

2020年度

東洋大学審査学位論文

土粒の粉碎メカニズムに関する研究

理工学研究科 生体医工学専攻 博士後期課程

46B0171001 大石正行

目次

目次.....	1
第1章 序論.....	3
1.1 本研究の背景.....	3
1.2 本研究の目的と意義.....	23
1.3 本論文の概要.....	24
参考文献.....	25
第2章 遊星式ロッドミルによる土粒の粉砕過程.....	26
2.1 はじめに.....	26
2.2 実験方法と装置.....	30
2.3 実験結果.....	36
2.3.1 粉砕容器内の粉砕過程の可視化.....	36
2.3.2 粉砕容器内の加速度の測定.....	40
2.3.3 土粒の破壊プロセス中の応力変化.....	41
2.4 まとめ.....	42
参考文献.....	43
第3章 土粒の粉砕の基本的メカニズム.....	44
3.1 はじめに.....	44
3.2 実験方法と装置.....	47
3.3 結果と考察.....	53
3.3.1 粉砕ロッドの役割.....	53

3.3.2 振動容器内の土粒の繰り返し衝撃.....	56
3.3.3 摩耗による土粒の破壊.....	58
3.4 まとめ.....	61
参考文献.....	62
第4章 土粒の粉碎メカニズム.....	64
4.1 はじめに.....	64
4.2 実験方法と装置.....	67
4.3 結論と考察.....	74
4.3.1 ソイルペレットの降伏応力.....	74
4.3.2 圧縮装置による破壊過程.....	77
4.3.3 摩耗による破壊実験.....	78
4.4 まとめ.....	83
参考文献.....	84
第5章 結論.....	85
研究業績.....	88
謝辞.....	89
あとがき.....	90
付録.....	92

第1章 序論

1.1 本研究の背景

現在、地球上には様々な生物が溢れている。生物と土は密接な関係を持っている。土の中では無機物や有機物を活用する様々な微生物が増殖して土壌となる。生物は土壌に育つ植物から始まる。植物は、一般に土中の根により自らを支え、土中の水分と養分を吸収し、太陽エネルギーを利用して生存に必要なエネルギーを確保している。動物は、植物の作ったエネルギーを直接・間接に活用することで生存のエネルギーを得ている。生物の死体や排泄物等は土に戻り、微生物などにより分解され、再び植物によって吸収されるという植物連鎖でつながっている。

地球は誕生してから約46億年経過しているといわれている。地球を覆う地殻はマグマや火山活動で隆起や沈降を繰り返しながら移動している。土の生成過程は一般的に、岩石が風化や細かく砕かれて生成されるものが多い。また、気候や生物・地形など相互作用によりできたものもある。前者を「土」、後者を「土壌」として使い分ける[1]。

土壌は生物の生存に不可欠であるだけでなく、家具や住宅などの材料となる木を育てる機能もある。また、工業製品の原料として粘土は、陶磁器やセメント、ガラス、タイルなどには欠かせない。土壌にはこの他にも様々な機能や役割があり、我々は土壌から多くの恩恵を受けている。土を利用あるいは評価をする場合、その性質を正しく理解することが重要となり、目的に応じた測定を行っている。例えば、建築物・ダム・鉄道・トンネルなどの構造物を作る時の基礎地盤調査、土質調査などは、物理的・力学的な測定が主に行われ、土壌汚染調査、肥沃度などの調査には土壌の化学的な測定が行われる。

現在、土壌を取り巻く環境は多くの問題を抱えている。世界的には熱帯での森林伐採、乾燥地での家畜の過放牧が地表の植物を喪失させ、風雨による土壌浸食による砂漠化が懸念され西暦 2000 年までに世界の肥沃な土壌のうち、3 分の 1 はその肥沃さを失うと予測もある[2]。さらに、人為的な大気汚染や水質汚濁による土壌汚染も深刻な問題となり、土壌の化学的な分析の重要性と頻度が高まっている。

化学的に土壌を分析する場合、自然界から採取した土壌を分析の目的に応じて粒径を一定以下に調整する必要がある。土壌の粒径を調整する場合、土壌の粉碎と篩分けと

いう工程を経ねばならない。多くの測定対象土壌を分析するために、この粒径の調整を効率的に行える機械化が求められている。

土壌は、種類、用途、目的に応じて古くから数多くの研究がされている。日本の学会だけでも、土壌物理学会、日本土壌肥料学会、土木学会、地盤工学会、日本ペドロロジー学会、日本土壌微生物学会などがあり各分野で土あるいは土壌に関連する研究がおこなわれている。土あるいは土壌はその多様性と同様に分類方法も多種多様で、工学的分類として地盤工学会では地盤材料の工学的分類方法があり、海外での工学的土壌分類は北米統一的土壌分類体系 (the Unified Soil Classification System: USCS) やヨーロッパ土壌分類体系 (the European soil classification system, ISO14688) などがある。

粉碎する土壌の三相構造と物理量

実験に用いる土壌の性質を明らかにするための物理的な量は以下の通り定義される。土壌は土粒子と間隙にある水と空気で構成されている。土粒子の粒径、間隙の大きさ、水の量が土の力学特性を複雑にしている。そしてこの 3 つの要素は、土粒子を固相 (Solid)、水を液相 (Water)、空気を気相 (Air) として定義され、これら3つの層を土壌の三相 (土壌三相) という。土壌三相の模式図を図 1.1 に示す。

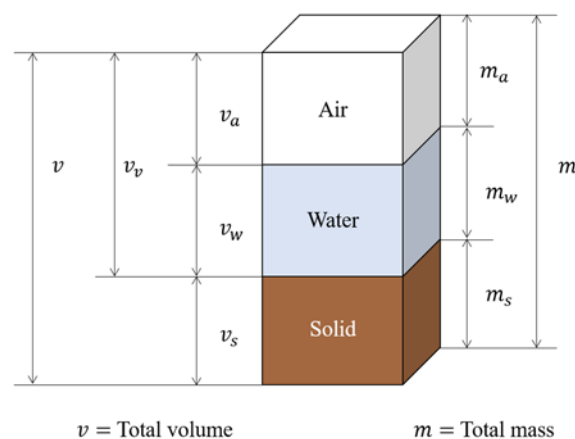


図 1.1 土壌の三相模式図

土壌はこの三相が占める体積や割合のバランスが土壌の硬さや透水性、保水性に大きく影響を与えている。また、土壌三相の体積と質量に関する基本的な物理量は次のように定義される。

$$\text{全体積 (Total volume)} \quad v = v_s + v_w + v_a \quad (1.1)$$

土壌の全体積 v は、土壌三相それぞれの体積 v_s, v_w, v_a の総和であり、固相体積 v_s と全孔隙体積 (Volume of voids) v_v との和である。

$$\text{全質量 (Total mass)} \quad m = m_s + m_w + m_a \quad (1.2)$$

土壌の全質量 m は、土壌三相それぞれの質量 m_s, m_w, m_a の総和であるが、気相の m_a は通常 0 とみなされるので、固相質量は m_s と液相 m_w の総和である。

$$\begin{aligned} \text{固相体積 (volume of solid phase)} \quad v_s &= v - v_w + v_a \\ &= v - v_v \end{aligned} \quad (1.3)$$

土壌の固相体積 v_s は、全体積 v から全孔隙体積 v_v を減じた体積量である。

一般に水を含んだ土壌においては3つの相を構成するが、乾燥した土壌では、図 1.2 に示すように固相と気相の2つの相となり、逆に飽和した土壌においては図 1.3 に示すように固相と液相の2つの相で構成される。つまり、周囲の環境に応じて土壌は二相または三相の状態となり存在する。

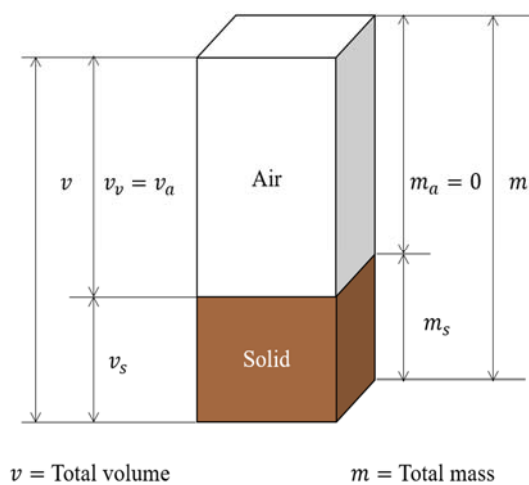


図 1.2 完全に乾燥した土壌(二相系)

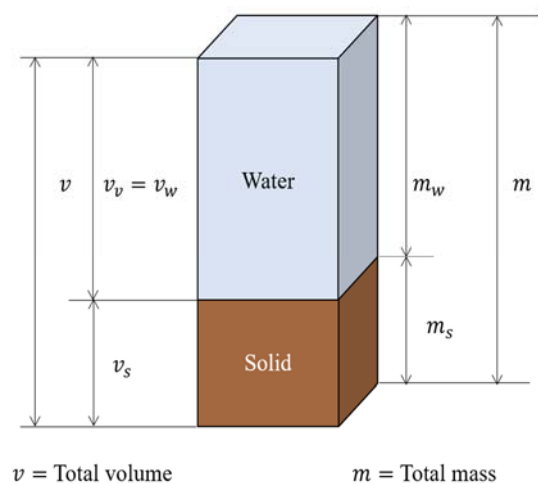


図 1.3 飽和土壌(二相系)

本研究で対象とする土壌も自然界にある土壌と同じく三相の各々の比率は変化する。土壌の物理的性質を表す場合によく使われる用語と体積と質量の関係式は下記の通りとなる。()で記載した用語は同義語として使われている。

1) 体積の割合から

$$\text{固相率} \quad \theta_s = v_s / v \quad (1.4)$$

$$\text{体積含水率(液相率・体積水分率)} \quad \theta = v_w / v \quad (1.5)$$

$$\text{気相率} \quad \theta_a = v_a / v \quad (1.6)$$

$$\text{孔隙率(間隙率)} \quad n = (v_a + v_w) / v \quad (1.7)$$

$$\text{間隙比} \quad e = (v_a + v_w) / v_s \quad (1.8)$$

$$\text{飽和度(飽水度)} \quad S = v_w / (v_a + v_w) \quad (1.9)$$

2) 質量の割合から

$$\text{含水比} \quad \omega = m_w / m_s \quad (1.10)$$

3) 体積と質量の比から

$$\text{土粒子の密度} \quad \gamma_s = m_s / v_s \quad (1.11)$$

$$\text{乾燥密度} \quad \gamma_d = m_s / v \quad (1.12)$$

4) 各用語の相互関係

$$\text{体積含水率} = \text{乾燥密度} \times \text{含水比} \quad \theta = \gamma_d / \omega \quad (1.13)$$

$$\text{孔隙率} = \text{間隙比} / (1 + \text{間隙比}) \quad n = e / (1 + e) \quad (1.14)$$

$$\text{孔隙率} = 1 - \text{乾燥密度} / \text{土粒子の密度} \quad n = 1 - \gamma_d / \gamma_s \quad (1.15)$$

このようにして求められる物理量は、多種多様な土壌を形成する物質の種類とともに土壌の性質を知る重要な指標として利用されている。

土壌分析と土壌の粒径

化学的に土壌を分析する場合、自然界から採取した土壌を分析の目的に応じて粒径を調整しなければならない。農林水産省の土壌・作物栄養診断マニュアルに記載されている内容は概ね次の通りである。採取した土壌は大きな土粒を砕きながら新聞紙などに薄く広げ温室やハウスの中などで風乾させるか、30℃から40℃の温風で風乾する。

風乾した土壌試料は、磁性乳鉢の中で乳棒を使用して土粒を押しつぶして、2 mm のふるいを通させたものを測定試料として用いるとある。また、環境省の土壌の汚染に係る環境基準について(平成3年8月23日環境庁告示第46号)の中の特定有害物質測定では、採取した土壌を分析室で風乾後、中小礫、木片、植物残渣等を除き、土塊や、団粒を粗砕した後、非金属性の 2 mm の目のふるいを通させ分析用試料として用いるとある。このように 2 mm 以下の粒径の土壌を分析用試料として用いているのは、土壌は国際土壌学会法による土壌粒子の大きさ区分(表 1.1)に示されているように、粒径 2 mm 以上は礫と区分されて水や養分を殆ど保持しないことから土壌分析から除外されている。

表 1.1 土壌の粒度別分類

粒径区分		粒径(mm)	区分の根拠
礫		2 以上	水を殆ど保持しない
砂	粗砂	2~0.2	毛管孔隙に水が保持される
	細砂	0.2~0.02	同上+肉眼で見える限界
シルト		0.02~0.002	凝集して団粒を形成
粘土		0.002 以下	コロイド的な性質を持つ

粉碎する土壌の団粒構造

粉碎する土壌は土粒子の集合体である。自然界にある土壌は生成要因や地形によっても性質が異なり千差万別で様々な土粒子の大きさの集合体であり土壌三相のバランスも変化に富んでいる。土壌を風乾させると(砂質土壌以外)大小様々な土粒子の塊を生成する。この土粒子の塊を団粒といい、その大きさは数センチ程度のものから目に見えないほど小さなものまでである。団粒土壌は図 1.4 に示す模式図のように、粘土やシルトの土粒子が結合し集合体となり、さらにその集合体がさらに集合体をつくる。土粒子の結合は、土粒子を構成するプラスの電荷を持つ鉄やアルミニウム等が腐食物質や微生物等の有機物を仲立ちとして結合される。これを「有機・無機複合体」という。有機・無機複合体として強固な団粒ができると、水に入れても崩れない耐水性団粒となる。逆に粘土やシルトが少なく砂の割合が極めて高い土壌の構造は、球が詰まったような構造となり単粒構造として図 1.5 のように模式的にあらわされる。砂浜や砂丘でみられるような単粒構造の土壌は粒子間の結合力が弱い。

本研究では土粒子が硬く固まった粒径 2 mm 以上の団粒を、粉碎装置を操作して粒径 2 mm 以下に断片化することを対象としている。粉碎する一般的な土壌には目に見えないほど小さな粒径の団粒も含まれるため、本稿では粒径 2 mm 以上の大きさの団粒を「土粒」と定義する。

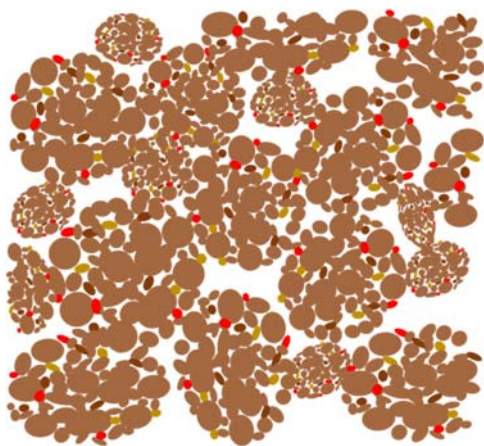


図 1.4 団粒構造の土壌模式図

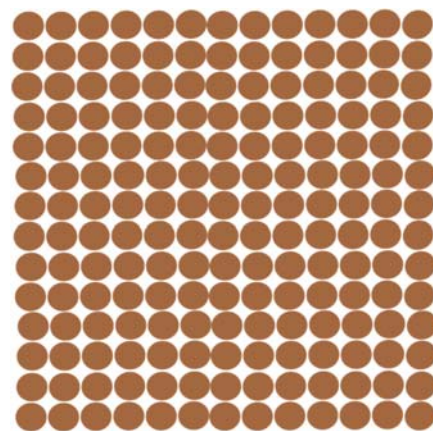


図 1.5 単粒構造の土壌模式図

粉碎機の進歩と研究

粉碎の起源は、原始時代の衣・食・住生活の中で日常的に行われ、その後道具として穀物を粉にする石臼やすり鉢などが登場した。古代エジプトでは小麦を製粉してパンを焼いた記録が残っている。18世紀に入ると鉱石を砕くためのスタンプミル等機械装置が開発され、同時に1867年 Rittinger の法則、1885年 Kick の法則等粉碎に投入したエネルギーと粒径との関係を表す法則が次々に発表された。

粉碎は固体の大きさを減少させる操作であり、粉碎前の粒径と粉碎後の粒径の変化から粉碎に要する仕事量が計算される。Rittinger は粉碎に消費されるエネルギー W は、新しい表面を生成するのに使われるとし、粉碎に要する仕事量は粉碎前後の粒径の逆数の差に比例するとした。

$$W = C_R(S_p - S_f) = C'_R \left(\frac{1}{x_p} - \frac{1}{x_f} \right) \quad (1.16)$$

ここで C_R 、 C'_R は砕料によって決まる定数、 x は粒径、 S は表面積で添字 f, p は粉碎前後を示す。これに対して、1885年 Kick は幾何学的に相似な変形を生じさせるために必要なエネルギーは砕料体積に比例するとし、粉碎に要する仕事量は、粉碎前後の粒径比(粉碎比)によって決まるとした。これを表すと次式となる。

$$W = C_K \ln \frac{x_f}{x_p} \quad (1.17)$$

ここで C_K は砕料によって決まる定数である。これらの考えに対して、1952年 Bond[3]は全ての粉碎は無限に大きい粒子(固体)を粒径が0の無限個数の粒子に粉碎する途中の現象であるとして、土壌のような形状が不規則な粒子の粉碎では、粉碎開始段階では粒子に加えられたひずみエネルギーは粒子体積に比例するが、粒子内に亀裂が発生した後は生成した表面積に比例するとして、最終的にはその中間に比例するとし次式を提案した。

$$W = C^S(x_p^{-1/2} - x_f^{-1/2}) \quad (1.18)$$

さらに Bond は式(1.18)の実用性を高めた次式を提案している。

$$W = W_i \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right) \quad (1.19)$$

ここで、 $F (\mu\text{m})$, $P (\mu\text{m})$ は粉砕前後の砕料の 80% 通過粒径である。これは粉砕に要する仕事量は粉砕前後の粒径の平方根の逆数の差に比例することを示している。また Bond は式(1.19)の $W_i (\text{kWh} / \text{ton})$ は砕料の種類によって決まる値であるとして、これを Work-Index、仕事指数と定義し多くの砕料について測定している。この仕事指数は **JIS M 4002** 粉砕仕事指数の試験方法として規定されている。 W_i の算出には次式が使われる。

$$W_i = \frac{1.1 \times 44.5}{P_1^{0.23} G_{bp}^{0.82} \left(\frac{10}{\sqrt{P_1}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right)} \quad (1.20)$$

記号 W_i : 粉砕仕事指数 (kWh/ton)

F : 試料の 80 % 粒度 (μm)

P_1 : 粉砕試料のふるいわけに使ったふるいの目開き (μm)

P : P_1 網下の 80 % 粒度 (μm)

G_{bp} : 試験ミル1回転当たりの粉砕産物量 (g/rev)

その後も多種多様な粉砕方式や装置が生み出されてそのメカニズムや理論研究とともに進化を続けている。しかし、粉砕の目的あるいは粉砕原料の種類から、どの粉砕方式や装置を選択するのが最適なのかは粉砕特性を熟知する必要がある。

本研究で粉砕をする対象物は粒状物質が結合した集合体である粒径 2 mm 以上の土粒で、その目的は単体粒子とし粒径 2 mm 以下に断片化することにある。一般的に粉砕操作で求める粉砕生成物の粒径と、利用されている粉砕装置について表 1.2 に示す。土壌の粉砕にはロッドミルが多く使われている。

表 1.2 粉砕粒径と粉砕装置

粉砕操作の区別	粉砕試料の大きさ → 粉砕生成物のおおよその粒径	代表的な粉砕装置
粗砕	1.5 ~ 1 m → 10 cm	ジョークラッシャー ジェレイトリ・クラッシャー
中砕	10 cm → 1 cm	ロールクラッシャー ハンマーミル
微粉砕	2 ~ 1 cm → 1mm 1 mm → 100 ~ 10 μm 100 ~ 10 μm → 10 ~ 1 μm	ロッドミル ボールミル 遊星ミル
超微粉砕	10 ~ 1 μm → 1 μm	マルチ粉砕機構型超微粉砕機
ナノ微粉砕	1 μm > nanometer	ビーズミル

土粒の強さ

土粒は土粒子が堆積し粒子同士が互いに接触した集合体で形成されている結晶構造を持たないいわゆるアモルファス構造と呼べる。断片化プロセスにおいて外力を受けたこの砂と粘土の粒子の集合体が、外力を受ける前より小さな集合体に断片化する場合、通常粒子自体は破壊されない。粒子の集合体の内部にせん断面が発生し、その面に沿って集合体が破壊される[4]。このせん断力に対して、集合体の内部ではせん断抵抗が発生する。せん断応力がせん断抵抗の最大値(降伏点)を超えたときに破壊が生じる。土粒の強さはこのせん断強度で示すことができる。

粉砕過程における応力

ロッドミルによる土の粉砕は、粉砕する土粒と粉砕媒体のロッドを入れた回転する円筒容器の中で行われる。この時粉砕は、容器の大きさ、媒体の大きさ、土の量、運動の種類に影響される。粉砕は個々の媒体の空間あるいは媒体と容器の空間に土粒が入り、土粒

の表面に作用する力により粉砕される。土に作用する力は、図 1.6 に示す衝撃または圧縮、斜めからの力によるチップング(削り取り)、表面に平行に作用する摩耗などがある。これらの複合的な力はランダムなプロセスであり、土粒が媒体の間の空間に入る確率の法則の影響を受けることになる。土粒は、粉砕過程で複合的な応力を受け、そのストレスレベルが土粒子結合を破壊するに十分なレベルに達したとき土粒に亀裂を生じさせ破壊へと至ると考えられる。

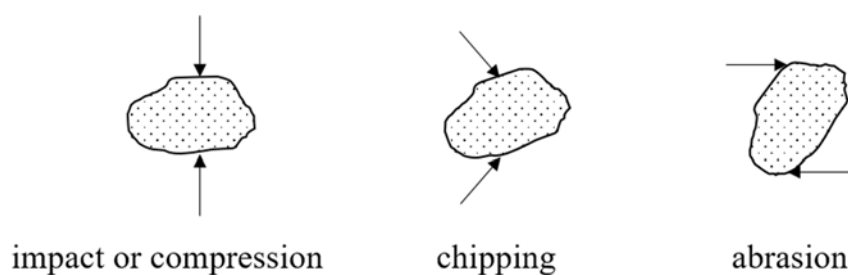


図 1.6 粉砕時の土粒への応力のかかり方

粉砕効率を高める手段は、エネルギー変換効率の高い粉砕原理の探索、プロセスにおける粉砕条件の最適化、システムの最適化の3つに大別されると考える[5]。エネルギー変換効率の高い粉砕原理とは粉砕する際の作用力の大きさ、速度、方向など破壊に影響を与えるエネルギー効率をいう。粉砕条件の最適化とはマクロ的な見地から粉砕方法・装置を検討することをいい、エネルギー効率と粉砕条件の最適化を組み合わせるシステム全体として性能を高めることも必要である。さらに、応力下での土粒の粉砕は、粒度分布、粒子形状、有効応力の状態、有効応力経路、空隙率、粒子硬度、および水の有無に影響される[6]。

地盤工学などでは土壌のせん断変形について評価するために、単純せん断試験、一面せん断試験、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験などの室内試験または、原位置ベーンせん断試験、コーン貫入試験などの現場試験でせん断強度を求めている。しかし、室内試験であっても個々の土粒サイズの試験ではなく、試験装置に合わせて土壌を成形して測定をするものである。もちろん、地盤というマクロ的な視点にたつては有効な試験方法で

