた．



(a) Micro model



(b) Macro model

図1 均質化モデル

2.2 材料定数の導出と検証

この均質化解析を行うためには均質モデルに割り当てる材料定数を計算する必要がある．しかしながら，実験データは各種の誤差を含んでいる．例えば，中芯部分形状もばらつきがあり，実験の時に荷重を付加する位置も厳密に指定するのは困難である．このような誤差を含んだ実験データから算出した材料定数は当然誤差を含んでおり，そのデータを使ったシミュレーションも誤差の影響を受ける．そこで，ここでベイズ推定に着目し，確率論的に材料定数を推定することを行った．このようにすると推定値の信頼性を評価することができる．ベイズ推定は次式のように表現できる．

$$p(\theta|D) \propto f(D|\theta)p(\theta) \quad (1)$$

ここで原因をデータ D ，結果をパラメータ θ とすると $p(\theta|D)$ は事後確率であり，データ D のもとでパラメータ θ が得られる確率である．事後確率はパラメータに対

する尤もらしさを示す尤度関数 $f(D|\theta)$ と文献、過去の知見やデータといった解析者の有する主観的な情報を反映させた事前確率 $p(\theta)$ を乗ずることで導き出している。

本研究では下記に示す確率モデルについて議論を行うため Case A では明瞭な因子を考慮しない従来型ベイズモデル、Case B, C では解析者が最低限把握している不確定性 (Case B は明瞭な情報を把握していないと仮定した予測情報, Case C は解析者が不確定性に対する正確な値を把握している予測情報) を考慮しパラメータの異なる階層ベイズモデルを作成した。

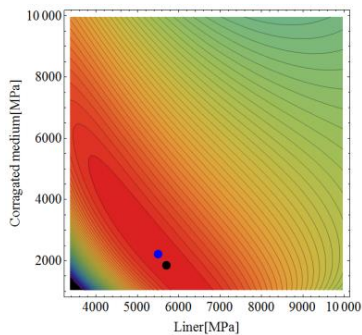
Case A: 従来型ベイズモデル

荷重条件 F 、段ボールの各方向における拘束条件のもとで得られた解析結果より作成した応答曲面の変位 u から弾性率 E (ライナ: E_{Liner} , 中芯: E_{CM})の弾性率を推定する。

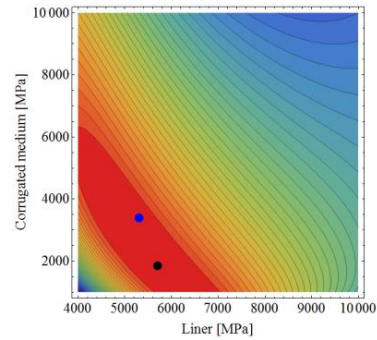
Case B, C: 階層ベイズモデル (階層は1層のみに単純化した)

実験値の観測誤差の因子を加えた応答曲面の変位 u から弾性率を推定する。

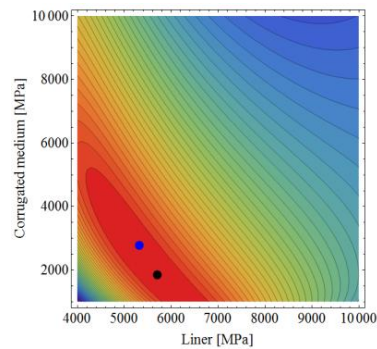
図2に、実験値に対して前処理を施した20の観測データデータ(D_i^{CD}, D_i^{MD}) (D_i^{CD} は、中芯にそった方向に荷重をかけた場合の変位で、 D_i^{MD} は、中芯にクロスする方向に荷重をかけた場合の変位)を用いてそれぞれの確率モデルに対してベイズ推定を行なった結果の事後分布を示し、表1に平均と分散の定量値を示す。表1においてParameterとはライナと中芯を指す。図2において、黒点は実験値の応答曲面から算出した中芯とライナの弾性率の値、青点はベイズ推定による事後確率の平均値である。



(a) Case A



(b) Case B



(c) Case C

図2 事後分布

表1 予測された平均値と分散

Parameter	Case A		Case B		Case C	
	Ave	Var	Ave	Var	Ave	Var
Liner	5494	6892.2	5305	6825.8	5319	3673.7
Corrugated medium	2211	16070	3389	27392	2774	13396

2.3 結果と考察

通常の有限要素解析は段ボール構造が複雑であるためモデル化や境界条件の設定に手間がかかり非効率であるが、段ボールの周期性構造に着目した均質化法を適用することで詳細なモデルによる解析を必要とすることなく全体構造解析が可能となり、効率的に解析を行える。Case A, B, Cを比較するとCase A (従来型ベイズモデル)が総合的に良い推定結果となっているが、用いた確率モデル(従来型ベイズモデル)は明瞭な不確定因子をモデルに反映しておらず事後分布に与える不確定因子の影響を表現できていない推定結果となっている。一方、Case B, Cの推定結果はCase Aに劣るが確率モデル(階層ベイズモデル)に明瞭な不確定因子を考慮したため、より真の現象を捉えており不確定因子のパラメータを設けること

で推定の自由度が増すため少数のデータを活用する場合においてもロバスト性を有する実用性のあるベイズモデルといえる。

3. 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式開発

シミュレーション学会誌では、2000年に「シミュレーションは何処まで実験を補完できるか—仮想実験による物質材料設計の試み」として小特集が組まれた⁴⁾。この仮想実験プロジェクトは材料に関わるミクロからマクロの数値シミュレーションプログラムをモジュールとして組み込んだワークベンチを開発し、ワークフローによって結合して材料に関わる統合化された計算環境を構築しようという試みであった。わが国ではこの方面でその後大きな動きはなかったが、シミュレーションやデータを用いた材料設計についての研究は各国で継続されてきた。

研究の方向性は二つに大別されており、一方は結晶構造などのデータベース、第一原理計算などの結果から、これまで作られたことのない組成、結晶構造の物質の特性を予測しようとするもので、所謂マテリアルズ・インフォマティクス、と呼ぶ場合こちらをさす場合が多い⁵⁾。この手法は実際には製造されていない物質系を探し出すことが可能である一方、予測可能な物性はミクロ構造が直接反映されるもの、電磁気的特性や熱物性などに限られる。

これに対して構造材料の強度や、特に長期的な性能に関わるクリープや疲労などの特性は結晶粒、粒界、転位などミクロ・マクロに至る実体、メカニズムが関わっている。このため単一の物理モデルによって計算・予測することが困難であり、熱力学計算による組織予測、亀裂進展などのモデル計算、有限要素法など複数のモデルを組み合わせるマクロな物性を予測しようとする ICME(Integrated Computational Materials Engineering)のアプローチが研究・開発されてきた⁶⁾。

2011年に米国ホワイトハウスがこれらの動きを取り上げ、Materials Genome Initiative (MGI)、として計算機支援による新材料設計・材料開発を国家戦略として推進することを発表し、国際的に注目を浴びることとなった⁷⁾。これを受けて、わが国でも戦略イノベーション創造プログラムの一つのテーマとして ICME のアプローチを取る革新的構造材料、マテリアルズ・インフォマティクスのアプローチを取る情報統合型物質・材料開発イニシアティブなどのプロジェクトが相次いで立ち上がった。中国においては、China MGI と称して材料研究者と情報科学者が共同する体制作りが進められており、ヨーロッパにおいても ICMEg (ICME Expert Group), MARVEL (Materials' Revolution), NoMaD (Novel Materials Discovery)などのプロ

ジェクトが開始されている。

材料の物性や性能に関わるデータは人工物の設計・評価に関わる基本的な情報であり、古くは印刷されたデータシートの形で、その後は計算機可読なデータベースとして各所において整備が進められてきた。しかしながら、独立に開発されてきたために互いに異なったデータ構造を持ち、加えて材料の種類、関係する物性値、測定方法、プロセスに関する記述などの多様さからデータ構造の標準化は困難であり、いくつかの試みはあったものの⁸⁾データの相互交換は困難であった。しかしながら、マテリアルズ・インフォマティクスにおいても ICME においても、データ処理やシミュレーションのためのツール、データベースを連携させるためのデータ交換が必須であり、データ交換のための共通スキーマ、材料分野の概念とその関係をネットワーク構造として記述し、共通の辞書となるドメイン・オントロジーの研究も MGI 以降活発化している。

筆者らは、計算力学を含む数値シミュレーションとの材料データの入出力や、各所で開発されている異なった構造を持つ材料データ資源の連携のためのデータ交換フォーマットの必要性に早くから着目し、2006-2007年に NEDO 知的基盤創成・利用促進研究開発事業「材料データベースのための共通プラットフォームの研究開発」の採択を得て材料オントロジーに材料データベースの統合利用について研究開発を行った⁹⁾。その後本センターにおいても、リンクト・データなどインターネット上でのデータ共有のための共通基盤となっているセマンティック・ウェブのフレームワークを用いた材料データフォーマットに関わる研究を行っている。2011-2013年には科研費「材料オントロジーの拡張と国際化による材料データ交換手法の確立」も得てオントロジーの拡張に加えて、経験式など数式として表される材料の特性記述に関する研究¹⁰⁾、2014年からは戦略イノベーション創造プログラム・革新的構造材料の中の中心的な課題であるマテリアルズ・インテグレーション(MI)に参画して複数の計算モジュール、データベースの連携のためのデータ・知識構造の研究とプロトタイプ開発を行っている。

筆者らが開発している MI のためのデータ構造を図3に示す。物性値や実験データ、シミュレーションモジュールの入出力データの記述には RDF (Resource Description Framework)や XML Schema を用い、そこに用いる語彙を OWL (Web Ontology Language)によって定義する。これらを XML で記述し、RDF データを検索するためのデータベースサーバである SPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language) Endpoint に格納して検索する。

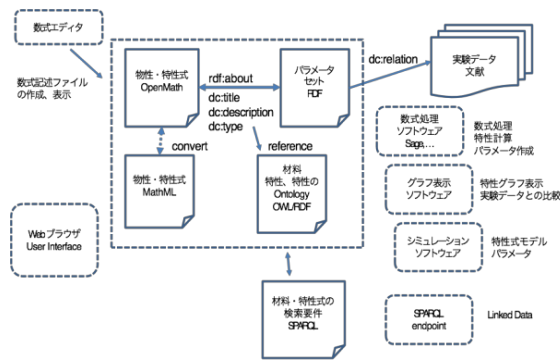


図3 セマンティック・ウェブのフレームワークを用いた MI システムのためのデータ・知識表現

また、構造材料の弾塑性モデルなどマクロな特性については、構成方程式などが従来から多く提案されている。このような数式は Fortran の関数などの形でシステムに組み込まれるのが一般的であったが、このような表現では数式としての意味が失われるため、メンテナンス、数式処理システムの入力への変換、数式としてのレンダリングなどが困難である。ここでは数式の意味内容を計算機処理可能な形式で記述するための規格である OpenMath を用いることで、数式処理システム入力形式への変換、W3C による数式記述のための規格である MathML へ変換することで Web ブラウザでのレンダリングを可能としている。

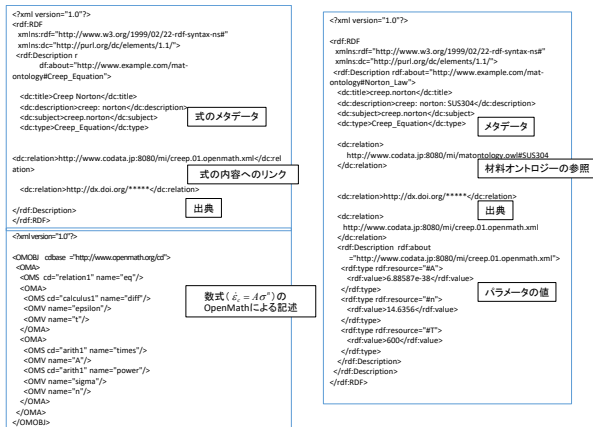


図4 クリープ構成方程式 Norton 則の数式

$\dot{\epsilon}_c = A\sigma^n$ とそのパラメータの OpenMath と RDF による記述

図4には、クリープ挙動の構成方程式の一つである Norton 則について式に関するメタデータ、式、実験データからアセスメントされたパラメータの記述を示す。パラメータは OpenMath による数式とは別に RDF 形式によって保存し、同じ数式に対して異なる実験データセットや文献から導かれたパラメータセットを個別に管理し、SPARQL を用いて検索することができる。

このように材料に関わる異種の情報を共通の基盤を用いて記述し、更に、用いられる語彙を共通の材料オントロジーから選ぶことで、データ資源を連携させ、統一的な検索を行うことが可能である。現在、数式などの連携に必要とされる材料オントロジーの拡張とともに、MI プロジェクトにおいて共通の試料として用いられている鋼材について、機械試験の結果などの RDF 記述を開発し、SPARQL Endpoint の1つである Apache Jena/Fuseki を用いてプロトタイプの日データベースを開発している。これを用いて OpenMath を用いて記述した弾塑性モデル式から計算モジュールへの入力パラメータを算出するなどの実証を行い、MI プロジェクトの統合システム開発グループに対して技術的なフィードバックを行っている。

4. オープンソース有限要素解析ソルバの V&V

4.1 オープンソース CAE の意義

有限要素解析 (FEA) を核とする CAE 技術は、設計・製造をはじめとする技術分野で多大な貢献をしてきている。多くの市販 CAE システム (商用 CAE) では、開発元が提供する手厚いユーザサポートによってある程度のブラックスボックス的利用が可能になっており、設計業務などルーチン的で迅速性を要する業務にあたっては商用 CAE の優位性は続くと思込まれる。

しかし、商用 CAE にはライセンス料の観点から超並列計算や新興国での利用に障壁があること、研究目的などソースコードに触れる必要がある場合などの点で制約がある。近年、各国で開発・実用が進められているオープンソース CAE はこうした点を補うとともに、ユーザ自身が検証に参加することでより幅広い視点からの品質向上が期待されている。数値流体解析の分野におけるオープンソースの代表格 OpenFOAM¹¹⁾はこのようなスキームで成功を収めている。

オープンソース CAE の普及を図る上では精度・妥当性検証をユーザ自身がを行い、ユーザコミュニティでの情報共有が必要になる。概して、オープンソースの利用は商用ソフトウェアよりユーザに対して高度な技術力・知識を求めるため、技術力が高いユーザが企業の垣根を超えたコミュニティで情報共有を図りつつ、所属組織内で

の主な業務には商用 CAE を使用するような図式であれば、相互に利するようになる。

本研究ではこうした事情を踏まえ、商用 CAE に匹敵する豊富な機能とコミュニティを有するオープンソースのフランス製 FEA 統合環境、Salome_Meca（ソルバは Code_Aster）¹²⁾を取り上げ、精度・妥当性検証と結果の公開を進めている。

4.2 固体の有限要素解析における V&V

4.2.1 安価な実験に基づく V&V

固体の FEA に対する V&V は、① 理論解との比較、② 実機計測や実験との比較、③ 異なるソルバ間の解析結果の比較、などの方法で行われる。理論解は線形弾性などの限定的な条件に対して得られており、非線形解析に対しては実験的 V&V が主となる。実験データとしては公開文献を利用する方法も考えられるが、公開データ自体の精度が不明なことも多く、検証項目によっては、自前で実施可能な安価な実験が望ましい。引張試験は固体の変形特性を計測するもっとも基本的な方法で、全国各地の公設試験場で利用貸出しがなされているため、誰でも実施できる安価な実験と言える。

引張試験を題材に Code_Aster (ver. 11.7) を検証した結果¹³⁾を図5に示す。引張試験には塑性による材料非線形性のほか、大変形による幾何学的非線形性が含まれる。このため高精度に解析を行うためには、真応力-真ひずみ曲線を用いた大変形解析が望ましく、本研究の解析でも真応力-真ひずみ曲線を用いた大変形解析によって、図5のように最大荷重を超えた後を含めて試験片の変形挙動を良好に再現できた。

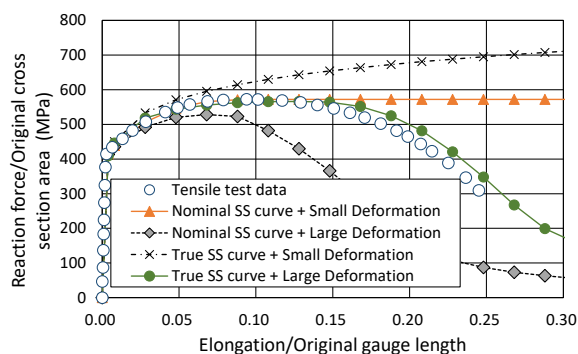


図5 低合金鋼引張試験の再現解析結果と試験データの比較¹³⁾

一方では、理由があって微小変形解析を行う場合がある。塑性やクリープを伴う非弾性変形に関する理論解のほとんどが微小変形を仮定しており、理論解に基づく V&V にあたっては、変形前の寸法を不変と仮定する公

称応力-公称ひずみ曲線を用い、微小変形解析を行う必要がある。図5中にはこの組合せによる解析結果が試験と比較され、最大荷重到達前の挙動が良好に再現されていることがわかる。これらの2つの組合せ以外は試験データと整合しない。弾塑性解析であれば常に真応力-真ひずみ曲線を用いるという訳ではないので注意が必要である。

4.2.2 文献データに基づく V&V

実験の難易度が高い現象を取扱う場合は信頼のおける文献データを参照することになる。実用上の価値が高い熱疲労問題などは、高い熱応力を発生させるためには試験体や装置が大型化、高コスト化するため、誰しも簡単に実験を実施できない。日本原子力研究開発機構が過去に実施した熱疲労試験¹⁴⁾では、図6に示すテーパ付き円筒試験片の内面に対して高温ナトリウムによる加熱・冷却が繰り返し行われ、実際に疲労き裂を発生させた試験に関する貴重な情報が詳細に公開されている。

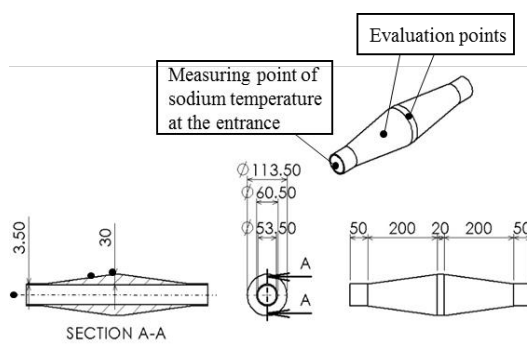


図6 熱疲労試験体の形状・寸法と試験中温度計測点¹⁴⁾

本研究では Code_Aster (ver. 11.7) を用いて非定常熱伝導解析と引き続き弾性熱応力解析を行っている¹⁵⁾。非定常熱伝導解析の結果と、試験における代表点温度の計測結果の比較を図7に示す。

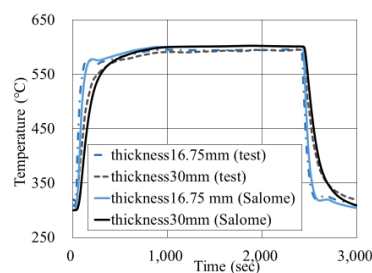


図7 非定常熱伝導解析結果と試験中温度計測データの比較¹⁵⁾

良好な一致が認められる。弾性熱応力解析の結果は、疲労評価に用いる von Mises 相当応力範囲で整理し、試験におけるき裂発生活況のスケッチと比較して図 8 に示す。

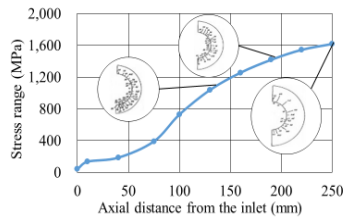


図 8 弾性応力範囲の解析結果と試験終了後き裂発生活況の比較¹⁴⁾¹⁵⁾

応力範囲が大きい厚肉部ほど深いき裂が観察されており、定性的な比較であるものの傾向の一致が読み取れる。

5 まとめと今後の展望

データ信頼性を考慮してシミュレーションに必要な定数を算出するための技術に関しては、実験データから算出したシミュレーション用の定数をベイズ推定を用いて算出した。ベイズ推定を用いることにより、算出したデータの信頼性を評価することができることがあきらかになった。物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形式の開発に関しては、材料に関わる異種の情報を共通の基盤を用いて記述し、更に、用いられる語彙を共通の材料オントロジーから選ぶことで、データ資源を連携させ、統一的な検索を行うことが可能となった。さらにオープンソース CAE を用いた V&V に関しては、FEA ソルバの V&V を行う場合には適切な理論解、実験データを参照する必要がある。オープンソース CAE は、ソースコードが公開されている上、価格の制約が低く、誰しも解析を再現できるため客観性の高い検証ができる見通しがある。今後、典型的な実験検証を商用 CAE とオープンソース CAE とを併用して行い、検証の再現に必要な情報を公開して行くことで計算力学技術の透明性を高め、社会的受容性の向上を図ることができると期待している。

引用文献

- 1) Masahiko Shimamura, Yoshitaka Ezawa, Yoshiaki Tamura, Satoru Takashimizu, Daisuke Satou : High Accurate Analysis by Experiment and Simulation Using Bayesian Inference, *Mechanical Engineering Journal*, **3-4**, 16/27 (2016)
- 2) 寺田賢二郎, 弓削康平, 菊池昇, 均質化法を用いた複合材料の弾塑性解析 (第 1 報 定式化), *日本機械学会論文集 A 編*, **61-590**, 2199/2205 (1995)
- 3) 寺田賢二郎, 菊池昇, 均質化法入門, 丸善出版 (2003).
- 4) 岩田修一編: 小特集「シミュレーションは何処まで実験を補完できるか —仮想実験による物質材料設計の試み」, *シミュレーション*, **19-1**, 2/38 (2000)
- 5) K. Rajan: *Materials Informatics*, *materialstoday*, **8-10**, 38/45 (2005)
- 6) National Research Council: *Integrated Computational Materials Engineering*, The National Academies Press (2008)
- 7) Materials Genome Initiative, <https://www.mgi.gov/> (2017 年 2 月 13 日参照)
- 8) C. P. Sturrok, E. F. Begley and J. G. Kaufman: *MatML, Materials Markup Language Workshop Report*, National Institute of Technology (2001)
- 9) T. Ashino: *Materials Ontology: An Infrastructure for Exchanging Materials Information and Knowledge*, *Data Science Journal*, **9**, 54/61 (2010)
- 10) T. Ashino and Y. Yamashita: *Development of Openmath Content Dictionary for Mathematical Knowledge of Materials Science and Engineering*, *Data Science Journal*, **11**, ASMD17-ASMD21 (2012)
- 11) <http://www.openfoam.com/>. (2016 年 2 月 8 日閲覧)
- 12) <http://code-aster.org/>. (2016 年 2 月 8 日閲覧)
- 13) 藤岡照高, 構造解析ソルバ検証用参照解の整備 (低合金鋼引張試験の Code-Aster による再現), オープン CAE シンポジウム 2015@富山, オープン CAE 学会, 富山市, (2015).
- 14) 石崎公人, 他 3 名, SUS304 鋼の熱疲労試験, PNC-TN9410 89/101, JAEA, (1989).
- 15) 三浦純哉, 藤岡照高, Salome-Meca を用いた熱疲労試験の再現解析, オープン CAE シンポジウム 2016@東京, オープン CAE 学会, 東京, (2016).

階層領域分割型数値解法ライブラリによる大規模並列計算

塩 谷 隆 二

1 はじめに

ポストペタスケールシステムなど次世代の並列計算機アーキテクチャにおいて、大規模な数値計算データ処理を必要とする実アプリケーション・ソフトウェアが高い演算効率を得るためには、マイクロプロセッサやメモリなどハードウェアが持つ階層構造を考慮したプログラミングモデルを採用することが必要である。特に、入力データ生成や可視化などのプレ・ポスト処理から数値解析手法などのソルバー処理に至るまで、全ての処理がスパコン上で行われることを想定する必要がある。そこで本プロジェクトでは、次世代並列計算機上における大規模数値計算データ処理システムに関する基盤技術として、これまで主に数値解析手法向けに研究開発してきた階層型領域分割法(HDDM)の技術を応用した、HDDMによる大規模数値計算データ処理システムの開発を行った。特に、学術研究・産業界で需要が高い有限要素法(FEM)と粒子法による連続体力学のシミュレーションに対象を絞ることで高性能が得られるアプリケーション特化型システムソフトウェア開発を行った。ターゲットとするアプリケーション・ソフトウェアは、著者らがこれまで開発に携わってきている、HDDMによる大規模計算・超並列計算で実績があり、HPCI 戦略プログラムやポスト「京」重点課題でも利用されているオープンソース CAE ソフトウェア ADVENTURE[1]とした。

本研究は、「DDM 入出力ライブラリ」、「DDM ソルバーライブラリ」、「連続体力学向け DSL」、「連続体力学系シミュレータ」の4つの研究項目に分類して研究開発を行った。本研究の成果物であるソフトウェアは、ADVENTURE プロジェクトホームページ内のサブプロジェクトページ[2]にて一般に公開している。

2 DDM 入出力ライブラリ

本研究項目は、領域分割法(DDM)に基づく多階層計算格子データの生成、操作および I/O ライブラリ開発を行うものである。一般的なアプリケーションシステムは、プレ・ソルバー・ポスト処理に分けられるが、これまで是最も高負荷であるソルバー部のみがスパコン上に実装されてきた。ポストペタスケールシステムでは、全ての

処理をスパコン上に実装し、並列化することが当然求められてくる。しかし、従来の枠組みで並列化したのみでは、それに伴い生成される大規模な数値計算データ処理に多くの時間が割かれてしまうことが予想される。そこで、これまでソルバー部の並列化手法として圧倒的な高い並列効率を示してきた階層型領域分割法(HDDM)の技術を応用したデータ処理システムの開発を行った。

2.1 多階層領域分割

演算処理装置や記憶装置の階層構造に適した負荷分散機能として、非構造格子向けの多階層領域分割アルゴリズムを開発した。特に、MPI-OpenMP ハイブリッド並列化、CAD データへの形状適合を伴った4面体・6面体ソリッド要素の1様メッシュ細分割機能(図1)、リスタート機能、「京」やPRIMEHPC FX10 等が持つTofu 向けにネットワークポロジを意識したデータ配分の自動調整アルゴリズムの開発を行った。これにより、「京」の8,196 計算ノードを用いて258 億要素の非構造4面体メッシュ生成にを約94 分で成功するなど、ポストペタスケールシステムで想定される超大規模シミュレーションのプレ処理に有効であることが示された。また、世界トップクラスとなる2,260 億要素(構造解析では0.9 兆自由度)の非構造4面体メッシュ生成に名大FX100 の128 ノードを16 時間用いることで成功した。これらの成果は、多階層領域分割ソフトウェア ADVENTURE_Metis2 として整備した。

また、粒子法向け階層型領域分割アルゴリズムを開発した。特に、粒子法シミュレーションにおけるMPI-OpenMP ハイブリッド並列計算向けのバケットベース2階層領域分割、分散メモリ並列計算向けのHalo 通信パターン生成を開発した。本アルゴリズムを粒子法向け連続体力学系シミュレータに組み込んだ結果、東大FX10 において理想的な解析条件の下で12 ノードから4,800 ノードまでのストロングスケーリング93%、ウィークスケーリング99%の並列化効率を達成できた。これらの成果は、分散メモリ並列向け陽的 MPS 法ソルバーライブラリ LexADV_EMPS として整備した。

2.2 DDM 圧縮技術

非構造格子向け DDM 圧縮技術の開発を行った。

シミュレーション 第〇〇巻第〇〇号

DDM 圧縮は、DDM における部分領域の境界上情報のみをファイル出力する対象とするものである(図 2)。復元は部分領域ごとの境界値問題を有限要素解析することによって行う。一般的な CG 法の演算量 ($O(n^3+n^2)$) を基準に試算を行った結果、全体剛性行列を解く計算量と領域ごとの小さな剛性行列を解く計算量の比が極めて大きくなり、例えば 100 億自由度有限要素解析モデルの計算量の比は 1010 以上の計算量比が生じることから、袖領域の変位量をもとに内部の変位、ひずみ、応力を再度計算することは現実的であることが分かった。

また、新たに多階層精度圧縮数値記録技術(JHPCN-DF)に基づくデータ圧縮ライブラリを開発した[3]。JHPCN-DFは、汎用の圧縮アルゴリズムでは圧縮しづらい科学技術計算の浮動小数点数データに対し、下位ビットをゼロパディングし、ハフマン符号化などの圧縮効率を高める技術である。ゼロパディングは指定する許容誤差内で行い、許容誤差は可視化や分析など目的にあわせて指定する。図 3 に、1 億自由度規模構造解析結果について、圧縮無し(RAW データ)、許容誤差 ε を 10-1 と 10-3 の値で圧縮したデータの可視化の様子を示す。 $\varepsilon=10-3$ のケースでは RAW データとの差異が見られないためこれにより、1 億自由度規模構造解析データを可視化や分析に有用な情報を保持したままでデータ量を 1/3 以下に圧縮することに成功し(図 3)し、ポスト京時代におけるデータ保存に有効な技術であることが示された。JHPCN-DF に基づいた粒子データ圧縮ライブラリも開発し、大規模解析において約 5 割の圧縮率を得ることに成功した。これらの成果は、有限要素解析ソフトウェア AdvSolid や粒子法シミュレーションソフトウェア LexADV_EMPS に組み込んだ。

3 DDM ソルバーライブラリ

本研究項目は、DDM に基づく連続体力学向け線形代数ソルバーの分散メモリ並列ライブラリ開発を行うものである。一般的な線形代数ソルバーは、アセンブリされた連立一次方程式を入力とするため、FEM におけるメッシュ情報など本来解析手法が持つ特徴を利用せずに実装されてきた。それらは共有メモリ環境及びその中で解くことができる解析規模では問題となりにくいが、ポストペタスケールシステムで対象とする解析規模では入力データから解析手法まで含めた分散メモリ環境向け並列化技術が必要となることが予想される。そこで、DDM による多階層型データ構造を活用した、大規模な線形代数ソルバーの分散メモリ環境に適したライブラリを開発を行った[4]。

3.1 DDM 反復法

有限要素法向けに、多階層領域分割情報を利用した DDM 反復ライブラリを開発を行った。DDM の静的縮約によって得られる Schur 補元方程式を反復法で解くアルゴリズムとなっており、反復法としては実対称向けに共役勾配(CG)法、共役残差(CR)法、準最小残差(QMR)法、最小残差(MINRES)法、複素対称向けに共役直交共役勾配(COCG)法、共役直交共役残差(COCR)法、対称版 QMR(QMR_SYM)法を実装した。さらに、複素対称向けには MINRES-like_CS 法を新たに開発した。また、MPI-OpenMP ハイブリッド処理に適した 2 階層領域分割に基づく実装、線形代数演算のアプリケーション特化型最適化として節点自由度数に応じた手動ループ展開や SIMD 向け最適化を行った。さらに、メモリアクセラ化などに伴う B/F 値低下に対応するため、DDM 反復法の部分領域問題ソルバーとして Eisenstat 技法に基づく CG 法+SSOR 前処理を実装した。これにより、「京」の 8,196 計算ノードを用いて 1,040 億自由度規模有限要素解析(古代建築物パルテノンモデルの自重解析)に 81.8 時間で成功した(図 4)。本手法は、「京」で強スケーリング性能として 85%以上の高い並列効率を示しており(図 5)、ポストペタスケールシステムでは 1 千億自由度超の超大規模有限要素解析を実用化できる可能性が示された。

3.2 多階層前処理技術

多階層前処理技術として、有限要素法向け BDD 法の開発を行った。既に実績がある構造解析向け BDD 法については超並列計算環境向け実装技術の開発を行い、「京」の 256 計算ノードで弱スケーリング 89%、強スケーリング 92%の並列効率が得られた。また、世界トップレベルの 112 億自由度有限要素解析への BDD 法適用実験を行い、53 反復(収束判定値は相対残差が 3 桁小さくなった時点)で収束解を得ることに成功した。

また、異種材料混在モデルにおける BDD 法の収束性を改善するために、DDM 反復法に対する簡易対角スケーリング処理法の新解釈を提案した。それに基づき、Scaled-BDD 法を新たに開発し、ヤング率の比が 100 倍以上となる複数部材で構成された構造物のシミュレーションにおいて、オリジナルの BDD 法に比べて反復回数・計算時間を 1/2 以下にすることに成功した(図 6)[5]。

3.3 DDM 数値解析技術

有限要素法向けに DDM 数値解析技術として、ヘテロジニアスコンピューティング向け負荷分散アルゴリズムの開発を行った。CPU と GPU のヘテロジニアス環境において、計算ノードに割り当てられた部分領域群を OpenMP の動的スケジューリング機能を用いて CPU コ

アや GPU に動的負荷分散を行う機能を開発した。また、DDM 反復法の主要な演算を含むミニコードを開発し、DDM 反復法の実装最適化に向けた研究開発環境として利用可能とした。さらに、領域分割メッシュ並びに関連する疎行列データのデータベース構築ソフトウェアを開発し、構造・熱の DDM 行列データベースを構築した。これら DDM のミニコードと DDM 行列データベースを用いて性能評価を行った。これより、CPU と GPU では最適な領域分割数が異なることが分かり、CPU-GPU ヘテロ計算によって領域分割数に対してロバストな性能を得ることに成功した(図 7)。また、メニーコアを用いて、領域分割数によって適切な並列化方法が異なることが分かった(図 8)。これらは、ベンチマークテストとして整備しており、新しい計算機アーキテクチャに適用する際に、性能評価試験を低コストに実施可能となった。

MPS 陽解法(粒子法)向け数値解析技術としては、東京大学 FX10 の 4,800 計算ノード上において 200 億粒子のベンチマーク計算に成功した。並列性能では、25 億粒子の 60 計算ノードから 4,800 計算ノードのストロングスケールで 99.33 %を達成した。実証例題として、石巻市街地に津波が侵入して、直径 9 m の 2 つのタンクが地上構造物に衝突しながら漂流する解析に成功した。本解析は、東京大学 FX10 の 600 計算ノードや九州大学 CX400 の 32 計算ノードを用いた最大 3.8 億粒子の解析である。「京」を用いて、RIST の協力により LexADV_EMPS のノード内とノード間のチューニングを行った。ノード内のチューニングでは、キャッシュスラッシングが低い確率ではあるが発生することが判明したため、データを格納している配列をマージしたりパディングしたりすることで、キャッシュスラッシングが発生する確率を大幅に低下させることに成功した。ノード間のチューニングでは、隣接間通信にノンブロッキング型の 1 対 1 通信 Isend-Irecv を用いると 24,576 ノード以上では"Unexpected Message"が多発してメモリを消費しすぎてデッドロックが発生する問題があったが、集団通信 Alltoallv を用いることで回避できることが分かり、72,000 ノードまでの高並列計算が可能となった。さらに、粒子探索の高効率化として、バケット内でソートした粒子を配列に格納する方法を開発し、一般的なリンクリストを用いる場合と比べて、キャッシュ再利用が改善し、高速化に成功した。また、粒子型解法の基礎となる近似作用素に関して、数学的な打ち切り誤差評価や、より高精度な近似手法の提案を行った。

4 連続体力学向け DSL

本研究項目は、連続体力学向け DSL の開発と、それに

対応した多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生成の開発を行うものである。ポストペタスケールシステムのアーキテクチャでは、計算ノード間の並列性だけでなく計算ノード内での効率も重視される。各計算ノードはメニーコアや GPU、SIMD 拡張命令といった多種多様なアクセラレータを有し、これらを有効利用することが望まれる。従来のプログラミング言語やコンパイラ最適化技術での対応は不十分であり、現状ではそれぞれのアクセラレータごとに人手で最適化された個別の実装が必要とされている。一方、数値シミュレーションコードの場合、特に連続体力学分野においては、そのアプリケーションロジックは物理現象や数値解析スキームであり、これは数学表現、特に行列やテンソルで表記されることが多い。よって、連続体物理モデルを DSL 化して、数学記述(例えば、行列、テンソルの式を `tex` 形式で記述)から各アクセラレータタイプ向けに最適化されたライブラリを `call` するコードを生成するコードジェネレータあるいはトランスレータアプローチが有効であると考えられ、これを実現するシステムの開発を行った。

4.1 DSL 基本機能

連続体力学向け DSL である LexADV_AutoMT、およびその C 言語および Fortran へのトランスレータ開発を行った。DSL の文法構造としては、基本的に科学技術分野、特に数学分野で広く使われている TeX/LaTeX を参考とした。本研究が主な対象とする連続体力学分野、特に非線形固体・構造力学分野においては、その物理現象や材料構成則を記述するために、テンソルあるいは行列・ベクトル演算に基づく数式が多用されている。特にテンソル演算として、連続体力学分野への応用を念頭に、3 次元空間におけるスカラー、ベクトル、2 階テンソルおよび 4 階テンソルに関する加減算および積演算などの各種演算子群に対応させる必要がある。ここではまず、こういった数式を記述可能な LaTeX のサブセットを設定し、またコード生成に必要な変数の型情報など補助的なデータをアノテーションとして追加する構造を採用した。なお言語仕様や文法などの詳細については、開発初期段階から研究グループ外の β テスターを獲得し、グループ内外のユーザーからのフィードバック情報を元にさまざまな検討を行った。

DSL としての AutoMT をユーザーが利用する際には、前述の LaTeX サブセットのコードがコメントとして C または Fortran のソースコード内に挿入される形式をとる。そして、トランスレータによってそのコメント部分が、対応する C あるいは Fortran のコードに置き換えられる。このとき自動生成されるコード内において、同名のテンソルおよび小規模行列・ベクトル演算向けライブ

ラリ AutoMT が備える各種ライブラリ関数がコールされる。さらに、ライブラリ実装内部について、各種 HPC プラットフォームごとに、特に CPU ベンダーごとの特殊命令や GPU、メニーコア等アクセラレータ向けに最適化することが可能である。DSL 利用の流れを図 9 に示す。

4.2 アクセラレータ対応コード自動生成

前述のように連続体力学分野向け DSL, LexADV_AutoMT では、その低レベル層に行列・テンソル演算向けライブラリ（同名の AutoMT）を配置している。この LaTeX をベースとする DSL は前記のトランスレータにより C や Fortran コードに変換されるが、このときトランスレータにより自動生成されたコード部分は主にこの AutoMT ライブラリ関数・サブルーチンをコールする。よって、ここの部分を各種 HPC プラットフォームや特にアクセラレータ向けに最適化することで、結果としてユーザープログラムが高速に動作することになる。ここでは、アクセラレータ対応コード自動生成として、近年のスカラ CPU の多くが装備する SIMD 命令セットおよび GPU 向けに性能最適化された AutoMT ライブラリ的高速バージョンを開発した。Intel および富士通 CPU のマルチコア及び SIMD 命令セット向け実装、CUDA による GPU 向け実装、メニーコア Xeon Phi 向け実装などを行った。

これらの実装に関して特に、主要な各種 HPC プラットフォームにおけるベンチマークテストを通して、SIMD 機構を用いたコードはこれに対応しないコードに比べ実効性能で数倍程度の違いを有することがわかったため、SIMD 命令および GPU 向け最適化として SIMD 機構に対応する AutoMT ライブラリ実装を用意した。これは、あるテンソル式または小規模な行列・ベクトル式に対し、コンパイラによるベクトル化や GPU のスレッドを介し、同時に複数のデータを作用させるものである。通常これは連続体力学ベースの数値解析コードにおいて、複数の要素やセル、粒子データなどについて同じ一連の数式群を評価していくことに対応する。例えば、有限要素解析においてそのモデルデータは大量の有限要素から構成されるが、これら要素単位の演算は *element-by-element* (EBE) 演算と呼ばれる。シミュレーションプログラムの EBE 演算を行うコード部分のループ構成に関して、必ず要素ごとループをある多重ループの最内側に配置するようにしておく。その最内側ループボディにおいて、テンソルや小規模行列演算ごとに AutoMT ライブラリコールがなされる。このとき、これらのライブラリコールが実際にはプリプロセッサマクロで実装されている、あるいはコンパイラによって確実にインライン展開されることが保障されることにより、最終的にこの要素ループに

関してコンパイラを通したベクトル化がなされることになる。さらに、こういった最適コードが共通に有する特徴やパターンをまとめ、これをハイパフォーマンス・デザインパターンとして提案した。ハイパフォーマンス・デザインパターンでは、まずテンソルや小規模行列、ベクトルなどの数値計算分野向け抽象データ型について、それぞれの変数を 1 つの配列や構造体ではなく、複数のスカラ変数の束として表現する。また、抽象データ型が備える各種演算・操作について、これら関数やサブルーチンの代わりにプリプロセッサマクロで実装する。このとき、C プリプロセッサマクロのシンボル連結演算子 `##` を利用している。

これらの成果をまとめ、行列およびテンソル演算ライブラリ LexADV_AutoMT として整備した。開発ライブラリを用いた有限要素解析で現れる特徴的な計算パターンに対する、計算機の対ピーク性能値の評価結果を表 1 に示す。当ライブラリを用いないオリジナルコードと当ライブラリを用いたチューニングコードの対ピーク性能値をそれぞれ示している。いずれのケースでも高い性能向上が得られていることがわかる。

5 連続体力学系シミュレータ

本研究項目は、2 章から 4 章で開発された基盤技術の性能評価を行うために、連続体力学系シミュレータの開発 [6-10] を行うものである。

5.1 シミュレータ実装

DDM 反復法ライブラリの応用例として、構造 FEM ソフトウェア AdvSolid への組み込みを行った。「京」、名大 FX10・FX100、名大 CX400、名大 UV 2000、Xeon Phi マシン、GPU マシンなど様々なアーキテクチャにおいて性能評価を行った。特に、メニーコア環境においてスレッド並列効率が低下する傾向が観察され、DDM アルゴリズム見直しについて DDM 反復法ライブラリ開発側にフィードバックした。また、電磁場解析を重要アプリケーションの 1 つと位置づけ、計画を一部前倒しして、電磁場シミュレータの実装を行った。また、実証問題例である数値人体モデルによる医療向け電磁場解析において、メッシュ形状が解析精度に与える影響について調査し、その結果を DDM 入出力ライブラリ側へフィードバックした。さらに、移動体を含む対象の並列計算を効率的に行うため、階層型領域分割法をベースに新たなアルゴリズムを開発した。移動体を含む対象の解析ではタイムステップごとに移動体の位置が変化し、移動体とそれ以外の固定部との間でメッシュの接続関係が変化する。そのため固定部と移動体の接合部が 1 タイムステップ分ずれ

でも要素面が一致するようにメッシュを生成することでこれに対応するといったことが広く行われている。本研究でもこの手法を踏襲するとともに、領域分割後の小領域表面に接合部の自由度が位置するよう固定部と移動体のメッシュを個別に領域分割することとした。個別に領域分割することで小領域表面に位置した接合部の自由度を part 間で共有されるインターフェース自由度として扱うことで、移動体の移動に伴うメッシュの接続関係の変化は、固定部側の part と移動体側の part の通信関係の変化へと置き換えられる。これにより、時間発展とともに変化する接合部の通信テーブルを事前に用意し、それぞれの時間ステップで使用する通信テーブルを替えることで効率的な手法を構築できた。この手法の利点は、時間ステップごとに異なる通信テーブルを使用する以外には従来の階層型領域分割法とアルゴリズムとして差異がないことである。そのため実装が非常に簡便であるとともに、これまで階層型領域分割法で積み上げられてきた効率化・高速化の成果がそのまま適用できる。さらに階層型領域分割法が適用できればこの手法も適用可能であり、高い汎用性を有する手法となっている。

粒子法向けライブラリは実問題解析に適用可能かが重要な評価指針であるため、当初計画を前倒しして、開発中の粒子法向けライブラリを用いたシミュレータ実装並び評価を並行して実施することとした。粒子法向けライブラリでは、関数ポインタを用いて利用者が粒子の物理量計算の関数を定義することができるので、解きたい物理モデルを自由に組み込むことができる仕様となっている。粒子の動的負荷分散機能や大規模流体剛体連成解析機能の実装を行った。これにより、多数の浮遊物(剛体)が津波で流される様子を計算することが可能となった(図 10)。また、直ぐに社会に役立つアプリケーションの構築を目指すために、3 段階の津波計算を行える機能を開発した。第 1 の解析では震源で発生する波源から沿岸部までの津波伝播計算(数十～数百キロ四方位度)、第 2 の解析では沿岸部に押し寄せた津波が地上へ遡上する解析(数 km～10km 四方位度)、第 3 の解析では、市街地に浮遊物が衝突しながら浮遊する市街地浸水解析(500m 四方位度)である。この 3 段階の津波解析機能により、従来からある波源から沿岸部までの津波伝播計算を利用して津波の市街地解析を行うことが可能となった。

5.2 シミュレータ評価

有限要素法によるシミュレータとして、構造 FEM ソフトウェア AdvSolid に DDM 反復法ライブラリを組み込み、400 万自由度から 1,134 億自由度規模までのサイズの問題に対し、「京」の 12 ノードから 24,578 ノードを用いて、強スケーリングと弱スケーリングによる並列効率評

価を行った。両指標において高い並列効率が示されたが、2 万ノード規模では効率の低下がみられ、ポストペタスケールシステムに向けての課題を見つけることができた。また、電磁場 FEM ソフトウェア AdvMagnetic にライブラリを組み込んだ。時間調和渦電流問題において反復解法の収束性を大幅に改善し、東京大学 FX10 の 720 ノードで 35 億自由度の渦電流解析精度検証問題を 9 時間弱で求解することに成功した。また、移動体を含む対象の階層型領域分割法による並列計算手法を回転機の電磁界解析に適用し、FX10 上でストロングスケーリング評価を行った。6 ノードから最大 384 ノードまで使用し、96 ノードまで並列化効率 90%以上という良好な結果を得た。96 ノードを超えるとノードあたりの割り当て演算量が著しく低下するため並列化効率が低下するが、それでも 384 ノードで 60%程度であった。また、従来の有限要素法による逐次計算で 1 ヶ月以上かかっていた計算が、48 ノードで 8.39 時間、384 ノードで 1.60 時間と、大幅な高速化を達成した。さらに、高周波電磁波問題において境界平滑化による計算精度の向上に取り組み、2 億自由度の人体モデルにおいて電界の精度を大幅に向上させることに成功した(図 11)。

さらに、開発ライブラリを用いた粒子法シミュレーションソフトウェアの評価を行った。評価環境として「京」、東京大学 FX10、東京工業大学 TSUBAME2.5 (GPU)、名古屋大学 FX100、名古屋大学 CX400 (MIC) を主な開発計算機としてそれぞれのソルバーの性能向上をおこなった。東大 T2K では、64 計算ノード 1,800 万粒子から 1,024 計算ノード 2.6 億粒子へのウィークスケーリング性能評価で 94%の並列効率が得られ、6,900 万粒子の 64 計算ノードから 1,024 計算ノードの強スケーリング性能評価において 93%の並列効率が得られた。10 億粒子モデルを用いて、「京」の 48 ノードから 12,288 ノードのスピードアップ値 225.8 (理想値 256) を達成することができた。FX100 では、12 ノードから 864 ノードのスピードアップ値 65 (理想値 72) を達成することができた。LexADV_EMPS を用いて、3 段階の津波解析をシステム化した。その結果、福島第一原子力発電所 1 号機タービン建屋内浸水解析と気仙沼での第 18 共徳丸の遡上解析を行うことができた。昨年度までは 1 ヶ月程度掛かっていた解析を、「京」を用いることで 3 日程度に短縮することができた。観測データ等を用いて津波遡上シミュレーション結果の妥当性確認を行い、十分な精度で現象を再現できていることが示された(図 12)。

6 おわりに

ポストペタスケールシステムにおける超大規模な連続

体力学系シミュレーションを実用化するために、1兆自由度メッシュを並列生成可能な AdvMetis2, FEM や粒子法シミュレーションに対して 10 万×10 万ピクセルの超高精細な First Detail Image を描画可能な LexADV_VSCG, 1 千億自由度 FEM 解析に成功した LexADV_IsDDM, 数億粒子の分散メモリ並列計算を可能にする LexADV_EMPS, LaTeX 記述のテンソル表記構成式から高性能なコードを生成する連続体力学向け DSL を含んだ LexADV_AutoMT など、多くのソフトウェアを開発・公開することに成功した。これらのソフトウェアは、HPCI 戦略プログラムでの利用からポスト京重点課題での採用と、ペタスケールからポストペタスケールへの橋渡しを行っているシステムソフトウェアとしてその意義は大きいと言える。本研究では有限要素法と粒子法に特化して開発したが、得られた成果は連続体力学向けの他の数値解析方法にも応用できるものであり、計算科学全般での活用が期待できるものである。また、開発ソフトウェアを用いて実施した津波遡上・浸水シミュレーション結果の妥当性確認や写実的描画は、水害の予測や被害の低減のために有用であることを示しており、安全・安心社会基盤構築に貢献するものと言える。今後は、本研究成果を元に採択されプロジェクトを通じてポストペタスケールシステムへの展開を進めていくとともに、ポストペタ後も見据えた研究へと発展させていく予定である。

謝辞：本研究の一部は JST-CREST の研究課題「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」および「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業（平成 24 年度～平成 28 年度）」による。あらためてここに記し、謝意を表す。

引用文献

- 1) ADVENTURE システム：
<http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/>
- 2) LexADV システム：
<http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/lexadv/>
- 3) Lijun Liu, Masao Ogino : Performance evaluation of efficient data compression JHPCN-DF for large-scale structural analysis, Mechanical Engineering Letters, Vol.2, p.16-00119 (2016)
- 4) 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 山田知典, 吉村忍：領域分割法におけるローカル Schur 補元アプローチの性能評価, Transaction of JSCEs, Vol.2016, 20160006 (2016)
- 5) 荻野正雄：対角スケーリング前処理を伴ったバランシング領域分割法による複数材料モデルの有限要素解析, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.833, p.15-00325 (2016)
- 6) Y. Wada, K. Murotani, M. Ogino, H. Kawai, R. Shioya : High resolution visualization library for exa-scale supercomputer, Mathe. Prog. Expressive Image Synth. III, Springer, 83/94 (2016)
- 7) Y. Imoto and D. Tagami : A truncation error estimate of the interpolant of a particle method based on the Voronoi decomposition, JSIAM Letters, 8, 29/32 (2016)
- 8) Masao Ogino, Hongjie Zheng, Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, Ryuji Shioya, Liu Lijun : Tsunami Run-Up and Inundation Simulations Using LexADV_EMPS Solver Framework on Fujitsu FX100, SC16 Research Poster (Peer-reviewed International Conference) (2016)
- 9) 室谷浩平, 玉井佑, 越塚誠一：流体シミュレーションにおける粒子法：MPS 法と LSMPS 法の数値解析精度の比較, 応用数理 26, 50/61 (2016)
- 10) Amane Takei, Kohei Murotani, Shin-ichiro Sugimoto, Masao Ogino, and Hiroshi Kawai : High-accuracy electromagnetic field simulation using numerical human body models, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.52, No.3 (2016).

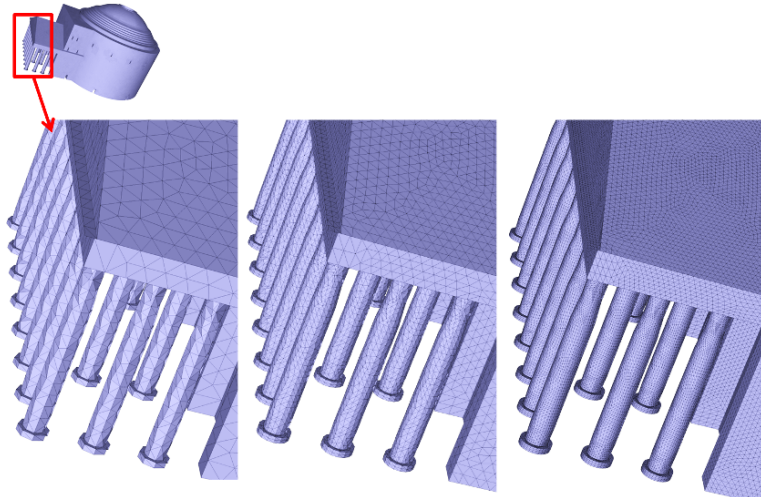


図1 CADデータへの形状適合を伴った細分割による超大規模メッシュの並列生成

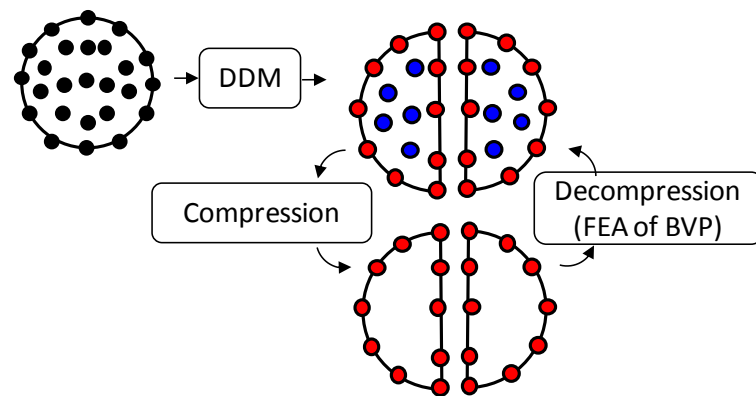


図2 領域内部自由度削除によるDDM圧縮

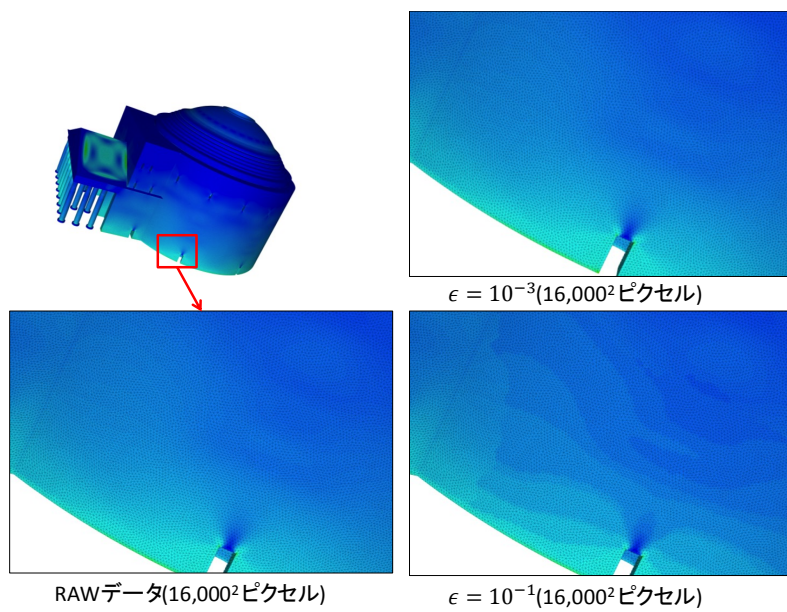


図3 JHPCN-DFの許容誤差が可視化結果に与える影響

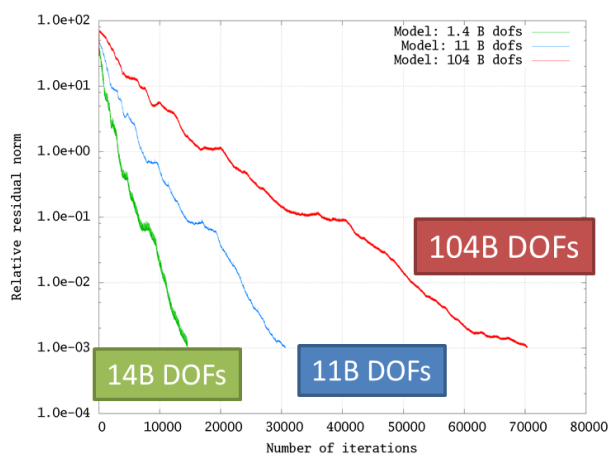


図4 1,000 億自由度有限要素解析における反復法の収束履歴

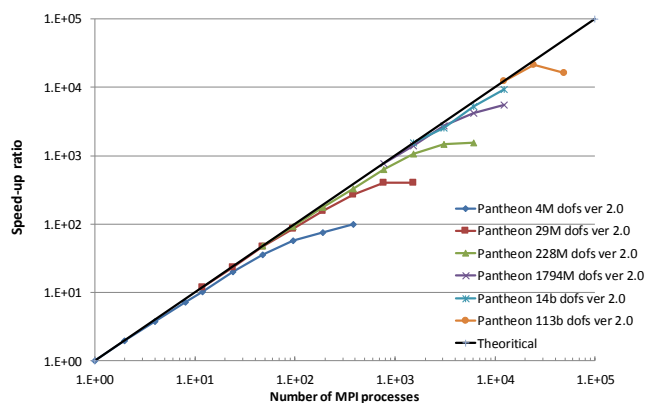


図51 DDM 反復法の京における強スケーリング

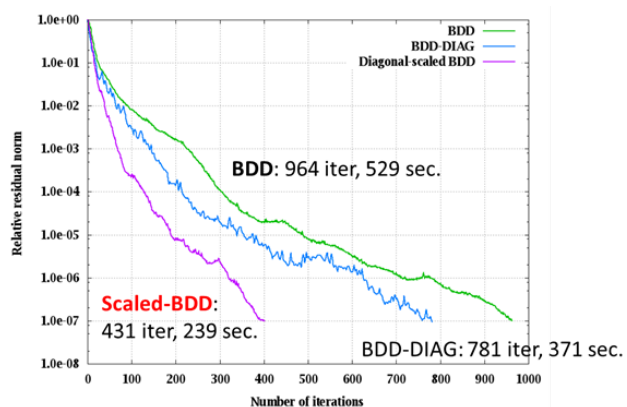


図6 Scaled-BDD 法を用いた複数材料モデル($E_{\max}/E_{\min} > 10^2$)における収束性改善

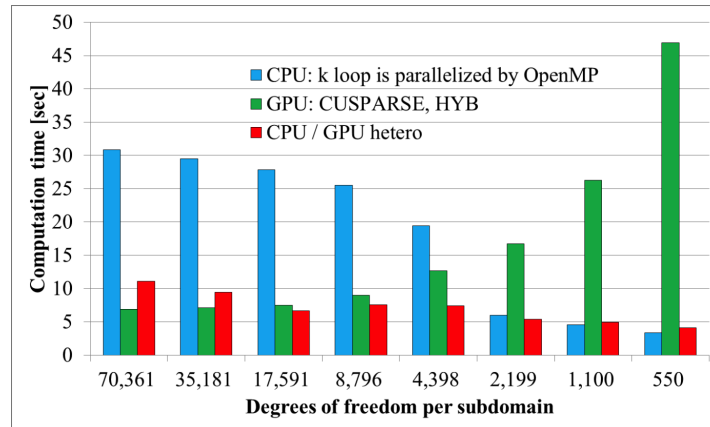


図7 CPU(Core i7-2700K)とGPU(GeForce GTX 980)併用における DDM 性能評価

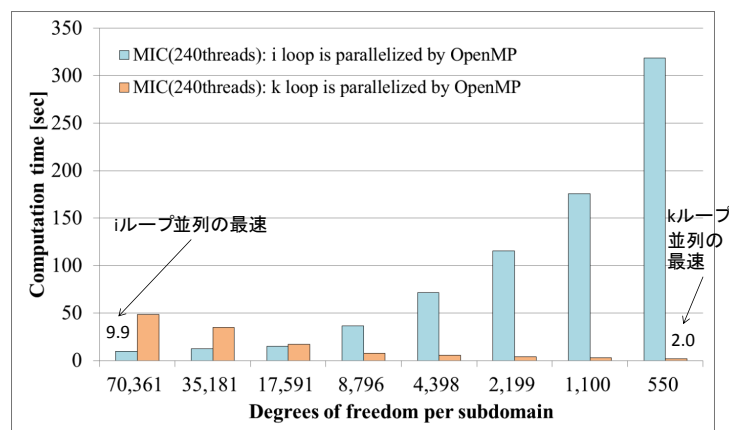


図8 メニーコア(Xeon Phi 5110P)における DDM 性能評価

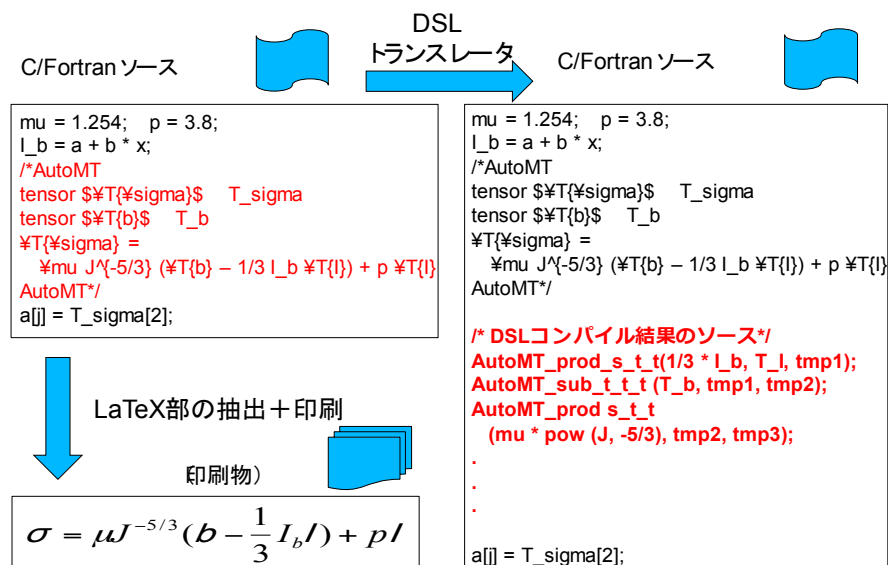


図9 連続体力学向け DSL 利用の流れ

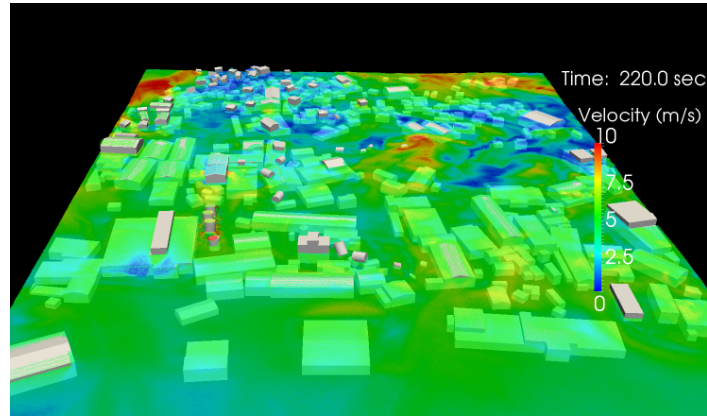


図 10 LexADV_EMPS を用いた多数の剛体を含む計算の様子

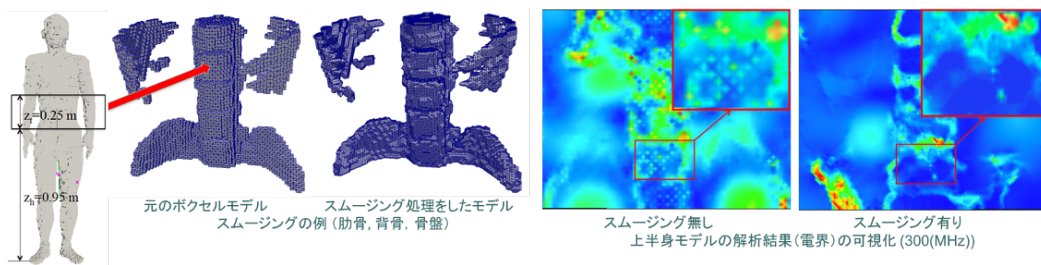


図 11 AdvMetis2 と AdvMagneticHF による高精度な温熱療法シミュレーション

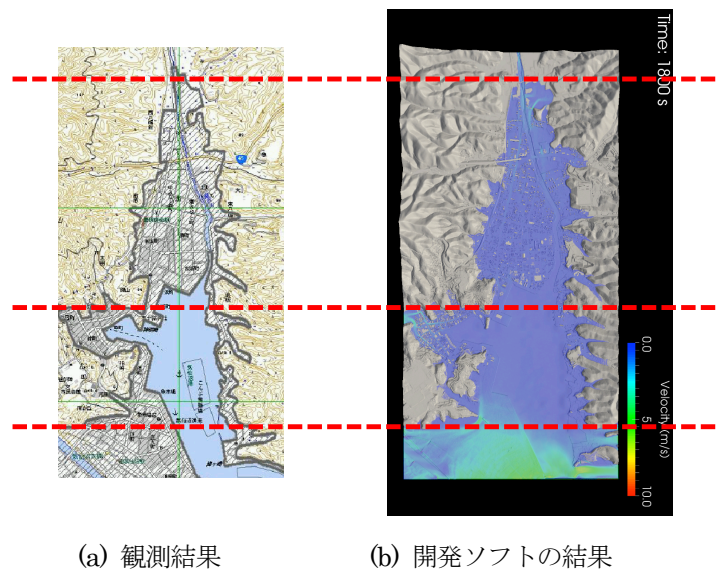


図 12 LexADV_EMPS を用いた津波遡上解析結果の妥当性確認

表 1 有限要素解析向けベンチマーク結果

計算機 コンパイラ	Intel x86 (Sandy Bridge) + Intel コンパイラ		Fujitsu SPARC64 IXfx + 富士通コンパイラ	
コード	オリジナル	チューニング	オリジナル	チューニング
構造解析・要素剛性	21 %	70 %	8 %	44 %
非線形材料構成則	16 %	31 %	6 %	40 %
熱伝導解析・要素剛性	24 %	50 %	12 %	38 %

大規模流体構造連成問題の可視化検証

田 村 善 昭

1 はじめに

コンピュータグラフィックス(CG)を用いた可視化は、計算力学においてはその当初から重要な要素であり、例えば1963年にはE. E. Zajacが人工衛星の運動を可視化する動画を作成している¹⁾ように、解析結果の数値では分からなくても、映像化することでその理解が進むことはよく知られている。計算機が進歩し、解析規模が大きくなると、一段と可視化の重要性は増してくる。かつては、研究者がそれぞれで書いたグラフィックスのプログラムを用いたりしていた¹⁾が、今日では、使い勝手にも優れ、機能豊富な市販ソフトウェアや無償ソフトウェアが多く流通している。しかし、それらの多くは例えば流体解析や構造解析などに特化したものであり(逆にそのために使い勝手が良い)、本稿で扱おうとしている流体—構造連成解析に対応するものは余りない。そこで、ここでは流体—構造連成解析の結果を可視化表示するシステムを新たに開発する。さらに、解析の妥当性を視覚的に検討するため、対応する実験結果を同時に表示する。解析も実験も表示すると、映像が煩雑になり、逆に理解をしづらくする可能性がある。ここでは立体視、特にバーチャルリアリティ(VR)の装置を用いることを考える。VRを用いた可視化は過去にいくつか例がある^{3), 4)}が、実験との比較や妥当性の検証のためには用いられてきていない。以下の章では、東洋大学計算力学研究センター(以下、本センター)で開発した流体—構造連成実験・解析同時可視化システムの詳細とその利用例を紹介するとともに、今後の展望についても簡単に触れておきたい。

2 流体—構造連成実験・解析同時可視化システム

2.1 VRの必要性

本題に入る前に、まずVRがなぜ必要かについて述べておきたい。先に挙げた^{3), 4)}ように、VRを用いた可視化はいくつか例があり、それぞれ効果があると結論づけているが、一般的には「VRでなくともよい」「立体視をする必要はない」と考えられていることが多いと思われる。

理論上、3次元のものは3次元で見るべきであり、立体的に見えればそれに越したことはないのだが、一方で、見る側の理解力にも限界があり、同時に多くのものを提示されても結局はその一部しか注目しないので、そうであれば3次元的に見る必要はない、コンピュータの画面(モニタ)で十分、という結論になっているのではないかとというのが著者の現在の理解である。それでは、なぜここであえてVRを利用するのかには、いくつか理由がある。ここでは実験の画像(動画)と可視化結果を同時に動かして比較したいのだが、2つを横に並べただけでは、その微妙な違いは分かりづらい。そこで、ここでは両者の位置を合わせ、重ねて表示する。これをモニタで行ったのではあきらかに見づらいが、立体視をすると、位置が重なっていても両者は区別できると考える。さらに、単なる立体視ではなく、VRであると、観察者が位置を移動することで、自由な角度から観察できるため、より分かり易くなるはずである。もう1つの理由は、VRでは可視化したいモノを目の前に適当な大きさで表示できることである。モニタでは映像の大きさはモニタの大きさによるが、VRでは自分が見たい、あるいは実際にそうであるような大きさに見せることが可能である。これは見逃されがちであるが、ヒトが現象を理解するには重要であると考え。図1は著者が以前に作成した傾斜型1面大型スクリーンによるVR装置による可視化の例⁵⁾であるが、スクリーンに映っている機体が、観察者に

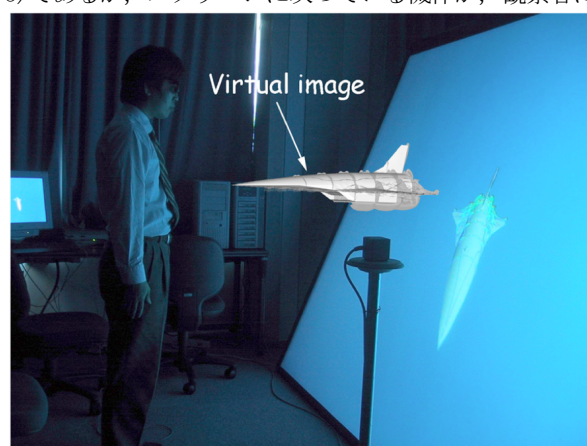


図1 傾斜型1面大型スクリーンVR装置(CANVAS)による可視化例。観察者からは図のように機体が飛び出して見えている。

1 良く知られたものとして、NASA エイムス研究所のPLOT3D[®]がある。

は図のように眼前にあるかのごとく見えている（もちろん図1はイメージ図であるが）。以上の考察から、流体一構造連成実験・解析同時可視化システムはVRを用いるのがよいと考え、システム開発を行った。

2.2 VR装置について

ここでは、VR装置として、没入型ディスプレイ（Immersive Projection Technology; IPT）に分類される装置を用いている。IPTは大型のスクリーンで視野を覆い、その前に立つ観察者の視点位置をなんらかの方法で計測し、その視点位置に応じた立体映像をスクリーンに投影する仕組みを指す。後で述べるゴーグル型ディスプレイ（Head Mounted Display; HMD）とは異なり、3D映画を見るときのような立体眼鏡をかける。本センターでは、クリスティ・デジタル社製のIPT型VR装置HoloStage®-Mini⁶⁾（以下、HoloStage）を所有しており、これを使用する。HoloStageを図2に、HoloStageで用いるコントローラと立体眼鏡を図3に示す。



図2 HoloStage®-Miniの全景



図3 HoloStage®-Miniで用いるコントローラと立体眼鏡。グレーのボールは位置と向きを赤外線カメラで計測するためのマーカである。

立体視は時分割方式を用いている。これは、立体眼鏡が

液晶シャッターになっており、右目、左目それぞれに対応する映像が交互に（例えば1秒間に60回ずつなど）表示されるのに同期して、反対のレンズを閉じる仕組みである。また、視点位置は眼鏡に付けられた4つのマーカを、HoloStage上部に付けられた4つの赤外線カメラで撮影し、リアルタイムにその位置と向きを計測するようになっている。図2から分かるように、スクリーンは正面と床面の2面で、正面は背面投影となっている。床面は上から直接投影するので、観察者の影になるところは映像が映らないことになるが、実際には気にならない程度である。

2.3 システム構成

HoloStageを用いた流体一構造連成実験・解析同時可視化システムの構成を図4に示す。

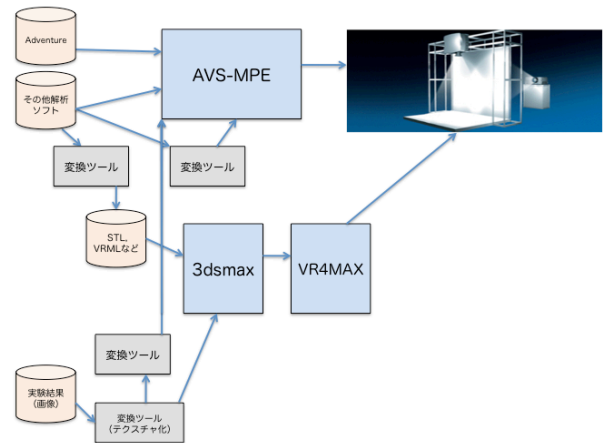


図4 流体一構造連成実験・解析同時可視化システム構成図

現状では、本センターにおいて、HoloStageにVR映像を表示するソフトウェアは、AVS/Express MPE⁷⁾（以下AVS-MPE）とVR4MAX⁸⁾の2種類であり、これに各種データを渡すシステムを構築している。現在、主な経路の1つはAVS-MPEを経由するもので、本センターの研究者が多く使用するADVENTUREシステム⁹⁾のデータはそのままAVS-MPEに取り込むことができる。AVS-MPEのベースになっているAVS/Express（以下AVS）は汎用の可視化ソフトウェアであり、流体解析結果も構造解析結果も表示することができるので、今回の用途には適している。他のシミュレーションソフトウェアの結果についても、変換ツールがあるものは、表示が可能である。実験の画像については、静止画、動画とも特定の形式に変換してAVS-MPEに取り込む。上記の解析、実験画像は共に、AVSの機能である、ネットワークエディタによる。その一部を図5に示す。左はUCDと呼ばれる有限要素法に基づくデータ形式のファイルを読み込むもので、右はこれに連番の画像（動画を1枚ずつの静止画にバラしたもの）

