

氏名（本籍地）	島村 雅彦（埼玉県）			
学位の種類	博士（工学）			
報告・学位記番号	甲第 484 号（甲（工）第百十三号）			
学位記授与の日付	2021 年 3 月 25 日			
学位記授与の要件	本学学位規程第 3 条第 1 項該当			
学位論文題目	ベイズ推定を用いた実験・シミュレーション融合による段ボール特性の高精度評価に関する研究			
論文審査委員	主査	教授	博士（工学）	田村 善昭
	副査	特任教授	工学博士	望月 修
	副査	教授	博士（工学）	大久保 俊文
	副査	成蹊大学 教授	工学博士	弓削 康平

学位論文審査結果報告書〔甲〕

【論文審査】

理論解析，実験に続く第3の解析手法として，コンピュータによる数値シミュレーション（以下，シミュレーション）が広く一般に認知されるようになって久しい。今日では，解析手法とともに計算機の性能向上も相まって実際の設計や開発の現場でも利用されることが増え，商用のソフトウェアも数多く存在する。一方で，シミュレーションの精度（正しさ）を決める要素の1つとして解析対象の物性値が挙げられる。空気や水などの流体や，鉄・アルミニウムなど組成が簡単な物質であれば正確に物性値を与えることができるが，一般の材料では必ずしも物性値は自明でなく，個別に試験等によって測定されるものの，それがそのままシミュレーションに用いることができるとも限らない。また，試験そのものも，様々な理由により測定値がばらつくことも多く，その扱いは容易でない。一般的には，多くの試験を行い，平均値を用いるなどするが，平均値が真の値であるとは限らず，また試験のばらつきも考慮されないことがほとんどである。

本論文の目的は，このように試験によってばらついた値しか得られない場合に物性値を精度よく推定し，シミュレーションを行う新たな手法を開発すると共に，シミュレーション結果に対しても，測定値のばらつきを考慮して解の信頼性を保証する方法を提案することである。

本論文は6章より構成されており，各章の内容は以下の通りである。

第1章では，本論文の背景として，上に述べたような現状を示した上で，以下の3点

- ・実験と数値シミュレーション解析の融合による物性値の逆解析手法
- ・ベイズ推定を利用して物性値に含まれるばらつきを確率的に表現する確率的評価法
- ・ベイズ推定の確信区間を利用した解析結果の精度を保証する妥当性検証

を提案することを述べている。また，その実用例として，形状が複雑であり，物性値が明らかでない段ボールの曲げ特性を取り上げることとその理由と共に述べている。

第2章では，シミュレーションの核となる均質化法とベイズ推定の理論的背景となるベイズ統計学について既存の研究を引用しながら述べている。ダンボールのような材料は元々が紙（原紙）でできているため，そのものの物性値が明らかでないことに加え，ライナー（上下の平板）と中芯（中の波状の紙）からなる異方性材料で，シミュレーションで用いられる有限要素法などをそのまま適用することが難しいものの1つである。そこで，本論文ではこのような複雑な材料に適した均質化法を適用することを提案し，その理論の詳細と，本論文での適用方法について詳しく述べている。また，ベイズ統計学については，従来の統計的手法である頻度統計学と比較して，事前分布という先見情報を利用することでより少ない観測データで精度のよい推定ができる手法であること，全てのデータを確率分布で表すために，測定値のばらつきから生じる物性値の不確定性を確率分布として表すことができ，従ってシミュレーションの結果についてもその解の信頼性を定量的に示すことが可能であることを述べている。

第3章では，本論文の実用例として取り上げる段ボールについて詳しく述べている。まず，段ボールの基本的構造や規格，従来行われている試験などについてまとめている。次に，段ボールの曲げ特性に関する過去の研究をレビューし，簡単な推算式から段ボールの構造を簡略化したモデルによる解析，細か

くモデル化した詳細モデルによる解析の結果などを示し、既存の研究の問題点を明らかにしている。特に、試験から求めた物性値を用いても、試験結果とシミュレーション結果に相当の差が生じることが、過去の論文の引用から明らかになっていて、改めて本論文ではこれを提案手法により解決することを述べている。