あるが、粉砕装置の中での、土粒のせん断応力の測定には別な手法が求められると考える。

従来の粉砕装置と問題点

化学的な土壌分析をする場合、採土、風乾、粉砕、篩分け、秤量、抽出、分析の各工程を経て行われる。このうち、粉砕と篩分け作業は一部機械化されたものもあるが、この粉砕プロセスにおいて発生する土壌の土埃対策が困難であり、多くの場合、現在でも手作業で行われている。分析する土壌の中には、人体に有害な物質が含まれている場合もあり、特に、環境分析を対象にした場合は、ドラフトチャンバーや集塵機等を使用し、作業者が直接土壌の土埃を吸引しないように、細心の注意を払って行われているのが現状である。大量の土壌検体を取り扱う分析会社などでは粉砕プロセスの高率化と労働負担の軽減、土埃の多い作業環境の改善が課題となっている。

従来、土壌の粉砕に使用していた装置の外観と仕様を図 1.7 と表 1.3 に示す。このロッドミル式土壌粉砕機の機構を図 1.8 に示す。この装置は直径 2 mm の円孔を有するドラムに、粉砕する土壌と直径の異なる大小 2 本の金属製の粉砕ロッドを入れて回転軸にのせる。モーターの回転力はベルトで接続された回転軸に伝わり、回転軸上のドラムが回る仕組みとなっている。回転するドラムの中の土壌と 2 本の粉砕ロッドはドラムの回転方向に持ち上げられるが、自重により重力方向に繰り返し落下する。この時、土壌に粉砕ロッドの衝撃が与えられて断片化した土粒子は、ドラムに開いた円孔から下方にあるホッパーに降下して回収する仕組みとなっている。この装置の欠点は、粉砕プロセスにおいて大量の土埃が発生しドラムの円孔から土粒子とともにドラムの外部へ流出してしまうことにある。さらに、コンタミの影響を避けるため試料を入れ替える毎に円孔ドラム、ホッパー、粉砕ロッド、回転軸に至るまですべて清掃をしなければならない。そのために装置を設置する場所には、粉砕プロセス中及び清掃時において土埃を回収する集塵機など、粉砕装置と合わせて設備を整える必要がある。



図 1.7 ロッドミル式土壌粉砕装置

表 1.3 ロッドミル式土壌粉砕装置仕様

仕 様	
外形寸法	W1900, D650, H900 mm
重 量	約 180 kg
ホッパー数	4 個
ドラム寸法	直径 180 mm、高さ 250 mm

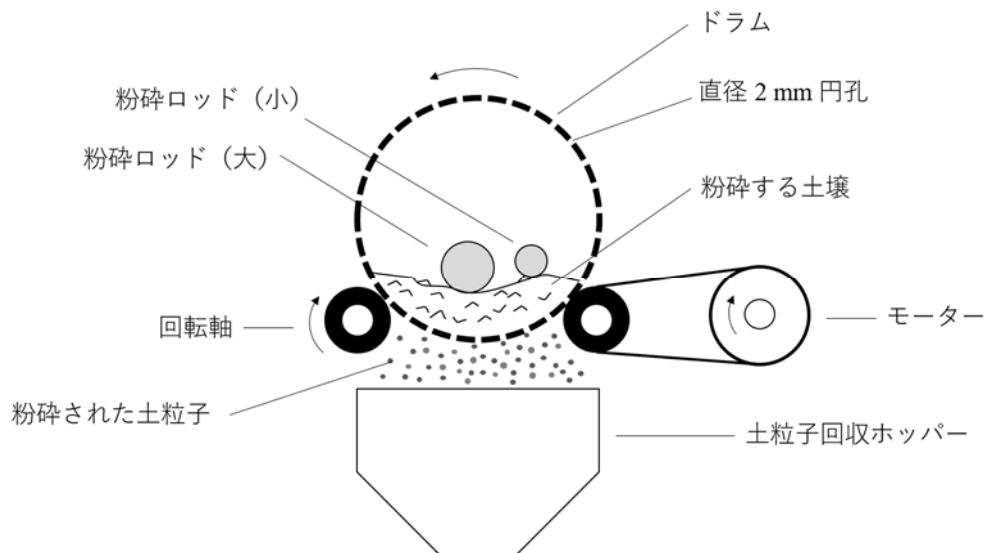


図 1.8 ロッドミル式土壌粉砕装置の粉砕機構

他の粉砕装置として、粉砕する土壌を入れた容器に粉砕媒体として粉砕ロッドの代わりにジルコニアなど硬質素材で作られた複数のボールを入れて、容器を高速で回転させてボールと土壌の衝突や摩擦によって粉砕するボールミル装置がある。このボールミル方式の装置では、ボールとの衝突や摩擦に耐えられる頑丈で密閉された容器が使われる。このため粉砕時に発生する土埃が容器外に出ることはない。しかし、この方式は微粉砕に利用されるほど粉砕能力が高いため短時間で粉砕できるが、粉砕してはいけない土壌中に含まれる粒径 2mm 以上の礫まで粉砕をしてしまう可能性がある。また、この激しい衝突や摩擦の運動エネルギーが熱エネルギーに変換されて試料を変質させ分析結果に影響することがある。さらに、粉砕後の試料を容器から取り出して、ボールと土壌を選別する作業と、土壌の粒径を揃えるための篩分け作業が別途必要なことから、作業性が悪く土壌の粉砕に使用されることは多くない。

遊星式ロッドミル

土壌汚染問題の拡大にともなう分析試料数の増大から、粉砕プロセスにおける作業性の向上と作業環境の改善が求められた。そして、従来のロッドミル式土壌粉砕装置の欠点を克服した図 1.9 の遊星式ロッドミルが開発された。この遊星式ロッドミルは、粉砕プロセスで発生する土埃を外部へ漏出しない密閉された粉砕容器を使用する粉砕装置である。装置の仕様を表 1.4 に示す。



図 1.9 遊星式ロッドミル

表 1.4 遊星式ロッドミル仕様

遊星式ロッドミル仕様	
外形寸法	W750, D670, H700 mm
重 量	約 160 kg
粉砕容器	4 個まで取付可能
粉砕容器寸法	直径 150 mm、高さ 200 mm

粉碎と篩分けが同時にできる容器の考案

遊星式ロッドミルは、遊星式回転機構と粉碎ロッドで土壌を断片化するユニークな組合せの装置である。遊星式ロッドミルが従来の粉碎装置の問題点を解決した方法と、粉碎装置としての能力について以下に詳述する。

遊星式ロッドミルの粉碎容器は、粉碎プロセスにおける土埃対策として粉碎容器外に一切土埃を漏出することがない密閉式であり、さらに土壌の粉碎と篩分けを同時に可能とした。この容器の開発構想段階で考案した構造を図 1.10 に示す。粉碎する土壌は上容器を逆さにして入れる。また、粉碎媒体として粉碎ロッドも 2 本入れる。その容器に直径 2 mm 以下の土粒子が通過する円孔篩を取り付けて、さらに下容器を取り付けて、粉碎する土壌が入った容器が上部になるよう容器全体を反転させて、遊星式ロッドミルに取り付ける。遊星式ロッドミルの遊星回転機構により、容器内の土壌は粉碎ロッドにより断片化され、上容器と下容器の間にある直径 2 mm の円孔を有する篩を通過した直径 2 mm 以下の土粒子のみが下容器で回収できる仕組みである。

この容器の材質はポリプロピレンである。その理由のひとつとして、土埃を容器外に漏出しないためには容器の寸法精度が求められたからである。試作段階では高精度な切削加工による ABS 樹脂容器を製作したが、粉碎時の振動影響などによる容器と篩の接合面からのごく少量な漏出を止めるためにパッキンなども工夫してみたが完全に漏出を止めることは困難であった。しかし、その後、試作と改良を重ねた結果、金型射出成型の成型条件の厳格化による寸法精度の向上と、容器材質をポリプロピレン樹脂にすることで柔軟で滑らかな勘合性と上容器を2重にすることでパッキンなど一切使用することなく土埃の漏出を止めることができた。もう一つの理由は、容器として重要なポイントは粉碎プロセスにおいてコンタミの影響をいかにして防ぐかである。一度使用した容器は洗浄して次の試料を処理しなければならない。一組の容器を粉碎後に洗浄して乾燥させて次の試料を粉碎することは非効率的である。しかし、金型射出成型による容器製作は安価で精度のよい容器を大量生産することができた。これによりユーザーは検体数に合わせた数量の容器を準備することができるようになった。また、粉碎と篩分け工程終了後に使用した容器を一括して洗浄することで、次の試料の処理に備えることもでき効率的な容器の運用が可能となった。

なお、開発段階で考案したこの粉碎と篩分けが同時にできる容器構造と土壌の粉碎方式は特許第 5055524 号(2012 年 8 月 10 日)として登録済みである。

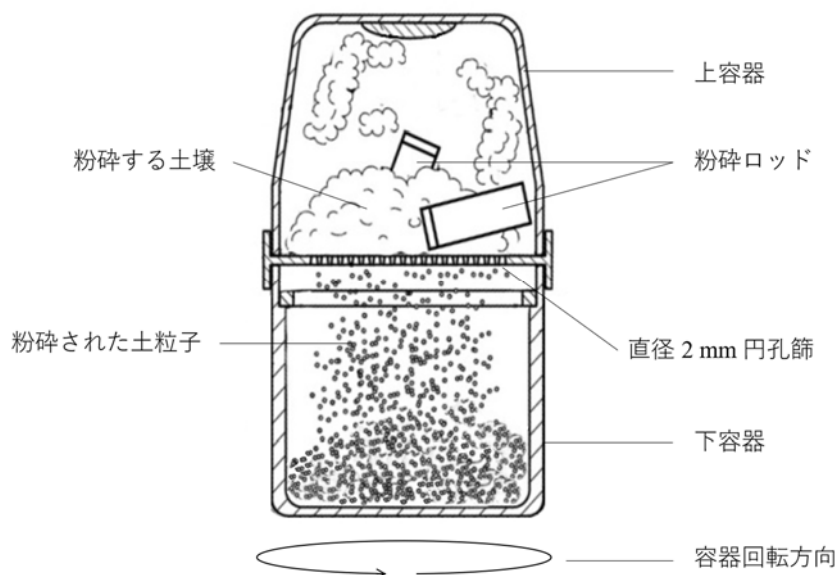


図 1.10 開発構想段階での粉碎と篩分けが同時にできる容器の構造

粉碎ロッドのコンタミ防止と洗浄対策

次にコンタミの影響として考えられる要因として、粉碎プロセスにおいて土壌や粉碎ロッドとの摩擦により容器や粉碎ロッドが削られて混入することを想定しなければならない。分析値への影響として特に注意が必要なのは土壌汚染調査に多い重金属分析や、農地の化学性分析における測定対象分析元素との関係である。粉碎容器の材質は土壌分析において分析対象元素ではない材質としてポリプロピレン製が採用された。同様に粉碎ロッドに使用するモリブデン鋼もポリプロピレン製の容器に封入し摩耗によるコンタミの影響を回避した。

図 1.11 に粉碎ロッドの構造と組立方法を示す。粉碎ロッドの外形寸法は直径 18 mm、長さ 50 mm で重量は 0.53 N である。この粉碎ロッドの組立方法は、ポリプロピレン製の口

ッド容器の中に、モリブデン鋼で作られたロッドを挿入し、ポリプロピレン製のキャップを圧入(叩き込む)して密封する。なお、粉碎ロッドは、粉碎に使用した後に、毎回洗浄をするため粉碎ロッド容器内部へ水が浸入しないようにキャップを圧入するときポリプロピレン材の接着に適した難接着材料用接着剤を、キャップ及び粉碎ロッド容器の外周に出ないように粉碎ロッド容器の凸部のみに塗布して接着した。これは、コンタミの影響を防ぐため粉碎中に接着剤が土壌と接触しないようにするためでもある。

粉碎ロッド容器の密封性(防水性能)を確認するため、粉碎ロッド容器を試作し、組立完了から接着が完了するまで 24 時間以上経過させた後に水没実験をした。また、同時に接着剤の選定のためセメダイン社製(商品名 PPX)とコニシ社製(商品名 GP クリヤー) 2 種類で試作容器各 4 本、合計 8 本を接着し比較実験をした。実験方法として、8 本を水位 7 cm の水に 24 時間水没させて、粉碎ロッド容器内に水の浸入がないことを目視で確認した。次に、図 1.12 に示す加圧容器に同じく水位 7 cm の水に粉碎ロッドを水没させた状態で 24 時間 98 kPa で加圧した。

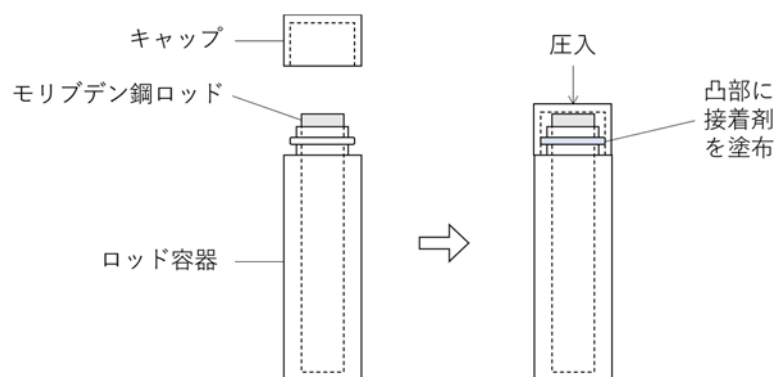


図 1.11 粉碎ロッド構造と組立方法

水没及び加圧実験により、8 本すべてにおいて粉碎ロッド容器内への目視による水の浸入は確認できなかった。図 1.13 に加圧方式による水没実験後の粉碎ロッドを示す。この結果、粉碎ロッド構造と組立方法による密封性(防水性能)に問題はないことを確認し

た。しかし、使用する接着剤として GP クリヤーは非常に粘性が高く作業性が悪い。このことから、接着剤は PPX を採用することにした。



図 1.12 加圧方式による粉碎ロッド容器の密封性実験



図 1.13 加圧方式による水没実験後の粉碎ロッド容器

円孔篩の粒子回収率の確認

実際に粉砕する土壌は様々な粒径の土粒が混在している。粉砕プロセスにおいて断片化された土粒子から求める粒径 2 mm 以下の土粒子に分級しなければならない。分級には粉砕容器に取り付けた直径 150 mm に 733 個円孔を有する篩を用いる。この篩を通過した粒径 2 mm 以下の土粒子を下容器に回収する構造とした。しかし、ここで懸念された問題点は、粒径の大きな土粒が円孔篩表面を覆い、小さい粒径の土が、円孔篩を通過して下容器に落下することを阻害するのではないかという点であった。この点を解決するために、粒子径の異なる土壌の代わりにガラスビーズを使用したモデル化実験で、粉砕容器に取り付けた円孔篩で求める粒径 2 mm 以下の粒子が通過できるかを確認した。実験方法は、市販で粒径が規定されているガラスビーズで異なる粒径の3種類を使用して粒径 2 mm 未満のガラスビーズの投入量 (m_b) と、円孔篩通過後の回収量 (m_x) から回収率を調べた。

ガラスビーズは表 1.5 に示すように粒径を 3 グループに分級して使用した。この 3 種類のビーズを A から D までの 4 種類の組合せと混合量で粉砕容器 4 個に投入し、開発した装置で水平方向に 407 rpm で 30 秒間水平回転した。その後、下容器に回収できたガラスビーズの質量を計測した。粒径 2 mm 未満のガラスビーズの回収率は各々の組み合わせで 3 回測定した平均値である。実験結果を表 1.6 に示す。なお、この時にガラスビーズを破壊しないように粉砕ロッドは使用していない。粒径 2 mm 以上のガラスビーズは篩を通過することなく粒径 2 mm 以下のガラスビーズの殆どが篩を通過して下容器に落ちた。

この結果、実験前に懸念した異なる粒径の土粒でも、ガラスビーズのように求める粒径 2 mm 以下に断片化することができれば粉砕容器を回転させるだけで求める粒径 2 mm 以下の粒子が円孔篩を通過して下容器に回収できることが確認できた。粒径 2 mm 以下のみのガラスビーズでの実験で回収率が 100 未満の場合があるが、これは容器の回転力により篩の円孔を通過できずに弾き飛ばされたものが篩の上に残ったものと考えられる。また、2 mm 以上のガラスビーズを混合した場合は、ガラスビーズの間に 2 mm 以下のガラスビーズが残っていたものがあると考えられる。

表 1.5 グループ分けしたガラスビーズ粒径

グループ名	GB-1	GB-2	GB-3
ガラスビーズの粒径幅	1.0 ~ 1.4 mm 未満	1.5 ~ 2.0 mm 未満	2.5 ~ 3.5 mm 未満

表 1.6 ガラスビーズの組合せ投入量と回収率

組合せ	GB-1の投入量 $\times 10^{-3}$ kg	GB-2の投入量 $\times 10^{-3}$ kg	GB-3の投入量 $\times 10^{-3}$ kg	回収率 $= \frac{m_x}{m_b} \times 100$
A-1	165	165	-	98.0
A-2	250	250	-	94.0
B-1	165	-	165	100
B-2	250	-	250	99.0
C-1	-	165	165	98.0
C-2	-	250	250	93.0
D-1	110	110	110	99.0
D-2	165	165	165	99.0

粉砕能力と粉砕に要する時間の確認

遊星式ロッドミルの粉砕能力を確認するため金型射出成型で製作したポリプロピレン製とABS樹脂で試作した2種類の粉砕容器と粉砕ロッドを使い、土粒の断片化に要する時間を確認した。実験に使用した土粒は固い団粒構造があり、土粒を形成する土粒子の粒径が殆ど2 mm以下に調整されている市販で入手しやすい赤玉土(火山灰に由来する関東ローム層に広く分布している赤土)を使用した。

実験では、材質の異なる2種類の粉砕容器に 150×10^{-3} kg の土粒 (m) と粉砕ロッドを2本入れ遊星式ロッドミルで回転を加えて断片化を行い、運転開始後から30秒毎に下容器で採取できた土粒子の質量 (m_s) を計測し、土粒の投入量との比率を断片化率とした。この断片化率が高いほど投入した土粒が断片化されたことであり、すなわち、粉砕能力を示している。

実験は5回同じ方法で繰り返し、その平均値を表1.7に示す。この結果、断片化に要した時間は2分間で投入した土粒の質量の95%以上が粒径2mm以下に断片化され下容器に回収されたことが確認された。また、容器材質としてポリプロピレン製の容器も試作容器と同等の能力であることが確認された。

表 1.7 粉砕容器 2 種類による断片化実験

粉砕容器材質	運転開始後の経過時間と断片化率% (断片化率 = $\frac{m_s}{m} \times 100$)			
	30 秒	60 秒	90 秒	120 秒
ポリプロピレン	39.9	79.1	94.0	95.9
ABS	31.9	76.8	93.1	98.7

遊星式ロッドミルの製品化までの経緯

遊星式ロッドミルは2009年後半から製品コンセプト作りを開始して、2010年5月埼玉県次世代産業参入支援事業費補助金による試作開発資金補助を申請し同年7月に交付決定された。開発テーマは「環境分析土壌の無粉塵型自動粉砕篩い分け装置の開発」である。また、同年8月10日に特許「土壌ふるい器」を申請した(特許査定2012年6月22日)。この補助金を基に試作機を2011年1月に完成させた。その後、粉砕能力、粉砕容器、粉砕ロッドなどについて前述のようないくつもの実験を経て完成した遊星式ロッドミルは、実際の土壌においても開発コンセプトである土埃を出すことなく短時間(2分間程度)で粉砕と篩分が可能であった。

こうして完成した遊星式ロッドミルは、2012年3月に1号機を納入以来、これまでに公的研究機関(農業試験場・大学)に14台、民間環境調査会社(JA含む)に25台、海外農業試験場に1台の合計40台が納入されている。いずれも年間に多数の土壌検体を調査するために粉砕プロセスで多くの労力を要していたユーザーが中心となっている。

1.2 本研究の目的と意義

土粒の粉砕を含め、種々の材料の粉砕には圧縮・衝撃・せん断・摩耗などの複合的な力により破壊され、粉砕に要するエネルギーと粒度分布との関係についてはこれまで様々な研究がなされているが、粉砕エネルギー効率は低いといわれている。しかし、多くの研究にもかかわらず、その原因がどこにあるのか未知の部分が多い。また、シミュレーション技術により粉砕過程における粉砕試料の挙動や、粉砕に関わる様々な因子の条件を変えながら粉砕機の性能を最適化する離散要素法 (Discrete Element Method, DEM) シミュレーションによる媒体攪拌の媒体挙動解析[7]などが広く行われているが、実際に断片化プロセスを可視化した例は少ない。

本研究で用いる遊星式ロッドミルは、土の粉砕プロセス中に土埃が飛散しない密閉された粉砕容器において、粉砕と篩分けを同時に可能とするアイデアで特許を取得した装置である。また、国内唯一の粉砕と篩分けが同時にできる土壌専用の粉砕装置である(海外にも同等の製品を見ない)。前述のようにこの遊星式ロッドミルは、実使用上、従来装置より優れた性能を有しているが、その断片化メカニズムに関しては不明なままである。

本研究では、この遊星式ロッドミルの粉砕プロセスにおける土粒の粉砕メカニズムについて明らかにすることにより、さらに効率の良い装置開発につなげることを目的としている。そこで本研究は、粉砕プロセスにおける粉砕装置から与えられる複合的な粉砕力と土粒の結合力を低下させ破壊に至らしめる力の関係性について明らかにするため、土粒の断片化プロセスの詳細を可視化し分析した。また、垂直振動実験と往復摩耗実験により土粒に作用する単一応力による断片化メカニズムを調べ考察した。さらに、土粒に代わるソイルペレットを製作し断片化プロセスのモデル化実験により、さらに詳しい土粒の粉砕メカニズムを明らかにした。

1.3 本論文の概要

本論文は、以下の5章から構成されている。

- 第1章 序論
- 第2章 遊星式ロッドミルによる土粒の粉砕過程
- 第3章 土粒の粉砕の基本的メカニズム
- 第4章 土粒の粉砕メカニズム
- 第5章 結論

第2章以降の内容は以下のとおりである。

第2章では、遊星式ロッドミルで土粒がどのように粉砕されるのかについて、粉砕ロッドの大きさと数量による粉砕能力の関係性について述べる。また、土粒を破壊する応力の測定と、加速度計による粉砕容器内の粉砕ロッドが土粒に与える力の計測実験と結果について述べる。さらに、粉砕ロッドと粉砕される土粒の挙動を容器上部に取り付け高速度カメラを用いて粉砕過程を撮影し分析した結果について述べる。

第3章では、可視化実験で明らかにできなかった容器内での粉砕の基本的メカニズムを解明するための基礎的な実験方法について述べる。また、考案した土粒の垂直振動実験と往復摩耗実験による圧縮・せん断応力実験の結果について述べる。

第4章では、土粒の粉砕メカニズムを明らかにするため、土粒の破壊プロセスをより詳しく調べた。ここでは実験に使用する、土粒に代わる同一質量・サイズのソイルペレットの製作と実験方法について述べる。また、このソイルペレットの均一性を検証する。さらにこのソイルペレットによる垂直圧縮荷重実験と、段階的に荷重を加えた圧縮摩耗実験による断片化プロセスを観察した結果について述べる。

第5章では、本論文で得られた成果を統括するとともに、今後の展望について述べている。

参考文献

- [1] 藤原俊六郎, 2013年, 土壌の基礎知識, 農山漁村文化協会, p1, p11.
- [2] 環境省, 環境白書(平成7年度版), 第3章, 第1節, 2 人間活動と土の関わり.
- [3] Bond, F.C. (1952) The Third Theory of Comminution, Trans. AIME., Min. Eng., 193, 484-494.
- [4] 広部良輔, 1976年, 土粒子の結合力を計算する新しい式, 国立防災科学技術センター研究報告, 第13号, p31-34.
- [5] 井上 外志雄, 1985年, 何が粉碎効率の向上に寄与するか?, 粉体工学会誌, Vol. 22, No. 6, p 403-408.
- [6] Hardin. B. O. (1985) Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111, Issue 10.
- [7] Cundall. P.A. and Strack. O.D.L. (1979) Geotechnique, 29,47-65.