を同期させて表示する機能を追加した様子である。

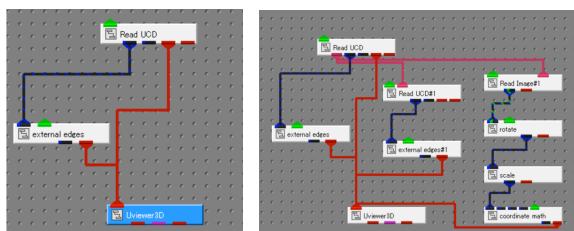


図5 AVS-MPE のネットワークエディタの一部。左は解析データを読み込む部分、右はそれに連番の画像を同期させて表示する部分を追加したものである。

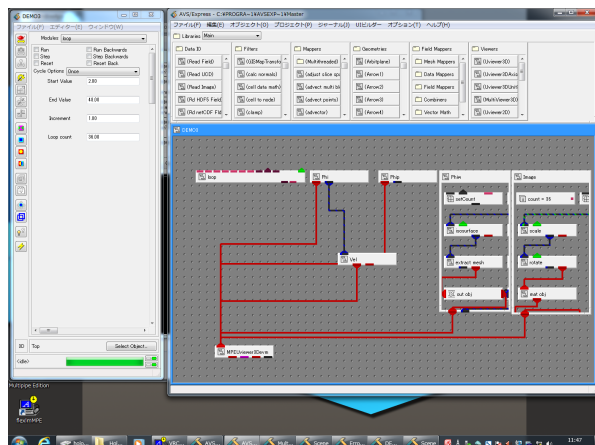


図6 AVS-MPE のネットワークエディタ画面

全体のイメージは図6のようになっている。もう1つの経路は、VR4MAX を用いるものである。AVS-MPE が可視化ソフトウェアの拡張として VR 装置に対応しているのに対し、VR4MAX は元々VRのためのCGソフトウェアである。ただし、VR4MAX にはモデリング機能がないので、ここでは3ds Max¹⁰⁾でCGモデルを作っている。シミュレーションのソフトウェアから直接3ds Max用のデータを出力することはできないので、ここでは自作の可視化ソフトウェアで可視化データを作り、これをVRML (Virtual Reality Modeling Language) 形式にして3ds Maxに渡すようにしている。VRML はテキスト形式なので、データ容量は大きくなるが、変換は難しくない。実験の画像については、3ds Max 内で定義したオブジェクトにテクスチャとして貼ることで表示を可能にしている。

3 表示例

ここでは、流体—構造連成実験・解析同時可視化システムによる流体—構造連成問題の表示例を紹介する。対象は、他の記事「流体構造連成コード検証のための標準問題の提案および実験」の標準問題である。重複を避けるため、詳しくは述べないが、図7のように、風洞の出口に上部から円柱を吊るし、レーザー変位計で変位を、

また高速度カメラで動画像を撮影している。図8にその動画像の1コマを示す。左は横からの画像で、流れは左から右で、わずかに流れ方向に変形していることが分かる。右は円柱を下から撮影したものである。これらの画像は、1コマずつの連番画像にし、AVS-MPE に渡す。

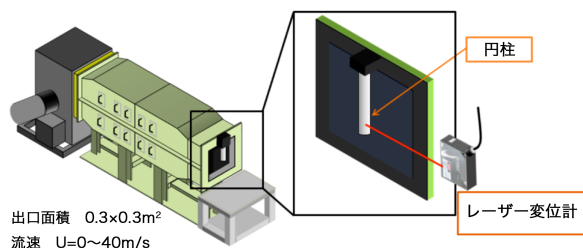


図7 標準問題の実験イメージ

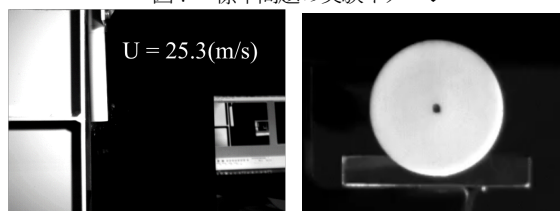


図8 実験の動画像の1コマ。左は横から見た映像で、流れは左から右。右は下からの映像である。

一方、解析はこれも他の記事「Enriched Free Mesh Method と SUPG/PSPG 安定化有限要素を組み合わせた効率的な流体構造連成解析システムの構築」で紹介されている手法を用いて行った。図4では「その他解析ソフト」になるが、ADVENTURE の入出力を模してデータを出力しているため、これもそのまま AVS-MPE で可視化が可能である。

2章の説明では、データさえ揃えば、すぐにもHoloStageで表示できるように書いているが、実際はその前にもう少し作業が必要である。AVS は汎用の可視化ソフトウェアであるため、何をどう可視化するかは事前に用意されていない。そこで、解析結果に関しては、図5および図6のネットワークエディタを編集し（だからエディタ）、自分が見たい可視化手法で可視化された画像を表示する必要がある。そこでまず、HoloStage は使わず、PCのAVSにより、見たい画像が出るようネットワークを構築する。更に、ネットワークのモジュール（図5および図6の文字が書かれた箱）の詳細設定により、実験画像と解析結果の位置合わせなどを行う。結果として、空間も時間も重なって表示されるので、これをここでは時空間同時可視化 (space-time simultaneous visualization) と名付けている。図9にPCモニタのイメージを示す。2つの実験映像に加え、解析結果が重なって表示されている。もし、この状態で実験と解析の比較を行うのだとすれば、位置合わせをして重ねて表示す

るよりも、横に並べる方がむしろ分かり易い。



図9 PC上でAVS/Expressにより表示した実験の動画像と解析結果の同時表示

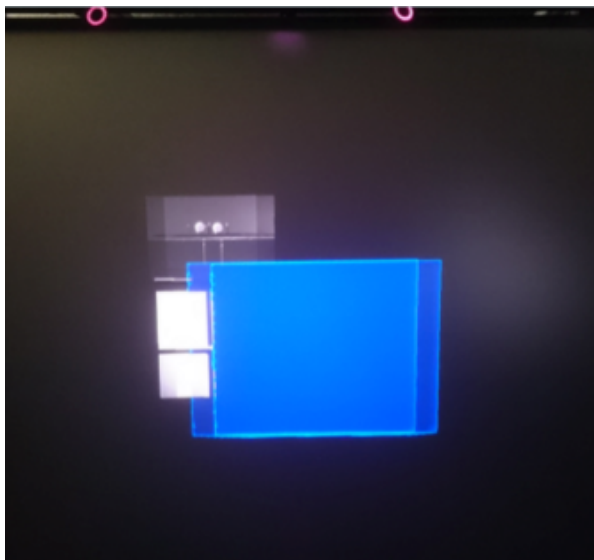
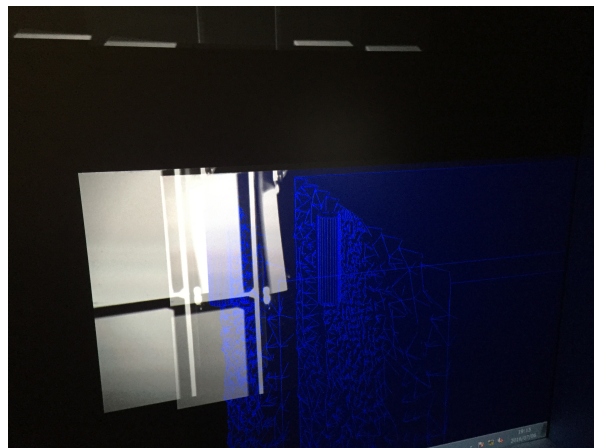


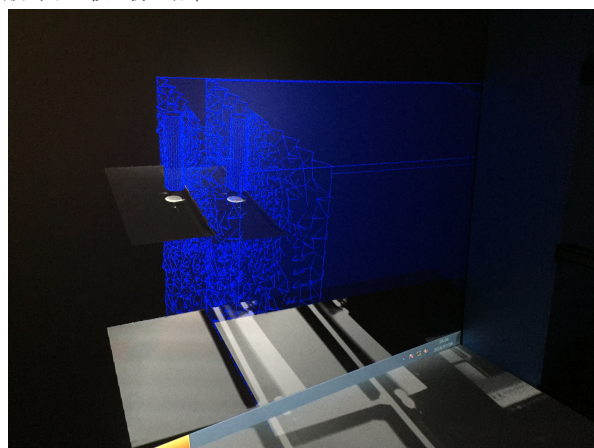
図10 HoloStageでの流体—構造連成実験・解析同時可視化の様子。像が二重になっているのは立体視で右目と左目の映像を交互に投影しているため。上部の円環上の光は位置計測のための赤外線カメラの光源である。

次にこれをそのままHoloStageに移動し、表示をする。図10に少し離れたところから撮った写真を示す。誌面では図9とさして変わらないが、実際にはいくつかの点で大きく異なる。まず、立体視をしているので、右目と左目のそれぞれの映像が交互に投影されている。図10では露光時間の関係でその両方が写っており、例えば下から見た円柱が二重に表示されているのが分かる。また、図9がモニタサイズであるのに対し、図10はHoloStageに表示している画像は十分に大きい。さらに、実際には

VRであるため、左右に回り込んだり、上や下から眺める（スクリーンからはみださなければ）ことも可能である。



(a) 実験映像と解析結果の位置をずらして表示したところ。一般的な比較の際の配置



(b) 円柱の底面の実験映像と解析結果の円柱の底面の位置を合わせて表示している。ここで提案している時空間同時可視化の一例である。

図11 HoloStageでの流体—構造連成実験・解析同時可視化の観察者から見たイメージ

図11に観察者の視点から見た映像を2つ示す。図11(a)は、敢えて実験映像と解析結果の位置をずらして表示している。奥に実験画像、手前に解析結果が表示されている。これはこれでそれぞれを詳細に観察することができるが、より比較に適しているのは図11(b)で、こちらは円柱を下から撮った映像と解析結果の位置を合わせているので、円柱の底面の動きを容易に見比べることができる。

4 考察と今後の展開

今回開発したシステムの最大の利点は、実験と解析を同時にVR空間内に表示できることであり、これにより

従来以上に分かり易い比較ができると共に、VR を用いることの意義も示すことができたと考えている。ただし、本システムにはまだまだ不十分な点が多い。時空間同時可視化を謳ってはいるが、時間合わせ、位置合わせは完全に手作業で、時間合わせに関しては、解析と同じタイミングの実験映像を並べる必要があり、位置合わせに関しては基準時刻で両者が一致するように手で微調整しているのが現状である。また、実験映像はその撮影距離等により特に映像の周辺で歪みが避けられないが、その補正は今のところ何もしていない。より厳密な比較をするときには問題になるかもしれない。さらに、今回の標準問題のケースでも、円柱の弾性率によっては変形がわずかで、直接見たのでは分からないこともあった。解析のみであれば、変形を誇張して描くことも可能であるが、実験と比較すると、実験画像でそのような変形を行うのは容易でない。ここでは示していないが、流体であれば、圧力や速度などは間に画像処理をはさむのでどのようにでも処理が可能であるが、連成問題であるが故の困難さとも言える。

今回は、AVS-MPE を中心とした可視化を行ったが、3ds Max→VR4MAX の可視化には別の可能性がある。3ds Max も VR4MAX も CG のためのソフトウェアなので、表示に関しては AVS-MPE 以上に様々な工夫ができる。写実的な CG を駆使して VR 空間をよりリアルなものにし、あたかも実験室で、あるいは現場で可視化を行っているように見せることもできよう。

最後に、HMD の可能性についても述べておきたい。平成 28 年は VR 元年などとも呼ばれ、民生用の HMD がこれまでにいく数多く発売された。著者はそのうちの 1 つである Oculus Rift¹¹⁾ (以下 Oculus) を購入し、使用し始めたところであるが、アプリケーション開発に関しては既に環境が整っており、Unity¹²⁾ を使えば、学部生レベルでも簡単に Oculus のアプリケーションを作ることができる。以前から指摘されていた、HMD では CG の描画が視点の動きに追従できないという問題は、近年の PC (特にグラフィックスボード) の性能向上により、ほぼ解決している。ただし、HoloStage 等の立体眼鏡と比べるとゴーグル型ディスプレイは物理的にも装着感があり、また、視野も IPT より狭く、VR 酔い (VR を体験中に気分が悪くなること) も起こり易い気がする。ただし、HMD は IPT より 2 桁程度も安価であるので、アプリケーションや使い方を工夫すれば、新しい可視化装置として役立つものになるのではないと思う。

5 おわりに

本センターで開発した流体・構造連成実験・解析同時可視化システムを中心に VR 装置を利用した可視化について述べた。図 1 に示した IPT 方式の VR 装置である

CANVAS を開発した 2002 年当時は立体視や視点位置計測のためのライブラリなども自作に近く、多くのプログラミングが必要であったが、ここで紹介した HoloStage の場合は、AVS-MPE や VR4MAX、3ds Max などの商用ソフトウェアを利用しており、さらに Oculus ではより簡便にアプリケーションが開発できるなど、VR を取り巻く環境は大きく変化しつつあり、工夫次第で解析結果の可視化表示やあるいはその妥当性を検証するような仕組みが可能であると思っている。

謝 辞

本研究の一部は「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 (平成 24 年度～平成 28 年度)」による。あらためてここに記し、謝意を表す。

引用文献

- 1) E. E. Zajac: Computer-made perspective movies as a scientific and communication tool, *Communications of the ACM*, **7**, 169/170 (1964)
- 2) P. G. Buning and J. L. Steger: Graphics and flow visualization in computational fluid dynamics, *AIAA Paper 85-1507-CP* (1985)
- 3) Kageyama et al.: Visualization of vector field by virtual reality, *Progress of Theoretical Physics Supplement*, **138**, 665/673 (2000)
- 4) 矢野ほか: 振動触覚グローブを用いた流れ場表現, *情報処理学会論文誌*, **40-2**, 414/421 (1999)
- 5) Y. Tamura: Development of an immersive display system for flow visualization, *Japan Korea Computer Graphics Conference 2002*, **7** (2002)
- 6) Christie HoloStage ® Mini - spatially immersive environment:
<https://www.christiedigital.com/en-us/3d/products-and-solutions/standard-projection-solutions/christie-holostage-mini>
- 7) AVS/Express MPE:
<http://www.cybernet.co.jp/avs/products/mpe/>
- 8) VR4MAX: <http://www.tree-c.nl/products/vr4max/>
- 9) S. Yoshimura et al.: Advanced general -purpose computational mechanics system for large-scale analysis and design, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, **149**, 279/296 (2002)
- 10) 3ds Max:
<http://www.autodesk.co.jp/products/3ds-max/overview>
- 11) Oculus Rift | Oculus:
<http://www.oculus.com/en-us/rift/>
- 12) Unity: <http://unity3d.com/jp/unity>

4.4.Validation & Verification for Computational Mechanics

Springer より 2017 年 3 月に刊行予定の書籍「Validation & Verification for Computational Mechanics」の入稿原稿を添付する。

Validation & Verification for Computational Mechanics

Editors: Yoshiaki Tamura, Ryuji Shioya and Yasushi Nakabayashi

Preface

This book provides articles on the state-of-the-art validation and verification (V & V) methodology for computational mechanics, especially fluid-structure interaction analyses and related topics.

Computational mechanics has more than fifty years history and in each research field, typically in structural dynamics and fluid dynamics, the analysis methods have been developed and validated. However fluid-structure interaction (FSI) analysis method, that is the combination of these two methods, has not yet been definitive and still a research topic in computational mechanics. There must be several reasons; the analysis methods were independently developed in the corresponding fields even though the basic methods are the same, such as finite element method or finite difference method, the extensions to higher-order accuracy took different approaches, the requirements for spatial and temporal divisions differ in each field, etc. Moreover reliable (experimental) data are few and V & V methodology has not yet been established for FSI.

The Center for Computational Mechanics Research (CCMR), Toyo University was established in 2005 with the grant of “Science Frontier” in Private Universities by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Japan and has been pursuing methods, applications and V & V of computational mechanics since then. In 2012, CCMR has been adopted for the MEXT-Supported Program for the Strategic Research Foundation at Private Universities with the research title of “Fluid-Structure Coupled Analysis and Its Validation & Verification”. The program will last till the end of March 2017. Most of the articles in this book are the results of this program.

One highlight of this book is proposal of the standard problem of FSI for the validation of code. The detailed experimental data are provided along with the computed results by the method also proposed in one of the articles. Not only comparing with experiments, this book covers various V & V approaches, e. g. the experiment–computation fusion for higher accuracy, the error analysis with the Bayesian estimation, the visual V & V, etc. The articles of large-scale FSI analysis are also included.

Finally, representing the authors in this book, I express our acknowledgements to Toyo University, MEXT, Japan Science and Technology Agency (JST) and all those who have supported our activities at CCMR.

February 13, 2017.

Yoshiaki Tamura

Director, the Center for Computational Mechanics Research, Toyo University

Table of Contents

1. Experiment on Oscillating Circular Cantilever for Fluid-Structure Interaction Code Validation (Fujimatsu)
2. Development of Large Scale Fluid-Structure Coupled Analysis Method by the Enriched Free Mesh Method (Nagaoka, Nakabayashi & Yagawa)
3. High Accurate Analysis by Experiment and Simulation Using Bayesian Inference for Corrugated Cardboard (Shimamura & Ezawa)
4. Validation & Verification of Structural Analysis Using Open Source Finite Element Analysis Code and Material Test Data (Fujioka)
5. ICME - Integrated Computational Materials Engineering, from Micro-Scale to FEM (Ashino)
6. Space-Time Simultaneous Visualization in Virtual Reality Environment for Validation and Verification (Tamura)
7. Application of Machine Learning for Computational Mechanics (Masuda & Nakabayashi)
8. High Performance Computing for Large Scale Structural Analysis (Shioya, Kawai and Ogino)
9. Large Scale Numerical Simulation of Water Splash by Moving Particle Simulation Method (Yokoyama & Yagawa)
10. Numerical Study of Adhesion Behavior of Sea-Salt Particles on Concrete Bridge Girders (Tomiyaama & Nakabayashi)
11. Numerical Simulation of the Mudcrack Grows (Matsubara & Hirose)
12. Coupled Analysis of Electromagnetic Fields and Temperature Distributions inside the Human Body Using Microwave Therapeutic Devices (Shindo)
13. Hybrid Geometry/Material Monitoring Method for Microcrack Identification (Furukawa)

Experiment on Oscillating Circular Cantilever and Sheet Flutter for Fluid-Structure Interaction Code Validation

Nobuyoshi FUJIMATSU

¹Department of Mechanical Engineering, TOYO University, JAPAN

fujimatsu@toyo.jp

Abstract

The purpose of this chapter is to provide the reliable experimental results for FSI code validation. We conducted the experiment on the flow-induced vibration of the oscillating cylinder and the sheet flutter and investigated a characteristics of critical flow velocity for oscillation. Three kinds of material of cylinder and of sheet with a different dimensions are used for the present experiment. The oscillation motion and the flutter frequency are measured using the laser-displacement sensor and the high-speed camera. There are differences on characteristics of the flutter in the case of increasing and decreasing the flow velocity. These dependencies on the material properties and the size of experimental model. We discussed from the comparison of the critical flow velocity. The present results showed that the sheet of same material with the short length has the greater critical flow velocity and the sheet of soft material with same length has the smaller critical flow velocity. The frequency of the flutter becomes large when the sheet has the short length. We also conducted the non-dimensional parameter for the classification of critical flow velocity and discussed on the influences to the flutter of the size of experimental model, material property and flow velocity.

Keywords: Flow-induced vibration, oscillating cylinder, sheet flutter, cantilevered flexible plate.

Introduction

The FSI problems is one of fundamental issues in an engineering applications and scientific researches. This topic is concerned with the plural physics. The information obtained by the experimental study is limited in terms of the spatial and the temporal resolutions. Consequently, the physical mechanism of FSI problem is not easy by the restricted information. We hope that the numerical simulation with a plenty of spatial and temporal information is a useful tool to reveal the physics of FSI problem. However, the numerical simulation is usually needed to validate the program code before applying the FSI problems and there are some difficulties from the lack of the experimental results for the FSI problems. There are many researches on the flow-induced vibration in the past and the experimental and numerical studies were conducted [1-6].

Eloy, C., et al.[7] investigated theoretically the linear stability of a variable aspect ratio, rectangular plate in a uniform and incompressible axial flow and could predict the flutter modes, their frequencies and growth rates. They calculated the critical flow velocity of sheet-flutter as a function of the mass ratio and the aspect ratio of the plate. Gjerek, B., et al.[8] studied the airfoil flexibility effect on the flutter behavior in terms of two main dynamic properties of a flexible plate, the flexural stiffness and the areal density and showed that the flutter behavior of a flexible airfoil is characterized by two types of flutter, namely the classical airfoil flutter and the plate flutter. Wu, X., et al.[9] dealt with both linear and nonlinear analyses of sheet flutter in a narrow passage caused by fluid–structure interaction

compared the calculated results with previously reported experimental results. In the nonlinear analysis, nonlinear fluid dynamic forces are introduced to simulate the behavior of the sheet, showing the appearance of limit-cycle vibration in high flow speed. In order to modify the underestimation of the critical flutter velocity in the theoretical analysis. Doaré, O., et al.[10] quantified the phenomenon of the flutter by analyzing the effect of the clearance between the plate and the side walls on the flutter instability. Their results showed that the convergence towards the two-dimensional limit is so slow that this limit is unattainable experimentally. Gibbs, S. C. et al.[11] explored cantilevered beam flutter for both clamped and pinned leading edge boundary conditions using a three-dimensional vortex lattice panel method coupled with a classical Lagrangian one-dimensional beam structural model to predict the linear flutter boundary for finite size rectangular plates. They discussed on the change in flutter characteristics as a function of the fluid to structure mass ratio and the structural aspect ratio and confirmed the validity of the three-dimensional vortex lattice aerodynamic model over a subset of mass ratios from the comparison of the aeroelastic experiments. However, those research works were not focused in terms of the classification of flutter frequency. In the present research work, we conducted two kinds of experiments on the flow-induced vibration. One is an oscillating cylindrical cantilever made of silicone rubber caused by aerodynamic forces. We investigate a characteristics of displacement and oscillating frequency for circular cantilever. The other is an investigation on a sheet flutter used by the metal plate. We research on the relationship of flutter frequency to the flow velocity and the material properties such as Young modulus and propose the non-dimensional parameters of the fluid force to the elastic forces for the estimation of the flutter phenomena. Through these experiments, we provide the reliable data for the code validation on the FSI problems.

Nomenclature

A : cross-section area of rectangular wing, $A=wl_p$ [m²]
 a : amplitude [mm]
 D : displacement [mm]
 d : diameter of circular cylinder [mm]
 E : Young modulus [Pa]
 f : oscillating frequency [Hz]
 f_n : eigen frequency with n mode [Hz]
 I : second moment of area $I=wt^4/12$ [m⁴]
 L : length of experimental model [mm]
 Re : Reynolds number [-]
 s_n : non-dimensional frequency with n mode [Hz]
 St : Strouhal number [-]
 t : thickness of rectangular plate [mm]
 U : flow velocity [m/s]
 w : chord length of rectangular plate [mm]
 λ_n : vibration mode [-]
 ν : dynamic viscosity [m²/s]
 ρ_s : density of rectangular plate [kg/m³]
 ρ : density of air flow [kg/m³]

Subscript

c : cylinder
 n : mode number
 p : flat plate

Experimental setup

Figure 1 shows the schematic of experimental setup to simulate the oscillating cylinder and the sheet flutter. We conducted the experiments using the blow-down typed low-speed wind tunnel facilities. Area of the cross section of wind tunnel is a $0.3 \times 0.3 \text{ m}^2$. Some kinds of material property for the present experiment were selected and we used the silicone rubber and the metal plate with different sizes. Flow speeds were varied from 0 to 45 m/s. We tested to investigate the displacement of oscillation and the frequency of flow induced vibration. The cylinder was supported at the top of that using the clamp and the motion of cylinder was recorded using the high-speed camera from the bottom and the side of the cylinder. The HAS-L1 is used as the digital image storage system produced by the DITECT Co. Ltd. in Japan. The rectangular plate supported by clamp is used in the sheet flutter experiment. We used the combination of the laser-head KG-G500 and the controller KG-G3000 made by KEYENCE Corp. as the LDS. The video image has 800x600 resolutions recorded by 300 fps. The CCD camera and the LDS were located to a downstream of rectangular plate and above the experimental model, respectively. We measured the displacement of the sheet flutter using the LDS. Table 1 shows the specifications of the LDS and the high-speed camera.

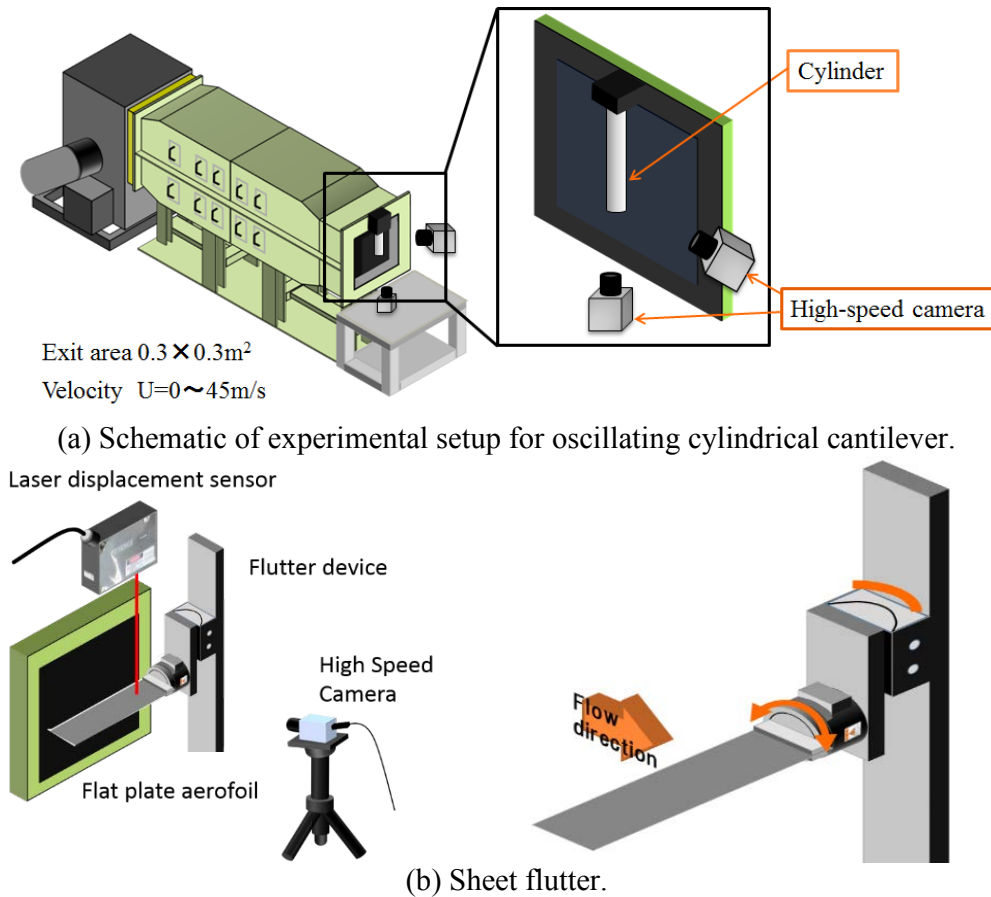


Fig. 1 Schematic of experimental setup for sheet flutter.

Table 1 Specifications of laser displacement sensor and high-speed camera.

Laser displacement sensor KG-G500		High-speed camera HAS-L1	
Installation mode	Diffuse reflection	Frame rate	300 fps
Sampling period [μs]	200	Resolution	800×600
Measurement time [s]	120 seconds	Measurement time [s]	30

Experimental results and discussions

Experiment on oscillating cylindrical cantilever

Table 2 shows the material properties and the size of circular cantilever. The cylinder have three kinds of Young modulus with same diameter and length. A50, A60 and A70 means the durometer hardness. The present experiments were conducted from 1.9 to 40.4 m/s of the flow velocity and the motion of cylinder is recorded by the high-speed camera from the bottom and the side views. The recorded time is 30 seconds and the optical images are storage with 9000 frames.

Table 2 Specifications of cylindrical cantilever.

d [mm]	20
L_c [mm]	160
E [MPa]	2.9 (A50)
	4.9 (A60)
	6.8 (A70)

In the wind-tunnel experiments, during the oscillating condition, the experimental model moves slightly over the x - y plane vertical to the cylindrical axis (z -axis). In order to capture the motion of cylinder, we conducted the image processing from the time series of images. Figures 2-(a) and (b) show the instantaneous images of elastic cylinder taken by the high-speed camera from the bottom and the side of the cylinder. From the images of bottom view of cylinder, the center coordinates of experimental model are automatically determined using the binary conversion from the pixel locations with the value of 1 in images[13]. We used herein the following algorithm for the detection of center coordinate: (1) Perform binary conversion of the image. (2) Search the location of arbitrary pixel with the value of 1 and determine the position of one pixel. (3) Search for pixels having the same intensity level around the position of arbitrary pixel with the value of 1. (4) Count the number of pixels having the same value. (5) Compute the total area. (6) Average the coordinates of the pixels having the same value and locate the center coordinate of the experimental model. The above process was applied to the experimental images and we could acquire the center coordinate of cylinder at every time.

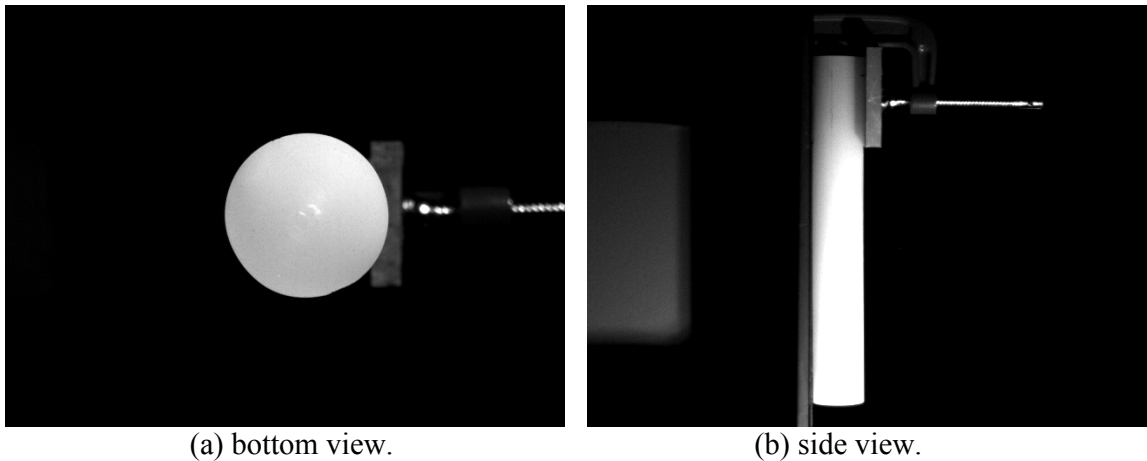


Fig. 2 Instantaneous image of oscillating cylinder ($U=18.6\text{m/s}$).

Figures 3 and 4 showed the time-averaged displacement and the root mean square (R.M.S.) of amplitude for oscillating cylinder, respectively. The x and y components of each quantity are

shown in the same figures. The Reynolds number is defined as $Re = Ud_c/\nu$ using a diameter of cylinder. The vertical axis means the ratio of each measurement value to the diameter d_c . Maximum value of displacement D_y is less than 3 percentages of a diameter d_c and we can be negligible rather than D_x in the present flow condition. Each amplitude for x and y directions gradually becomes large over $Re = 1 \times 10^4$ and is nearly proportional to the Reynolds number. The amplitude a_y perpendicular to flow direction is greater than a_x with streamwise direction. These tendencies do not change to the material properties.

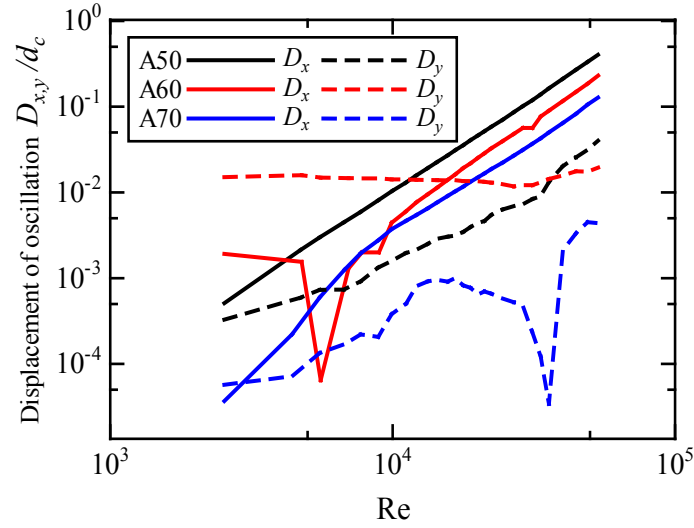


Fig. 3 Time-averaged displacement of oscillating circular cantilever.

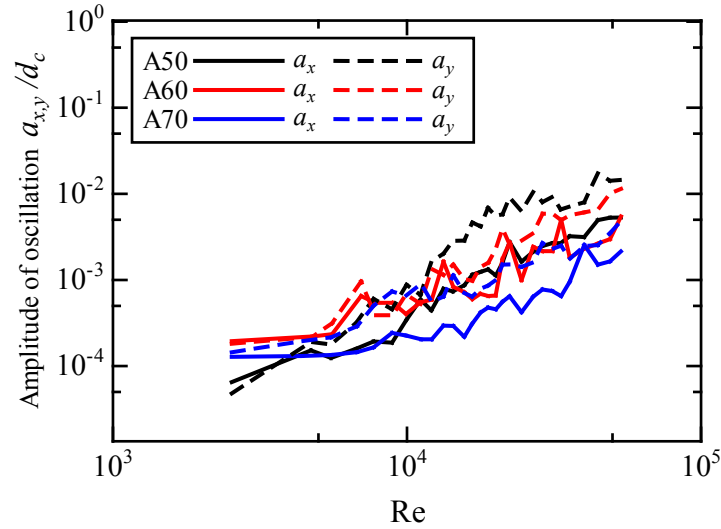


Fig. 4 Root mean square amplitude of circular cantilever.

Figures 5 showed the frequency characteristics of oscillating cylinder. The FFT analysis was applied to capture the power spectrum using 8192 points. The Strouhal number is defined as $St = f_c d_c / U$. The data points are not shown in Figs. 5 because the oscillating frequency could not successfully captured in the case of the tiny displacement. The Strouhal number decreases to the Reynolds number and the frequency characteristics are almost constant to all the flow conditions and for each material. Table 3 shows the slope of experimental results for the oscillating circular cantilever. These values are computed using the least square method. We did not show the slope of D_y because the y -component of displacement is negligible rather than that of D_x . The gradient of displacement in x -direction corresponds to about 2 in all the

cases. The variation rate of amplitude a_x and a_y are slightly large and those values have the range of 1.0 to 1.5. In the only case of A50, the a_x and a_y are greater than 1.5 because the Young modulus is less than those of the other cylinder. The Strouhal number changes with the slope value -1.0 for x and y directions in all the cases.

In this section, we showed the experimental results on the oscillating circular cantilever. Characteristics on the displacement and the frequency are simply changed to Re and are useful to validate the FSI code.

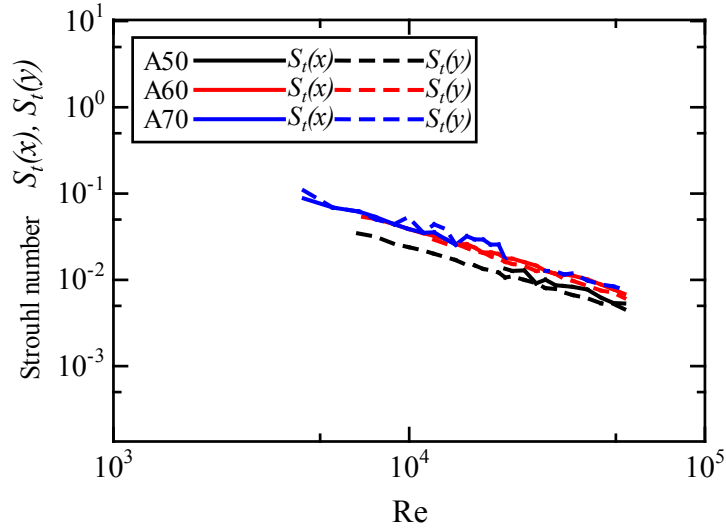


Fig. 5 Oscillating frequency of circular cylinder.

Table 3 Slope of characteristics of oscillating cylinder.

	D_x	D_y	a_x	a_y	$S_t(x)$	$S_t(y)$
A50	2.164	-	1.626	1.988	-1.017	-0.985
A60	2.260	-	1.090	1.504	-1.005	-1.046
A70	2.442	-	1.052	1.125	-0.912	-1.042

Experiment on sheet flutter

In this section, characteristics of sheet flutter is discussed on the material properties of the flat plate. We experimented to investigate the critical flow velocity of sheet flutter. The displacement of flat plate under the flutter condition was measured using the LDS. Table 4 shows the material properties and the size of flat plate airfoil. The experimental model is a rectangular plate and has three kinds of metal plate such as aluminum, brass and stainless with 9 kinds of different dimensions. The flow velocity was varied from 1.9 to 42.6 m/s.

Table 4 Specifications of sheet flutter.

w [mm]	40
L_p [mm]	200, 250, 300
t [mm]	0.3, 0.4, 0.5
Young modulus [GPa]	70.6 (aluminum)
	105 (brass)
	210 (stainless)

Figure 6 shows the comparison of flutter velocity to the span length L_p . The flat plate airfoils have 0.3, 0.4 and 0.5 mm thickness with 40mm chord length. The experimental results

showed that the flutter velocity to the span length is slightly reduced for the different thickness and the gradient of flutter velocity have almost the same tendencies to the span length. As increasing the thickness of sheet, the flutter phenomena is not easy to occur because of the increment of rigidity. Figure 7 showed the comparison of flutter velocity to the Young modulus. The flat plate has 0.3mm thickness and 40mm chord length. From this figure, the flutter velocity is increased when the strength of material is greater.

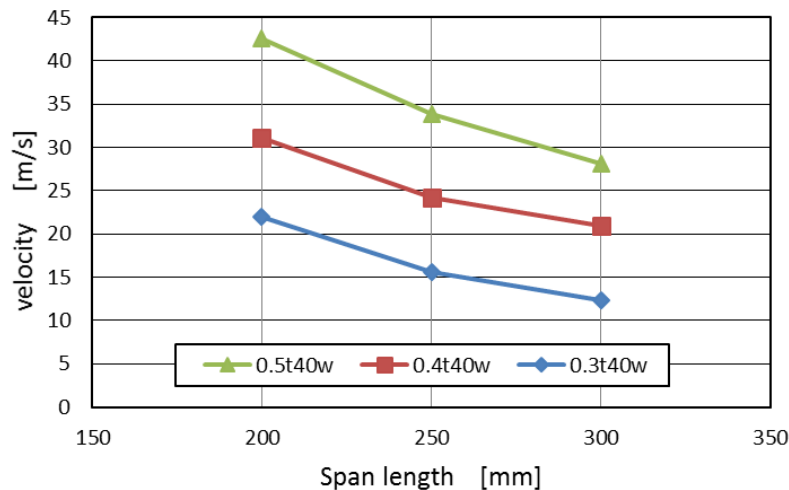


Fig. 6 Comparison of the flutter velocity to span length for the alminum sheet with various thickness.

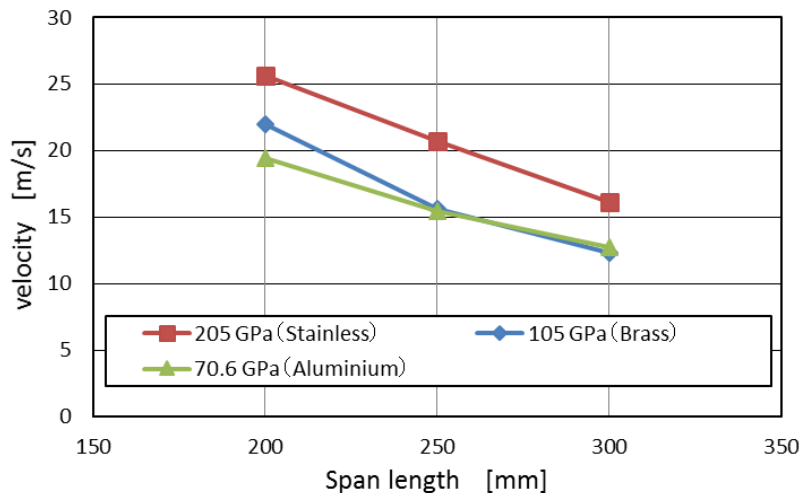


Fig. 7 Comparison of the flutter velocity to span length for various Young modulus ($t=0.3\text{mm}$ and $w=40\text{mm}$).

The displacement of the flat plate is measured using the laser displacement sensor under the condition where the flutter phenomena occurs. The measurement point is located at 50mm length from the root of the flat plate. The time history of displacement of the flat plate is recorded for 12 seconds with 5 kHz. The frequency analysis is conducted using the FFT. Figure 8 showed the typical result of aluminum plate under the flutter condition. The peak of power is confirmed at 42 Hz. We classified the characteristics of flutter frequency to the flow velocity for aluminum plate with various size and showed in Fig. 9. The analytical results indicated that the flutter frequency is gradually increasing. Especially, these tendencies depends on the shorter span length with the same thickness.

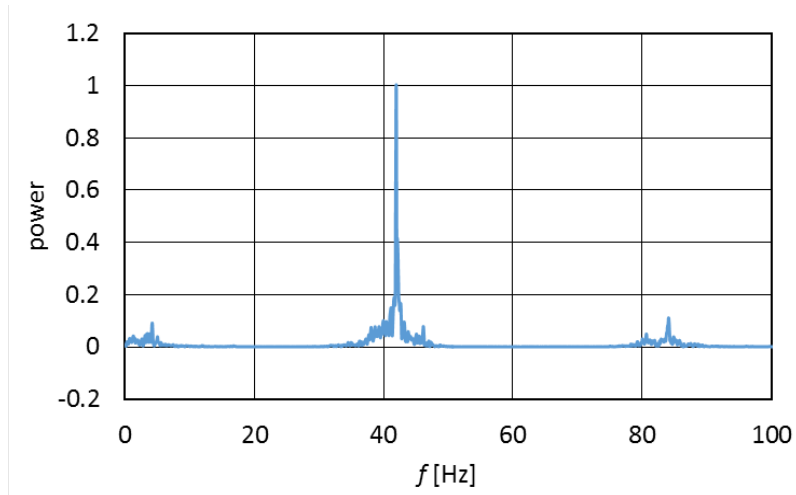


Fig. 8 Flutter frequency for alminum plate which has the dimensions ($t=0.3\text{mm}$, $L_p=200\text{mm}$, $w=40\text{mm}$ and $U=20\text{m/s}$).

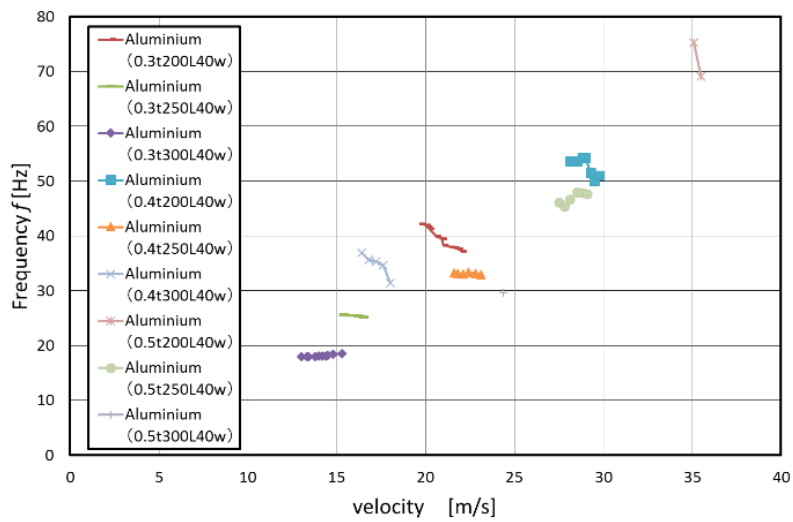


Fig. 9 Flutter frequency to flow velocity.

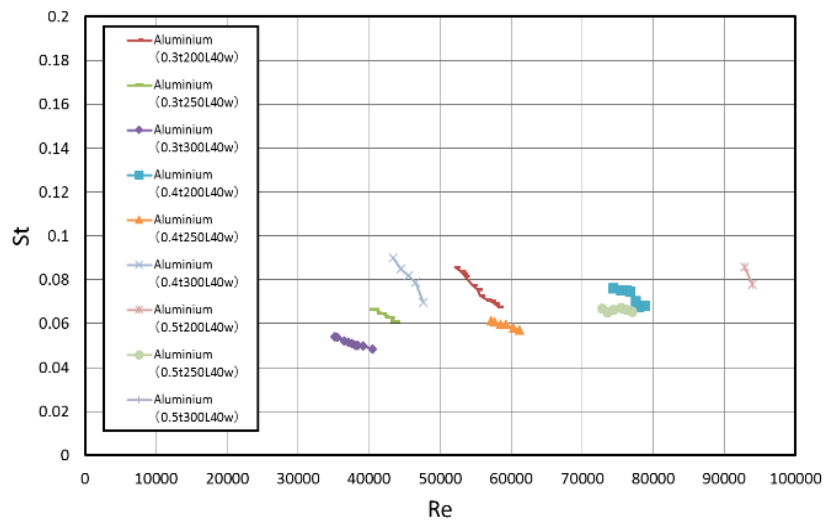


Fig. 10 Characteristics of non-dimensional flutter frequency.

Figure 10 showed the Strouhal number $St=f_p L_p /U$ for flutter frequency to the Reynolds number $Re=UL_p/\nu$. The reference length is the chord length 40mm. The experimental results showed that St has the range with in 0.05 to 0.08 for aluminum plate under the flutter condition. However, these results can not be simultaneously arranged for another materials because the Reynolds number does not include the material properties and the flutter frequency depends on the thickness and span length of sheet.

As shown in Fig. 10, we showed that the flutter velocity depends on the cross section area and the Young modulus of flutter sheet. The experimental results is a traditional classification based on the non-dimensional numbers St and Re and is involved for the different size and materials. In order to express the non-dimensional number include with the material properties, we need to incorporate another non-dimensional number from the Buckingham π theorem.

The flat plate is supported as the cantilever and is oscillated by the aerodynamic force. Therefore, we can consider that the flutter frequency is concerned with the eigen frequency for the elasticity of materials. Equation (1) means the eigen frequency with single-supported cantilever.

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda_n^2}{L_f^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho_s A}} \quad (1)$$

$$s_n = \frac{f_p}{f_n} \quad (2)$$

Figure 11 showed the non-dimensional flutter frequency based on Eq. (1). The oscillation mode λ depends on the flow condition. When we substituted 1st, 2nd and 3rd oscillation modes $\lambda_1=1.875$, $\lambda_2=4.694$ and $\lambda_3=7.854$ to Eq. (1), the flutter frequency corresponded to the eigen frequency of the aluminum plate with the 2nd oscillation mode. From the observation study shown in Fig. 12, the flutter patterns in the present experiments indicated the 2nd mode oscillation and we decided $\lambda_2=4.694$ is appropriate value used in the non-dimensional. Equation (2) is clear prospects on the discussion of flutter frequency.

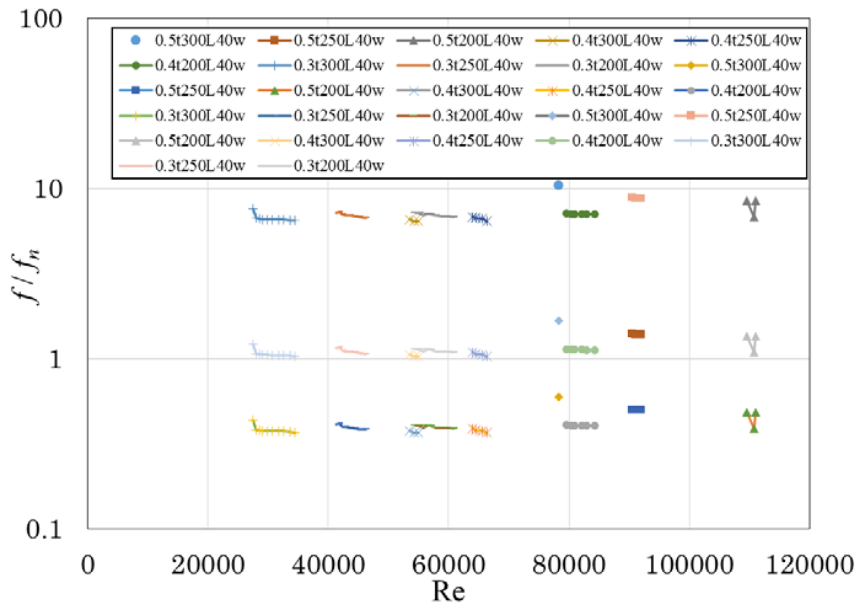


Fig. 11 Characteristics of non-dimensional flutter frequency based on an eigen frequency.

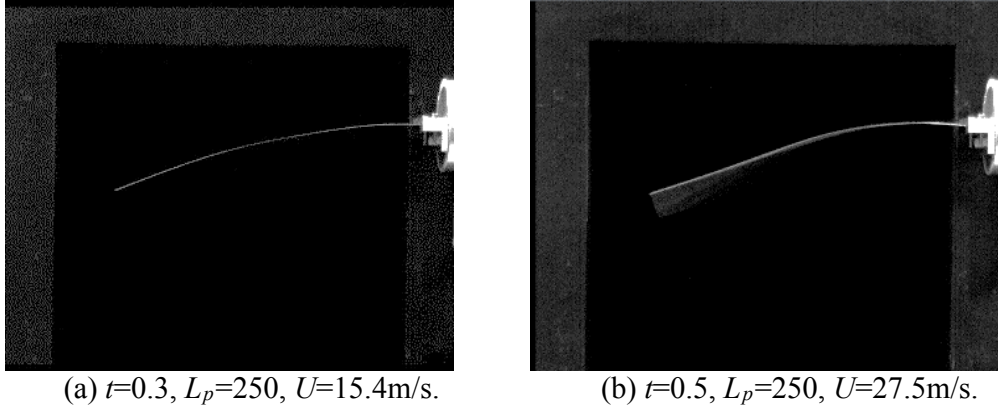


Fig. 12 Oscillating flat plate with 2nd mode.

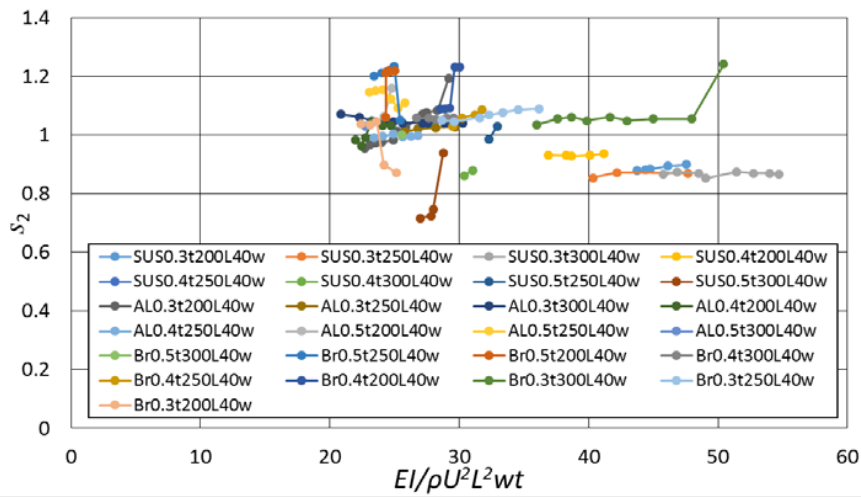


Fig. 13 Characteristics of non-dimensional flutter frequency based on aeroelasticity parameter.

Furthermore, we discuss the relationship of elastic force to aerodynamic force as the remaining problem and propose the non-dimensional number. In the analytic solution of cantilever problem, the displacement of beam under the uniform distributed load q [N/m] has the coefficient EI/qL_p^4 which corresponds to the ratio of moment of force. We consider that this coefficient is also responsible for the displacement of plate in the flutter phenomena and investigate the expression in terms of L_p^4 . As the elastic plate is acting to the flat plate, the displacement is caused by the moment of force. The moment of force M is concerned with EI/t . Aerodynamic force is expressed as the dynamic pressure acting to the flat plate. Consequently, the fluid force F has the order of $\rho U^2 w L_p$. The moment of fluid force M is approximately equal to $\rho U^2 w L_p^2$ under the uniformly distributed aerodynamic load. We propose the aeroelastic parameter $EI/\rho U^2 L_p^2 w t$ as the non-dimensional number. Figure 13 show the flutter frequency for the three kinds of materials. These results indicate that the flutter phenomena is occurred in the range of 20 to 55 for the aeroelastic parameter.

Conclusions

We conducted two kinds of experiments for flow-induced vibration. The experimental results on oscillating circular cantilever showed that the displacement and the frequency of cylinder are proportional to the Reynolds number. In the sheet flutter experiment, we introduced the aeroelastic parameter combined with the elastic force to the aerodynamic force and the flutter

frequency are classified using the non-dimensional number $EI/\rho U^2 L_p^2 w t$ included with the material property. The experimental results in the present research can be useful to validate the numerical code for FSI problems.

References

- [1] Blevins, R. D. (1990) *Flow-Induced Vibration*, Krieger Publishing Company.
- [2] King, R., Prosser, M. J., and Johns, D. J. (1973) On Vortex Excitation of Model Piles in Water, *Journal of Sound and Vibration* **29**, (2), 169-188.
- [3] Kondo, N. (2012) Three-dimensional computation for flow-induced vibrations in in-line and cross-flow directions of a circular cylinder, *International Journal for Numerical Methods in Fluids* **70**, 158-185.
- [4] Blake, W. K. (1986) *Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration* - Vol. 1: General Concepts and Elementary Sources, Academic Press, Inc.
- [5] Brika, D., and Laneville, A. (1993) Vortex-Induced Vibrations of a Long Flexible Circular Cylinder, *Journal of Fluid Mechanics* **250**, 481-508.
- [6] Huerre, P., and Monkewitz, P. A. (1990) Local and Global Instabilities in Spatially Developing Flows, *Annual Review of Fluid Mechanics* **22**, 473-537.
- [7] Eloy, C., Souilliez, C. and Schouveiler, L. (2007) Flutter of a rectangular plate, *Journal of Fluids and Structures* **23**, (6), 904-919.
- [8] Gjerek, B., Drazumeric, R. and Kosel, F. (2014) Flutter behavior of a flexible airfoil: Multiparameter experimental study, *Aerospace Science and Technology* **36**, 75-86.
- [9] Wu, X. and Kaneko, S. (2005) Linear and nonlinear analyses of sheet flutter induced by leakage flow, *Journal of Fluids and Structures* **20**, (7), 927-948.
- [10] Doaré, O., Sauzade, M., and Eloy, C. (2011) Flutter of an elastic plate in a channel flow: Confinement and finite-size effects, *Journal of Fluids and Structures* **27**, (1), 76-88.
- [11] Gibbs, S. C., Wang, I. and Dowell, E. (2012) Theory and experiment for flutter of a rectangular plate with a fixed leading edge in three-dimensional axial flow, *Journal of Fluids and Structures* **34**, 68-83.
- [12] Fujimatsu, N., Tamura, T. and Fujii, K. (2005) Improvement of Noise Filtering and Image Registration Methods for the Pressure Sensitive Paint Experiments, *Journal of Visualization* **8**, (3), 225-233.

Development of Large Scale Fluid-Structure Coupled Analysis Method

by the Enriched Free Mesh Method

Shinsuke NAGAOKA¹

¹Center for Computational Mechanics Research, Toyo University, JAPAN.

Abstract

Fluid-Structure interaction phenomenon is becoming a very important issue in recent numerical analysis field. Therefore a lot of new analysis methods are proposed by many researchers. Each approach has various advantages. But crucial analysis method is not proposed yet. We also have been already proposed the new method to obtain highly analysis result. The method is using the SUPG/PSPG stabilized finite element method (FEM) as a fluid analysis method. On the other hand, the Enriched Free Mesh Method (EFMM) is using in structure analysis field. Our approach is combined these two analysis methods. Both methods are using the same type element. For example, linear triangular elements are used for two dimensional analysis. In the case of three dimensional problem, linear tetrahedral elements are used. In short, both methods are using only linear element. Therefore, the handling of the fluid-structure interface becomes simple and accurate. Moreover, these method can be obtained fine analysis result compared with conventional method. Accuracy and parallel efficiency of the SUPG/PSPG stabilized FEM has been already proven by many analysis results so on. Analysis accuracy of the EFMM has been already proven by some analysis results by us. But, EFMM needs special treatment to apply parallel computing. For example, domain decomposition method is different from conventional FEM, communication table will become more complicate compared with conventional parallel computing. Introduced into special treatment for EFMM, parallel efficiency of EFMM is able to obtain very good result. As a written in above features, analysis accuracy and parallel efficiency of our proposed method will become very good. In this study, we describe detail of our proposed analysis method. In addition, analysis result compared with examination result are described to prove of efficiency of our proposed method.

Keywords: Fluid-Structure Interaction Analysis, Large Scale Analysis, Parallel Computing, Enriched Free Mesh Method, SUPG/PSPG Stabilized Finite Element Method.

1. Background

Fluid-structure interaction problem is becoming a very important problem in the recent numerical analysis field. In fact, phenomenon that is occurred around our body is almost interaction phenomenon. Especially, it is very important that to solve fluid-structure interaction problem using numerical simulation in the engineering field.

To solve this fluid-structure interaction phenomenon, a lot of new methods are proposed by many researchers. These new methods have many strongpoint but crucial method is not developed yet.

2. Motivation

The analysis accuracy of the FEM is known to be improved by using higher-order elements with mid-side nodes. If engineers try to improve analysis accuracy without using high-order elements, they usually employ finer finite elements in the analysis domain, which results in the increase of calculation time and memory consumption [1-3].

It is well recognized that, for the FEM-based structural analysis, higher-order elements are generally used to improve analysis results. On the other hand, for fluid analysis, by employing the Streamline Upwind/Petrov-Galerkin (SUPG) [4] method and the Pressure-Stabilizing / Petrov-Galerkin (PSPG) [5-7] method, it is possible to achieve good analysis results without using higher-order elements.

When conducting analysis considering fluid-structure interaction effects, it is desirable that node locations are consistent on the interface between fluid and structure domain as shown in Fig.1. But, when the fluid analysis method using the SUPG/PSPG stabilized FEM and the structural analysis method using higher-order elements are used at the same time, the locations of nodes on the interface between two analysis domain becomes inconsistent (see Fig. 2), because the second-order elements with mid-side nodes are used for the structural field and first-order elements without mid-side nodes for the fluid field, although these elements are both triangular and tetrahedral in the case of the 2D problems and the 3D problems, respectively.

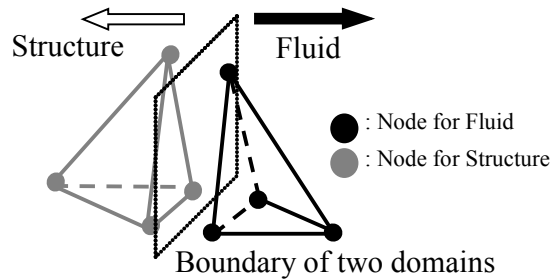


Figure 1. Interface nodes being consistent at the interface between fluid and structure fields

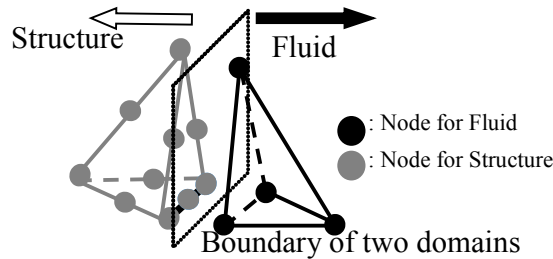


Figure 2. Interface nodes being inconsistent at the interface between fluid and structure fields

Accordingly, when considering the coupling effects of two different fields, it is necessary to interpolate the analysis results between the nodes. Much has been accomplished in 3D computation of practical problems with incompatible meshes at the fluid-structure interface (see, for example [8,9]) and in some cases deliberate use of incompatible meshes might be part of the solution strategy (see, for example [8,9]) and in some cases deliberate use of incompatible meshes might be part of the solution strategy (see, for example [10-13]). Still, using incompatible meshes at the interface complicates the calculation process, influences the coupling accuracy, and unless the solution strategy requires it, should be avoided. Therefore, when we try to perform structure-fluid coupled analysis, it is ideal to adopt an accurate structural analysis method without using the mid-side noded elements.

In order to cope with this problem, the authors propose to use the Enriched Free Mesh Method (EFMM) [14] as the structural analysis part, which is one of the meshless methods of high accuracy. The elements used for the EFMM based analysis are triangular or tetrahedral without mid-side nodes and it has been reported that the method gives solutions as accurate as that of the mid-side noded elements. By combining EFMM with the SUPG/PSPG stabilized FEM, it is possible to accurately analyze fluid-structure interaction problems in which the nodes on the boundaries between the structural and fluid fields are consistent as shown in Fig. 1.

On the other hand, the method has a shortcoming that is too difficult to apply into parallel computing. This issue is caused by algorithm of Enriched Free Mesh Method.

As a motivation, in this study we propose a parallelization algorithm for Enriched Free Mesh Method. And proposed parallelization method apply into our proposed fluid-structure coupled analysis method. Then compared with experimental data to prove effectiveness of our proposed fluid-structure coupled analysis method.

3. Fluid analysis Method

In this chapter, we describe fem that is using as a fluid analysis method. In addition, detail of ALE method is described. The method is the technique to solve moving boundary problem like a FSI problem.

Finally, numerical example that is computed this method is shown to prove validity.

3.1 SUPG/PSPG method

Here, the fluid analysis is conducted with a stabilized finite element formulation based on the SUPG[4] and PSPG[5-7] stabilizations (see [15] for a similar pressure stabilization method) that discretizes the Navier-Stokes equation and the equation of continuity. As the basic equations for incompressible viscous fluid, the dimensionless Navier-Stokes equation and the incompressible continuity equation can be respectively, written as follows,

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (2)$$

Where u_i and p represent the velocity and the pressure, respectively. Re is the Reynolds number, and Ω is the analysis domain occupied by fluid. When the SUPG and PSPG method is applied to Eqs. (12) and (13), the following weak form is derived:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} w_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) d\Omega - \int_{\Omega} \frac{\partial w_i}{\partial x_i} p d\Omega + \int_{\Omega} \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial w_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) d\Omega \\ + \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{\Omega_e} \tau_s u_k \frac{\partial w_i}{\partial x_k} \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) d\Omega = \int_{\Gamma_h} w_i h_i d\Gamma \end{aligned} \quad (3)$$

and

$$\int_{\Omega} q \frac{\partial u_i}{\partial x_i} d\Omega + \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{\Omega_e} \tau_p \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) d\Omega = 0 \quad (4)$$

Where w_i and q represent the weighting functions of the Galerkin terms of Eqs. (1) and (2), respectively. Γ denotes the boundary of the analysis domain Ω . τ_s and τ_p represent the stabilization parameters of the SUPG and PSPG method, respectively.

Regarding the velocity and the pressure, which are the unknown variables of Eqs. (3) and (4), the interpolation is carried out with the first-order triangular elements. This combination is

possible, because the formulation is based on the stabilization finite element method. After discretizing this formulation in the time direction, a system of linear equations is derived with the unknown variables U^{n+1} , V^{n+1} , and P^{n+1} in the two-dimensional case. As the matrices in the above equations are asymmetric, we adopt the Generalized Product type method based on the Bi-CG (GPBi-CG)[16,17] method or the General Minimal Residual (GMRES(m)) method.

3.2 Numerical example

For fluid-structure interaction analysis, it is generally necessary to integrate the Lagrangian structural analysis with the Eulerian fluid analysis. For this purpose, the Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE[18-23])method is used in this study, in which the Eulerian and the Lagrangian descriptions are combined. By using the finite element mesh moving independently from the motion of fluid, it is possible to track the motion of fluid-structure interface without generating highly distorted elements. In addition, the governing equation for fluid expressed with the ALE method is the same as the Navier-Stokes equation for incompressible flow expressed with the Eulerian method, except that advection velocity is replaced with the relative velocity with respect to mesh moving speed. From these features the method, the ALE method can be considered to be appropriate for analyzing the fluid-structure interaction problems[24].

Here, we discuss a numerical analysis of oscillation of a spring-supported cylinder induced by the Karman vortices in order to demonstrate the effectiveness of the fluid analysis method based on the SUPG/PSPG stabilization FEM. This problem was also studied extensively in [25] by using the DSD/SST formulation [26,27] and a special-purpose mesh moving technique [27]. Here we perform this analysis to compare our results to data from a water tank experiment model, with which Anagnostopoulos and Bearma [28-30] succeeded in studying the lock-in phenomenon of the flow with a Reynolds number of around 100. The model used in this analysis is shown in Fig 1. It is assumed that the cylinder is a rigid single-degree-of-freedom spring-mass system. The condition for this analysis are also shown in the figure. The left figure of Fig 2 shows the mesh division at the initial state, while the right figure shows that when the cylinder moves upward due to spring oscillation.

In this analysis, elements are deformed due to the movement of the cylinder as we assume that the entire analysis domain is that of ALE method. In order to avoid an excessive deformation of the mesh during the analysis process, a mesh smoothing method based on the Laplace equation type technique is employed.

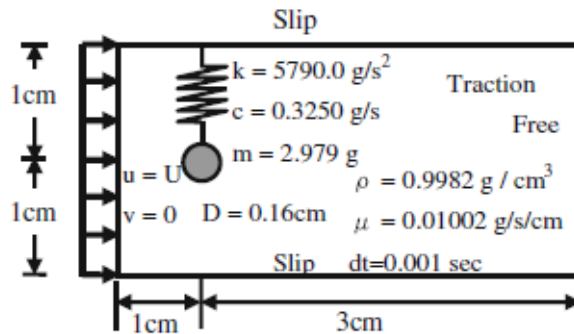


Figure 1. Analysis model

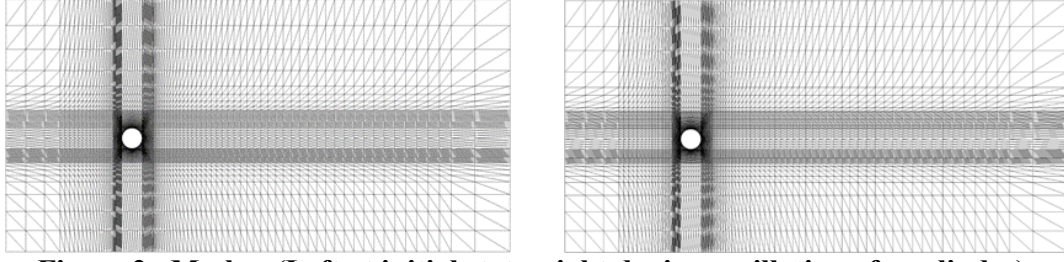


Figure 2. Meshes (Left at initial state, right during oscillation of a cylinder)

The motion of a rigid body can be given by the following equation,

$$m\alpha + c\nu + k\delta = X \quad (5)$$

with

$$\nu = \frac{d\delta}{dt}, \quad \alpha = \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (6)$$

Where m , c , and k represent the mass, the damping, and the stiffness, respectively. X is the force acting on the body. δ is the displacement of the rigid body. For solving this equation, the Newmark-beta method is used. This analysis is carried out for 4 cases of the Reynolds number equal to 100, 110, 120, and 130, respectively.

Figure 3 shows the amplitude of the oscillation of the cylinder and trailing vortex frequency versus Reynolds number, respectively. It is seen from this figure that as upstream flow rate changes, the amplitude of the cylinder oscillation and the trailing vortex frequency change. Especially, when Reynolds number is 110 or 120, vortex frequency is locked at the eigen frequency of the cylinder, whereas the spring amplitude is larger at these Reynolds numbers.

The left figure of Figure 4 shows the streamline around the cylinder with Reynolds number equal to 130, while the right figure shows the case with Reynolds number equal to 110. These indicate that the “lock-in” increases the amplitude of the cylinder oscillation and also causes larger wake flow. It has been reported by the visualization experiment that wake flow widens during the lock-in phenomenon, which indicates that the present result is reasonable.

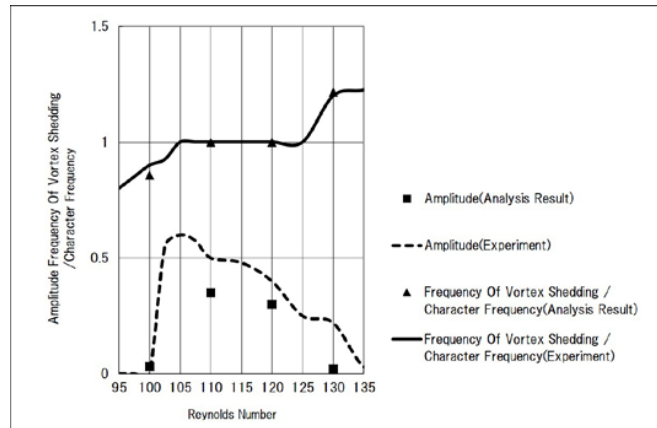


Figure 3. Vibration amplitude and vortex shedding frequency of a cylinder versus Reynolds number

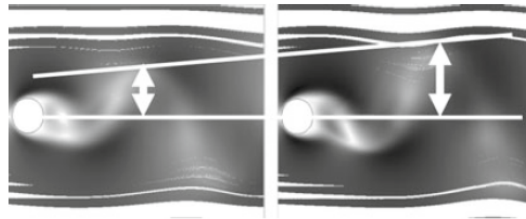


Figure 4. Streamline behind cylinders at lock-in and non-lock-in states (Left $Re = 130$; At non-locking state, right $Re = 110$; At locking state)

4. Structure Analysis Method

In this chapter, detail of Enriched Free Mesh Method (EFMM) is described.

4.1 Fundamental Concept of Enriched Free Mesh Method

Enriched Free Mesh Method (EFMM) [14] used for the structure analysis in this study is based on Free Mesh Method (FMM) [31,32], which is one of mesh-less methods. The most important feature of FMM is that it requires only the coordinate data of each node in analysis domains as the input information. Based on the given coordinate data of nodes, a local triangular elements cluster is created at each node. To produce such a local triangular elements cluster, there are a variety of methods including the diagonal comparison method, the gift wrapping method, and the method for developing a Delaunay triangle [33,34] for each central node based on the planar relative relation between a Voronoi polygon and a Delaunay triangle.

Here, the node located at the center of local triangular elements cluster is called the central node, while nodes located at the edge of the elements cluster are called the satellite nodes (see Fig 5).

The stiffness matrix of this local elements cluster is calculated with the same way as the conventional FEM, and only the row components of the central node of the local triangular elements cluster are added to the global stiffness matrix. By performing this procedure for all the nodes in the analysis domain, it is possible to obtain the stiffness matrix for the global analysis domain. Then, the resulted final solution becomes equal to that of FEM.

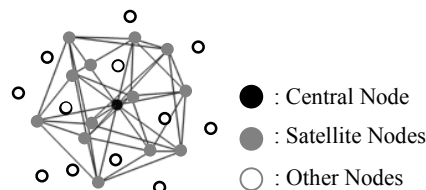


Figure 5. Local triangular elements cluster

4.2 Formulation of EFMM

It is known that FMM has the difficulty in using mid-side noded elements due to its automatic element production algorithm. In order to overcome this problem with FMM, EFMM has been developed, where it is assumed that a local triangular elements cluster has an arbitrary strain field in addition to a displacement field like the conventional FEM or FMM (see. Fig 6).