第4章では、提案手法の一である、実験とシミュレーションの融合により物性値を逆解析的に求める方法を段ボールに適用し、その有効性を示している。まず、段ボールの曲げ試験を行い、その結果やばらつきの程度を具体的に示したのち、ここでは仮にその平均値を真の試験結果と仮定して、段ボールの物性値を求めている。その際の独自のアイデアとして、段ボールには原紙自体に繊維の方向による異方性があり、さらにライナーと中芯が糊で貼合された極めて複雑な構成をしているが、その全てを詳細にモデル化することは現実的でないとして、ライナーと中芯の一部を取り出して詳細にモデル化したマイクロモデルと、それらの集合として表されるマクロモデルに分けて均質化法により解析をすること、マイクロモデルにおいても糊などはモデル化されないため、これらの影響を吸収して正しく曲げ剛性を再現する調整済み弾性係数を提案している。これらによって得られた物性値を用いたシミュレーション結果は、過去の研究と異なり、逆解析に用いた点以外でも良く試験値を再現することが示されている。ただし、ここでは試験値のばらつきを無視して平均値にのみを用いているため、次章でばらつきを考慮した確率的手法に発展させることを合わせて述べている。

第5章では、前章で求めた物性値が必ずしも真の値でないことから、物性値をばらつきを含んだ確率分布として表すための手法の詳細とその適用について詳しく述べている。具体的には、まず、ベイズ推定で用いる事前分布（先見情報）の中央値を先に求めた平均値からの値とすることで、少ない観測データでも物性値を確率分布として推定できることを示している。一方で、この事前分布ではばらつきに関する情報が未知であるため、結果として得られる物性値のばらつきが大きくなることが問題となる。そこで、ここでは階層型ベイズモデルを構築し、事前分布をさらに予測する手法を提案し、そのためにWAICと呼ばれる情報量基準を利用することを述べている。これにより、予測される物性値のばらつきが抑えられ、少ない観測データでも十分に精度よく推定ができることを示している。さらに、物性値が確率分布で表されていることを利用し、分布の確信区間（その確率で真の値が含まれる範囲）の上限値と下限値を用いてシミュレーションを行い、真の解がその確率で含まれる範囲を具体的に示して、シミュレーションの信頼性を保証する手法についても具体的に示している。

第6章は、結論として、提案した手法が、物性値が未知で試験結果がばらつきを含む問題に対して有効であり、そのシミュレーション結果の精度も同時に保証できるものとなっていることを改めて述べている。

以上、要するに数値シミュレーション分野において、実験とシミュレーションを融合しベイズ推定を用いることで、試験によるばらつきを確率分布として表し、かつシミュレーション結果の信頼性を保証する独自の手法を提案し、その有用性を示した論文であり、例として取り上げた段ボールの解析に有用であることはもちろん、他の複雑構造を持つような同様の解析対象に対しても有効な手法となっており、その応用範囲は広いものとなっている。

【審査結果】

本論文は、理論解析、実験につぐ第3の手法である数値シミュレーション（以下、シミュレーション）について、新たな手法を提案し、実問題でその有用性を実証したものである。現在のシミュレーションは民間企業での製品設計や開発などにも用いられるほど一般的になっているものの、その適用範囲には限りがある。その理由として、解析対象の物性値を正しく与えることが困難な材料がまだまだ多いこと、シミュレーションの結果にどれほどの信頼性があるかが不明確であることなどがあげられる。本論文で提案する手法はこの2つの問題を解決するものである。物性値が不明な材料については、試験を行ってその結果から逆解析的に物性値を求めることが多いが、本論文では試験を行っても適切な物性値が得られない、あるいはそのままではシミュレーションに用いることができないような材料について、試験結果を正しく再現する手法として、実験とシミュレーションを融合した解析手法を独自に開発し、提案している。さらに、試験には誤差やばらつきが必ず含まれるが、そこから真の値を得るには膨大な数の実験が必要となり、現実的でない場合も多い。ここでは、少ない試験回数で精度のよい推定を行うためベイズ推定を導入し、前述の解析手法と組み合わせることで、確率分布として物性値の推定を行う方法を提案している。さらに、物性値が確率分布で与えられることを利用し、真の物性値が含まれると期待される確信区間を利用してシミュレーション結果の妥当性を定量的に示す方法も提案した。これらは本研究独自のものである。また、その実用例として段ボールの曲げ特性について解析を行い、これまで不十分であった段ボールの解析が実用的に可能であることを示しており、その有用性は高い。さらに、本手法が段ボールに限らず適用可能であることを考えると、工学的な価値も高いと考えられる。

また、工学研究科（機能システム専攻）の博士学位審査基準に照らしても妥当な研究内容であると認められる。

本審査委員会は、島村雅彦氏の博士学位請求論文について、所定の試験結果と上述の論文審査結果に基づき、全員一致をもって本学博士学位を授与するに相応しいものと判断した。