第2章 遊星式ロッドミルによる土粒の粉砕過程

2.1 はじめに

土壌より硬い岩石やコンクリート片などを粉砕する場合は、大きな圧縮力を用いたジョークラッシャー、コーンクラッシャー、エッジランナー、ロールクラッシャー、ロータリークラッシャー、ハンマークラッシャーなど多種多様な装置がある。土壌を粉砕する方法として乳鉢と乳棒を使用して人力で粉砕する方法や、ロッドやボールを粉砕媒体として使用して機械で粉砕する方法がある。分析会社や各種研究所で土壌試料を分析する場合、土壌は分析マニュアルに従って直径を2 mm未満に断片化する必要がある。

粉砕装置の性能を改善する際の難点の1つは、ボール等の粉砕媒体と粉砕容器内の土粒との相互作用による断片化メカニズムが完全に理解されていないことである。

Pazeshらは(2017)遊星ボールミル(PM100、Retsch Co.)を使用して、さまざまな粉砕条件でボールミル粉砕中の α -ラクトース-水和物粒子の粉砕とアモルファス化の関係を研究した[1]。粉砕装置内の容器は、水平面で太陽歯車が1回転する毎に2回転するこの動きにより、摩擦力と衝撃力の間に複雑な相互作用が生まれる。彼らは、粒子サイズが時間の指数関数として減少することを発見した。粉砕容器内で何が起きているのかを理解するため、井上らと(1999) Sinnottらは(2017)数値シミュレーションを使用して、水平軸で回転する粉砕容器内のボールの動きを調査した[2][3]。ボールの軌道は、遠心力と重力の比率に依存することがわかった。Deyらは(2013)異なる供給速度と回転速度によるハンマーミルでの石炭と鉄の材料の粉砕について研究をした[4]。そのハンマーミルは、粉砕物に対して、圧縮、衝撃、せん断力を使用して粉砕する。こうした乾式粉砕機を使用する産業では、通常屋外で粉砕が行われて粉砕装置から生じる土埃は環境汚染を引き起こしている。Wheeldonらは(2015)振り子式のローラーミルでの断片化プロセスを調査した[5]。このような粉砕装置では、粉砕対象物は粉砕リングと振り子ロッドに取り付けられたローラーとの隙間で生成される圧縮力と接線力で破壊される。ローラーの力は、その回転運動による遠心力から生成されるための粉砕力は角速度が重要である。

Jankovic (2001) は、摩耗が破壊の基本モードである場合の縦型攪拌ミルと媒体の応力強度を分析した。Hasan らは (2017)、エネルギー消費を削減するために、いくつかの条件下で破損機能を調査した [6] [7]。

遊星式ロッドミルの性能は、従来の機械と比較して十分満足のいくものであるが、粉碎容器内部での土粒の断片化メカニズムは複雑で未解明である。したがって、本章では、より良いパフォーマンスで将来の装置を開発するための指標を得るために、粉碎容器の中で何が起こるかの観察と、装置によって生成される力の大きさを測定した。土粒を破壊する過程を調査するために、容器の中で起きている土粒の硬い塊の断片化シーケンスを高速動画で観察した。また、遊星式ロッドミルによって生成された力の成分を測定し、それらの大きさを調査した。高速度カメラで撮影された動画を分析すると興味深いことに、粉碎ロッドは土粒と一緒に容器の内壁に沿って回転をしていた。粉碎ロッドが土粒と衝突して断片化される明確なシーンは 1 分間に数回程度しかなかった。しかし、土粒の硬い塊が突然、小片に断片化することがわかった。これは遊星式ロッドミルが起動後、大きなエネルギーや衝撃力を土粒に供給しておらず、一定時間が経過する間に、粉碎ロッドが土粒に接触・衝突を頻繁に繰り返すことで土粒が断片化するための破壊的なエネルギーを蓄積していることを意味している。したがって、粉碎容器の土粒と粉碎ロッドの時折みられる粉碎に至る衝突だけでは、土粒の突然の粉碎につながらないと考えられる。これは、近い将来に装置のパフォーマンスを向上させるためのより良い設計指標が見つかることを示唆している。

遊星式ロッドミルの機構

第1章で紹介した遊星式ロッドミル(特許第5055524)について詳細な内容を表2.1の仕様と図2.1で示す。

表2.1 遊星式ロッドミルの主な仕様

外形寸法	W750 × D670 × H700 mm	回転方式	遊星回転式
電源電圧	AC 100 V (50/60 Hz)	重量	160 kgf
電流値	最大 2.5 A	粉碎時間	30 ~ 120 秒
使用温度範囲	20°C ~ 30°C	モーター回転数	100 ~ 800
使用湿度範囲	30% ~ 70 % RH	減速比	1:2



図2.1 遊星式ロッドミル, 左図は防護カバーを閉じた状態, 右図は防護カバーが開いた状態

環境分析や研究目的で土壌を分析する場合、粒径が2 mm以下の土粒子を使用する。この遊星式ロッドミルによる土壌の粉碎と篩分けの操作手順は次の通りとなる。

- 1) サンプルした土壌を風乾させ、粉碎ロッド 2 本と一緒に図 2.2 に示す粉碎容器に投入する。
- 2) 遊星式ロッドミルの防護カバーを開き、粉碎容器をターンテーブルに付いた容器取付台にセットする。粉碎容器は最大 4 個をセットすることができる。
- 3) 防護カバーを閉じる。防護カバーは作業者が運転中に装置内に誤って手を入れないように防御し粉碎中の騒音を抑制する。
- 4) 運転操作表示パネルで粉碎する時間を設定し運転開始キーを押すと運転表示ランプが点灯しターンテーブルが回転を始める。万一、緊急停止をしたい場合は、装置の前面にある非常停止ボタンを押すと直ちに停止する。
- 5) ターンテーブルは図 2.3 に示す遊星方式で時計回りに回転し、逆に容器取付台は反時計回りに回転する。この機構により粉碎容器の中の土壌と粉碎ロッドには水平面の回転だけよりも複雑な回転力が与えられ土壌が粉碎される。粉碎中の装置内部の様子は防護カバーにある透明板を通して見るができるが、粉碎容器の中は見ることができない。
- 6) 粉碎容器の中で断片化された粒径が 2 mm 以下の土粒子が篩を通過して下容器に落ちる。このとき、粉碎容器から土埃は一切容器の外に出ない。

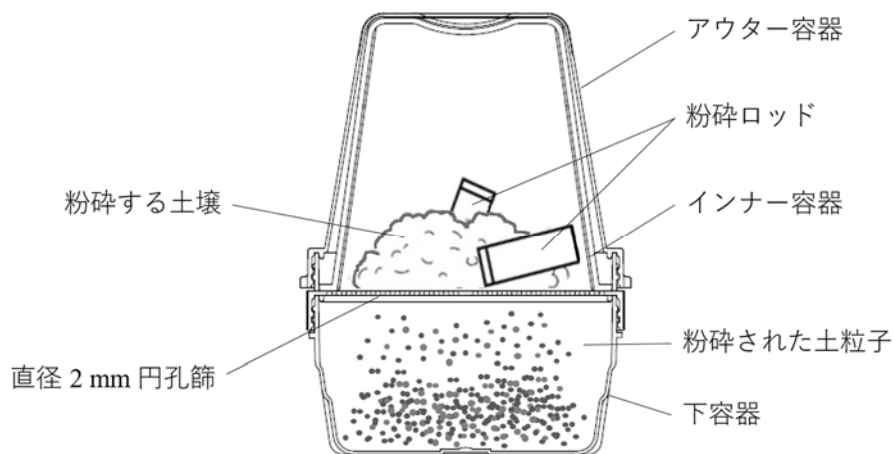


図 2.2 粉碎と篩分けが同時にできる粉碎容器

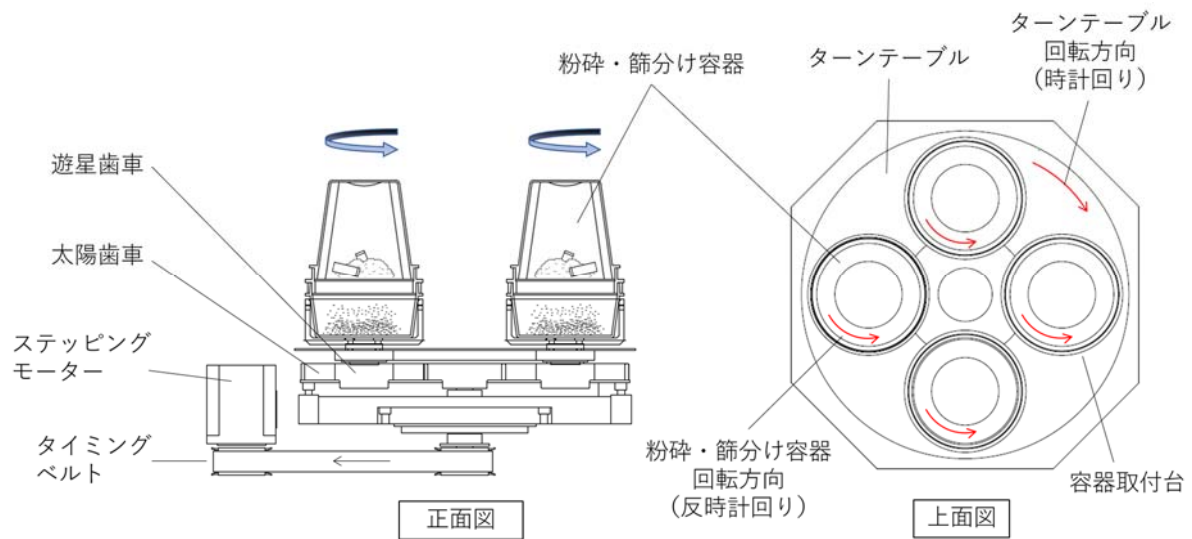


図 2.3 遊星回転機構によるターンテーブルと粉碎容器取付台の回転方向

2.2 実験方法と装置

粉砕ロッドと粉砕能力

粉砕ロッドと粉砕する土粒とは直接相互作用するため、粉砕能力を向上させるには最適な粉砕ロッドのサイズと数量を決める必要がある。遊星式ロッドミルで使用しているモリブデン鋼を芯材とした粉砕ロッドを図 2.4 に示す。粉砕ロッドは直径 18 mm、長さ 50 mm で、容器の材質はポリプロピレン製で、芯材と合わせた重量は 60×10^{-3} kg である。

製品化した遊星式ロッドミルの粉砕ロッドが最適であるかを検証するため異なる粉砕ロッドサイズを使用して実験をした。実験では、粉砕ロッドの直径は 18 mm で、長さ 38 mm, 45 mm, 50 mm の 3 種類を使用して遊星式ロッドミルで回転を加えて投入した土粒を断片化し、運転開始からの 30 秒、60 秒、90 秒の経過時間毎に下容器で回収できた土粒子の質量を計測し、土粒の投入量との比率を断片化率として確認した。実験結果を図 2.5 に示す。グラフの縦軸は下容器で回収できた土粒の断片化率で、横軸は運転開始後の経過時間である。実験で得られた断片化した土粒子の量を比較すると、図 2.4 に示すように長さ 45 mm が最大であった。これは粉砕時に最も早く土粒を断片化することができること

を示唆している。なお、長さ 38 mm, 45 mm の粉碎ロッドの容器には ABS 樹脂を使用した。序章で述べたように、ポリプロピレンと ABS の材質の違いによる断片化率は同等であることを前提としている。

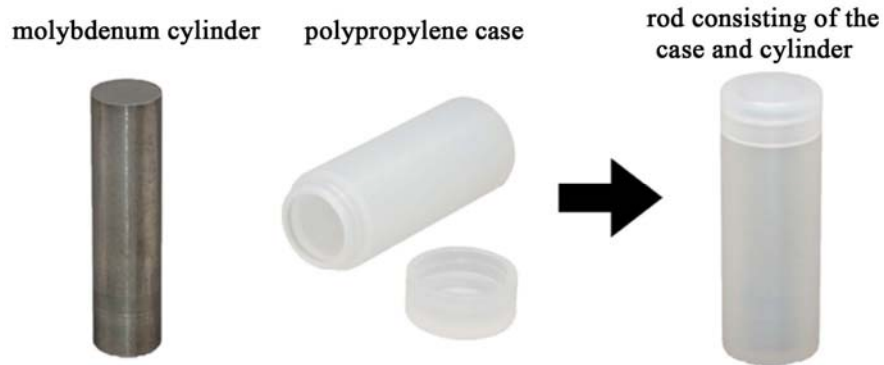


図 2.4 モリブデン鋼を芯材とした粉碎ロッド

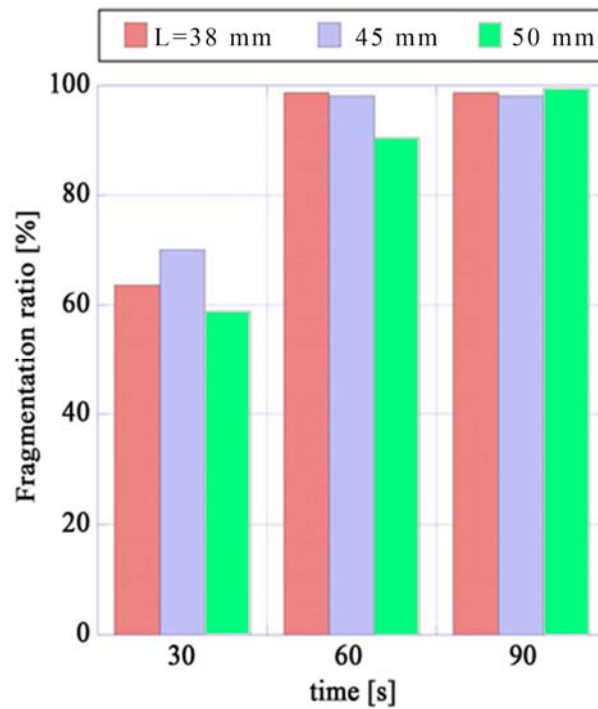


図 2.5 異なるサイズの粉碎ロッドによる断片化した土粒の回収率

さらに、粉碎ロッドの直径は 18 mm で揃え、粉碎ロッドの長さを 58 mm と 70 mm を加えた 5 種類と、粉碎ロッド容器の有無と、使用する数量も変化させ運転開始からの 60 秒経過後に下容器で回収できた土粒子の質量を計測し、投入量との比率を断片化率として計算した。

図 2.6 に実験結果を示す。グラフの縦軸は下容器で回収できた土粒子の断片化率で、横軸の各列の項目は、投入する粉碎ロッドの数量－粉碎ロッドの長さ－容器の材質－粉碎土粒の大きさを 1 行で記載している。なお、横軸左から 9～12 列目は粉碎ロッド容器の材質と芯材の材質を容器材質の前に加えて記載している。横軸左から 9～12 列目以外の粉碎ロッドは粉碎ロッド容器を使用していない。ステンレス製の丸棒をそのまま使用した。また、この実験に使用した土粒の大きさとは、市販されている赤玉土(関東平野に広く分布している火山灰由来の土壌で、関東ローム層の赤土から作られている)に記載されている粒(土粒)のサイズで、L(大粒) = 12 ~ 20 mm, M(中粒) = 6.0 ~ 12 mm, S(小粒) = 3.0 ~ 6.0 mm のことである。

実験の結果、投入する長さ 38 mm の粉碎ロッドの数量を 1 本から 4 本に増加させると断片化率が増加した。しかし、それ以上に粉碎ロッド長さ 50 mm で、粉碎ロッド本数が 2 本のとき最高のパフォーマンスを得られた。

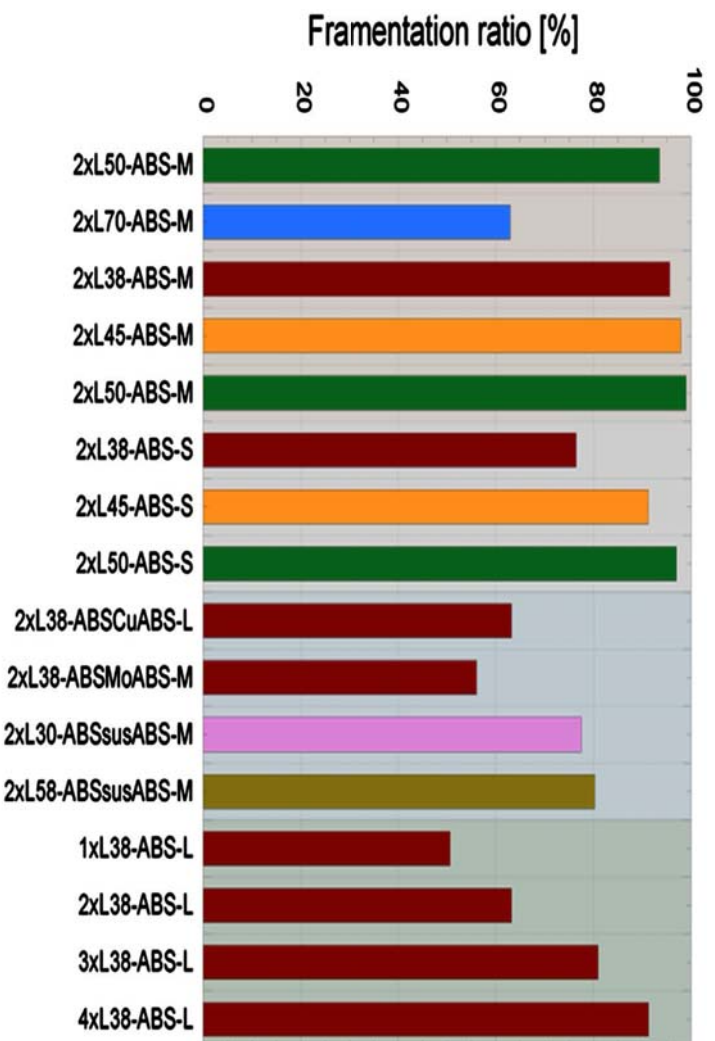


図 2.6 各種パラメータによる断片化率の比較, チャートの同色の棒グラフは粉砕ロッドの長さと同じことを示している

従来の粉砕装置では、粉砕効率を上げるためには粉砕媒体としてロッドミル方式では多くのロッドを必要とし、ボールミル方式の場合は異なる直径の多くのボールを使用する必要があった。したがって、ロッド対土壌比またはボール対土壌比は、従来の機械の性能を決定する際の重要なパラメータであった。しかし、遊星式ロッドミルでは 2 本の短い粉砕ロッドしか必要としない。これは、機械を駆動する際のエネルギー節約につながり、粉砕容器を小型化できるという大きな利点になる。また、繰り返し使用する時に必要な粉砕容器や粉砕ロッドを洗浄する際にも有利である。さらに、より粉砕効率を高めるために、ターンテーブルの傾斜角度を変化させて、断片化率を調べた結果、20°の傾斜角度で最も良いパフォーマンスを得た。これは、図 2.7 に示すように、水平軸のとは別の回転運動が加わり、水平面ではなく複雑な軌道に沿って粉砕容器内部にある土壌と粉砕ロッドは移動することになる。

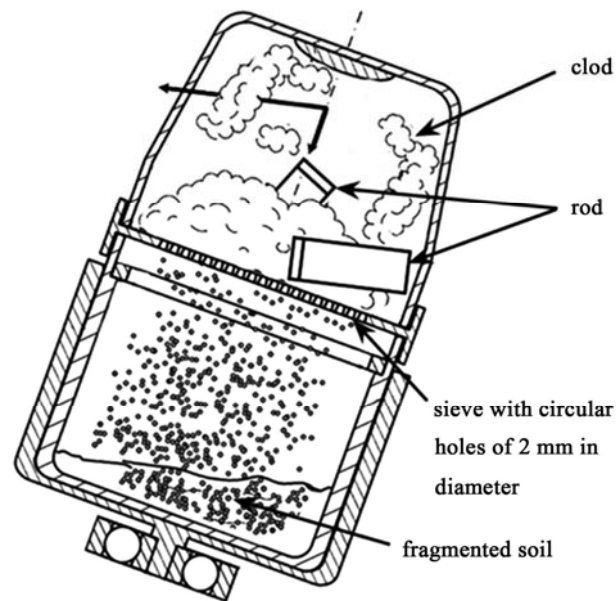


図 2.7 粉碎容器にある土壌と粉碎ロッドの動き

粉碎容器内の粉碎過程の可視化

粉碎容器の中で何が起きているのかを確認するために、図 2.8 に示すように粉碎容器の蓋に小型で高速撮影が可能な CCD カメラを取り付け、粉碎中の土粒と粉碎ロッドの挙動を動画撮影した。なお、粉碎容器の内側は、同じく蓋に取り付けられた LED ライトで照らされている。したがって、粉碎容器が複雑に回転していても、固定座標で容器の中の挙動を観察することができる。そして、粉碎中の土粒と粉碎ロッドの軌跡は、容器に対するそれらの動きの結果として観察された。

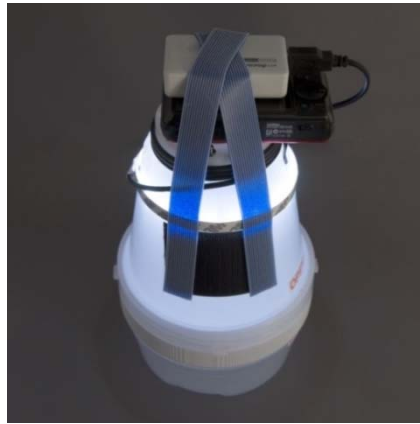


図 2.8 粉碎容器に取り付けた高速度カメラと LED 照明

粉碎容器内の加速度の測定

遊星式ロッドミルのターンテーブルで複雑な回転をする粉碎容器内部には、 x 、 y 、 z の 3 方向にそれぞれの α_x 、 α_y 、 α_z の力が働いている。それをあきらかにするため、図 2.9 に示すように粉碎容器の円孔篩の端に小型の加速度計 (AccStick6, SysCom Co. 製) を取り付けて測定した。ここで、 x は周方向、 y は径方向、 z は垂直方向を示している。



図 2.9 円孔篩に取り付けた加速度計

圧縮装置による土粒のひずみ測定

土粒の断片化を考える場合、土粒がどの程度の外力が加わったときに、どの程度変形し、どの程度の力で破壊されるのかを知ることが重要になる。土粒が破壊されるアモルファス降伏点での力の大きさを理解することは、機械を改善するために重要である。降伏点での力の大きさは、土粒を破壊するために利用できる最大の力を示すからである。ひずみに対する力の関係は、図 2.10 に示す一軸圧縮試験装置 (Instron 5566) を使用して試験をした。適用したひずみ速度は 1 mm/min で、10 個の土粒サンプルを計測した。

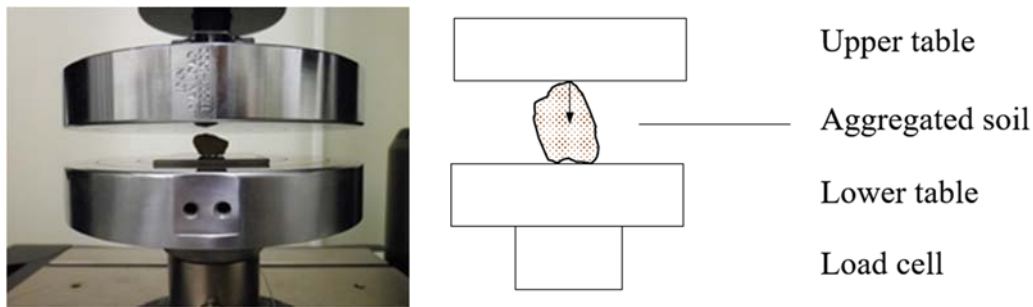


図 2.10 一軸圧縮試験装置 (Instron 5566) による土粒のひずみ測定,
左写真: Instron 5566 に土粒をセットした状態, 右図: 一軸圧縮試験装置の模式図