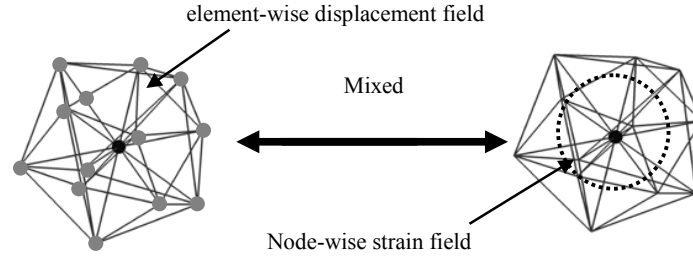


Figure 6. Two independent fields postulated in a local triangular elements cluster

In EFMM, the displacement and the strain fields are, respectively, assumed in independent locations, and these two fields are linked with the Hellinger-Reissner principle [35]. The principle, in which displacement u and strain ε are assumed to be independent variables, is given by

$$\Pi(\varepsilon, u) = \int_{\Omega} \{\varepsilon\}^T [D] \{\partial u\} d\Omega - \frac{1}{2} \int_{\Omega} \{\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} d\Omega - \int_{\Omega} \{u\}^T \{b\} d\Omega - \int_{S_{\sigma}} \{u\}^T \{\tilde{t}\} dS \quad (7)$$

with

$$\{\partial u\} = [B] \{\bar{u}\}, \{u\} = [N^u] \{\bar{u}\}, \{\varepsilon\} = [N^{\varepsilon}] \{\bar{\varepsilon}\} \quad (8)$$

Where $\{\bar{u}\}$ represents the nodal displacement, $\{\bar{\varepsilon}\}$ the unknown parameter of strain, $\{b\}$ the body force, $\{\tilde{t}\}$ the surface force on the boundary S_{σ} , and Ω the analysis domain. $[N^{\varepsilon}]$ is an arbitrary function that determines the strain of a local region, which can be assumed as

$$[N^{\varepsilon}] = \begin{bmatrix} p^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p^T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p^T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p^T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p^T \end{bmatrix} \quad (10)$$

where

$$p^T = [1 \quad x \quad y \quad z] \quad (11)$$

The stationary condition of Eq. (7) is expressed by

$$\int_{\Omega} \delta \{\varepsilon\}^T [D] ([B] \{\bar{u}\} - [N^{\varepsilon}] \{\bar{\varepsilon}\}) d\Omega = 0 \quad (12)$$

and

$$\int_{\Omega} \delta\{u\}^T [B]^T [D] [N^e] \{\bar{\varepsilon}\} d\Omega - \int_{\Omega} \delta\{u\}^T \{b\} d\Omega - \int_{S_{\sigma}} \delta\{u\}^T \{\tilde{t}\} dS = 0 \quad (13)$$

These equations are written as follows,

$$\begin{bmatrix} -A & C \\ C^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\varepsilon} \\ \bar{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

where

$$\begin{cases} A = \int_{\Omega} [N^e]^T [D] [N^e] d\Omega \\ C = \int_{\Omega} [N^e]^T [D] [B] d\Omega \\ f_1 = 0 \\ f_2 = \int_{\Omega} [N^u]^T \{b\} d\Omega + \int_{\Gamma} [N^u]^T \{\tilde{t}\} d\Gamma \end{cases} \quad (15)$$

Next, Eq. (14) is condensed to the following equation:

$$C^T (A^{-1} C \bar{u}) = f_2 \quad (16)$$

Finally, the local enriched stiffness matrix is derived as

$$[k_{HR}] = C^T A^{-1} C \quad (17)$$

Above enriched stiffness matrix is expected to give more accurate solutions than the usual FEM or FMM with the linear displacement base. The following section demonstrates that EFMM with the use of Eq. (17) is more accurate than the conventional FEM in a simple demonstrative example.

4.3 Numerical example for accuracy check

In this section, describe difference of analysis accuracy computed by EFMM and FEM. Cantilever beam model as shown in Fig. 7 is used for accuracy comparison between FEM and EFMM.

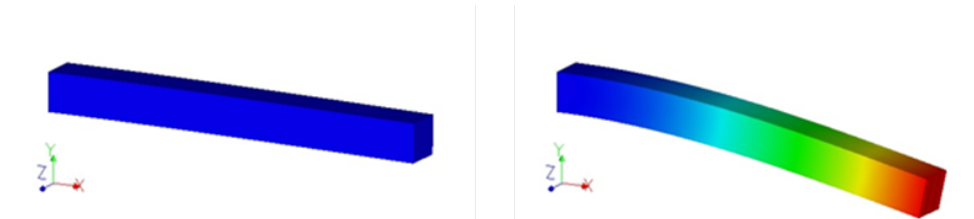


Figure 7. Analysis model and example of analysis result

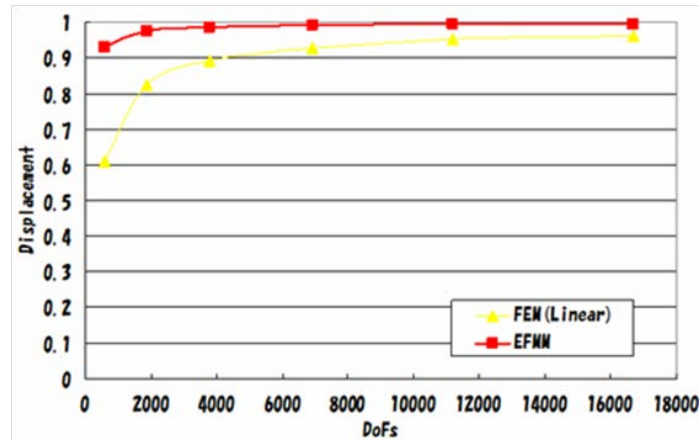


Figure 8. Accuracy comparison with FEM and EFMM

In the Fig.8, x-axis means number of degree of freedoms of analysis model. On the other hand, y-axis means normalized displacement.

From this result, it is obvious that analysis accuracy of EFMM becomes better than conventional FEM.

However, algorithm of EFMM is different from conventional FEM therefore, specific parallelization method for EFMM is needed.

Next chapter, specific parallelization method of EFMM is described.

5. Parallelization Method for Enriched Free Mesh Method

In this chapter, we describe about specific parallelization method for EFMM. In addition, numerical example that to prove a verification of the validity and parallel efficiency of this method are shown.

Incidentally, authors have been already proposed simplified parallelization method for EFMM [36]. This method have strongpoint but it is revealed that this method have some issues. Therefore simplified parallelization method is not able to apply into large scale analysis.

The specific parallelization method that is described in this chapter is able to overcome these problems.

5.1 Fundamental Concept of Parallelization Method

In this section, we describe the specific parallelization method for EFMM. In the case of conventional parallelization method for FEM, analysis domain is divided into some local domains by domain decomposition method, and create communication table. Then communication is done using communication table.

On the other hand, in the case of specific parallelization method for EFMM introduced by us is needed one more process. In particular, node on interface of each local domain have to search node to create correct local elements cluster.

A flowchart of parallelization method for EFMM is as shown Fig. 24.

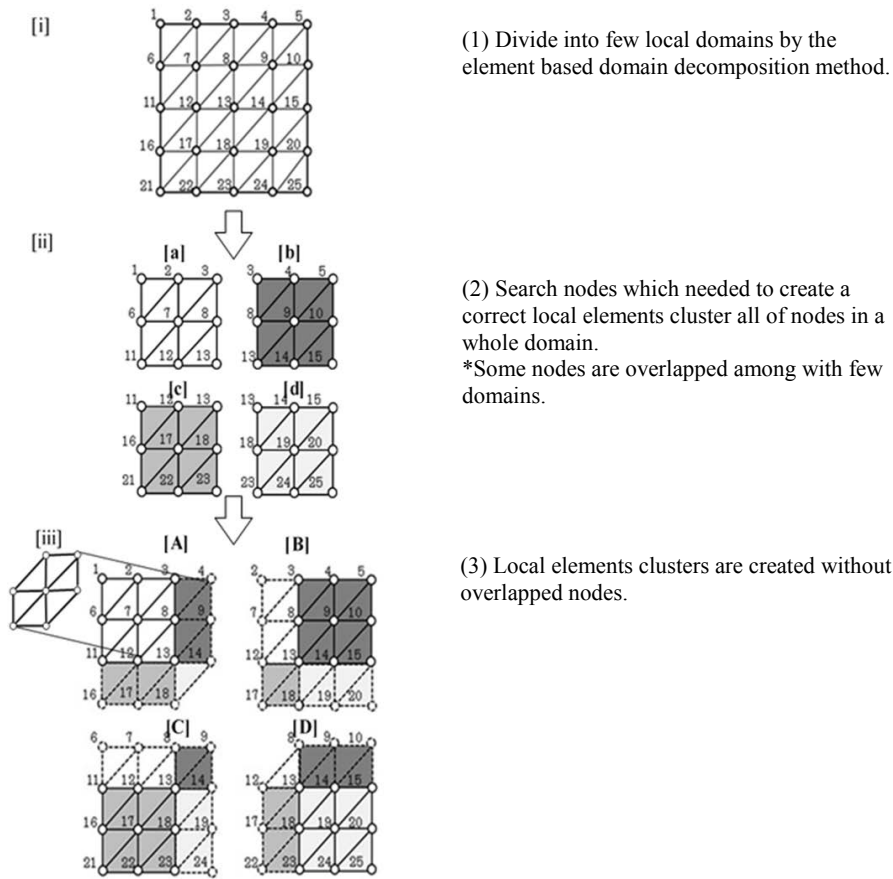


Figure 9. A concept of domain decomposition for parallel EFMM

All node in local domain can create correct local elements cluster by expand local domain as shown in Fig. 9. However additional nodes in the process [iii] can't create correct local elements cluster. Therefore, it can't be maintained consistency in the whole analysis area. To solve this problem, following communication process is added.

1. Matrix-vector product in each local domain. (All nodes are evaluated in any one of a local domain.)
2. Send computed value of one layer inside node to other domain that compensate for the lack of value. At this time, received value is added.
3. Send and receive value of node on interface between adjacent local domains.
4. Receive computed value of one layer outside node to other domain that compensate for the lack of value. At this time, received value is overwritten.

In short, communication of node data between each local domain will be incompatible. In particular, example of communication table between local domain [A] and [B] is shown in Table 1.

Parallelization of EFMM become possible by above calculation procedure.

Table 1. An example of communication table

	Send	Receive	Send & Receive
Local domain [A]	2,7,12	4,9,14	3,8,13
Local domain [B]	4,9,14	2,7,12	3,8,13

5.2 Evaluation of soundness of algorithm

In this section, describe a verification result of numerical example to prove soundness of proposed algorithm.

Communication tables made for parallel EFMM are different depending on domain decomposition because nodes needed communication are incompatible. Moreover, communication table will become more complicate than conventional parallel FEM.

In this paper, three types of models are used to confirm an evaluation of our proposed parallelization method.

1. Maximum number of adjacent domains : 2
2. Maximum number of adjacent domains : 4
3. Maximum number of adjacent domains : 8

5.2.1 Maximum number of adjacent domain is 2

In this subsection, describe evaluation results using model that is maximum number of adjacent domain is 2. Evaluation model is cantilever beam model shown in Fig 10. Analysis conditions are also written in Fig 10. Number of processors for this numerical example is 2 PEs.

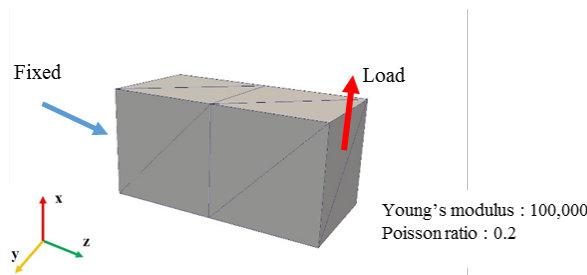


Figure 10. Analysis model

Fig 11 shows analysis results. An analysis result obtained by single computing is shown in left hand side. The other one is an analysis result obtained by 2 parallel computing.

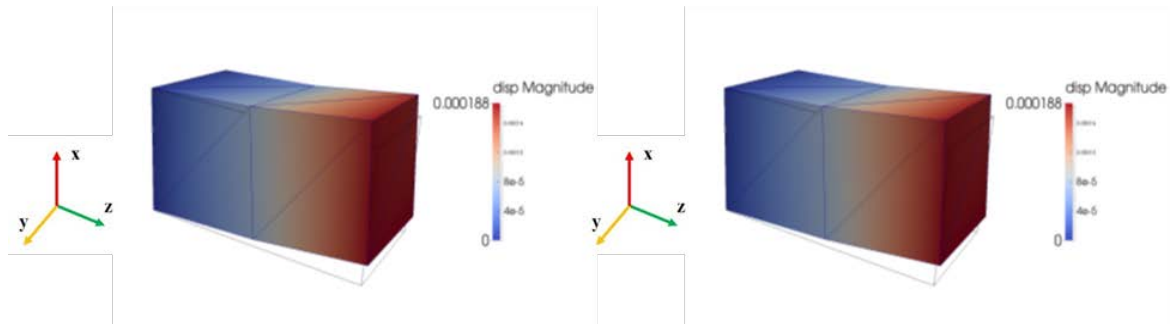


Figure 11. Analysis results (L : Single analysis , R : Parallel analysis)

Obtained maximum displacement of x direction that is computed by single computing and parallel computing is 0.000188. Analysis result obtained by single computing and parallel computing are completely same. From these result, it is revealed that our proposed parallelization method is able to calculate correctly in the case of maximum number of adjacent domain is 2.

5.2.2 Maximum number of adjacent domain is 4

In this subsection, describe evaluation results using model that is maximum number of adjacent domain is 4. Evaluation model is cantilever beam model shown in Fig 11. Evaluation model is simple as same as previous evaluation model but a shape of cantilever

beam is little bit different from previous evaluation model. Analysis conditions are written in Fig 12. Number of processors for this numerical example is 4 PEs.

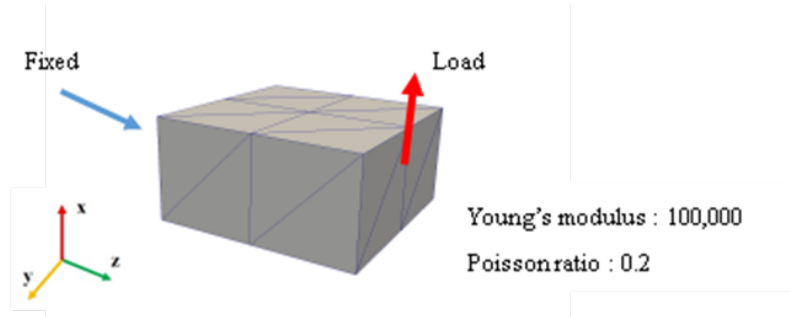


Figure 12. Analysis model

Fig 13 is analysis results obtained by single computing and parallel computing. Single analysis result is shown in (a). (b) is an analysis results computed by 4 PEs.

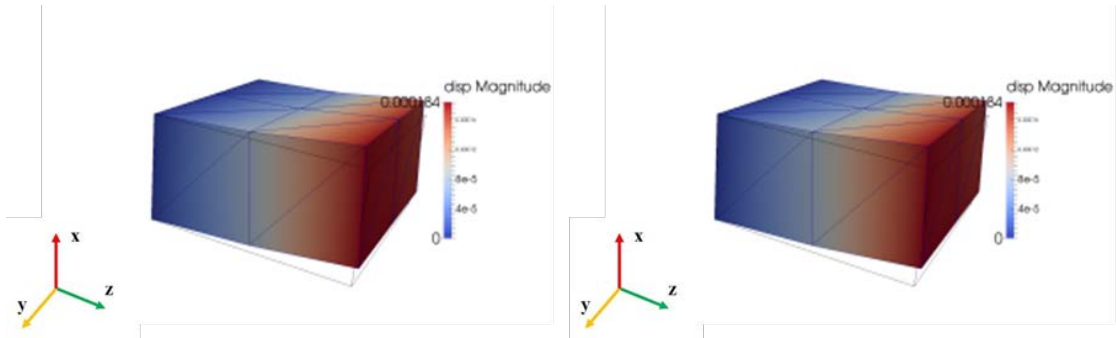


Figure 13. Analysis results (L : Single analysis , R : Parallel analysis)

Obtained maximum displacement of x direction of single analysis and parallel computing are 0.00184. Compared with previous case, communication table becomes more complicate and necessary communication domain is increased but both methods are obtained completely same result. From these results, it is revealed that our proposed parallelization method is able to calculate correctly in the case of maximum number of adjacent domain is 4.

5.2.3 Maximum number of adjacent domain is 8

Finally, in this subsection, describe evaluation results using model that is maximum number of adjacent domain is 8. Evaluation model is simply cantilever beam model as shown in Fig 14. In this case, number of processor that is using for analysis evaluation is 8. Analysis conditions are written in Fig 14.

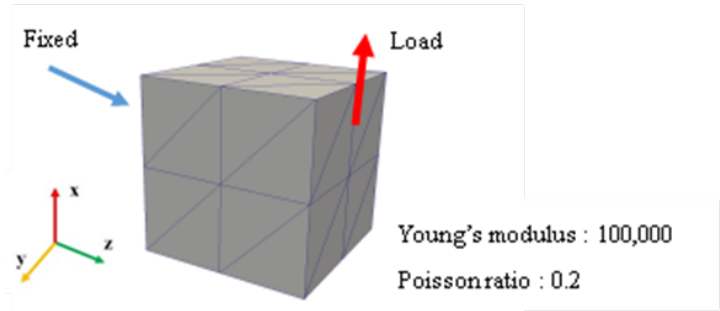


Figure 14. Analysis model

Fig 15 shows analysis results. Single computing result is shown in the left hand side. On the right hand side, parallel computing result is shown.

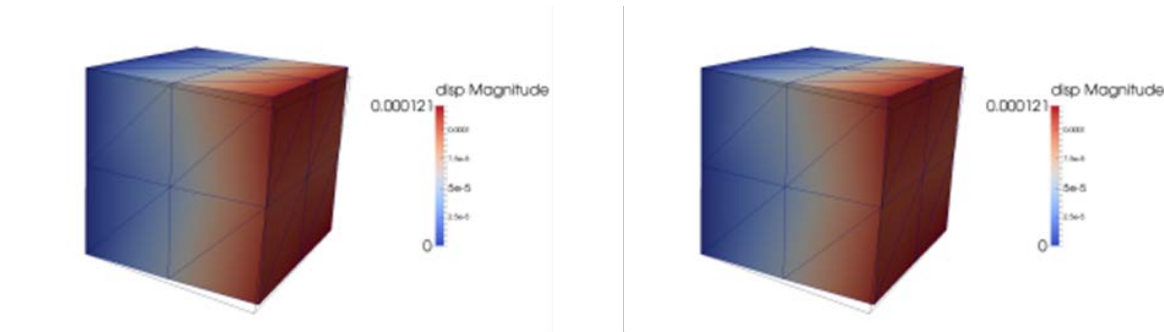


Figure 15. Analysis results (L : Single analysis , R : Parallel analysis)

Obtained maximum displacement of x direction computed by single computing and parallel computing are 0.000121. In short, analysis results are completely same. From this result, it is obvious that our proposed algorithm is able to apply into large analysis that is needed communication between many local domains.

5.3 Numerical Example for accuracy check

As previously described, evaluation of our proposed parallelization method for EFMM is proven. In this section, describe about analysis accuracy of parallelization EFMM. Cantilever beam model shown in Fig 16 are used to prove our proposed parallelization method. Analysis conditions and analysis mesh model are shown in Fig 16.

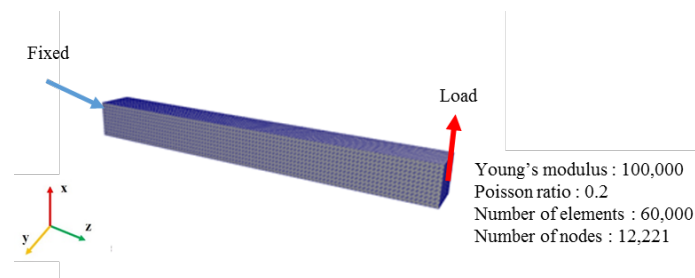


Figure 16. Analysis model

Calculate in accordance with this analysis condition, maximum displacement to tip of cantilever beam is 0.04.

Three types of models are used for evaluation. In particular, single computing, 10 PEs and 20PEs. Detail of analysis mesh data of each case are shown in Table 2.

Table 2. Detail of each local domain

#PE	Number of elements	Number of nodes	Degree of freedoms
1	60,000	12,221	36,663
10	6,000	1,331	3,993
20	3,000	756	2,268

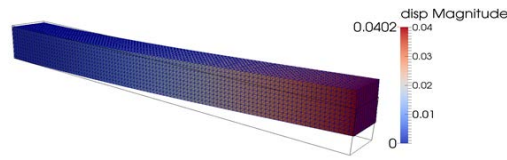


Figure 17. Analysis result

Fig 17 is an analysis result computed by single computing. Obtained displacement of tip of cantilever is 0.0402. From this result, it is obvious that this method can calculate high accuracy because error ratio between numerical result and theory is about 0.05%. Of course analysis results of single computing, 10 PEs and 20 PEs are completely same.

From this result, it is determine that our proposed parallelization method for EFMM is able to calculate correctly.

5.4 Numerical Example for Parallel Efficiency

In this section, describe parallel efficiency of our proposed parallelization method for EFMM. Evaluation model of parallel efficiency is shown in Fig 18. Detail of analysis model and analysis conditions are written in Fig 18.

Parallel efficiency is measured two methods. One is a strong-scaling, the other one is a weak-scaling. Here, this evaluation test is used Kei computer.

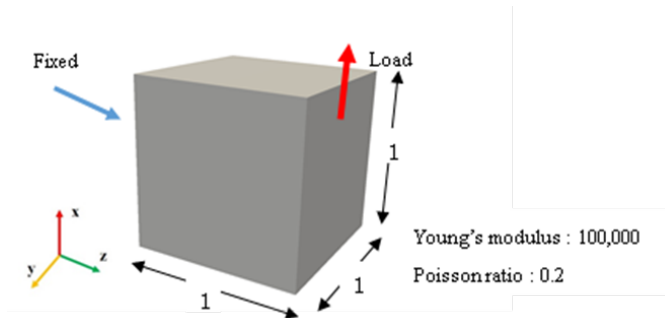


Figure 18. Analysis model

5.4.1 Strong Scaling

First, evaluation result of parallel efficiency that is measured by strong-scaling is shown in this subsection

Table 3 shows detail of whole analysis model that is used for verification of parallel efficiency. Number of elements, number of nodes and degree of freedoms written in Table 4. These are detail of mesh model that is used for each parallel computing.

Table 3. Detail of whole analysis model

Number of elements	7,558,272
Number of nodes	1,295,029
Degree of freedoms	3,885,087

Table 4. Detail of each local domain

#PE	Number of elements	Number of nodes	Degree of freedoms
16	472,392	84,700	254,100
54	139,968	26,011	78,033
144	52,488	10,108	30,324
432	17,496	3,610	10,830

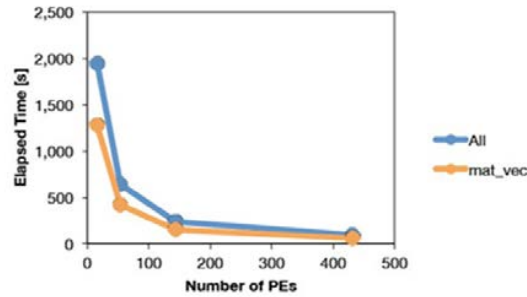
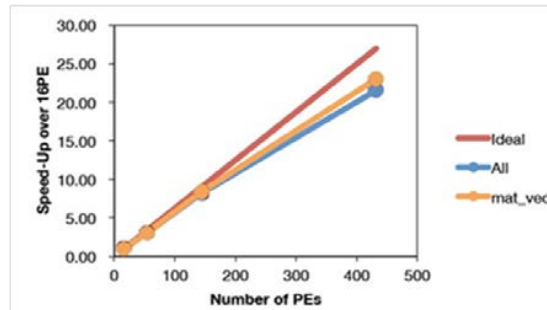
Parallel efficiency that is measured by Kei computer is shown in Table 5. Results of parallel efficiency and speed up are calculated based on 16 PEs.

In addition, whole computing time and time for matrix vector product are calculated in this evaluation. Because, matrix vector product process is needed many time. Therefore, decreasing of calculation time for this process is very important point.

Table 5. Parallel efficiency

#PE	Elapsed [s]		#CGIter	Speed-Up 16PE			Parallel Efficiency	
	All	mat_vec		All	mat_vec	Ideal	All	mat_vec
16	1,944	1,273	1,375	1.00	1.00	1.00	100.0%	100.0%
54	639	416	1,375	3.04	3.06	3.38	90.1%	90.6%
144	237	151	1,375	8.21	8.41	9.00	91.2%	93.4%
432	90	55	1,375	21.54	23.02	27.00	79.8%	85.3%

Changes in calculation time, acceleration ratio and parallelization ratio are shown in Fig 19, Fig 20 and Fig 21.

**Figure 19. Changes in computing time****Figure 20. Changes in acceleration ratio**

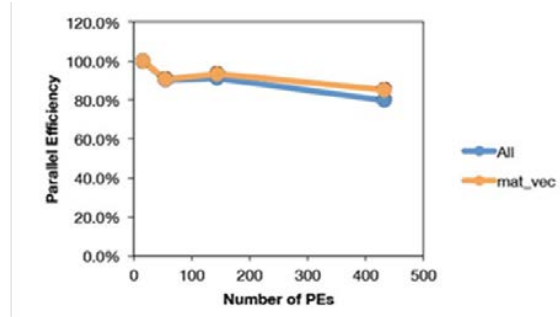


Figure 21. Changes in parallel efficiency

Parallel efficiency becomes worse because percentage of communication time in the whole analysis is increase because calculation scale of each nodes become smaller. This is a feature of strong scaling. However, in view of performance evaluation and calculation scale, it can be said these results are sufficient good performance is obtained.

Moreover, following Table 6 and Fig 22 show a percentage of main routine in the whole computing time. From these table and figure reveal that matrix vector product process occupy 60% in the whole computing time. Therefore, speed up of matrix vector product is very important to obtain more highly parallel efficiency.

Reason of increase of percentage of other process is caused by feature of strong scaling.

In particular, it is considered that amount of communication cost will become increase along with increasing of number of nodes.

Table 6. Detail of each local domain

	4M DoF 16PEs	4M DoF 54PEs	4M DoF 144PEs	4M DoF 432PEs
Matrix vector product	65.51%	65.15%	63.96%	61.29%
Calculation time for making stiffness matrix	30.26%	30.35%	31.01%	31.79%
Others	4.23%	4.50%	5.03%	6.93%

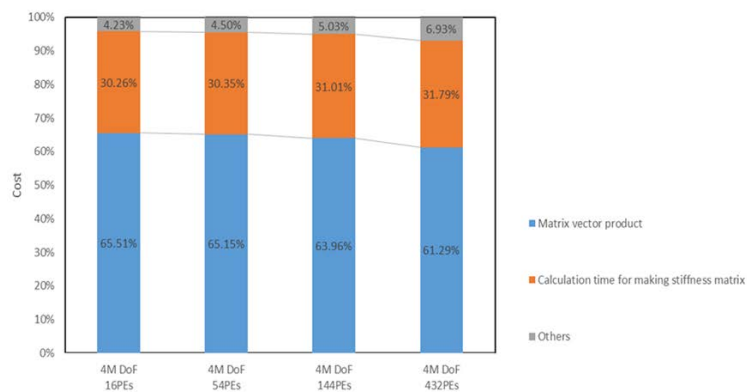


Figure 22. Percentage of primary routine

5.4.2 Weak Scaling

In this subsection, describe an evaluation result of parallel efficiency measured by weak scaling. Detail of analysis model that is used for this evaluation is shown in Table 7. And Table 8 shows a detail of analysis model for each parallel analysis.

Table 7. Detail of analysis model

Number of elements	472,392
Number of nodes	84,700
Degree of freedoms	254,100

Table 8. Detail of analysis model for each parallel analysis

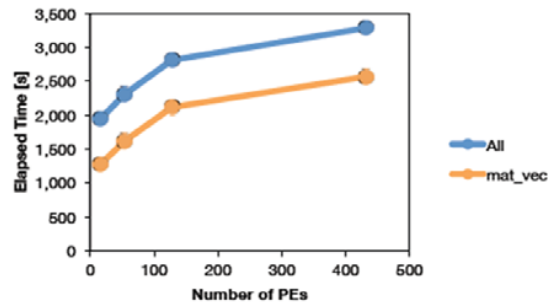
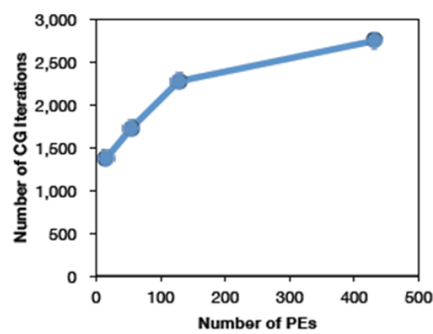
#PE	Number of elements	Number of nodes	Degree of freedoms
16	7,558,272	1,295,029	3,885,087
54	25,509,168	4,330,747	12,992,241
144	60,466,176	10,218,313	30,654,939
432	204,073,344	34,328,125	102,984,375

Parallel efficiency analysis measured by weak scaling that is computed by Kei computer is shown in Table 9. In this table, whole computing time and time for matrix vector product are written.

Table 9. Result of measurement of parallel efficiency

#PE	Elapsed [s]			#CG Iter
	All	mat_vec	1 mat_vec	
16	1,944	1,273	1,375	1,375
54	2,304	1,614	1,375	1,726
144	2,813	2,115	1,375	2,276
432	3,286	2,568	1,375	2,747

Moreover, Fig 23, 24 and 25 show changes in computing time, matrix vector product, number of iterations and time for matrix vector product

**Figure 23. Changes in computing time****Figure 24. Changes in number of CG iterations**

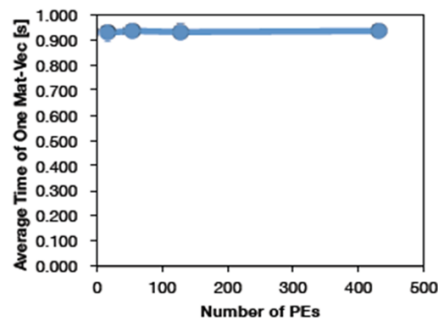


Figure 25. Changes in average time of one matrix-vector product

Number of iterations of CG method will be increased along with increasing of number of degree of freedoms of analysis model. Therefore, total computing time is also increased.

However, computing time for matrix vector product is kept substantially constant. In short, it can be determined that increasing of total computing time is caused by increasing of number of iterations.

Moreover, Table 10 and Fig 26 show a percentage of a computing time of main routine in a total computing time.

From following table and figure, it is obvious that percentage of computing for a matrix vector product time is increased along with increasing of an analysis scale.

In view of results of strong scaling and weak scaling, improvement of process for matrix vector product is very important that to obtain high parallel efficiency using our proposed parallelization method.

However, it is proved that our proposed parallelization method for FMM is able to apply large scale analysis like an about 100 million degree of freedoms from measurement results.

Table 10. Percentage of primary routine

	4M DoF 16PEs	13M DoF 54PEs	31M DoF 144PEs	103M DoF 432PEs
Matrix vector product	65.51%	70.04%	75.21%	78.13%
Calculation time for making stiffness matrix	30.26%	26.08%	21.35%	18.48%
Others	4.23%	3.88%	3.44%	3.39%

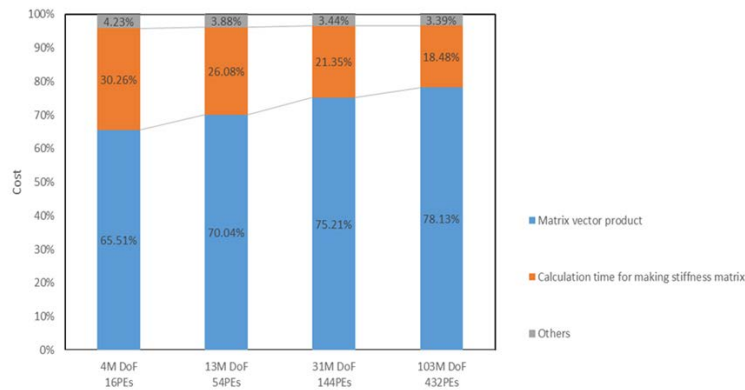


Figure 26. Percentage of primary routine

5.5 Conclusion

In this chapter, parallelization algorithm for EFMM that was too difficult to apply into large scale analysis is introduced and implemented.

Our proposed parallelization method was verified a parallel efficiency by weak scaling and strong scaling. From obtained verified results, it is obvious that speed up of matrix vector

product is very important to obtained higher parallel efficiency by our proposed parallelization method.

However, our proposed method is able to apply into large scale analysis and obtained fine analysis result. Therefore, it can be said that our proposed parallelization method is an effective method from verified results.

From this perspective, EFMM can be expected to be applied into wider field (ex : fluid-structure coupled phenomenon) by our proposed parallelization method.

6. Analysis

In this chapter, outline of our proposed fluid-structure coupled analysis method is described.

6.1 Flow chart

In this section, explain about analysis flow of our proposed method.

Fig 27 is flow chart of our proposed method.

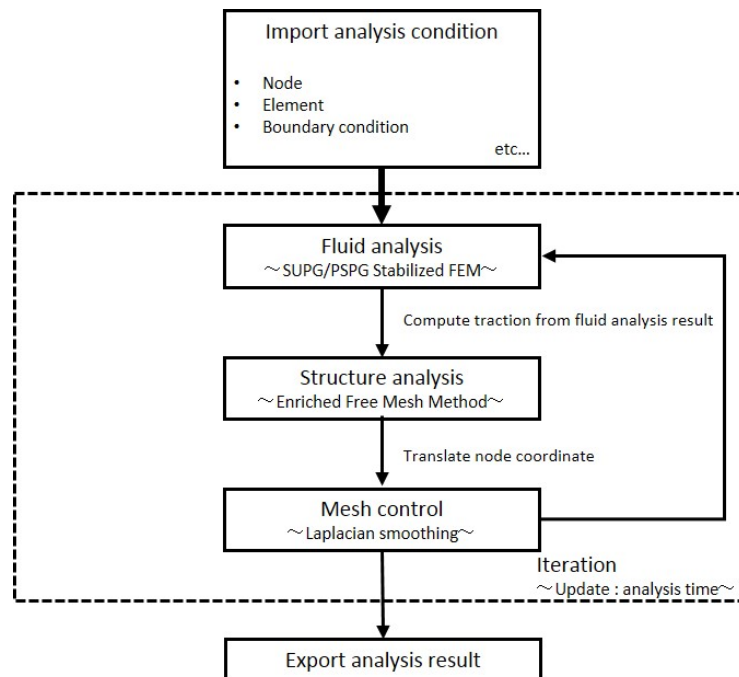


Figure 27. Flow chart of fluid-structure coupled analysis

First, import an analysis model.

Second, solve fluid analysis field by FEM. And calculate traction of fluid-structure interface. Next, solve structure analysis field using EFMM. At this time traction that is calculated by previous process is used as a load.

Then, coordinate of node is moved according to analysis result.

Iterate above processes to obtain fluid-structure coupled analysis result.

This is the flowchart of our proposed fluid-structure coupled analysis method.

6.2 Numerical Example

In this section, describe a numerical example that is conforming to an experiment.

Fig 28 shows an analysis model that is used for numerical example.

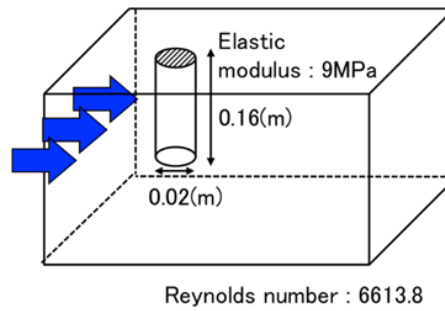


Figure 28. Analysis model

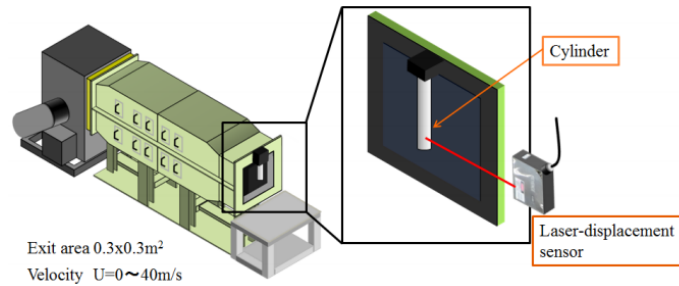


Figure 29. Experiment device

As shown in Fig 28, fluid flow is given to cylinder that is made by rubber. Upper side of cylinder is fixed. As an objective, elucidate difference of cylinder vibrations and relationship between flow velocity and physical properties of cylinder.

This numerical example is calculated accordance with experiment that is using experiment device as shown in Fig 29. Fig 30 is an analysis mesh model.

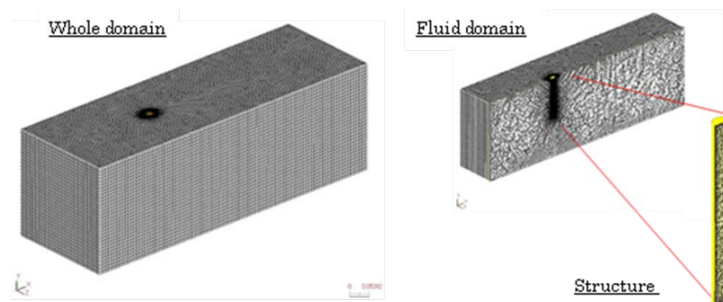


Figure 30. Analysis mesh model

Table 11. Detail of analysis mesh model data

	Fluid	Structure
Number of Nodes	944,121	94,768
Number of Elements	169,321	21,295



Figure 31. Experimental result (side)



Figure 32. Experimental result (upper side)

Experiment result shows in Fig 31 and 32.

A Cylinder did not vibrate under this experiment condition. As a behavior of cylinder that is simply bended by fluid flow. Observed displacement was very small. In particular, maximum displacement of bottom of cylinder was only 0.0005m.

Next, numerical analysis result is shown in Fig 33. Color contour in this figure means displacement. Obtained displacement is 0.0063m, amount of bending of cylinder is bigger than experiment result.

Error ratio between numerical result and experimental result is about 20%.

Unfortunately, effectiveness of our proposed method can't prove from this numerical result.

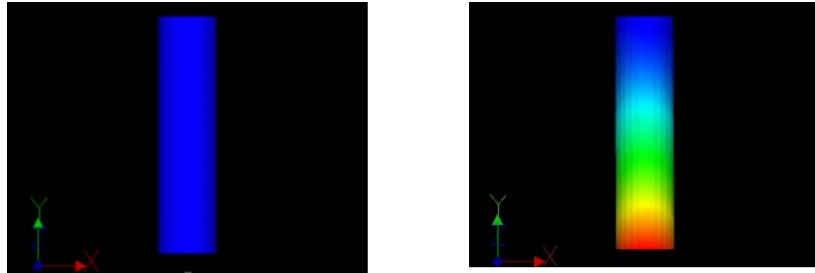


Figure 33. Numerical analysis result (side)

7. Conclusion

In this paper, proposed the new fluid-structure coupled analysis method that is combining SUPG/PSPG stabilized FEM and Enriched Free Mesh Method to solve fluid-structure coupled phenomenon.

Most important issue of this method was parallelization of EFMM. Because EFMM is needed the specific treatment to apply into parallel computing.

In this paper, proposed the specific parallelization method for EFMM and proved an effectiveness of this method. By evaluation result, our proposed method proved that is able to solve about 100 million degree of freedoms problem.

Our proposed method has already proven that can obtain fine analysis result by a qualitative evaluation [37]. But quantitative evaluation result and observation result were significantly different. From obtained result, quantitative evaluation of our proposed method was not able to prove.

As a future work, change experimental condition and continue evaluation to prove soundness of our proposed fluid-structure coupled analysis method.

However, proposed parallel fluid-structure coupled analysis method can be expected to be obtained fine analysis result. Because, the method has proven that to obtain fine analysis result of structure analysis and fluid analysis, moreover, highly parallel efficiency of each analysis field can be obtained.

References

- [1] Zienkiewicz OC, Taylor RL (2000) The finite element method, 5th edn. Elsevier, Amsterdam
- [2] Hughes TJR (1987) The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis. Prentice Hall, New York

- [3] Zienkiewicz OC, Taylor RL, Nithiarasu P (2005) The finite element method for fluid dynamics, 6th edn. Elsevier, Amsterdam
- [4] Brooks AN, Hughes TJR (1982) Streamline upwind/Petrov–Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier–Stokes equations. *Comput Methods Appl Mech Eng* 32:199–259
- [5] Tezduyar TE (1992) Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations. *Adv Appl Mech* 28:1–44
- [6] Tezduyar TE, Mittal S, Ray SE, Shih R (1992) Incompressible flow computations with stabilized bilinear and linear equal-order interpolation velocity-pressure elements. *Comput Methods Appl Mech Eng* 95:221–242
- [7] Tezduyar TE (2003) “Computation of Moving Boundaries and Interfaces and Stabilization Parameters”. *Int J Numer Methods Fluids* 43:555–575
- [8] Tezduyar TE, Sathe S, Keedy R, Stein K (2006) Space-time finite element techniques for computation of fluid-structure interactions. *Comput Methods Appl Mech Eng* 195:2002–2027
- [9] Tezduyar TE, Sathe S (2007) Modeling of fluid-structure interactions with the space-time finite elements: solution techniques. *Int J Numer Methods Fluids* 54:855–900
- [10] Tezduyar TE, Sathe S, Pausewang J, Schwaab M, Christopher J, Crabtree J (2008) Interface projection techniques for fluidstructure interaction modeling with moving-mesh methods. *Comput Mech* 43:39–49
- [11] Tezduyar TE, Takizawa K, Moorman C, Wright S, Christopher J (2010) Multiscale sequentially-coupled arterial FSI technique. *Comput Mech* 46:17–29
- [12] Takizawa K, Moorman C, Wright S, Christopher J, Tezduyar TE (2010) Wall shear stress calculations in space-time finite element computation of arterial fluid-structure interactions. *Comput Mech* 46:31–41
- [13] Takizawa K, Tezduyar TE (2011) Multiscale space-time fluidstructure interaction techniques. *Comput Mech*. doi:10.1007/s00466-011-0571-z
- [14] Yagawa G, Matsubara H (2007) Enriched free mesh method: an accuracy improvement for node-based fem, computational plasticity. *Comput Methods Appl Sci* 7:207–219
- [15] Franca LP, Frey SL (1992) Stabilized finite element methods II. The incompressible Navier–Stokes equations. *Comput Methods Appl Mech Eng* 99:209–233
- [16] Zhang S (1997) GPBi-CG generalized product-type methods based on Bi-CG for solving non-symmetric linear systems. *SIAM J Sci Stat Comput* 18:537–551
- [17] Thuthu M, Fujino S (2008) Stability of GPBiCG AR method based on minimization of associate residual. *ASCM* 5081:108–120
- [18] Belytschko T, Flanagan DF, Kennedy JM (1982) Finite element method with user-controlled meshes for fluid-structure interactions. *Comput Methods Appl Mech Eng* 33:689–723
- [19] Huetra A, Liu WK (1988) Viscous flow with large free surface motion. *Comput Methods Appl Mech Eng* 69:277–324
- [20] Huetra A, Liu WK (1988) Viscous flow structure interaction. *J Press Vessel Technol* 110:15–21
- [21] Nitikipaboon C, Bathe KJ (1993) An arbitrary Lagrangian-Eulerian velocity potential formulation for fluid-structure interaction. *Comput Struct* 47:871–891
- [22] Bathe KJ, Nitikipaboon C, Wang X (1995) A mixed displacement- based finite element formulation for acoustic fluid-structure interaction. *Comput Struct* 56:225–237
- [23] Bathe KJ, Zhang H, Wang MH (1995) Finite element analysis of incompressible and compressible fluid flows with free interfaces and structural interactions. *Comput Struct* 56:193–213
- [24] Chakrabarti SK (2007) Fluid structure interaction and moving boundary problems. WIT Press, Southampton
- [25] Mittal S, Tezduyar TE (1992) A finite element study of incompressible flows past oscillating cylinders and airfoils. *Int J Numer Methods Fluids* 15:1073–1118
- [26] Tezduyar TE, Behr M, Liou J (1992) A new strategy for finite element computations involving moving boundaries and interfaces – the deforming-spatial -domain/space-time procedure: I. The concept and the preliminary
- [27] Tezduyar TE, Behr M, Mittal S, Liou J (1992) A new strategy for finite element computations involving moving boundaries and interfaces – the deforming-spatial-domain/space-time procedure: II. Computation of free-surface flows, two-liquid flows, and flows with drifting cylinders. *Comput Methods Appl Mech Eng* 94: 353–371
- [28] Nomura T (1992) Finite element analysis of vortex-induced vibrations of bluff cylinders. *J Wind Eng* 52:553
- [29] Anagnostopoulos P, Bearman PW (1967) Response characteristics of vortex-excited cylinder at low Reynolds numbers. *J Fluids Struct* 6:501–502
- [30] Koopman GH (1967) The vortex wakes of vibrating cylinders at low Reynolds numbers. *J Fluid Mech* 28:501–502
- [31] Yagawa G, Yamada T (1996) Free mesh method a new meshless finite element method. *Comput Mech* 18:383–386
- [32] Yagawa G, Yamada T (1996) Performance of Parallel computing of free mesh method. In: *Proceedings of the 45th National Congress of Theoretical & Applied Mechanics*

- [33] Berg M, Cheong O, Kreveld M, Overmars M (2008) Computational geometry: algorithms and applications, 3rd edn. Springer, New York
- [34] Inaba M, Fujisawa T, Okuda Y, Yagawa G (2002) Local mesh generation algorithm for free mesh method. The Japan Society of Mechanical Engineers [No. 02-9] Dynamic and Design Conference
- [35] Zienkiewicz OC, Taylor RL (1996) Matrix finite element method I (Revised new publication) Kagaku Gijutsu Shuppan, Inc
- [36] Nagaoka S, Nakabayashi, Y, Yagawa G, (2014) Parallelization of Enriched Free Mesh Method for Large Scale Fluid-Structure Coupled Analysis. Procedia Engineering 90
- [37] Nagaoka S, Nakabayashi, Y, Yagawa G, YJ Kim (2011) Accurate fluid-structure interaction computations using elements without mid-side nodes. Computational Mechanics Volume 48 Number 3.

High Accurate Analysis by Experiment and Simulation Using Bayesian Inference for Corrugated Cardboard

Masahiko Shimamura¹, Yoshitaka Ezawa²

¹Department of Mechanical Engineering, Toyo University

² Center for Computational Mechanics Research, Toyo University

Abstract

Corrugated cardboards are used in many fields. The design of corrugated cardboard, however, is based on experimentations. The subject of this paper is developing the technique for high accurate analysis of corrugated cardboards. The corrugated cardboard is complicated structures and its property is unknown. Therefore, it is difficult to analyze this structure. We did bending tests of corrugated cardboard and its homogenized analysis using finite elements. We estimated its property by comparing both results. The experimentations include a lot of variation because the sample varies widely. Therefore model verification and validation is necessary. We used Bayesian inference for this purpose. In Bayesian inference, a priori probability is important. We compared three a priori probabilities. The first one is a uniform distribution which means no a priori information. The second one is a normal distribution which indicates a priori information about ambiguous data of the property. The third one is a normal distribution of which mean is the exact property. It is not realistic to use the third one. Numerical results show a uniform distribution is useful for estimating the property. The variance of Bayesian inference using a uniform distribution is wide, but the mean value becomes exact value quickly. The numerical results show the validity of Bayesian inference.

Key words : Corrugated cardboard, Finite element analysis, Data assimilation, Bayesian inference, Equivalent analysis

1. Introduction

Products that use composite materials, such as corrugated cardboard, are used in a wide variety of fields. Therefore, the importance of conducting numerical analysis of composite materials is increasing. When conducting numerical analysis of a composite material structure with anisotropic characteristics, one must give sufficient consideration to the parameters of composite material characteristics; therefore, to conduct a valid numerical analysis, it is important in engineering to calculate physical properties that are unique to the structure. In this study, we approached these issues using corrugated cardboard consisting of composite materials. In recent years, the use of corrugated cardboard has expanded, such as in transportation and cushioning material, and accurate strength design is necessary. However, corrugated cardboard parameters in a numerical analysis are adjusted based on literature and the previous experiences of the designer. Corrugated cardboard is structured by having a wave-shaped corrugating medium sandwiched between two base papers called liners. Since its flute is quite dense, it takes much time and effort to model, and it is impractical to run the usual finite element analysis as it requires too much cost and time to generate mesh for each flute. Therefore, numerical simulation of corrugated cardboards has not progressed. As such, to analyze subjects for which discretization is difficult with a finite element method due to its analysis domain regularly repeating with a microscopic structure as a unit, and its dense degree of repetition, a study that applies a homogenization technique is being conducted [1].

Therefore, it is quite effective to apply a homogenization technique to corrugated cardboard with the complex and microscopic structure of multiple flute [2][3]. To estimate the material properties of corrugated cardboard, in this study, by incorporating the experimental values of a bending test into numerical analysis using the homogenization technique, we were able to fully utilize the experimental results, and established a method that efficiently obtained the material properties, which are unknown parameters, using the response surface from the results of these numerical analyses. By comparing the results of numerical analysis of material properties with experimental values, we were able to verify its validity. In addition, to obtain material properties, we used experimental values of corrugated cardboards; however, the quality of corrugated cardboard materials is not uniform, and thus the reliability of analytical results obtained for material properties is essential in conducting numerical analysis. As such, the methodology of Model Verification & Validation (V&V) [4] that increases the reliability of analytical results against modeling errors and parameter uncertainties is gaining attention and Bayesian inference [5][6][7] in particular, is considered to be effective. There is no example of obtaining material properties of corrugated cardboard and conducting accuracy validation with the Model V&V. Therefore, we quantitatively evaluated uncertainties for material properties obtained using Bayesian inference, and examined the validity. Also In this paper, we conducted discussion on especially elastic modulus for material property.

2. Corrugated cardboard test method

2.1 Test material

Fig. 1(a) shows the structure of the single corrugated cardboard used for the experiment. Table 1 shows the dimensions, and Fig. 1(b) shows the load direction due to an indenter. In addition, in this study, we used B flute that consists of corrugating medium MC120 and liner LB180 that is compliant to JIS P 3902 and JIS P 3904, and the experiment was performed at a temperature of 11 degrees and humidity of 38%.

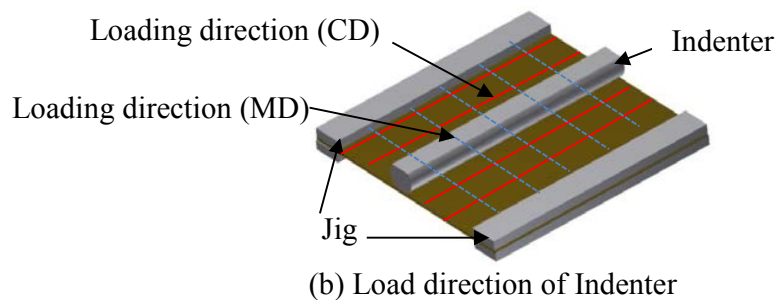
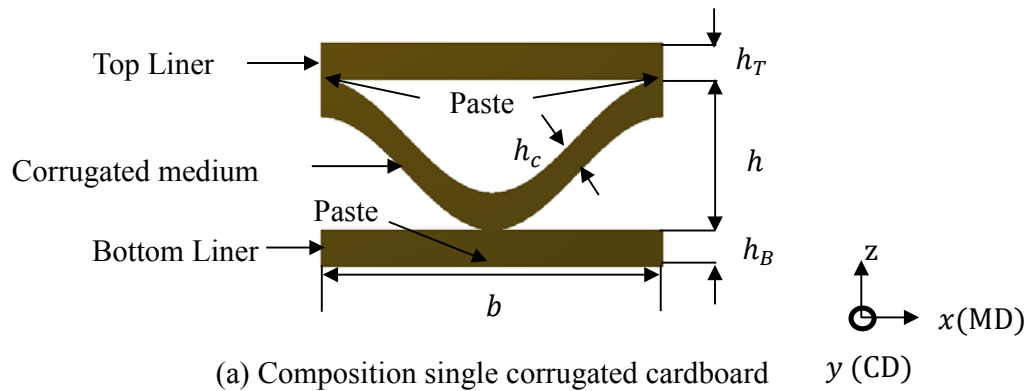


Figure 1. Composition single corrugated cardboard and loading

Table 1. Size of corrugated cardboard

h_T	h_B	h_c	h	b
0.3	0.3	0.3	2.4	6

(mm)

2.2 Bending test

To measure the flexural strength characteristics of corrugated cardboard, the sample was fixed with jigs and load was applied with an indenter as shown in Fig. 2. At the speed of 10 mm/min, tests were conducted in the CD and MD ten times until the flute was completely crushed. The test fragment was to be changed in each experiment. Load and displacement characteristics of the test results are shown in Fig. 3. It shows that with the maximum load, the bent part of the corrugated cardboard forms a line and buckling develops, confirming a rapid decrease in the load. Furthermore, when comparing each experimental result, there was a difference in the behavior of load and displacement, likely due to systematic errors.

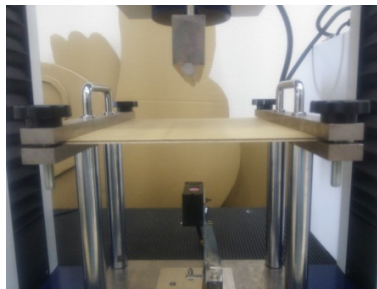


Figure 2. Bending test of corrugated cardboard

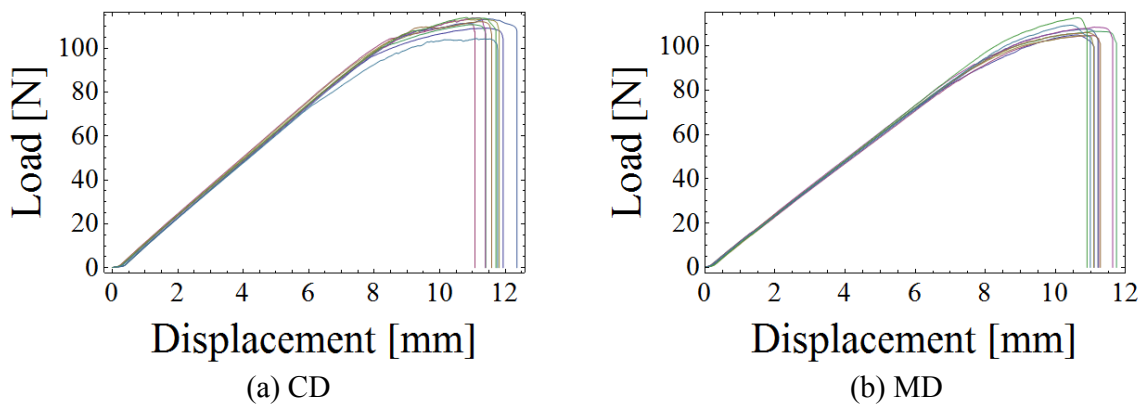


Figure 3. Results of bending test

3. Errors and the least square method

3.1 The regression line by the least square

Data obtained from the experiment have errors as long as there are human factors involved. If a theoretical model is applied to such experimental values, one may use the least square method to determine the most appropriate function. If the model function is a primary function, a single regression model can be expressed as follows:

$$f(x) = ax + b \quad (1)$$

If n data $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ is obtained:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (2)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (3)$$

By obtaining Eq. (2) and (3), the slope of Eq. (1) and the value for the intercept can be obtained. We used the results between displacement 0.5 and 2.0. These result shows linear response.

3.2 Pretreatment for regression line

The value of b of Eq. (1) depends on the setting of the indenter. This value is not important for the analysis. Therefore, we set the value of b at zero as in Eq. (4) to recreate the behavior of experiment values in a numerical simulation. The analysis domain was limited to a linear range ($0.5 \leq \text{displacement} \leq 2.0$). Fig. 4 shows regression lines of Eq. (1) obtained from the least square method and Eq. (4) in which the error due to the sample attachment is 0, in both the CD and MD.

$$y = ax \quad (4)$$

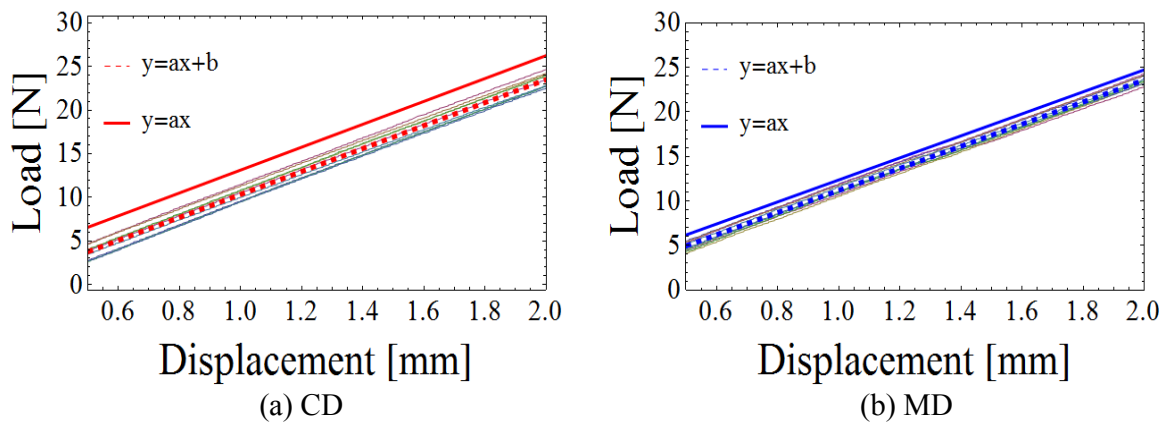


Figure 4. Analysis target area

4. Numerical analysis of corrugated cardboard

4.1 The homogenization technique

The homogenization technique [1] substitutes composite material with a microscopic periodic structure with an equivalent homogenous body and reflects the analysis of a microscopic basic structural unit (unit cell), consisting of one period of microscopic period structure, to evaluate macroscopic behavior. It is one of the effective averaging methods, and makes microscopic-macroscopic coupled behavior analysis possible. If we set the coordinate system of a macro structure as x , and the microscopic coordinate system of the unit cell as y , the following equation is established through microstructural parameter μ :

$$y_i = \frac{x_i}{\mu} \quad (5)$$

Assuming body force f that works in the domain Ω and surface force t that works in the domain Γ_t , the work of the virtual principle against the macro-model can be expressed as follows:

$$\int_{\Omega} D_{ijkl}^{\mu} \frac{\partial u_k^{\mu}}{\partial x_i} \frac{\partial v_i^{\mu}}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Omega} f_i v_i^{\mu} d\Omega + \int_{\Gamma_t} t_i v_i^{\mu} d\Gamma \quad (6)$$

where D_{ijkl}^{μ} is the elastic tensor. Displacement u^{μ} of a structure consisting of a microscopic structure with periodicity is asymptotically expanded.

$$u_i^{\mu} = u_i^0(x) + \mu u_i^1(x, y) + \dots, y_i = \frac{x_i}{\mu} \quad (7)$$

where the following equation can be established for Y -periodic function $\Psi(y)$:

$$\lim_{\mu \rightarrow 0} \int_{\Omega} \Psi\left(\frac{x}{\mu}\right) d\Omega = \frac{1}{|Y|} \int_{\Omega} \int_Y \Psi(y) dY d\Omega \quad (8)$$

Here, $|Y|$ represents the volume of the unit cell. Eq. (7) is substituted into Eq. (6) and rearranged, and by applying Eq. (8), it can be divided into Eq. (10) that expresses microstructure and Eq. (11) that expresses macrostructure.

$$\frac{1}{\varepsilon^2} \int_{\Omega} D_{ijkl}^{\varepsilon} \frac{\partial u_{0k}}{\partial y_l} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} d\Omega = 0 \quad (9)$$

$$\frac{1}{\varepsilon} \int_{\Omega} D_{ijkl}^{\varepsilon} \left[\left(\frac{\partial u_{0k}}{\partial x_l} + \frac{\partial u_{1k}}{\partial y_l} \right) \frac{\partial v_i}{\partial y_j} + \frac{\partial u_{0k}}{\partial y_l} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right] d\Omega = 0 \quad (10)$$

$$\int_{\Omega} D_{ijkl}^{\varepsilon} \left[\left(\frac{\partial u_{0k}}{\partial x_l} + \frac{\partial u_{1k}}{\partial y_l} \right) \frac{\partial v_i}{\partial y_j} + \left(\frac{\partial u_{1k}}{\partial x_l} + \frac{\partial u_{2k}}{\partial y_l} \right) \frac{\partial v_i}{\partial y_j} \right] d\Omega = \int_{\Omega^{\varepsilon}} f_i^{\varepsilon} v_i d\Omega + \int_{\Gamma_i^{\varepsilon}} t_i v_i \quad (11)$$

By applying divergence theorem and Eq. (8) to Eq. (9), the following equation is obtained:

$$u_0 = u_0(x) \quad (12)$$

where u_0 only depends on the overall structure. By applying Eq. (8), Eq. (12), and divergence theorem to Eq. (10), and by introducing χ that satisfies Eq. (9), Eq. (14) is obtained:

$$\int_Y D_{ijmn} \frac{\partial \chi_m^{kl}}{\partial y_n} \frac{\partial v_{1i}}{\partial y_j} dY = \int_Y D_{ikjl} \frac{\partial v_{1i}}{\partial y_j} dY \quad \forall v_1 \in V_Y \quad (13)$$

$$u_{1i} = -\chi_i^{kl}(x, y) \frac{\partial u_{0k}(x)}{\partial x_l} \quad (14)$$

By applying Eq. (8), (12), (14), and divergence theorem to Eq. (11), the virtual principle of the overall structure can be derived.

$$\int_{\Omega} D_{ijkl}^h \frac{\partial u_{0k}}{\partial y_l} \frac{\partial v_{0i}}{\partial y_j} d\Omega = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{|Y|} \int_Y f_i dY \right) v_{0i} d\Omega + \int_{\Gamma_t} t_i v_{0i} d\Gamma \quad (15)$$

where Eq. (16) is an equation that obtains the equivalent elastic constant in macroscopic structure, and if defined as a homogenization elastic tensor D_{ijkl}^h , we obtain:

$$D_{ijkl}^h = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left(D_{ijkl} - D_{ijmn} \frac{\partial \chi_m^{kl}}{\partial y_n} \right) dY \quad (16)$$

In addition, displacement u^ε , strain ϵ^ε , and stress σ^ε that take microscopic structures into consideration can be obtained with the following equation:

$$u_i^\varepsilon = u_{0i}(x) - \varepsilon \chi_i^{kl}(x, y) \frac{\partial u_{0k}(x)}{\partial x_l} + \dots \quad (17)$$

$$\epsilon_{ij}^\varepsilon = \frac{\partial u_{0i}}{\partial x_j} - \frac{\partial \chi_i^{kl}}{\partial y_j} \frac{\partial u_{0k}}{\partial x_l} + \dots \quad (18)$$

$$\sigma_{ij}^\varepsilon = \left(D_{ijkl} - D_{ijmn} \frac{\partial \chi_m^{kl}}{\partial y_n} \right) \frac{\partial u_{0k}}{\partial x_l} + \dots \quad (19)$$

We used the finite element method calculating Eq. (13),(14),(15),(16),(17),(18) and (19).

4.2 Microscopic structure finite element method model

Since flute of corrugated cardboard have periodicity, we prepared a finite element model that uses one flute as a unit cell as shown in Fig. 5. To model corrugating medium, we approximated with Sine wave. Poison ratio was literature [1][8] reference and element decomposition was performed with appropriate number of nodes and elements considering the analysis time. Details are shown in Table 2.

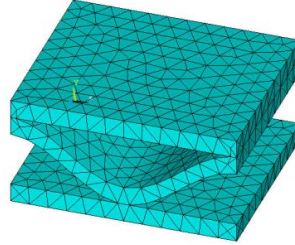


Figure 5. Unit cell finite element method for corrugated cardboard

Table 2. Specification of unit cell finite element method

Size(mm)		x=6.0,y=6.0,z=3.0
Element Type		Quadratic element
Number of nodes		6099
Number of elements		2973
Number of materials		2
Material 1		Liner
Material 2		Corrugated medium
Poison ratio	Liner	0.6
	Corrugated medium	0.3

4.3 Overall structure finite element method model

We use the homogenized elastic stiffness obtained in Section 4.2. We prepared a finite element method model that uses the test fragment used in the bending test as the overall structure.

Fig. 6 shows the finite element model, and Table 3 shows the details. Boundary conditions are shown in Fig. 6: shown in Fig. 6(a) if analyzing in the CD, cross-directional xyz direction C_1 and C_2 were constant, and -20N was applied in the line z direction on the both L_1 and L_2 ; shown in Fig. 6(b) if analyzing in the MD, cross-directional xyz direction C_3 and C_4 were constant, and -20N was applied in the line z direction on the both L_3 and L_4 .

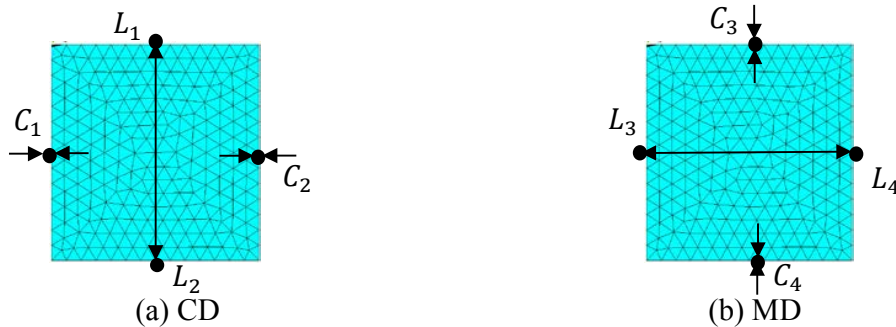


Figure 6. Finite element method for corrugated cardboard for macro model

Table 3. Specification of finite element method for macro model

Size(mm)	X=250,y=250,z=3.0
Number of nodes	3019
Number of elements	1492

5. Method of calculating material constant

5.1 Formulation of elastic modulus search

In this study, we targeted both the CD and MD of the corrugated cardboard that receives point load as an external force, and numerical simulation searched for elastic modulus that fit the displacement due to known 20 N load from the regression line using the homogenization technique. e_1 represents the liner, while e_2 represents the elastic modulus of the corrugating medium, respectively, and can be formulated as in Eq. (20).

$$im(F_{20})({(e_1, e_2)}|e_1, e_2 \in \{1000, 2000, 3000, \dots, 10000\}) \quad (20)$$

5.2 Response surface model

Response surface method is technique for continuous carved surface complementary discrete multiple solution, and predictive accuracy and that depend on approximate function and interpolation technique but it have estimating advantage relatively well-approximate equation by low sample number. If analysis point of search $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ and approximation error as ε , elastic modulus of liner and corrugated medium y can be expressed as Eq. (21).

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (21)$$

Fig. 7 shows response surface of CD and MD obtained in this research. Point is result of numerical simulation and curved surface is response surface. There was difference in both numerical simulation and response surface from approximation error as ε . But obtained numerical simulation and response surface are consistent, and the number of sample used here was sufficient enough to give accurate response surface.

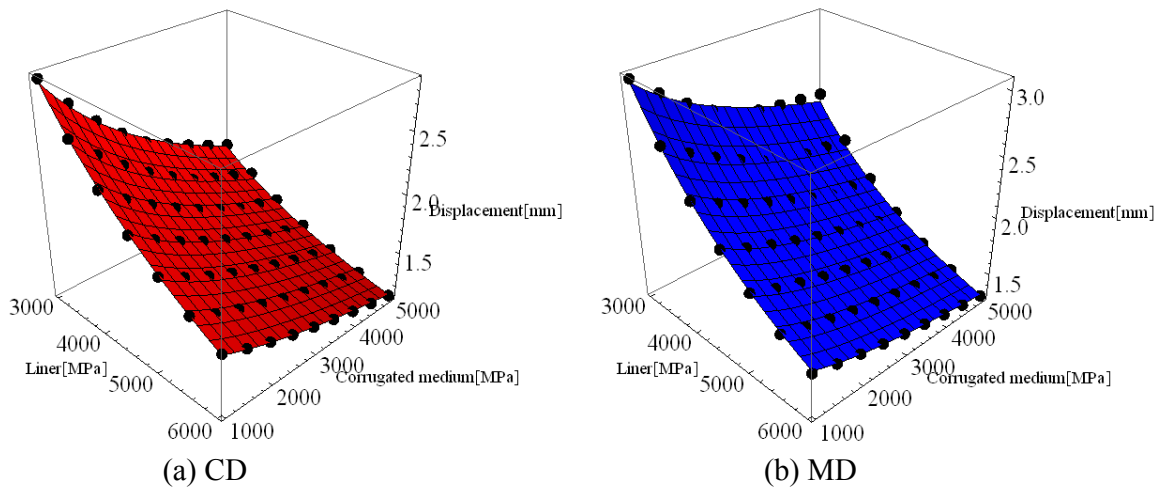


Figure 7. Response surface model search for elastic modulus

5.3 Calculation of material constant

We considered the coordinates of CD and MD intersection as shows Fig. 8 by Eq. (22) in solution space of responses surface that the estimated elastic modulus of liner and corrugated medium.

$$(e_1^*, e_2^*) = \underset{(e_1, e_2)}{\operatorname{argmin}} (rs'(data')(e_1, e_2) - rs''(data'')(e_1, e_2))^2 \quad (22)$$

Where e_1^* and e_2^* are the estimated elastic modulus of liner and corrugated medium, rs' and $data'$ are response surface and data used in the response surface of CD, rs'' and $data''$ are response surface and data used in the response surface of MD. Therefore, $rs'(data')(e_1, e_2)$ and $rs''(data'')(e_1, e_2)$ are shows response surface of liner and corrugated medium of CD and MD. In this study, we get intersection coordinate by calculating difference $rs''(data'')(e_1, e_2)$ from $rs'(data')(e_1, e_2)$ as a method of obtaining the coordinate of CD and MD intersection. Material properties of Liner and Corrugated medium calculated by intersection coordinate are shown in Table 4.

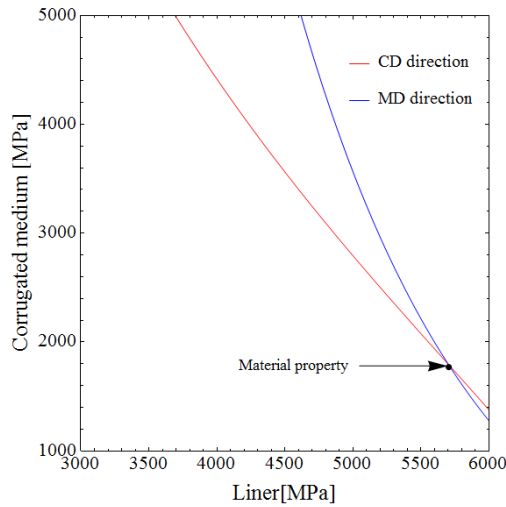


Figure 8. Inference of elastic modulus by intersection of coordinate

Table 4. Elastic modulus by inference

	Liner	Corrugated medium
elastic modulus (MPa)	5700	1850

6. Verification of elastic modulus

We will verify if the elastic modulus obtained in this research are valid. In the verification used elastic modulus both liner and corrugated medium of estimated Table 4 by this research. Fig. 9 shows the results of comparing results of regression lines and numerical analysis by conducting an analysis under the condition of applying a load on a linear range using the homogenization technique as shown in Section 4. In this study, by rationally incorporating displacement data of the regression line into a numerical simulation, elastic modulus were obtained. Therefore, both in the CD and MD, results are consistent with regression line values, confirming the validity of elastic modulus.