2.3 実験結果

2.3.1 粉碎容器内の粉碎過程の可視化

図 2.11 は、粉碎容器内の土粒の断片化プロセス開始から 60 秒までの動画から 10 秒毎に抽出された写真である。粉碎容器に投入した初期の土粒の量は $15 \times 10^{-2} \text{ kg}$ で、少なくとも遊星式ロッドミルの運転開始から 10 秒まで、ロッドは土粒とともに回転していた。それらは、互いに同じ距離で一緒に動くので、互いに衝突する可能性は低いように見えた。運転時間が 10 秒を超えると、20 秒の写真にあるように、視界が突然曇ってしまった。

これは、土粒の細かい土埃が摩擦により表面から剥離するためである。土粒の数は 30 秒から 40 秒でかなり減少した。つまり、土粒の断片化プロセスはこの期間中に突然進行している。その後、ほとんどの土粒は 40 秒後に消えた。

この動画に示された断片化プロセスは、粉碎ロッドが土粒を断片化し細かく砕く事象を明らかにしなかった。さらに、50 秒の写真にあるように、すべての土粒が消えるためには、何らかの断片化を起こすイベントが発生していなければならない。この期間に何が起こるかを確認したいが、細かい土粒子の土埃で視界が悪く見えないため、粉碎する土粒の量を減らして断片化プロセスを観察することにした。

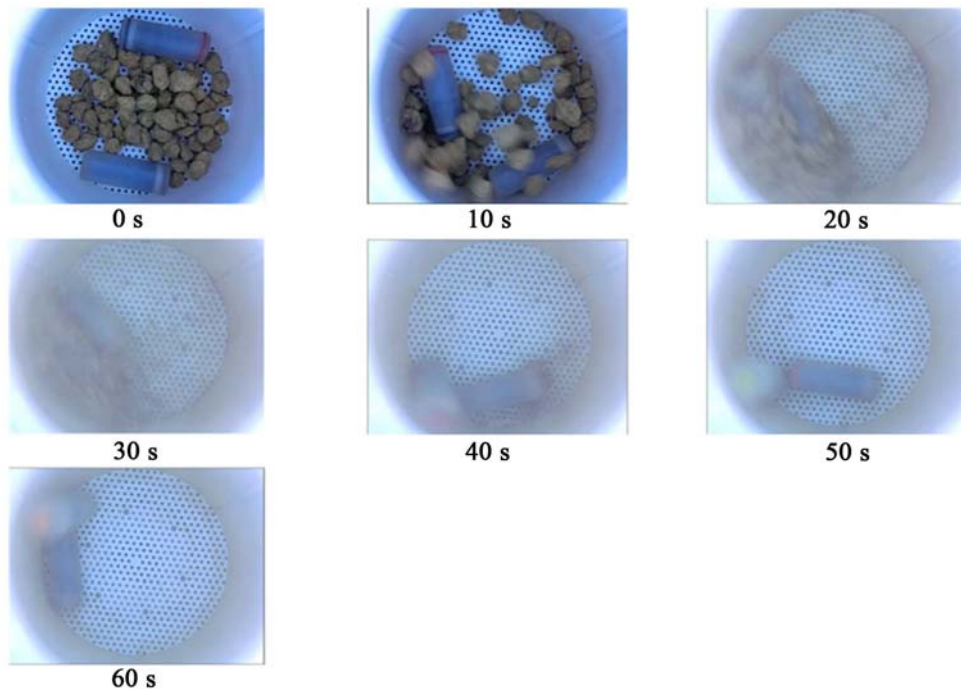


図 2.11 運転開始から 60 秒間の粉碎容器内の土粒の断片化

図 2.12 は、粉碎ロッドが土粒に衝突することによって発生する破壊イベントを示している。粉碎ロッドの側面ではなく端面が土粒にぶつかり、土粒が 2 つに分かれた。撮影動画を分析した結果、このように明確な粉碎パターンは頻繁に発生せず、1 分間に 1 回から数回程度しか見られなかった。この場合の破壊パターンは衝撃応力ではなく圧縮応力によ

って発生したと考えられる。粉碎ロッドと容器の内面との間で土粒が押し付けられると、その面積は狭く圧力は土粒の表面に集中する。それにより土粒は2つに分割された。一軸圧縮試験による破壊とは対照的に、衝撃圧縮による破壊の場合は小さな断片を生成している。粉碎ロッドは土粒のグループと一緒に容器内部を移動するため、粉碎ロッドの土粒に対する相対速度は小さい。ただし、この実験では粉碎ロッドと土粒の重量比が約半分であるため、相対速度が小さくても粉碎ロッドの運動量は土粒よりもはるかに大きくなっている。

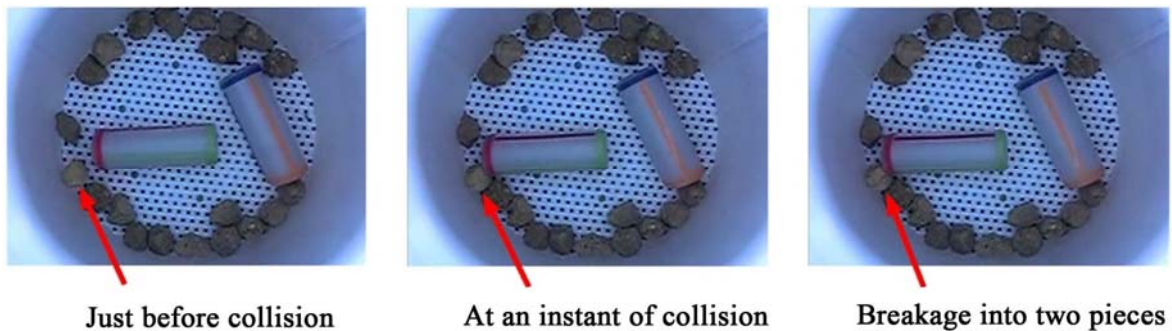


図 2.12 粉碎ロッドが土粒に衝突する破壊イベント

粉碎容器に取り付けた高速度カメラは粉碎ロッドと土粒の挙動として、粉碎ロッドが土粒をヒットしているところを捉えることができた。図 2.13 はその破壊イベントの例を示す。図中にマーキングされた赤い点と軌跡はターンテーブルの1回転中に追跡した同一土粒を示している。赤い点を結んだ赤い線の軌跡は単純な円ではない。これは、粉碎容器の土粒の位置の関数である非定常遠心力が土粒に作用していることを意味している。このように、各土粒は異なる経路を移動するため、容器内で異なる応力を受けることになる。粉碎ロッドや粉碎ボールなどの粉碎媒体を粉碎容器に入れなくも、各土粒は常に異なる方向からの不安定な応力を受けることになる。

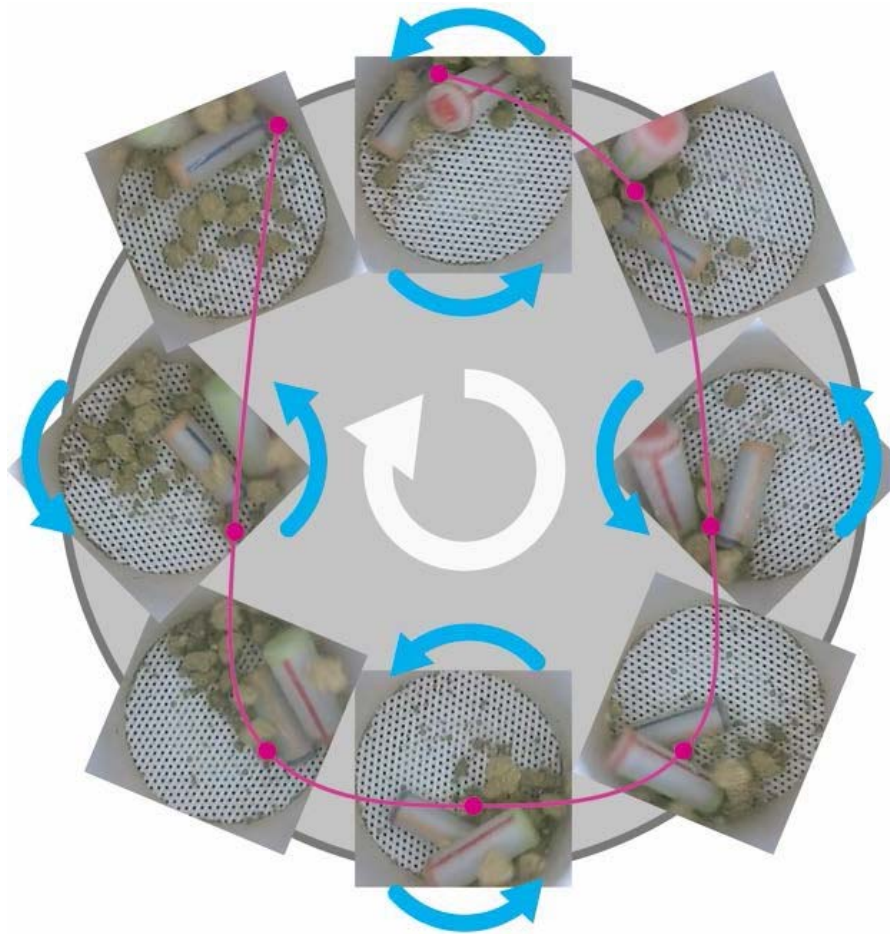


図 2.13 粉碎ロッドと土粒の破壊イベントの例

粉碎の3つの原因は、Littleら(2016)によって明らかにされた。以前の研究から抽出されたイベントを圧縮応力による粉碎、衝突による衝撃、およびせん断応力による摩耗に分類した[7]。Hasanら(2017)は、粉碎のこれらの原因が粉碎装置の中で単独で発生することは決してないことを示した[8]。アモルファス降伏点を超えると、前述の不安定な力により土粒が破壊される可能性がある。ただし、土粒が粉碎ロッドの存在なしに小さな断片に分割されることはない。したがって、粉碎ロッドとの接触・衝突は、土粒の破滅的な断片化を引き起こしていると考えられる。粉碎ロッドとの衝突により分離された土粒の形状は、図

2.12 と図 2.13 で考慮された圧縮荷重によって分離された土粒と同じ形状に見える。そのため、土粒がばらばらになった後、壊滅的な断片化が発生する可能性がある。

2.3.2 粉碎容器内の加速度の測定

粉碎容器に取り付けた加速度センサーによる計測により、容器内で生成された加速度の波形の例を図 2.14 に示す。 α_x の大きさの変化は -4.0 g から $+3.6\text{ g}$ 、 α_y の大きさの変化は -7.3 g から $+0.1\text{ g}$ 、 α_z の大きさの変化は $+0.8\text{ g}$ から $+1.4\text{ g}$ であった。ここで、 g は重力加速度の単位である。測定の結果、容器側壁に沿った接線力と側壁への圧縮力の大きさは同じ 7g のオーダーとなった。これを土粒に作用する力に変換すると、土粒の質量は $1 \times 10^{-3}\text{ kg}$ なので、 $1 \times 10^{-3} \times 7\text{g} \cong 69 \times 10^{-3}\text{ N}$ であることがわかった。この計算によると、質量が $60 \times 10^{-3}\text{ kg}$ の粉碎ロッドの力は 4.1 N となる。

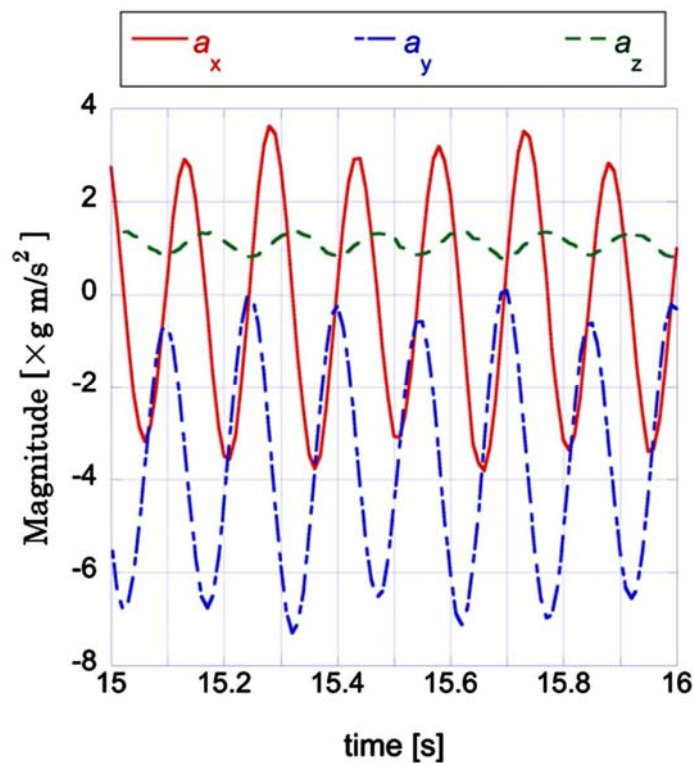


図 2.14 遊星式ロッドミルを運転中に粉碎容器で得られた加速度成分の波形

2.3.3 土粒の破壊プロセス中の応力変化

土粒を 10 個無作為に選び Instron 5566 を使用して力とひずみの関係が得られた。図 2.15 に示すように、土粒はサンプル毎に異なる波形を示した。これらのサンプルの共通の特徴は、最初のピークで土粒にクラックが見られるアモルファス降伏点を示し、2 番目のピークの後に土粒が細かく分割された。

2 番目のピークの大きさが最大の応力を示した。これら圧縮荷重の最大値の平均値は 52 N であった。圧縮荷重の最大値の平均は、粉碎ロッドによって与えられる遠心力の約 13 倍である。これは、粉碎ロッドが土粒に衝突する破壊イベントが観測された最大力を超える可能性を示している。

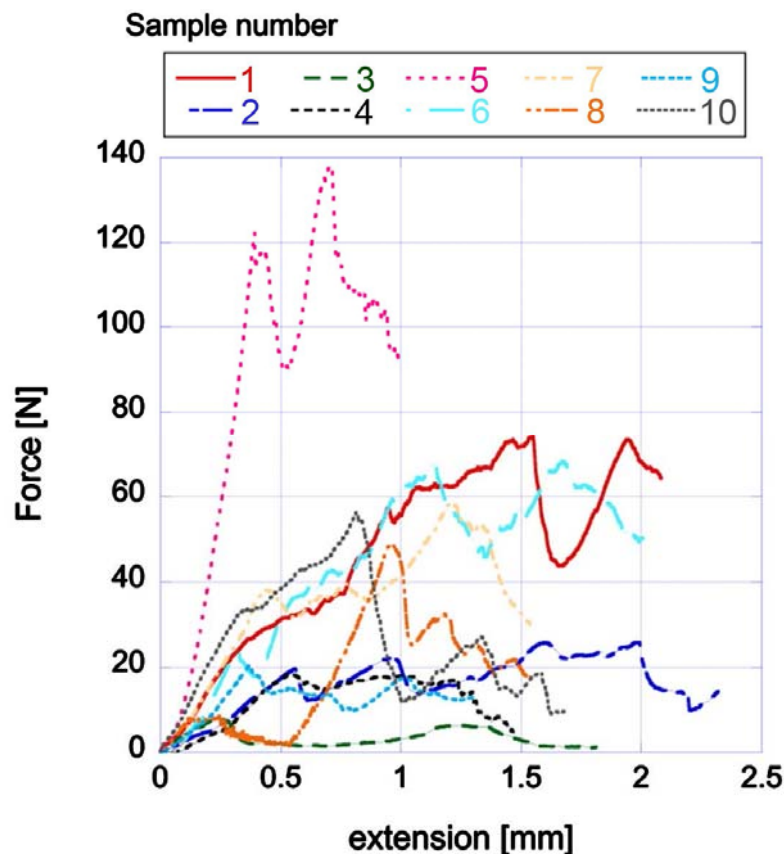


図 2.15 土粒の破壊プロセス中の応力変化

2.4 まとめ

粉碎作業効率を向上させた遊星式ロッドミルでは、土粒は2分以内に直径2 mm未満の細かい粒子に断片化され効率的に回収することができるようになった。この研究の目的の1つは、土粒の断片化プロセスを観察することにより、粉碎装置の性能を向上させることであった。粉碎プロセスは、遊星式ロッドミルの中で回転する粉碎容器に取り付けられた高速カメラを使用して実験的に視覚化された。遊星式ロッドミルでの土粒の断片化は、以前の研究で得られた断片化パターンに従って形態学的に考慮された。粉碎ロッドは粉碎容器内を土粒と一緒に移動していた。したがって、激しい衝突は土粒の破壊の主な原因であるとは考えられなかった。したがって、土粒が断片化するプロセスのシナリオは次のとおりである。粉碎ロッドの繰り返す接触・衝突により、土粒は表面が最初に削られ、その後壊れやすくなり壊滅的に断片化され、小さな破片になる可能性が高いと考えられる。この研究では、せん断応力による摩耗が断片化過程の初期段階であるように見えた。これは、細かい土粒子のために可視化した動画が曇っていたことから明らかである。土粒の表面は粉碎ロッドと容器により摩耗にさらされているため、細かな土粒子は土粒の表面から発生している。土粒の角のある表面は粉碎ロッドが接近して移動するため、粉碎ロッドが土粒に接触・衝突する可能性が多くあり、それにより最初に削られ、次に表面の土粒子が結合力から解放されるために土粒全体が壊れやすくなる。つまり、粉碎ロッドの不規則な動きが増え粉碎する土粒との接触・衝突の可能性を高めることで、粉碎ロッドによる圧縮力または衝撃力により、土粒は小さな断片に断片化しやすくなると考えられる。これは、近い将来粉碎装置のパフォーマンスをさらに改善するための装置の設計が改善できることを示唆している。

参考文献

- [1] Pazesh, S., Grasjo, J., Berggren, J. and Alderborn, G., (2017) Comminution Amorphisation Relationships during Ball Milling of Lactose at Different Milling Conditions. *International Journal of Pharmaceutics*, 528, 215-227.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.05.043>
- [2] Inoue, Y., Yokoyama, T., Tanaka, T. and Tsuji, Y. (1999) Three-Dimensional DEM Analysis of Collision Force in a Tumbling Ball Mill. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, 65, 1-7. (In Japanese)
<https://doi.org/10.1299/kikaic.65.1>
- [3] Sinnott, M.D., Cleary, P.W. and Morrison, R.D. (2017) Combined DEM and SPH Simulation of Overflow Ball Mill Discharge and Trommel Flow. *Minerals Engineering*, 108, 93-108. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.01.016>
- [4] Dey, S.K., Dey, S. and Das, A. (2013) Comminution Features in an Impact Hammer Mill. *Powder Technology*, 235, 914-920. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.12.003>
- [5] Wheeldon, M., Galk, J. and Wirth, K.E. (2015) Investigation of the Comminution Process in Pendular Roller Mills. *International Journal of Mineral Processing*, 136, 26-31. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2014.09.013>
- [6] Jankovic, A. (2001) Media Stress Intensity Analysis for Vertical Stirred Mills. *Minerals Engineering*, 14, 1177-1186. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(01\)00135-2](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(01)00135-2)
- [7] Little, L., Mainza, A.N., Becker, M. and Wiese, J.G. (2016) Using Mineralogical and Particle Shape Analysis to Investigate Enhanced Mineral Liberation through Phase Boundary Fracture. *Powder Technology*, 301, 794-804.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.06.052>
- [8] Hasan, M., Palaniandy, S., Hilden, M. and Powell, M. (2017) Calculating Breakage Parameters of a Batch Vertical Stirred Mill. *Minerals Engineering*, 111, 229-237.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.06.024>

第3章 土粒の粉碎の基本的メカニズム

3.1 はじめに

土壌の粉碎にはいくつかの方法が考案されている。乳棒、乳鉢、ふるいなど人力を使用する方法がある。粉碎容器の中に粉碎媒体としてロッドやボールを土壌と一緒に入れる方法や、ハンマーやエアジェットを用いた粉碎方法もある。

このような装置は電気駆動で粉碎容器や粉碎ロッドに回転を加えたり、ローラーで圧縮したりディスクや刃物で破碎・断片化をさせている。しかし、粉碎機の種類ごとの粉碎特性の詳細は明らかにされていない。従来の粉碎法の利点と欠点は Powel と Morrison によって議論された [1]。この種の論議は、既存の粉碎装置を再設計または修正する場合に役立つ。しかし、これまでの粉碎モデルは経験式(すなわち、Kick, Bond, Rittinger の方程式)を適用して構築されており、その性能を改善するために特定の粉碎装置から導出された経験データを他のタイプの粉碎装置に適用することは困難である。しかし、これらの式は粒子サイズと粒子を分解するのに必要なエネルギーの関係を示すもので、粉碎装置の性能を評価するのに便利である。Vogel と Peukert [2] は、機械的粉碎も考慮しながら、理論的に導出された 2 つの材料パラメータと次元解析を用いて粉碎を定量化するアプローチを開発した。これらのパラメータの1つは衝撃粉碎における粉碎に対する微粒子材料の破壊抵抗であり、他のパラメータは比エネルギーである。2つのパラメータを組み合わせてあらゆる材料の完全破壊関数に適用する無次元変数を形成した。従って、粒子サイズ、衝撃エネルギー、材料特性は粉碎を説明するための重要なパラメータである。

Gay [3] は確率論から導かれる粉碎のための解放モデルを導入した。この確率エントロピーモデルは母粒子と子粒子間の関係として鉱石の粉碎過程を合理的に説明した。Lob-Guerrero 及び Vallejo [4] は等方性及び二軸応力条件下での粒状材料の粉碎を解析し、粒子断片化の結果として内部摩擦角が減少することを発見した。Tromans [5] は、処理効率を改善するために粉碎の理論的エネルギー効率を考慮し、中心亀裂を含む単一粒子の応力状態モデルから最大理想限界効率を推定した。

Liu [6] は、中規模の粉碎可能な丸棒で構成される粒状モデルを用いて破壊と変形のメカニズムを実験的に調べた。破壊帯域は 2 種類の応力経路と異なる応力状態に従って

形成されることが分かった。粒子としての丸棒は主に軸方向の荷重下で垂直に分割されたモードと横方向に押しつぶされた粉碎モードで破壊した。これとは対照的に、丸棒は、横方向の除荷応力経路の条件下で、垂直に分割され局所的粉碎を組み合わせたモードで粉碎した。McDowellとBono [7] は、一定の質量を維持しながら破壊粒子を新しいより小さな粒子に単純に置き換えることにより、粒子破壊のマクロメカニクスをシミュレートした。フラクタルな粒子サイズに分布する粉碎の進化は破壊近傍の同様な粒径の粒子によって引き起こされることが明らかになった。

EtayとChiang [8] は、離散要素計算法を適用することにより、岩石の粉碎過程をシミュレートするための離散亀裂モデルを研究した。それらのモデルは、結果が他の同様の研究のものと良く一致するため、不具合発生メカニズムの予測に有用である。彼らは様々なタイプの荷重(点と点、点と面、面と面)別に、破壊または亀裂パターンを分類した。