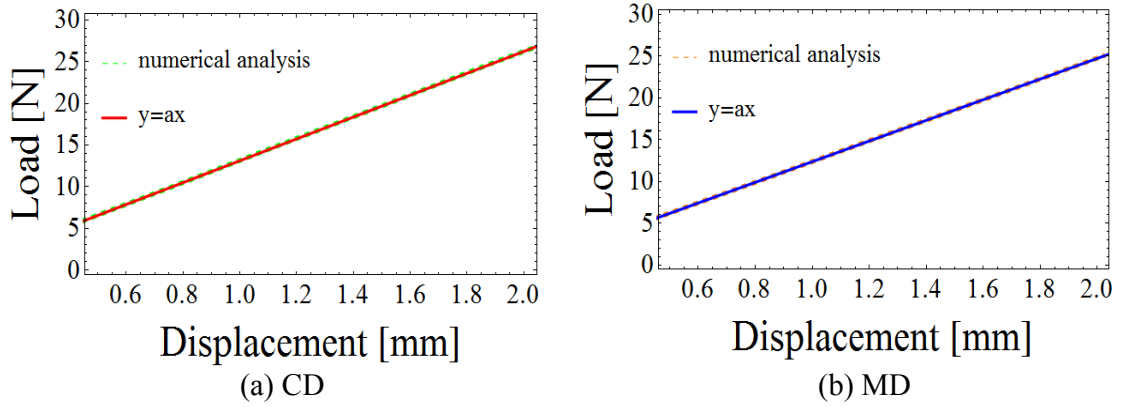


Figure 9. Comparison of between regression line and numerical analysis

7. Reducing uncertainty

7.1 Posterior distribution estimation method

Bayesian inference determines posterior distribution by uploading observational data to parameters of prior distribution, which consist of information already obtained and the prior knowledge of the analyst. Bayes theorem can be expressed with Eq. (23). Assuming the parameter the elastic modulus of liner and corrugated medium as θ and observational data as d , posterior distribution $p(\theta|d)$ can be obtained from the product of likelihood $f(d|\theta)$, which is probability of obtaining observation data as a condition for elastic modulus has particular value.

$$p(\theta|d) \propto f(d|\theta)p(\theta) \quad (23)$$

In other words, posterior distribution is proportional to prior distribution and likelihood, and can be considered to be the conditional probability of parameters when data were obtained. Since Bayesian inference can actively utilize prior distribution, even if the number of samples is low, it allows for estimation of unknown parameters that include uncertainties. In this study, we estimated parameter elastic modulus of liner and corrugated medium using

7.2 Bayesian updating

As shown in the Fig.10, Bayesian inference improves the accuracy of estimation by sequential updating estimated posterior distribution using observed data.

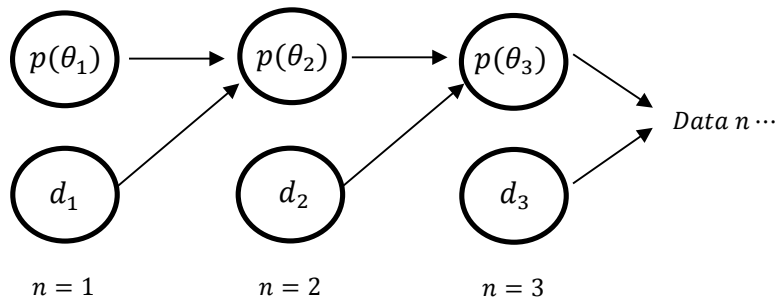


Figure 10. Bayesian updating

7.3 Likelihood

We calculate probability distribution by using Bayesian inference. This method does not calculate fixed parameters unlike maximum likelihood method. Considering elastic modulus of liner and corrugated medium follows normal distribution of Eq. (24), we estimate parameter μ , σ^2 of elastic modulus by observed data x .

$$N[x|\mu, \sigma^2] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{\{x - \mu\}^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (24)$$

where μ is average and σ^2 is variance. Therefore the likelihood for complete experimental data is Eq. (25), (26).

$$p(u'|e_1, e_2, \text{MD}) = N[u'|rs'(data')(e_1, e_2), \text{var}(rs'(data')(e_1, e_2))] \quad (25)$$

$$p(u''|e_1, e_2, \text{CD}) = N[u''|rs''(data'')(e_1, e_2), \text{var}(rs''(data'')(e_1, e_2))] \quad (26)$$

where u is a displacement as observed data and var is a function for calculating the variance. In this study, we calculate posterior distribution, multiplying those likelihood by prior distribution.

7.4 Setting prior distribution

Prior distribution can reflect the analyst's subjective information. Fig. 11 shows used prior distributions and its details are shown in Table 5. In Case A, uniform distribution considers all parameters uniform when there is no prior knowledge, and in Case B, though it is unclear based on past experience, the range of model parameter values is roughly understood. Therefore, to reflect model parameter uncertainties as effectively as possible, we applied Gaussian distribution that has been through engineering study to this information. In Case C, we applied isotropic Gaussian distribution that reflects detailed information using the estimated model parameter values.

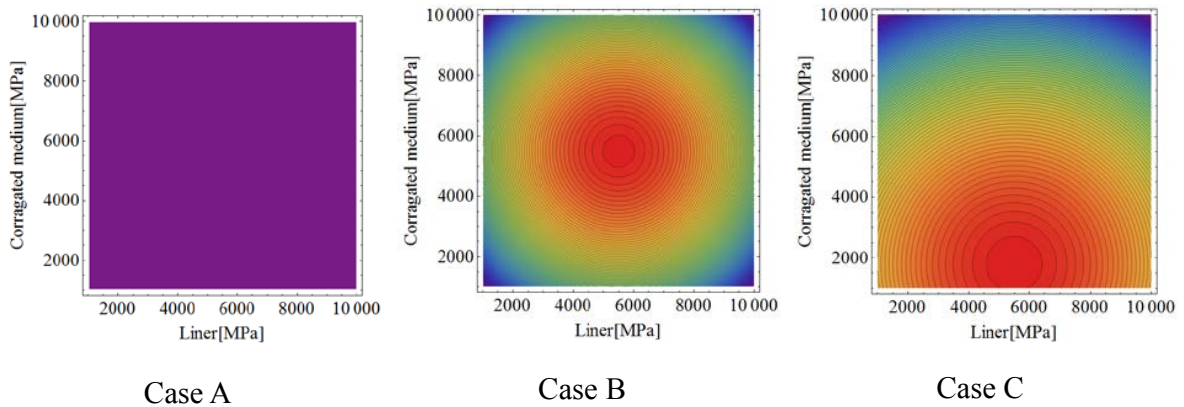


Figure 11. Prior distribution

Table 5. Prior distribution value

		Case A	Case B	Case C
Average	Liner	5500	5500	5500
	Corrugated medium	1800	5500	1800
Variance	Liner	1.0×10^{10}	10000	10000
	Corrugated medium	1.0×10^{10}	10000	10000

7.5 Reducing uncertainty in posterior distribution

In this study, to examine reduction of uncertainty, we made a ten-step observation where the total of two types of data (one in the CD and one in the MD) were represented as one step in order to make confirmation. Fig. 12 shows the posterior distribution results of first step and final step. In addition, Table 5 shows mean and variance of ten steps. According to Fig. 10 and table 5, in Cases A and B, with the number of data used in this research, it is difficult to say that uncertainty has been reduced to the point to guarantee the validity of elastic modulus. In Case B, results were biased toward prior distribution due to the impact of variance of prior distribution set for the estimated mean values. Thus, it was shown to be strongly influenced by prior distribution. In Case C, uncertainty was reduced even with a small number of data by reflecting more accurate prior information. Therefore, knowing more accurate prior information obviously contributes to gaining a valid value more quickly. In addition, while incomplete prior information has a negative impact on the estimation of mean value, in Case A without prior information, by using Bayesian inference, though reduction of uncertainty is slow, estimated mean value reaches a valid value quickly.

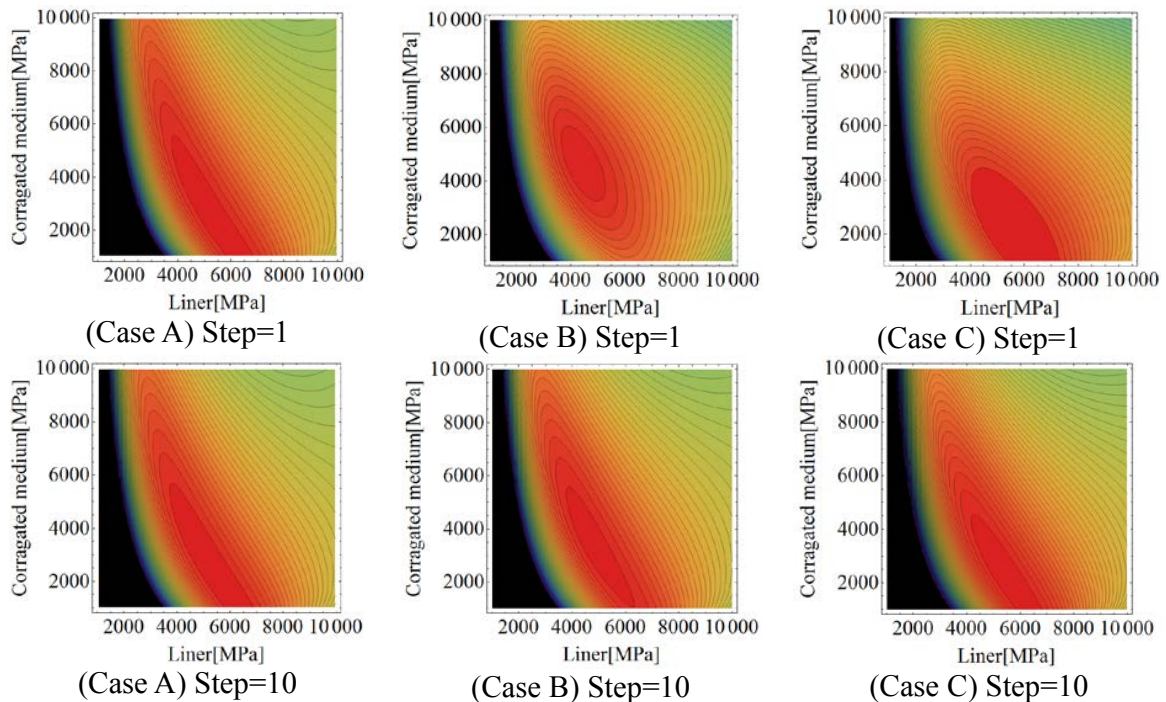


Figure. 12 Posterior distribution

Table 6. Comparison of posterior distribution

		Case A	Case B	Case C
Average	Liner	5494.9	4760.53	5629.13
	Corrugated medium	2211.7	3491.87	2001.32
Variance	Liner	6892.2	1046.41	2492.13
	Corrugated medium	16070	3342.29	5470.91

8. Conclusion

In this study, we proposed a method of obtaining elastic modulus from a response surface prepared by using numerical analysis with a homogenization technique that focuses on the periodicity of corrugated cardboard and a bending test. Additionally, we then made a comparison with experimental values in order to confirm its validity. To reduce uncertainty in the obtained elastic modulus values, we conducted a quantitative evaluation using posterior distribution obtained using Bayesian estimation and conducted examination and validation. We present our findings below.

1. In a conventional finite element analysis, it took time and effort to prepare the model. In addition, since mesh is generated for each flute, the calculation cost is extremely high and inefficient. We focused on the periodicity of the corrugated cardboard, and used a flute of corrugated cardboard as a unit cell in order to conduct homogenization analysis of the test fragment as the overall structure. In this manner, by only preparing a model of the microstructure and simplified overall structure, and substituting the flute with a uniform material, analysis that takes microstructure into consideration was possible. This allows for a significant reduction in calculation cost, indicating that this is a useful method in analyzing corrugated cardboards.
2. We incorporate displacement of experimental value into numerical analysis of CD and MD, and created response surface by that result of analysis. Calculated material properties of liner and corrugated medium by the intersection of these response surface, displacement of numerical simulation analysis using calculated elastic modulus was compared with displacement of regression line. Result shows elastic modulus calculated by method proposed in this research is consistent with regression line values, confirming the validity of elastic modulus.
3. To reduce uncertainty of model parameters with Bayesian inference, posterior distribution was quantitatively examined. When more accurate prior distribution was used, even with a small number of samples, reduction in uncertainty was confirmed. However, with other prior distributions, such reduction was not confirmed. By using prior distribution for which analysts examined uncertainty, a valid posterior distribution was obtained. However, even when there is no prior information, by using Bayesian inference, though reduction of uncertainty is slow, estimated mean value reached a valid value quickly.

Reference

- [1] Kawashima, Y., Nishimura, F. and Tezuka, A., Research on Structural Analysis of Paper Ware, Gifu Prefectural Research Institute of Manufacturing Information Technology Report, Vol. 2, (2000), pp.29-34

- (in Japanese).
- [2] Terada, K., Yuge, K. and Kikuchi, N., Elasto-Plastic Analysis of Composite Materials Using the Homogenization Method, 1st Report, Formulation, Japan Society of Mechanical Engineers, vol. 590, (1995), pp.2199-2205 (in Japanese).
 - [3] Terada, K. and Kikuchi, N., Introduction to Homogenization Technique (2003), Maruzen.
 - [4] Alvin, K. F., et al., Uncertainty Quantification in Computational Structural Dynamics: a new paradigm for model validation, Society for Experimental Mechanics, Inc, 16th International Modal Analysis Conference, Vol. 2, (1998), pp.1191-1198.
 - [5] Watanabe, S., Theory and Method of Bayesian Inference (2012), Corona Publishing Co.
 - [6] Fukasawa, K. and Sumiya, T., Let's Start! Data Analysis with Bayesian Inference, Japanese Journal of Ecology, Vol. 59, (2009), pp.207-216 (in Japanese).
 - [7] Nishio, M. and Fujino, Y., Bayesian Inference Based Uncertainty Quantification and Calibration of Numerical Models of Existing Structures, JSCE A2 (Applied Mechanics), Vol. 69, (2013), pp.711-718 (in Japanese).
 - [8] Ishibuchi, H., Nagasawa, S., Yoshizawa, A. and Yoshitani, Y., Three-Dimensional Bending Stress Analysis for Corrugated Fibreboard Sheet, Japan Society of Mechanical Engineers, vol. 60, (1994), pp.2774-2781 (in Japanese).
 - [9] Hirohata, K., Kawakami, T., Mukai, M., Kawamura, N., Yu, Q. and Shirai, M., Proposal for Structural Reliability Design Method Based on the Response Surface Methodology and Bayes theory, Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 660, (2001), pp.1297-1304 (in Japanese).
 - [10] Christopher, M. B., Pattern Recognition and Machine Learning (2006), pp.137-156, Springer.
 - [11] Steffen, L. L., Graphical Models (1996), pp.4-26, Oxford University Press Inc.

Validation and Verification of Structural Analysis Using Open Source

Finite Element Analysis Code and Material Test Data

†Terutaka Fujioka¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science & Engineering, Toyo University, Japan

†Corresponding author: fujioka@toyo.jp

Abstract

Quality management of most commercial finite-element analysis solvers is conducted by the software vendors themselves. Therefore, users do not need to know the source codes. Validation and verification (V&V) of open-source solvers, on the contrary, is accomplished by the users, who can access the source codes. When a user attempts V & V of an open-source solver, they should compare their analytical results with reference test data. This study presents a V & V example of non-linear analyses using the open-source finite-element solver Code_Aster. The outputs are compared with simple tensile test data produced by a ubiquitous material test machine.

Keywords: Stress Analysis, Finite Element Method, Open Source, V & V, Material Test.

Introduction

The importance of validation and verification (V&V) of computer-aided engineering (CAE) software is widely recognized. CAE software, especially structural finite element analysis (FEA) solvers, are widely used in various industries, as its user-friendliness and reliability. Most of these commercial solvers are black box software whose source codes are not disclosed to ordinary users. Nonetheless, regular users of such software can perform proper analyses under technical support of the software vendors.

However, the strength and safety of structures designed using CAE software, particularly those that pose a public safety risk, must be evaluated to promote public acceptance and understanding of the technologies. Open-source CAE may mitigate this concern. In V & V of a finite element solver, the analytical results should be compared with corresponding test data. The tests themselves should be accessible to the public and easily performed without requiring costly and specialized experimental equipment.

This paper demonstrates a V & V of non-linear finite element analyses. The analyses were performed by the open-source FEA solver *Code_Aster* [1], developed by the French organization EDF (Electricité de France). The results were compared with those of a conventional tensile test using a ubiquitous material test machine. The selection of tensile curves and analytical options are also discussed. The analyses dealt with material non-linearity and geometrical non-linearity.

Reference Test Data

The reference test data were acquired in a simple tensile test using a round-bar-type specimen constructed from low-alloy steel (2.25Cr–1Mo Steel), as reported in [2]. This material was one of the test materials for creep datasheet provided by the National Institute of Materials Science (NIMS). The chemical composition of the steel is shown in Table 1 [3]. The dimensions and configurations of the test specimen are shown in Figure 1.

The test was conducted at room temperature. In the commonly employed standard test procedures, the strain is measured until the stress slightly exceeds the 0.2% proof strength

level. To obtain a widely applicable stress–strain curve, the strain in the present study was measured up to maximum loading. The ultimate and 0.2% proof strengths were 636 and 426 MPa, respectively. Figure 3 plots the nominal stress–strain curve obtained in this test.

Table 1. Chemical compositions of the tested material (2.25Cr–1Mo Steel) [3]

Element	Requirement ^{*)}	Analyzed	Element	Requirement ^{*)}	Analyzed
C	≤ 0.17	0.12	Cr	1.88-2.62	2.20
Si	≤ 0.50	0.29	Mo	0.85-1.15	0.99
Mn	0.27-0.63	0.29	Cu	—	0.07
P	≤ 0.030	0.015	Al	—	0.018
S	≤ 0.030	0.007	N	—	0.0095
Ni	—	0.05		—	

(mass percent) ^{*)} JIS G 4109-1987

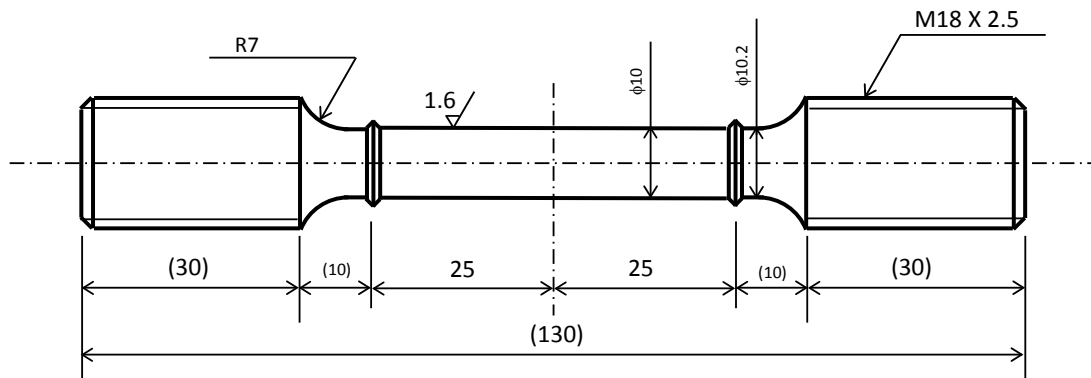


Figure 1. Round-bar-type specimen for the tensile tests

Analysis Methods

Code_Aster & Salome_Meca

The analyses were performed by *Code_Aster* (Ver. 11.3.0). Pre- and post-processing were performed by the integrated CAE package *Salome_Meca* (2013.2). *Code_Aster* and *Salome_Meca* are downloadable from the *Code_Aster* website [1].

Finite element model and boundary conditions

Excluding the gripping portions in the specimen, the analytical model was axisymmetric. The round bar was subdivided into simple uniform square meshes for easy comparisons with various solvers. The axisymmetric construction and mesh subdivisions are shown in Figure 2. The element was an eight-node iso-parametric quadratic full integration element. Necking at the specimen center was induced by a slight initial imperfection (1/1000 of the bar radius).

To define the multi-point constraints on the top-edge nodes, the model was subjected to displacement-controlled loading using the operator *LIAISON_UNIF*. The loading was

incremented by equal time steps. Because we were evaluating the actual performance of the non-linear analysis, we omitted automatic loading step adjustment.

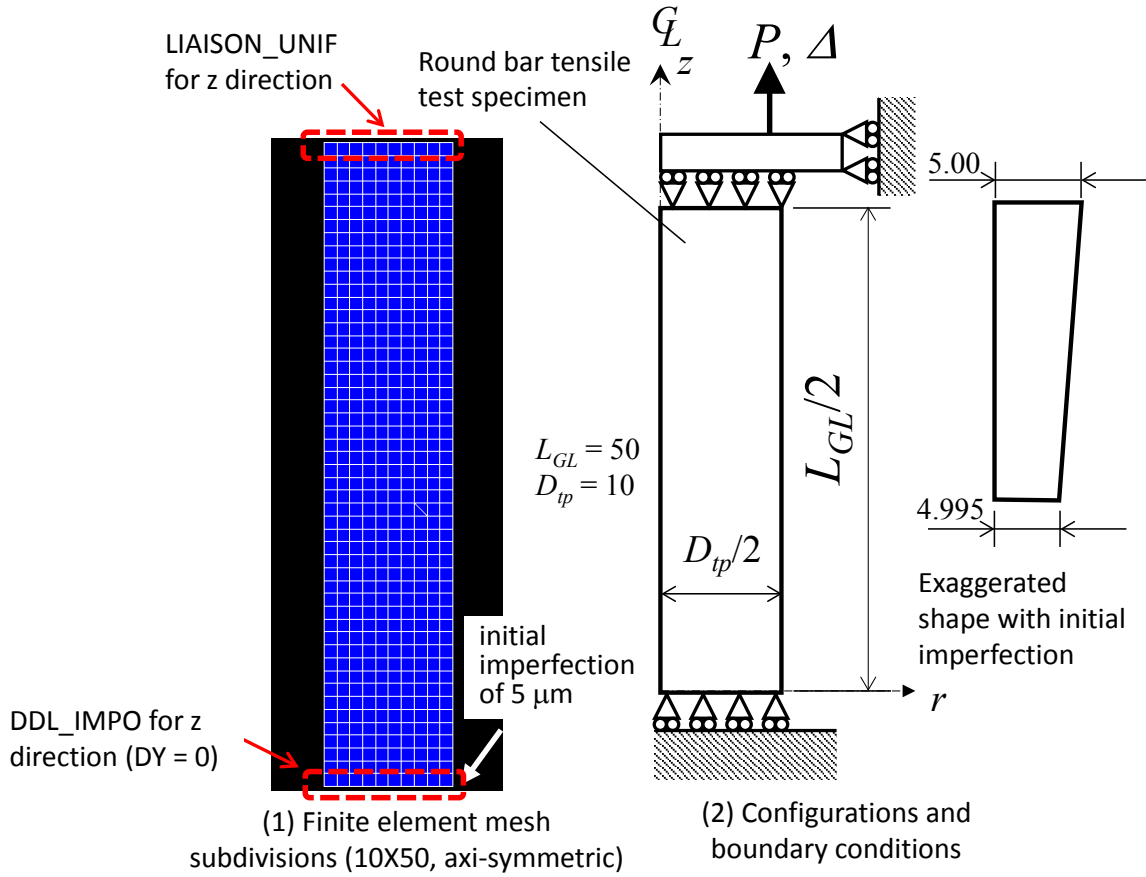


Figure 2. Finite element mesh model of the specimen and boundary conditions

Material properties

The results were compared against the nominal and true stress–strain curves, as shown in Figure 3. The test data were approximately fitted to the left-hand side of the nominal stress–strain curve, and the right-hand side (beyond the maximum load point) was assumed as a horizontal straight line (see Figure 3). The true stress–strain curve was expressed by the Ramberg–Osgood law

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \kappa \left(\frac{\sigma}{\sigma_Y} \right)^m, \quad (1)$$

where ε is the strain, σ is the stress, and σ_Y , κ , and m are material constants. The constants were selected to fit the true stress and strain data converted from the test data between the zero and maximum loading points. Beyond the maximum load point, the stress was extrapolated by a power law. The constants are tabulated in Table 2.

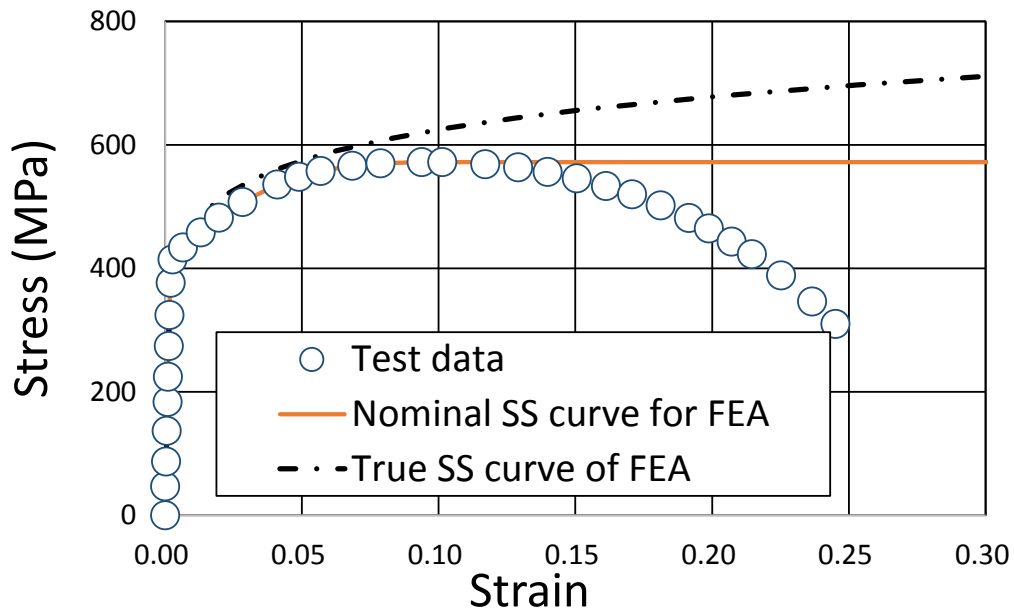


Figure 3. Comparisons between stress–strain curves for FEA and tensile test data

Table 2. Constants related to material properties

Elastic modulus	$E = 204.1 \text{ GPa}$	Reference yield strength	$\sigma_Y = 426 \text{ MPa}$
Poisson's ratio	$\nu = 0.3$		
Coefficient for plasticity	$\kappa = 3.582 \times 10^{-3}$	Yield strength for elastic, perfectly-plastic body	$\sigma_u = 636 \text{ MPa}$
Stress exponent	$m = 8.607$		

Treatment of geometric non-linearity

Many of the theoretical studies on plasticity, such as path independence of the elastic–plastic J-integral, have assumed small deformation. Limit analysis, which can replace the elastic FEA-route stress classification in pressure vessel design codes [4], is based on the small deformation theory. For these reasons, large deformation analysis is not always appropriate.

Some users consider that the true stress–strain curves are mandatory in elastic–plastic FEA. Although the true stress–strain is appropriate in large deformation analyses, where the nodal coordinates change step by step, the nominal stress–strain curve is suitable for small deformation analyses. The present study investigates unsuitable combinations for comparison purposes.

Small and large deformation analyses were performed with the operators DEFORMATION = “PETIT” and DEFORMATION = “SIMO_MIEHE,” respectively. The various combinations of stress–strain curves and operators are tabulated in Table 3.

Table 3. Cases in the geometric non-linearity analyses

	Stress-strain curve	Geometrical non-linearity
Case 1	Nominal curve	Small deformation (PETIT)
Case 2	Nominal curve	Large deformation (SIMO_MIEHE)
Case 3	True curve	Small deformation (PETIT)
Case 4	True curve	Large deformation (SIMO_MIEHE)

Results and Discussion

The reaction forces and displacements obtained in the elastic-plastic FEA were converted into nominal stresses and strains. The resultant stresses and strains are compared with the test data in Figure 4. The most accurate case, Case 4, well agreed with the tensile curve throughout the test, including the loading decline after the maximum load point. Case 1 accurately estimated the maximum load (tensile strength). The results of Cases 2 and 3 differed from the test data.

Necking was observed in the cases analyzed with SIMO_MIEHE. A typical deformation, along with the distribution of equivalent plastic strain in the time step near the specimen rupture (roughly 25% of the nominal strain), is shown in Figure 5.

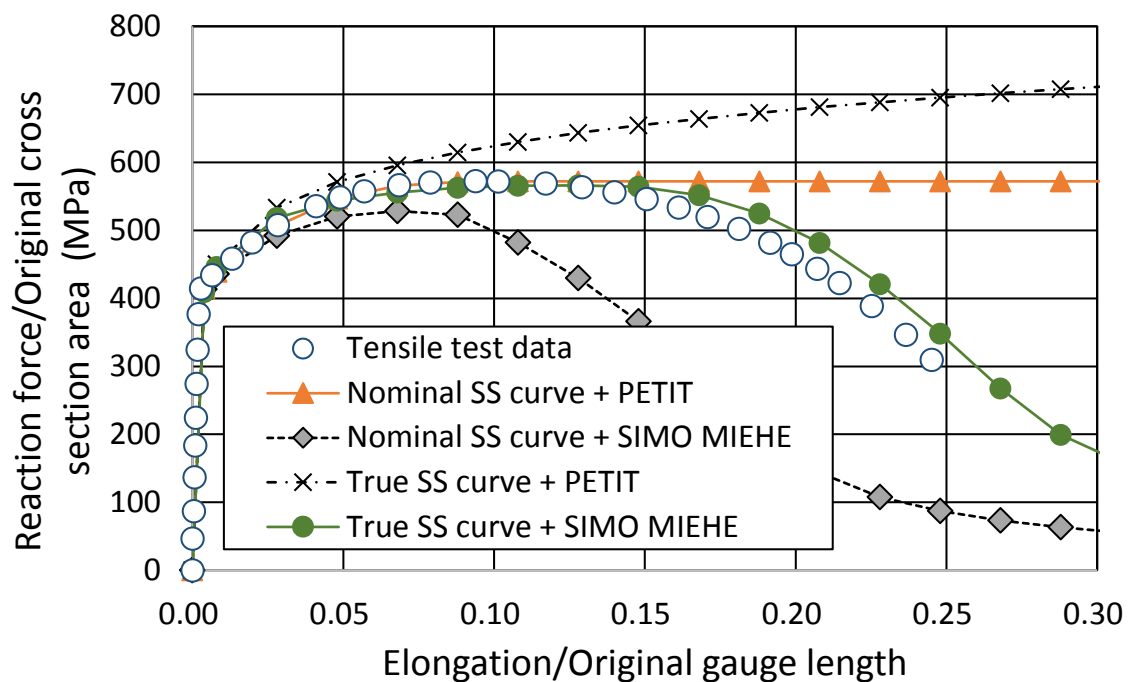


Figure 4. Comparisons of analysis results and tensile test data

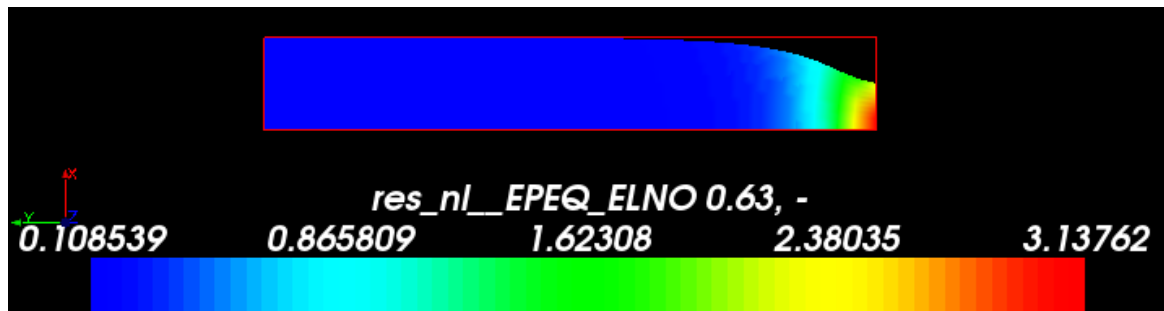


Figure 5. Deformation (top, actual size) and distribution of equivalent plastic strain (bottom)

Conclusions

This study presented a V & V of an open-source finite element structural analysis solver. The validated phenomena were material non-linearity and geometrical non-linearity. The reference test was a simple tensile test using a ubiquitous test machine. By following this example, users can perform their own V&Vs.

Appropriate stress–strain curves in FE analyses were also discussed, and the analytical results were compared with actual data. It was confirmed that large deformation FEAs should use the true stress–strain curve, whereas small deformation FEAs can assume the nominal stress–strain curve.

Similar V & V examples should be publicized in future. Small punch tests, including friction and contact, and other simple material tests, are useful and easily performed and are suitable for this purpose.

References

- [1] <http://www.code-aster.org/>
- [2] Fujioka, T., et al. (2012) Analytical Replication of Room Temperature Small Punch Test of 2.25Cr-1Mo Steel (STBA24) and Its Application to Load-Stress Conversion of Small Punch Creep Test, Proceedings of the Annual Meeting of JSMS, Vol. 61, Okayama, JSMS, pp. 77-78. (in Japanese)
- [3] NIMS (1997), Creep Data Sheet, 2.25Cr-1Mo (Plate) JIS SCMV 4 NT 11B, NIMS, Tokyo.
- [4] European Commission Joint Research Centre and EPERC (1999) The Design-by-Analysis Manual, EUR 19020 EN.

ICME: Integrated Computational Materials Engineering - From Micro Structure to FEM

T. Ashino¹

¹Department of Regional Development Studies, Toyo University, Japan

ashino@toyo.jp

Introduction

Integrated Computational Materials Engineering (ICME) is a kind of materials and products design methodology by integrating micro to macro scale data and simulation[1]. Materials performances, such as strength, creep and fatigue are critical for designing artifacts. They depend on many phenomena, crystal structure, micro structure, dislocation and others, hence, combining, integrating many types of data and models are essential and obtained materials properties are essential inputs for computational fluid dynamics, heat transfer and finite element models.

ICME is expected to accelerate design and development process of products if the framework has been established and relevant models are modularized, freely combined each together for problem solving. Since there are no established rules how to combine these data and models, it becomes important to accumulate use cases as many as possible. It requires heterogeneous information integration, i.e. common data representation, unified vocabulary and definition of terms are fundamental. In this section, ICME data and models hierarchy and ontology based information integration for such heterogeneous data and models are discussed.

Hierarchy of Data and Models

Fig. 1 shows one of relation schematizations between substances, computational models, data and properties for materials design. It starts left side from atomic level and moving to right, crystal structure, interaction energy of atoms, thermodynamics e.g. phase transition and properties are estimated. Also, in lower part, dislocations and other deformation mechanisms are introduced.

This diagram for virtual experiment[3] is mainly focusing on materials design and property prediction, in ICME concept, it is trying to apply more realistic product design and manufacturing process, this schema is extended to macro scale and connected to computer simulation like computational fluid dynamics (CFD), heat transfer and finite element method (FEM). Since there are so many proprietary and open source software tools developed for each stage of simulation models, general idea of ICME platform is to modularize such simulation codes by wrapping or data conversion, and connect these modules with a workflow engine[4][5][6].

But all software tools are developed independently, they requires original input and output data formats, sometimes only controllable from GUI, “integration” requires conversion of data format, structure, representation and terms. In order to solve this kind data exchange and metadata description issues, the Semantic Web provides generic framework and many software tools.

The Semantic Web and Materials Data and Knowledge

The Semantic Web is an activity of W3C which intends to introduce semantics into the Web which just provides simple links of data, web pages, images and query[7]. It is basically a kind of knowledge representation framework for knowledge base for machine reasoning. There are

One of them is Materials Ontology[9]¹, which is written in Web Ontology Language (OWL), the W3C standard for ontology construction. It consists of four core ontologies and three peripheral ontologies as follows.

- Core Ontologies
 - Substance - defines elements and materials taxonomy
 - Process - descriptions of materials processing
 - Property - names of properies and their classification
 - Environment - environment of measurement and operation
- Periphearl Ontologies
 - Materials Information - class definitions for aggregation of materials data entry
 - Unit Dimension - measurement units and dimensions
 - Physical Constant - a list of URI's of physical constant

The categories of four core ontologies are selected from the viewpoint of orthogonality of the concepts.

As an example of this ontology definition, the basic structure of property ontology is illustrated in Fig. 2. Class “Property” has properties (attributes), its name (PropertyName) and value (Value). The value is a measured value and contains corresponding maximum, minimum, unit and dimension. Subclasses “Chemical”, “Thermal” and “Mechanical” are classification of properties, by tracking this tree, specific materials property and its definition can be found.

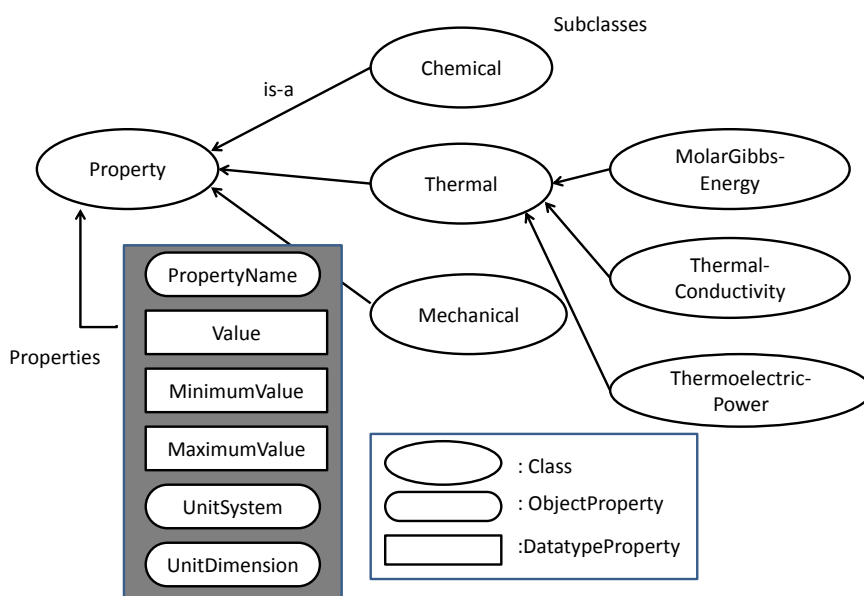


Figure 2: Definition and classification of materials properties in Materials Ontology.

¹OWL definitions and examples of Materials Ontology can be obtained from the web site, <http://www.codata.jp:8080/>.

Since there are huge number of related concepts about materials science and engineering, property ontology focuses on thermophysical properties, but four core ontologies consists over 600 class definitions, it is regarded not realistic to define whole domain ontology for materials science and engineering by pure top down style.

ICME concept requires data integration, for example, experiment data, the output of simulation models and empirical equations. One idea of how to integrate such heterogeneous information resources is ontology based integration, information resources are described by using standards of the semantic web, and the vocabularies used in these descriptions are selected from the common ontology.

The architecture for materials data and knowledge integration based on the Semantic Web framework is shown in Fig. 3. Data and knowledge are written in XML format. For example, experimental data are in XML Schema, reference of articles are in RDF and mathematical objects are in OpenMath, which is a standard for representing the semantics of mathematical objects[10]. For materials performance estimation, mathematical knowledge, e.g. empirical equations and constitution equations are very valuable, therefore, such equations are stored as OpenMath library for processing by symbolic mathematics system, and variables estimated from experimental data are stored as RDF data.

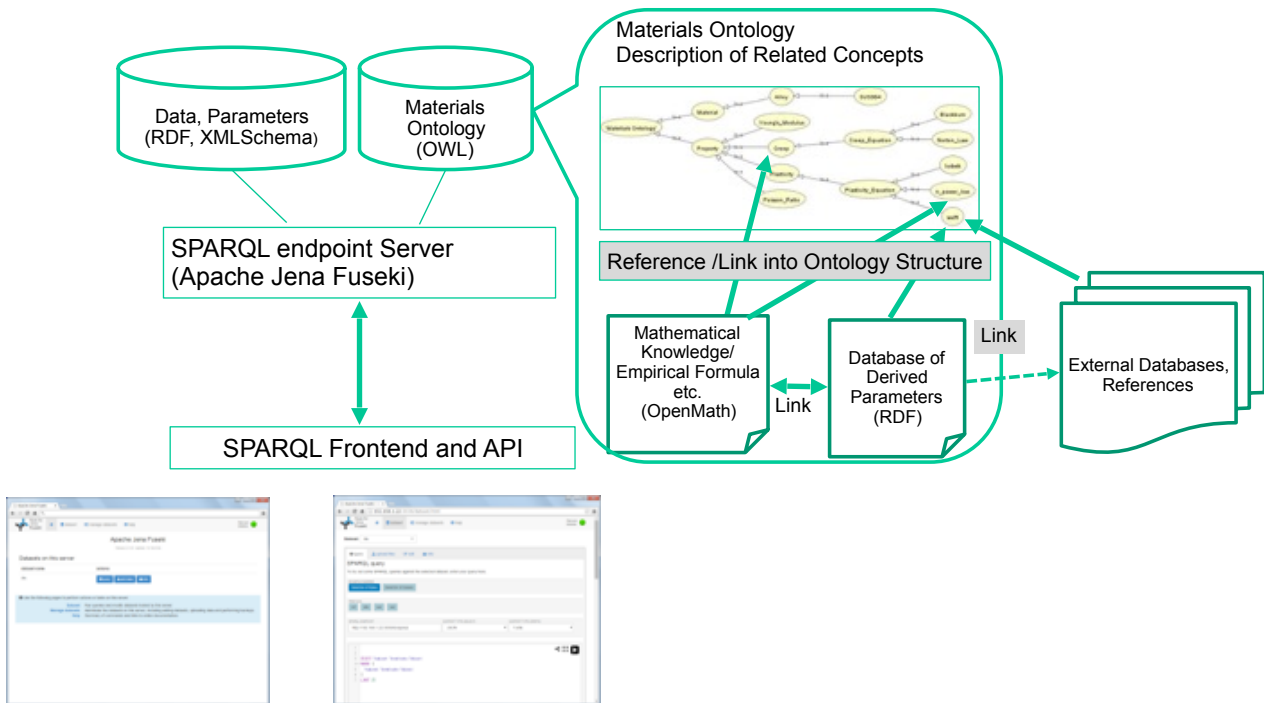


Figure 3: Data and knowledge integration by Materials Ontology.

These all data share Materials Ontology as a common vocabulary, it enables to identify same data from these heterogeneous data resources and process them. RDF query language, SPARQL Protocol[11] and RDF Query Language (SPARQL) endpoint stores these data and provides interface to retrieve these data and knowledge.

Conclusions

ICME platform is designed as an total product and component design environment which consists of materials selection, materials process design, structural calculation and other data, simulation models. Each data and simulation models are connected by workflow but data interchange requires standardized data and metadata. Constructing domain ontology for materials science and engineering is key to integrate heterogeneous data resources, but it requires huge efforts, novel idea and collaboration between information scientists, materials scientists and engineers is required.

References

- [1] National Research Council (2008) *Integrated Computational Materials Engineering: A Transformational Discipline for Improved Competitiveness and National Security*, The National Academies Press, USA.
- [2] Shichijo, N. (1999) Modular simulation technique for virtual experiment of complex phenomena in materials (Doctorial dissertation), Retrieved from National Diet Library of Japan. (DOI. 10.11501/3162796)
- [3] Iwata, S., Shichijo, N. and Ashino, T. (2001) Modular simulation technique for virtual experiment of complex phenomena in materials, *Materials & Design*, **22**, 77–79.
- [4] Schmitz, G. J. (2016) Microstructure Modeling in Integrated Computational Materials Engineering (ICME) Settings: Can HDF5 Provide the Basis for an Emerging Standard for Describing Microstructures?. *Journal of Materials*, **68**(1), 77–83.
- [5] Jacobsen, M. D., Benedict, M. D., Foster, B. J., & Ward, C. H. (2015) An Integrated Collaborative Environment for materials research. Proceedings of the 3rd World Congress on Integrated Computational Materials Engineering, John Wiley & Sons, 285–292.
- [6] Arnold, S., Frederic, H. and Bednarczyk, A. (2014) Robust Informatics Infrastructure Required for ICME: Combining Virtual and Experimental Data, *55th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, National Harbor, Maryland.*, (DOI. 10.2514/6.2014-0460)
- [7] Berners-Lee, T., Hendler, J., & Lassila, O. (2001) The semantic web, *Scientific american* **284**(5), 28–37.
- [8] Zhang, X., Zhao, C., & Wang, X. (2015) A survey on knowledge representation in materials science and engineering: An ontological perspective, *Computers in Industry*, **73**, 8–22.
- [9] Ashino, T. (2010) Materials Ontology: An Infrastructure for Exchanging Materials Information and Knowledge, *Data Science Journal*, **5**, 52–63.
- [10] Buswell, S., Caprotti, O., Carlisle, D. P., Dewar, M. C., Gaetano, M., & Kohlhase, M. (2004) *The open math standard. version 2.0*, Technical report, The Open Math Society, <http://www.openmath.org/standard/om20>
- [11] Yu, L. (2014) A Developer's Guide to the Semantic Web, Second Edition, *Springer*

Space-Time Simultaneous Visualization in Virtual Reality Environment for Validation and Verification

†Y. Tamura^{1 2}

¹Center for Computational Mechanics Research, Toyo University, Japan.

²Department of Information Sciences and Arts, Toyo University, Japan.

†Corresponding author: tamura@toyo.jp

Abstract

A novel space-time simultaneous visualization system using virtual reality (VR) technology is developed. Visualization is one of useful tools for validation and verification (V & V) of computational mechanics. In the literature, many scientific visualization systems were developed, including ones for V & V purpose. They were typically intended to compare computed results with experiments visually. VR, on the other hand, was invented as an extension of computer graphics (CG) or interactive media, and merely applied to scientific visualization. In the present article, VR technology is applied for V & V of computational mechanics, especially fluid-structure coupled analyses, displaying the computed and the experimental results at the same location and time. We name it “space-time simultaneous visualization”. The present system shows the potential for V & V in VR space.

Keywords: Scientific visualization, Virtual reality, Fluid-structure coupled analysis, Stereovision.

Introduction

Scientific (computer-aided) visualization has long history back in 1963 when E. E. Zajac made a movie of the motion of a satellite [1]. In those years, one did not have a graphics monitor but used a printer or a film recorder to make computer graphics (CG) images. In 1980's, NASA Ames research center developed a visualization system called “PLOT3D” [2] which visualizes computed results of flow fields. PLOT3D created three-dimensional (3D) images of computed results in wireframe initially and later had capability of 3D surface rendering with light and shade. PLOT3D made a great success and created a lot of followers. The present author had started his career of visualization in late 1980's and he developed his own visualization system called “Post-kun” in 1989 [3] when PLOT3D was not available outside of U. S. A. The uniqueness of Post-kun is that it has a feature to simulate visualization process in experiment, such as the shadowgraph and the schlieren photograph [4]. This must be one of typical visual V & V (validation and verification) tools.

In 1990's and after, visualization systems were shifted to commercial ones, such as “Field View”, “Techplot” or “AVS”. They have sufficient functions and capability to visualize the computed results till now. However visual V & V is becoming more difficult because of the complexity of computation caused by detailed representation of objects, by the targeted flow field itself and by the nature of multi-physics.

Virtual reality (VR) is rather a new technology and its potential is expected for scientific visualization but very few papers have been published. Kageyama and his group of the National Institute for Fusion Science in Japan tried to visualize 3D vector data in VR facility [5][6]. The present author also tried to visualize 3D flow field in VR environment [7]. Both of them had clear objectives to use VR. One is to use the stereovision technique to see 3D field as it is. One could see objects in front of him and walk around them and even touch them (virtually). Also he could see the detail of objects simply by coming closer to them. He didn't need to scale the objects. In other words, the human interface of visualization is very natural in VR space. Their trial might make a certain success but the counterarguments have always converged with indispensability of 3D view or virtual reality experience. VR is expensive and the argument if VR is worth paying the price for scientific visualization is still an open question.

In the present article, we propose a novel idea of using VR for visual V & V. We name it “Time-Space Simultaneous Visualization” and try to visualize computed results and corresponding experimentally-obtained images at the same time, at the same location in VR space in order to demonstrate the potential of VR for scientific visualization.

In the section 2, VR is briefly reviewed to clarify the present situation of VR in the field of scientific visualization. In the section 3, the basic idea and the practical procedure of the present VR system are described. Some examples are shown in the section 4 to demonstrate the capability of the present system, followed by the discussions and conclusions.

Virtual Reality (VR) for Visualization

The purpose of this article is not to explain VR itself but a brief history of VR is reviewed here in order to discuss the possibility of VR for scientific visualization.

VR has a couple of ancestors and one of them is the “ultimate display” developed by I. E. Sutherland [8]. This type of device is currently called a head mounted display (HMD) or more simply a headset. Two small monitors are in front of viewer's eyes and show two images for the left and the right eyes respectively to realize stereovision. Also HMD has a device to detect the location and the orientation of the viewer's head to generate proper CG images for the both eyes. This technology is called “head tracking”. Nowadays head tracking is realized by an acceleration sensor (gyro sensor) though it was mechanical in the ultimate display.

HMD, however, had a weak point that the graphics power of the computer is required to catch up the movement of a head. Otherwise the viewer feels strange feeling that the image drops behind the motion, and that may lead to a motion sickness. A low resolution of monitors in HMD is also a problem that reduces the reality of images. To overcome these problems, Cruz-Neira et al. developed a four-screen VR system called CAVE [9]. This type of system is called an immersive display or an immersive projection technology (IPT). IPT uses one or more numbers of large screens surrounding viewers. A viewer wears stereo glasses and sees the stereo images on the screens. The location and the orientation of the viewer are detected, usually by the visible markers or by the magneto-electric source attached to the stereo glasses. IPT has some advantages to HMD. As IPT uses multi-screens surrounding a viewer, the field of view is sufficiently wide and thus images displayed on the screens might change less than the image of HMD with the motion of the head. This relaxes the requirement of the computer power. As each screen is large compared to the display of HMD, higher resolution is possibly achieved. Moreover the viewer can see himself in IPT, but not with HMD. This also helps to increase the reality of the virtual image. Only the drawback of IPT is the cost and the space for construction, as easily imagined. CAVE was later commercially released, followed by many similar systems. The present author has been using IPT systems called CABIN [10], CANVAS [11] and currently HoloStage® Mini [12] (Holostage, in short). All of them are general-purpose VR systems and the present author has been applying them to scientific visualization. Figure 1 shows CABIN and a snap shot of visualization. CANVAS images are shown in fig. 2. Even with one screen, we could see a virtual 3D image.



Figure 1. CABIN. Left: overview of CABIN, which has five screens, namely top, bottom, front, left and right. Right: flow field visualized in CABIN. Arrows indicate flow velocity vectors.

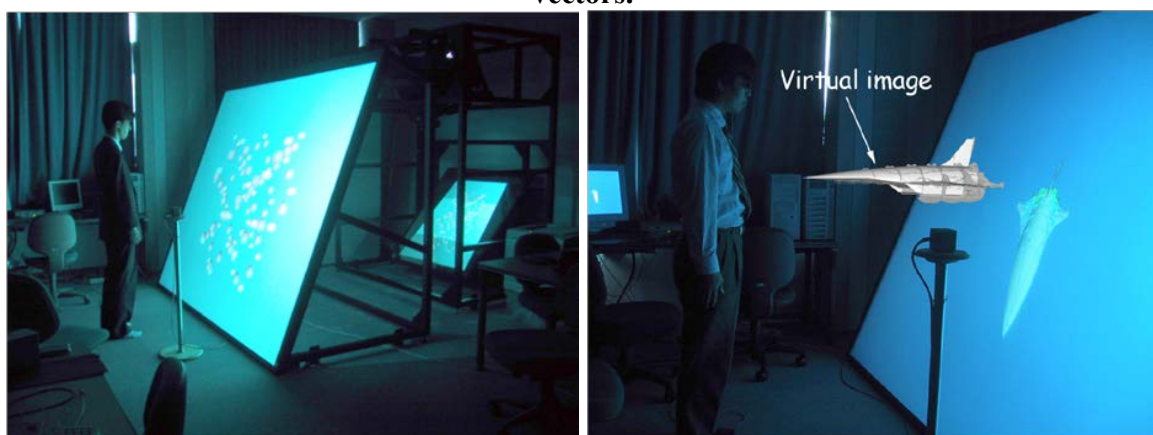


Figure 2. CANVAS having one large slant screen. Left: observing molecules. Right: flow around a spaceplane.

For scientific visualization, important factors for observing computed results in VR space are that we can see the results from every direction, that we can come up as close as we want and that we can see the object of its real scale. They are believed to help a viewer to recognize 3D conformation of the results.

Idea and Process

When an analysis is three-dimensional (3D), we want to see the visualized image in 3D. It is realized with stereovision or VR. When an experiment is recorded or shot in 3D, we also want to see it in 3D. After a certain post process, the experimentally recorded images can also be displayed in VR space, thus can be viewed with stereovision.

A visualization system of VR, that can handle both computed and experimental results, was developed as shown in fig. 3.

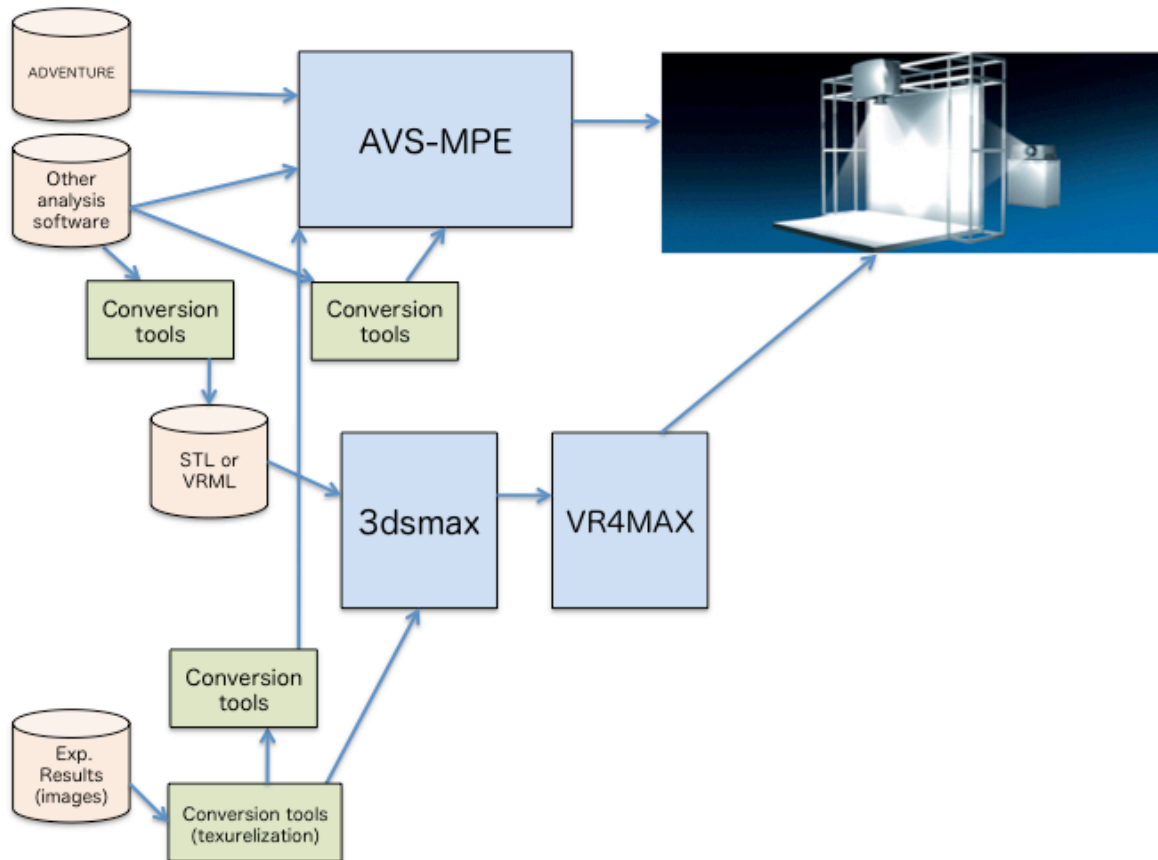


Figure 3. The design of the space-time simultaneous virtual reality visualization system. Bigger square boxes are software, smaller boxes are in-house conversion tools and cylinders represent data.

The upper-right picture is HoloStage and there are two routes to reach HoloStage. One is AVS/Express MPE [13] (AVS-MPE). It is a multi-screen version of AVS/Express (AVS), which is commercial scientific visualization software for all kinds of computational mechanics. AVS visualizes the data of several formats for a finite element method (FEM), a finite difference method, a particle method, and more. The other is VR4MAX [14], which is a computer graphics (CG) software for VR. AVS-MPE is the main path that allows results of ADVENTURE [15] software and other computational mechanics analysis as well as two-dimensional video images. Experimental 2D videos are mapped onto a rectangular panel with a specially developed AVS module in AVS-MPE. The video is firstly converted to sequentially numbered still images. The time steps of a computed result and an experimental video must be matched manually in advance.

Two network modules of AVS are shown in fig. 4. The left figure is for the computed results and the right for video images. The two network modules are linked with other AVS modules in order to synchronize the two results both in time and space. In time, the sequential number of the experimental data is counted up while the time step of the computed results advances together. The location, the orientation and the scale of the computed results and the video images are also controlled together, typically by the controller input (fig. 5).

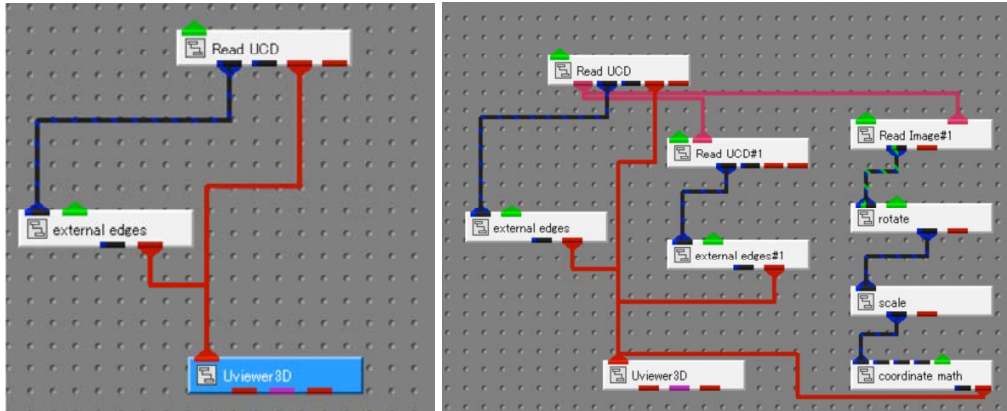


Figure 4. Parts of AVS network module. Left: for computed results. Right: for sequentially numbered images.



Figure 5. The controller and the stereo glasses. Four balls attached to the controller and the glasses are the markers for a visual motion capture system.

Figure 6 illustrates a whole module network of AVS-MPE even though the detailed explanation of AVS is out of scope of this article.

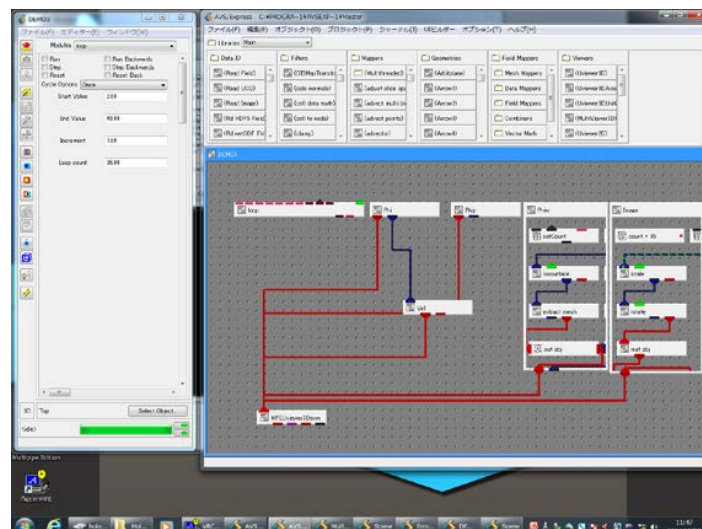


Figure 6. A whole module network of AVS-MPE.

The other types of data are displayed with VR4MAX. As described above, VR4MAX is CG software but does not have modeling functions. Thus 3ds Max [16], which is standard CG software, is used to make CG models. As analysis software, in general, does not output data for 3ds Max directly, here data for visualization is created by our in-house post-process

software and converted into VRML format, which is supported by 3ds Max. Experimental videos can be displayed as a texture of a CG object.

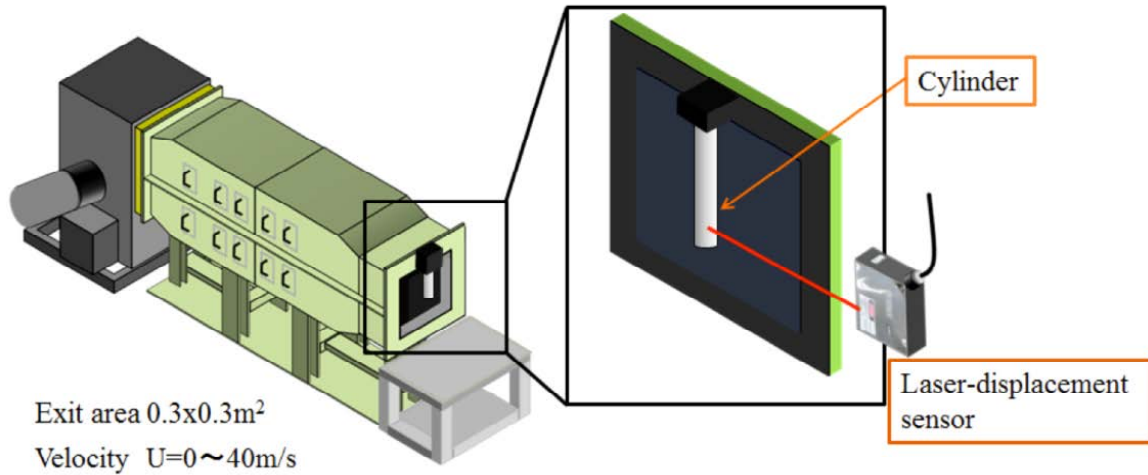


Figure 7. Schematic picture of the experimental setup.

Results and Discussions

In this section, an example of visualization by the present VR system is described. The so-called standard problem of fluid-structure coupled analysis proposed in this book (see the chapter of “Experiment on Oscillating Circular Cantilever for Fluid-Structure Interaction Code Validation”) is applied. Figure 7 schematically shows the setup of the experiment. The low speed wind tunnel gives uniform flows of 10 - 40 m/s to hit a cylinder that is fixed at the top wall and that is deformed or is vibrated according to the condition of the flow and the material properties of the cylinder. High-speed video cameras, which are not illustrated in the figure, are located so as to obtain the views from the side and the bottom of the cylinder. Snap shots of the movies are shown in fig. 8. In the left figure, the cylinder slightly deforms by the flow from the left to the right.

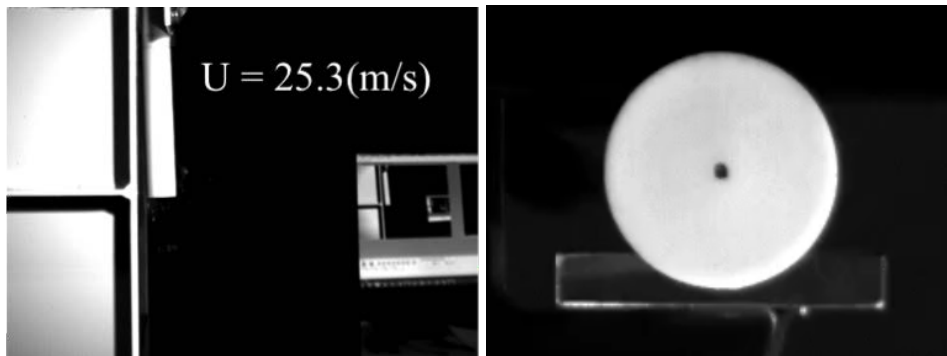


Figure 8. Snap shots of experiment. Left: side view. Right: bottom view.

Computation is done by our in-house fluid-structure analysis code also described in this book (see the section of “Development of Large Scale Fluid-Structure Coupled Analysis Method by the Enriched Free Mesh Method”). Both the flow field and the cylinder are discretized with a sort of FEM. More accurately, the flow field is computed with the SUPG-PSPG stabilized FEM [17] and the structure of the cylinder is analyzed with the enriched free mesh method (EFMM) [18]. Both results of the flow field and the structure of the cylinder are output as the format of ADVENTURE, and thus directly visualized with AVS-MPE.

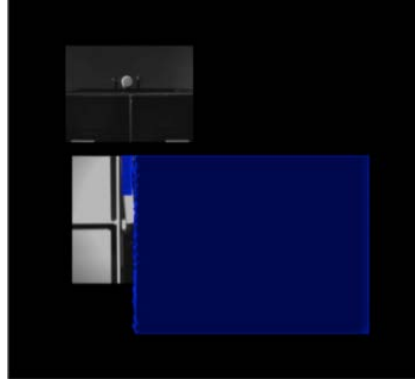


Figure 9. A monitor image of AVS showing two experimental video images and the corresponding computed result onto one of these videos.

Figure 9 shows the monitor image of the computed and the experimental results visualized with AVS (not AVS-MPE). One of the two video images (the side and the bottom views) is overlapped with the computed result. As expected, it is not easy to compare the computation and the experiment results. A usual side-by-side arrangement might be better for the comparison on a monitor display.

On the other hand, In VR space, two results are separately recognized even if they are overlapped each other. Especially in the present case, the video image is 2D and the computed result is 3D. Then changing the view angle simply highlights their difference. Figure 10 shows a picture of VR space showing two experimental video images and the corresponding computed result at the same location, the same orientation and the same scaling of one of the videos. The side view video and the computed result are overlapped. You can see doubled images in this figure, but because of the stereovision.

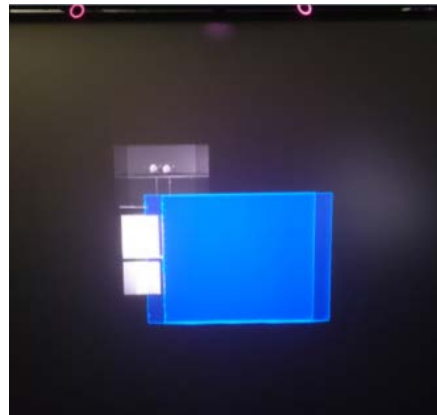
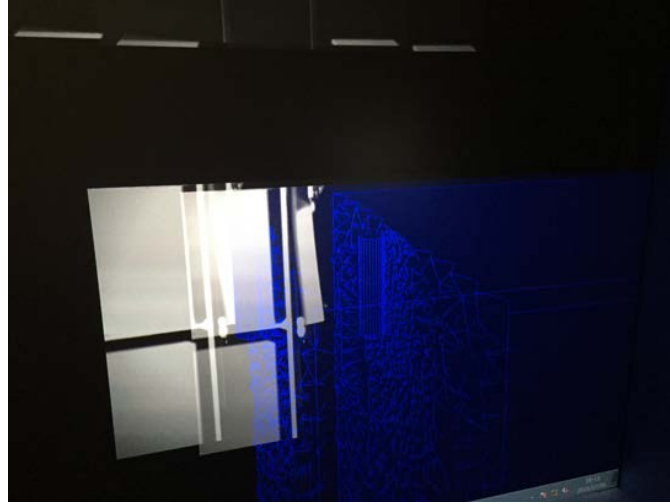
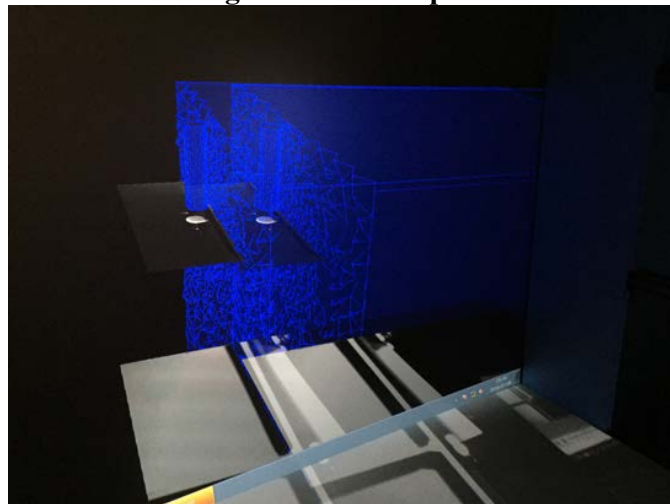


Figure 10. Space-time simultaneous visualization in VR space. Experimentally obtained video images and the corresponding computed result are displayed at the same time on the same location with the same scaling. As to stereovision, images of the left and the right eyes are doubly displayed. Two red circles on the top are infrared cameras to detect the viewer's location and orientation.

Figure 11 shows images from the viewer's eyes. In fig. 11 (a), the video from the side and the corresponding computed result are displayed side by side. This is a typical arrangement for comparison. You might recognize the difference of the two results but there is no significant difference in VR space and on a standard monitor. On the other hand, the video from the bottom and the corresponding computed results are overlapped in fig. 11 (b). In VR space, the difference of the two results must be clearly observed.



(a) The side view of the video is placed aside of the computed result. A typical arrangement for comparison.



(b) The bottom view of the video is placed almost coinciding with the computed result. An example of the space-time simultaneous visualization.

Figure 11. An image from viewer's eyes.

Compared with the previous systems on CABIN and CANVAS, the possibility of the present system becomes clear. In CABIN or CANVAS, only computed results are visualized. We could enjoy the stereovision and experience the virtual world, but CABIN and CANVAS did not show the capability for V & V more than visualization on a computer monitor. The present system apparently shows the capability of visual comparison for V & V.

One of current problems of the present system is a manual control of the location and the size of the two results in order to be perfectly overlapped. Also the video image includes the distortion of the lens, resulting in degrade of accuracy. These spatial matching problems are crucial, especially in the present particular situation that the deformation of cylinder is small. In the computation, the deformation can be numerically enlarged, for example ten times of the original values, but not in the experiment. If we want to enlarge the deformation in experimental images, some special techniques of image processing might be necessary. It is left for future works as well as the stereovision video shooting in experiment.

In this article, the example with AVS-MPE is described. The other route with VR4MAX has another possibility. VR4MAX as well as 3ds Max is pure CG software and they have various

functions for CG expressions. They can create photo-realistic images of VR space, such as those of laboratories or of any other places, which might give us more immersive environment. The present system was developed for IPT but HMD is less expensive and tends to become common lately. The present author has a little experience of Oculus Rift [19] (Oculus) and Oculus and other similar devices have well-designed developer's tools, such as Unity [20]. A disadvantage of HMD that HMD couldn't follow a rapid head motion is mostly overcome thanks to the progress of graphics power of PC. There other disadvantages are still left, namely a heavier headset, a narrower eyesight, etc. Despite them, HMD seems to have possibility to widen applications of VR for scientific visualizations. This article mainly deals with VR. There is a similar technology called augmented reality (AR) which superimposes CG images onto the real world, typically used for instruction, navigation, planning, etc. with see-through glasses or a computer monitor with a webcam or a smartphone. The present system has possibility to extend to AR in which a computed result is superimposed onto the corresponding experiment, being conducted just in front. This system is not a pure V & V but will be useful for "augmenting" the analysis.

Conclusions

A novel space-time simultaneous visualization system using VR technology is developed. The hardware for VR is HoloStage® Mini and the software is AVE-MPE, both are commercial products. On this VR system, some tools (AVS modules) are developed to display computed and experimental results. The present example of the fluid-structure coupled analysis and the corresponding experiment proves the possibility and usefulness of the present system. There are some problems left, e.g. matching of the precise location of two results, causing the deficiency of quantitative evaluation. VR is now becoming common and expected to be a new scientific visualization tool.

References

- [1] Zajac, E. E. (1964) Computer-made perspective movies as a scientific and communication tool, *Communications of the ACM* **7**, 169-170.
- [2] Buning, P. G. and Steger, J. L. (1985) Graphics and flow visualization in computational fluid dynamics, AIAA Paper 85-1507-CP.
- [3] Tamura Y. and Fujii, K. (1989) Use of graphic workstation for computational fluid dynamics, *A Collection of Technical Papers International Symposium on Computational Fluid Dynamics Nagoya*, 197-202.
- [4] Tamura Y. and Fujii K. (1994) Simulation of experimental visualization methods for computational fluid dynamics research, *International Journal of Computational Fluid Dynamics* **2**, 309-333.
- [5] Kageyama, A., Tamura, Y. and Sato, T. (2000) Visualization of vector field by virtual reality, *Progress of Theoretical Physics Supplement* **138**, 665-673.
- [6] Tamura Y., Kageyama, A., Sato T., Fujiwara, S. and Nakamura H. (2001) Virtual reality system to visualize and auralize numerical simulation data, *Computer Physics Communications* **142**, 227-230.
- [7] Yano, H., Hirose, M., Ogi, T. and Tamura, Y. (1999) Haptization of flow field using vibroglove, *Transaction of Information Processing Society of Japan* **40**, 414-421 (in Japanese).
- [8] Sutherland, I. E. (1965) The ultimate display, *Proceedings of IFIP Congress*, 506-508.
- [9] Cruz-Neira, C. Sandin, D. J. and DeFanti, T. A. (1993) Surround-screen projection-based virtual reality: the design and implementation of the CAVE, *SIGGRAPH '93 Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 135-142.
- [10] Hirose, M. (1997) CABIN-A multiscreen display for computer experiments, *Proceedings of Virtual Systems and MultiMedia 1997*, 78-83.
- [11] Tamura Y. (2002) Development of an immersive display system for flow visualization, *Japan Korea Computer Graphics Conference 2002*, 7.
- [12] Christie HoloStage® Mini - spatially immersive environment, <https://www.christiedigital.com/en-us/3d/products-and-solutions/standard-projection-solutions/christie-holostage-mini> (last access 5 Jul. 2016).
- [13] AVS/Express MPE, URL: <http://www.cybernet.co.jp/avs/products/mpe/> (last access 9 Feb. 2017).
- [14] VR4MAX, URL: <http://www.tree-c.nl/products/vr4max/> (last access 5 Jul. 2016).