Grady [9] は材料の動的変形と波の伝搬を予測するために局所慣性と運動エネルギーを微視的レベルで考察した。微細構造のスケールを決定するために重要な局所慣性力を、動的せん断における動的破壊とせん断帯に基づくモデルによって求めた。Gradyのモデルを発端とした理論に基づいて、BajantとCaner [10] は、粉碎によって得られる中規模粒子を決定するために材料の法則に対する微小平面モデルを提案した。それらのモデルはひずみエネルギーの解放により生じる破壊を考慮した過去に提案された多くの連続体モデルとは対照的に、局所運動エネルギーの解放に基づいており最小粒径をもたらす。RabczukとBelyschko [11] は、メッシュフリー法 (Meshfree method) を用いて様々な進む亀裂に対して、大きな三次元変形の結果として生じる亀裂をシミュレートし、実験的な亀裂パターンと損傷が正確に予測できることを見出した。Caicedo [12] らは、粒状材料の粉碎による粒子サイズ分布の変化を計算する分析モデルを提案した。彼らのモデルは実験結果を説明するのに役立つことが分かった。

遊星式ロッドミルの性能は、従来の装置と比べて十分に満足できるものであるが、粉碎容器の中で起きる土粒の断片化メカニズムは明確ではない。装置の性能の向上を求めるためには、粉碎容器の中で何が起きているのか調べるための観察と、装置によって生成された力の大きさを測定した。Saediら [13] は、粉碎イベントの改善を考慮して、単一の粉碎イベントに適用したひずみ速度の効果を実験的に調査し、圧縮と衝撃機構を用いた粉碎装置では、土粒の一次破損の特性がほぼ同一であることを見出した。

第2章では、土粒の粉砕プロセスを調査するために、高速動画を撮影して土粒の断片化過程を記録した。また、遊星式ロッドミルによって生成された力の大きさを加速度センサーで計測した。粉砕プロセスを動画撮影により観察すると、土粒の粉砕の初期段階において土埃が粉砕容器の中で多く発生し浮遊していた。また、粉砕時間の経過とともに粉砕ロッドは頻繁に土粒と接触・衝突を繰り返しながら、突然、断片化が起こり土粒は小さな破片に変化することがわかった。これらのことから、遊星式ロッドミルでは、装置から粉砕する土粒に対して大きなエネルギー供給の伝播が起きているのではなく、土粒を断片化するために必要な破壊エネルギーを蓄積させていることを意味していると解釈している。さらに、土粒と一緒に粉砕容器に入れている粉砕媒体としての粉砕ロッドと土粒との接触・衝突の繰り返しが、突然の土粒の断片化につながることに注目した。これらの観察結果は、装置の性能の向上と効率化の改善のための方法を示唆している。本章では、粉砕ロッドの役割について高速動画を撮影して土粒の断片化過程を記録した。粉砕ロッドがない場合は、土粒は粉砕されず、土粒の表面が僅かに削り取られるだけであった。また、振動実験装置および摩耗実験装置を使用して、土粒の破壊に要する力を明らかにすることにより、圧縮及びせん断力が土粒の破壊に及ぼす影響を実験的に調査した。遊星式ロッドミルでは、アモルファス降伏点の臨界力よりも低い応力レベルで断片化が発生することが明らかになった。

3.2 実験方法と装置

粉碎ロッドの役割

土壌の調査・分析をする研究機関で使用する遊星式ロッドミル(特許第 5055524 号)(図 3.1)を粉碎の実験装置として使用した。この装置は、調査する土壌を短時間で粉碎すると同時に、土壌の調査・分析に必要な粒径 2 mm 未満の土壌粒子を回収できる装置である。装置の概要と操作手順については、第 2 章の遊星式ロッドミルで記述した通りである。



図 3.1 遊星式ロッドミル(DIK2610)

遊星式ロッドミルは、ターンテーブルに最大 4 個の粉碎容器を取り付けることができる。ターンテーブルは図 3.2 に示すとおり 20° の傾斜角度で装置に取り付けられている。これにより回転軸は水平に対して傾き角ができるため粉碎容器の中の土壌と粉碎ロッドがランダムに複雑に動くことになり土壌と粉碎ロッドの接触回数が増え、水平回転よりも粉碎効率が向上することが期待できる。しかし、土粒の粉碎において粉碎ロッドの役割はまだ十分に明らかにされていない。第2章の粉碎容器内の粉碎過程の可視化と同じく高速撮

影可能な CCD カメラと LED ライトを用いて、粉碎ロッドを使用しない場合と、使用した場合における、土粒の粉碎実験をして、土粒の断片化過程を観察し粉碎ロッドの役割を明らかにする。

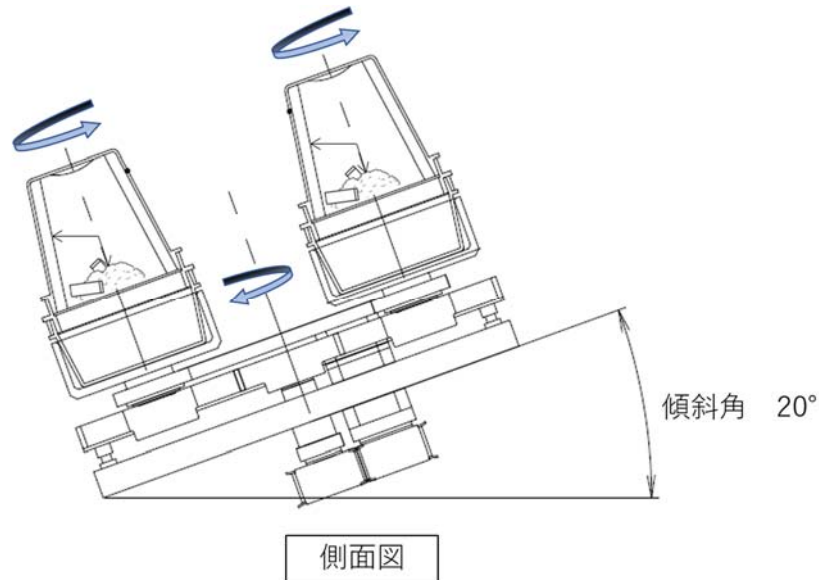


図 3.2 遊星式ロッドミルのターンテーブルの概略図

衝撃圧縮実験と摩耗実験

断片化の過程を圧縮と摩耗過程で分離することを試みた。圧縮に焦点を当てるために、図 3.3 に示す振動装置を作製し、樹脂製の容器に土粒を1個入れて各種パラメータの決定に使用した。この振動装置ではモーターの回転を上下の正弦波振動に変換した。その周波数は 8.13 Hz で、遊星式ロッドミルで生成される回転数 488 rpm と関連付けた。この装置の上下振動振幅は 10 mm で、振動装置に取り付けた振動容器も同じ速度で移動し 0.51 m/s まで加速することが可能で、最大加速度は 26 m/s^2 であった。実験で使用した土粒の質量が $2.6 \times 10^{-3} \text{ kg}$ であり、振動容器の端部に衝突することによる最大圧縮は 0.068 N であり、 180° の位相シフトで運動量が変化する。これは、遊星式ロッドミルで与えられる圧縮力と同じオーダーとなる。この振動実験装置を使用することで、土粒に衝撃圧縮を加えることができる。



図 3.3 左:振動容器、右:振動実験装置

摩耗過程の実験に使用した摩耗試験機 DIK0850 を図 3.4 に仕様を表 3.1 に示す。この装置に取り付けたカンチレバーには、錘により垂直荷重を変化させる機構が備えられていて、水平方向へのカンチレバーのストロークは 2 ～120 mm の範囲で設定が可能となっている。この実験ではカンチレバーは 25 mm の振幅で正弦波状に往復運動させた。カンチレバーの作動周波数は 10 ～ 60 rpm の範囲で変更ができる。実験条件として作動周波数は 60 rpm とし、カンチレバーの垂直荷重を 1.5 N とした。カンチレバーとベースの間の高さの変化を空間センサーで測定した。また、土粒の破壊過程を高速 (240 fps) CCD カメラで撮影した。

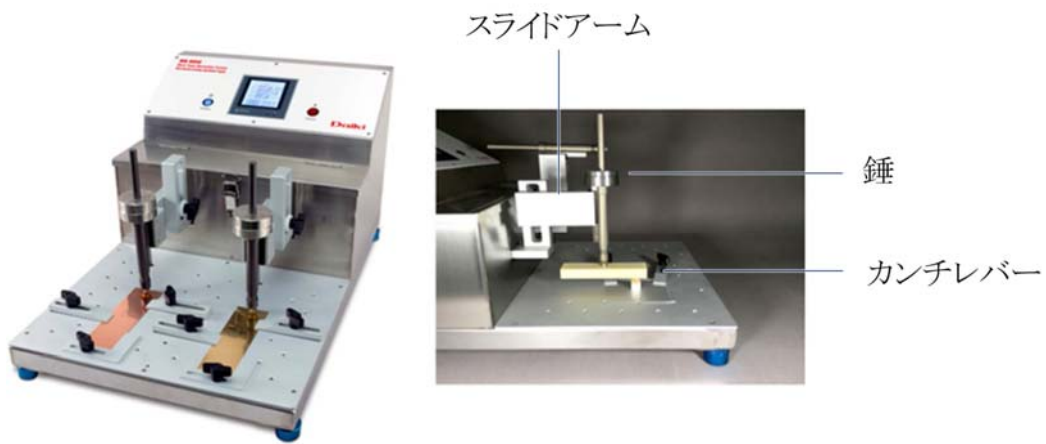


図 3.4 左: 摩耗試験装置 DIK0850, 右写真: スライドアームと錘付きカンチレバー

表 3.1 摩耗実験装置の仕様

摩耗実験装置 DIK0850 仕様	
水平移動距離	2 ~ 120 mm (1 mm 単位で調節可能)
水平往復速度	10 ~ 60 回 / min
水平往復回数	1 ~ 100,000,000 回の範囲で任意設定可能
試験条件保存件数	15 件
電 源	AC 100 ~ 240 V 50 / 60 Hz
外形寸法	W380 mm × D590 mm × 310 mm
重 量	約 22 kg

実験に使用した土壌

実験で使用する土粒の土に関して詳しく調べた。この土壌は、関東ロームと言われている東京近郊に多く分布している地層から採取された土壌である。この土壌の起源は東京周辺に堆積した火山砕屑物(火山灰など)が降下し、風雨などによって再度運ばれて堆積したものである。この土壌の特徴は、粘性質の高い土壌であり、シルトおよび粘土の含有割合が25%～0%程度のものである。通常、遊星式ロッドミルの粉碎実験では、自然乾燥状態の土粒で行っているが、土壌の含水量が実験結果に影響されと考え、含水量を測定するために、気化装置 EV-6 と測定装置 AQV-7(平沼)を組み合わせたカールフイッシャー水分滴定装置で測定した結果、土壌含水量は 10.7 重量・%であった。また、土壌の化学組成を調べるため分析を埼玉県産業技術総合センターに依頼した。その結果、炭素硫黄分析装置 EMIA920V(株式会社堀場製作所)での結果、炭素は 1.4%であった。また、波長分散型蛍光 X 線分析装置 ZSX101e(理学電機工業株式会社)で計測した結果を表 3.2 に示す。この使用している土壌には、主にシリカ(47.5%)、酸化アルミニウム(33.6%)、および酸化鉄(12.1%)が含まれていた。さらに、レーザー回折式粒度分布測定装置 SALD-3100(島津製作所)で、粉碎後の土粒子の粒度分布を測定した。

表 3.2 実験に使用した土壌の成分表

成分名	分析値(mass %) ¹
MgO	1.7
Al ₂ O ₃	34
SiO ₂	48
P ₂ O ₅	0.23
SO ₃	0.40
Cl	0.82
K ₂ O	1.4
CaO	0.46
TiO ₂	1.4
MnO	0.27
Fe ₂ O ₃	12
CuO	0.014
ZnO	0.019
Br	0.0077
SrO	0.0083
ZrO ₂	0.026
MgO	1.7

¹ 分析値(mass%)は、検出された成分だけを酸化物に換算して合計が100%になるよう換算した値である。

3.3 結果と考察

3.3.1 粉碎ロッドの役割

粉碎容器に取り付けた高速撮影が可能な CCD カメラと LED ライトを用いて容器内の粉碎過程を記録した。容器には重さ $150 \times 10^{-3} \text{ kg}$ の土粒を入れて 2 分間運転をした。粉碎容器の土粒には、粉碎ロッド無しで遊星式ロッドミルの遊星回転機構によって複雑な回転を与えてみたが、土粒だけが容器に入っていた場合(図 3.5(a))、ほとんどの土粒は断片化されず、少量の土粒子のみが篩を通過して下容器に落下した(図 3.5(b))。この結果、粉碎ロッド無しで複雑な回転を与えた場合、それぞれの土粒からは表面の土粒子を僅かに削り取るだけであった。

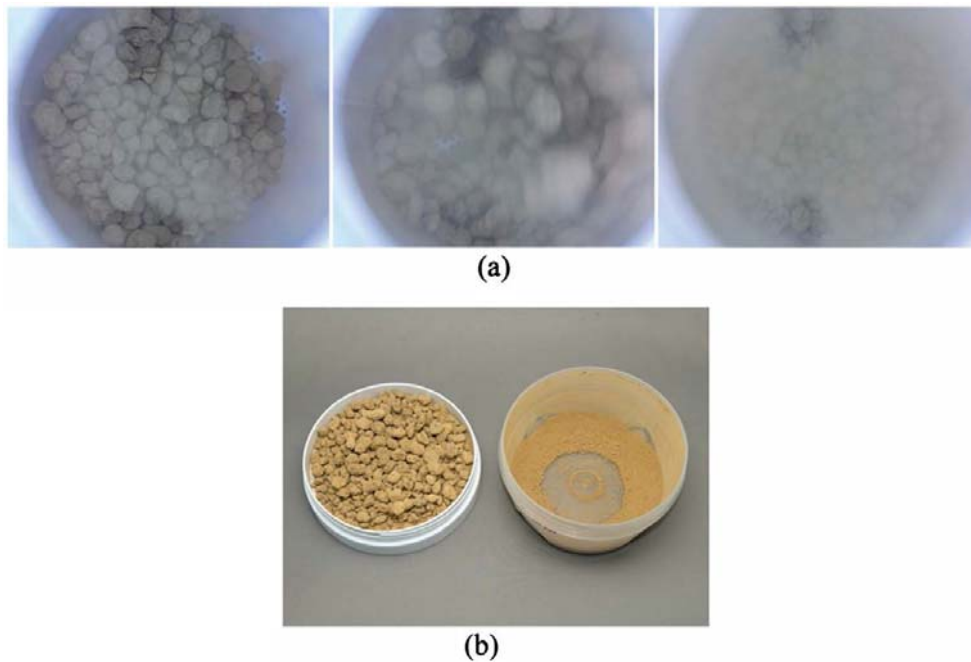


図 3.5 (a) 土粒だけを容器に入れて運転した, (b) 2 分間運転した後の結果

そこで、粉碎容器に 150×10^{-3} kg の土粒と粉碎ロッド 2 本を入れて(図 3.6 (a))、2 分間運転をした。その結果、ほぼすべての土粒は断片化されて、土粒子が篩を通過して下容器に落下した(図 3.6 (b))。これは、粉碎ロッドが土粒を断片化するために重要であることを意味している。



図 3.6 (a) 土粒と粉碎ロッド 2 本を入れて運転した, (b) 2 分間運転した後の結果

図 3.7 は、粉碎後の土粒子の粒度分布を棒グラフで示している。土粒の約 65 %が直径 1 mm 以下に減少したことは遊星式ロッドミルの設計要件が適切に機能していることを示している。高速度カメラにより撮影された図 3.6 (a) のぼやけた写真に示されているように、運転初期段階から粉碎プロセス中の粉碎容器内部には摩耗による土埃(土粒子粉)が観察された。土埃の原因は、土粒の表面がせん断力によって最初に摩耗した可能性がある。粉碎ロッドが使用されない場合は、土粒の断片化は起こらないため土埃を生成するせん断作用は粉碎ロッドではなく、粉碎容器の内壁が重要な役割を果たしている。

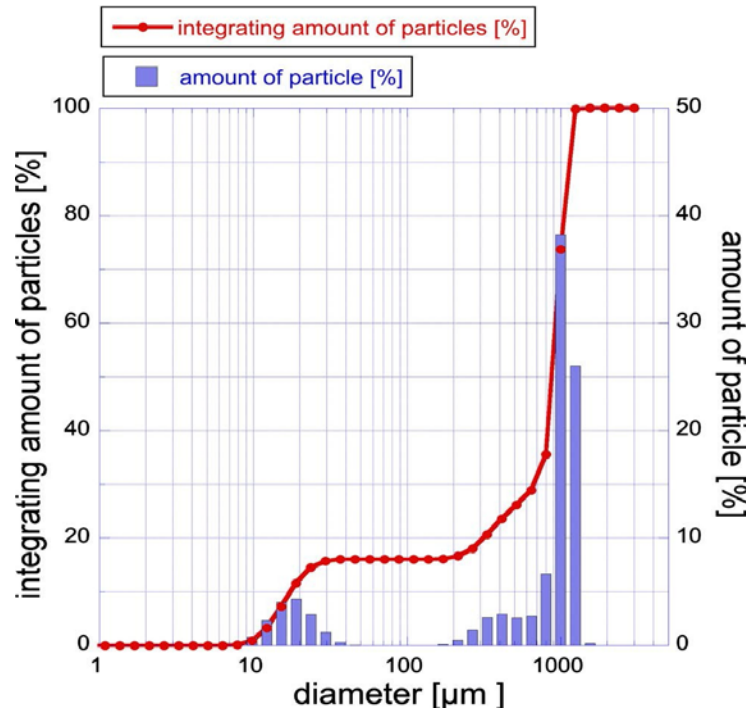


図 3.7 粉碎後の土粒子径の頻度分布

通常のロッドミルでは数多くのロッドを使用して粉碎をしている。しかし、遊星式ロッドミルでは 2 本の粉碎ロッドの組み合わせが最も効率的な粉碎をする条件であるという予備実験の結果について、それが何故なのか疑問に思った。粉碎のために粉碎容器の中の粉碎ロッドの数を変えてみた。2 本の粉碎ロッドを使用した結果は、作業時間を短縮し、土粒を小さな粒子(直径 2 mm 未満)への断片化が可能になるという利点が得られた。しかし、回転する粉碎容器内で 2 本の粉碎ロッドを入れただけで粉碎するメカニズムは不明のままである。そこで、基本的な土粒の粉碎実験として衝撃実験と摩耗実験を実施することにした。この実験により、回転する粉碎容器内ではどのようなひずみによって、どのような破壊が起こるのか。そして、最大強度が土の降伏応力を超えるかどうか。また、どのようなメカニズムで粉碎ロッドが効率的な粉碎を実現しているのかを明らかにすることを目的とした。以下に、これらの疑問を解決するための基礎実験の結果を紹介する。

3.3.2 振動容器内の土粒の繰り返し衝撃

回転する粉碎容器内で土粒が、容器の内壁との衝突を繰り返している間に何が起きているのかを理解するために、垂直に振動する容器の中で土粒の状態が変化する様子を観察した（図 3.8）。また、振動実験装置の容器取付け方向を水平にした横振動実験も実施した。

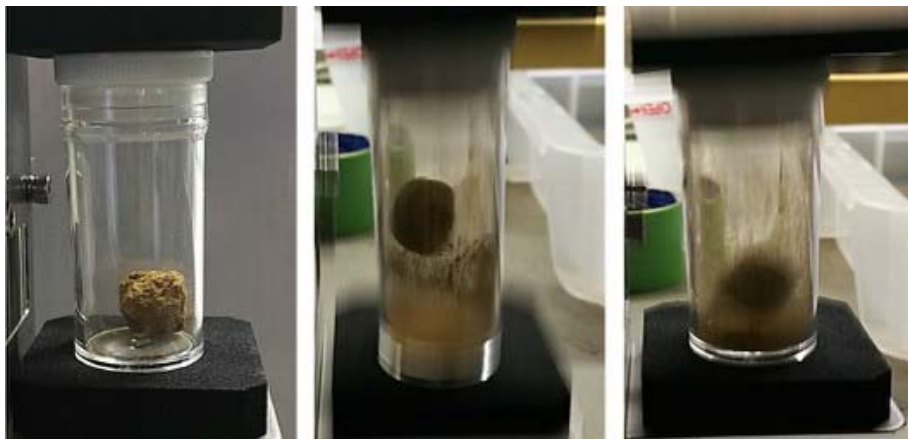


図 3.8 垂直振動中に衝突を繰り返す土粒

最初は 2.6×10^{-3} kg の土粒を 1 個入れて実験を開始したが、時間の経過とともに土粒の質量は対数的に減少するが、2 分以内には土粒が破壊されるような大きな変化をしないことを確認した（図 3.9）。また、2 時間経過しても垂直振動・水平振動ともに土粒の破壊は観察されなかった。計算すると垂直振動容器での最大衝撃力は 0.42 N であった。振動実験装置の容器振動方向を水平にして横振動実験も実施した。この時の最大衝撃力は 0.068 N であった。これに対し、一軸圧縮試験装置 Instron 5566 を用いた試験結果から、土粒の降伏応力は平均で約 52 N であった。したがって、振動容器が与える衝撃力は、垂直方向の場合は 8/1000 以下、水平方向の場合は 1/1000 以下と降伏応力よりもはるかに小さいといえる。これらの結果か

ら、この実験条件では決して衝突による衝撃力で土粒が破壊しないことは明らかである。また、振動容器での揺動運動が遊星式ロッドミルの粉砕容器内で土粒揺動運動を模擬したものであることから、粉砕容器の中に入っている土粒は回転だけで破壊されないことがこの実験からも明らかになった。

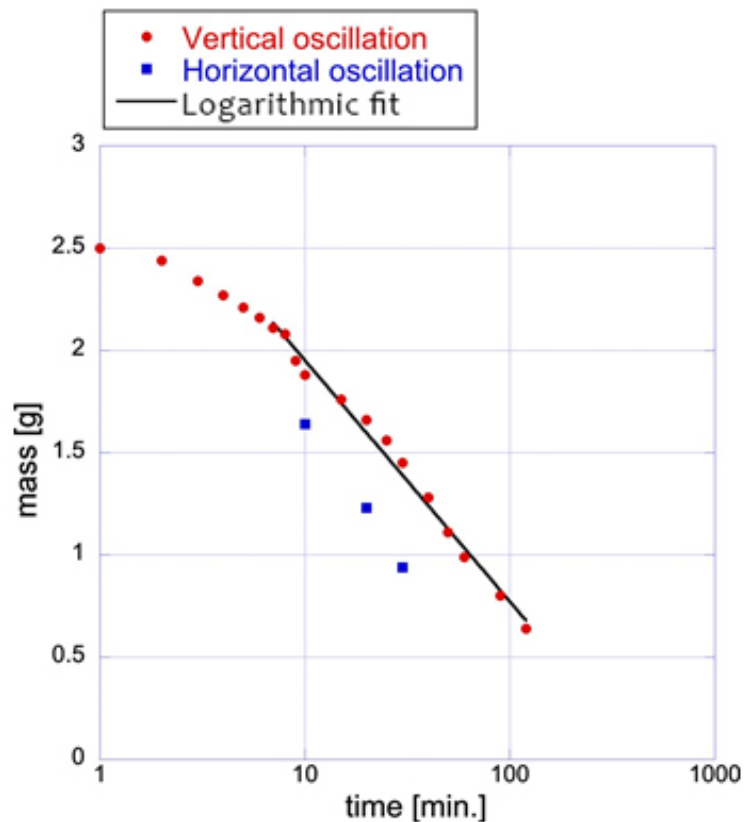


図 3.9 垂直振動中の土粒の質量変化

中田ら[14]と Saeidi ら[13]は、一軸圧縮実験による単一粒子粉砕と数値的研究を幅広く行った。このような研究は、通常、非常に低速の圧縮下での静的荷重による粉砕を調べるために行われている。粒径分布に及ぼすひずみ速度の影響を研究した Huang ら [15] は、土を粉砕するための圧縮応力はひずみ速度の増加に伴って

増加するため、衝撃粉砕では静的圧縮よりも高い応力を必要とすることを発見した。また、土粒の降伏応力は粒径が大きく初期の空隙率が高いほど低くなる。今回の実験土壌には直径 1 mm の粒子が多く含まれている (図 3.7)。したがって、これらの粒径が比較的大きいために空隙率が大きくなっていると考えられる。これが、振動容器の降伏応力よりもはるかに小さな力でも土粒が僅かながらも砕ける原因の一つと考えられる。Bažant and Caner [10]の提案する粒径に対するひずみ速度の影響の解析と、Saeidi ら[13]の実験データによると、衝撃圧縮による粉砕片の粒径は、静的荷重圧縮によるものよりもわずかに小さくなっている。したがって、15~20 μm (図 3.7) の範囲の小さな粒子は衝撃圧縮によって生成されると考えられる。

また、繰り返し荷重をかけることによる疲労[12]の影響で土粒の強度が低下するかどうかも検討した。しかし、今回の実験では、振動容器内では2時間経過しても破壊は起こらなかった。遊星式ロッドミルによる粉砕では、わずか2分という短い粉砕時間での疲労の影響を解釈することは困難で、このことは、圧縮応力ではなくせん断応力が土粒の断片化の原因となっている可能性があることを意味している。これを確認するために、せん断応力による破壊の可能性があるかどうかについても実験を行いその結果を次項で述べる。

3.3.3 摩耗による土粒の破壊

3.3.1 節で述べたように、回転している粉砕容器の中に土粒のみが入っている場合には土粒の粉砕は観察されなかったが、2本の粉砕ロッドと一緒に粉砕容器の中に土粒が入っている場合には良好に粉砕が行われた。このように、回転している粉砕容器の中で回転している粉砕ロッドの動きを観察していると、土粒と粉砕ロッドの動きの違いから粉砕ロッドと土粒の間に摩耗が生じていると考えられる。このような相互作用を摩耗試験機 DIK0850 を用いて単純にシミュレーションした。図 3.10 に実験結果の一例を連続写真で示す。時刻 0 はカンチレバーの往復運動開始時刻である。

最初は、細かい粒子が土粒の表面から分離された。37.7 秒後には小さな破片が分離始めた。37.8 秒と 38.5 秒の写真には、せん断応力による典型的な大きな傾斜亀裂が見られた。粒子間の小さな隙間や小さなクラックは、せん断応力下で大きなクラックの引き金と

なった[11] [16]。DIK0850 摩耗試験装置で発生するせん断力は 1.5 N であり、一軸圧縮試験装置 (Instron 5566) で発生する圧縮力よりもはるかに小さい。したがって、粉碎ロッドの効果は、土粒を擦ることによるせん断力であると考えられる。

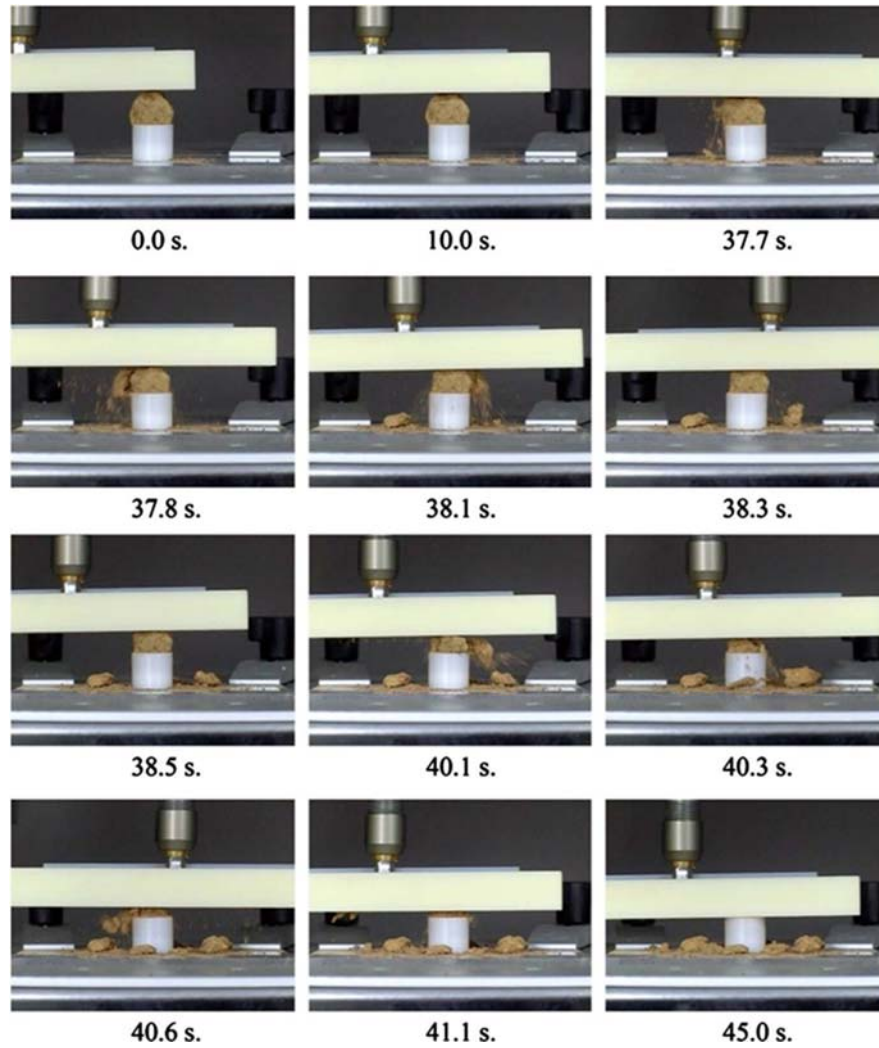


図 3.10 摩耗試験装置による破壊過程

摩耗試験装置のベース台からカンチレバー底面までの高さを経時的に測定したが37.7秒まであまり変化しなかった(図3.11)。実験中、土粒の表面から擦り落とされるように土粒子が僅かに削り取られている。実験開始からここまでの間は、せん断応力が土粒の中にポテンシャルエネルギーとして蓄積されるのに時間がかかるためと考えられる。粒子間のバネ系のポテンシャルエネルギー[5][10]を微視的に考えると、土質構造としての粒度分布に関する粒子間の間隔[17]が重要なパラメータとなる。材料特性(空隙率[12][18]、初期の亀裂[5][8][11])は同じではないため、応力が蓄積されるタイミングは、その違いによって大きく左右される。しかしながら、一旦破壊が始まると、小さな破片に碎けるまでに必要な時間は、37.7秒から7.3秒間で破壊が壊滅的に起こるように見える(図3.10)。この時のカンチレバーの高さは急激に下がる曲線(図3.11)として示された。

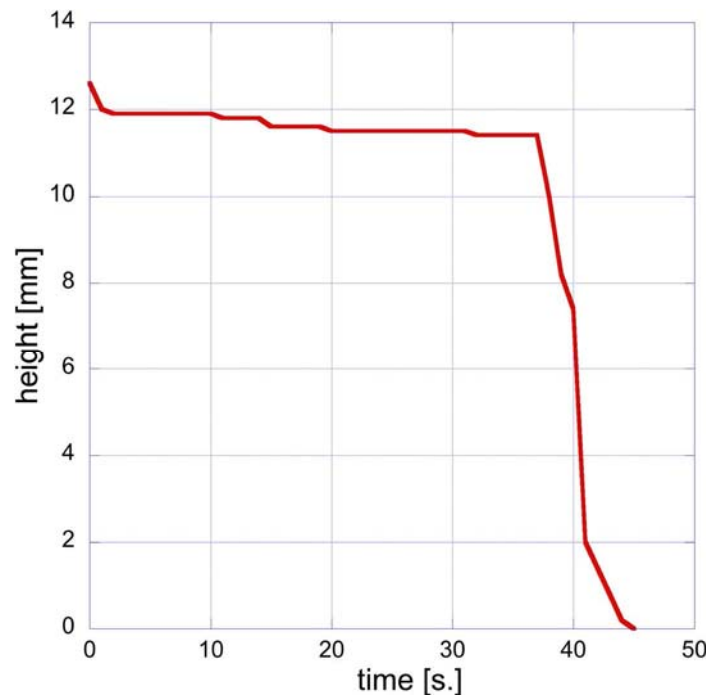


図 3.11 時間の経過によるカンチレバーの高さの変化

3.4 まとめ

土粒は表面が最初に削られ、その後壊れやすくなった。ただし、粉碎容器に粉碎媒体である粉碎ロッドがない場合は、土粒が小さな破片になることはなかった。つまり、土粒の粉碎に粉碎ロッドが大きな役割を果たしていることは明らかである。遊星式ロッドミルの遊星回転機構に取り付けられた粉碎容器の中の土粒の粉碎メカニズムを明らかにするために、基礎的な実験から土粒の破壊の研究を行った。複雑に回転する粉碎容器の中ではどのようなひずみで土粒が破壊されるのか、最大強度が土の降伏応力を超えるかどうか、急速な粉碎時の粉碎ロッドの機能はどうなっているのか、などの疑問があった。そこで、振動実験装置と摩耗試験装置を用いて衝撃圧縮実験とせん断応力実験を実施し、一つの応力が土粒に作用することによる破壊プロセスを観察した。破壊実験の様子は目視で記録した。遊星式ロッドミルの遊星回転機構によって生じる遠心力は、土粒のアモルファス降伏点の臨界力よりもはるかに小さいことがわかった。粉碎容器の中の土粒の断片化は粉碎ロッドがない場合には起こらなかったが、粉碎ロッドが2本ある場合には短時間で起った。粉碎過程の初期には、粉碎容器の内に摩耗による土埃が観察された。このような遊星式ロッドミルの運転開始初期段階の土埃は、粉碎ロッドによるせん断力によって土粒の表面が摩耗して発生したものと考えられる。土粒の表面が削られた後、壊滅的に小さな粒子へと破壊が起こった。このことから、遊星式ロッドミルによる粉碎では、圧縮力よりも粉碎ロッドによるせん断力の方が有効であることが分かった。これらの結果から、土粒の破壊には、せん断力と圧縮力の付加を考慮した粉碎装置の開発が必要であることが示唆された。

参考文献

- [1] Powell, M.S. and Morrison, R.D. (2007) The Future of Comminution Modelling. *International Journal of Mineral Processing*, 84, 228-239.
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.08.003>
- [2] Vogel, L. and Peukert, W. (2003) Breakage Behaviour of Different Materials Construction of a Master Curve for the Breakage Probability. *Powder Technology*, 129, 101-110. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(02\)00217-6](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00217-6)
- [3] Gay, S.L. (2004) A Liberation Model for Comminution Based on Probability Theory. *Minerals Engineering*, 17, 525-534.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2003.11.012>
- [4] Lobo-Guerrero, S. and Vallejo, L.E. (2005) Analysis of Crushing of Granular Material under Isotropic and Biaxial Stress Conditions. *Soils and Foundations*, 45, 79-87. https://doi.org/10.3208/sandf.45.4_79
- [5] Tromans, D. (2008) Mineral Comminution: Energy Efficiency Considerations. *Minerals Engineering*, 21, 613-620. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.12.003>
- [6] Liu, E. (2010) Breakage and Deformation Mechanisms of Crushable Granular Materials. *Computers and Geotechnics*, 37, 723-730.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.04.009>
- [7] McDowell, G.R. and de Bono, J.P. (2013) On the Micro Mechanics of One-Dimensional Normal Compression. *Géotechnique*, 12, 41-54.
<https://doi.org/10.1680/geot.12.P.041>
- [8] Estay, D.A. (2010) Discrete Crack Model for Simulating Rock Comminution Processes with Discrete Element Method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60, 125-133. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.12.041>
- [9] Grady, D.E. (1982) Local Inertial Effects in Dynamic Fragmentation. *Journal of Applied Physics*, 53, 322-325. <https://doi.org/10.1063/1.329934>
- [10] Bažant, Z.P. and Caner, F.C. (2014) Impact Comminution of Solids Due to Local

- Kinetic Energy of High Shear Strain Rate: I. Continuum Theory and Turbulence Analogy. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 64, 223-235.
<https://doi.org/10.1016/j.jmps.2013.11.008>
- [11] Rabczuk, T. and Belytschko, T. (2007) A Three-Dimensional Large Deformation Meshfree Method for Arbitrary Evolving Cracks. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196, 2777-2799.
<https://doi.org/10.1016/j.cma.2006.06.020>
- [12] Caicedo, B., Ocampo, M. and Vallejo, L. (2016) Modeling Comminution of Granular Materials Using a Linear Packing Model and Markovian Processes. *Computers and Geotechnics*, 80, 383-396.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.01.022>
- [13] Saeidi, F., Yahyaei, M., Powell, M. and Tavares, L.M. (2017) Investigating the Effect of Applied Strain Rate in a Single Breakage Event. *Minerals Engineering*, 100, 211-222. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.010>
- [14] Nakata, Y., Kato, Y. and Murata, H. (2001) One-Dimensional Compression Behaviour of Uniformly Graded Sand Related to Single Particle Crushing Strength. *Soils and Foundations*, 41-42, 39-51. https://doi.org/10.3208/sandf.41.2_39
- [15] Huang, J.Y., Hu, S.S., Xu, S.L. and Luo, S.N. (2017) Fractal Crushing of Granular Materials under Confined Compression at Different Strain Rates. *International Journal of Impact Engineering*, 106, 259-265.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.04.021>
- [16] Kamon, M. and Maekawa, K. (1992) Microscopic Observation of Shear Failure of Soils. *Annals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, 35-B2, 289-303. <http://hdl.handle.net/2433/72407>
- [17] Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S. and Vogel, H.-J. (2018) Soil Structure as an Indicator of Soil Functions: A Review. *Geoderma*, 314, 122-303.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- [18] Nakata, Y., Hyodo, M., Hyde, A.F.L., Kato, Y. and Murata, H. (2001) Microscopic Particle Crushing of Sand Subjected to High Pressure One-Dimensional Compression. *Soils and Foundations*, 41-1, 69-82. <https://doi.org/10.3208/sandf.41.69>

第4章 土粒の粉砕メカニズム

4.1 はじめに

試験研究機関で土壌を分析調査する場合、各種測定マニュアルなどで決められた前処理方法に従い、土壌を直径 2 mm 未満の粒径に粉砕する必要がある。粉砕対象の土壌には、大きさや硬度にばらつきがある土粒を含む団粒を多く有している。したがって、効率的に土粒を粉砕するメカニズムが必要である。その方法として、乳棒や乳鉢を使い人力で粉砕する方法や、粉砕ロッドやボールを粉砕対象の土壌と一緒に回転する容器の中に入れて機械的に粉砕する方法などが考案されている。

粉砕とは固体の大きさを減少させる操作であり大きな鉱石や個体物を粉砕することから、穀物や種子などを粉砕するものまで広義の意味が含まれている。土壌は土粒子が結合した集合体であり、化学的に土壌を分析する場合において、土壌の粉砕とは、分粒(篩分け・分級)したい粒径以下に土粒子間の拘束する力を取り除いた断片化(粒子分離)が行われればよいといえる。

この土壌を分析調査する前処理段階で土壌を効率的に粉砕する専用装置として、容器内に粉砕したい土壌と一緒に粉砕ロッドを入れて旋回する遊星式ロッドミルがある。この装置は乾燥した硬い土粒を短時間に粉砕することができる。この土粒の粉砕過程を明らかにするため、第 2 章において、土粒の降伏点と容器内で土粒に作用する力を比較し、また、容器内部を可視化して粉砕時の粉砕ロッドと土粒の振る舞いを分析した。その結果、遊星式ロッドミル装置に付けた容器内での粉砕ロッドの衝撃力や遠心力による一方向の荷重だけでは土粒を破壊するには十分ではなく、実際の粉砕中では土粒が遠心力と容器内に入れた粉砕ロッドにより容器の壁面に押し付けられて擦られながら粉砕される様子を容器に取り付けたカメラで確認した。その結果、容器内の粉砕ロッドがまず土粒表面に衝突し、表面から内側に向かって粒子の結合が緩み粉砕されていることが映像で確認できた。高橋[1]は、リグノセルロースの微粉砕前処理に用いる粉砕機のスケールアップと粉砕力を高めるために、粉砕した粒子を通すリングと粉砕ロッドの組み合わせによる効果を検討した。その結果、大量のスギ粉末の粉砕において、粉砕ロッドの数が多いほどより高

い粉砕効率が得られることが示された。しかし、第 2 章において、遊星式ロッドミルでは、ロッドの数を増やすと粉砕効率が下がった。

そうしたことから、第 3 章において、可視化実験で明らかにできなかった容器内での粉砕メカニズムを解明するために基礎的な実験により粉砕を検討した。どのような種類の応力が迅速な粉砕を引き起こすのか、土粒の垂直振動実験と往復摩耗試験装置による圧縮・せん断応力実験を行い、土粒に作用する単一応力による破壊メカニズムを観察した。その結果、乾燥した硬い土粒は、衝撃力よりも擦りにより短時間に破壊されることが実験で実証された。しかし、擦りが破壊へと至る過程や、摩擦と圧縮荷重との関係については未解明であった。

サイズや形態の異なる土粒子に圧縮力を加えるとせん断力が発生し、わずかに弾性的な挙動が観察されている。Defos-sez と Richard [2] は、有限要素法を用いて、土壌表面に垂直荷重を加えることで応力が下層に伝わることを数値的に示した。弾性変形から破壊に至るまでの様々な土壌の変形段階を説明するために Cam Clay models は使用することができる。近年のモデリングの進歩により、力学的なプロセスと水理的なプロセスの相互作用を考慮した連成モデルが開発されてきている。離散要素法(DEM)を用いたソフトウェア研究では、鉍石材料の単一粒子をプレートで擦ると、引張せん断の複雑な応力を受けて容易に破壊することが示されている [3]。このことは、乾燥して固まった土粒が、粉砕装置の容器の壁に押し付けられ擦ると容易に破壊することを示唆している。

粒状物質での応力は、均質に伝播するのではなく、優先的な経路を通して伝搬することが多く、優先的な経路よりも応力が小さな塊を分散させる。これは、粒径と形状のわずかな違いによる異なる集合体が土壌中に多く共存しているためである[4]。圧縮を受けると、土壌の粒子は、最初は弾性的に移動する傾向がある。Majmudar と Behringer [5] は、実験と数値解析を用いて、外部応力下では、乾燥粒状物質の粒子が不均一な接触ネットワークを形成し、外部荷重の大部分が力の連鎖を介して伝搬されることを示した。さらに、Desrues and Chambon [6]や Desrues and Viggiani [7]は、土やコンクリートなどの不均質な固体に外部応力を加えて塑性変形や破壊を誘発させると、せん断帯と呼ばれる局所的な領域に応力が集中することを示した。圧縮応力による亀裂の形成・拡大過程については、伊澤ら[8]が力学的に不均質な柱状の花崗岩を対象に一軸圧縮実験を行い、亀裂は断面中心部に発生し、中心部を通して垂直方向に進展することを示した。これらの結果

は鉱物分布法に基づく数値解析とほぼ一致している。しかし、この方法では、実験で観察された破壊後の顕著な応力低下や鉛直端での亀裂形成を再現することはできなかった。

粒子状物質である土壌は複雑な反応をするため、個々の粒子の特性と材料の反応との関係は十分に理解されていない。通常、土壌は物理的・化学的な分析試験をする前に、風乾させている。しかし、風乾により乾燥して固まった土粒は、大きさや形が不均一で、定量的な試験に用いるのには不向きである。本章では、乾燥・硬化した土粒を破壊する際の圧縮荷重と摩耗の関係を明らかにすることを目的として、同じ土質の土粒子による同一サイズのソイルペレットを成型し、摩耗試験装置を用いて異なる荷重条件でソイルペレットを回転させて破壊するモデル実験を行った。遊星式ロッドミルの容器内の土粒は、容器の回転と粉碎ロッドの複雑な動きにより、土粒も複雑に回転しながら粉碎ロッドと容器に擦り付けられている。ソイルペレットを使用したこの実験は、実際の粉碎容器で発生する動作をシミュレートできると考えられる。その結果、ソイルペレットへの荷重と破壊には相関があり、破壊過程においてソイルペレットの中心から円周部に向かって亀裂が発生すると、ソイルペレットは直ちに破壊されることが分かった。

4.2 実験方法と装置

ソイルペレットの製作方法

土粒を破壊する際の圧縮荷重と摩耗の関係を明らかにすることを目的として実験を考へるとき、土粒では大きさや形が不均一で、定量的な実験に用いるのには不向きである。そこで、実験で使用する土粒に代わるソイルペレットによる実験をした。本章の実験で用いたソイルペレットは、均一な質量と形状を確保して作製したものである。ソイルペレットに使用した土は、東京近郊に広く分布する関東ロームと呼ばれる地層から採取したものである。関東ロームは、風雨によって風化した火山灰や火山礫が堆積して形成されたもので、凝集力が高くシルトや粘土の含有量が 25~40%含まれている。第 3 章において、土粒のひずみ測定および遊星式ロッドミルの可視化実験で使用した土粒は $1 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 前後の体積であった。第 3 章の実験結果とソイルペレットの実験結果を比較検討するため、ソイルペレットは図 4.1 に示すように、直径 $1 \times 10^{-2} \text{ m}$ 、長さ $1 \times 10^{-2} \text{ m}$ の円筒状のソイルペレットを作製した。図 4.2 は、本実験で使用したソイルペレット製作キットを示している。図 4.3 は、ソイルペレット製作キットでアクリルパイプ内に土粒子を詰めてソイルペレットを成型しているところを示している。図 4.4 に詳しい製作手順を示し、製作方法を以下に詳述する。

- Step 1: 内径 $1 \times 10^{-2} \text{ m}$ 、長さ $2 \times 10^{-2} \text{ m}$ のアクリルパイプを、直径 $1 \times 10^{-2} \text{ m}$ 、高さ $5 \times 10^{-3} \text{ m}$ の凸型がついたステンレス製のスタンドに挿入し、電子天秤に載せ秤量をゼロにする。
- Step 2: 電子天秤で計測しながら土壌(土粒子) $1 \times 10^{-3} \text{ kg}$ をアクリルパイプに詰める。
- Step 3: 土壌に $0.4 \times 10^{-3} \text{ kg}$ の純水を徐々に注ぎ浸透させる。
- Step 4: 凸部の付いたステンレス製のスタンドを、土を詰めたアクリルパイプの上部に挿入して手で圧縮して成型する。
- Step 5: 上下のステンレス製のスタンドを土が詰まったアクリルパイプから抜いて、約 15 分間乾燥器に入れる。
- Step 6: 土が詰まったアクリルパイプに直径 $1 \times 10^{-2} \text{ m}$ 、長さ $2 \times 10^{-2} \text{ m}$ の凸型がついたステンレス製のスタンドを挿入して、アクリルパイプからソイルペレットを取り出す。