- [15] Yoshimura, S., Shioya, R., Noguchi, H. and Miyamura, T. (2002) Advanced general-purpose computational mechanics system for large-scale analysis and design, *Journal of Computational and Applied Mathematics* **149**, 279-296.
- [16] 3ds max, URL: <http://www.autodesk.com/products/3ds-max/overview/> (last access 14 Feb. 2017).
- [17] Tezduyar, T. E. (1992) Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations, *Advances in Applied Mechanics* **28**, 1-44.
- [18] Yagawa, G. and Matsubara, H. (2007) Enriched free mesh method: an accuracy improvement for node-based FEM, *Computational Plasticity* **7**, 207-219.
- [19] Oculus Rift | Oculus, URL: <http://www.oculus.com/en-us/rift/> (last access 8 Jul. 2016).
- [20] Unity, URL: <https://unity3d.com/unity/> (last access 13 Feb. 2017).

Application of Machine Learning for Computational Mechanics

†Masato Masuda¹ and *Yasushi Nakabayashi²

¹Center for Computational Mechanics Research, Toyo University, Japan

² Faculty of Information Sciences and Arts, Toyo University, Japan

†mst.masuda@gmail.com

*nakabayashi@toyo.jp

Abstract

In this research, it aims to predict the degree of analysis results without analysis, by using a large amount of analysis results obtained by the computational mechanics.

First, the ultimate goal of this research is the analysis result prediction intended for the fluid-structure interaction analysis. But, for the sake of simplicity, the problem is dealing with the vibration problem of a two-dimensional cylinder with moving boundary problem in the fluid analysis. The initial conditions and the results of the numerical analysis are collected as teacher data, and given to the learning machines. We performed a numerical fluid analysis using ADVENTURE Fluid, mesh were smoothed using the velocity Verlet method. Analysis was calculated until the steady state.

In this study, machine learning is a neural network. Networks are constructed Multi-Layer Perceptron (MLP), modular network Self-Organizing Map (mnSOM) and Deep MLP using Auto-encoder of pre-process type. MLP is a very simple configuration of three layers with input layer, hidden layer and output layer. mnSOM is a general configuration using MLP to the module.

Benchmark problems using techniques respectively were solved. And we checked these prediction accuracy.

Then analysis result of our target is predicted. As the prediction result, the mnSOM and Deep MLP are clearly better than the MLP. In addition, Deep MLP and mnSOM was almost the same prediction performance. However, Deep MLP was obtained high prediction accuracy even though a small number of neurons.

Deep MLP can be better prediction with tuning. In summary, we propose a network that changed the module of mnSOM to Deep MLP.

Keywords: Machine Learning, Deep Learning, Neural Network, Perceptron, Self-Organizing Map.

Introduction

In recent years, computer improves the increasingly performance, the top of the super computer was got the calculation speed of 93PFLOPS in 2016 June[1]. This is a factor that became high speed of vector calculation by progress in generalization of GPU (Graphics Processing Unit). "Kei" computer in Japan recorded the performance of 10 PFLOPS. Against this background, Computational mechanics has become super large scale. Analysis of complex shapes and phenomenon are possible by the large-scale computing.

Experimental analysis is costly to make the modeling, experimental environment and maintenance for one analysis. The simulation can be easily analyzed for multiple conditions. If there is an assurance of analysis accuracy, the cost is lower than the experiment.

In fact, numerical analysis becomes high accuracy by creating a fine grid[2]. In addition, fluid-structure interaction analysis technique also has enabled highly accurate analysis by the large-scale computation[3]. In our CCRM team, we have been the variety analysis of fluid-structure interaction and large-scale[4][5][6].

On the other hand, mechanical learning is dramatically improved image recognition technology such as "Google's cat" [7][8]. A boom of artificial intelligence happens by these technology breakthroughs, and machine learning has achieved further development. Convolutional Neural Network (CNN), Recurrent Neural Network (RNN) and Multi-Layer Perceptron (MLP) etc. are being the mainstream of mechanical learning in the present day.

Arthur Lee Samuel proposed machine learning in 1959 as "Field of study that gives computers the ability to learn without being explicitly programmed." [9]. And, Mechanical learning was defined closely by Tom M. Mitchell as "A computer program is said to learn from experience E with respect to some class of tasks T and performance measure P , if its performance at tasks in T , as measured by P , improves with experience E ." in 1999 [10].

Research target of this paper is coupled analysis. We will develop a system to predict the analysis results from the initial conditions of the analysis. Analysis is directed to a vibration phenomenon of a two-dimensional cylindrical problem. The analysis is dealing with a moving boundary problem of fluid analysis for the sake of simplicity.

In this paper, machine learning is a neural network, and the techniques of Multi-Layer Perceptron (MLP) and modular network Self-Organizing Map (mnSOM) are used. And, Deep MLP using the technology of Deep Learning was constructed.

Each neural network solves the benchmark problems, and operation check was performed. We compare the respective prediction results, and show the advantage of a prediction by Deep Learning.

Numerical Analysis

In this present study, we aim to analyze the results prediction of fluid-structure interaction analysis. However, we deal with the vibration problem of fluid analysis intended for the two-dimensional cylindrical problem for simplicity. In addition, input and output for use as teacher data is defined in this chapter.

Analysis Model

Analysis model was elastically support the two-dimensional cylinder with a spring damper model in a direction perpendicular to the flow. A schematic diagram of the analysis model is shown Fig. 1. The influx gives a uniform flow from the left side of Fig. 1. Cylinder is vibrated up to down by the fluid force.

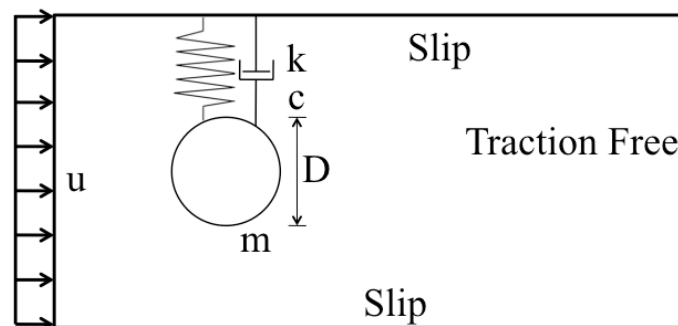


Figure 1. Model of Analysis

Fluid analysis uses the ADVENTURE_Fluid of ADVENTURE_system [11].

DVENTURE_Fluid is a large-scale parallel incompressible fluid analysis module by the finite element method. There are hexahedron code and tetrahedral code. Hexahedral code as based on the Q1-P0 element, is memory saving and high speed by one point integration. Also stabilization by BTM method is applied. Tetrahedral code as based on the P1-P1 element, is

stabilized by SUPG / PSPG method. These codes are parallelized using MPI. ADVENTURE_Fluid can cooperate with other modules of the ADVENTURE system and perform efficiently large-scale parallel analysis by domain decomposition method

In this paper, a coupled analysis of the incompressible viscous fluid and two-dimensional rigid cylinder using tetrahedral code of ADVENTURE_Fluid is performed. Weak form of the finite element method is expressed as follows.

$$\begin{aligned}
& \int_{\Omega} w_i \cdot \rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} - f_i \right) d\Omega + \int_{\Omega} w_{i,j} \sigma_{ij} d\Omega + \int_{\Omega} q u_{i,j} d\Omega \\
& + \sum_e \int_{\Omega^e} \tau_{SUPG} u_j w_{i,j} \left[\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k u_{i,k} - f_i \right) - \sigma_{ik,k} \right] d\Omega \\
& + \sum_e \int_{\Omega^e} \tau_{PSPG} \frac{1}{\rho} q_i \cdot \left[\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k u_{i,k} - f_i \right) - \sigma_{ik,k} \right] d\Omega \\
& = \int_{\Gamma_h} w_i h_i d\Gamma
\end{aligned} \tag{1}$$

An algebraic equation obtained by discretizing this equation becomes asymmetric matrix. Since the pressure diagonal terms become nonzero by PSPG term, this equation can be solved directly. In practice, Bi-CGSTAB method is used in conjunction with the diagonal scaling pre-processing.

Mesh smoothing is used to grid control in accordance with the movement of the cylinder. And moving boundary using the ALE method is expressed. The weak form of SUPG / PSPG stabilized finite element method of ALE notation is shown below.

$$\begin{aligned}
& \int_{\Omega} w_i \cdot \rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j u_{i,j} - f_i \right) d\Omega + \int_{\Omega} w_{i,j} \sigma_{ij} d\Omega + \int_{\Omega} q u_{i,j} d\Omega \\
& + \sum_e \int_{\Omega^e} \tau_{SUPG} u_j w_{i,j} \cdot \left[\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_k u_{i,k} - f_i \right) - \sigma_{ik,k} \right] d\Omega \\
& + \sum_e \int_{\Omega^e} \tau_{PSPG} \frac{1}{\rho} q_i \cdot \left[\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_k u_{i,k} - f_i \right) - \sigma_{ik,k} \right] d\Omega \\
& = \int_{\Gamma_h} w_i h_i d\Gamma
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\bar{u} = u - \hat{u} \tag{3}$$

Here, \hat{u} is a moving speed of the mesh.

Vibration of the cylinder by the results obtained by integrating the traction around a cylinder at each time step, perform a mesh smoothing and move the position of the cylinder. Moving position and the moving speed of the cylinder is determined by the velocity Verlet method. The formula is indicated below.

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v(t)\Delta t + \frac{1}{2}a(t)\Delta t^2 \tag{4}$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \frac{1}{2}[a(t + \Delta t) + a(t)]\Delta t \tag{5}$$

Here, x , v , a and t are the position, speed, acceleration of the cylinder and time step of the fluid analysis. Fig. 2 shows the flow of analysis.

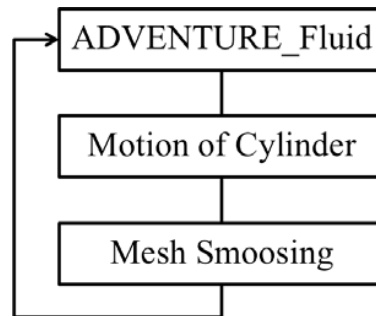


Figure 2. Flowchart of Fluid-Ridged Coupled Analysis

The mesh of the numerical analysis is shown in Fig. 3. Mesh is 256 points in the circumferential direction, and 64 points in the normal direction. Minimum grid width is $0.0003D$, and cylinder around holds a sufficient mesh resolution. Furthermore, ADVENTURE_Fluid is a 3-dimensional analysis code, and the analysis was pseudo two-dimensional analysis as the two nodes and 1 element. One example of analysis conditions is shown in the Table 1, the lift coefficient and drag coefficient is shown in Fig. 4. And the time history of the cylinder center position is shown in Fig. 5. The drag coefficient indicates a slightly higher value, but the vibration frequency and the lift coefficient were obtained generally satisfactory values.

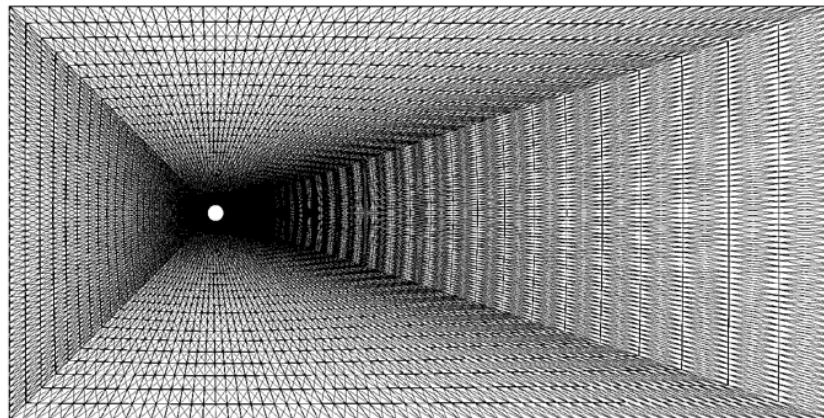


Figure 3. Mesh of 2-Dimentional Cylinder Model

Table 1. An Example of Calculation Condition

Time Step	1.0×10^{-3}	[s]
Flow Velocity	1.0	[m/s]
Cylinder Diameter	1.0	[m]
Reynolds Number	100	[-]
Cylinder Mass	1.0	[kg]
Spring Constant	1.0	[kg/s ²]
Dumper Constant	0.0	[kg/s]

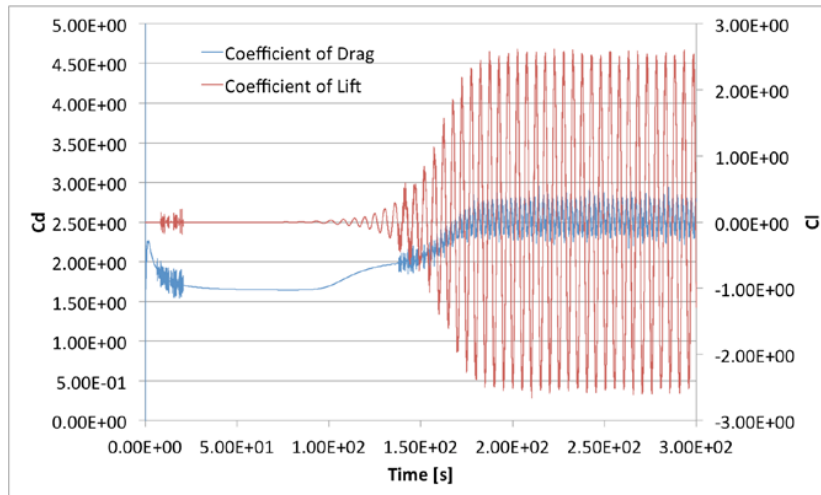


Fig.4 Coefficient of Lift and Drag at Reynolds Number 100

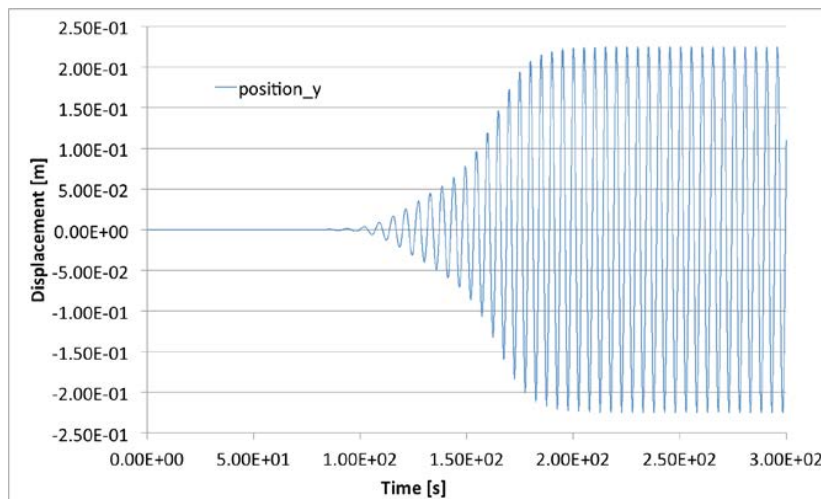


Fig.5 Displacement of Cylinder

Generation of Teacher Data

Next, we show how to create a teacher data. Aforementioned fluid-motion interaction analysis is analyzed until a steady state. The initial conditions of numerical analysis are the mass of cylinder, the spring constant, the damping coefficient, the velocity of the uniform flow, the Reynolds number and the natural frequency of cylinder. The lift coefficient, drag coefficient, the amplitude and frequency of the analysis result are obtained as Fig. 4, 5. In addition, the Strouhal number is also obtained.

Input and output items of teacher data are summarized in Table 2.

Input items are the following six. 1: Mass of Cylinder, this is the mass of the cylinder, using two types of 0.5kg and 1.0kg. 2: Spring Constant, this is a spring constant of the spring to support the cylinder, using two of 0.5kg/s and 1.0kg/s. 3: Dumper, this is the damping coefficient of the damper for suppressing the motion of the cylinder to damp the kinetic energy of the cylinder. If with damper, damping coefficient is 0.01kg/s². 4: Flow Velocity, this is uniform flow velocity from the inlet, flow velocity are two of 0.5m/s and 1.0m/s. 5: Reynolds Number, Reynolds number is a dimensionless quantity that is defined as the ratio of inertial forces to viscous forces. Reynolds number that is adjusted the kinematic viscosity coefficient, 100, 500, 1000 uses 3 ways. 6: Natural Frequency of Cylinder, this is the natural

frequency of the cylinder. This value is determined from the mass and the spring constant of the cylinder.

Table 2. Input and Output Items for Machine Learning

Inputs	Symbols [Unit]		Ways
Mass of Cylinder	m	[kg]	0.5 1.0
Spring Constant	k	[kg/s]	0.5 1.0
Dumper	c	[kg/s ²]	0.0 0.01
Reynolds Number	Re	[-]	100 500 1000
Natural Frequency of Cylinder	f _N	[Hz]	-
Outputs			
Amplitude of Cylinder	Ac	[m]	-
Frequency of Cylinder	f _C	[Hz]	-
Maximum Coefficient of Lift	C _L	[-]	-
Strouhal Number	St	[-]	-
Average Coefficient of Drag	C _D	[-]	-

Output items are five of the following obtained from the analysis results. 1: Amplitude of Cylinder, which is the largest amount of displacement when the cylinder vibrates. 2: Frequency of Cylinder, this is the frequency of the cylinder to oscillate regularly in the steady state. 3: Maximum Coefficient of Lift, this represents the coefficient of the maximum lift that cylinder receives from fluid. 4: Strouhal Number, Strouhal number is the vortex shedding frequency of Karman vortex that is released from the cylinder. 5: Average Coefficient of Drag, which is the average drag coefficient in the steady state.

Teacher data is 48 dataset, the number of combinations of input. Furthermore, we prepared 22 datasets for verification. The input items of verification data are shown in Table 3.

Table 3. Input Items of Verification Data

No.	mass	k	c	u	Re
1	0.750	1.000	0.000	1.000	100.000
2	0.500	0.750	0.000	1.000	100.000
3	0.500	1.000	0.005	1.000	100.000
4	0.500	1.000	0.000	0.750	100.000
5	0.500	1.000	0.000	1.000	300.000
6	0.500	1.000	0.000	1.000	750.000
7	0.750	0.750	0.000	1.000	100.000
8	0.750	1.000	0.005	1.000	100.000
9	0.750	1.000	0.000	0.750	100.000
10	0.750	1.000	0.000	1.000	300.000
11	0.750	1.000	0.000	1.000	750.000
12	0.500	0.750	0.005	1.000	100.000
13	0.500	0.750	0.000	0.750	100.000
14	0.500	0.750	0.000	1.000	300.000
15	0.500	0.750	0.000	1.000	750.000
16	0.500	1.000	0.005	0.750	100.000
17	0.500	1.000	0.005	1.000	300.000
18	0.500	1.000	0.005	1.000	750.000
19	0.500	1.000	0.000	0.750	300.000
20	0.500	1.000	0.000	0.750	750.000
21	0.750	0.750	0.005	0.750	300.000
22	0.750	0.750	0.005	0.750	750.000

The flow velocity of verification data is fixed to 1.0m/s. Other input items are intermediary value of the values of the teacher data. Location marked with the color of the Table 3 is an intermediate value. Numerical analysis for verification was also calculated until the steady state.

The verification data are given to network after learning by using the 48 data. The output results were compared with the results actual numerical analysis, and the error was calculated.

Multi-Layer Perceptron

In this chapter, Multi-Layer Perceptron (MLP) is described. MLP is a common approach of the neural network. We explain the Simple Perceptron, and describe the MLP.

Simple Perceptron

Simple Perceptron is such a structure of Fig.1.

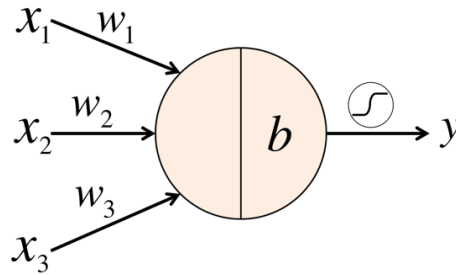


Figure 6. Simple Perceptron

Simple Perceptron is learning with the teacher data. The weight w_i is modified based on teacher data using the forward propagation method and gradient descent method. Forward propagation determines the output of the network as in the following expression.

$$y = f\left(\sum_i x_i w_i + b\right) \quad (6)$$

Here, b is a bias, $f(\cdot)$ is a transfer function. And the subscript i is the index of i -th input. Mean square error E is calculated from the output of teacher data and output of perceptron by the Eq. (6).

$$E = \sum \frac{(t - y)^2}{2} \quad (7)$$

Here, t is the output of the teacher data. Weights are modified by Back propagation by using the E . Formula conversion is omitted, but modified formula of weight is as below.

$$w_i = w_i + \Delta w_i \quad (8)$$

$$\Delta w_i = -\alpha \frac{\partial E}{\partial w_i} \quad (9)$$

$$\frac{\partial E}{\partial w_i} = (t - y) f'(x_i) \cdot x_i \quad (10)$$

The α is the learning rate, given a value less than 1. When the function $f(\cdot)$ is a sigmoid function, modified formula of weight is Eq. (11).

$$\Delta w_i = -\alpha(t - y)y(1 - y) \cdot x_i \quad (11)$$

The update equation is repeated enough times. The method of optimizing the weights so as to satisfy the teacher data is perceptron. The process to modify the weight is called learning.

Multi-Layer Perceptron

The Multi Layer Perceptron is a network that formed a simple perceptron hierarchical, commonly called the neural networks. A schematic diagram of an MLP is shown in Fig. 7.

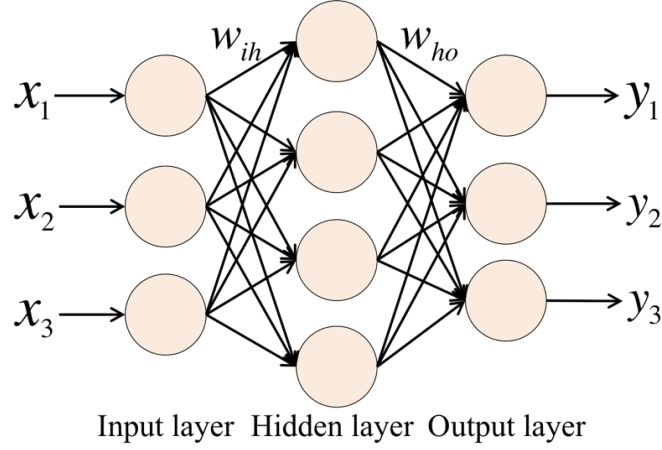


Figure 7. Multi-Layer Perceptron

w_{ih} is the weight that connects the input layer and the hidden layer, w_{ho} is the weight that connects the output layer and the hidden layer. The learning method calculates the loss function by forward direction calculation at first like a simple perceptron. In Forward propagation, an output of the perceptron is given as input for Perceptron of the next layer. An expression of the o-th output vector is Eq. 12.

$$h_o = f \left(\sum_j f \left(\sum_i x_i w_{ih,i} + b_j \right) w_{ho,j} + b_o \right) \quad (12)$$

Subscripts are i-th input vector, the number of j-th neurons in the hidden layer, and the o-th output vector. Weights are modified by the Back Propagation method. When the function $f(\cdot)$ is the sigmoid function, the weight w_{ho} connecting the hidden layer and output layer is updated by the following equation.

$$w_{ho} = w_{ho} + \Delta w_{ho} \quad (13)$$

$$\Delta w_{ho} = -\alpha(t_o - h_o)h_o(1 - h_o)h_h \quad (14)$$

The weights w_{ih} connecting the input layer and hidden layer are updated by Eq. (15).

$$w_{ih} = w_{ih} + \Delta w_{ih} \quad (15)$$

$$\Delta w_{ih} = -\alpha \sum_j \left(w_{ho,j} (t_o - h_o) h_o (1 - h_o) \right) h_h (1 - h_h) x_i \quad (16)$$

The h_h is the output of hidden layer. MLP is learned by solving the Eq. (12), (14) from the output side.

modular network Self-Organizing Map

This chapter describes the mnSOM. First, self-organizing map (SOM) is explained. mnSOM is a technique that is advanced SOM. SOM is a classification machine, and there is a function of grouping the input. mnSOM becomes prediction machine from classification machine by introducing module into SOM. In addition, SOM, mnSOM have functions of clustering the teacher data on the map and interpolating between the teacher data.

Self-Organizing Map

Self-Organizing Map (SOM), which is one of neural networks and was proposed by T. Kohonen[12], is a two-layered unsupervised competitive learning model that does not have a hidden layer. In the learning algorithm of SOM, the characteristics of input data are learned through neighborhood learning. A map is formed so that similar kinds of data are located in the neighborhood and other data are located at distant places. Accordingly, it is possible to visualize high-dimensional vector data, and understand the relations among data intuitively.

SOM has a map with the $M \times N$ grid, and weighted units exist (Fig.8).

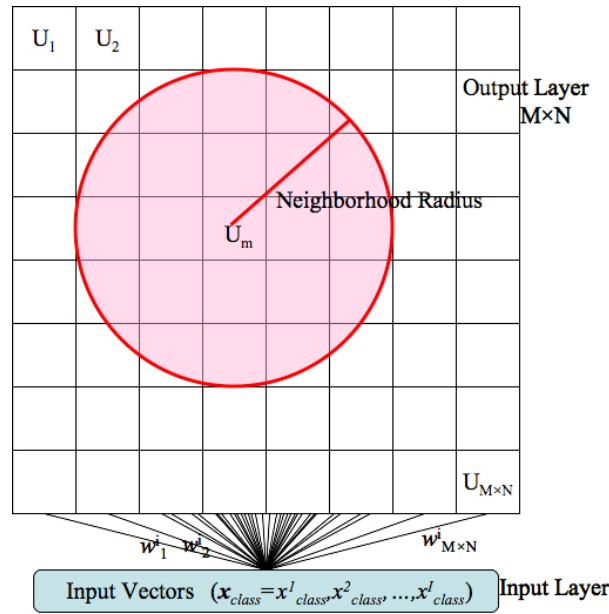


Figure 8. Conceptual Diagram of SOM

(U is map unit, m and n are unit number, w is uniting weight, X is input signal)

Unit weights are updated in neighborhood learning. The algorithm of SOM is as follows:

- Step 1. Initialize the weight vector w of units.
- Step 2. Input the vector $x_{class} = (x^1_{class}, x^2_{class}, x^3_{class}, \dots, x^I_{class})$ into input layer. Here, “class” represents the number of input vectors, and “I” denotes the dimension of the input vector.
- Step 3. Calculate the Euclidean distance “Dist” between an input vector and the weight vector of a unit in the map layer (competitive layer).

$$Dist_m = \sqrt{\sum_i (x^i_{class} - w^i_m)^2} \quad (17)$$

Step 4. Define the unit that minimizes the Euclidean distance obtained at Step 3 as the winning unit BMU (Best Matching Unit).

$$BMU = \arg \min_m Dist_m \quad (18)$$

Step 5. Update the weights of the winning unit and surrounding units only.

$$\Delta w_m^i = h(l(BMU, m))(x_{class}^i - w_m^i) \quad (19)$$

$$h(l) = \alpha \exp\left(-\frac{l^2}{2\sigma^2}\right) \quad (20)$$

Step 6. Repeat Steps 2 to 5 sufficiently.

Here, l represents the distance between the winning unit and the unit whose weight is updated. $h(\cdot)$ and σ denote the neighborhood function and the range of the influence of the neighborhood function (neighborhood radius), respectively. This is decreased according to learning steps. α is learning coefficient, ranging from 0 to 1. The learning coefficient α decreases as learning steps proceed.

modular network Self-Organizing Map

The modular network Self-Organizing Map (mnSOM)[13] replaces the unit of SOM to the module as shown in Fig. 9. Module is generally used for MLP. Competitive learning of mnSOM is learning by using the output of the module.

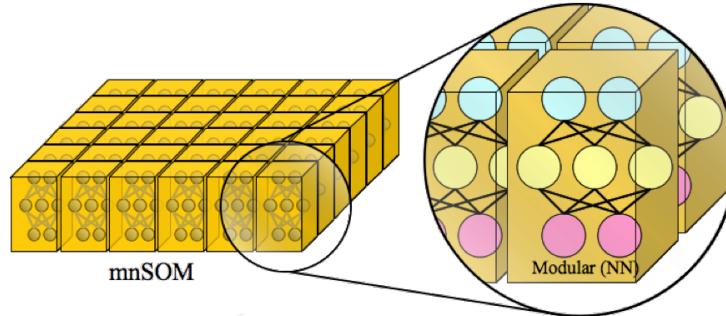


Figure 9. Image of mnSOM

The algorithm of mnSOM is shown below.

Step 1. Initialize the weight vector w of modules.

Step 2. Input the vector $\mathbf{x}_{teacher} = (x_{teacher}^1, x_{teacher}^2, x_{teacher}^3, \dots, x_{teacher}^I)$ into input of modules. Here, “teacher” represents the number of input vectors, and “ I ” denotes the dimension of the input vector.

Step 3. Calculate the output vector $\mathbf{y}_{teacher} = (y_{teacher}^1, y_{teacher}^2, y_{teacher}^3, \dots, y_{teacher}^J)$ of modules. “ J ” is the dimension of the output vector.

Step 4. Calculate the error E between output of module and output of teacher data.

$$E_{teacher} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (T_{teacher}^j - y_{teacher}^j)^2 \quad (21)$$

Step 5. Define the module that minimizes the error E obtained at Step 4 as the winning module BMM (Best Matching Module).

$$BMM_{teacher} = \arg \min_m E_{teacher} \quad (22)$$

Index “m” is number of module.

Step 6. Update the weights of the winning module and surrounding modules.

$$\Delta w = -\varepsilon \sum_{teacher}^{TEACHER} h_{teacher}(I) \frac{\partial E_{teacher}}{\partial w} \quad (23)$$

$$w^{new} = w^{old} + \Delta w \quad (24)$$

Here, ε is learning rate. Updating of the weights for 1 step is repeated enough times when the h and $E_{teacher}$ are fixed.

Step 7. Repeat Steps 2 to 6 sufficiently.

Deep Learning

Since the Deep Learning is a term that refers to the neural network of deep hierarchy, there is no learning machine named Deep Learning. Deep Learning solved the gradient loss (explosion) problems in the back-propagation method that occurs when the neural network is a multilayered. Furthermore, the network is solved complex problem by multilayered.

Deep Learning commencing with the Deep Belief Network[14] optimize the weight of the MLP by pre-processing. The network is aimed at high learning accuracy by this optimization. In this approach, the learning process by the back propagation is called fine-tuning, and the pre-processing is called pre-training. The pre-training calculates the weight of the MLP to reproduce the input vector using a Restricted Boltzmann Machine (RBM) or an Auto-encoder (AE)[15] and etc. The pre-training is unsupervised learning. The weights of the network are the value extracted the feature of the input vector. The weight optimized by pre-training is used, so the learning precision of the network is the mechanism to improve. Because the weight optimized by pre-training is used, the learning precision of the network is the mechanism to improve.

As a feature of Deep Learning, each layer of the neural network is processed independently. Thus, gradient loss problems caused by multi-layered is solved, and super multi-layer of the network is constructed. Further, the network corresponding to different prediction problems, by solving each layer with different approach.

For example, the image recognition mainly uses Convolutional Neural Network (CNN) [16]. Pixel of the image is given to the network as the input vector, and the input vector is compressed and feature is extracted. Since pixels in the image have a continuity of the data, compression of the data by the convolution is valid.

In speech recognition, primarily Recurrent Neural Network (RNN) [17] is used. Speech data is given the input of the sound in the time series, and the word is inferred from past information and current information. Recently, speech recognition can accurately recognized using a Long Short Term Memory (LSTM) [18].

Our Deep Learning technique is the MLP pre-processed using the AE. There is no continuity in the analysis conditions given as an input vector. Analysis conditions do not handle as in the image data. And the data is not the time sequence data. Therefore, CN and RNA are inconsistent with our purpose. We expect to improve the learning accuracy by the feature extraction from the input data by the AE. This technique is called Deep MLP.

Deep MLP

In this chapter, Deep MLP which is a network performed pre-training by the AE is explained. Deep MLP was tested a handwritten digit recognition as a benchmark problem.

Network Structure

Deep MLP performs pre-training and fine-tuning as Fig. 10. There are two ways in the fine-tuning. One is a method to perform fine-tuning in the whole network. The other one is the way to perform fine-tuning several layers of the output side.

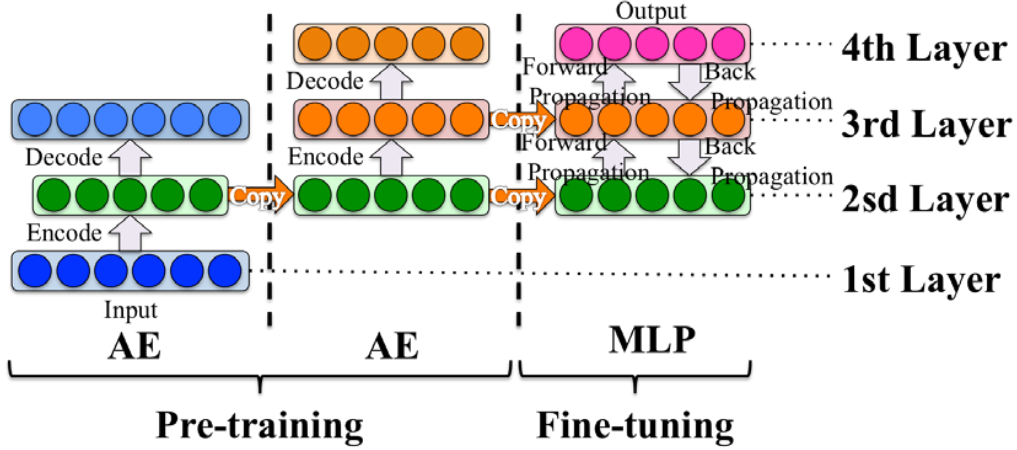


Figure 10. Image of Deep MLP

The encode formula and decode formula of AE are as follows:

$$\text{encode: } y = f(Wx + b) \quad (25)$$

$$\text{decode: } z = f(W'y + b') \quad (26)$$

Here, $f(\cdot)$ is sigmoid function. W and b are weight and bias. W' is used transpose of W (tied weight). The amounts obtained by differentiating the loss function with respect to weight and bias are used for each modify amount.

Benchmark Test of Deep MLP

As a benchmark problem, handwritten digit recognition is done. Learning data uses the MNIST [19]. The digits data are images of 28×28 pixels and are labeled with one-hot.

Network was simple configuration of 4-layers. The pre-training by AE in two layers from the input layer is performed, and MLP is learned in three-layer from the output layer. The results of the benchmark got a good result with a score of 85.1 percent. Correct answer rate is expected to further rise by learning of the deeper layers.

Learning Results

In this chapter, the result of numerical analysis is predicted using machine learning. In addition, Prediction results for MLP, mnSOM and Deep MLP are compared and summarized. In this case, the learning coefficient is fixed at 0.01 and the iteration of learning is fixed at 10,000 steps. Training data is given six input of analysis condition and the five output of analysis result as shown in the Table 2. Learning is used 48 datasets as Training data. Verification is used 22 datasets of unlearned data.

MLP is constructed of three layers, and the number of neurons of the intermediate layer is 900. Module of mnSOM is the 3-layered MLP. The number of neurons in the hidden layer is 50. Map size is 10×10 . Deep MLP is a network of five layers. The hidden layers are 3 layers. The number of neurons in respectively layers is 50. Result is shown in the Table.6 when given validation data after learning.

Table 6. Error Rate of Learning Result

	MLP	mnSOM	Deep MLP
Average error	73.5 %	51.3 %	53.1 %
Maximum error	230.3 %	214.1 %	227.3 %
Number of Neurons (hidden)	900	50 / module	50 × 3Layers

Error Rate is defined by the following equation.

$$Error = \sum_o \left(\frac{\|NN - correct\|}{correct} \right) \quad (27)$$

$$average = \frac{\sum Error}{DATA} \quad (28)$$

$$maximum = \underset{data}{\operatorname{argmax}}(Error) \quad (29)$$

Here, NN is the output of the neural network, $correct$ is the value of the analysis result. Subscript o is the number of output items, and $data$ represents the number of datasets.

From Table 6, the average error of mnSOM and Deep MLP were clearly better than the MLP. Maximum error was not much difference in all networks. Maximum error was recorded when given the same dataset to all learning machine. Predictions of 21-th and 22-th of validation data were insufficient. It is due to the weak network to unknown input. However, when comparing the number of neurons, Deep MLP is the smallest number of neurons in these methods. Learning accuracy of Deep MLP is the same as the mnSOM even if the number of neurons is small. In order to increase the prediction accuracy in this network, it is necessary to learn using more teacher data and to tune the network. Tuning is to increase the number of layers and number of neurons. By doing so, learning accuracy will be improved.

Conclusions

Neural network that predicts analysis results was constructed using MLP and mnSOM and Deep MLP. In each method, learning accuracy and the number of neurons were compared. The results are summarized below.

- By building the neural network of the five-layer, capacity to deal with problem was raised. Thereby prediction accuracy of Deep MLP is clearly better than MLP.
- Even if number of neurons is small, the same prediction result as mnSOM is obtained by increasing layers.

The Deep MLP is a network without tuning. Therefore, we think that it is possible to improve the prediction accuracy by tuning. By Increase the number of layers and neurons, prediction accuracy will be more improvement.

Finally, although not summarized in this paper, we are thinking the Deep mnSOM that changes mnSOM module to Deep MLP. In view of the fact that mnSOM and Deep MLP has clearly improved accuracy more than the MLP, we believe that Deep mnSOM gives great result better than the Deep MLP and mnSOM.

References

- [1] Super Computer Top500, <https://www.top500.org> (as of 31 July, 2016)

- [2] Masao Ogino, Ryuji Shioya, Parallel Finite Element Analysis of 100 Billion DOFs based on the Hierarchical Domain Decomposition Method, Proceedings of the Conference on Computational Engineering and Science 18, 4p, 2013, in Japan
- [3] Yuri Bazilevs, Kenji Takizawa, Tayfun E. Tezduyar, 流体-構造連成問題の数値解析, 森北出版株式会社
- [4] Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, Eiichi Nagai, Toshimitsu Fujisawa, Akira Anju, Hiroshi Kanayama, Satoshi Tanaka, Kyoko Hasegawa, Large-Scale Tsunami Run-Up Analysis Using Particle Method, High-Performance Computing for Structural Mechanics and Earthquake / Tsunami Engineering (Springer Tracts in Mechanical Engineering), Springer, pp.157-177, 2015
- [5] Hiroshi Kawai, Masao Ogino, Ryuji Shioya, Shinobu Yoshimura, Fundamentals of High-Performance Computing for Finite Element Analysis, High-Performance Computing for Structural Mechanics and Earthquake / Tsunami Engineering (Springer Tracts in Mechanical Engineering), Springer, pp.1-21, 2015
- [6] Shinsuke Nagaoka, Yasushi Nakabayashi, Genki Yagawa, Fluid-Structure Coupled Analysis Using Enriched Free Mesh Method, Key Engineering Materials, Vols. 462-463, pp.1238-1243, 2011
- [7] Quoc V. Le, Marc'Aurelio Ranzato, Rajat Monga, Matthieu Devin, Kai Chen, Greg S. Corrado, Jeff Dean, Andrew Y. Ng, Building High-level Features Using Large Scale Unsupervised Learning, Appearing in Proceedings of the 29th International Conference on Machine Learning, Edinburgh, Scotland, UK, 2012
- [8] IMAGENET Large Scale Visual Recognition Challenge 2012 (ILSVRC2012), <http://image-net.org/challenges/LSVRC/2012/results.html> (as of 31 July, 2016)
- [9] Arthur Lee Samuel, Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers, IBM Journal, Vol.3, No.3, p.535-554, 1959
- [10] Tom Michael Mitchell, Machine Learning, McGraw Hill. ISBN 0-07-042807-7, 1997
- [11] ADVENTURE Project, <http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/jp/> (as of 31 July, 2016)
- [12] T. Kohonen, Self-Organizing Maps, Springer-Verlag, 1995
- [13] T. Furukawa, K. Tokunaga, K. Morishita and S.Yasui, Modular network SOM (mn- SOM) : From vector space to function space, Proceeding of International Joint Conference on Neural Networks, pp.1581-1586, 2005
- [14] Geoffrey E. Hinton, Simon Osindero, Yee-Whye Teh, A Fast Learning Algorithm for Deep Belief Nets, Massachusetts Institute of Technology, *Neural Computation*, No.7, vol.18, pp.1527-1554, 2006
- [15] G. E. Hinton; and R. R. Salakhutdinov, Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks, *Science* vol.313, pp.504-507, 2006.
- [16] Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio, P. Haffner, Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition, *Proc. IEEE*, 1998
- [17] Tomas Mikolov, Martin Karafiát, Lukas Burget, Jan "Honza" Cernocký, Sanjeev Khudanpur, Recurrent neural network based language model, Proceedings of the 11th Annual Conference of the International Speech Communication Association (INTERSPEECH 2010), 2010
- [18] Felix A. Gers, Nicol N. Schraudolph, Jürgen Schmidhuber, Learning Precise Timing with LSTM Recurrent Networks, *Journal of Machine Learning Research*, 3, pp.115-143, 2002
- [19] Yann LeCun, "The MNIST database of handwritten digits", <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/> (as of 31 July, 2016)

High Performance Computing for Large Scale Structural Analysis

R. Shioya¹, Hiroshi Kawai², M. Ogino³

¹Faculty of Information Sciences and Arts, Toyo University, JAPAN

² Faculty of Engineering, Tokyo University of Science-Suwa, JAPAN

³Information Technology Center, Nagoya University, JAPAN

Introduction

In November 2016, TOP500 [1] List of the world's top supercomputers reported that the world's fastest supercomputer is Sunway TaihuLight, NRCPC, China with 93 Peta Flops (PFlop/s) of maximal LINPACK performance and in June 1993 when the first list of TOP500 was released, it was CM-5/1024, Los Alamos National Laboratory, United States with 59.7 Giga Flops (GFlop/s). Therefore, it is about 1,500,000 times faster in these 23 years, that is, about 1.9 times faster per year. According to the Moore's law [2], it is 2 times per year. With such speed-up, in 2020, it will achieve over 1 Exa Flops (EFlop/s), so called post petascale speed.

To use such high performance computers in the post generations of petascale supercomputer, developing system software technologies as well as related systems is very important. More concretely, research and development of system software enable us to exploit maximum efficiency and reliability from supercomputers which will be composed of general purpose many-core processors as well as special purpose processors, so called GPGPU. In addition to the system software such as programming languages, compilers, runtime systems, operation systems, communication middleware, and file systems, application development support systems and ultra-large data processing systems are important targets for research and development.

In such situation, we have been developing open source system software, ADVENTURE [3], which is a general-purpose parallel finite element analysis system and can simulate a large scale analysis model with supercomputer like the Earth Simulator or K-computer. In the system, HDDM (hierarchical domain decomposition method), which is a very effective technique to large-scale analysis, was developed. The aim of our project is to develop a numerical library based on HDDM that is extended to pre and post processing parts, including mesh generation and visualization of large scale data, for the post petascale, that is, exa scale simulation (Fig. 1).

HDDM Library for Post PetaScale Computing

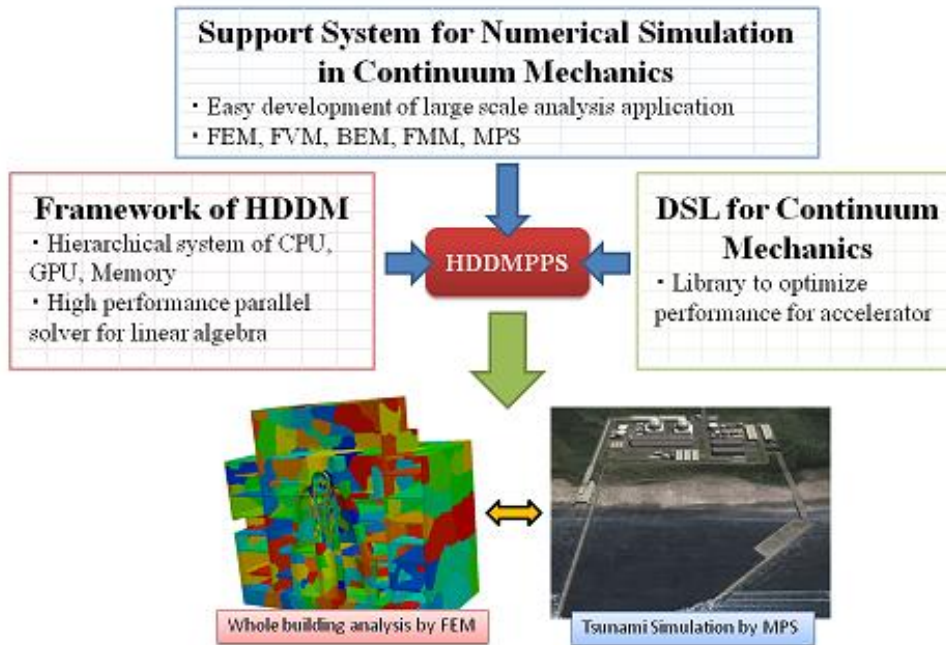


Fig.1: HDDM Library for Post Petascale Computing.

1. Overview of ADVENTURE SYSTEM

Various general-purpose computational mechanics systems have been developed in the last three decades to quantitatively evaluate mechanical / physical phenomena such as deformation of solid, heat transfer, fluid flow and electromagnetics. Nowadays such systems are regarded as infrastructural tools for the present industrialized society. The existing systems, however, cannot be used with massively parallel processors (MPPs) with the order of 100-10,000 processing elements (PEs), which are about to dominate the high-performance computing market in this century, as they were developed for single-processor computers, which took leadership an age ago. Neither can the current systems be used in heterogeneous parallel and distributed computing environments such as the Grid. Owing to the fact, they can deal with only medium scale problems with millions degrees of freedom (DOFs) at most.

The ADVENTURE project [3, 4] was one of the research projects in the "Computational Science & Engineering" field selected for the "Research for the Future (RFTF)" Program sponsored by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) [5] during 1997-2002. The project is continuously going on as an open source software development project. In the project we have been developing an advanced general-purpose computational mechanics system named ADVENTURE since August 1997. The system was designed to be able to analyze a three-dimensional (3D) finite element model of arbitrary shape over 100 million DOF mesh, and additionally to enable parametric and non-parametric shape optimization. The first version of the ADVENTURE system has been released from the project website as open source software since March 2002 [3]. About 1,320 registered users in academia and industries are now using the programs, while one private company has developed and released its commercial version named ADVENTUREcluster [6, 7].

Domain-decomposition-based parallel algorithms are implemented in pre-processes (domain decomposition), main processes (system matrix assembling and solutions) and post-process (visualization), respectively. Especially the hierarchical domain decomposition method with a

preconditioned iterative solver (HDDM) [8-10] is adopted in two of the main modules for solid analysis and thermal conduction analysis, named ADVENTURE_Solid and ADVENTURE_Thermal. The employed pre-conditioner is the Balancing Domain Decomposition (BDD) type method [11-18]. To efficiently solve a coarse space problem derived from equilibrium conditions for singular problems associated with a number of subdomains appeared in the BDD formulation, an incomplete factorization based parallel direct solver is employed. The ADVENTURE_Solid has been successfully implemented on a single PC, PC clusters and supercomputer such as the Earth Simulator or K-computer.

The ADVENTURE system consists of pre-, main- and post-processing modules and design modules that can be used in various kinds of parallel and distributed environments. The system employs HDDM based massively parallel algorithm as one of the major solution algorithms in order to handle a huge-scale finite element model over 100 million DOFs efficiently. The system employs module-based architecture and consists of 19 modules. The pre-process modules include the surface patch generator which converts geometry model data into a collection of triangular surface patch data, named ADVENTURE_TriPatch, a tetrahedral mesh generator [19, 20], i.e. ADVENTURE_TetMesh, an attachment tool of boundary conditions and material properties onto the mesh, i.e. ADVENTURE_BCtool, and a domain decomposer of a finite element model, i.e. ADVENTURE_Metis. The kernels of the ADVENTURE_Metis are a graph partitioning tool METIS and its parallel version ParMETIS developed in the University of Minnesota [21, 22]. The main process modules, i.e. solvers include an implicit elastic-plastic analysis module named ADVENTURE_Solid [9-10, 18] which enables large-deformation and implicit dynamic analyses, a thermal conductive analysis module named ADVENTURE_Thermal, a thermal-fluid analysis module named ADVENTURE_Fluid, a magnetic analysis module named ADVENTURE_Magnetic [23], an explicit impact analysis module named ADVENTURE_Impact, and a rigid plastic analysis module named ADVENTURE_Forge. The post process module named ADVENTURE_Visual is for parallel visualization of analysis results [24]. Common functions related to finite elements are programmed as class libraries named libFEM. Figure 2 shows the configuration of the ADVENTURE modules.

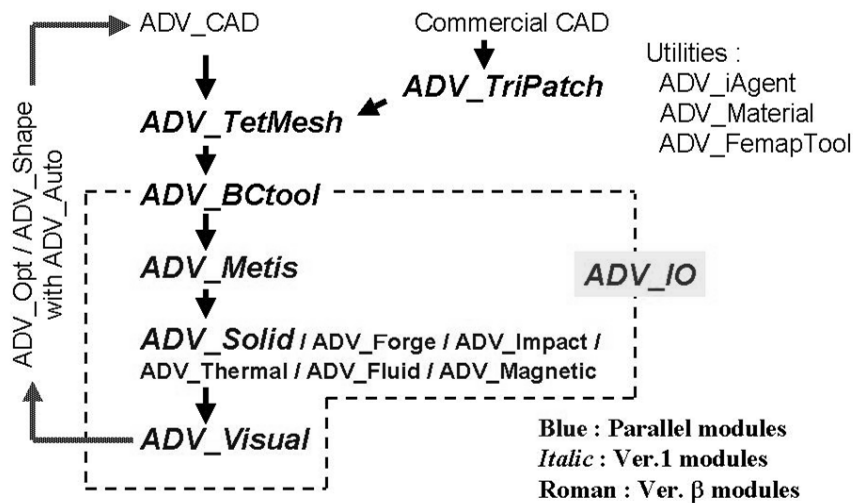


Fig.2: Configuration of ADVENTURE modules.

2. Hardware

A typical modern supercomputer consists of many computational nodes. They are connected each other by high-speed network interconnect. Each computational node holds

one or a few processor chips and its associated memory chips, thus forming a distributed memory parallel computer. As a result, both intra-node and inter-node performance are important for the performance design of simulation code. Here in this section, these hardware components are explained briefly.

2.1 Processor and memory

Nowadays, a processor can issue multiple instructions and execute multiple floating point operations for each clock cycle. For example, a pair of multiplication and addition, or a set of multiply-add pairs packed in one SIMD instruction. It is called Instruction-Level Parallelism (ILP). For example, if a processor can handle 8 double precision (DP) floating-point operations per clock, and it runs with 2 GHz, its DP peak performance is $8 \times 2 = 16$ GFLOPS. In real code, however, it is very likely that only a small portion of these computational resources is utilized. It is so-called “ILP wall” problem, and it is gradually widening the gap between the ideal, peak performance of the hardware and the actual, sustained performance when running real application code on the hardware.

In recent years, the number of cores in a chip had also increased. Here, “core” means “processor” in a traditional sense. Until recently, one processor corresponds to just one chip, or sometimes to multiple chips in case of very complicated processor design. But nowadays, because of Moore’s law, one processor chip can hold multiple processors. To avoid ambiguity, the keyword “processor” is renamed to “core”. Thus, it is called “multi-core”. Currently, a typical scalar processor has 2, 4, 8 or 16 cores in one chip, although there are some “many-core” chips having more than twenty cores. They can be regarded as a shared memory computer in one chip. Either MPI or OpenMP can be used for parallel programming. Even if the processor can perform multiple operations per clock, in reality, it is no meaning if data cannot be supplied from the memory system into the processor in enough speed. Memory access pattern is the important keyword to understand the performance characteristics of the memory system. Let’s imagine the memory access patterns in a loop. It can be sequential, stride or random. In case of random access, actually it may be indirect index access.

Cache memory is very important in the design of modern scalar processors, and it is related to a memory access pattern called data locality. In short, the cache memory is a fast but small special memory region, and it is separated from the main memory. When the processor tries to read a small amount of data from the main memory, the fetched data is once copied into the cache memory automatically. Then, suppose this small data becomes necessary again. If the data still remains on the cache memory, instead of reading the original data again from the slow main memory, it is sufficient to access this copy from the fast cache. This means, it is better to keep using this small amount of data as much as possible. If the size of frequently used data is larger than the size of the cache, however, it doesn’t work in this way. While reading it, most of data are kicked out of the cache, and it ends up virtually accessing to the main memory. Thus, the cache mechanism works only if “a relatively small amount of data is accessed repeatedly, repeatedly and repeatedly”.

Then, how can we utilize such tricky cache mechanism? There is a well-known technique called blocking or tiling. In cache blocking, a big data region is divided into many small data blocks first. For example, in case of a matrix, it is decomposed into multiple sub-matrices. They look like tiles. Using associated blocking algorithm, once a small block is read from the main memory, it is utilized repeatedly before the next one is needed.

However, if any blocking algorithm cannot be devised, how come? In this case, sadly, you have to directly tackle against the slowness of the main memory. Now, memory bandwidth becomes a serious issue. To consider the memory bandwidth problem, it is useful to understand the keyword, B/F ratio. B/F ratio measures how much data can be read / write from / to the main memory for each execution of floating-point operation. This ratio typically

assumes a specific numerical algorithm. If the actual B/F ratio value is no less than the value originally required by the algorithm, it is OK. Otherwise, there is memory bandwidth bottleneck.

The recent rapid growth of the raw computational power of a processor chip in terms of floating point operations, caused by the increase of both the number of processor cores and the number of SIMD ways, has made this memory bandwidth issue more serious and desperate. Thanks to Moore's law, the growth pace of the FP capability is far exceeding that of the memory bandwidth. While each core has its own cache memory (roughly speaking), the path to the main memory is basically shared among all the cores, because it is "shared memory". As a result, only the algorithms which can take advantage of cache mechanism can keep up with the growth of the computational power, while B/F ratio will drop further.

2.2 Network interconnect

In modern supercomputing, distributed memory parallel architecture is the primary hardware architecture. A supercomputer is composed of multiple computational nodes. Each of them has its own memory space. A computational node cannot directly access memory owned by other nodes. Instead, it has to send / receive data to / from others through this high-speed network interconnect.

As the architecture of the network interconnect, nowadays torus or fat tree is utilized for a high-end supercomputer, while for low-end HPC environment like a PC cluster, switching hardware is used. The fat tree can be said to be cascade of switches. On the other hand, in case of the torus architecture, each node has very high bandwidth connection directly, but to only a few neighbouring nodes. To communicate to any node other than these neighbour nodes, data has to be relayed through one or a few intermediate nodes. It is typically used to connect relatively large number of nodes.

To use such a distributed memory parallel computer, care must be taken about communication patterns. Because some of the communication patterns are either inherently efficient or strengthened by additional hardware mechanism, the use of these special patterns should be considered first in the design of parallel software.

Global communication, such as barrier, broadcast and reduce operations are frequently used in various kinds of parallel programs. High-speed interconnect supports those patterns directly in hardware level. Therefore, if these communication patterns are recognized in your code, instead of ordinary send / receive protocol, the corresponding special communication API or directives should be used. They are the only routes to take advantage of the special network hardware mechanism.

On the other hand, neighbour communication is another important pattern. To understand it, let's consider the difference between bus and switch. Suppose there are four nodes, A, B, C and D. In case of the bus architecture, node C and D cannot communicate while node A and B are talking. In case of the switching architecture, however, communication of A-B and C-D can work simultaneously. It can be easily extended to the case of many, many nodes. A-B, C-D, E-F, G-H, and so on. All of them can be invoked at once. Instead, if node A wants to receive data from more than one, for example, node B and C, there will be conflict.

The neighbour communication pattern is very important in case of macro-scale, continuum mechanics-based simulation. In this type of simulation, the whole analysis domain can be decomposed into multiple subdomains. Typically, communication between neighbouring subdomains frequently occurs. It can be represented as the neighbour communication pattern. Thus, well-designed code for the continuum mechanics field can easily scale on a supercomputer.

As for the neighbour communication pattern, it is better to understand the keyword, volume to area ratio. This means the ratio between amount of calculation per subdomain as a

volume, and that of the associated interface boundaries as an area. As the problem size grows, this ratio is expected to grow also, because of comparison between volume N^3 and area N^2 . That means, the bigger the problem size is, the easier to parallelize. You can always enjoy good parallel efficiency, if you specify the problem size big enough. Of course, there are some issues, too long execution time and lack of memory.

3. Software

In the previous section, the hardware architecture of modern supercomputers is described. It is also necessary to mention about more software-related topics, especially, the software development process and environment of supercomputing applications. In this section, starting from basic programming models, programming languages, compilers, libraries and tools are explained.

3.1 Programming model

To consider the software design for modern supercomputing applications, there are some special programming models. Each model covers a specific HPC hardware architecture. Here, we introduce two important programming models, hybrid parallel and data parallel.

Suppose if a supercomputer is based on multi-core scalar processors, there are two choices in programming models, flat MPI and hybrid parallel. In case of flat MPI, it is just sufficient to re-use your MPI-based code without modification, but you need to set the number of MPI ranks as same as the number of total cores using. On the other hand, the hybrid parallel programming model is needed mainly for two reasons. One is, to obtain the maximum parallel efficiency. The other one is, to utilize processor cores of sub-million order or more.

Theoretically, it is better to utilize OpenMP for intra-node communication, while MPI is used for inter-node one. In reality, it depends on applications and problems. Typical trend is, when the problem size is relatively small while the number of cores used is many, hybrid parallel programming model works well. If the parallel efficiency is already good enough with the current flat MPI implementation, however, the additional gain obtained from the hybrid parallel approach is marginal. In case of domain decomposition-based approaches, because of the volume to area ratio, explained before, the bigger the problem size is, the better the parallel efficiency is also.

On the other hand, if luckily you have a chance to utilize a world-class supercomputer, then unluckily you will be forced to adopt the hybrid parallel programming model, simply because the flat MPI model does not work in this environment. Currently, no MPI implementation seems to work well more than ten thousand MPI processes. The combination of MPI and OpenMP is the only way to utilize millions of cores available on such a top-end supercomputer.

Data parallel programming model, or SIMD, is the programming model useful for GPU, and also for SIMD instruction in modern scalar processors. SIMD is Single Instruction Multiple Data. It usually involves the use of either compiler directives, such as SIMD vectorization and OpenACC, or extension to existing programming languages, such as CUDA and OpenCL. In the former cases, a loop is annotated by compiler directives with additional information necessary to parallelize. In case of CUDA and OpenCL, the loop body of a loop is extracted as a GPU-local routine, which is associated to a thread when running on the GPU.

3.2 Programming language and compiler

To port your simulation code onto a supercomputer, more or less some amount of code modification effort will be required. It typically involves inserting special compiler directives

such as vectorization, OpenMP and OpenACC into the code, and calling functions / subroutines of HPC-related libraries such as MPI and BLAS. In the worst case, instead of keep using ordinary programming languages such as Fortran, C and C++, special programming languages dedicated for specific HPC environments might have to be employed, and the code would be re-written completely from scratch.

If the hybrid parallel programming model, explained before, is employed, OpenMP is the primary choice for intra-node parallelization. OpenMP is mainly a set of compiler directives designed for thread-level parallelization on shared memory parallel environment. It fits well on modern multi-core or many-core scalar processors. Programmer specifies OpenMP compiler directives on each loop which can be parallelized. Instead, if your code is relatively simple and also you are lucky, the automatic parallelization capability of compiler may also work well.

Recently, the impact of SIMD instructions is becoming more and more important for the performance design in supercomputing. To utilize the SIMD instructions, there are three ways. One is, of course, directly use assembly language. Most of people, including us, would want to ignore the first choice. Then, the second option is, to use SIMD intrinsic functions / subroutines. Still, this option is very tedious. Therefore, the third option, compiler-driven vectorization, is more practical for the most of programmers.

Compiler-driven vectorization technique for SIMD is very similar to the so-called “vectorization” in the vector supercomputer age. The idea itself has been very simple, inserting compiler directives just before loops which can be vectorised. However, there is one big difference between the current SIMD vectorization (also called, short vectorization) and the old predecessor. While the vector processor can aggressively read / write data from / to main memory, the SIMD mechanism of the modern scalar processor is effective only to data on cache memory. That means, before considering the use of SIMD instructions, first, you need to put your data on cache.

We also need to mention about accelerators. The use of accelerators such as GPU and many-core chip is gradually starting. On these environments, special programming languages or extension to existing languages, such as CUDA and OpenCL, may have to be utilized. Directive-based programming models such as OpenACC, which require much less work, are also becoming available.

3.3 Library

Some HPC-related libraries are available. They may have to be employed into your code if necessary.

Assuming the use of a modern distributed memory parallel supercomputer, for inter-node parallelization, MPI (Message Passing Interface) is the primary choice. It is a message passing-based communication library among computational nodes. In case of macro-scale simulation, domain decomposition is required. Especially in case of unstructured grid or mesh-free / particle, identifying the boundary region between subdomains is a bit complicated task. Instead of this really tedious approach, some people have started using PGAS languages also. Using these special languages, programmer can parallelize code in much similar way as shared memory environments like OpenMP.

In addition, the knowledge of linear algebra is often required. It is very useful if matrix and vector-related libraries are available. Linear algebraic solver and eigenvalue solver libraries are also important.

BLAS (Basic Linear Algebraic Subroutines) is one of the famous libraries for matrix and vector operations in the basic and fundamental level, such as various kinds of vector-vector, matrix-vector and matrix-matrix operations. The scene behind the fact that recently this library becomes very important is, however, because nowadays highly tuned versions of this

library prepared by hardware vendors themselves are available. Especially, level-3 BLAS routines, which are related to matrix-matrix operations, are really important. Usually, inside the vendor-provided library, these routines are implemented as cache-aware and SIMD-vectorised. And, by using these optimized routines, high peak ratio can be easily obtained. Although BLAS is designed for dense matrix, recently, its sparse matrix version becomes also available.

As for the linear algebraic solver, variety of libraries is available. LAPACK contains direct solvers for dense and banded matrices [1]. ScaLAPACK is also available for MPI-parallel environments. In case of sparse solvers, some are direct and others are iterative. SuperLU, MUMPS, PARADISO and WSMP are examples of sparse direct solvers, while PETSc is an example of iterative solver libraries.

3.4 Supporting environment and tools

Other than compiler, the most important programming tool for supercomputing is, profiler. This tool can be used to identify hot spot of the code. Finding the hot spot is vital in performance-centric software design, described before. Moreover, the profiler can measure how fast your code runs on the supercomputer. That means, measuring FLOPS values.

4. Design and Implementation of Finite Element Code

The finite element method (FEM) is one of the famous approximation methods for solving partial differential equations. Starting from structural mechanics, it has mainly been applied to macro-scale problems in the continuum mechanics field.

As for the history of FEM on supercomputers, until recently, it used to be just enough to tune only the direct solver part of the FE code. With sufficiently large problem size, either band or skyline solver can be easily vectorised on vector processor, or parallelized on shared memory environment.

With the emergence of distributed memory parallel supercomputers, however, things have been drastically changed. Numerical schemes adopted in the applications running on PC cluster and MPP are mainly dominated by either static / implicit time marching schemes using iterative solver as the linear equation solver, or explicit time marching schemes. The whole analysis domain has to be domain-decomposed into multiple subdomains. The use of sparse direct solvers on such a distributed memory parallel environment has just begun recently with a relatively limited number of computational nodes.

Here in this section, related to the implementation of FE code on supercomputers, four topics are explained. Starting from element-by-element (EBE) approaches, some issues about linear algebraic solver are described, followed by The Domain Decomposition Method (DDM) as a parallel processing scheme. Finally, the issue of pre- and post-processing in supercomputing applications is briefly described.

4.1 Element-by-element (EBE)

Although the typical performance bottleneck, or the hot spot, of a FE code is its linear algebraic solver, the part of forming element-wise matrices and vectors can also be another weak point. In case of an explicit code, this part typically dominates. Even in an implicit or a static code, it can occupy a significant portion of execution time, if non-linearity is strong and stress integration involves relatively heavy calculation, or some of the terms in the weak form are explicitly evaluated. The performance tuning effort of element-by-element (EBE) operations is at least not negligible.

As for the performance optimization of the EBE routines, it is easy to parallelize them. Because they are namely element-by-element operations, each of them can be done

independently. The granularity of parallelization can be any, because there will be millions, or perhaps billions of elements to be processed.

In addition to parallelization, what else? Intra-core optimization remains. For example, SIMD vectorization. Assuming that there is no major IF/THEN branch in forming an element-wise value, evaluation of this quantity in multiple elements or multiple integration points in an element can be performed not only in parallel, but also in exactly the same way. This fact naturally leads to SIMD. SIMD / short vectorization can be applied. SIMD implementation on GPU is also possible if a sufficient number of elements, for example, thousands or more, can be allocated in each GPU.

4.2 Linear algebraic solver

Unless the scheme of your FE code is purely explicit, it is necessary to prepare a linear algebraic solver to handle the matrix equation $[A] \{x\} = \{b\}$. The matrix $[A]$ may be represented as band, skyline or sparse. Here, sparse means storing only non-zero components in a certain way, such as CRS (Compressed Row Storage) format or block CRS one.

If no iterative solver can be employed to solve the linear equation, because the matrix $[A]$ is highly ill-conditioned or some other reasons, direct solver is the only choice. In this case, however, you'd better give up using a supercomputer. Even a small-scale PC cluster may have difficulty in scaling, unless the problem size is really huge. Currently, it can be said that it is very difficult or even impossible for direct solver to take advantage of distributed memory parallel architecture. As for a typical modern supercomputer with hundreds or thousands of computational nodes, either implicit code employing iterative solver or explicit code using EBE operations predominantly is the choice.

It can be said that iterative solver works fine on massively parallel environment, if domain decomposition is properly performed [2]. At least, the matrix-vector product, which is the main body of iterative solver, can be easily parallelized on any parallel environment, from SIMD, share memory to MPP. However, this is the case without pre-conditioner. In some problems, without efficient pre-conditioner, the convergence ratio is very bad. Then, the question is, are there any parallel pre-conditioners available? Currently, not so many pre-conditioners are ready. It is because, the stronger and the more effective the pre-conditioner is, the more it looks like a kind of direct solver. As we explained just before, it is very difficult to parallelize direct solver. Currently, finding a good parallel pre-conditioner is on-going challenge in this research field. Some parallel pre-conditioners based on hierarchical domain decomposition, in a similar way as that of sparse direct solver, are available. Also, multi-grid approaches are effective. Either geometrical multi-grid or algebraic multi-grid (AMG) solver may be used. The third way is, domain decomposition method (DDM), described in the next section.

4.3 Domain decomposition method (DDM)

The domain decomposition method (DDM) is a way to solve partial differential equation, by solving each subdomain problem separately [3]. The solution of each subdomain problem requires assumed boundary condition. With the repetition of this process, this, initially assumed boundary condition along subdomain interface gradually converges to the true one. In this sense, it is a kind of iterative method. DDM is inherently parallel, because each subdomain local problem can be solved independently [4] [5]. To solve the subdomain local problem, either iterative or direct solver may be used.

Anyway, DDM is different from just decomposing a mesh into multiple subdomains. This type of domain decomposition reduces the communication cost in matrix-vector product operations, which is typically found in parallel iterative solver and explicit code. Instead, DDM is an independent numerical scheme originated from the mathematical field of partial

differential equation. Sometimes, it is also called as Schur complement method or iterative sub-structuring method in the field of iterative solver.

DDM is a kind of hybrid method between iterative solver and direct one. The global view of DDM is iterative, and pre-conditioner may be required in the similar way as the case of iterative solver. Coarse grid solver is typically employed as pre-conditioner. In this case, the coarse grid is derived from the graph structure of domain decomposition itself, and it can be said to be a kind of two grid version in multi-grid solver. To solve the coarse problem and the subdomain local problems, direct solver may also be utilized.

4.4 Pre- and post-processing: where and how?

When a supercomputer is employed to solve a huge-scale problem, its input and output data, namely, the mesh and the result data of such a huge-scale analysis can also be very huge. Then, the pre- and post-processing becomes a critical issue.

The mesh generator might have to be ported onto the supercomputer side. That means, it also has to be fully parallelized. Unfortunately, the development of highly parallel automatic mesh generator is still the on-going research topic. To overcome the issue, instead, mesh refiner may be utilized [6]. This tool simply refines the given initial mesh into half. Speaking more exactly, in case of 3-D solid / volume element, each element is divided into 8 elements, by adding a mid-node on each edge. One step refinement increases the number of elements 8 times. Uniform mesh refinement itself can be easily parallelized. Because the refiner can be invoked on the supercomputer, it is sufficient to create an initial coarse mesh on your desktop PC and send it to the supercomputer through slow network.

About the visualization of the result data, however, things are more complicated. One obvious answer is, generate images and movie data on the supercomputer side [7]. Not only this post-processor simply runs on the supercomputer, it should also be parallelized. Assuming the analysis domain is already decomposed into subdomains, it is possible for each subdomain to generate its own result image independently, and to gather these images and compose a single image, by image convolution techniques. These processes can be parallelized. This software rendering process can be contained as a part of the main analysis process. After a job is completed, you can obtain not only the result data, but also their images and movies. While waiting for the download of the huge result data, you can quickly browse these images and movies.

5. Parallel Algorithms Implemented in ADVENTURE System

One of the key technologies of the ADVENTURE System is the HDDM, which enables parallel finite element calculations on various kinds of computing environments. Basically in the HDDM, force equivalence and continuity conditions among subdomains are satisfied through iterative calculations such as the Conjugate Gradient (CG) method. Therefore it is indispensable to reduce the number of iterations by adopting some appropriate preconditioning technique especially for solving large-scale ill-conditioned problems. The Neumann-Neumann algorithm (N-N) [11] is known as efficient domain decomposition preconditioner for unstructured subdomains. However, its convergence deteriorates with the increasing number of subdomains due to lack of a coarse space problem which takes care of global propagation of error. The Balancing Domain Decomposition (BDD) based N-N algorithm proposed by Mandel [12] shows that the equilibrium conditions for the singular problems on subdomains result in simple and natural construction of a coarse space problem and that its construction is purely algebraic. The BDD has been applied to solve various phenomena [13-15]. There are also several researches on parallelization of the BDD and also the FETI (Finite Element Tearing and Interconnecting) [26-32]. However, most problems

solved there are still medium scale ones such as sub-millions to one million DOFs. As the DOFs of the coarse space problem is directly related to the number of subdomains, it is indispensable to consider the parallelization of the solution process of the coarse space problem as well when solving large-scale problems. The Salinas system [33], which employed the FETI-DP method [32], is succeeded in solving large-scale problems such as over 100 million DOF mesh of optical shutter model [34]. It shows good performance but does not seem to include load-balancing techniques. In the present study, an incomplete parallel direct method and the HDDM are adopted.

5.1 Hierarchical Domain Decomposition Method (HDDM)

In Domain Decomposition Methods (DDM), an analysis model, i.e. a finite element mesh with boundary conditions and material properties, is subdivided into a number of subdomains. The HDDM employs a hierarchical technique to implement the DDM on various parallel computers. In the HDDM, a group of processing elements (PEs) are subdivided into the following three subgroups: one Grand Parent PE (Grand), several Parent PEs (Parent or Parents), and many Child PEs (Child or Children). At the same time, the analysis model is subdivided into some 'parts' whose number is the same as the number of the Parents. Each part is further subdivided into a number of subdomains, the number of which can be much larger than that of the Children. Figure 3 shows a 35 million DOFs mesh for an Advanced Boiling Water Reactor (ABWR) model, generated by the ADVENTURE_TriPatch and the ADVENTURE_TetMesh. Figure 4 illustrates an example of the hierarchically decomposed mesh generated by the ADVENTURE_Metis.