Step 7: 取り出したソイルペレットを 1×10^{-3} kg まで自然乾燥させた後、実験に使用する。



図 4.1 完成したソイルペレット

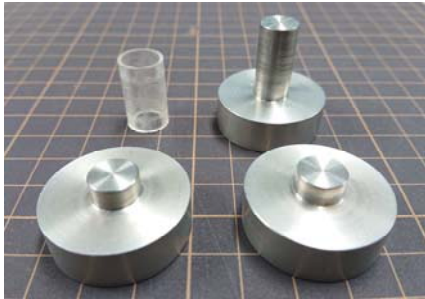


図 4.2 ソイルペレット製作キット



図 4.3 土粒子はアクリルパイプ内で成型される

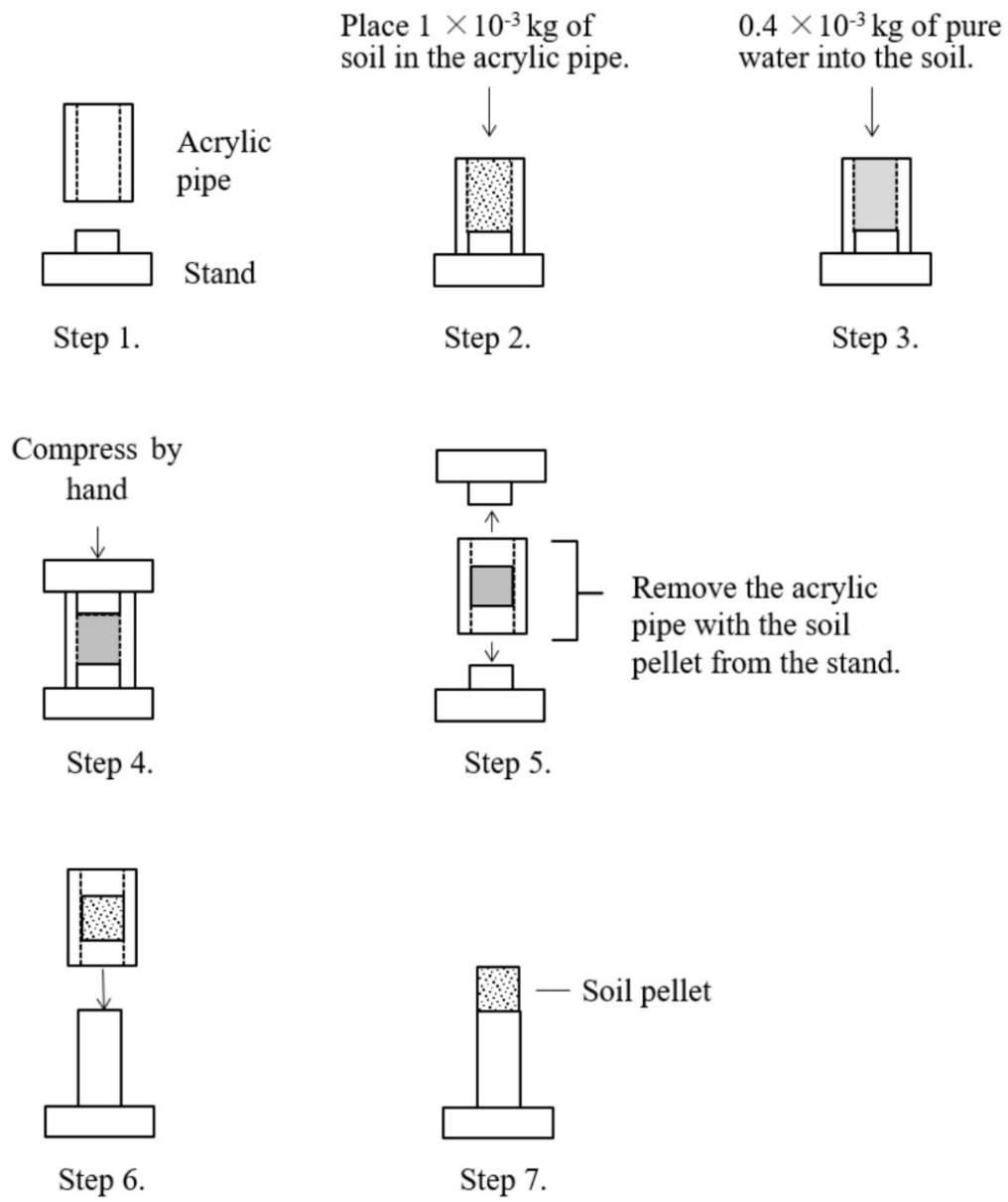


図 4.4 ソイルペレット製作手順

ソイルペレットの物理量

ソイルペレットに使用した土壌の物理性を明確にするため、一般社団法人日本総合建築研究所 (GBRC) に土質試験を依頼した。土粒子の密度試験 (JIS A 1202) と土の含水比試験 (JIS A 1203) と間隙比の測定結果を表 4.1 に示す。ソイルペレットは 1×10^{-3} kg (標準偏差=0.537) の土壌と、 0.4×10^{-3} kg の純水 (標準偏差 = 0.124) をアクリルパイプに詰めて手で長さ 1×10^{-2} m まで圧縮して製作した。完成したソイルペレットの含水量が実験結果に影響を及ぼすのを防ぐために、48 時間自然乾燥をして、ソイルペレットの質量が製作時に投入した土(土粒子)の質量と同じ 1×10^{-3} kg になるのを確認してから実験に用いた。

ソイルペレットの物理量から、ソイルペレットの間隙比 (e) を求めた。一般に、土壌は固体(土粒子)、液体および気体から成る三相系である。同様に固体(土粒子)、水、空気できているソイルペレットの三相を構成している固体 (m_s)、水 (m_w)、および空気 (m_a) の物理的質量は、100 個のソイルペレットの平均から計算した。

ソイルペレットの三相を構成している各質量は、次のように定義される。

$$m = m_s + m_w + m_a \quad (4.1)$$

そして含水比 w は次のように定義される。

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad (4.2)$$

ソイルペレットの質量は $m = 1.02 \times 10^{-3}$ kg であり、表 4.1 より土粒子の自然含水比は $w = 17.7\%$ であるので、式の (4.1) と (4.2) から空隙 (m_a) は質量 0 として考えられるので、 $m_s = 0.862 \times 10^{-3}$ kg、 $m_w = 0.153 \times 10^{-3}$ kg となる。

この結果から、ソイルペレットの三相の各体積を求めることができる。ソイルペレットの直径は 1×10^{-2} m で長さは 1×10^{-2} m なので、ソイルペレットの体積 $v = 0.785 \times 10^{-6}$ m³ となる。ソイルペレットの体積 (v) と固体の体積 (v_s)、水 (v_w)、および空気 (v_a) の関係式は

$$v = v_s + v_w + v_a \quad (4.3)$$

表 4.1 より土粒子の密度 $\rho_s = 2.432$ から

$$\rho_s = \frac{m_s}{v_s} \quad (4.4)$$

したがって、 $v_s = 0.354 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 、 $v_w = 0.153 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ となる。

$$v_a = v - v_s + v_w \quad (4.5)$$

ソイルペレットの体積 $v = 0.785 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ および式 (4.5) から $v_a = 0.251 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ となり
間隙比 e は、以下の式で求められる。

$$e = \frac{v_a + v_w}{v_s} \times 100 \quad (4.6)$$

したがって、ソイルペレットの間隙比 $e = 1.141$ であった。表 4.1 で示した、試験結果とソイルペレットの物理的性質を比較した場合、間隙比 (e) が 1.720 から 1.141 に減少した。これはソイルペレットを成型するときに圧縮によって土粒子間の間隙が減少したためと考えられる。

このように、ソイルペレットは形状寸法だけ同一にしたものでなく、構成している固体 (m_s)、水 (m_w)、および空気 (m_a) の物理的質量も均質に製作したことで、このソイルペレットを使用した以下の試験においてその結果は信頼性に足ると判断した。

表 4.1 ソイルペレットに使用した土壌の土質試験データ

土壌試験項目	測定結果
土粒子の密度 ρ_s (g / cm^3)	2.432
自然含水比 (w) %	17.70
間隙比 (e)	1.720

圧縮装置による破壊試験

図 4.5 は、ソイルペレットを破壊するのに必要な力を調べるために、一軸圧縮試験装置 (Instron 5566) を用いた圧縮試験の方法を示している。この装置の上部テーブルはソイルペレットを載せた下部テーブルの上から 1 mm / min の速度で降下して、ソイルペレットの周方向に垂直方向から荷重を加えた。下テーブルにはロードセルが取り付けられていて、上テーブルがソイルペレットに接触した時の荷重の変化を測定した。上テーブルによってさらに垂直方向に圧縮すると土粒が破壊した。自然に団粒化した土粒 10 個とソイルペレット 50 個を無作為に選択して測定し、降伏応力とそれに対応する変位を比較した。

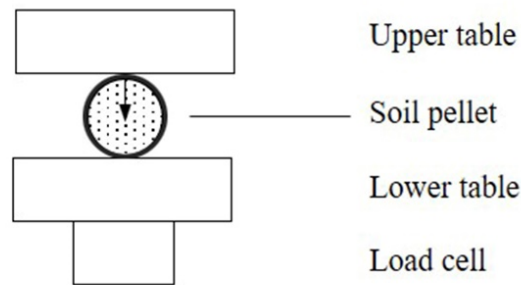


図 4.5 圧縮荷重試験の方法

摩耗試験装置による破壊実験

摩耗によるソイルペレットの破壊プロセスを明らかにするため、第3章の衝撃および摩耗試験の項で紹介した図4.6に示す摩耗試験装置を用いて実験を行った。この装置を使った実験は、図4.7の模式図に示すように、アームの下方には幅30 mm、長さ130 mm、厚さ14 mmの樹脂製のカンチレバー(押さえ板)が取付けてあり、アーム部上部に取り付けた錘により実験対象物に対して常に一定の荷重がかけられる構造となっている。ソイルペレットは、幅100 mm、長さ180 mmのレールプレートにセットされる。レールプレートには長さ方向に対して幅20 mm、深さ1 mmの凹みが付けられている。カンチレバーは水平方向に往復運動をする。カンチレバーの振幅は60 mmで、往復周期は0.17 Hz(1分間に10回往復)で設定されている。アーム部上部に取り付けた錘の荷重はカンチレバーとソイルペレットの接触部から、ソイルペレットの回転に伴ってソイルペレットの円周上に均等に往復回転荷重が加えられる。この摩耗試験装置を用いて、5段階の異なる往復回転荷重条件でソイルペレットを回転させた。カンチレバーが水平方向に往復運動すると、ソイルペレットはレール板上で反時計回り、時計回りに往復回転した。コロの原理で、ソイルペレットの回転移動距離はカンチレバー移動距離幅の半分の60 mmであった。ソイルペレットは1往復につき約2回転していた。このときのソイルペレットとレール板の静摩擦係数は0.44であった。摩耗試験装置と同様に、ソイルペレットの回転面(外周面)の転がり摩擦係数はレール板、カンチレバーともに0.05であった。5段階の往復回転荷重条件において各々15個のソイルペレットに破壊が発生するまでに要したソイルペレットの回転数を測定した。



図 4.6 摩耗試験装置

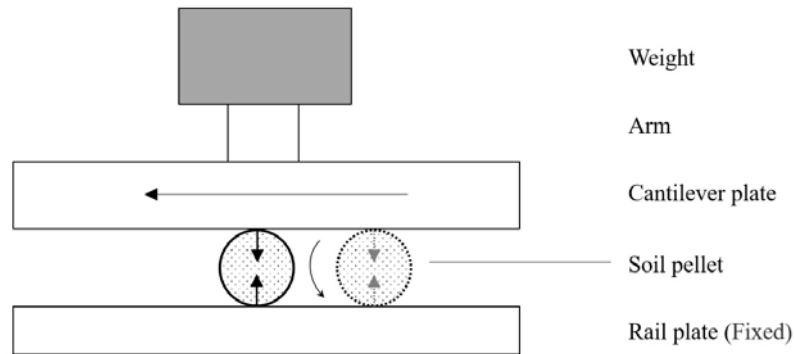


図 4.7 摩耗試験装置の模式図 (ソイルペレットはカンチレバーによって回転させられる), 錘の荷重はソイルペレットが回転するとき、ソイルペレットの周方向から中心に作用する

4.3 結論と考察

4.3.1 ソイルペレットの降伏応力

ソイルペレットの均質性を調べるために、製作した 50 個のソイルペレットで一軸圧縮試験装置 (Instron 5566) を使用して圧縮荷重とひずみ量を測定した。測定の結果、圧縮荷重の最大値でソイルペレットにクラックが見られるアモルファス降伏点を示した。測定結果を図 4.8 に示す。グラフの縦軸は圧縮荷重の最大値 (N) で、横軸は圧縮荷重が最大値を示した時の圧縮ひずみ (ε) 値を示している。50 個のソイルペレットの最大圧縮荷重値は 13 N から 31 N の範囲であった。また、この最大値の平均は 21 N であった。さらに、ソイルペレットの 94 % は、圧縮ひずみ (ε) 値が 0.006 から 0.009 の範囲であった。

圧縮ひずみ (ε) は、次の式で計算した。

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (4.7)$$

ΔH = ソイルペレットの直径の変化、 H_0 = ソイルペレットの初期の直径。

一方、土粒は、土質量や大きさは均一ではない。ソイルペレットと比較するために、製作したソイルペレットの質量 $1 \times 10^{-3} \text{ kg}$ に近い土粒を 10 個選び、ソイルペレット同様に圧縮荷重とひずみ量を測定した。測定した土粒の大きさと質量を表 4.3 に示す。また、測定結果を表 4.4 に示す。土粒の圧縮荷重の最大値は 8 N から 138 N の範囲であった。また、この最大値の平均は 52 N であった。さらに、圧縮荷重が最大値を示した時の圧縮ひずみ (ε) 値は、0.1 から 0.2 の範囲であった。この結果が示すように、ソイルペレットでは最大の圧縮荷重値の範囲は 2.4 倍で、土粒では 17 倍であった。圧縮ひずみ (ε) 値がソイルペレットより大きくなるのは、土粒は形状がいびつで表面には凹凸があり、圧縮荷重が最大値に到達するまでの圧縮変位量が大きくなるのが原因と考えられる。

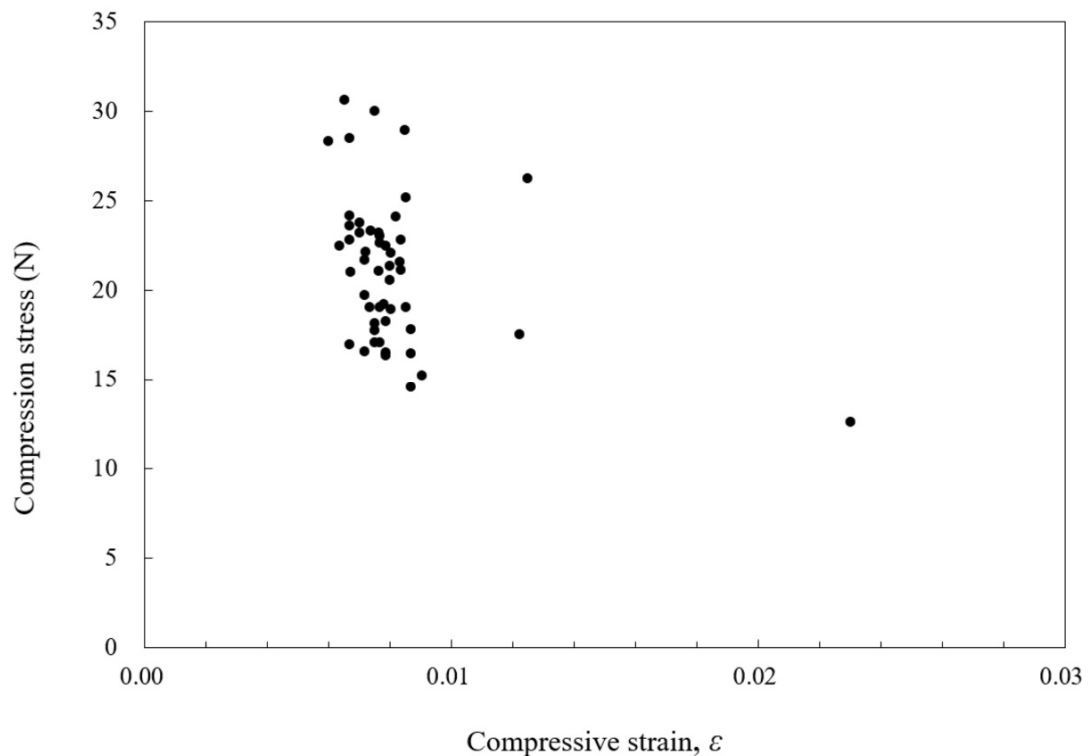


図 4.8 ソイルペレットの降伏点と圧縮ひずみ

表 4.3 実験に使用した土粒の大きさと質量











No.	Photo	Size (W / D / H $\times 10^{-3}$ m) Weight ($\times 10^{-3}$ kg)	No.	Photo	Size (W / D / H $\times 10^{-3}$ m) Weight ($\times 10^{-3}$ kg)
1		19 / 13 / 11 1.4	6		14 / 12 / 7.9 0.71
2		13 / 10 / 9.5 0.66	7		15 / 11 / 9.6 0.88
3		14 / 12 / 9.8 0.90	8		14 / 12 / 8.1 0.72
4		15 / 10 / 10 0.73	9		13 / 11 / 9.7 0.62
5		16 / 11 / 8.1 0.86	10		16 / 13 / 11 1.2

表 4.4 土粒の最大降伏応力と圧縮ひずみ

Number of samples	Air-dried soil aggregate mass kg	Maximum yield stress N	Compressive strain ϵ
n=10			
Average	0.86×10^{-3}	52	0.17
Standard deviation	0.23×10^{-3}	36	0.037

4.3.2 圧縮装置による破壊過程

図 4.10 は、一軸圧縮試験装置による圧縮荷重とひずみ量を測定した時のソイルペレットの破壊過程を示している。このグラフはソイルペレットの圧縮試験中の荷重と変位を表しており、写真 (a) から (c) は、グラフに示すポイントにおけるソイルペレットの側面である。(a) の写真では、圧縮荷重は 24 N ($\epsilon = 0.0094$) を示している。ソイルペレットの中央部に細く縦にクラックが確認された。写真 (b) では、圧縮荷重は 19 N ($\epsilon = 0.015$) で、ソイルペレットが 2 つに割れた。写真 (c) では、圧縮荷重は 18 N ($\epsilon = 0.020$) でさらに多くのクラックが見られた。

粒状物質の弾性挙動については、Muttze [9] は、低圧では粒子が間質空間に移動することで、個々の粒子が弾性を形成しているような粒子間応力挙動がみられ、高圧では破壊に至るといふ応力挙動モデルを導出している。Wang と Yan [10] は、3D DEM を用いたシミュレーション結果を用いて粒子の破壊が微小なひずみでのひずみエネルギーの蓄積を阻害し、粒状土壌の動的せん断強度と膨張性を低下させることを実証した。

ソイルペレットの破壊過程の動画を詳しく観察したところ、垂直方向の圧縮荷重が最大値に達するまで水平方向にわずかに膨らみを生じていた。この時点に達するまでソイルペレットは弾性体として機能しており、この直後から破壊が始まったと考えられる。また、ソイルペレットでは垂直方向の圧縮荷重が最大値に達するとソイルペレットの中心部からクラックが見られ破壊が始まり、その後、多くのクラックによりソイルペレットは分割されたが一気に破壊されることはなかった。

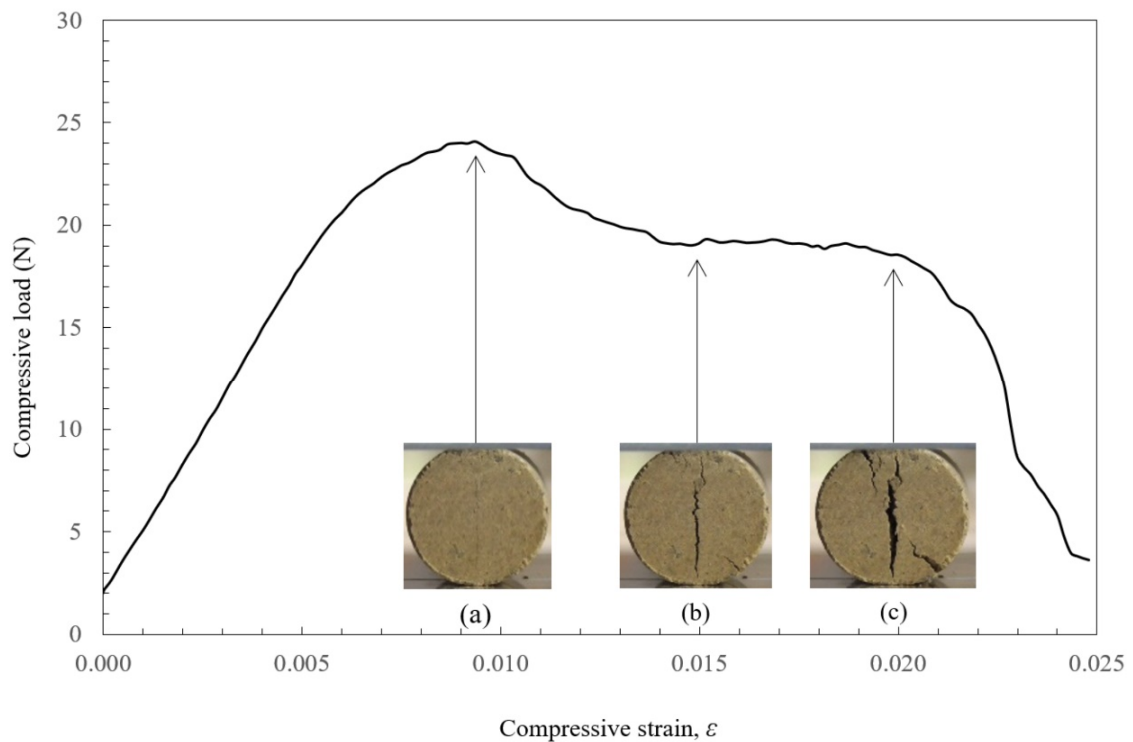


図 4.10 圧縮試験中のソイルペレットの破壊プロセス (a) ソイルペレットの中央に細い垂直にクラックが確認された, (b) ソイルペレットは2つに割れた, (c) さらに多くのクラックが見られた

4.3.3 摩耗による破壊実験

図 4.11 は、摩耗試験装置による実験で、カンチレバーの水平運動により回転させられたソイルペレットが破壊する瞬間を捉えたものである。この時の、カンチレバーによるソイルペレットへの往復回転荷重は 4 N であった。図 4.11 (a) では、ソイルペレットは全く壊れていない。その 0.5 秒後、図 4.11 (b) で大きな亀裂が入り破壊を始めた。さらに 0.5 秒後、図 4.11 (c) でソイルペレットは完全に破壊した。この間、わずか 1 秒であった。この瞬間的な破壊は、遊星式ロッドミルの容器の中で起きている破壊に似ている。

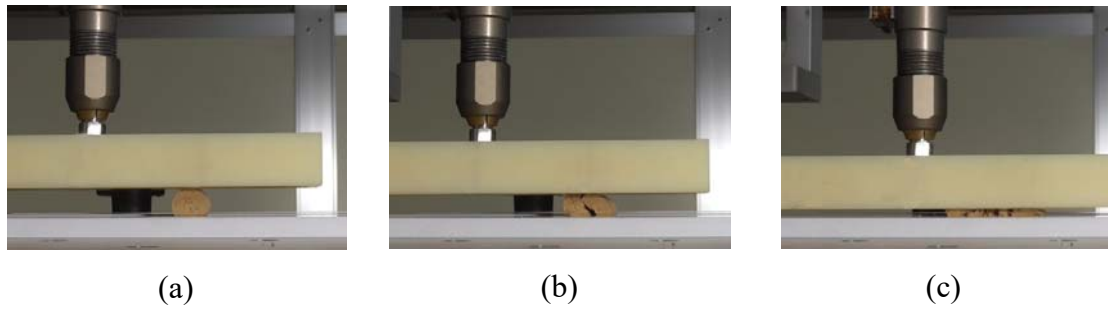


図 4.11 荷重 4 N を受けたソイルペレットが破壊する瞬間

図 4.12 は荷重を受けて回転させられたソイルペレットが破壊するプロセスである。補足として画像の下にイラストを掲載している。図 4.12 (a) はソイルペレットに接触しているカンチレバーの荷重が 8 N で、実験開始後 10 回転したソイルペレットを示している。この時点で、ソイルペレットの中心部に小さな亀裂が見られた。図 4.12 (b) に示すように、実験開始後 11 回転したソイルペレットの亀裂はさらに大きくなっている。実験開始後 13 回転したソイルペレットは、図 4.12 (c) に示すように複数の亀裂が形成された。この後、15 回転目にソイルペレットは完全に破壊した。