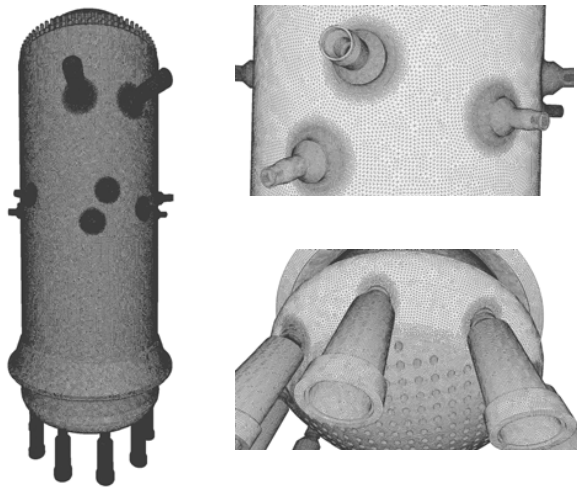


Fig.3: 35 million DOF mesh of ABWR model.

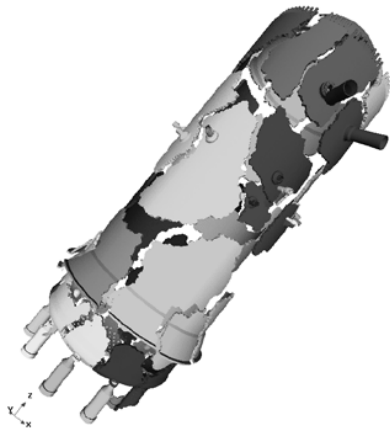


Fig.4: Part decomposition of ABWR vessel model.

Owing to the HDDM algorithm, large-scale analysis data can be easily handled by increasing the number of the Parents. The main roles of the three kinds of processors are summarized as follows. The Grand manages all PEs, i.e. synchronization and calculation of the sum of vectors spread over a number of Children. Each Parent stores mesh data and material properties of subdomains, sends / receives subdomains data to / from Child, and iterates loops of the CG method. Each Child performs finite element calculations of the subdomains received from the Parent, and sends analyzed data back to the Parent. Figure 5 shows the schematic data flow among PEs.

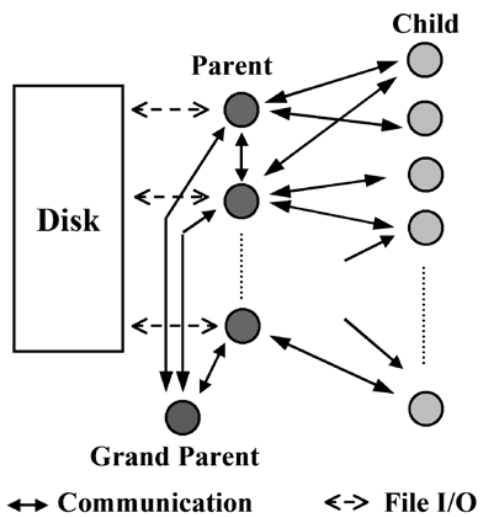


Fig.5: Schematic data flow in h-mode.

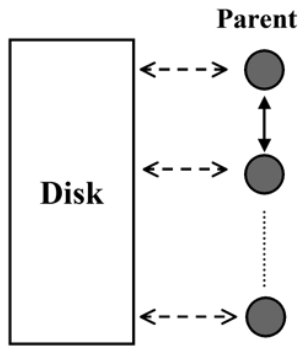


Fig.6: Schematic data flow in p-mode.

According to the design concept of the HDDM, most computation is assigned to the Children, while most communication occurs in between Parents and Children. Varying the number of Parents and Children for different kinds of parallel computers, the present HDDM-based system can easily achieve high performance. In the HDDM architecture, thanks to the dynamic load balancing technique among Child processors, high parallel performance can be achieved even in heterogeneous computer environments. However in this mode, an amount of data communication between Child and Parent tends to be large. To reduce such data communication among Children and Parents, it is useful to assign all balance becomes static. This analysis mode shown in Figure 6 is called in parallel processors mode (p-mode), while the original analysis mode as shown in Figure 5 is named hierarchical processors mode (h-mode).

5.2 Balancing Domain Decomposition (BDD)

The BDD algorithm is based on the DDM with a preconditioned iterative solver. After eliminating interior DOFs of local subdomain matrices, the problem to be solved is reduced onto the interface DOFs of subdomains. The reduced matrix is so-called Schur complement. The reduced problem is also called the interface problem, and is to be solved by a preconditioned iterative method. There are two main methods as such preconditioner, i.e. local subdomain correction and coarse grid correction in a coarse space.

5.3 Performance Optimization of ADVENTURE System

As optimization approaches of structural analysis code, ADVENTURE Solid, one example for The Earth Simulator 2 is described. In this case, we have chosen two approaches. One is to optimize the ADVENTURE Solid code within the range of the existing design, by varying a few selected performance-sensitive parameters. The other is to apply more drastic design changes, such as the local Schur complement approach.

Here, the performance design issues of ADVENTURE Solid are briefly explained. ADVENTURE Solid is based on the hierarchical domain decomposition method (HDDM). In HDDM, a whole analysis domain is subdivided into many small subdomains. The parallelization of ADVENTURE Solid code is primarily based on subdomain-wise FEM calculation. On the FE analysis of each subdomain, a linear system of the subdomain stiffness matrix is solved. A skyline solver is employed for the solution of the relatively small system. In the current version of ADVENTURE Solid, this subdomain-wise skyline solver is identified as a hot spot. The inner-most loop of the hot spot is the double loop in forward and back substitution of the skyline solver. Its loop length, which means the band width of the skyline matrix, is not so large. It is usually about several hundreds.

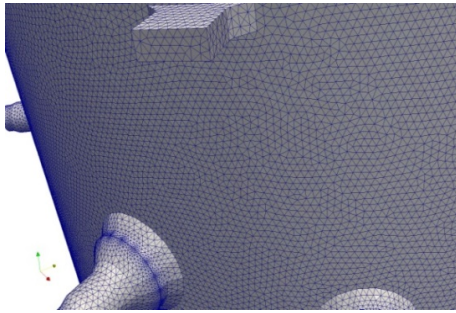
As for the former approach, we selected average subdomain size of the domain

decomposition method as the most performance-sensitive parameter. This parameter controls the effective vector length of inner-most loops of ADVENTURE Solid. By varying the subdomain size parameter in the input data files through the analysis of 245 million DOF Pantheon model, about 15 % of peak performance was achieved. In this case, vector operation ratio was 98.57 %. Using 512 processors, 6.5 T flops was obtained. The analysis of this Pantheon model took 18.6 minutes, using 4.1 TB memory. The number of DDM iterations was 277. Each DDM iteration took 2.48 seconds.

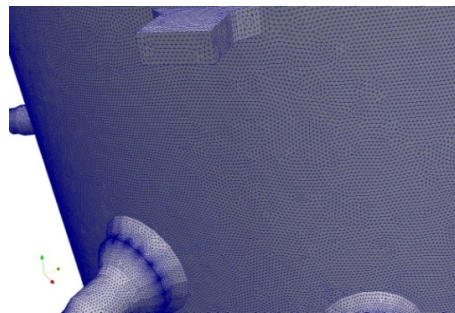
As the latter approach, the local Schur complement (LSC) of each DDM subdomain is explicitly formed. An LSC matrix is a symmetric full matrix. In each DDM iteration, simply a matrix vector product using the LSC is performed for each subdomain. The last year, the performance of this approach itself has already been investigated fully using the extracted hot spot code from ADVENTURE Solid. About 40 % of the peak performance was obtained through the hot spot code. This year, the new LSC-based performance design was verified within the single process code of ADVENTURE Solid. Scalar version of this new LSC implementation achieved about twice faster than the existing implementation using skyline solver for the DDM subdomain local solver on PC. This means the total number of floating point operations, or the number of I/O requests to memory system can be halved by this approach.

5.4 Developing mesh refinement function for ADVENTURE Metis

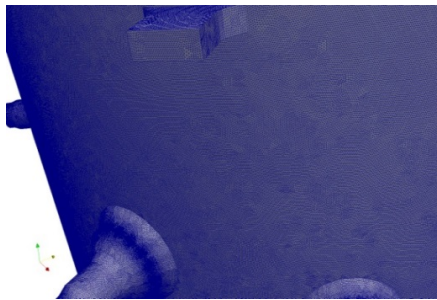
A mesh refinement function for ADVENTURE_Metis was implemented, since the huge size models must be generated because of the huge analyses in post petascale simulation. We have succeeded to generate the refined mesh models of more than tens-of-billions DOF scales from the coarse mesh models in parallel computers at short times (Fig.7).



(a) Original mesh of 10 million nodes.



(b) First refined mesh of 68 million nodes.



(c) 2nd refined mesh of 480 million nodes. (d) 3rd refined mesh of 3,600 million nodes.



Fig. 7: Refined mesh generating system.

The generated elements by the mesh refinement function can be geometrically fitted on surfaces of CAD models by shape functions of finite element method, as shown in Figure 8. Additionally, to generate mesh model of the same scale size by memory-saving mode using only one CPU, this system can be flexible for computer environment.

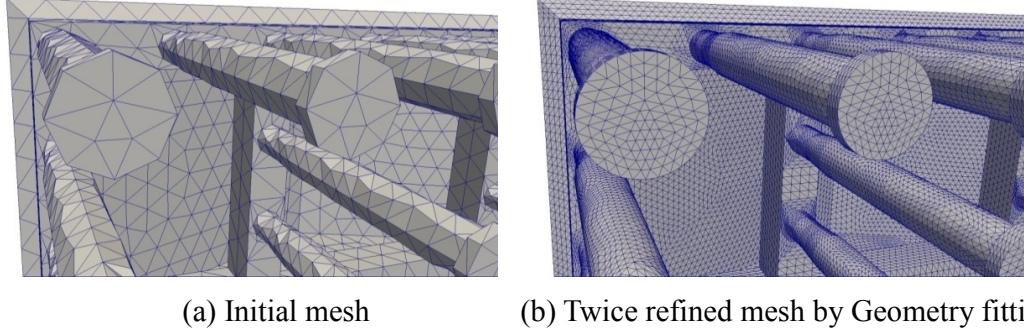


Fig. 8: Geometry fitting function.

5.5 Numerical Analysis of Pressure Vessel Model

The ADVENTURE_Solid is implemented on the Earth Simulator (ES) consisting of 256 nodes, i.e. 2,048 PEs with 4TB of main memory, whose theoretical peak performance is 16 TFLOPS. The second problem is an elastostatic stress analysis of a simplified pressure vessel model with 100 million DOFs unstructured mesh. Its mesh size is listed in Table 1. As a boundary condition, the bottom surface of the vessel is fixed, and a static gravitational force is applied to the vessel in the horizontal direction, being similar to the previous problem.

Table 1: Mesh size for a simplified vessel model.

Number of elements	25,084,456
Number of nodes	34,772,634
Total degrees of freedom	104,195,500

Although we do not show convergence histories of relative residual, (1) HDDM with BDD and N-N preconditioner (denoted as BDD) and (2) HDDM with BDD and diagonal-scaling preconditioner (denoted as BDD-DIAG) demonstrate excellent performance in convergence. By considering the performance results, it is concluded here that the diagonal scaling is sufficient as local subdomain correction in the BDD method. The analysis model is divided into 34,816 subdomains and then the number of DOFs of its coarse space is 208,896. The LU factorization of the coarse grid operator is calculated in only 20 seconds. As the result, the present system successfully achieved 5.1TFLOPS, which is 31.8% of the peak performance. The calculation time is only 8.5 minutes. Parallel ratio over 99.9% is achieved, and then parallel efficiency exceeds 80% not only for computation time per iteration but also for total computation time.

Conclusions

We have been developing an advanced general-purpose finite element analysis system, named ADVENTURE, which is designed to be able to analyze a model of arbitrary shape over 100 million DOF mesh. The ADVENTURE_Solid has been successfully implemented on a single PC, PC clusters and supercomputers such as K computer.

To perform our systems on the post petascale supercomputers with high efficiencies, we are developing a numerical library based on HDDM [35, 36] that is extended to pre and post processing parts, including mesh generation and visualization of large scale data, for the post petascale simulation.

References

- [1] J. J. Dongarra et al., Numerical Linear Algebra for High-Performance Computers, SIAM, 1998.
- [2] Y. Saad, Iterative Methods for Sparse Linear Systems, SIAM, 2003.
- [3] B. Smith et al., Domain Decomposition: Parallel Multilevel Methods for Elliptical Partial Differential Equations, Cambridge Univ. Press, 2004.
- [4] Bhardwaj et al., Salinas: A scalable software for high-performance structural and solid mechanics simulations, Proceedings of SC02, 2002.
- [5] M. Ogino, R. Shioya, H. Kawai and S. Yoshimura, Seismic response analysis of full scale nuclear vessel model with ADVENTURE system on the Earth Simulator, J. Earth Simulator, Vol. 2, pp. 41-54, 2005.
- [6] K. Murotani, S. Sugimoto, H. Kawai and S. Yoshimura, Hierarchical domain decomposition with parallel mesh refinement for billions-of-DOF-scale finite element analyses, Int. J. Comput. Methods, DOI: 10.1142/S0219876213500618, 2013.
- [7] H. Kawai, M. Ogino, R. Shioya and S. Yoshimura, Vectorization of polygon rendering for off-line visualization of a large scale structural analysis with ADVENTURE system on the Earth Simulator, J. Earth Simulator, Vol. 9, pp. 51-63, 2008.
- [8] The Top500 List: <http://www.top500.org>
- [9] Gordon E. Moore, Cramming more components onto integrated circuits, Electronics Magazine, Vol. 38, No. 8 (1965).
- [10] ADVENTURE System: <http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp>
- [11] S. Yoshimura, R. Shioya, H. Noguchi and T. Miyamura, Advanced general-purpose computational mechanics system for large-scale analysis and design, Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol. 49 (2002) 279-296.
- [12] Report on Computational Science and Engineering, JSPS-RFTF Program 2001-2002, (2002).
- [13] M. Suzuki, H. Akiba, S. Yoshimura and G. Yagawa, Analysis of stress intensity factor of piping using large scale analysis code AD-VentureCluster, Trans. 16th SMiRT, G05/5, Washington D.C., CD-ROM, (2001).
- [14] M. Suzuki, T. Ohyama, H. Akiba, H. Noguchi and S. Yoshimura, Development of fast and robust parallel coarse-grid based CG solver for large scale finite element analyses, Trans. JSME, 68A-671 (2002) 1010-1017 (in Japanese).
- [15] G. Yagawa and R. Shioya, Parallel finite elements on a massively parallel computer with domain decomposition, Computing Systems in Engineering, 4 (1994) 495-503.
- [16] R. Shioya and G. Yagawa, Parallel finite elements of ten-million DOFs based on domain decomposition method, WCCM IV Computational Mechanics -New Trends and Applications- IV 11 (1998) 1-12.
- [17] T. Miyamura, H. Noguchi, R. Shioya, S. Yoshimura and G. Yagawa, Elastic-plastic analysis of nuclear structures with millions of DOFs using the hierarchical domain decomposition method, Nuclear Engineering & Design, 212 (2002) 335-355.
- [18] Y. H. DeRoeck and P. LeTallec, Analysis and test of a local domain decomposition preconditioner, 4th International Symposium on Domain Decomposition Methods (1991) 112-128.
- [19] J. Mandel, Balancing domain decomposition, Communications on Numerical Methods in Engineering, 9 (1993) 233-241.
- [20] P. LeTallec and M. Vidrascu, Generalized Neumann-Neumann preconditioners for iterative substructuring, 9th International Symposium on Domain Decomposition Methods, (1996) 413-425.
- [21] P. LeTallec, J. Mandel and M. Vidrascu, A Neumann-Neumann domain decomposition algorithm for solving plate and shell problems, SIAM J. Numer. Math., 35 (1997) 836-867.
- [22] J. Mandel and C. R. Dohrmann, Convergence of a balancing domain decomposition by constraints and energy minimization, Numer. Lin. Alg..
- [23] R. Shioya, H. Kanayama, D. Tagami and M. Ogino, 3D large scale structural analysis using a balancing domain decomposition method, Trans. JSCES, 2 (2000) 139-144 (in Japanese).
- [24] R. Shioya, M. Ogino, H. Kanayama and D. Tagami, Large scale finite element analysis with a balancing domain decomposition method, Key Engineering Materials, 243-244 (2003) 21-26.
- [25] T. Miyamura and S. Yoshimura, Parallel stress analyses of ancient architecture Pantheon on PC cluster, Trans. Architectural Institute of Japan, 55 (2001) 95-102 (in Japanese).
- [26] G. Yagawa, S. Yoshimura and K. Nakao, Automatic mesh generation of complex geometries based on fuzzy knowledge processing and computational geometry, Integrated Computer-Aided Engineering 2 (1995) 265-280.

- [27] S. Yoshimura, H. Nitta, G. Yagawa and H. Akiba, Parallel auto-matic mesh generation of nuclear structures with ten-million nodes, Trans. 15th SMiRT, Seoul, II (1999) 21-28.
- [28] G. Karypis and V. Kumar, Multilevel k-way partitioning scheme for irregular graphs, Technical Report TR 95-064, Department of Computer Science, University of Minnesota, (1995).
- [29] G. Karypis and V. Kumar, Parallel multilevel k-way partitioning scheme for irregular graphs, Technical Report TR 96-036, Department of Computer Science, University of Minnesota, (1996).
- [30] H. Kanayama, R. Shioya, D. Tagami and M. Saito, Numerical analysis of 3D eddy current problems by the hierarchical domain de-composition method, Trans. JSCES, 3 (2001) 151-156 (in Japanese).
- [31] S. Shoui, S. Yoshimura, H. Akiba, T. Ohyama and G. Yagawa, Parallel visualization of finite element solutions with ten million DOFs using PC cluster, Proceedings of European Congress on Computational Methods in Science and Engineering (ECCOMAS2000), Balcelona, CD-ROM, (2000)
- [32] <http://www.es.jamstec.go.jp/>
- [33] M. Vidrascu, Remarks on the implementation of the generalized neumann-neumann algorithm, 11th International Conference on Do-main Decomposition Methods, (1998) 485-493.
- [34] P. R. Amestoy, I. S. Duff, J. -Y. L'Excellent and P. Plechac, PARASOL. An Integrated programming environment for parallel sparse matrix solvers, High-Performance Computing, (1999) 79-90.
- [35] J.-M. Cross, A preconditioner for the Shur complement domain decomposition method, 14th International Conference on Domain Decomposition Methods (2002)
- [36] P. Goldfeld, Balancing Neumann-Neumann for (in)compressible linear elasticity and (generalized) stokes-parallel implementation, 14th International Conference on Domain Decomposition Methods, (2002)
- [37] F.-X. Roux and C. Farhat, Parallel implementation of the two-level FETI method, 9th International Conference on Domain Decomposition Methods, (1997)
- [38] J. Mandel, R. Tezaur and C. Farhat, A scalable substructuring method by lagrange multipliers for plate bending problems, SIAM Journal of Numerical Analysis, 36 (1999) 1370-1391.
- [39] M. Lesoinne and K. Pierson, FETI-DP : An efficient, scalable and unified dual-primal FETI method, 12th International Conference on Domain Decomposition Methods, (1999) 421-428.
- [40] <http://endo.sandia.gov/9234/salinas>
- [41] M. Bhardwaj, K. Pierson, G. Reese, T. Walsh, D. Day, K. Alvin, J. Peery, C. Farhat and M. Lesoinne, Salinas : A scalable software for high-performance structural and solid mechanics simulations, Technical Papers of SC2002, (2002).
- [42] H. Kawai, M. Ogino, R. Shioya and S. Yoshimura, Large Scale Elasto-Plastic Analysis Using Domain Decomposition Method Optimized for Multi-core CPU Architecture, Key Eng. Materials, 462-463 (2011) 605-610.
- [43] M. Ogino, R. Shioya, A Scalable and High Performance Implementation of the Domain Decomposition Method, The 4th International Conference on Computational Methods (ICCM2012), 160.pdf, (2012) 1-8.

Large-Scale Numerical Simulation of Water Splash by Particle Method

†Masao Yokoyama¹, Genki Yagawa²

Abstract

Numerical simulation of water splash, which is one of the free surface flows, was performed using the high-performance Moving Particle Simulation (MPS) method.

The MPS method is an effective method for calculating fluid with free surface, but the conventional simulation results of splash have not been sufficiently expressed and compared with experimental results. This is because the model of the interaction force between water particles and solid particles was insufficient. Therefore, we performed a highly accurate calculation using the MPS method and validated the models for expressing the slip effect and interfacial tension. The numerical simulation of the splash by falling solid sphere, milk-crown, and water drip spilling from the edge of the cup were carried out. The obtained simulation results of splash are in much better agreement with the experimental results than the conventional results. This indicates the appropriateness of our proposed approach.

Keywords: Splash, Milk crown, Water drip, Surface condition, High-performance computing, Moving Particle Simulation method.

Introduction

In our daily lives, we often see many splash phenomena such as droplets on a puddle during the rain, sea spray by an advancing ship or splash when a frog plunges into a pond. The earliest research on splash form was done by Worthington in 1882 [1], who noted that the form of a splash made by a plunging sphere depends on the surface roughness or wetness of the sphere. Among the various splash phenomena, the milk drop coronet seems to be an interesting fluid phenomenon, which occurs when a droplet of milk falls into a tank filled with milk, producing a beautiful shape that has attracted many researchers (Peregrine[2]). This “milk crown” phenomenon was first filmed by Harold Edgerton in the 1930s (Deegan et al.[3]).

In the field of numerical simulation, splash simulation is often performed as a typical example of Fluid–Structure Interaction (FSI). On the other hand, the sloshing problem is taken as another important issue of FSI (Manservigi and Scardovelli[4]). Rebouillat et al.[5] performed a comparative simulation of liquid splashing in a container and the wall adhesion of a droplet using the finite-element, finite-difference, and smoothed-particle hydrodynamics (SPH) methods (Saksono and Perić[6], Angeles et al.[7]).

In the research on preventing natural disasters, the coupled problems of alluvion and floating object (Koshizuka et al.[8]) and the destruction of a structure by tsunami or flood (Kanamori, et al.[9], Mader[10], Imamura[11]) are very significant issues.

One of the earliest numerical simulation in splash studies was that of the collision of a drop using the Marker-and-Cell method by Harlow and Shannon[12].

Subsequently, more results were published, including simulation with a falling square object (Idelsohn et al.[13]) and the drop simulation considering the wetness using the contact angle by the phase-field method (Do-Quang and Amberg[14]).

A splash on a plate was simulated by the volume of fluid (Yokoi et al.[15], Pasandideh-Fard[16]), Lattice Boltzmann (Tanaka et al.[17]), and moving particle simulation (MPS) methods (Xie et al.[18]). The relation between the impact velocity of a drop and tip number of the tip of the crown splash, called the splash finger, was simulated (Bussmann et al.[19]) and that between the depth of a liquid film and height of a splash was revealed through the SPH method (Nishio et al.[20]).

The accuracy of the splash simulations of a drop improved with the introduction of surface tension or wetness (Nomura et al.[21], Caboussat[22], Alam et al.[23]). However, the details of the splash are yet to be well calculated because the treatment of surface conditions or the surface tension of an object is insufficient.

The splash patterns strongly depend on the surface conditions of a solid object such as hydrogel or acrylic resin (Yokoyama et al.[24]). For this problem, we proposed a model for splash calculation considering the slip condition or electric condition of the surface of a falling object.

In this paper, we discuss the modeling of surface condition and splash simulation by a falling object, the high accuracy calculation of milk crown by large-scale parallel computing, and the simulation of water dripping from the edge of a cup or dish.

Governing equations and particle method by high-performance computing

Here, we describe the outline of the method of discretizing the Navier–Stokes equation by the MPS method. In this study, we simulate the 3D Navier–Stokes equation as shown in Eq.1 using the Explicit Moving Particle Simulation (EMPS) method (Murotani et al.[25]).

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2\vec{u} + \vec{F} \quad (1)$$

Here, ρ is the density of the fluid, P is pressure, ν is the kinematic viscosity, and vector u is the velocity of flow. F is an external force term, including gravity G and surface tension T that will be described later.

For calculating the step $k+1$, u^* , which is intermediate velocity, is explicitly calculated from viscosity and the external force in the Navier-Stokes equation except for the pressure as follows:

$$\vec{u}^* = \vec{u}^k + \Delta t(\nu[\nabla^2\vec{u}]^k + \vec{F}) \quad (2)$$

where the vector u^k is velocity at step k , and Δt is time step.

The EMPS method differs from the conventional MPS method because when solving pressure P using the former method, the Poisson's equation is not solved implicitly. Instead, pressure P_i for each particle is calculated using Eq. 3, and the correction velocity u' in Eq.4 is calculated using the pressure gradient, which differs from the previous MPS.

$$P_i = c^2 \rho^0 \frac{n_i - n^0}{n^0} \quad (3)$$

$$\vec{u}'_i = -\frac{\Delta t}{\rho}[\nabla P_i]^{k+1} \quad (4)$$

Here, ρ^0 is the initial density of liquid particle, n_i is the particle density for particle number i , and n_0 is the particle density for the initial allocation. c is a parameter, which is determined as the Courant condition is satisfied (Oochi et al.[26]).

Then, u' is added to u^* , then the velocity u at step $k+1$ is obtained as follows:

$$\vec{u}^{k+1} = \vec{u}^* + \vec{u}' \quad (5)$$

Moreover, the splash is a physical phenomenon in which the surface tension is dominant. Therefore, in this study, we adopted a surface tension model using the potential force between particles (Kondou et al.[27]).

$$\vec{f}_{ij} = -\frac{\partial\Phi}{\partial r_{ij}} \frac{\vec{r}_{ij}}{r_{ij}} \quad (6)$$

Here, Φ represents the potential energy, and f_{ij} is the potential force acting from particle j to particle i in radius r_s (valid radius when calculating surface tension). For r_s , here, we used the $2.6 r_0$ (initial particle distance) used by Kondou et al.[27]. For the external force F in Eq.1, the force acting on particle i is the sum of the potential force from peripheral particle j ,

$$\vec{T}_i = \sum_{j \in r_s} \vec{f}_{ij} \quad (7)$$

The potential energy is calculated as

$$\Phi(r_{ij}) = C\phi(r_{ij}) \quad (8)$$

$$\phi(r_{ij}) = \begin{cases} -\frac{1}{3}(r_{ij} - \frac{3}{2}r_0 + \frac{1}{2}r_s)(r_{ij} - r_s) & (r_{ij} < r_s) \\ 0 & (r_{ij} \geq r_s) \end{cases} \quad (9)$$

Here, C is the adjusted value.

The computer used for the simulation was a Fujitsu PRIMEHPC FX100 from Nagoya University, with the following specifications:

Processor name: Fujitsu SPARC64 XIfx

Clock Rate: 2.2 (GHz)

Cores/CPU: 32

The Number of Nodes: 2,880

For the method of domain decomposition with parallel computing, we used a two-level hierarchical domain decomposition.

Surface condition for different material

In this section, the numerical simulation of splash considering a surface condition is described.

Effect of surface condition of object on splash's form

When simulating the splashes by a solid object plunging into the water, the major issue is how to model the properties of the wall of the object. The wall is usually assumed in numerical simulations so that the water does not permeate into the object, and the boundary condition between the object and the water is no-slip. It is well recognized that the above assumptions cannot distinguish the qualities of the surface of the iron and those of the skin of an animal in the water. In other words, the simulated pattern of the splash by the hydrogel object and that by the acrylic resin object becomes the same.

The importance of consideration of the surface properties in the splash formation can be seen in the experimental results as shown in Fig. 1. Fig. 1 A shows the crown-type splash generated by a hydrophilic object (hydrogel), and Fig. 1 B shows the column-type splash generated by an object of weaker hydrophilicity (acrylic resin). These figures show that the splash patterns strongly depend on the surface conditions of the objects.

To calculate the splash, the large geometry change of the free surface of water needs to be solved. However, past research works have ignored surface properties related to different materials, so the effects of a surface on the splash formation remain to be clarified.

In this section, we describe the effect of the surface condition of an object and propose a method distinguishing the difference in materials in the particle method. The purpose of the present paper is

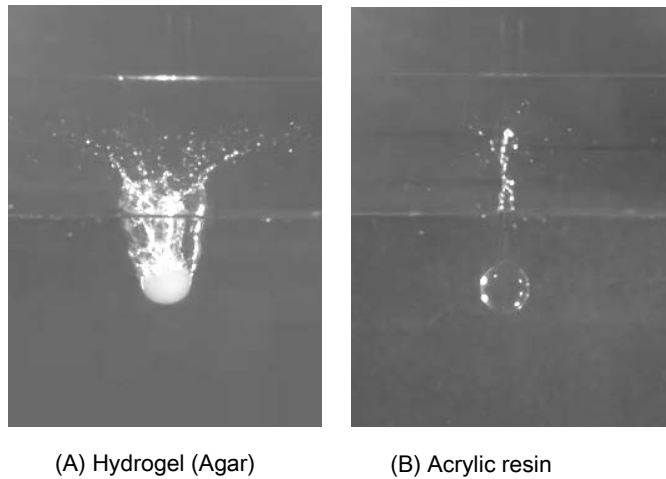


Figure 1. Comparison of splash patterns between hydrogel and acrylic resin (Radius of sphere=10 mm and Impact velocity=2.21 m/sec).

to discuss the effects of the difference in surface conditions when we solve a splash caused by a sphere diving into water with the particle method. The proposed method describes the wall conditions, considering the effect of the slip such as hydrophilicity and the attractive force or electrostatic force.

Surface condition and slip ratio

We show here how we can introduce the influence of the slippery wall seen, for example, in the case of the skin of a frog into the calculation in a heuristic manner. We take a diving sphere made of agar as the hydrophilic material, which consists of cross-linked structure by polymer called agarose, and plenty of water molecules between the polymer structures to make the solid surface slippery. The velocity distribution of water flow near the surface of the acrylic-resin versus that of the agar-gel is called “slip ratio.” Here, the slip ratio α is defined as follows,

$$\alpha = \tau' / \tau \quad (10)$$

where τ is the wall shear stress under the no-slip condition, and τ' is the wall shear stress under the slippery condition. The wall shear stresses are obtained experimentally from the flow velocity near the wall as follows:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \Big|_{y=0} \quad (11)$$

where μ is the kinematic viscosity, and u the flow velocity. Figure 2 shows the experimental relations between the swelling ratio S and the slip ratio α for the agar-gel and the carrageenan-gel, respectively, where the swelling ratio S is defined as follows [20]:

$$S = (m_{\text{water}} + m_{\text{gel}}) / m_{\text{gel}} \quad (12)$$

where m_{water} is the mass of the water, and m_{gel} is the mass of the solid gel. S increases with the amount of the water contained in the solid gel. Agar employed in this study is a kind of hydrogel. Figure 2 suggests that α can be expressed as:

$$\alpha = 1 - \beta S \quad (13)$$

where β is a constant value estimated to be 1.2×10^{-3} in the case of the agar. This relation indicates that larger S gives more slip on the surface.

The above relation is taken into consideration in the vicinity of the solid wall in the viscous term of the Navier-Stokes equation. Since the shear force acting between the wall and the fluid is presumed to be directly related to the viscosity term of the Navier-Stokes equation, we modified the discretized form of the viscosity term as follows:

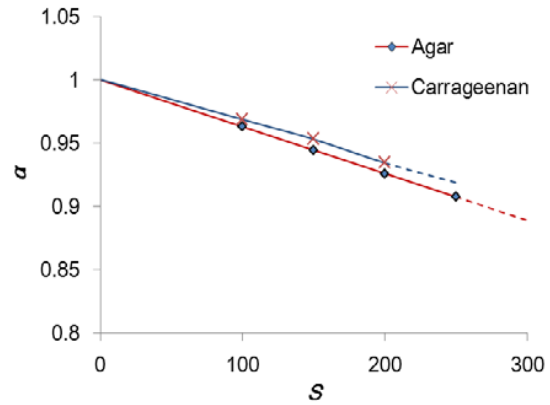


Figure 2. Relationship of swelling degree S and slip ratio α .

$$\nabla^2 u = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{i \neq j} [(u_j - u_i) \kappa_H(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)] \quad (14)$$

with

$$\kappa_H(r) = \alpha \kappa(r) \quad (15)$$

where i denotes the water particles near the hydrogel wall, and j denotes the surface particles of the hydrogel wall. α is set effective only near the hydrogel wall because the effect of the slip is important only near this area.

Validation – comparison with experimental result

The comparison of the MPS simulation result with $S = 100$ and the experimental one is shown in Fig. 3, where the radius of the sphere R is 10 mm, and the sphere is dropped from the height $h = 50R$ in both the simulation and experiment. The left hand side of Fig.3 shows the simulation result (top) and the snap-shot of the experiment (bottom) at $t = 0.02$ second after the sphere touches the surface of the water, respectively. On the other hand, the figures on the right hand side are those at $t = 0.03$ second. The first splash, which is observed just after the hydrogel sphere is dropped into water, is called the primary splash. It is noted that the patterns of the crown-type splash and the air cavity by the present simulation are similar to the experimental ones and that the above crown-type form and the occurrence of the air cavity are not seen in the case of the acrylic resin sphere.

Figure 4 shows the crown-type splashes and the representative path trajectories of particles for the different swelling ratios. The blue solid lines are the path trajectories of particles when S is 50 or $\alpha = 0.94$, whereas the red lines are those when S is 350 or $\alpha = 0.7$. It is seen from the figure that the splashes spread widely with a larger value of S or α , or the velocity of the water near the wall is larger with the swelling ratio, which causes the earlier exfoliation, creating the wider primary splash.

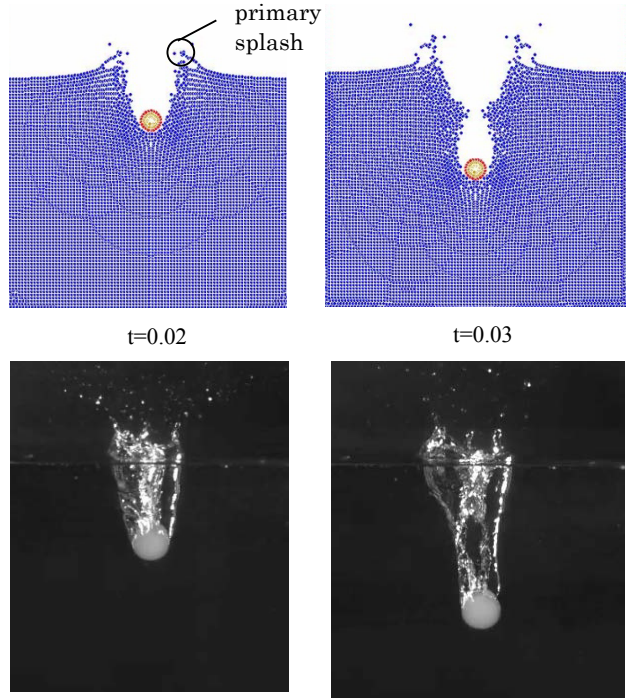


Figure 3. Crown-type-splash of hydrogel ($S = 100$) by experiment and simulation, where primary splash ($t=0.02$) and air cavity ($t=0.03$) are shown.

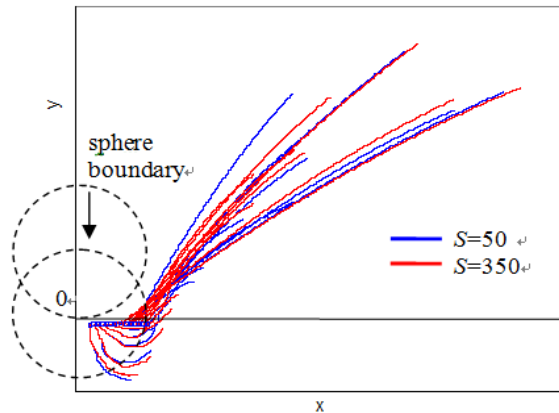


Figure 4. Path lines of a virtual water particle near the impact point hydrogel sphere plunging, during $T = 0$ to 0.045sec. The particles started from the surface of water at $x = 0$ to R . Blue line: $S = 50$, Red line: $S = 350$. The particle of $S = 350$ moved wider than that of $S = 50$.

Simulation of splash in 3D

We performed the large-scale simulation using the distributed memory parallel computers, employing the two-level domain decomposition (Yagawa and Shioya[28]). The first level domain decomposition is performed in order to keep the balance in the number of particles among nodes, and the second level domain decomposition is performed in order to keep the balance in the number of particles among the threads in each node.

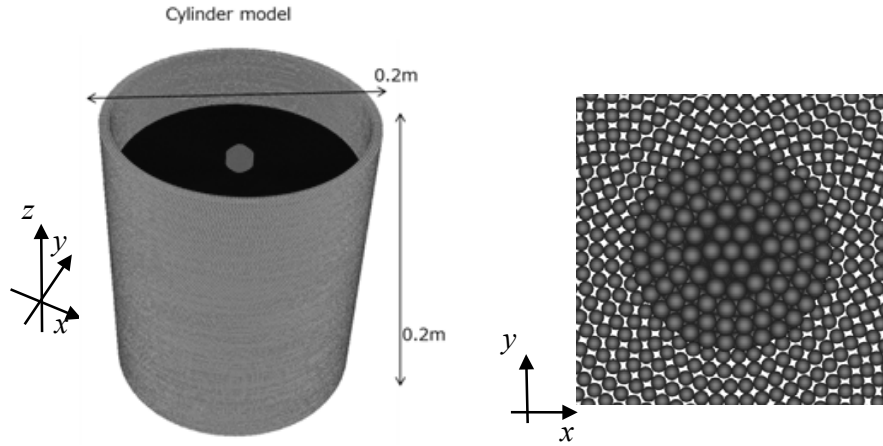


Figure 5. Analysis domain for 3D splash simulation (left figure) and arrangement of particles of hydrogel sphere and water viewed from the top (right figure). Figure 6.

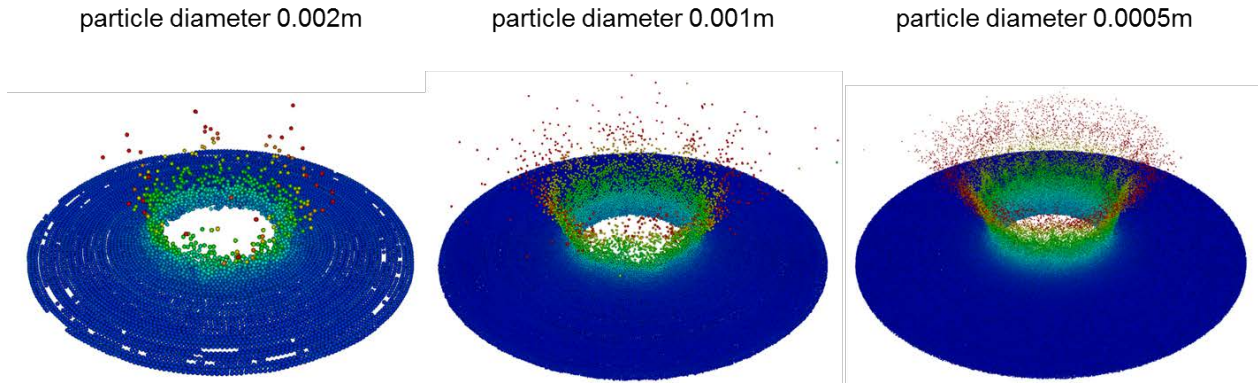


Figure 6. Comparison of splash patterns with the different initial distances of water particles l_0 ($S = 100$, $r_e = 4.1$ and $t = 0.03$ sec.)

Figure 5 shows the simulation setup for splash by a ball. The initial locations of particles are arranged concentrically, and the water tank is a circular cylinder. Figure 6 shows the simulation result of our 3D calculation, which is in good agreement with the experimental result as shown in Fig.1, where the crown-type splash, the air cavity and the droplets scattering are expressed well in the condition of particle diameter 0.0005 m. It is observed that the particle diameter, which is described as the initial distance of particle l_0 , influences the pattern of the splash. In other words, l_0 becomes smaller and the total number of particles is larger, and hence, the splash pattern is expressed more clearly. But as we could not simulate the finger or the spike in the crown-type splash as seen in the experimental result, we need a larger scale computing.

3D simulation of milk crown by large-scale simulation

The “milk crown” is formed when a milk droplet falls and collides with the surface of the thin milk tank (Fig. 7). We calculated the condition when the spherical droplets with a diameter of 4 mm collided with the milk in a tank having a depth of 1 mm at a speed of 1.71 m/s. The 4 mm sphere was selected as it was the approximate size of the maximum diameter droplet that falls freely through the air. The collision speed of 1.71 m/s was equivalent to falling from a height of 15 cm. The depth of 1 mm was selected to match the experimental result [29]. The property of the fluid was water, with a viscosity of $\nu=1.0 \times 10^{-6}$ m²/s, and the coefficient of surface strength C in Eq. 8 was set to 0.02361 N/m, in accordance with Kondou et al.

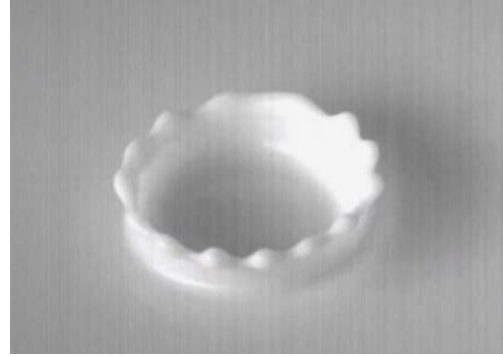


Figure 7. Milk crown by high speed camera. Milk droplet is dropped from 15 cm height.

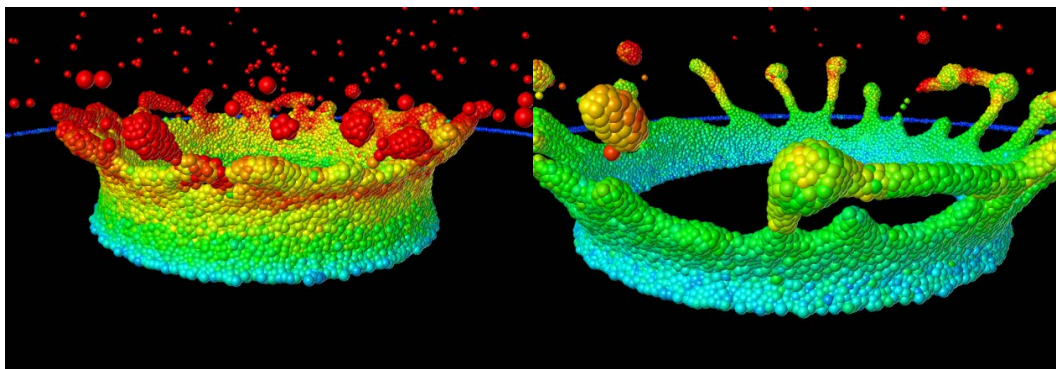
In order to evaluate the influence of the particle diameter and confirm suitable particle diameter, the particle diameter was changed to 0.2 mm, 0.1 mm, 0.05 mm, and 0.025 mm.

Table 1 Particle spacing and number of particles for calculation

Particle spacing (mm)	Number of particles	Time for calculation	Number of Node (FX100, Nagoya Univ.)
0.2	787,670	0.3 h	12
0.1	4,526,320	2.3 h	24
0.05	29,273,448	12.6 h	96
0.025	208,465,245	53.2 h	384

The number of particles and the number of nodes in the calculation conditions for the respective particle diameters are shown in Table 1. For the particle spacing at 0.2 mm and 0.025 mm, the number of fluid particles was calculated at 7.8 M at 200M, respectively. Fig.8 to Fig.11 show the simulation results with the particle diameters at 0.2 mm, 0.1 mm, 0.05 mm, and 0.025 mm, and the colors in the figures represent the velocity of each particle. The analysis of particle diameters of 0.2 mm in Fig.8 and 0.1 mm in Fig. 9 showed the occurrence of unrealistic phenomena such as holes in the wall of the milk crown because the necessary surface tension to tether the particles was not sufficient. This is because the diameter of the particle is too large, and a sufficient number of particles could not be allocated in the direction of the thickness of crown's wall.

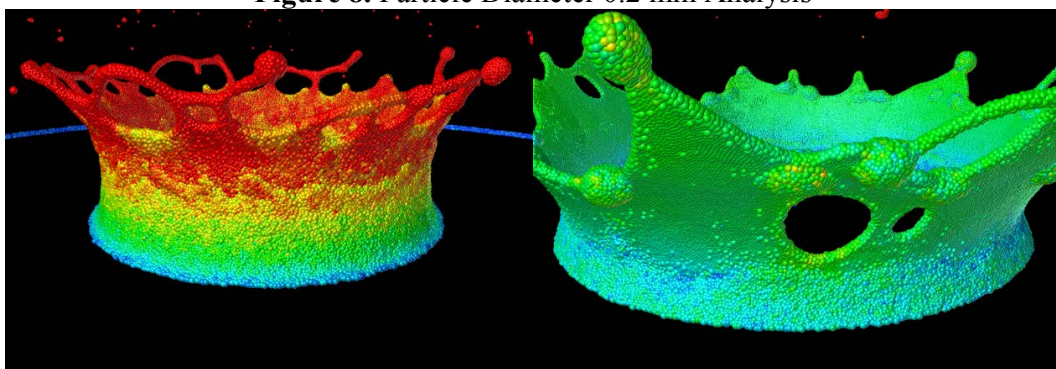
On the other hand, the simulation result of particle diameter 0.05 mm in Fig.10 and 0.025 mm in Fig.11 shows the successful results in generating milk crowns. From the above results, we should use particles with a diameter of at least 0.1 mm, and if possible, a particle diameter of 0.05 mm should be used.



(a) 10 ms

(b) 24 ms

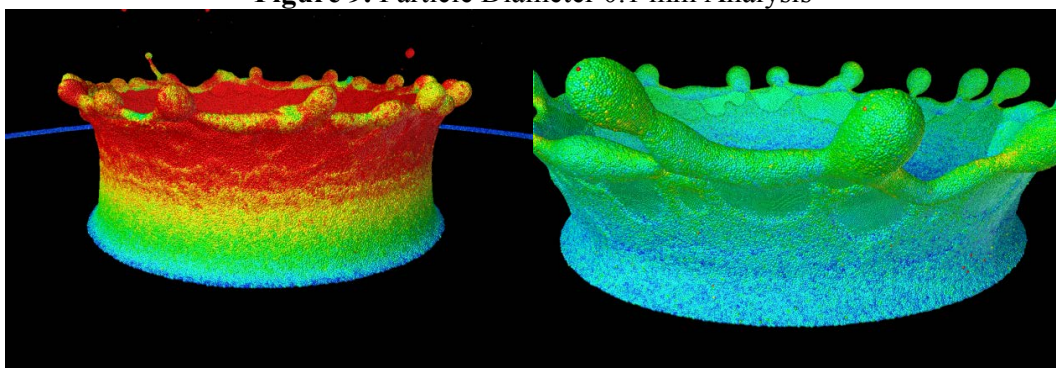
Figure 8. Particle Diameter 0.2 mm Analysis



(a) 10 ms

(b) 24 ms

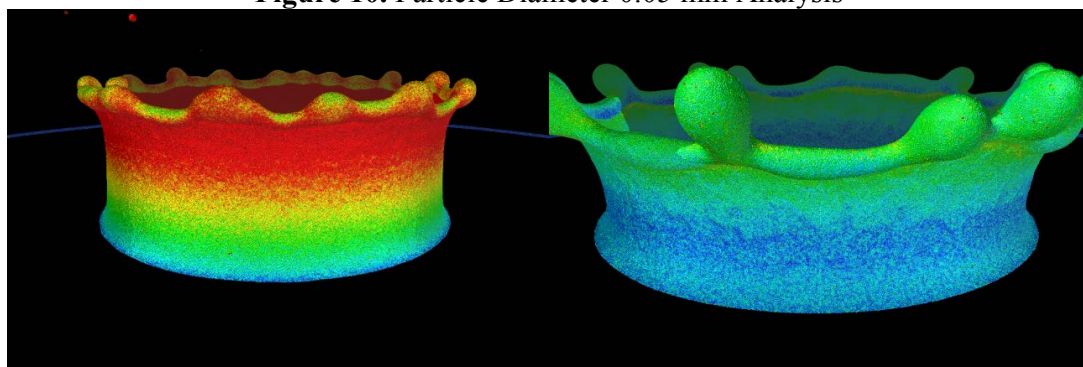
Figure 9. Particle Diameter 0.1 mm Analysis



(a) 10 ms

(b) 24 ms

Figure 10. Particle Diameter 0.05 mm Analysis



(a) 10 ms

(b) 24 ms

Figure 11. Particle diameter 0.025 mm Analysis

Mechanism of water drip

We have stimulated water dripping, which is a phenomenon of droplet, as an issue of FSI.

This phenomenon occurs when we pour water or any other liquid by a cup or pot, causing the adherence of the liquid to the wall of the cup or pot and making them dirty, which is an annoying problem for us.

Therefore, the experimental observation was carried out by recording movies with a high-speed camera, and we observed the flow from the various edges of the cup made using a 3D printer.

Three patterns of the cup, i.e., square edge, circle edge, and 45-degree slope edge, were made of polylactic resin. The experiment was carried out in various settings with the angle of the cup ranging from 0 to 30 degree. The movie was recorded from the beginning of pouring

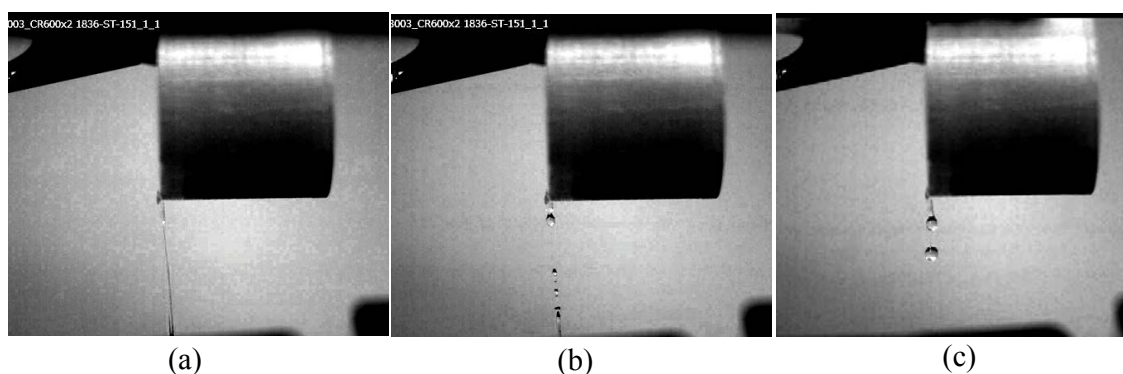


Figure 12. Experimental result of water drip from square edge of cup

water, which was poured by a pipette at the rate of 3 ml/sec, to the end when the last water dripped. Figure 12 shows the snapshots of water dripping from square edge set at 0 degree. As the droplets are seen on the edge of the cup in Figs. 12 (b) and (c), this indicates the wall of the cup gets dirty by the adhesion.

On the other hand, the simulation result of water dripping is shown in Fig. 13. The contact angle model by Kondo et al. was used as the model of wetness between wall and liquid, and we set the value of contact angle to be 45 degrees in this calculation. In Fig.13, the edge of the cup was square, and the cup was set at 0 degree as in the experiment.

We found some differences between our simulation and experimental results. The distance from the edge to the point where the adhesion of droplet on cup's wall appeared was longer than that in the experimental result, and the flux of water was larger than that of the experimental result.

To improve this disagreement with the experimental result, the calibration of contact angle and flux are needed, and these problems were adjusted.

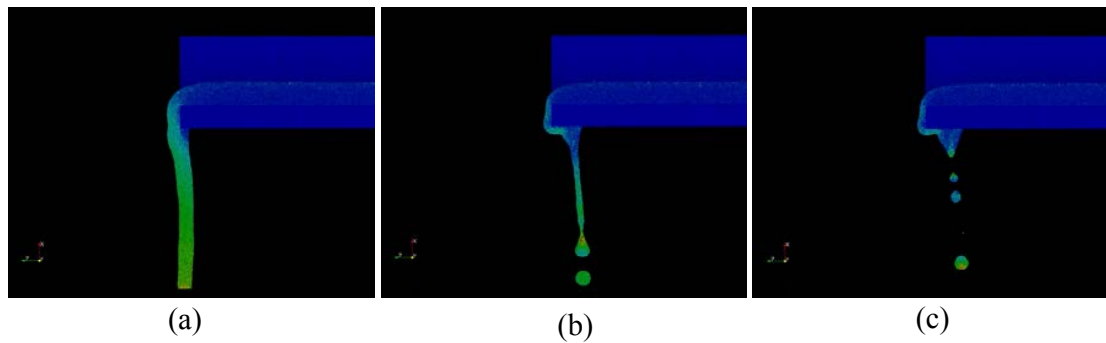


Figure 13. Simulation result of water drip from square edge of cup

Conclusions

In this study, we performed a large-scale calculation of the splash phenomenon using the MPS method. We focused on the importance of the object's surface properties, such as the slip wall, by hydrophilicity of hydrogel and proposed a new intuitive model using slip ratio to express the splash by an object with slip surface properties. Using our large-scale calculation, the projection of the milk crown and its tips such as spikes could be expressed more precisely. Our simulation result was in good agreement with the experimental result in the form of spike and width of a splash. As one of the FSI problem, the simulation of dripping water from the edge of the cup was carried out, and we showed the simulation result of expressing water adhesion by introducing the wetness model of the wall.

References

- [1] Worthington A. M. (1882) On Impact with a Liquid Surface. *Proceedings of the Royal Society of London*, 34, 217-230.
- [2] Peregrine, D. H. (1981) The fascination of fluid mechanics. *Journal of Fluid Mechanics*, 106, 59-80.
- [3] Deegan, R. D, Brunet, P. and Eggers, J. (2008) Complexities of splashing. *Nonlinearity*, 21(1), C1.
- [4] Manservigi S., Scardovelli R. (2009) A variational approach to the contact angle dynamics of spreading droplets. *Computers & Fluids*, 38, 406-424.
- [5] Rebouillat S., Liksonov D. (2010) Fluid–structure interaction in partially filled liquid containers: A comparative review of numerical approaches, *Computers & Fluids*, 39, 739-746.
- [6] Saksono P. H., D. Perić (2006) On finite element modeling of surface tension Variational formulation and applications–Part I: Quasistatic problems, *Computational Mechanics*, 38(3), 265-281
- [7] Angeles J. and Thomson M. (1989) Profile determination of a drop of liquid under surface tension, gravity and centrifugal forces, *Computational Mechanics*, 4(5), 329-344.
- [8] Koshizuka, S., Nobe, A., and Oka, Y. (1998) Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 26(7), 751-769.

- [9] Kanamori H. (1972) Mechanism of tsunami earthquakes. *Physics of the earth and planetary interiors*, 6(5), 346-359.
- [10] Mader C.L. (1973) Numerical simulation of tsunamis. Hawaii Institute of Geophysics, University of Hawaii, 1973.
- [11] Imamura F., Goto, K., and Ohkubo S. (2008) A numerical model for the transport of a boulder by tsunami. *Journal of Geophysical Research*, 113(C1), C01008.
- [12] Harlow, F. H. and Shannon, J. P. (2004) The splash of a liquid drop. *Journal of Applied Physics*, 38(10), 3855-3866.
- [13] Idelsohn S.R., Onate E and Pin F.D. (2003) A Lagrangian meshless finite element method applied to fluid structure interaction problems. *Computers & Structures* 81:655-671.
- [14] Do-Quang, M., and Amberg, G. (2009) The splash of a solid sphere impacting on a liquid surface: numerical simulation of the influence of wetting. *Physics of Fluids* (1994-present), 21(2), 022102.
- [15] Yokoi, K., Vadiello, D., Hinch, J. and Hutchings, I. (2009) Numerical studies of the influence of the dynamic contact angle on a droplet impacting on a dry surface. *Physics of Fluids* (1994-present), 21(7), 072102.
- [16] Pasandideh-Fard, M., Qiao, Y. M., Chandra, S. and Mostaghimi, J. (1996) Capillary effects during droplet impact on a solid surface. *Physics of Fluids* (1994-present), 8(3), 650-659.
- [17] Tanaka Y., Washio Y., Yoshino M. and Hirata T. (2011) Numerical simulation of dynamic behavior of droplet on solid surface by the two-phase lattice Boltzmann method. *Computers & Fluids* 40, 68-78.
- [18] Xie, H., Koshizuka, S. and Oka, Y. (2004) Modelling of a single drop impact onto liquid film using particle method. *International journal for numerical methods in fluids*, 45(9), 1009-1023.
- [19] Bussmann M., Chandra S. and Mostaghimia J. (2000) Modeling the splash of a droplet impacting a solid surface. *Physics of fluids*, 12, 3121-3132.
- [20] Nishio, N., Yamana, K., Yamaguchi, Y., Inaba, T., Kuroda, K., Nakajima, T., Fujimura, H. (2010) Large - scale SPH simulations of droplet impact onto a liquid surface up to the consequent formation of Worthington jet. *International journal for numerical methods in fluids*, 63(12), 1435-1447.
- [21] Nomura K., Koshizuka S., Oka Y., Obata H. (2001) Numerical Analysis of Droplet Breakup Behavior using Particle Method. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 38, 1057-1064.
- [22] Caboussat A. (2006) A numerical method for the simulation of free surface flows with surface tension. *Computers & Fluids*, 35, 1205-1216.
- [23] Alam A., Kai H. and Suzuki, H. (2007) Two-dimensional numerical simulation of water splash phenomena with and without surface tension. *J Mar Sci Technol*, 12, 59-71.
- [24] Yokoyama M., Kubota Y., Kikuchi K., Yagawa G. and Mochizuki O. (2014) Some remarks on surface conditions of solid body plunging into water with particle method, *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, 1, 9.
- [25] Murotani K., Koshizuka S., Tamai T., Shibata K., Mitsume N., Yoshimura S., Tanaka S., Hasegawa K., Nagai E. and Fujisawa T. (2014) Development of Hierarchical Domain Decomposition Explicit MPS Method and Application to Large-scale Tsunami Analysis with Floating Objects, *Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering (JASSE)*, October 31, , pp.16-35 .
- [26] Oochi, M., Yamada, Y., Koshizuka, S. and Sakai, M. (2011) Validation of Pressure Calculation in Explicit MPS Method *Transactions of the Japan Society for Computational Engineering and Science*, Vol. 2011, P 20110002.

- [27] Kondo, M., Koshizuka, S., Suzuki, K., and Takimoto, M. (2007). Surface tension model using inter-particle force in particle method. In ASME/JSME 2007 5th Joint Fluids Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers, 93-98.
- [28] Yagawa G and Shioya R. (1994) Parallel finite elements on a massively parallel computer with domain decomposition, 4, Comput. System Eng. 4, 495-503.
- [29] Gunji H., Ishii H., Saitoh A. and Sakai T. (2003) http://www2.nagare.or.jp/mm/2003/gunji/index_ja.htm, The Japan Society of Fluid Mechanics.

Numerical Study of Adhesion Behavior of Sea-Salt Particles on Concrete Bridge Girders

†Jun Tomiyama¹, *Yasushi Nakabayashi²

¹Department of Civil Engineering and Architecture, University of the Ryukyus, Japan.

² Department of Information Sciences and Arts, The University of Tokyo, Japan

*Presenting author: jun-t@tec.u-ryukyu.ac.jp

†Corresponding author: nakabayashitoyo.jp

Abstract

The deterioration rate of concrete structures caused by salt attack differs according to each member and site of these structures. One proposed reason for this is the difference in amount of airborne salt adhering to individual members and sites. In fact, some concrete structures in coastal areas suffer serious salt damage. Therefore, the quantification of airborne salt adhesion on these surfaces is key for the appropriate maintenance of concrete structures. We have proposed a numerical approach for airborne salt transportation and adhesion to concrete surface based on the random walk method which is a particle diffusion method. In this study, measurements and simulations obtained for an existing concrete bridge are compared to validate the proposed method. These results agree well qualitatively, validating this method.

Keywords: Concrete structure, Salt damage, Airborne salt adhesion, Random walk method, Maintenance

Introduction

Located in a subtropical area and surrounded by sea, Okinawa Prefecture is subjected to a hot and humid climate that inherently produces a corrosive environment.

The deterioration rate of concrete structures caused by chloride attack differs at their individual members and sites because of variations in the amount of adhered airborne salt on these components and area. In particular, airborne salt inflicts serious salt damage to some concrete structures in coastal areas. Therefore, an estimate of airborne salt adhesion on these surfaces is essential for the proper maintenance of concrete structures.

Numerous studies have been performed to evaluate salt damage caused by airborne salt spray [1].

These studies focused on the spatial distribution of the deterioration rate and environmental factors, such as temperature, humidity, rainfall, isolation, and airborne salt for individual components and area of the same structure. Moreover, they underlined the importance of environmental action on these deterioration rates.

We have proposed a simulation method to assess airborne salt transportation and adhesion to concrete surfaces using the random walk method, which is a particle diffusion method. In this study, the analytical and numerical results obtained for an existing concrete bridge are compared in order to determine the validity of the proposed method.

Simulation Method

Outline of Simulation method

The proposed method comprised two stages (Fig. 1). First, the wind velocity field in the analytical domain was calculated using the finite element method. Second, airborne salt particle transport and their adhesion to concrete surfaces were simulated by the random walk method using the calculated wind velocity data.

The flowchart of the proposed method is shown in Fig. 1.

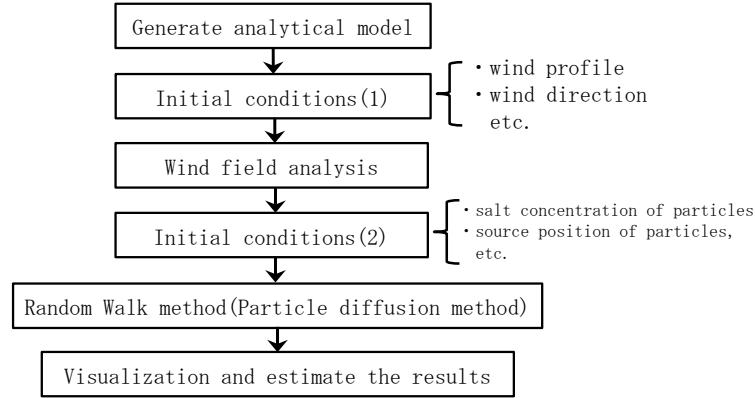


Fig. 1 Flowchart of the proposed method

Wind Field Analysis

The wind field around the structure was analyzed using the three-dimensional (3D) large-scale incompressible fluid finite element code ADVENTURE_Fluid [2].

This analysis considered the following velocity–pressure formulation of the Navier–Stokes equations governing incompressible flows:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - \mathbf{f} \right) - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0, \quad (2)$$

where \mathbf{u} is the velocity, ρ is the density, \mathbf{f} is a body force vector, $\boldsymbol{\sigma}$ is the stress tensor, ∇ is the differential operator, and t is the time.

The incompressible fluid analysis code for tetrahedral P1-P2 elements ADVENTURE_Fluid [2] was stabilized using streamline-upwind/Petrov–Galerkin (SUPG) and pressure-stabilized/Petrov–Galerkin (PSPG) methods.

The Crank–Nicolson method was chosen for time discretization, and the velocity and pressure fields are determined simultaneously using asymmetric solvers.

Finite element equations based on the combined SUPG/PSPG method are written as

$$(M + M_\delta) \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (N + N_\delta) \mathbf{u} + K\mathbf{u} - (G + G_\delta) \mathbf{p} = 0 \quad (3)$$

$$G^T \mathbf{u} + M_\varepsilon \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + N_\varepsilon \mathbf{u} + G_\varepsilon \mathbf{p} = 0, \quad (4)$$

where matrices M , N , K , and G are the mass, convection, diffusion, and gradient, respectively. The subscripts δ and ε identify the SUPG and PSPG contributions, respectively.

Particle Diffusion Method[3]

The 3D random walk [3] was used to model the advection–diffusion of airborne salt particles. Here, individual particles in a 3D space was assumed to be transported by turbulence and mean flow.

(1) Particle position

Salt particle positions in the Cartesian coordinate system were updated using their velocities:

$$x_j^{i+1} = x_j^i + u_j^{i+1} \Delta t \quad (5)$$

where i is the number of analytical steps, j is the number of 3D coordinates, and Δt is the time step. x_i and u_i are the particle position and velocity at the i th step, respectively.

The particle velocity at step $i+1$ is written as

$$u_j^{i+1} = U_j^{i+1} + \alpha u_j^i + \lambda_j^{i+1} \quad (6)$$

where U_j^i is the mean wind velocity in the analytical domain calculated using ADVENTURE_Fluid, λ_j^{i+1} is the turbulence statistic, and α is the Lagrangian correlation function. The particle random velocity was assumed to conform to a normal distribution of mean value zero.

The static turbulence is expressed as

$$\lambda_j^{i+1} = (1 - \alpha^2)^{1/2} \sigma_j \cdot \eta_j^{i+1} \quad (7)$$

where η_j^{i+1} is a standard normal random variable and σ_j is the standard deviation of the particle velocity representing the particle diffusion properties. In addition, σ , which is assumed to obey a Fick-type diffusion, was defined as

$$\sigma = \sqrt{2Kt} \quad (8)$$

where K is the particle speed-dependent turbulent diffusion coefficient. K is written as

$$K = \frac{\beta}{3} (u^2 + v^2 + w^2) \cdot t \quad (9)$$

where β is an analytical coefficient.

(2) Determination of salt particle adhesion

Modeling particle adhesion to concrete surfaces is important for evaluating the amount of airborne salt on these surfaces. However, the mechanism of this adhesion is unclear.

Therefore, the full adhesion model, in which all particles reaching the surface and adhered to it, was adopted in this study.

(3) Saline concentration and dropping velocity of particles

The saline concentration and dropping velocity of particles have been previously assumed to exhibit variable distribution values[3]. However, because of the small calculation domain, these values were considered constant in this study.

Experimental Investigation of a concrete bridge

Salt adhesion on the surface of a concrete bridge superstructure[4] was evaluated to estimate the distribution of the environmental impact of airborne salt. For comparison purposes to simulation results, this investigation addressed the central portion of the main girders.

Bridge outline and wind conditions

Opened to traffic in March 2011, the subject bridge is located on Northern Okinawa Island (Fig. 2). As shown in side and cross-sectional views (Fig. 3), this three span post-tension prestressed concrete bridge comprises five main girders.

Salt adhesion was assessed in areas N, M, and S of the bridge positioned in the central region of the girders (Fig. 3). In addition to airborne salt, areas N and S were affected by sea spray. Wind direction and velocity are treated as key factors influencing the amount of airborne salt. Weather data for the Northern Okinawa Island were retrieved from the Izena station between January 2008 and December 2012. The percentage of each accumulative wind direction at Izena station is shown in Fig. 4.

As mentioned above, environmental conditions clearly promote severe chloride attacks in winter because of the north monsoon. Therefore, the bridge was assumed to be subjected to a vertically oriented wind presenting a high airborne salt content.

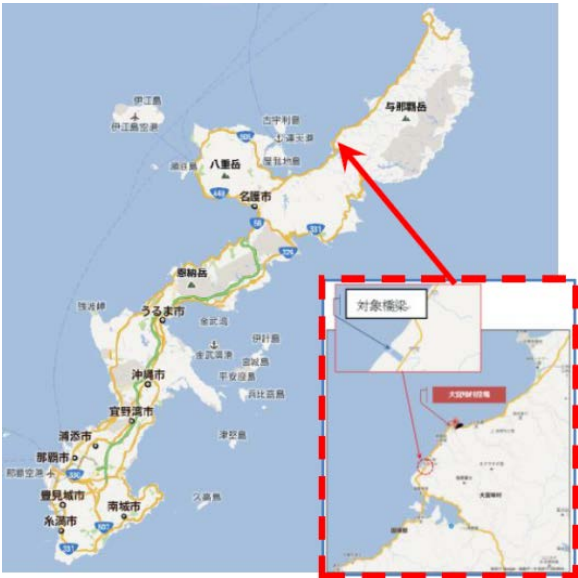
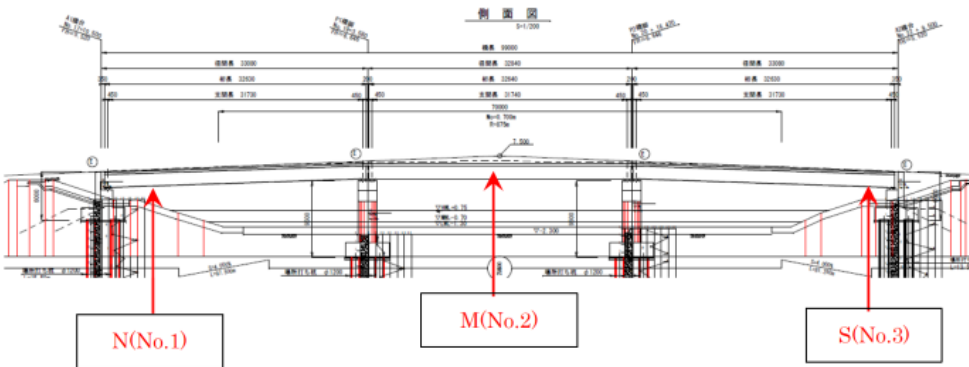
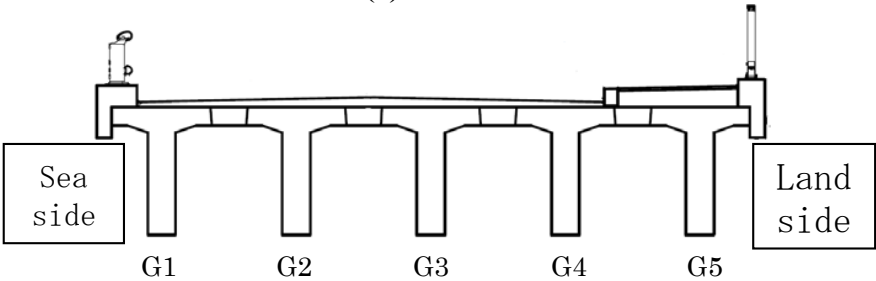


Fig.2 Bridge location



(1) Side view



(2) Cross-sectional view
Fig.3 Bridge outline

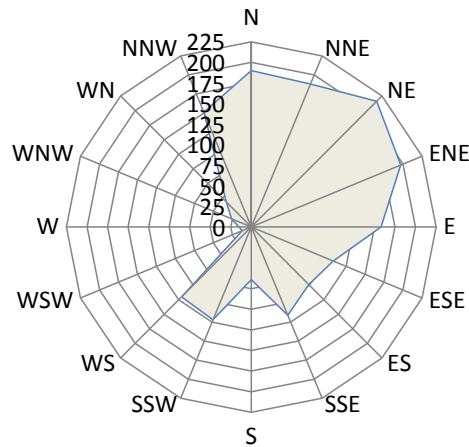


Fig.4 Percentage of each accumulative direction

Gauze swab method

Airborne salt adhesion on main girder surfaces was measured by the gauze swab method [5]. In this method, a 20 cm × 20 cm area was swabbed using moist gauze (Fig. 5) and analyzed using a chloride detector tube. Measurement points #1, #2, #3, #4, and #5 at each main girder are shown in Fig. 6.



Fig.5 Image showing the gauze swab sampling step

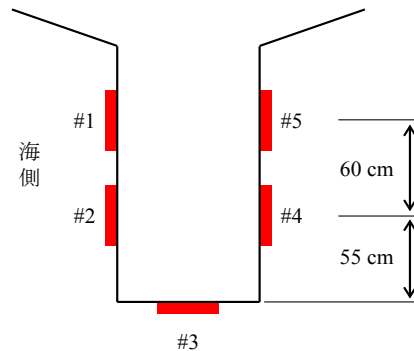


Fig.6 Measurement positions each main girder

Measurement results

Fig. 7 and Fig. 8 show the measurement positions along the main girder surfaces and their corresponding adhered salt content, respectively. These results indicated that airborne salt tended to adhere to the underside of the girders. Moreover, salt adhesion was more significant on the seaside portion of the second girder (G2) than that of the first girder (G1), suggesting that salt adhesion varied within the same structure.

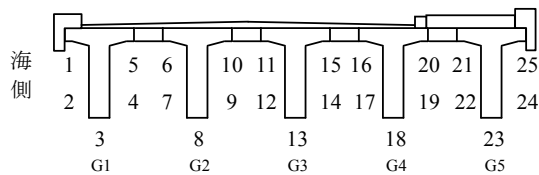


Fig.7 Measurement positions on the main girder surface

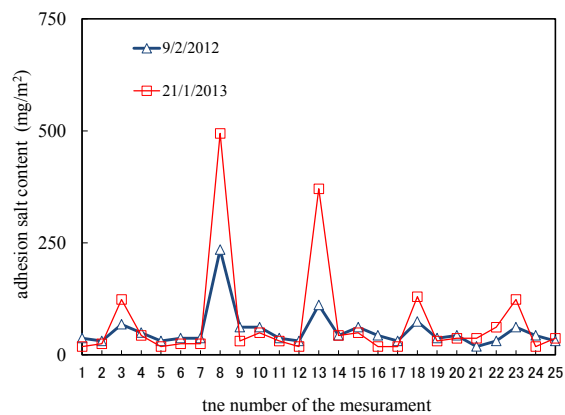


Fig.8 Slat adhesion on the main girder surfaces

Simulation of airborne salt adhesion

In this section, measurements and numerical results of the Northern Okinawa Island concrete bridge were compared to validate the proposed method.

Numerical model and simulation conditions

Fig. 9 shows the analytical domain around the bridge superstructure. A uniform wind velocity was initially set to 5 m/s using mean wind data from the Izena station as a reference.

Fig. 10 shows the mesh division around the bridge superstructure. This mesh consisted of 1,009,795 elements and 174,434 nodal points. The parallel calculation is performed using the Center for Computational Mechanics Research (CCMR) cluster at Tokyo University.

Boundary conditions are established by introducing nonslip velocity conditions in the structure surface and slip velocity conditions in another surface.

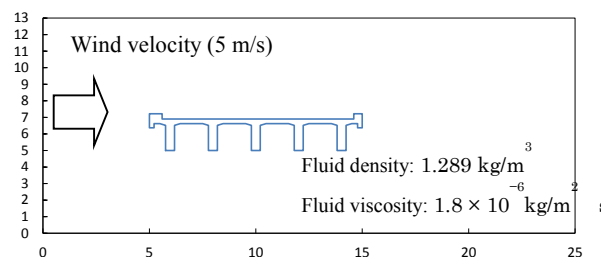


Fig. 9 Analytical domain around the bridge superstructure

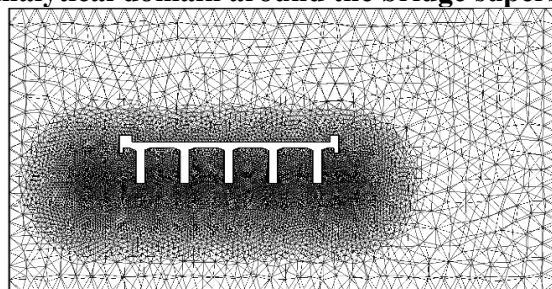


Fig. 10 Mesh division around the bridge superstructure

Numerical results

Wind field and particle advection–diffusion are analyzed by the random walk method and these results are compared with the measurements.

(1) Wind field analysis

Fig. 11 shows the wind velocity obtained from analysis method around the bridge superstructure.

As a boundary conditions, it was assumed that wind velocity of 5m/s is the uniform flow from windward side (sea side). From these results, at first, it was observed that Kármán's vortex was generated at downwind side (land side) of the bridge cross-section, also, wind velocity field in the domain shifted to small eddies from large eddies generated between the main girders.

The wind velocity map after 0.5 s (Fig. 10b) was used in the random walk simulation of particle advection–diffusion because it exhibited the largest eddy between the main girders.

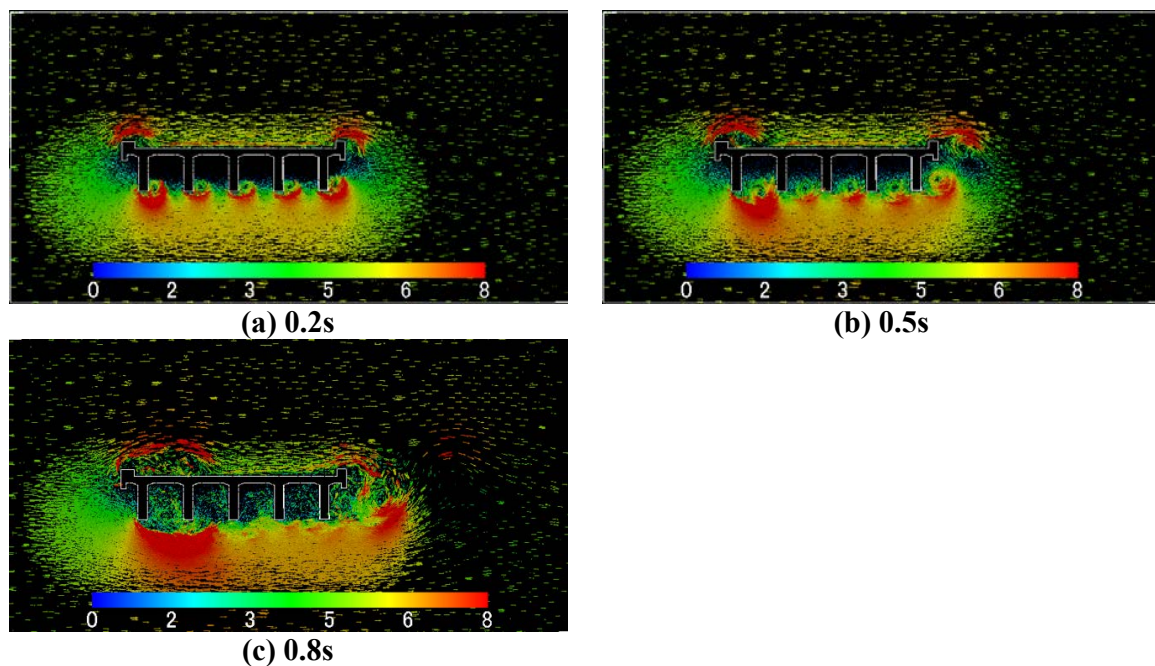


Fig. 11 Wind velocity vectors

(2) Simulation of salt particle adhesion

The random walk simulation of the particle advection–diffusion–adhesion was conducted using the wind field obtained at 0.5 s (Fig. 10b).

This simulation was performed using 20,000 particles for 3000 steps of 0.01 s. Moreover, the parameter β was defined by preanalysis. Although the simulation was 3D, the particle advection–diffusion–adhesion is considered as a two-dimensional problem because the wind field calculated by ADVENTURE_fluid is like two-dimensional.

Fig. 12 and Fig. 13 show the initial particle position with respect to the bridge and simulated particle advection–diffusion–adhesion at different times, respectively. These results demonstrate that the advection, diffusion, and adhesion of airborne salt particles on the structure surface can be reproduced in response to wind field.

Fig. 14 shows the simulated salt particle adhesion at different positions on the main girder surface. These results are expressed in terms of number of particles per unit area. These numerical results indicated that airborne salt adhesion preferably occurred on the underside of the girders and varied within the same structure, which were consistent with the measurements shown in Fig. 7.

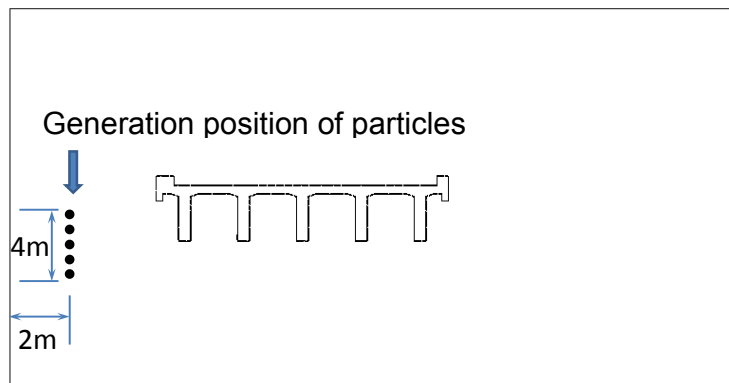


Fig. 12 Initial particle position with respect to the bridge

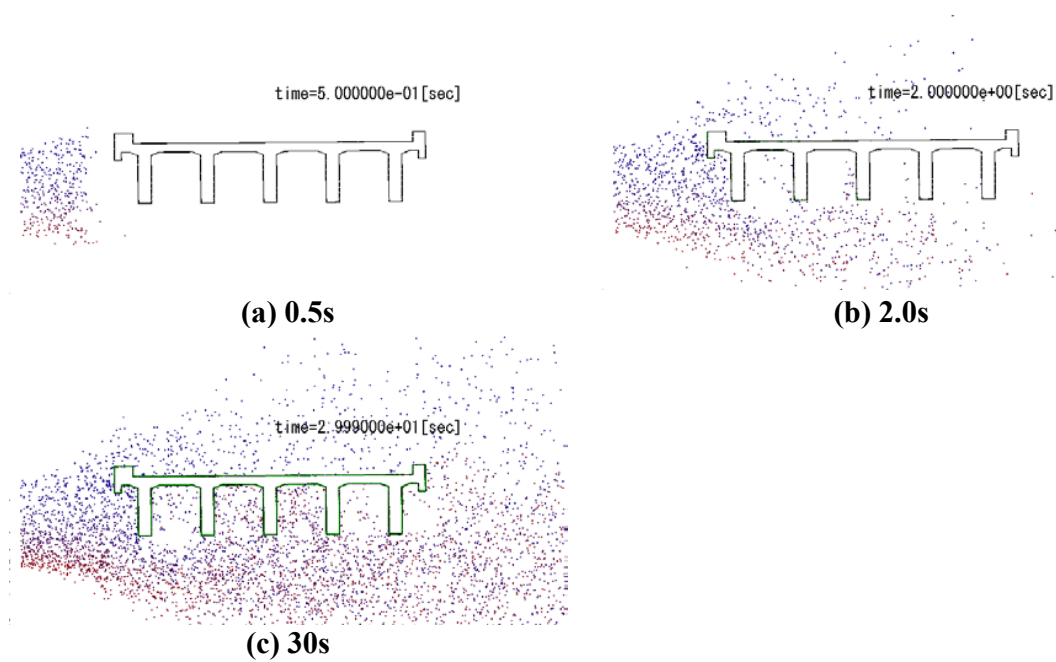


Fig.13 Random walk simulation of the particle advection-diffusion-adhesion

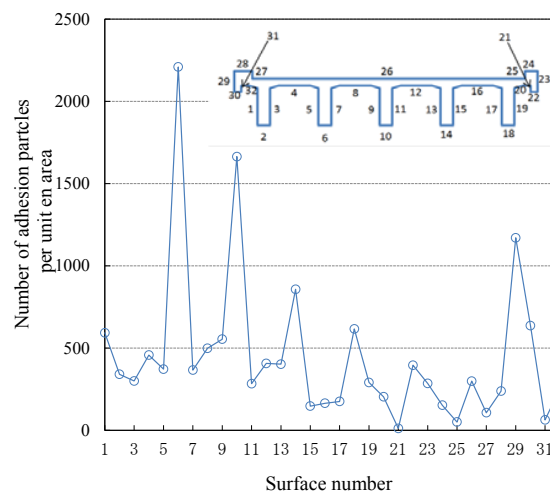


Fig. 14 Simulated salt particle adhesion at measurement positions on the main girder surface.

(3) Correlation between numerical results and measurements

To correlate the numerical results and measurements, which are expressed in different units, surface values were normalized by the value for the underside of girder G2, which exhibited significant salt particle adhesion. Fig. 15 compares these normalized quantities. This comparison clearly showed that numerical results were similar to the measurements.

Correlation diagrams for all data and data recorded on the underside of the main girders are plotted in Figs. 16a and b, respectively. These diagrams showed that numerical results and measurements were well correlated. In particular, the values obtained for the underside of the main girders displayed an excellent correlation between simulation and experiment ($R^2 = 0.9482$). Although the values recorded for the main girder sides presented a slightly weaker correlation, the simulation results was the value of the safety side in comparison with the measurements.

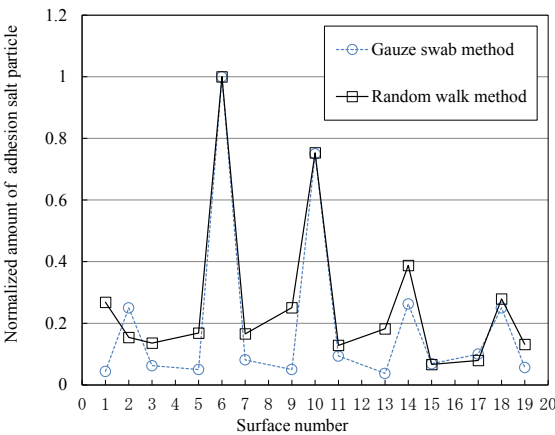
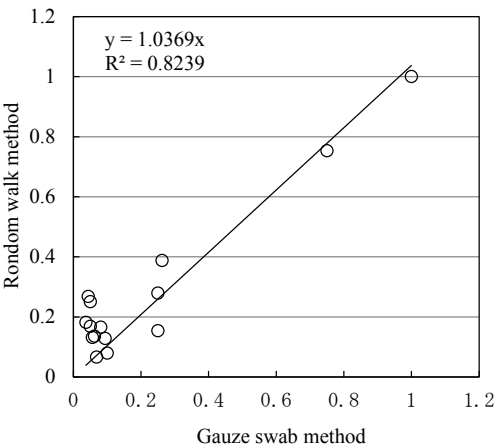
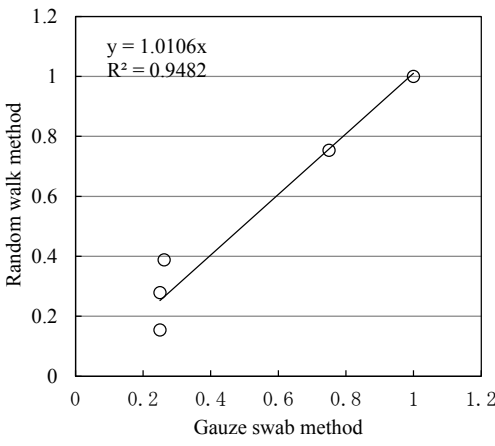


Fig. 15 Normalized amounts of simulated and measured adhered salt particles



(a) Correlation diagram for all data



(b) Correlation diagram for data collected on the underside of the main girders

Fig. 16 Correlation between simulated and measured amount of adhered salt particles

Conclusions

The findings of this study are summarized as follows:

- (1) Measurements indicated that airborne salt adhesion preferably occurred on the underside of girder G2 positioned seaside and varied within the same structure.
- (2) The behavior of airborne salt transported from sea to landside was analyzed using the random walk method.
- (3) Simulation results exhibited similar trends to measurements.
- (4) A good correlation was observed between the results of the random walk and gauze swab methods, validating the proposed method.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank the Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research (CAESAR) of Japan's Public Works Research Institute (PWRI) for the concrete bridge investigations by the gauze swab method. We also acknowledge valuable discussions on the numerical simulation results with members of the Subcommittee on Priority in Maintenance and Management of Deteriorated Concrete Structures (JSCE-342, the Japan Society of Civil Engineering) and the Research Committee on Long-term Durability Simulation for Concrete Structures (Japan Concrete Institute). Numerical calculations were performed using the CCMR personal computer cluster.

References

- [1] Japan Society of Civil Engineers Midterm report of subcommittee on priority in maintenance and management of deteriorated concrete structures, (2012), (In Japanese).
- [2] ADVNETURE Project, <http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/jp/>
- [3] Tanaka, T., et al., "Application of random walk method to the airborne salt simulation", Japan Concrete Institute, Vol. 26, No. 1, pp. 789-794 (2004), (In Japanese).
- [4] Matsuura, A., et al., "Study on the amount of adhered salt on surface of concrete bridge by using gauze swab method", Japan Society of Civil Engineers Annual Meeting, V-496, pp.991-992,(2013), (In Japanese).
- [5] Japan Road Association, "Manual of Steel Road Bridge Painting & Corrosion Prevention (Appendix)", pp.119-120,(2006), (In Japanese).

Numerical Simulation of Mudcrack Grows

†Hitoshi Matsubara¹ and Kosaburo Hirose^{2,3}

¹Department of Civil Engineering and Architecture, University of the Ryukyus, Japan.

²Graduate School of Engineering and Science, University of the Ryukyus, Japan.

³Technical Division of Faculty of Engineering, University of the Ryukyus, Japan.

†Corresponding author: matsbara@tec.u-ryukyu.ac.jp

Abstract

The fracture patterns of mud-pastes show significantly complex patterns in nature. The mud-pastes initially have fluid-like properties, but gradually change from “fluid” to porous “solid” in their drying process. The mudcrack phenomena in nature, therefore, is one of the complex physical phenomena of interest in material sciences. However, although it has been considered that mudcrack may be induced by the friction caused by the differences between shrinkage ratios of soil skeletons, the mechanical details remain unknown.

In this work, we describe a novel numerical model based on three dimensional finite element method for mudcrack growth in/on mud-pastes. This model is newly description for mudcrack simulation based on the techniques of three dimensional solid simulations. In order to validate the proposed model, Hausdorff fractal dimension of the numerical fracture patterns is compared with those of the experiments. As a result, the numerical results showed fracture patterns reasonably, and the fractal dimension of the cracking pattern by numerical simulation was almost consistent with the experimental results.

Keywords: Mudcrack, Crack propagation simulation, Digital image correlation, Maximum principal stress/strain, Fractal dimension.

Introduction

The dry shrinkage cracking phenomena of mud-pastes (hereinafter, “mudcrack”) is a fracture process commonly observed on surface of farms, tidelands, etc. in nature as shown in Figure 1. Under some multiple physical processes such as wet-drying interactions or changing of material properties, the fracture morphologies show significantly complex patterns [1]-[3]. In addition, the mud-pastes composed of numerous microscopic soil-particles and solvents initially have fluid-like properties, but gradually change from “fluid” to porous “solid” in their drying process. The mudcrack phenomena in nature, therefore, is one of the complex physical phenomena of interest in material sciences. Recently, it has been clarified that mudcrack generated in the ancient Earth may affect the modern geological structures [4]. Therefore, to establish some evaluation techniques for mudcrack patterns would be useful for assessing the natural rock failures such as block or flexural toppling in nature, which is one of the natural disasters. Hence, understanding the mechanism of mudcrack patterns become increasingly important for the geoen지니어ing fields.

We often observe geometric patterns of mudcracks having many joints with angles close to 90° or 120° in nature as shown in Figure 1 [2][5]. Ito and Miyata [6] showed experimentally that the joint angles depend on the thickness and the friction between the drying paste and



Figure 1. Mudcrack pattern in Nature

container. Also, they reported that the amount of cracks decreases as the content of coarse sand is increased [6]. Mudcracks are induced by the friction caused by the differences between the shrinkage ratio of the paste and the container. In the case of thin paste samples, Müller [7] and Weinberger [8] used cornstarch pastes to show that the crack propagation speed decreases as the paste thickness becomes less. In addition, they observed plumose morphologies on the surface, and conducted some pattern analyses for these plumose morphologies and clarified that the crack propagation speed on the paste surface is larger than that in the bottom part of the samples [9][10].

On the other hand, in the case of thick paste samples, polygonal blocks are generated as the drying process zones grow from the paste surface in the depth direction [11]-[13]. In these experiments, because the water content and the volume contraction rate of the pastes are positively correlated, it was considered that the mudcracks are induced by the friction caused by the differences of the shrinkage ratios inside the paste samples.

It is interesting that wetted pastes can remember the direction of vibration and flow that were given before the drying process [14]-[16]. The key physical parameter of this imprinting memory in pastes may be the shear stress caused by external vibrations that partially and regularly exceeds the shear yield strength of the paste [15]. Therefore, a strong resistant function may be developed against the fracture process in adequately controlled wetted pastes. In recent viewpoints, it has been considered that the “imprinting memory” in pastes is one of the most important parameters to prevent separation and flaking on the walls of buildings [17].

The fractal analysis is an effective evaluation method for the fracture patterns of mudcracks, and many researchers have attempted to understand the patterns by using this geometric approach [18]-[21]. In most recent literatures, some researchers have proposed a three-dimensional fractal evaluation approach that uses digital images captured by computed tomography and laser scan systems [22][23]. These researchers reported a positive relationship between the porosity of pastes and their fractal dimensions. In this regard, a relationship could exist between the fractal dimensions, the fracture patterns, and the crack propagation in drying pastes. Also, in numerical approaches, the fracture pattern of mud pastes were described by using a simple three dimensional model called as spring network model [24]. However, we have not obtained such complicated patterns in modern three dimensional solid simulations.

Under above situation, however, although it has been considered that mudcrack may be induced by some physical phenomena such as friction caused by the differences between shrinkage ratios of soil skeletons, the mechanical details remain unknown indeed regarding the mechanical evaluation. Also, regarding the morphological evaluation, there are many strange phenomena in mudcrack patterns. In this work, we describe a novel numerical model based on three dimensional finite element method for mudcrack growth in/on mud-pastes. This model is based on the experimental results of digital image correlation, and is newly description for mudcrack simulation based on the techniques of three dimensional solid simulations. In order to validate the proposed model, Hausdorff fractal dimension of the numerical fracture patterns is compared with those of the experiments.

Distribution of principal strain based on Digital image correlation

Digital image correlation (DIC) is a full-field image analysis method, and has been performed with many types of object-based patterns, including lines, grids, dots and random arrays [25]. The greatest feature of this technique is that the measurable strain range could be extremely wide though it depends on the resolution. Therefore, it would be useful to obtain the dynamics of strain distributions for the mudcrack propagation because the mud-pastes would largely

shrink in their drying process. The theoretical details of the DIC technique could be followed in the reference [25].

In this work, we observed actual crack propagation process by using a DIC system. In this system, mud-pastes with mottled patterns are captured by 2 cameras as shown in Figure 2. After capturing, we may analyze the distribution of their principal strain by using the dataset of the deformation of mottled patterns. In Figure 3, the mottled pattern on the paste is shown where all of the patterns should be irregular.

Figure 4 shows the experimental cracking patterns with mudcrack propagation. In the experiment, each one crack occurs and propagates independently, and subsequently the cracks are connected to each other with angles closed to 90° . Figure 5 illustrates the distribution of maximum principal strain. From this figure, the cracking on mud-pastes obviously occurs at the point of maximum principal strain. This means that we may use the maximum principal stress/strain theory as a fracture criterion for the mudcrack phenomena.

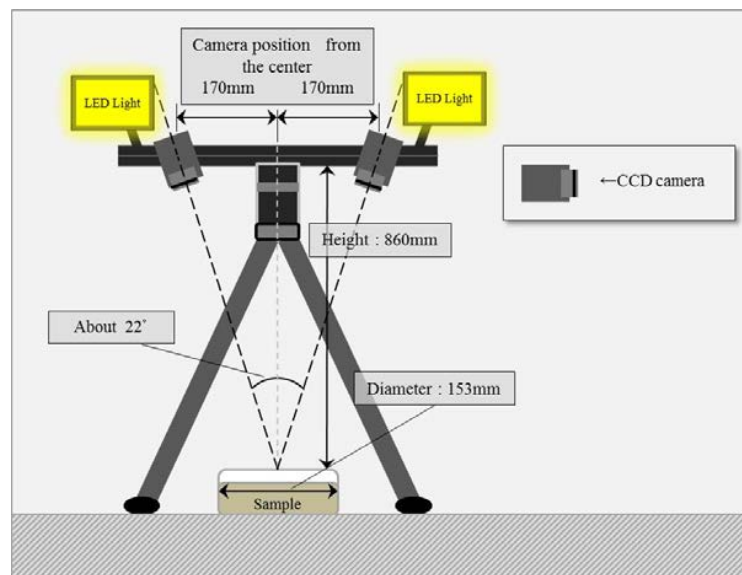


Figure 2. Digital Image Correlation system

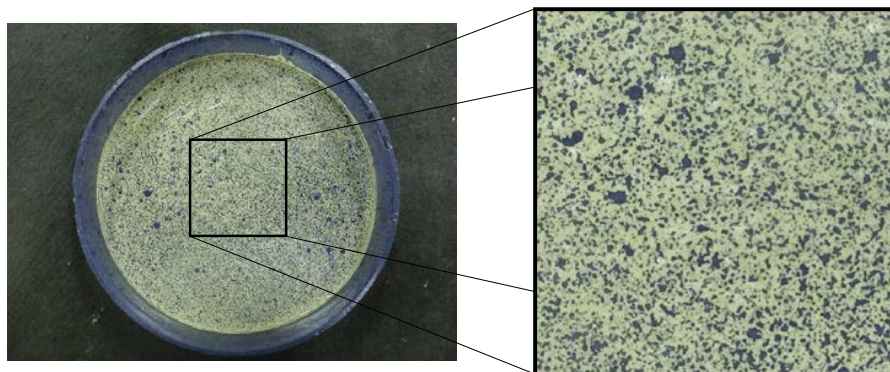


Figure 3. Mud-paste sample with mottled patterns

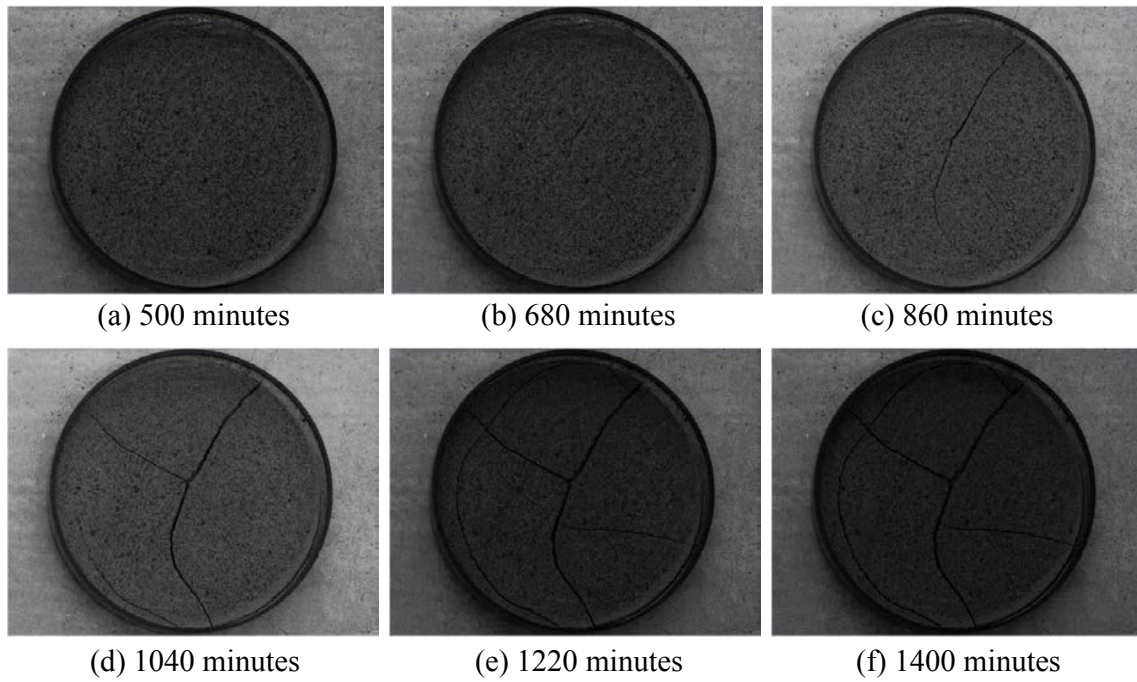


Figure 4. State of the mudcrack propagation

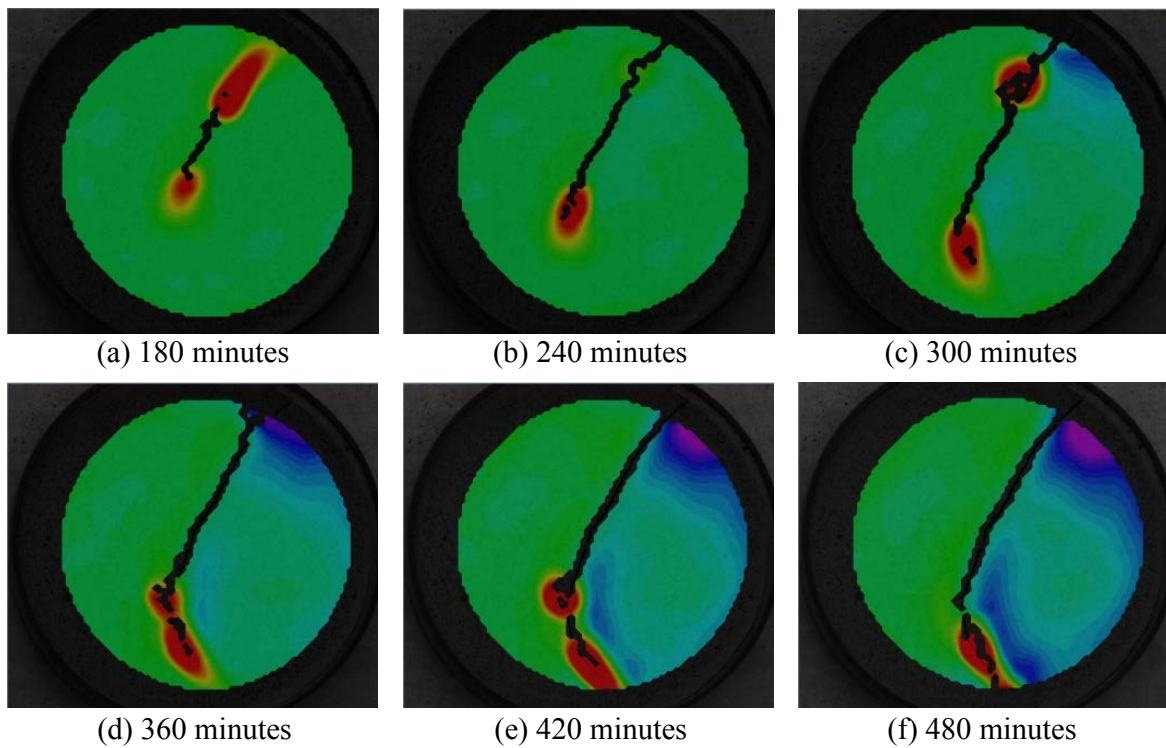


Figure 5. State of the mudcrack propagation

Mathematical modeling for mudcrack grows

Finite element formulation

The following governing equation for non-fractured finite element is employed.

$$\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{D}_e \mathbf{B} \mathbf{u} d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{D}_e \boldsymbol{\varepsilon}_s d\Omega \quad (1)$$

where \mathbf{B} is the strain-displacement matrix, \mathbf{D}_e is the elastic stress-strain matrix, \mathbf{u} is the nodal displacement, Ω is the volume of an element and $\boldsymbol{\varepsilon}_s$ is the shrinkage strain. In this work, normal element of $\boldsymbol{\varepsilon}_s$ is assumed by the following equations:

$$\varepsilon_s = - \left(\frac{\exp(-\beta \cdot t) - 1}{\exp(-\beta) - 1} \right); \quad t = \frac{z}{z_{\max}} \quad (2)$$

where β is the positive coefficient, t is the normalized thickness of mud-pastes, z_{\max} is the thickness of mud-pastes and z is the distance from bottom. The distribution of $\boldsymbol{\varepsilon}_s$ is shown in Figure 6. The distribution shows that the surface drying becomes strong as the β becomes large, or vice versa.

Regarding the stress-strain matrix, \mathbf{D} , we used the smeared crack model [26]. This model is conceptually and computationally quite simple, but this model is very effective in capturing essential fracture behavior in various materials. This model would be useful for mud-pastes cracking system because it has been found that the crack propagations in paste-like materials may be suppressed by the stress relaxation occurring around crack tips rather than by singularity of crack tip stress [27].

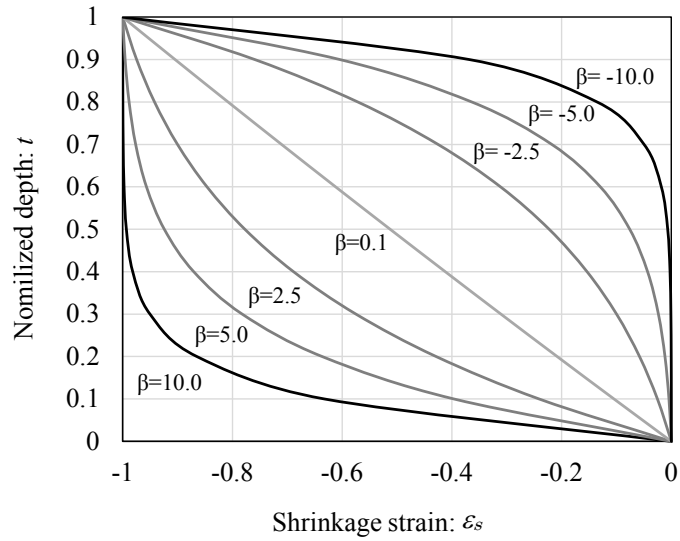


Figure 6. Assumed shrinkage strain distribution

The smeared crack model could be categorized into fixed and rotating crack models. With a fixed crack model, the orientation of the crack is fixed during the entire computational process, whereas a rotating crack model allows the orientation of the crack to co-rotate with the axes of the principal strain. In this work we used the fixed crack model, and employed the following equation for fractured finite elements:

$$\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{T}^T \mathbf{D}_{cr} \mathbf{B} \mathbf{u} d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{T} \mathbf{D}_{cr} \boldsymbol{\varepsilon}_s d\Omega \quad (3)$$

where \mathbf{T} is the transformation matrix for the stress and the strain, which are reflecting the orientation of the crack.

Crack propagation algorithm

In the non-increment-type of the smeared crack model, just one element with the maximum value of the following r is assumed to be a smeared fractured element:

$$r = \frac{\sigma_{1,\max} - f_t}{f_t} \quad (4)$$

where $\sigma_{1,\max}$ is the maximum value of maximum principle stresses, and f_t is the material tensile strength. We used just one criterion of equation (4); that is, only Mode I was assumed in all finite elements based on the experimental results in the previous section.

The calculated physical values \mathbf{p} (displacement, stress and strain) of all elements are modified by the following equations:

$$\mathbf{p}_{\text{mod}} = \frac{1}{1+r} \mathbf{p} \quad (5)$$

where \mathbf{p}_{mod} is the modified physical value. In this approach the element is fractured one-by-one, and therefore all we need do is repeat the continuum analysis with some fractured elements. Hence, the cracks propagate slowly but steadily, so that we can observe some localized fracture areas on the screen.

Numerical simulation and its discussion

The three dimensional models with a $50 \times 50 \times 2$ (long \times wide \times height) specimen is simulated. In this numerical example the Poisson's ratio ν of 0.3, Young's modulus E of $40 \pm 40 \text{ N/mm}^2$ with random manner, and the tensile strength f_t of $0.02 \pm 0.025 \text{ N/mm}^2$ with random manner are set up as the material constants. In the smeared crack model we employed the 4-node tetrahedral element, and the number of elements and nodes were 481,107 and 96,390 respectively. In advance of the calculation, we prepared two analytical models with a different β in equation (2); $\beta = 3.0$ and $\beta = -3.0$.

The crack propagation results for each case are shown in Figures 7 and 8. From these figures, we can observe that some "crack seeds" that initially occurred in the entire analytical region are interlocked with one another, and some grown-up cracks propagated locally to the various direction with increasing analytical steps.

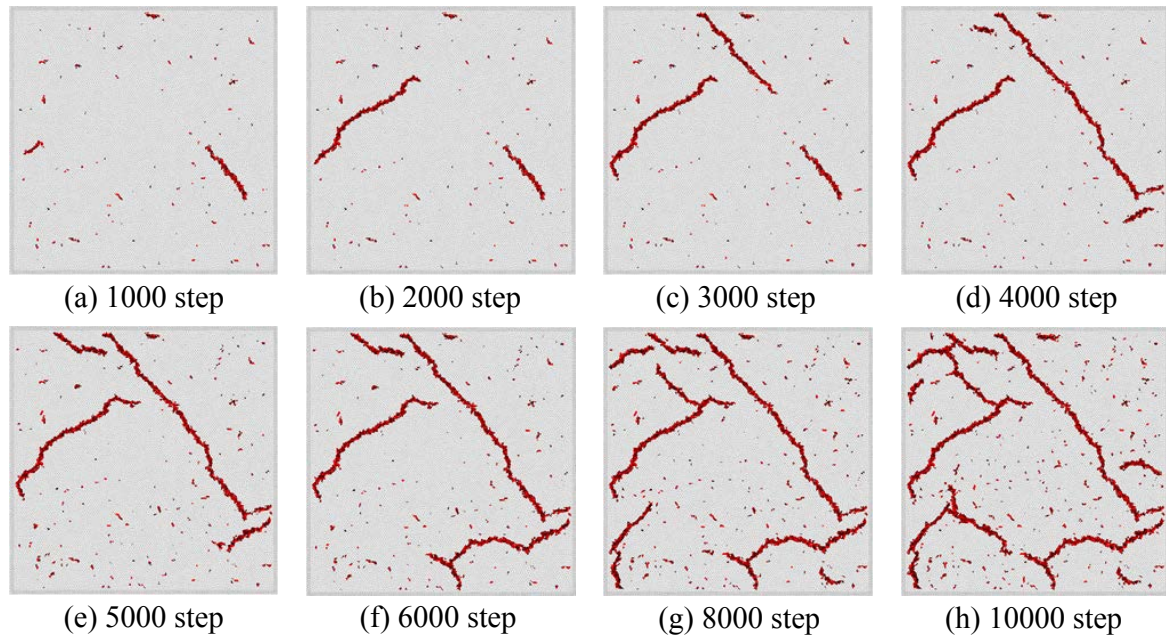


Figure 7. Crack propagation pattern ($\beta = 3.0$)

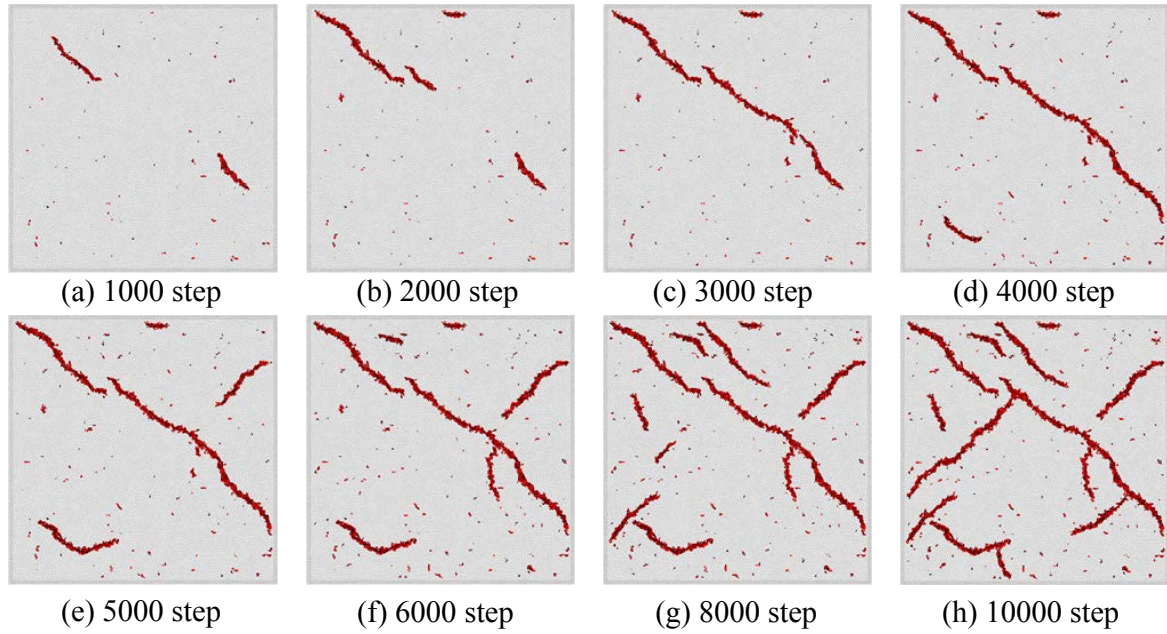


Figure 8. Crack propagation pattern ($\beta = -3.0$)

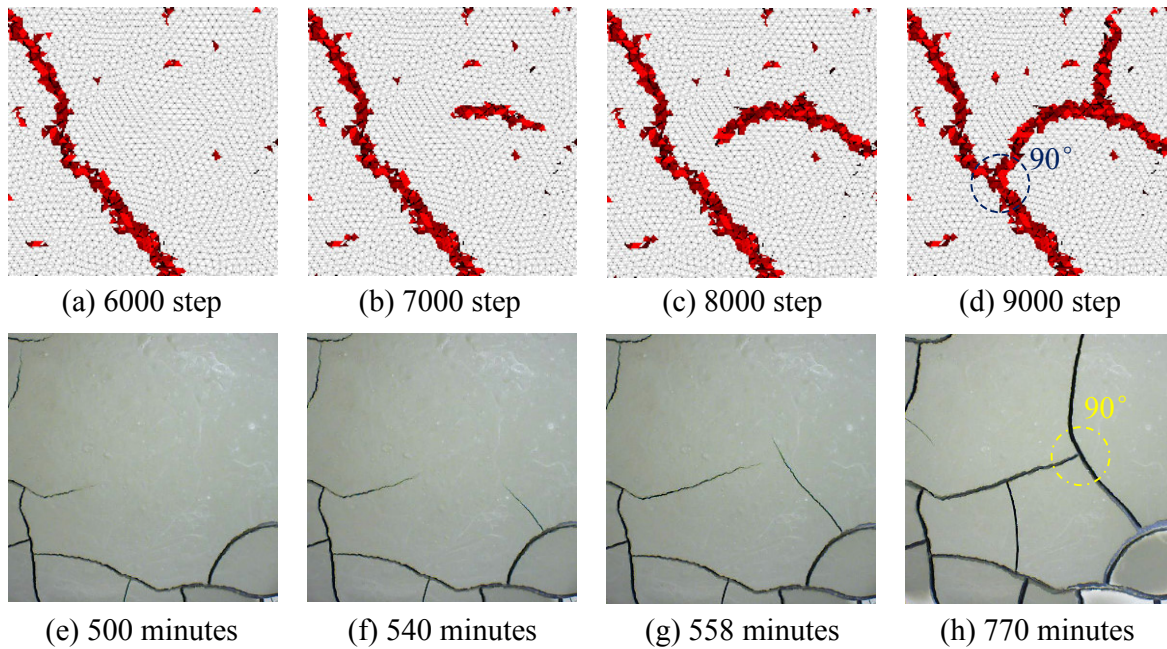


Figure 9 T-type cracking pattern ((a)-(d): Numerical, (e)-(h): Experimental)

Finally, these cracks connected each other with angles close to 90° or 120° regardless of the value of β . Also, these T- and Y-pattern joints can be seen in nature as shown in Figure 1. Figures 9 and 10 show some comparison images between numerical and experimental results for T- and Y-cracking patterns, respectively. From Figure 9, a crack propagates in direction to another crack surface, and subsequently the cracks connect each other with angle closed to 90° . On the other hand, from Figure 10, a crack branches to two cracks with angle closed to 120° .

Additionally, the cracks in the case of $\beta = 3.0$ is concentrated more than those of $\beta = -3.0$. These results indicate that many sparse cracks may be generated under the strong drying condition, whereas many dense cracks may be generated under the gentle drying condition. In

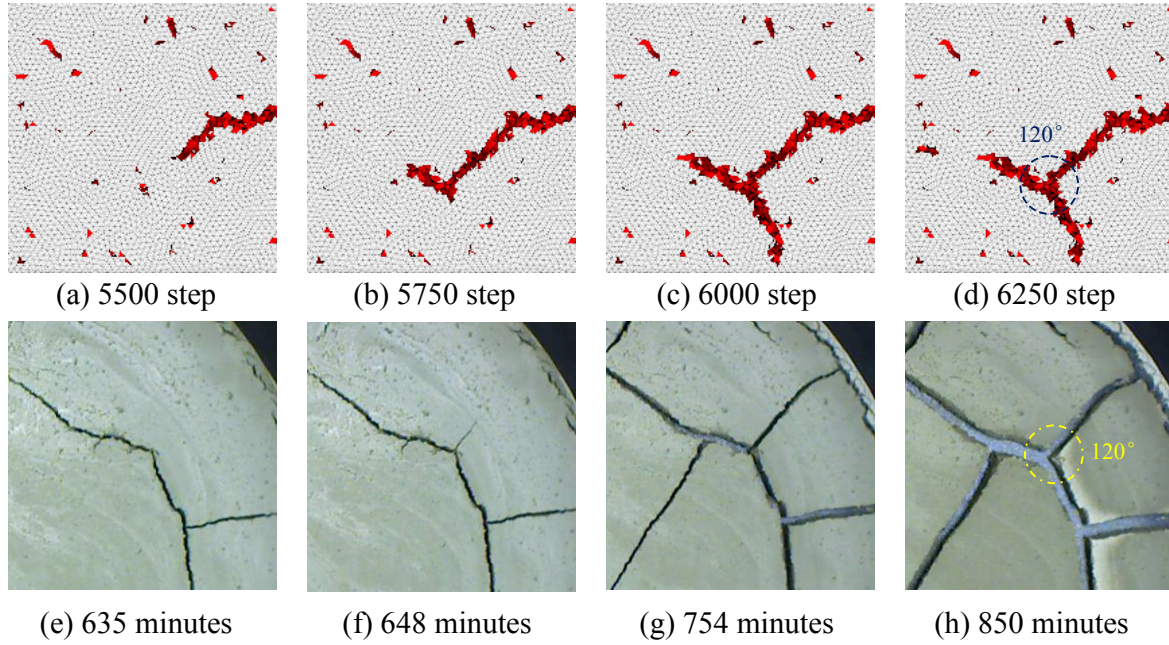


Figure 10 Y-type cracking pattern ((a)-(d): Numerical, (e)-(h): Experimental)

nature, we also observe many sparse cracking patterns and many dense cracking patterns, so that the differences may be caused by atmospheric temperature and humidity.

Figure 11 shows the relationship between fractal dimension and analytical step. The fractal geometry provided exact dimensions to morphologies that could not be quantified in Euclidean geometric analyses [28]. A fractal is generally defined as having a morphology exhibiting self-similarity, such as a coastline, rock surface or crack. Also, it is well known that pattern analysis by fractal dimension is useful for characterizing the crack propagation phenomena in wetted pastes [19] [29]. In this work, the fractal dimensions (Hausdorff dimensions, F_d) of mudcrack are determined by the box counting probability method [19]. Specifically, to calculate F_d , a digital image of the analytical objects is overlaid with boxes of side length d , and the number $N(d)$ of boxes required to cover the object is counted and plotted against d on a double-logarithmic graph. The slope of tangent to this plot is taken as the fractal dimension, F_d . That is,

$$\log(N(d)) = F_d \log(d) \quad (6)$$

In this study we assumed the following cases of d : 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 32 and 64 pixels.

From Figure 11, the fractal dimensions of numerical cracking pattern increased gradually as the analytical step increased, and they converged towards approximately 1.5, regardless of the value of β . Figures 12(a) and 12(b) show the fracture pattern and the relationship between fractal dimension and elapsed time in drying mud, respectively. In the

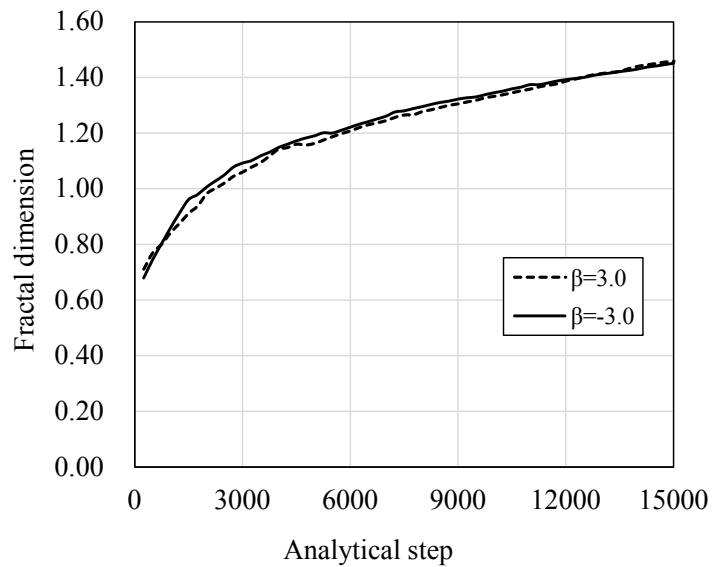


Figure 11. Fractal dimension vs Analytical steps

experiment, the sample was set in a thermostatic device for 24 hours to remove the influence of a changing temperature. In the device, the temperature and humidity were kept constant at 25 °C and 37%, respectively. From Figure 12(b), we understand that the fractal dimensions of mud-paste converged towards approximately 1.46. This tendency and the fractal dimension value is almost consistent with the numerical results in Figure 11.

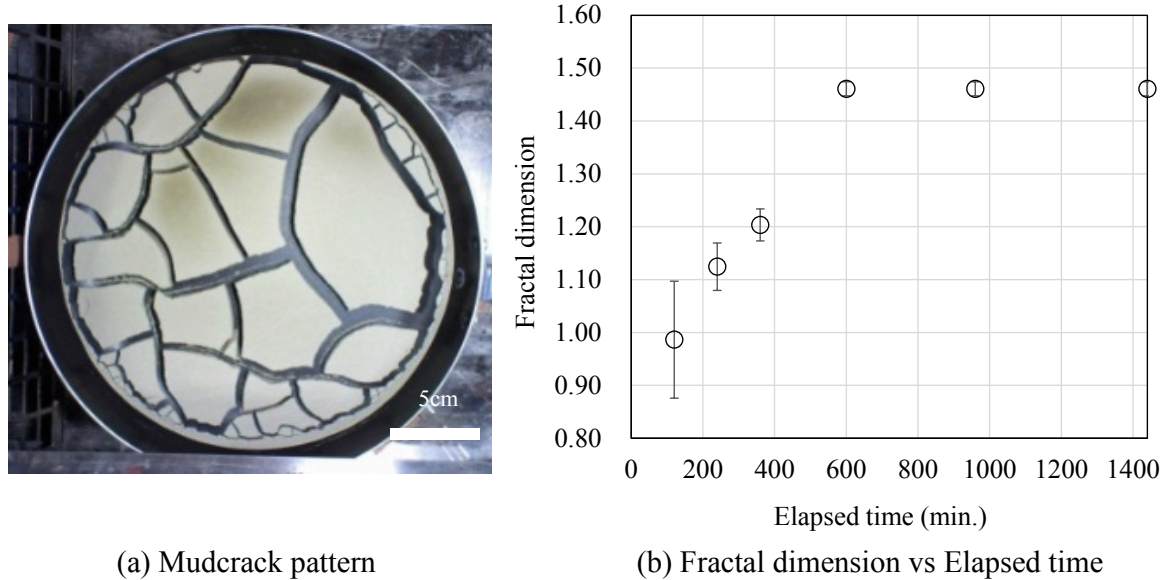


Figure 12. Change in experimental fractal dimension

Concluding remarks

The three dimensional numerical simulation for mudcrack pattern were described and validated. Our interpretation of the results is summarized as follows:

- (1) According to the Digital image correlation analyses, the cracking on mud-pastes occurs at the point of maximum principal strain, and propagates to other cracking surface with the drying process.
- (2) The simplified crack propagation algorithm is a powerful computational technique for solving the crack propagation phenomena of mud-pastes. By using this technique, we can determine the carious fracture patterns of mud-pastes.
- (3) The cracks in numerical simulations connected each other with angles close to 90° or 120°. These joint-patterns can be seen in nature.
- (4) From numerical simulation results, we found that the differences fracture pattern in nature may be caused by atmospheric temperature and humidity.
- (5) The fractal dimensions of numerical cracking pattern converged towards approximately 1.5 that was almost consistent with the experimental value of mud-paste, 1.46.

Acknowledgements

A part of this research was supported by the JSPS Grant-in-Aid for Young Scientists (B) Grant Number 26790079.

References

- [1] Zhang, Z.B., Zhou, H., Zhao, Q.G., Lin, H. and Peng, X. (2014) Characteristics of cracks in two paddy soils and their impacts on preferential flow, *Geoderma* **228-229**, 114-121.
- [2] Sletten, R.S., Hallet, B. and Fletcher, R.C. (2003) Resurfacing time of terrestrial surfaces by the formation and maturation of polygonal patterned ground, *Journal of Geophysical Research: Planets* **108**(E4), 8044.
- [3] Aydin, A. and Degraff, J.M. (1988) Evolution of polygonal fracture patterns in lava flows, *Science* **239**, 471-476.
- [4] Zhao, Z.Y., Guo, Y.R., Wang, Y., Liu, H. and Zang, Q. (2014) Growth patterns and dynamics of mud cracks at different diagenetic stages and its geological significance, *International Journal of Sediment Research*, **29**, 82-98.
- [5] Kerfoot, D.E. (1972) Thermal contraction cracks in an arctic tundra environment, *Arctic Institute of North America*, **25**(2), 142-150.
- [6] Ito, H. and Miyata, Y. (1988) Experimental study on mud crack patterns, *Journal of Geological Society of Japan*, **104**, 90-98.
- [7] Müller, G. (2001) Experimental simulation of joint morphology, *Journal of Structural Geology*, **23**(1), 45-49.
- [8] Weinberger, R. (2001) Evolution of polygonal patterns in stratified mud during desiccation: The role of flaw distribution and layer boundaries, *Geological Society of America Bulletin*, **113**(1), 20-31.
- [9] Weinberger, R. (1999) Initiation and growth of cracks during desiccation of stratified muddy sediments, *Journal of Structural Geology*, **21**, 379-386.
- [10] Müller, G. and Dahm, T. (2000) Fracture morphology of tensile cracks and rupture velocity, *Journal of geophysical research*, **105**(B1), 723-738.
- [11] Toramaru, A. and Matsumoto, T. (2004) Columnar joint morphology and cooling rate: A starch-water mixture experiment, *Journal of Geophysical Research*, **109**, B02205.
- [12] Goehring, L. and Stephen, W. M. (2006) An Experimental investigation of the scaling of columnar joints. *Physical Review E*, **74**, 036115.
- [13] Goehring, L. (2013) Evolving fracture patterns: columnar joints, mud cracks, and polygonal terrain, *Philosophical Transactions of Royal Society A*, **371**, 20120353.
- [14] Nakahara, A. and Matsuo, Y. (2005) Imprinting the memory into paste and its visualization as crack patterns in drying process, *Journal of the Physical Society of Japan*, **74**(5), 1362-1365.
- [15] Nakahara, A. and Matsuo, Y. (2006) Transition in the pattern of cracks resulting from memory effects in paste, *Physical Review E*, **74**, 045102.
- [16] Nakayama, H., Matsuo, Y., Ooshida, T. and Nakahara, A. (2013) Position control of desiccation cracks by memory effect and Faraday waves, *European Physica Journal E*, **36**, 1.
- [17] Carpinteri, A., Lacidogna, G. and Niccolini G. (2009) Fractal analysis of damage detected in concrete structural elements under loading, *Chaos, Solitons and Fractals*, **42**, 2047-2056.
- [18] Velde, B. (1999) Structure of surface cracks in soils and muds, *Geoderma* **93**, 101-124.
- [19] Baer, J.U., Kent, T.F. and Anderson, S.H. (2009) Image analysis and fractal geometry to characterize soil desiccation cracks, *Geoderma* **154**, 153-163.
- [20] Preston, S., Griffiths, B.S. and Young, I.M. (1997) An investigation into sources of soil crack heterogeneity using fractal geometry, *European Journal of Soil Science* **48**, 31-37.
- [21] DeCarlo K.F. and Shokri N. (2014) Effects of substrate on cracking patterns and dynamics in desiccating clay layers, *Water Resources Research*, **50**(4), 3039-3051.
- [22] Perret, J.S., Prasher, S.O. and Kacimov, A.R. (2003) Mass fractal dimension of soil macropores using computed tomography: from the box-counting to the cube-counting algorithm, *European Journal of Soil Science* **54**, 569-579.
- [23] Velde, B. (2001) Surface cracking and aggregate formation observed in a Rendzina soil La Touche (Vienne) France, *Geoderma* **99**, 261-276.
- [24] Nishimoto, A., Mizuguchi, T. and Kitsunozaki, S. (2007) Numerical study of drying process and columnar fracture process in granule-water mixtures, *Physical Review E*, **76**, 016102.
- [25] Michael A. Sutton, Jean-José Orteu and Hubert W. Schreier (2009) Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, Springer.
- [26] Rots, J.G. (1970) Computational modelling of concrete fracture, Ph.D. diss., *Delft University of Technology*.
- [27] Kitsunozaki, S. (2009) Crack propagation speed in the drying process paste, *Journal of the Physical Society of Japan*, **78**(6), 064801.
- [28] Mandelbrot, B.B. (1982) The fractal geometry of nature, *W.H. Freeman and Co.*
- [29] Preston, S., Griffiths, B.S. and Young, I.M. (1997) An investigation into sources of soil crack heterogeneity using fractal geometry, *European Journal of Soil Science*, **48**, 31-37.

Coupled Analysis of Electromagnetic Fields and Temperature Distributions inside the Human Body Using Microwave Therapeutic Devices

Yasuhiro Shindo

Department of Mechanical Engineering Faculty of Science and Engineering, Toyo University, Japan.

shindo060@toyo.jp

Abstract

I discuss coupled analysis of SAR distributions and temperature distributions using an anatomical simulation model reconstructed from 2D medical images. The distributions are calculated by 3D Finite Element Method (FEM) using a resonant cavity applicator for non-invasive, deep hyperthermia treatment. This applicator is made for treatment of abdominal tumors.

Some electromagnetic therapeutic devices for hyperthermia treatment are currently used in clinics. However, these applicators come with some disadvantages. The abdominal region is covered with fat tissue which is resistant to deep heat penetration. Furthermore, electromagnetic energy concentrates on the convex surfaces of the human body, such as the chests and the buttocks. However, methods capable of creating and controlling a heated area without attachments such as a bolus and loading dielectrics were insufficient.

In my previous study, I developed a new resonant cavity applicator for non-invasive hyperthermia treatment. And in these studies, in order to evaluate the effectiveness of the proposed methods, I conducted coupled analysis of specific absorption rate (SAR) distributions and the changing temperature profiles and experiment with prototype applicator. First of all, for verification and validation (V&V) of my calculation method, the thermal properties of this proposed heating method when applied to agar phantoms were calculated with computer simulations. And the experimental results were compared with the basic heating system.

After the evaluation, I constructed an anatomical 3D calculation model from 2D medical images.

Next, to evaluate the effectiveness of the proposed methods, temperature distributions were calculated by FEM with the 3D anatomical human body model.

From these results, it was confirmed that the calculated temperatures inside the agar phantoms were in close agreement with the measured temperatures with an error margin of 10% or less. Furthermore, the results with anatomical human body model suggest that the proposed heating method using electromagnetic field patterns generated inside of a resonant cavity is capable of non-invasive hyperthermia treatments.

Keywords: Coupled analysis, Anatomical human model, Resonant cavity, Electromagnetic, Temperature distribution.

Introduction

Hyperthermia treatment is based on the clinical fact that a tumor is weaker than healthy tissue at the temperature of 42-43°C and can be eliminated by a series of approximately one-hour-long heat treatments. A variety of heating methods have already been proposed to heat deep tumors.

Some examples of heating methods are radio frequency (RF) capacitive heating applicators and microwave heating applicators. Some of these applicators have been in practical use. However, all of these heating methods have some disadvantages. An entirely advantageous heating method has not yet been realized [1], [2].

Therefore, I proposed a non-invasive heating method as shown in Fig.1. In this system, a large resonant cavity with inner electrodes was used for heating deep tumors in the abdominal region of the human body[3]-[9].

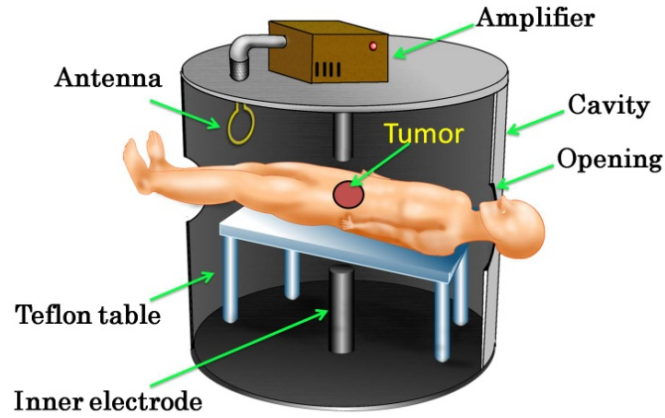


Figure 1. Illustration of the resonant cavity applicator

The human body consists of many organs that have different electrical and thermal properties and also have various shapes and sizes. Therefore, it was expected that the electromagnetic fields would concentrate on the convex parts of the human body, such as the chest and the buttocks etc.

To overcome these problems, I proposed a new heating method of using the resonant cavity applicator with cylindrical shields made of an aluminum alloy and a water bolus. In this new heating system, the human body is covered with the cylindrical shields, except for the area to be heated.

The human body is placed in the gap between the two inner electrodes. The surface of the human body is then covered with the water bolus to concentrate the electromagnetic energy on the deep-seated tumors.

Using FEM, I calculated SAR distributions of an anatomical human body model, including the bones, muscle tissue, fat tissue, lungs, liver, stomach and other internal organs.

Methods

Coupled Analysis of SAR and Temperature Distributions by 3D FEM

The SAR distribution inside the human body can be calculated by equations (1) to (4):

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (1)$$

$$k^2 = \omega^2 \epsilon \mu \quad (2)$$

$$W_h = \frac{1}{2} \sigma |E|^2 \quad (3)$$

$$SAR = \frac{1}{\rho} W_h \quad (4)$$

where E is the electric field vector, ω the radial frequency, ϵ the dielectric constant, μ the magnetic permeability, W_h the heating power generated inside a human body, σ the electrical

conductivity, and ρ the volume density of tissue. Equations (1) and (2) can be solved numerically by the FEM [6]-[11]. The electrical parameter values at 130MHz for each organ are listed in Table 1 [12]-[15].

Table 1. Identified results

Tissue	σ [S/m]	ϵ	ρ [kg/m ³]	c [J/kg/K]	κ [W/m/K]	F [ml/min/gm]	Mesh size [mm]
Air	0.0	1.00	1.165	1010	0.025	-	5.0
Bladder	0.30	21.82	1000	3553	0.53	0.31	2.0
Bone	0.18	26.21	1790	2700	0.22	0.1	3.0
Colon	0.71	76.28	1000	3012	0.38	1.24	2.0
Fat	0.036	5.91	900	2524	0.24	0.21	2.0
Heart	0.77	83.89	1000	3720	0.54	3.72	1.0
Kidney	0.86	89.14	1000	1046	0.52	4.0	1.0
Liver	0.51	63.98	1000	1050	0.51	3.17	0.5
Lung	0.0	1.00	1.165	3625	0.44	1.14	2.0
Muscle	0.72	63.36	1000	3634	0.55	0.027	1.0
Small intestine	1.70	87.50	1000	3012	0.375	2.09	2.0
Spleen	0.84	82.46	1000	3603	0.54	3.60	2.0
Stomach	0.91	74.73	1000	3553	0.53	0.53	2.0
Uterus	0.96	75.19	1000	3542	0.54	0.31	2.0
Pancreas	0.80	66.67	1000	3601	0.54	0.55	2.0
Bolus	0.0	75.00	1000	4200	0.60	-	1.0
Tumor	0.6	65.00	900	3437	0.50	0.25	0.2

Using the resulting data of SAR distributions inside a human body, the tissue temperature (T) can be calculated by equations (5) to (7) [10], [11], [16]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \kappa \cdot \nabla T + \rho \cdot SAR - W_c \quad (5)$$

$$W_c = (F\rho)_{\text{tissue}} \cdot (\rho c)_{\text{blood}} \cdot (T - T_b) \quad (6)$$

where c is the specific heat of each tissue, κ the thermal conductivity, T the temperature of tissues, t the heating time, W_c the cooling energy by blood flow, F the blood flow rate of each tissues, and T_b the temperature of blood. In this study, T_b is fixed as 37°C. The initial temperatures of each tissue set to 37°C, and that of air is 26°C. Heating time was set to 60min. Equations (1) and (5) can be solved numerically by the FEM. The thermal properties for each organ are listed in Table 1 [17]-[20].

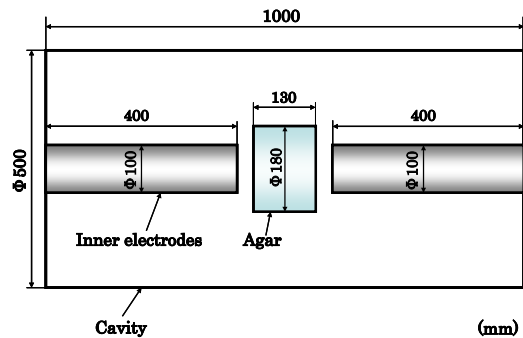


Figure 2. Cross-sectional view of the basic resonant cavity applicator

Basic Heating System

In basic evaluation, I used a basic cavity applicator shown in Fig. 2. The cavity is made of an aluminum plate, and is 500mm in diameter and 1000mm in height. To concentrate the heating energy in the center of the cavity, the inner electrodes of 100mm in diameter and 400mm in height are used. [7]

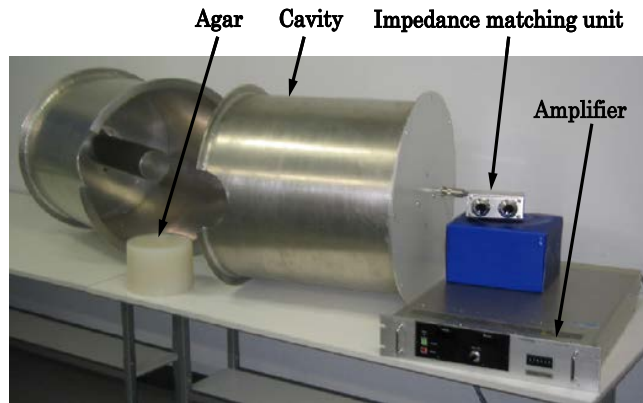


Figure 3. Setup of the heating system

Fig.3 shows a photograph of the basic heating system. It consists of a cavity, an amplifier, a looped antenna inside the cavity, and an impedance matching unit shown in Fig.3(a). The maximum input power was 150 W, and the operating frequency can be set between 50 and 400MHz. The agar phantom (agar: 4%, NaCl: 0.24%, NaN₃: 0.1 %, water: 95.66 %) used in these experiments was 13.0cm in height and 18.0cm in diameter. The impedance matching unit is connected to the cavity with coaxial cables.

Figure 4 shows the finite element mesh for calculating electromagnetic field and temperature distributions for basic evaluation. Here, JMAG-studio™ (J-SOL co.ltd, Japan) which is FEM software was used in computer simulations. In calculating the temperature distribution of agar phantom, an initial temperature was 37°C, and the heating time was set to 60min. And the agar phantom's parameter was set to same as a muscle's one.

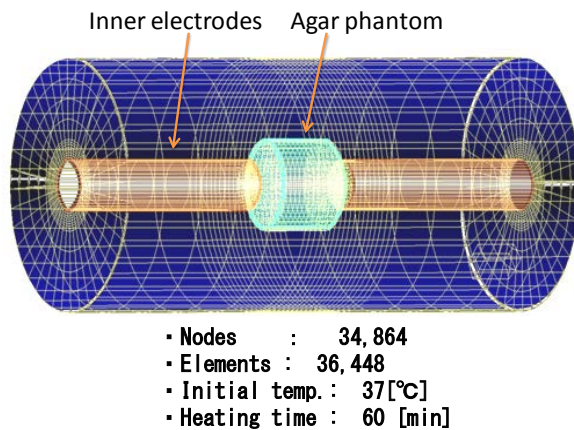


Figure 4. Finite element mesh for calculating electromagnetic field and temperature distributions

New heating system for an abdominal tumor

After the basic evaluation, I calculated the heating properties of the anatomical human body model using a large resonant cavity applicator. Figure 5 shows the large resonant cavity heating system for treating the abdominal tumors. In Fig. 5, a human body is placed in the center of the inner electrodes and is heated with the electromagnetic field

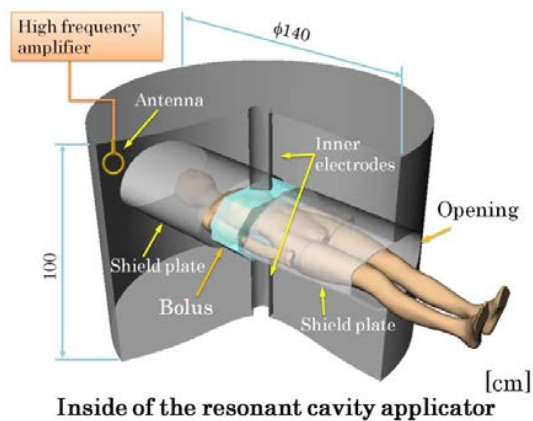
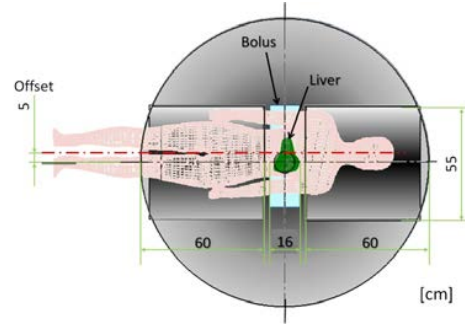


Figure 5. Illustration of the improved resonant cavity.

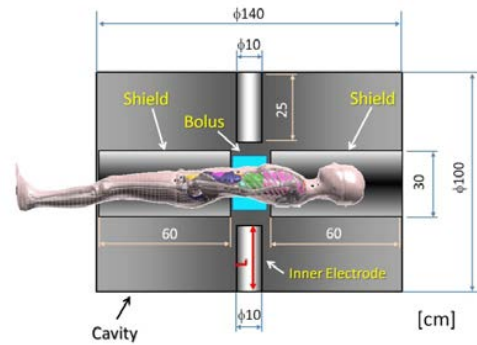
patterns which are generated inside the cavity. No contact is made between the human body and the applicator. The elliptic cylindrical shield is connected to the cavity wall.

This shield was designed to protect non-tumorous areas in the human body from the electromagnetic heating energy. In order to concentrate heating energy on deep tumors, the water bolus is set on the human body surface without contacting the applicator.

Figure 6 shows a cross-sectional view of the cavity. The cavity is 140 cm in diameter and 100 cm in height. To concentrate the heating energy in the center of the cavity, the inner electrodes are used. The upper inner electrode is 10 cm in diameter and 25 cm in height. The length of a lower inner electrode was adjustable. The ellipses (55×30 cm) are located at the head and leg regions. These allow the head and leg to rest outside of the cavity. Electromagnetic shields are 60 cm in length and are connected to the cavity wall. The water bolus, 45 cm in width, 25 cm in height and 16 cm in thickness, covers the surface of the human body. The water bolus is filled with distilled water. In order to heat the liver tumor the human body and bolus were put in a position shifted 5 cm from the center of the cavity.



(a) Top view of the improved resonant cavity.



(b) Side view of the improved resonant cavity.

Figure 6. Cross-sectional view of a resonant cavity applicator for abdominal tumors.

Reconstructing the 3D anatomical human model

Figure 7 shows the process of reconstructing the 3D human body model. The proposed reconstruction method consists of 3 steps.

The first step is to collect MRI images taken at intervals of several millimeters. In this study, the 2D images of 320 sheets were used. After that, shown in Fig.7(a), I traced the outlines of all the human tissue.

The 2nd step is to collect and combine the outlines of the all the human tissue and make solid models shown in Fig. 7(b). The commercial 3D computer-aided design (CAD) software, Rhinoceros® (Robert McNeel & Associates) was used in this study.

The last step is to create the FEM model shown in Fig.7(c). I used the commercial pre-processor, Hyper Mesh® (Altair Engineering, LTD).

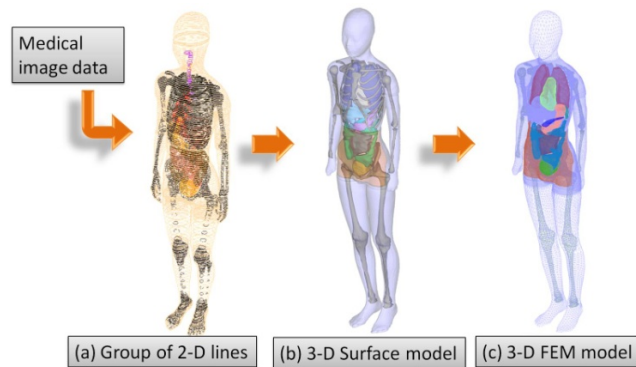


Figure 7. Process of reconstructing the 3D human body model.

The dimensions of this anatomical human model are shown in Fig. 8. This female FEM model has 14 organs. In this study, a tumor ($3 \times 4 \times 3$ cm) set in the liver is selected as the object to be heated. The dimensions of the model are 165 cm in height, and 40.5 cm in width at the shoulders. The average mesh sizes and the electrical parameter values at 130MHz for each organ are listed in Table I.

Figure 9 shows a finite element mesh for calculating the SAR distribution. This FEM model, created by the proposed method, and consisting of nonlinear elements, is included in the analysis area (250×100 cm). The total number of elements is 1,898,908. We carried out FEM analysis with the 3D model using a personal computer.

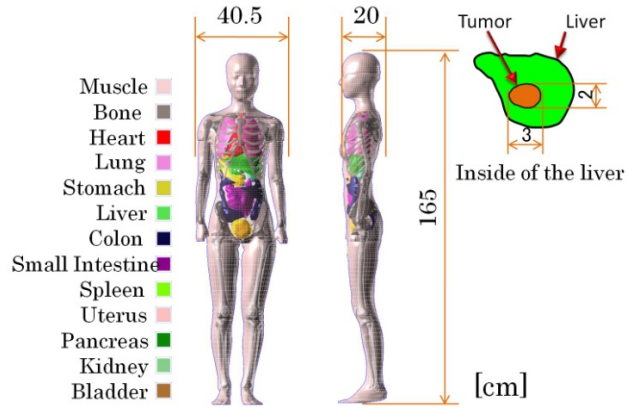


Figure 8. Dimensions of the anatomical body model.

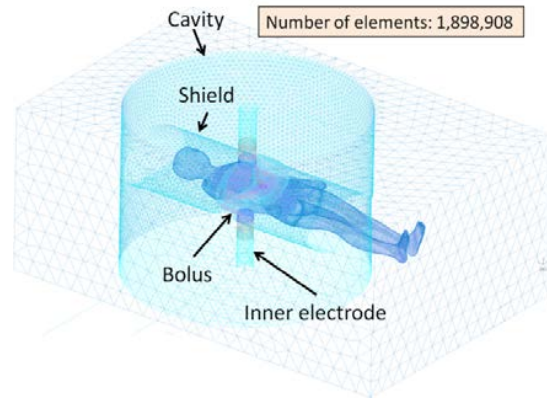


Figure 9. FEM model (Human body with the applicator)

Results and Discussions

Basic evaluation (cylindrical agar phantom)

Figure 10 shows the thermal results of the central section of the agar phantom. Fig. 10(a) is the heating result, and Fig. 10(b) is a thermal image taken by an infrared thermal camera after 60 minutes heating by the re-entrant resonant cavity. The resonant frequencies were 375.90MHz in the simulation result, and 377.55MHz in the experiment. Both of results show that the heated area of the center of the agar phantom was concentrated. From Fig. 10(b), the initial temperature of agar phantom was 22.4°C, and the center of agar phantom is heated to maximum temperature of 27.4°C (temperature increase: 5.0°C) respectively

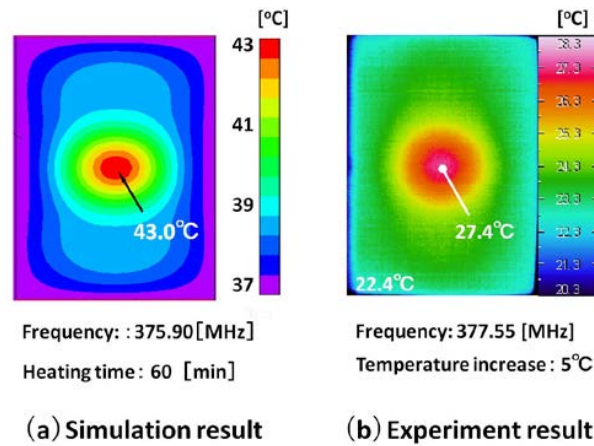


Figure 10. Temperature distributions of the central section of the cylindrical agar phantom

Fig. 11 shows the measured and estimated temperature profiles along x-axis of the both temperature results. To discuss the heating properties of our heating method in detail, the normalized temperature, T_N , is given by the following equation;

$$T_N = \frac{(T - T_0)}{(T_{max} - T_0)} \quad (7)$$

Where T_0 is the initial temperature, T_{max} is the maximum temperature inside the agar phantom. From Fig. 11, the estimated temperature agrees with the measured temperature with an error of 5% or less on x-axes at the normalized temperature 0.8.

From this comparison of computational and experimental results showed that both were well in agreement.

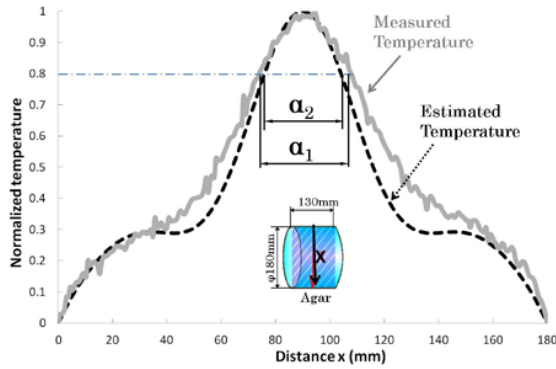


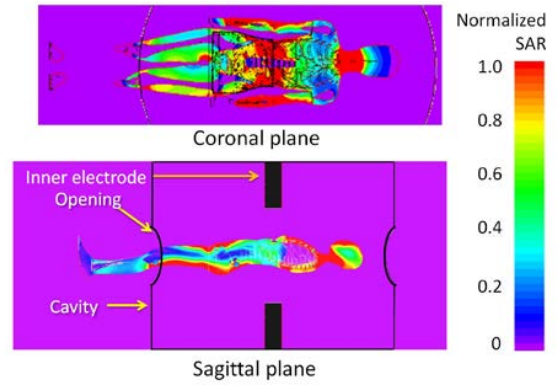
Figure 11. Temperature profiles on the X-axis

Calculation using anatomical human body model

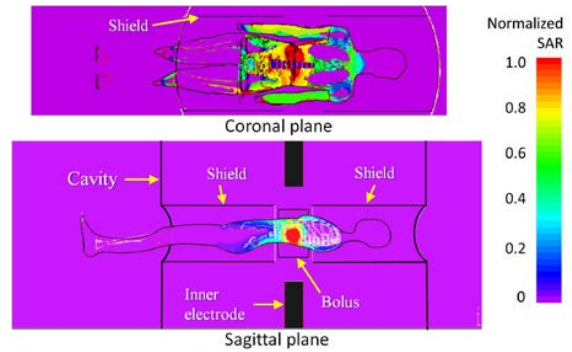
Figure 12 shows the results of normalized SAR distributions calculated by 3D FEM with two applicators, before and after the improvements. Figure 13 shows the close up view of these results. In these results, the lengths of both inner electrodes were 25cm. Figure 13(a) shows the SAR distribution with the cavity applicator before the improvement. Here, the normalized SAR is given by,

$$S_N = \frac{(S - S_{min})}{(S_{max} - S_{min})} \quad (7)$$

where S_N is the normalized SAR, S_{min} is the minimum SAR, S_{max} is the maximum SAR and S is the variable SAR in the human body. The resonant frequency was 123.0 MHz. The heating energy was concentrated on the hip and the head regions. However, in Fig. 13(b), the SAR distribution was concentrated on the selected regions with the proposed applicator. The resonant frequency was 131.5 MHz. The heating power is only concentrated on the gap between the inner electrodes.



(a) Cavity before the improvement.
(Resonant Frequency: 123.0MHz.)



(b) Improved cavity.
(Resonant Frequency: 131.5MHz.)

Figure 12. SAR distributions of side cutting plane. (when L=250mm)

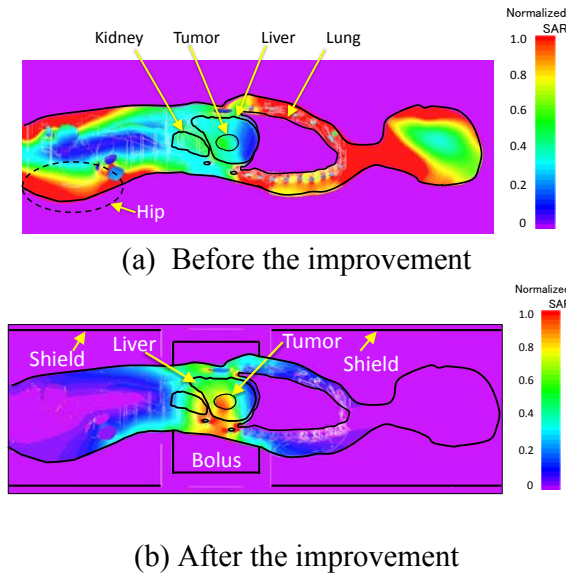


Fig. 13. Close up view of SAR distributions.

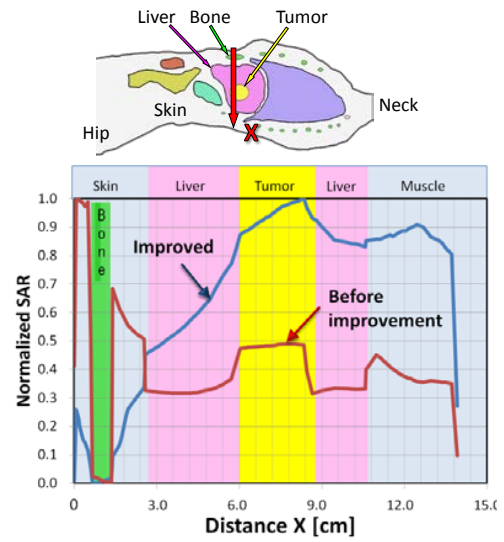


Fig. 14. Normalized SAR profiles on the X-axis.

Figure 14 shows the normalized SAR profiles along X-axis. Before the improvements, the normalized SAR value of the tumor region was half of the abdominal surface region. After the improvements, the maximum normalized SAR value is concentrated on the tumor. From these results, it was shown that the maximum heating energy was deeply concentrated on the liver tumor.

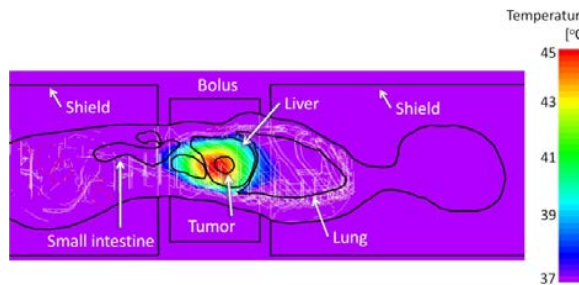


Fig. 15. Temperature distributions (Length of lower electrode: 10cm).

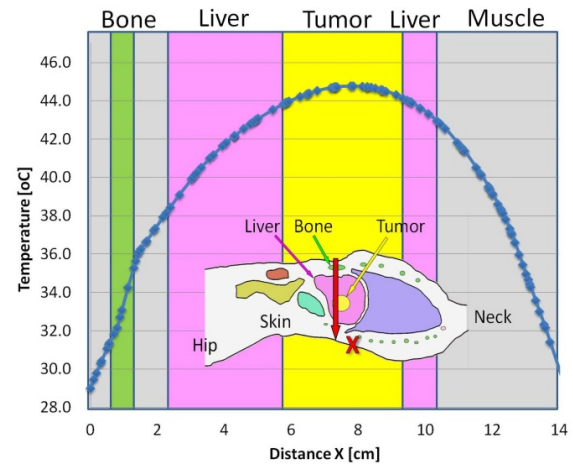


Fig. 16. Temperature profiles on the X-axis.

Fig.15 shows the results of temperature distribution when L is 10cm. From this result, it was found that the heating energy was concentrated on the targeted liver tumor. The tumor was heated to a maximum of 45°C. Coupled analysis of SAR and temperature distributions was carried out. From Fig.15, the maximum temperature inside the targeted liver tumor was 45°C. The surface of the human body was kept cool by the water bolus, which was set at a fixed temperature of 28°C.

As seen in Fig. 16, the temperature distribution results show that the tumor region was heated to a maximum of 45°C, whole of which is well over the minimum requirement for effective hyperthermia treatment (42-43°C).

From these calculations, it was shown that the improved applicator can be effective in heating targeted regions for hyperthermia treatment.

Conclusions

This paper shows the results of coupled analysis of SAR distributions and temperature distributions using an anatomical simulation model reconstructed from 2D medical images.

First of all, in order to show the validity of the proposed calculating method, the temperature distribution of agar phantom was estimated by the FEM. Based on the computer simulation results, the computer simulation and the experimental heating results were discussed. The comparison of computational and experimental results showed that both were well in agreement.

And I evaluate the improved large resonant cavity applicator for non-invasively hyperthermia treatment of deeply seated abdominal tumor. The proposed heating system was designed to protect healthy tissue from concentrated electromagnetic fields.

From SAR distributions, the electromagnetic energy was concentrated on the targeted liver tumor. Furthermore, it was found that the heating energy of the backside region can be eased by adjusting the length of the lower electrode.

And from the estimated temperature distribution, the liver tumor was able to be heated over 43°C using the improved applicator. It was confirmed that the improved heating system was able to non-invasively heat abdominal deep tumors.

References

- [1] Crandall CG, Brothers RM, Zhang R, “Human Cerebral Perfusion Is Reduced During Passive Heat Stress, Comments on Point: Counterpoint: Humans do/do not demonstrate selective brain cooling during hyperthermia”, *Appl Physiol*, 2010.
- [2] Mathew D White, Jesse Greiner and Patrick L. McDonald, Point, “Humans do demonstrate selective brain cooling during hyperthermia”, *Journal of Applied Physiology* vol. 110, No. 2, pp. 569-571, 2011.
- [3] Y. Shindo, K. Kato, K. Tsuchiya, T. Yabuhara, T. Shigihara, R. Iwazaki, T. Uzuka, H. Takahashi, Y. Fujii, “Heating Properties of Re-entrant Resonant Applicator for Brain Tumor by Electromagnetic Heating Modes”, *Proc. Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* 2007, pp. 3609-3612, 2007.
- [4] E.Morita, K.Kato, Y.Shindo *et al.*, “Heating Properties of Non-invasive Hyperthermia Treatment for Abdominal Deep Tumors by 3-D FEM”, *Proc. of the IEEE EMBC 2009*, pp.3389-3392, 2009.
- [5] K. Yokoyama, K. Kato, W. Igarashi, Y. Shindo, M. Kubo, H. Takahashi, T. Uzuka, Y. Fujii, “Heating properties of a new hyperthermia system for deep tumors without contact”, *Proc. Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* 2011, pp. 310-313, 2011.
- [6] Y. Shindo, Y. Iseki, K. Yokoyama, J. Arakawa, K. Watanabe, K. Kato, M. Kubo, T. Uzuka, H. Takahashi, “SAR Analysis of the Improved Resonant Cavity Applicator with Electrical Shield and Water Bolus for Deep Tumors by a 3-D FEM”, *Proc. 34th IEEE EMBS Ann Int Conf, San diego*, pp. 5679-5682, 2012.
- [7] T. Yabuhara, K. Kato, Y. Kanazawa, M. Kubo, H. Takahashi, T. Uzuka, Y. Fujii, “Finite element analysis of the needle type applicator made of shape memory alloy”, *Proc. 30 IEEE EMBS Ann Int Conf, Vancouver*, pp. 4364-4367, 2008
- [8] Kubo M.,Mimoto N.,Kanazawa Y.,Shindo Y.,Kazuo K.,Takahashi H.,Uzuka T.,Fujii Y.: Heating properties of needle applicator made of shape memory alloy for brain tumor hyperthermia. *Thermal Med*, 25: 71-80, 2009.
- [9] Y. Iseki, Y. Shindo, M. Kubo, K. Watanabe, J. Arakawa1, H. Takahashi, T. Uzuka and K. Kato “Heating Control Method for Resonant Cavity Applicator Using Divided Type of Dielectric Bolus for Effective Hyperthermia Treatment”, *Proc of 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1122-1126, 2013.
- [10] Y. Shindo, Y. Iseki, K. Nakanne, N. Mimoto, M. Kubo, K. Kato *etal.* , “A Support System in Virtual Reality for Effective Hyperthermia Treatments: Heating Properties of Needle Applicator for Brain Tumors”, *Thermal Medicine*, Vol. 27, No. 3, pp. 79-87, 2011.

- [11] Y. Shindo, K. Shibafuji, Y. Iseki, K. Kato, H. Watanabe, T. Uzuka, A. Takeuchi, "Development of Coaxial Needle Applicator Made of Shape Memory Alloy" *Thermal Medicine*, Vol. 30, No. 3, pp. 27-40, 2014.
- [12] C. Gabriel, "Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies", *King's College London Department of Physics*, pp. 1-15, 1996.
- [13] C. Gabriel, S. Gabriel, E. Corthout, "The dielectric properties of biological tissues literature survey", *Physics in Medicine and Biology*, vol. 41, pp. 2231-2249, 1996.
- [14] S. Gabriel, W. Lau, C. Gabriel, "The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz". *Physics in Medicine and Biology*, vol. 41, pp. 2251-2269, 1996.
- [15] S. Gabriel, W. Lau, C. Gabriel, "The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues". *Physics in Medicine and Biology*, vol. 41, pp. 2271-2293, 1996.
- [16] Jens Lang, Bodo Erdmann, Martin Seebass, "Impact of Nonlinear Heat Transfer on Temperature Control in Regional Hyperthermia", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 46, No. 9, 1999.
- [17] Kenneth R. Holmes "Thermal properties.", pp.1-14, 2009. <http://users.ece.utexas.edu/~valvano/research/Thermal.pdf>
- [18] J.W. Valvano, J. R. Cochran K. R. Diller, "Thermal Conductivity and Diffusivity of Biomaterials Measured with Self-Heated Thermistors", *Journal of Thermo Physics*, 6 (3), pp. 301-311, 1985.
- [19] Koehler, RC, RJ Traystman and MD Jones, Jr. "Regional blood flow and O₂ transport during hypoxic and CO hypoxia in neonatal and adult sheep". *Am. J. Physiol.*, 248, pp. 118-124, 1985.
- [20] Bodo Erdmann, Jans Lang, Martin Seebass, "Adaptive Solutions of Nonlinear Parabolic Equations with Application to Hyperthermia Treatments", *ICHMT DIGITAL LIBRARY ONLINE*. Begel House Inc., pp. 1-9, 1997.

Hybrid Geometry/Material Monitoring Method for Microcrack Identification

Tomonari Furukawa¹

¹Department of Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA

¹Corresponding author: tomonari@vt.edu

Keywords: Microcrack identification, Hybrid method

Introduction

The aim of this project is to establish a novel theoretical and experimental methodology that detects and localizes defects up to microscopic level. The growth and propagation of a crack, which has caused various catastrophic failures to aeronautical and aerospace structures, is rooted in the nucleation and growth of microcracks and their coalescence that results in forming a crack. Due to the inability of the existing methods in identifying defects at microscopic level, structures are traditionally designed with large margins of safety. If the structure can be rehabilitated before any visible signs of deterioration develop, the durability, reliability and survivability of the structure could significantly improve while allowing flexible design with low factor of safety. To date, the majority of structural health monitoring (SHM) methods identify defects using a single sensor with high-frequency wave analysis capability although return signals of such wave may not capture small defects due to the smallness of geometrical irregularities. Recent years have seen the use of multiple sensors accordingly where significant improvement has been made, but the accuracy is limited by the capability of sensors regardless of the number of sensors. This project uniquely adds theoretical and experimental solutions to the current sensor network setup and sees the possibility of identifying up to microcracks, which none of the existing methods can do.

The original contributions of the methodology proposed in the project that guarantees its superiority to the existing methods lie in the following new theoretical and experimental advances of science and technology:

- *Hybrid geometry irregularity and material degradation monitoring:* In addition to the geometrical irregularity measurement from high-frequency wave signals, the proposed methodology detects and localizes defects by material degradation using low-frequency loading signal. The previous work of the investigators experimentally verified that the area at which microcracks grow exhibits more strain variation under a static loading. The material degradation analysis from the displacement and strain field measurement could detect defects that the existing methods measuring geometrical irregularity are incapable of.
- *Three types of sensor network:* The geometrical irregularity and the material degradation are both measured by a network of piezoelectric (PZT) sensors and a network of piezoresistive strain gauges. The material degradation is additionally measured by a network of digital cameras and a numerical technique that extracts displacement and strain field from the camera images. The sensors have trade-offs in accuracy and field-of-view (FoV). The use of multiple types of sensors will maintain accuracy and area of coverage simultaneously.

- *Probabilistic multi-sensor observation fusion*: The multi-sensor data fusion proposed in this project fuses the locations of defects estimated by all sensors and means in terms of not scalar quantities but observation likelihoods unlike the existing deterministic sensor fusion methods. The probabilistic fusion that enables the identification in the framework of recursive Bayesian estimation (RBE) allows the uncertainty to be taken into account and thus makes the identification more reliable.
- *Element-based RBE*: The observation of defects outside the FoVs of sensors can still influence the identification if it is treated as a negative observation likelihood. Since the negative observation likelihood could however make the belief heavily non-Gaussian, the proposed methodology will extensively use the element-based method developed by the investigators for non-Gaussian RBE. The element-based method will show advantages over the other non-Gaussian RBE methods such as the grid-based method and the particle filters for defect identification as it can represent the belief over the solid structure with high-fidelity shape functions.
- *Belief fusion*: The belief fusion enables the identification of defects only by measuring geometrical irregularity or material degradation while the hybrid identification is performed. This allows the traditional defect identification in the same framework and thus sees the improvement by the direct comparison.

The project has been aimed at proving the concept of the proposed hybrid geometry/material monitoring method. More specifically, the proposed method for the proof-of-concept uses a PZT transducer to identify the geometrical irregularities caused by a defect whereas an industrial CCD camera and the Dot Centroid Tracking (DCT) method are used to identify the material degradation. In order to experimentally validate its efficacy, the proposed method was applied to the measurement of geometrical irregularity and material degradation of three specimens each made of a different material. These materials identify geometrical irregularity and material degradation at different amplitudes.

The paper is organized as follows. The next section introduces the basics of the optical method or the camera-based method that includes the DCT method whereas the vibration method including a technique with a PZT transducer and the high-frequency wave analysis is described in the third section. The fourth section presents the proposed method, and the capability of the proposed method is experimentally investigated in the fifth section. The final section summarizes the conclusions made in the first-year effort.

1 Optical method

One of the key concepts of the proposed hybrid method is to measure material degradation by using an optical sensor such as a digital camera. A popular sensor used to measure the strain has been the strain gauge. While it measures even highly sensitive strain very accurately as a contact sensor, the strain gauge is not suited for the measurement of material degradation. Firstly, it is limited to the measurement at a point, so that the field strain cannot be extracted unless a number of strain gauges have been glued to the field of interest, which is highly cumbersome. Further, a strain gauge measures only longitudinal strain, so the measurement of shear strain requires at least two strain gauges at a point.

Meanwhile, an optical method has received significant attention as a non-contact displacement and strain field measurement technique in the last couple of decades. These include the holography [9], the speckle interferometry [10], the speckle photography [2], the pure grid method [17, 19], the digital image correlation (DIC) method [3, 20], and the DCT method [1]. Among

these, the camera-based techniques including the pure grid method, the DIC method and the DCT method, become the lowest-cost solutions in both cost and effort. Out of the camera-based methods, the dot centroid tracking (DCT) method, in part developed by the investigators, has been found to achieve the best accuracy and speed provided that the system is properly set up.

1.1 Theory

Figure 1 illustrates the concept and function of the DCT method. The specimen in the figure is supposed to unexpectedly have a defect invisible from the front side. Both the upper and side views do not see the defect as shown in the figure. The DCT method prepares the specimen with a number of dots marked on its surface to measure the strain field. When a camera observes the specimen under a tensile force in the y direction, the location of each dot changes differently due to the deformation of the specimen; dots on the thin part of the specimen exhibits larger displacement than the dots on the thick part. Since the strain is given by the first derivative of the displacement, the extraction of the strain field sensitively identifies the existence, the location and the geometry of the defect.

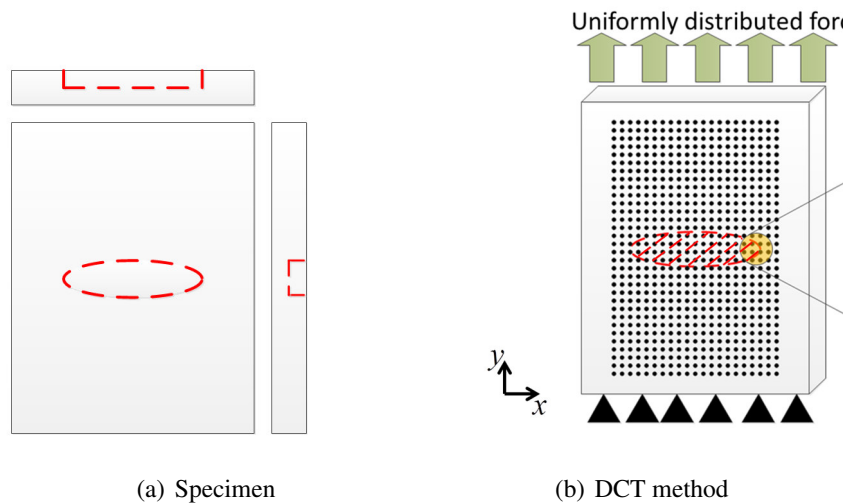


Figure 1: (a) Illustration of invisible crack from the front side, (b) After applying tensile force in y -direction, full strain field is measured by meshless method. Dashed line circles represent location of dots on the undeformed material surface. Black dots represent location of dots on the deformed material surface.

Figure 2 is a simulation result by using a commercial finite element analysis tool to illustratively understand the concept. Figure 2(a) shows the front view of a specimen, Figure 2(b) shows the back view of the specimen, which sees multiple circular defects, and Figure 2(c) shows strain fields of the front and back sides after a tensile force in the y direction is applied to the specimen. Clearly the existence, the location and the geometry of the defects can be found from the front view though the defects are not visible from the front side.

Figure 3 visually explains the procedure to identify invisible defects using the DCT method. First the front surface of the specimen with invisible defects is marked with dots. A mechanical

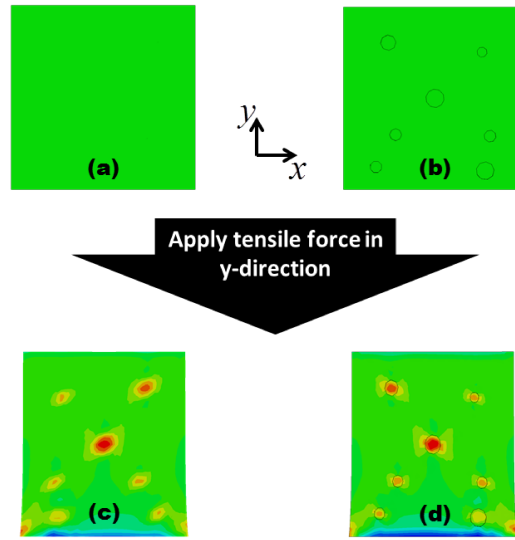


Figure 2: Result of simulation of full strain field measurement of defected specimen. (a) and (b) show front and back view of defected specimen before applying tensile force. (c) and (d) show full strain measurement after applying tensile force in y-direction.

load is then provided by a loader. By measuring a strain field using the DCT method, the existence, location and geometry of the defects can be identified from the front view.

Having understood the concept of defect identification through the strain field measurement, the next section will validate the effectiveness of the proposed material degradation measurement method by presenting experimental results.

1.2 Result

The effectiveness of the proposed material degradation measurement method was investigated with a specimen with an artificial defect. The specimen was an aluminum plate with a circular hole. Table 1 shows the parameters of the specimen. The front side of each specimen was marked with dots as shown in Figure 1.5. Figure 1.4 shows the configuration of experimental

Table 1: Mechanical properties of the aluminum specimen

Properties	Aluminum (at 25 °C)
Poisson Ration	0.33
Density(kg/m^3)	2710
Elastic Modulus(GPa)	69
Tensile Strength(MPa)	110
Yield Strength(MPa)	105

systems. Using uniformed light source, effect of light noise becomes minimized (Figure 1.4).

Figure 1.6 shows the strain fields ($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_{xy}$) identified by the DCT method. The irregular distribution around the circular hole shows the existence of the defect in the specimen clearly.

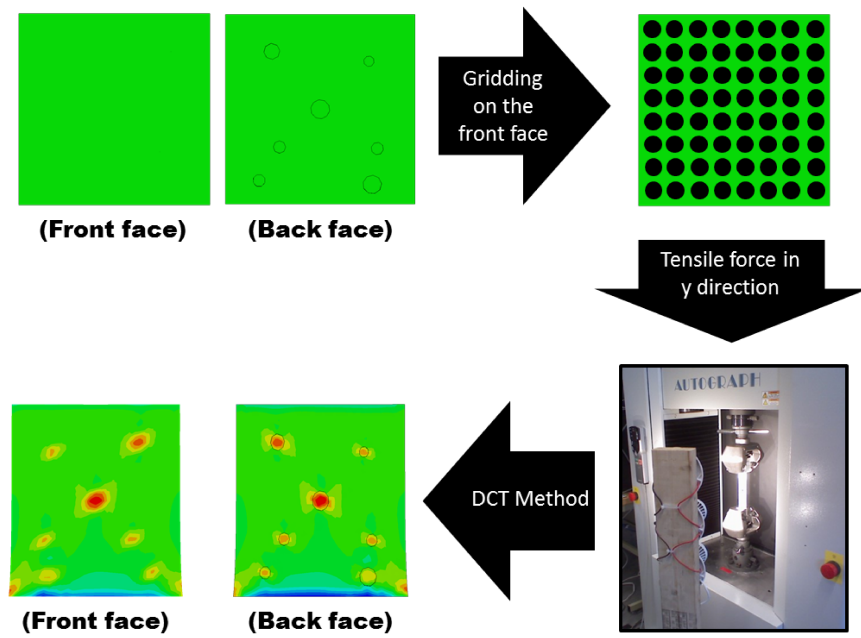


Figure 3: Procedure of full strain field measurement using DCT

2 Vibration method

Vibration methods estimate the damage by comparing the structural dynamic response (obtained by analyzing signals from transducers) with referencing baseline signals (collected from a benchmark structure supposed to be damage-free). They can be classified into active methods and passive methods based on whether the vibration is actively controlled. In active methods, the structure can be excited in an array of vibration actuators. The proposed geometrical irregularity measurement method uses piezoelectric transducers (PZT) as a vibration actuator and measures return signals of waves propagated over the structure. In the following subsections, the theory of surface waves generated by the PZT will be introduced, and the analytical solution to waves on a plate will be further formulated.

2.1 Lamb Wave

This section will introduce an important class of waves for SHM, which are guided waves. Since guided waves can travel at large distances in structures without much dissipation of energy, it can be a good candidate for SHM usage. Especially, guided waves is good for thin plate specimens. These properties allow them to apply to the ultrasonic inspection of aircraft, missiles, pressure vessels, oil tanks, pipelines, etc. In this project, lamb waves are chosen among several guided waves. Through advances in various related disciplines over the past two decades, there have been a number of studies for developing damage identification techniques using Lamb waves[13, 6, 21]. Through intensive research in this area, Lamb waves have shown their excellent properties for cost effective damage identification. Lamb waves are widely used acoustic-ultrasonic guided waves for damage identification[11].

2.1.1 Theory of Lamb Wave

Using simple plane structure such as isotropic plate, we can understand how the Lamb wave propagate in the structure. In a thin isotropic and homogeneous plate as shown in Figure 2.7,

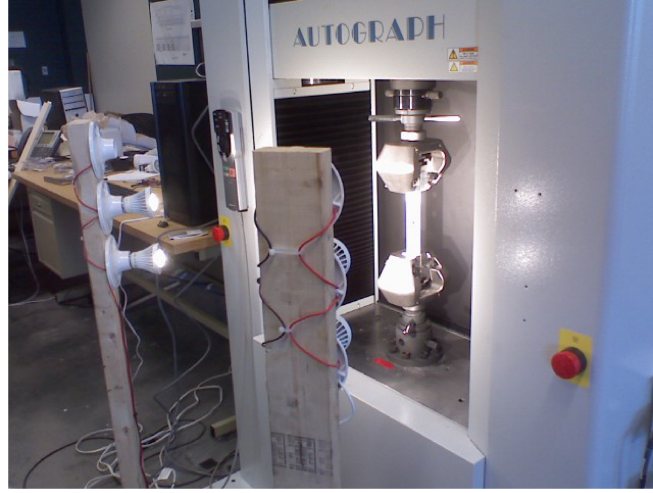


Figure 4: Experiment set-up

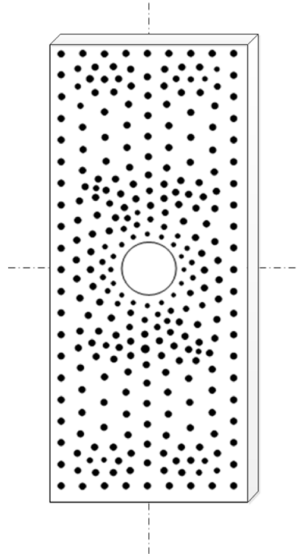


Figure 5: Illustration of dot pattern

the waves can generally be described in a form of Cartesian tensor notation as

$$\mu \cdot u_{i,jj} + (\lambda + \mu) \cdot u_{j,ji} + \rho \cdot f_i = \rho \cdot \ddot{u}_i \quad (1)$$

where u_i and f_i are the displacement and body force in the x_i direction, respectively. ρ , μ , and λ are density, shear modulus of the plate, and Lamé constant, respectively[7]. The displacement potential approach based on Helmholtz decomposition is an efficient approach to decompose Equation 1 into two uncoupled parts with the condition of plane strain,

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_2^2} = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2^2} = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}, \quad (3)$$

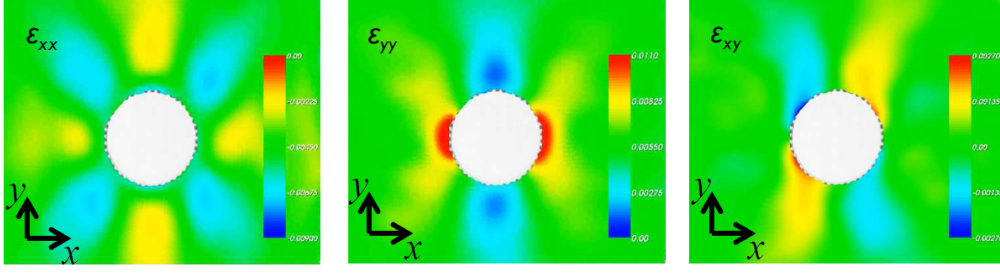


Figure 6: Full strain field measurement

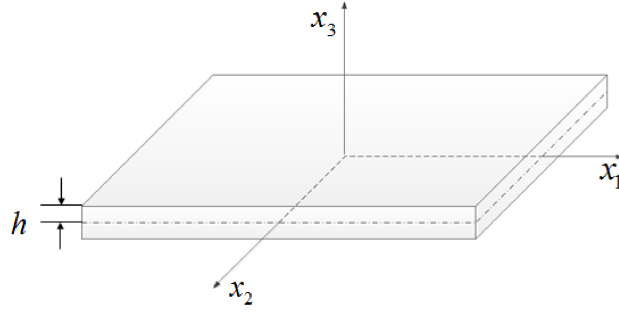


Figure 7

where

$$\phi = [A \sin(px_3) + B \cos(px_3)] \cdot e^{i(\kappa x_1 - \omega t)}, \quad (4)$$

$$\psi = [C \sin(qx_3) + D \cos(qx_3)] \cdot e^{i(\kappa x_1 - \omega t)}, \quad (5)$$

where A, B, C and D are four constants determined by the boundary conditions.

$$p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - \kappa^2, \quad q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - \kappa^2, \quad \kappa = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (6)$$

where κ, λ , and ω , and are wavenumber, wavelength, and angular velocity, respectively. c_L and c_T are the velocity of longitudinal and transverse modes, which are defined by

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (7)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}, \quad (8)$$

where E denotes elastic modulus, so-called the Young's modulus, $E = 2\mu(1+\nu)$. They are reduced to

$$c_L = \sqrt{\frac{2\mu(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)}}, \quad (9)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (10)$$

Even though there are many modes simultaneously between the upper and lower surfaces of the plate, a well behaved guided wave leads all the modes. Under the plain strain assumption, the displacement can be reduced to

$$u_1 = \frac{\partial \phi}{\partial x_1} + \frac{\partial \psi}{\partial x_3}, \quad (11)$$

$$u_2 = 0, \quad (12)$$

$$u_3 = \frac{\partial \phi}{\partial x_3} - \frac{\partial \psi}{\partial x_1}. \quad (13)$$

In addition, stress are expressed as

$$\sigma_{31} = \mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1 \partial x_3} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} \right), \quad (14)$$

$$\sigma_{33} = \mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_3^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_3^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1 \partial x_3} \right). \quad (15)$$

Since the geometry of thin plate has the following boundary conditions,

$$u(x, t) = u_0(x, t) \quad (16)$$

$$t_i = \sigma_{ij} n_j \quad (17)$$

$$\sigma_{31} = \sigma_{33} = 0 \quad \text{at} \quad x_3 = \pm \frac{d}{2} = \pm h, \quad (18)$$

the general solution of Lamb wave is expressed as

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = \frac{4\kappa^2 qp\mu}{(\lambda\kappa^2 + \lambda p^2 + 2\mu p^2)(\kappa^2 - q^2)}. \quad (19)$$

Equation 19 can be separated into symmetric part and anti-symmetric part by substituting Equation 6 into this solution.

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4\kappa^2 qp}{(\kappa^2 - q^2)^2} \quad (20)$$

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(\kappa^2 - q^2)^2}{4\kappa^2 qp}. \quad (21)$$

In addition, the speed of wave propagation is characterized into phase velocity and group velocity like,

$$c_p = \left(\frac{\omega}{2\pi} \right) \cdot \lambda, \quad (22)$$

$$c_g(f \cdot d) = \frac{c_p^2}{c_p - (f \cdot d) \frac{dc_p}{d(f \cdot d)}}, \quad (23)$$

where c_p is phase velocity and c_g is group velocity.

2.1.2 Tone burst

The wave dispersion phenomenon is most readily demonstrated during the study of the propagation of narrow band frequency wave packets, known as tone bursts. When used as a diagnostic wave, a Lamb wave mode's cycle number, frequency, and magnitude are important features that

can improve the capability of damage identification, at least to a certain extent. Previous experiments using Lamb wave modes at different frequencies in plates show that a narrow bandwidth signal with a certain number of cycles can significantly prevent wave dispersion. For that reason, windowed tone bursts, rather than a single pulse or simple sinusoidal signals, are used much more often to activate diagnostic wave signals in practice, although a pulse signal may offer higher and more concentrated incident energy. Windowing techniques are used to narrow the bandwidth of a selected Lamb mode. The Hanning window is the most widely adopted window function, defined as

$$h(n) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(2\pi \frac{n}{N-1}\right) \right], \quad (n = 1, 2, \dots, N), \quad (24)$$

where h is discretized using N sampling points. Figure 2.8 and Figure 2.9 show how the

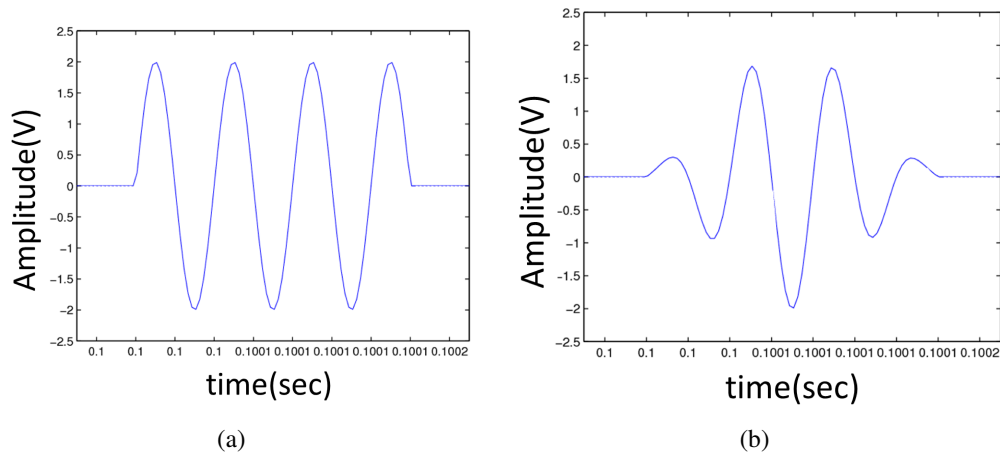


Figure 8: Comparison of original sinusoid (a) and hanning window filtered wave (b)

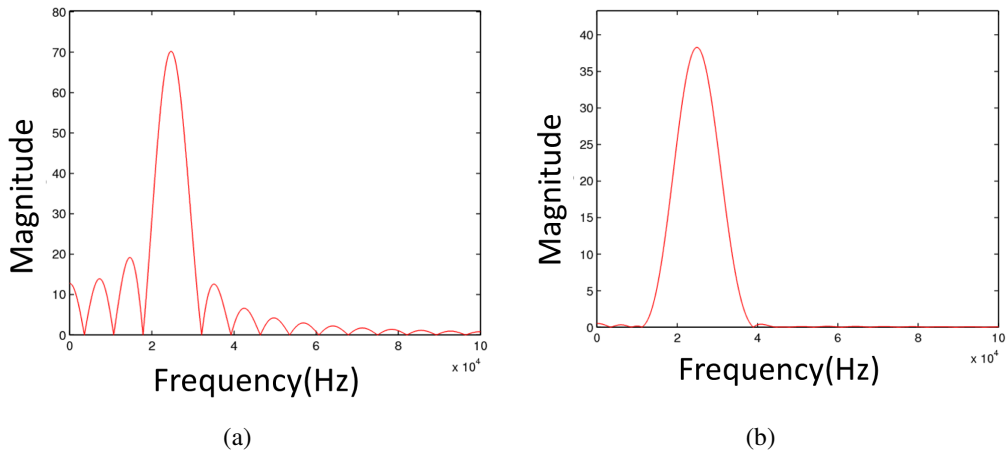


Figure 9: FFT comparison of original sinusoid (a) and hanning window filtered wave (b)

application of windowing function generates a given 3.5 cycles sinusoidal signal to tone burst signal in both time domain and frequency domain.

2.2 Result

To generate Lamb waves, Data Acquisition (DAQ) board in a personal computer is used with 1MHz sampling rate Digital Analog Convertor (DAC) It is amplified by a charge mode amplifier circuit board (Voltage range is from $-15V$ to $15V$), and then amplified voltage apply to PZT cemented on a specimen. Using matlab code, frequency and amplitude can be controlled. The excitation signals has 3.5 cycles for generating higher dispersive Lamb wave and sent to 2 PZT actuators on the specimen. To measure the reflected wave, 2 PZTs are used as sensors and they are connected to ADC of DAQ board. Matlab code can display and analyze the received data through DAQ board. Figure 2.10 shows picture of PZT used in this project and Table 2

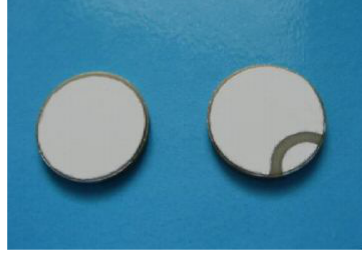


Figure 10: Picture of piezoelectric sensor/actuator

shows mechanical properties of PZT. To transfer and receive a wave of the specimen plate, these PZTs should be assembled perfectly with an adhesion. Figure 2.11 displays the architecture of PZT system. Figure 2.12 illustrates how PZTs are used for structural health monitoring. Once

Table 2: Properties of Piezoelectric Ceramic Transducer

Piezoelectric Ceramic Transducer	
Material	SM411
Dimension	7mm diameter x 0.5mm thickness
Resonant Freq	300kHz \pm 10kHz
Static capacitance	1400 pF \pm 15% @ 1kHz

PZT actuators generate specified signals, those signals will be propagated along the specimen. However, if there are cracks, holes, or abnormalities, the propagated signals will be attenuated scattered to ambiguous direction. It makes PZT receivers detect differences between health materials and unhealth materials. There are many methods to analyze those received signal to find exact location of defects, and there is no exact solution to defect identification by using PZTs.

Figure 2.13 shows how PZTs are assembled on the aluminum specimen. PZT transmitter is connected to amplifier which is to amplify the tone burst signal coming from DAQ board in computer. PZT receiver is connected to DAQ board directly to measure the propagated wave from the transmitter along the specimen. Figure 2.14 plots the transmitted and received signal from PZTs. To measure time of flight, difference in time, Δt between first peaks of each waves, which is $14\mu sec$.

$$v_{wave} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \nu^2)}} \quad (25)$$

where v_{wave} is velocity of wave inside of material, E is elastic modulus, ρ is density of material, and ν is poisson's ration of material. Substituting the parameters of the table 3 into Equation 25,

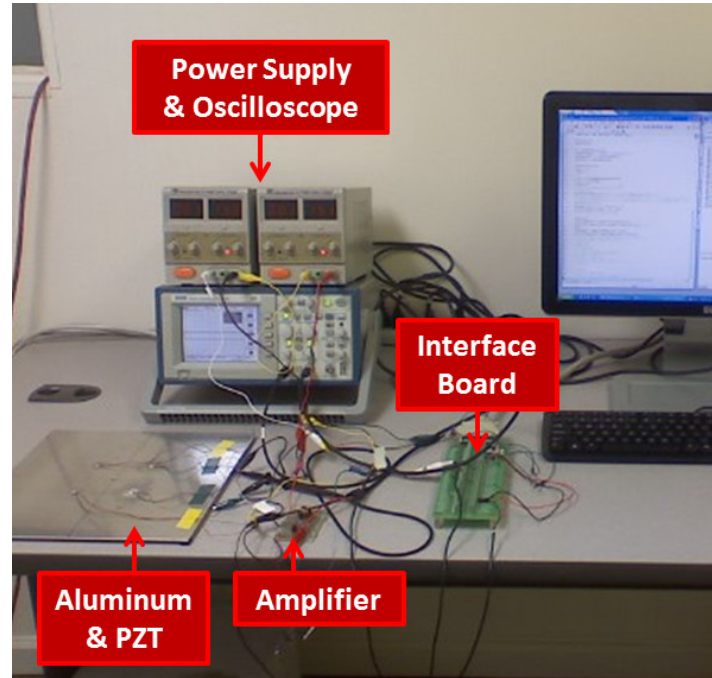


Figure 11: Experimental system for vibration method

the wave speed of aluminum plate is $5345m/sec$. calculating travel distance of wave signal by multiplying v_{wave} and Δt , it becomes $0.07483m$ which is very close to the physically measured distance by ruler, $0.0762m$. In this report, detecting a crack on the aluminum specimen with multi-PZT sensors and actuators is out of our scope. The purpose of this experiment is to show a potential to use vibration method for hybrid method which are suggested by this report. In the next section, we have presented a hybrid method and several experimental result to verifying this method.

3 Hybrid method

This section presents how optical method and vibration method are cooperated together for improving robustness of defect identification. In the preceding sections, we have a better understanding what the vibration method and optical method are. Hybrid method is a method combining those two method by using a sensor network technique. The geometrical irregularities are measured by using vibration method with high-frequency wave signals, and material degradations are measured by using optical method using low-frequency or static loading signal. The material degradation analysis from the full-field strain measurement could detect defects that the existing methods measuring geometrical irregularity are incapable of. The geometrical irregularity measured by a network of PZT and the material degradation is additionally measured by a network of digital cameras. The sensors have tradeoffs in accuracy and Field-of-View (FoV). The use of multiple types of sensors will maintain accuracy and area of coverage simul-

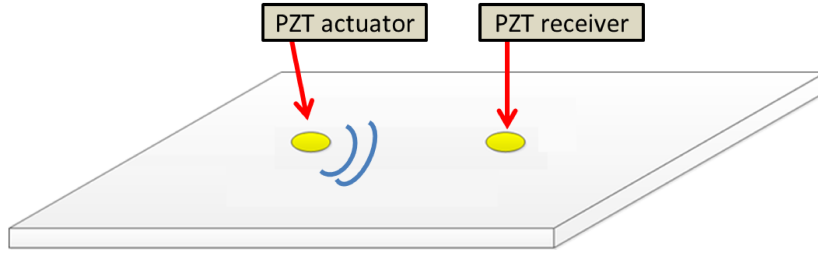


Figure 12: Schematic of vibration experiment system

Table 3: Properties of aluminum specimen

Aluminum specification (at 25 °C)	
Poisson Ration	0.33
Density	2710 kg/m^3
Elastic Modulus	69GPa
Tensile Strength	89.6 MPa
Yield Strength	34.5 MPa

taneously. The probabilistic fusion that enables the identification in the framework of Recursive Bayesian Estimation (RBE) allows the uncertainty to be taken into account and thus makes the identification more reliable. The observation of defects outside the FoVs of sensors can still influence the identification if it is treated as a negative observation likelihood.

3.1 Theory

The belief fusion enables the hybrid identification by combining the identification of defects measured from both geometrical irregularity and material degradation. Figure 3.15 shows the schematic diagram of the proposed methodology. Target motion block represents the model of defect location on the specimen. Using previous correction, new probability density function (PDF) of prediction in step ‘k’ is calculated. Using predicted location of defects, \tilde{x}_k , sensor models generate new observations, $\tilde{z}_{1:k-1}$. Those generated probability function is called likelihood, $l(x_k|\tilde{z}_{1:k-1})$. In the hybrid method, there are two sources of likelihood: PZT sensor network and camera sensor network. The geometrical irregularity is measured with networks of PZTs by generating high-frequency vibration whereas the material degradation is measured with networks of digital cameras by providing low-frequency loading input. The collected sensor measurements are fused probabilistically via observation fusion and the defect identification is maintained stochastically by the RBE. The belief fusion enables the synchronization of beliefs by the geometrical irregularity and the material degradation measurements, allowing more reliable identification than that by a single method.

3.2 Results

This report has provided a potential usage of hybrid method for defect identification by showing results getting from 3 different materials: aluminum plate, glass-fiber reinforced plate and rubber plate. Since aluminum plates have high stiffness, vibration method using PZT is very useful to measure time of flight of reflected waves from abnormal properties of materials. However, optical method is not efficient, because high stiffness requires strong tensile force to show a visible strain field. Second material is Glass-Fiber Reinforced Plate (GFRP) which is most

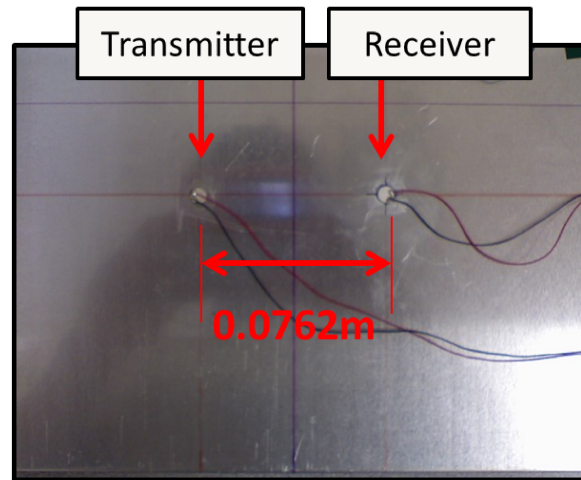


Figure 13: Installation PZT on a specimen

popular material for aerial industry. GFRP shows nonlinear behavior, so we can not use an analytical solution to wave equation which requires homogeneity of materials, whereas optical method shows a good performance for this material. Finally, rubber plate is used to show a paramount potential of this hybrid method, which existing structural health monitoring method couldn't apply to. Since rubber plate is high viscosity and high damped material, vibration method cannot be applied. However optical method can detect a class by observing a strain field. The following three subsections shows the results in detail and the Table 4 is a list of material properties.

3.2.1 Aluminum plate

Aluminum 1100 is used for this experiment. Figure 3.16(a) shows a dot pattern for applying DCT method and Figure 3.16(b) shows artificial defects which is invisible from the front side. After applying tensile force in y direction, we have observed a strain field, Figure 3.16(c). The red color distribution is too wide and too ambiguous to estimate the location of the artificial defects. However, vibration method shows a tangible potential to estimate a location of defect on the material by showing the demonstration of time of flight measurement. Figure 3.17(a) shows the installation of PZT actuator and sensor on the aluminum plate. Transmitter generates

Table 4: Properties of materials for verifying hybrid method

Properties	Al. (at 25 °C)	GPRF	Rubber
Poisson Ration	0.33	0.33	0.22
Density (kg/m^3)	2710	1500	1500
Elastic Modulus (GPa)	69	26	0.028
Shear Modulus (GPa)	26	10	0.0006
Ultimate Tensile Strength (MPa)	89.6	530	15
Yield Strength (MPa)	34.5	125	-
Breaking strain (%)	12	2	-
Thermal expansion ($10^{-6}/C$)	33	19	77

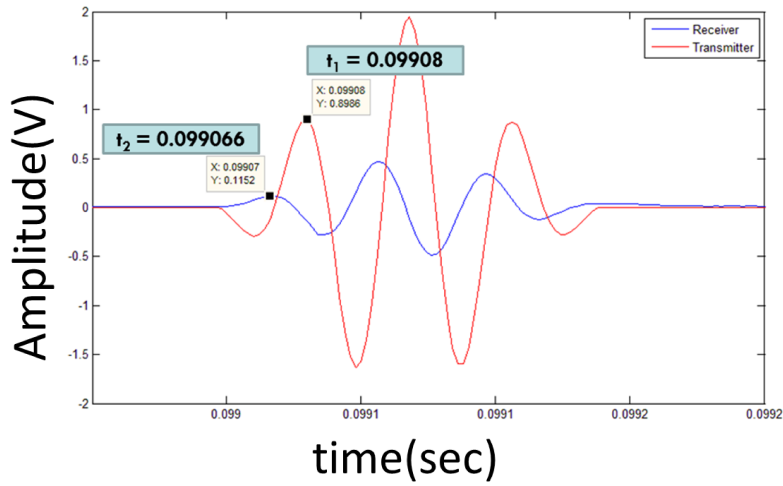


Figure 14: Time of flight measurement of aluminum plate, blue line is received signal and red line represents tone burst signal.

a vibration, and the vibration propagates through the aluminum specimen. The propagated wave is detected by the receiver and time of flight is measured as well. From the material properties in Table 4, wave speed of material is calculated by Equation 25. With this velocity and the time of flight, we can estimate a distance between the transmitter and the receiver. Substituting the parameters of the Table 3 into Equation 25, the wave speed of aluminum plate is $5345m/sec$. calculating travel distance of wave signal by multiplying v_{wave} and Δt , it becomes $0.07483m$ which is very close to the physically measured distance by ruler, $0.0762m$. The result of calculation shows that there is almost zero error between estimated distance and physically measured distance. In this experiment, even though we didn't use this vibration method for a damaged aluminum plate, this demonstration shows a possibility to use vibration method to detect defects for aluminum plate.

3.2.2 Glass-Fiber Reinforced Plate (GFRP)

GFRP is a composite material which is popularly used in aerial industry, because it has light weight and strong strength. However, since shows very weak performance in the transverse direction, crack propagation in that direction will be particularly fatal. To prevent this kind of accidents, it is very important to detect invisible defects. Figure 18(a) shows a regular dot pattern, which means that there are unknown defects. Figure 18(b) shows an artificial defects which is not observable from the front side. After applying optical method, we can see the strain field of the GFRP and we can estimate a location of invisible defects (Figure 18(c)). In addition, to check the availability of vibration method, we install two PZT on the GFRP (Figure 19(a)). From both the GFRP properties and Equation 25, we can get $3958m/sec$ as a speed of wave in GFRP. Multiplying the time of flight from the Figure 3.19(b) with the speed of wave, the calculated distance is $0.03958m$ which is not close to physically measured distance, $0.0762m$. This result has presented that hybrid method can complement classical vibration method which is popular in structural health monitoring field by using optical method.

3.2.3 Rubber plate

This section shows the specialty of this hybrid method by applying this method to rubber which most of existing structural health monitoring technique can be applicable. Figure 3.20 (a) shows

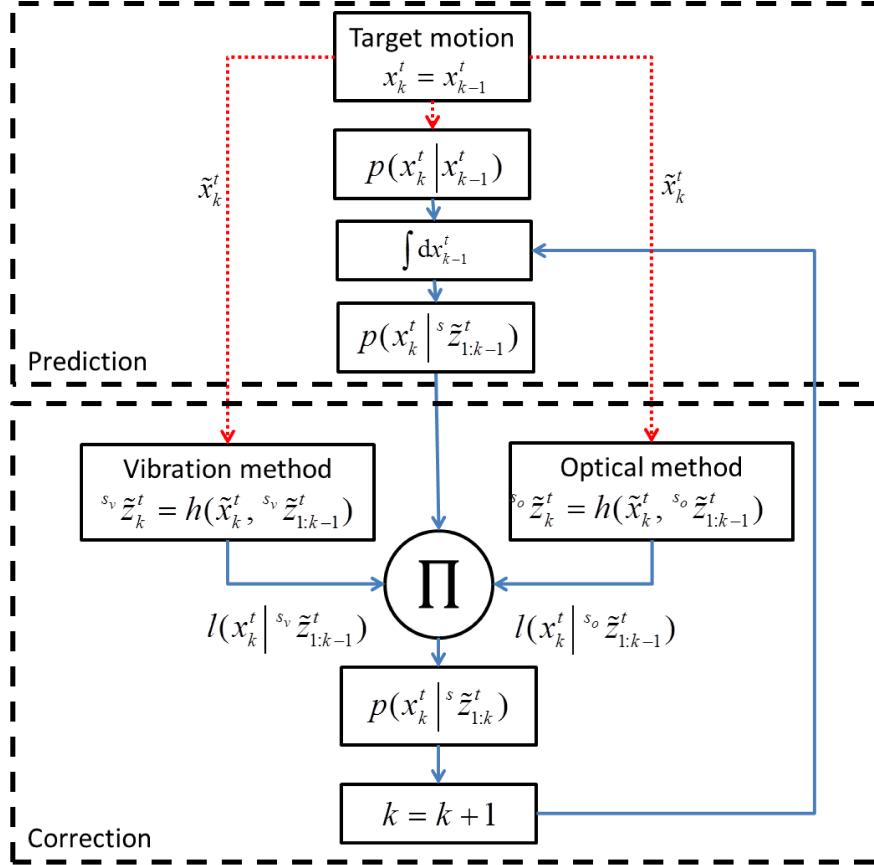


Figure 15: Schematic of hybrid method

a doc pattern for optical method and Figure 3.20 (b) shows a crack which is invisible from the front side. After applying optical method, we can obtain a strain field, Figure 3.21(b). It allows us to estimate a location of invisible defects intuitively. To show the inapplicability of vibration method, we have added a result below. From the Table 4 and Equation 25, we can obtain the wave speed inside of rubber, $333m/sec$. Since Figure 3.22(b) tells the time of flight is $10\mu sec$, the calculated distance becomes $0.0033m$ which is not close to the physically measured distance. The fail of vibration method for rubber is very obvious, because rubber has high viscosity which make wave propagation hard and attenuated easily.

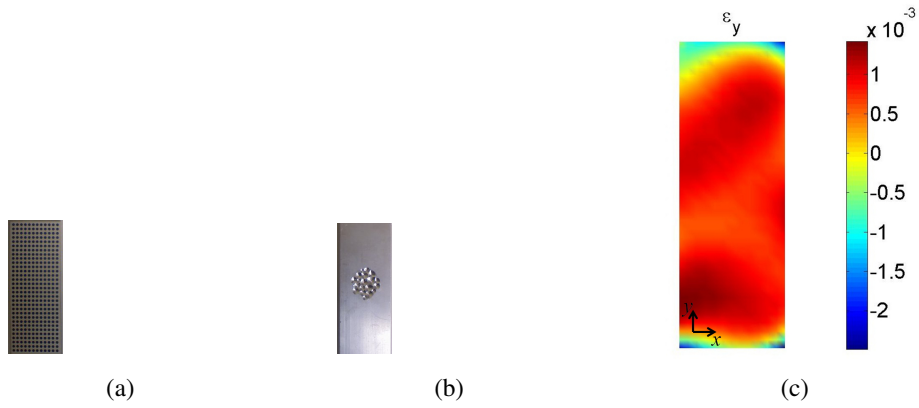


Figure 16: Full strain field measurement of aluminum plate, (a) dot pattern, (b) artificial defects on the back side of the specimen, and (c) result of full strain field measurement using DCT.

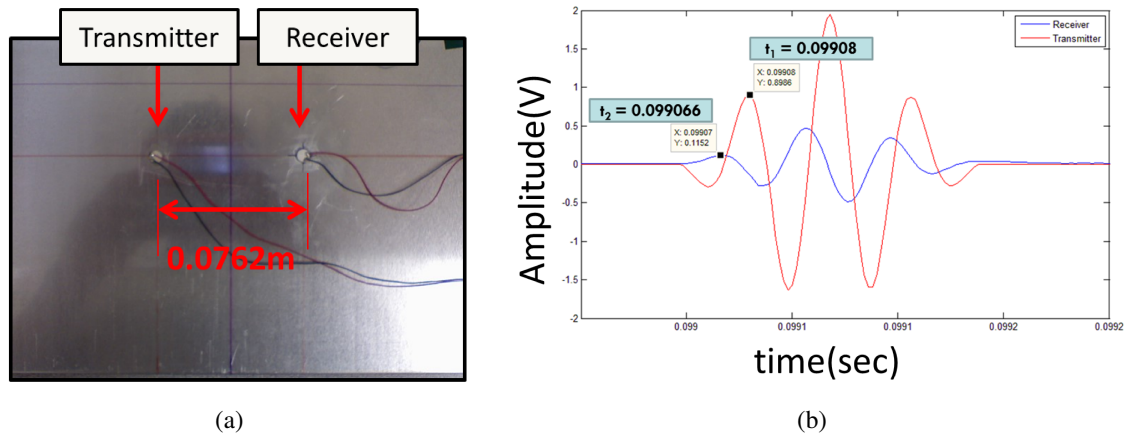


Figure 17: Time of flight measurement of aluminum plate

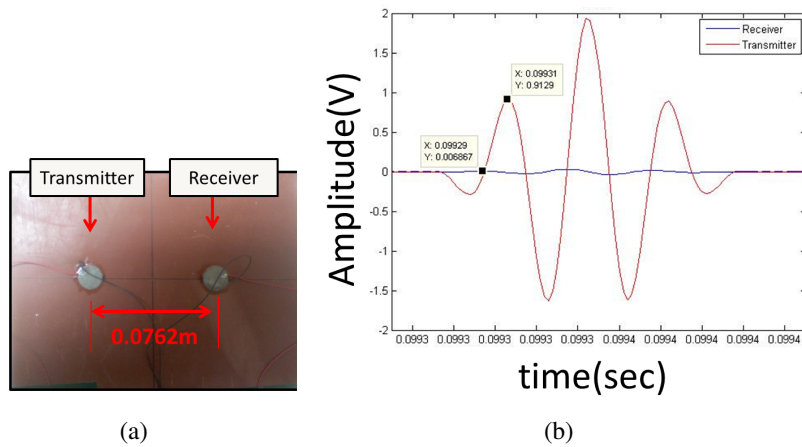


Figure 22: Time of flight measurement of rubber plate

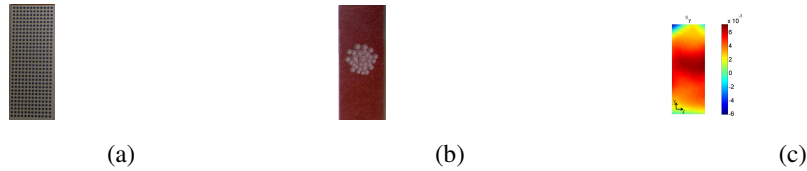


Figure 18: Full strain field measurement of glass-fiber reinforced plate, (a) dot pattern, (b) artificial defects on the back side of the specimen, and (c) result of full strain field measurement using DCT.

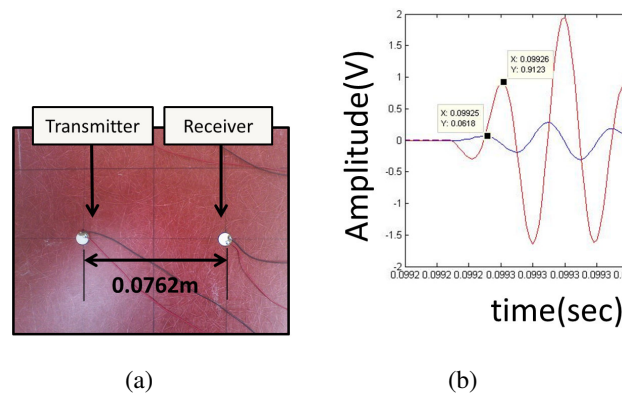


Figure 19: Time of flight measurement of glass-fiber reinforced plate

However, since hybrid method can use both optical method and vibration method, they complement each other and the result have a potential to use in practical for monitoring rubber structure.

4 Conclusion

This paper has presented the first-year outcomes of the three-year project developing the hybrid geometry/material monitoring method for microcrack identification. The geometrical irregularity measurement method has been developed with a PZT transducer and associated wave analysis techniques whereas a digital camera and the novel DCT method has been implemented for material degradation measurement. The specimens or structures are specified by geometrical and material properties. By measuring both properties and identifying defects, the proposed method has the potential for identifying a variety of defects including microcracks.

The proposed method was tested for the identification of defects on different specimens. The application of the material degradation measurement method to the holed specimen with a tensile load has shown its capability for measuring the strain field and identifying defects whereas the

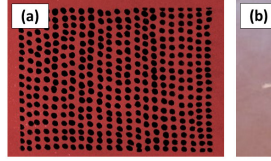


Figure 20: (a) The front face of rubber plate with dot pattern, (b) the back face of rubber plate with a crack which is not through the rubber plate.

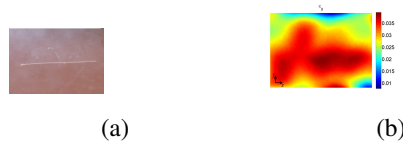


Figure 21: Full strain field measurement of rubber, (a) artificial crack named kissing bond and (b) result of full strain field measurement using DCT.

potential for detecting the location of defects using the proposed geometrical irregularity measurement method has been demonstrated using an aluminum plate. The proposed hybrid method was further used to identify invisible defects in the aluminum, GFRP and rubber specimens, each of which has different elastic modulus. In the aluminum specimen, the proposed hybrid method was able to find defects using the geometrical irregularity measurement method. The material degradation measurement method did not work since the deformation of aluminum, with high Young's modulus, is generally small. Defects in the GFRP specimen was, meanwhile, identified by both the geometrical irregularity and material degradation measurement methods. Lastly, the material degradation measurement method greatly found defects in the rubber specimen whereas they were not at all detected by the geometrical irregularity method due to high viscosity of the rubber specimen. The result of the rubber specimen is particularly important for this project since the rubber specimen grows a number of microcracks. The proposed hybrid method has the capability of identifying microcracks using the material degradation measurement method whilst it is also able to identify macrocracks using the standard geometrical irregularity measurement method. Due to the hybrid implementation, the proposed method could also identify other challenging defects such as a kissing bond or scar which a number of methods failed in the past.

The goal of the first year, which is the proof-of-concept of the proposed hybrid method has

been accomplished. The project, if continuously funded for the second and the third year, will investigate the capabilities and limitations of the proposed method in detail and, together with probabilistic formulation, improve the identification accuracy so that the identification of microscopic or semi-microscopic cracks can be possible.

References

- [1] Andrianopoulos, N. Full-Field Displacement Measurement of a Speckle Grid by using a Mesh-Free Deformation Function Strain, Wiley Online Library, 2006, 42, 265-271
- [2] Archbold, E.; Ennos, A. & Virdee, M. Speckle photography for strain measurement? a critical assessment First European Congress on Optics Applied to Metrology, Strasbourg, 1977, 136, 258-264
- [3] Bruck, H.; McNeill, S.; Sutton, M. & Peters, W. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction Experimental Mechanics, Springer, 1989, 29, 261-267
- [4] Cheng, P.; Sutton, M.; Schreier, H. & McNeill, S. Full-field speckle pattern image correlation with B-spline deformation function Experimental mechanics, Springer, 2002, 42, 344-352
- [5] Gazis, D. Three-Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinders. I. Analytical Foundation The journal of the Acoustical Society of America, Acoustical Society of America, 1959, 31, 568-573
- [6] Gazis, D. Exact Analysis of the Plane-Strain Vibrations of Thick-Walled Hollow Cylinders The Journal of the Acoustical Society of America, Acoustical Society of America, 1958, 30, 786-794
- [7] Giurgiutiu, V. Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors Academic Press, 2008
- [8] Goldrein, H.; Palmer, S. & Huntley, J. Automated fine grid technique for measurement of large-strain deformation maps Optics and lasers in engineering, Elsevier, 1995, 23, 305-318
- [9] Gottenberg, W. Some applications of holographic interferometry Experimental Mechanics, Springer, 1968, 8, 405-410
- [10] Hung, Y. Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing Optical Engineering, International Society for Optics and Photonics, 1982, 21, 213391-213391
- [11] Lee, B. & Staszewski, W. Modelling of Lamb waves for damage detection in metallic structures: Part I. Wave propagation Smart Materials and Structures, IOP Publishing, 2003, 12, 804
- [12] Raghavan, A. & Cesnik, C. Modeling of piezoelectric-based Lamb-wave generation and sensing for structural health monitoring Proceedings of SPIE, 2004, 5391, 419-430
- [13] Rayleigh, L. On waves propagated along the plane surface of an elastic solid Proceedings of the London Mathematical Society, Oxford University Press, 1885, 1, 4-11
- [14] Reddy, P. & Tadjuddin, M. Exact analysis of the plane-strain vibrations of thick-walled hollow poroelastic cylinders International journal of solids and structures, Elsevier, 2000, 37, 3439-3456
- [15] Rockett, I. & Smith, G. Homicide, suicide, motor vehicle crash, and fall mortality: United States' experience in comparative perspective. American Journal of Public Health, American Public Health Association, 1989, 79, 1396-1400
- [16] Rose, J. Ultrasonic waves in solid media Cambridge university press, 2004
- [17] Sevenhuijsen, P. The photonical, pure grid method Optics and lasers in engineering, Elsevier, 1993, 18, 173-194
- [18] Shapiro, R. & Haralick, R. Computer and robot vision Reading: Addison-Wesley, 1992
- [19] Sirkis, J. & Lim, T. Displacement and strain measurement with automated grid methods Experimental mechanics, Springer, 1991, 31, 382-388
- [20] Sutton, M.; Wolters, W.; Peters, W.; Ranson, W. & McNeill, S. Determination of displacements using an improved digital correlation method Image and vision computing, Elsevier, 1983, 1, 133-139
- [21] Worlton, D. Experimental confirmation of Lamb waves at megacycle frequencies Journal of Applied Physics, AIP, 1961, 32, 967-971

4.5.その他

・TV 出演

2015 年 6 月 13 日（土）TBS 系列放送「報道 LIVE あさチャン！サタデー」において、田村センター長が、マンションの 10 階相当から水の入った 2 リットルのペットボトルが落とされた事件に関連して、その威力をシミュレーションの結果に基づき解説した。

報道LIVE あさチャン！サタデー 2015年6月13日放送回

📺 放送日	2015年6月13日(土) 5:45～ 7:30
📺 放送局	TBS

📺 番組概要

オープニング（その他） 05:45～

オープニング映像。今回のラインナップは「年金機構 名乗る詐欺 被害額,300万円」「ペットボトル落下 妊婦が受けた恐怖」など。

週間ごだわりニュース（ニュース） 06:20～

このあと「“年金機構”を名乗る詐欺 300万円だまし取られた手口とは？」「障害者施設での虐待 元職員を逮捕」。

中国全土で942万人が統一大学入試に臨んだ。中国は超学歴至上社会で、レコードチャイナの編集員によると、受験生たちは教室で点検を受けながら授業を受けていた。一方、問題になっているのがカンニング対策で、試験会場周辺では携帯や無線の電波を感知するドローンも飛ばされた。

選手権日に、迷惑防止条例違反などの疑いで女が逮捕された。女は近所ではトラブルメーカーとして知られ、その様子は防犯カメラに撮影されていた。女は隣に住む女性もつめまわし、女性は2年前から警察に相談していた。

東京・中央区の高層ビルから2リットルの水入りペットボトルが落とされ、妊娠中の女性が負傷した事件で、警視庁はこのマンションに住む16歳の少年を逮捕した。少年は容疑を認めている。今回、ペットボトルが直撃した女性が当時の様子を語った。東洋大学の教授によると、高層ビルからペットボトルを落下させると、460キロの衝撃があるという。

高層マンションペットボトル落下事件について。吉永みち子は「頭に当たっていたら亡くなっていた可能性もある。歯止めが効かないのが一番こわい」とコメント。

キーワード レコードチャイナ 受験 胡錦濤 習近平国家主席 李克強首相 清華大学 北京大学
ドローン カンニング 迷惑防止条例違反 中央区（東京） 警視庁 東洋大学

番組内容



映像の 1 コマ