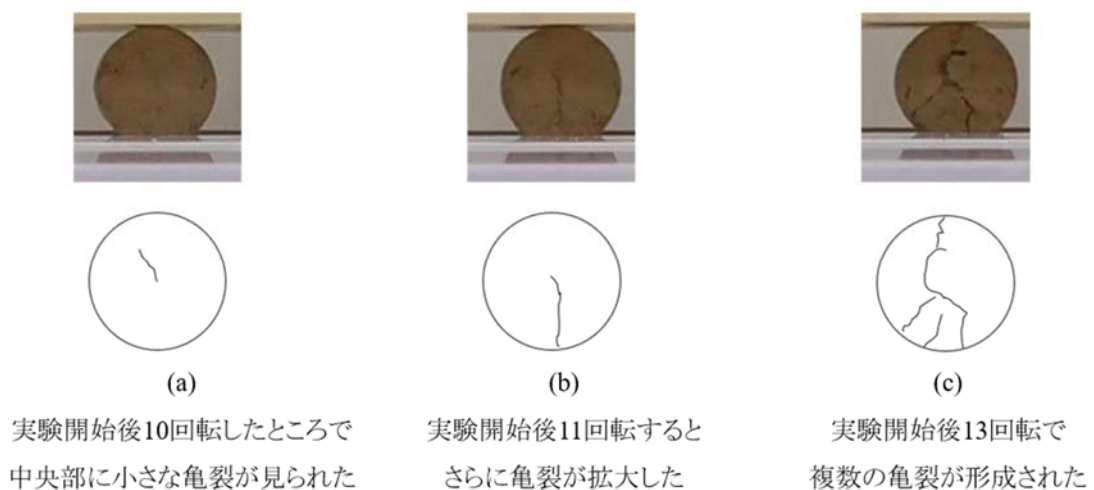


図 4.12 荷重 8 N を受けたソイルペレットの亀裂発生状況

摩耗試験装置を用いて 5 段階の荷重条件において各々 15 個のソイルペレットが破壊するまで往復回転荷重をかけてソイルペレットを回転させ、破壊されるまでの回数を測定した。実験の結果を図 4.13 に示す。縦軸はソイルペレットが破壊したときまでに何回転したかを回転数 (R_m) で示し、横軸はソイルペレットに接触しているカンチレバーの荷重 (W) を示している。

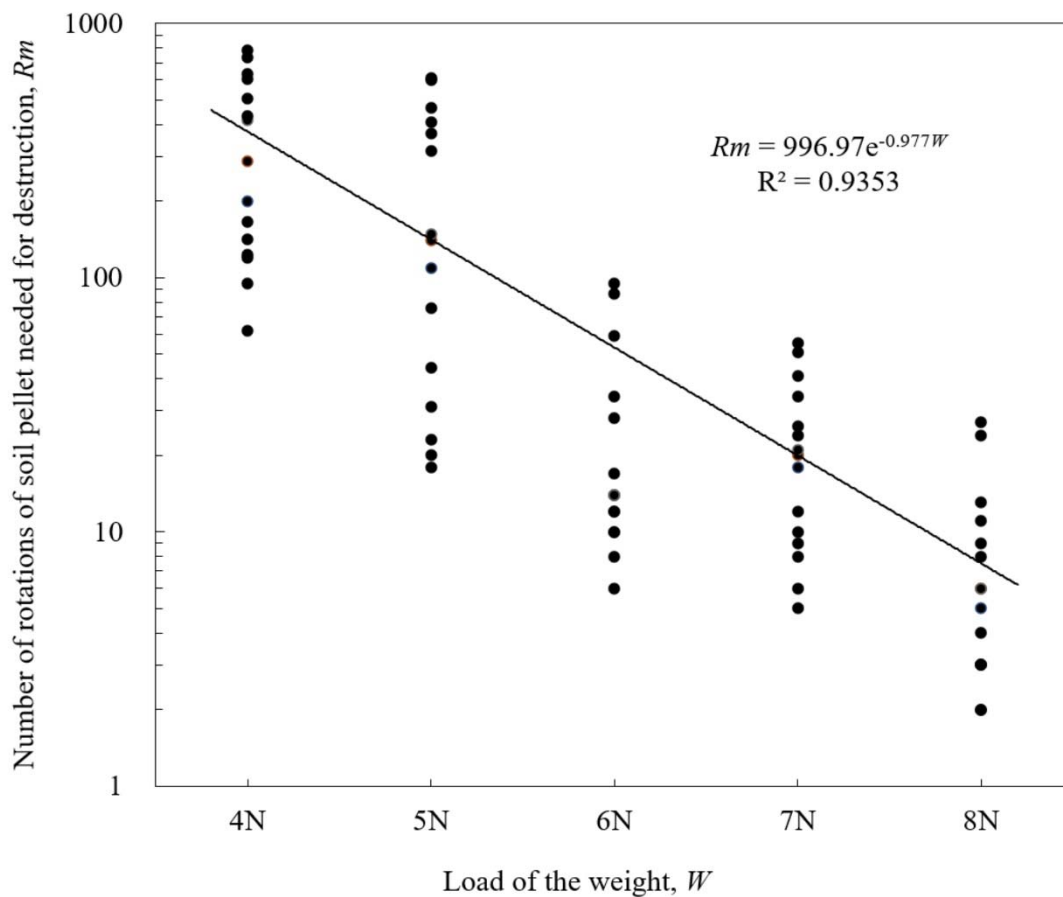


図 4.13 破壊したソイルペレットの回転数と荷重

前述したように、一軸圧縮試験装置による垂直圧縮荷重によってソイルペレットを破壊することに必要な最大圧縮力の平均値は 21 N であり、圧縮荷重のピークを過ぎると圧縮

荷重値は低下している。これは圧縮荷重のピークを過ぎると土壌粒子の結合力が低下していることを示している。実験の結果から、往復回転荷重で土粒を壊すことができる荷重が、垂直荷重圧縮の約 1/3 から 1/5 の範囲にあることを示している。さらに、ソイルペレットが破壊した回転数は、荷重が増加するにつれて減少することが明らかになった。言い換えれば、荷重が増加するにつれて、ソイルペレットが破壊する時間が短くなった(すなわち、少ない回転数で破壊できた)。往復回転荷重とソイルペレットが破壊した平均回転数とは反比例の相関があり、その相関係数は 0.9353 と高い相関関係を示している。このことから、容器内の土粒を粉砕する粉砕ロッドの質量と、遊星式ロッドミル内の粉砕容器の回転数との関係が示された。

また、第3章の摩耗による土粒の破壊では、通常粉砕実験に使用する土粒は歪な形状をしているため固定した状態で一部分だけにカンチレバーが接触した実験となっていた。しかし、粉砕装置の容器の中の土粒は、容器の回転と複雑な粉砕ロッドの動きにより、土粒も複雑に回転しながら粉砕ロッドと容器に押し付けられ擦られている。ソイルペレットを使用したこの実験は、こうした実際の粉砕容器の中で起きている挙動をシミュレートできていると考えられる。

摩耗試験装置による 8 N の往復回転荷重では、一軸圧縮試験と同様にソイルペレットの中心部から破壊する様子が確認できた。しかし、実験開始から破壊するまでの時間が短く、ソイルペレットにどのような変化が経時的に起きているのかを十分に確認できなかった。そこで、往復回転荷重 4 N での破壊過程を詳細に観察した。図 4.14 は、4 N の往復回転荷重実験の初期段階のソイルペレットの側面図であり、図 4.15 は、140 回転させた後のソイルペレットの側面の拡大図である。ソイルペレットの側面には、目視では大きな変化は見られなかったが、しかし、図 4.15 に示すように、デジタル顕微鏡(PlumRive社製 HDGMCS Pwh)による拡大観察すると、ソイルペレットの中心部と周方向を繋ぐ小さな亀裂があり、外周部の一部も欠けていた。また、165 回転後のソイルペレットは、8 N の往復回転荷重の場合と同様に大きな亀裂が入り、突如完全に破壊した。ソイルペレットに回転と荷重をかけるこの実験では、一軸圧縮試験装置を用いた場合よりも少ない応力でソイルペレットが破壊することが示された。これは、一軸圧縮試験装置ではソイルペレットに垂直荷重を与えるだけであるのに対し、摩耗試験装置ではソイルペレットを回転させて円

周方向の接触点に静荷重と動荷重を加えることで、土粒子間の結合強度が低下して、ソイルペレット内の土粒子間に亀裂が発生し、ソイルペレットが壊滅的な破壊を起こした。

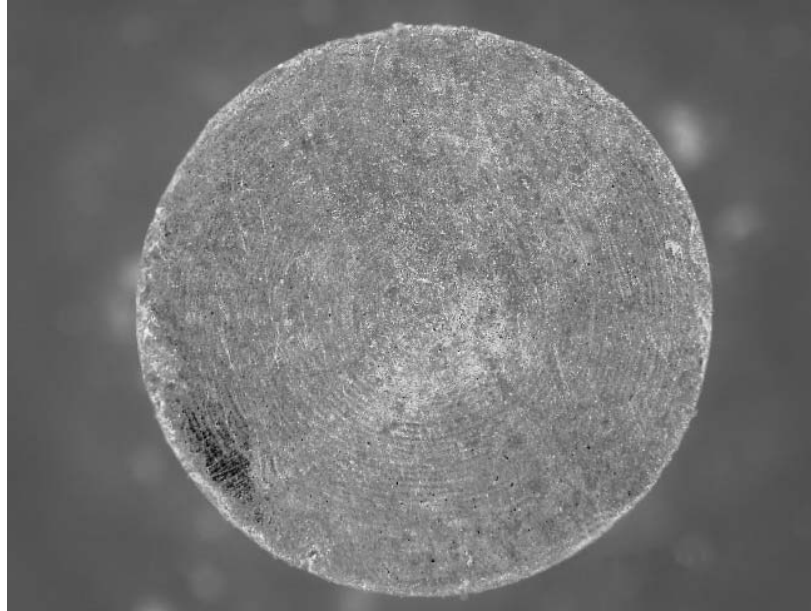


図 4.14 実験前のソイルペレットの側面

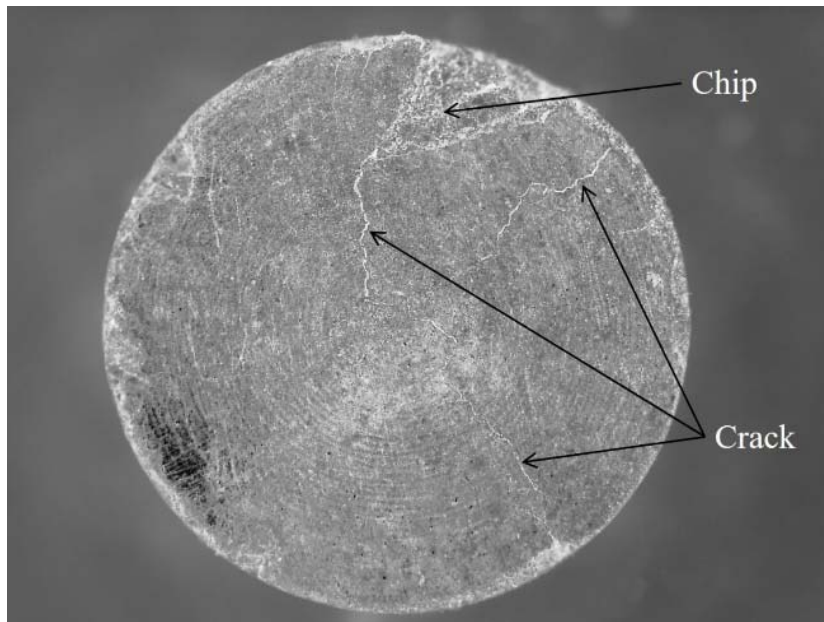


図 4.15 荷重 4 N で 140 回転後のソイルペレットの側面

4.4 まとめ

硬く団粒化した土粒の破壊について、圧縮荷重と摩擦の関係を明らかにするために、同じ寸法で、土質、粒子サイズを同じくしたソイルペレットを製作してモデル実験を行った。その結果、応力が円周方向に継続的に加えられたときソイルペレットは容易に破壊されることを示した。さらに、破壊に必要な応力は、垂直圧縮荷重よりも小さかった。これまでの研究では、遊星式ロッドミルで粉碎された土粒は、土粒子が土粒の表面から徐々に剥がされ破壊したと示唆されていたが、今回の実験では、応力が円周方向に継続的に加えられたとき土粒の表面からわずかに土粒子は剥がされるが、破壊プロセスは土粒の中心から始まり、その後、土粒全体が突然の破壊を引き起こしたことが明らかになった。ソイルペレットの回転が、ソイルペレット自体の破壊を引き起こし、それは中央から始まり、瞬時に周縁部に広がることを発見した。

参考文献

- [1] Takahashi, T., (2019) Ring and Rod Media Combination Effects on Continuous Pulverization by Tandem Ring Mill, *Journal of the Japan Institute of Energy*, 98, 333-339.
- [2] Défossez, P., Richard, G., (2002) Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil Tillage Research* 67, 41–64.
- [3] Yu, H., Fei, Q., Wang, R., Fan, B., Wang, Y., Shi, B., (2017) Study on Crushing Mechanism of Cone Crusher, *Advances in Computer Science Research*, volume 62, 612-616.
- [4] Nawaz, M. F., Bourrié, G., Trolard, F., (2013) Soil compaction impact and modelling. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, Springer Verlag / EDP Sciences / INRA, 33 (2), 291-309.
- [5] Majmudar, T. S., Behringer, R. P., (2005) Contact force measurements and stress induced anisotropy in granular materials. *Nature*, 435(23), 1079–1082.
- [6] Desrues, J., Chambon, R., (2002) Shear band analysis and shear moduli calibration. *Int J Solids Struct*, 39, 3757–3776.
- [7] Desrues, J., Viggiani, G., (2004) Strain localization in sand: an overview of the experimental results obtained in Grenoble using stereophotogrammetry. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 28, 279–321.
- [8] Izawa, S., Ogata, S., Yasuhara, H., Kinoshita, N., Kishida, K., (2020) Evaluation of Fracture Evolution of Granite during Brazilian Test by Numerical Analysis of Fracturing Process Considering Mineral Distribution, 69, 236-242.
- [9] Mütze, T., (2016) Modelling the stress behaviour in particle bed comminution. *International Journal of Mineral Processing*, 156, 14–23.
- [10] Wang, J. and Yan, H., (2012) DEM analysis of energy dissipation in crushable soils, 52(4), 644-657.

第5章 結論

生物と土は密接な関係を持っている。環境汚染の増加とともに土壌汚染も広がり始め、土壌分析の重要性が高まっている。土壌の化学的な分析を行う場合、各種環境調査マニュアルに従い土壌を前処理した後に分析をする。この前処理の段階で、自然界から採取した土壌を分析の目的に応じて粒径を一定以下に調整する必要がある。土壌の粒径を調整する場合、土壌の粉碎と篩分けという工程を経ねばならない。多くの測定対象土壌を分析するために、この粒径の調整を効率的に行える機械化が求められている。

こうした社会的な要求に対していくつものトライ&エラーと試作実験を繰り返し、その結果を基に開発された遊星式ロッドミルの能力は結果的には十分に満足できるものであるが、粉碎のメカニズムという本質的な理論構築がなされていない。

本論文では、装置の中で、何がどういう作用で粉碎を起こしているのかを解明して、近い将来に土壌の粉碎装置として進化させるための示唆を得ることにある。

各章ごとに得られた結論をまとめると、以下のとおりである。

第1章では、まず、土壌の基本的な三相の構造と、粉碎する土壌が固い塊の状態になる団粒という特徴的な土壌構造について説明した。また、粉碎については、様々な粉碎方式や装置が生み出されている。そのメカニズムや理論研究に触れ、従来の土壌専用の粉碎装置の問題点から社会が求める粉碎装置の開発された経緯と装置の特徴について説明をした。

遊星式ロッドミルは非常に優れた粉碎能力をもっているが、そのメカニズムは明らかにされていない。この粉碎メカニズムを解明することが装置のさらなる改良や効率化に示唆を与えると考え次章に続く研究をした。

第2章では、遊星式ロッドミルにおいて、土粒がどのように粉碎されるのかを調査した。まず、遊星式ロッドミルで使用する、粉碎ロッドと粉碎能力の関係について粉碎ロッドの大きさと数量による粉碎能力の関係を実験により明らかにすると非常にユニークな関係があり、最適な粉碎ロッドサイズが求められた。

次に、粉碎する土粒を一軸圧縮試験装置でひずみと破壊される荷重の最大値を測定した。測定した土粒毎にピーク値に大きな差が認められたが 1 番目のピークで土粒は破壊され2番目のピーク以後土粒はさらに断片化された。遊星式ロッドミルに取り付けられた粉碎容器内の加速度を計測すると粉碎ロッドが土粒に与える力は、一軸圧縮試験で得られた土粒を破壊させる荷重の最大値の平均値よりはるかに小さいことが分かった。そこで、遊星式ロッドミルに取り付けられた容器内で土粒が粉碎されるメカニズムを解明するために、容器の中で、粉碎ロッドと粉碎される土粒の挙動を容器上部に取り付けた高速カメラを用いて粉碎過程を撮影した。この可視化実験では粉碎ロッドが粉碎に大きな役割をしていることがわかった。可視化映像から粉碎過程の初期段階では不規則な粉碎ロッドの挙動により土粒に衝突して分割される様子を見ることができた。しかし粉碎過程が進むと容器内に土埃が多く発生し鮮明な画像が得られなかった。土粒の表面は粉碎ロッドと容器により摩耗にさらされているため、細かな土粒子は土粒の表面から発生している。土粒の角のある表面は粉碎ロッドが接近して移動するため、粉碎ロッドが土粒に接触・衝突する可能性が多くあり、それにより最初に削られ、次に表面の土粒子が結合力から解放されるために土粒全体が壊れやすくなると考えられた。

第 3 章では、前章の可視化実験で明らかにできなかった容器内での粉碎メカニズムを解明するために基礎的な実験により粉碎を検討した。ここではどのような種類の応力が迅速な粉碎を引き起こすのか、土粒の垂直振動試験と往復摩耗試験装置による圧縮・せん断応力試験を行い、土粒に作用する単一応力による粉碎メカニズムを観察した。

粉碎容器内の振動運動をシミュレートし振動容器に土粒を単体で投入し、垂直振動と水平振動を与えて土粒の変化を観察した。土粒の塊としての質量は、時間経過とともに対数的にわずかに減少するが、2 時間経過しても粉碎されなかった。したがって、遊星式ロッドミルの粉碎容器内での土粒の粉碎は衝撃圧縮によるものではなく、せん断応力によるのであると考え往復摩耗試験装置による圧縮・せん断応力試験をした。その結果、わずかなせん断力を土粒に加えるだけで短時間に壊滅的に土粒は破壊された。つまり、遊星式ロッドミルの粉碎容器内でロッドによるせん断力が土粒の粉碎に効果的であると考えられた。

第4章では、これまでの研究で、土粒の粉碎には圧縮せん断力が効果的であると示唆された。粒子状物質である土粒を圧縮するとわずかに弾性挙動が観察される。さらに圧縮を加えると弾性変形から破壊へと至る。自然界から採取した土粒では大きさも形状も均一ではなく、弾性変形から破壊へと至る力の伝搬プロセスについて定量的な試験には適していない。

本章では、同一質量・サイズのソイルペレットを製作して、破壊に至る圧縮荷重と摩耗との関係を明らかにすることに焦点を当てた。このソイルペレットに垂直圧縮荷重試験と、段階的に荷重を加えた圧縮摩耗試験を行い、破壊プロセスを観察した。

ソイルペレットの均一性について検討するため、同じ土質の土粒と垂直圧縮荷重試験により比較した結果、土粒の降伏応力とひずみ量の関係は不均一であるのに対し、ソイルペレットの94%は同じひずみ量で破壊した。ソイルペレットの垂直圧縮荷重試験を観察すると、1番目の圧縮荷重のピークでソイルペレットの中心部に垂直方向に亀裂が入り、亀裂の拡大とともに圧縮荷重が低下したが一気に壊滅的な破壊には至らなかった。

荷重を加えた圧縮摩耗試験では、垂直圧縮荷重試験同様にソイルペレットの中心部に亀裂が入り、亀裂の拡大とともに一気に壊滅的に破壊される様子が捉えられた。また、圧縮摩耗試験では段階的に加えた荷重量とソイルペレットの破壊に至るまでのペレットの回転数には対数的な相関関係があった。

垂直圧縮荷重は、ソイルペレットに垂直荷重を適用するだけであるのに対して、往復圧縮荷重を加えた圧縮摩耗試験ではソイルペレットは円周方向の接触点に動的荷重を加えるため周方向に静的荷重と動的荷重を加えることになる。これにより、土粒子間の結合強度が低下し、ソイルペレット内部の土粒子間に亀裂が発生し、ソイルペレットが一気に破壊すると考えられた。これは、粉碎容器内の土粒を粉碎した粉碎ロッドの質量と容器の回転との関係を示唆している。

本研究の成果により土粒の粉碎のメカニズムが解明されたことで、粉碎装置としての回転機構の検討や、せん断・摩耗・圧縮衝撃力をより効率的に土粒に与える手法の改善など、装置の小型化、製造コストの削減、粉碎効率の向上、省電力化など装置の進化を考えた設計変更を可能にするものと考えている。

研究業績

(本論文に関するもの)

1. 学術論文

- [1] Oishi, M., Kubota, Y., Mochizuki, O., (2019) Investigation of the Fragmentation Process of Clods in a Rod Mill Developed for Research Use, World Journal of Mechanics, 9, 233-243.
第2章の成果として論文に纏めたもの
- [2] Oishi, M., Kubota, Y., Mochizuki, O., (2019) Investigation of Fundamental Mechanism of Crushing of Clods in a Rod Mill, Engineering, 11, 703-716.
第3章の成果として論文に纏めたもの
- [3] Oishi, M., Kubota, Y., Mochizuki, O., (2020) Crushing Mechanism for Soil Particles, World Journal of Mechanics, 10, 69-82.
第4章の成果として論文に纏めたもの

2. 口頭発表

- [1] 大石正行, 窪田 佳寛, 望月修, 「土壌の粉砕過程」, 第44回 可視化情報シンポジウム, 混相流の可視化 I, E207, 2016年7月20日
- [2] 大石正行, 窪田 佳寛, 望月修, 「粉砕棒を用いた土壌粉砕の特性」, 日本機械学会2016年次大会, 環境工学部門一般セッション, G09001001, 2016年9月14日
- [3] Oishi, M., Kubota, Y., Mochizuki, O., (2016) Process of Fracturing Soil, American Society of Agronomy, Crop Science of America, and Soil Society of America Annual Meeting (Phoenix, AZ), Session title: Soil Pedology Oral, 6 Nov.

謝辞

本論文は、東洋大学理工学研究科 望月修 教授と機械工学科 窪田佳寛 准教授にご指導ご鞭撻を賜り作成されたもので心より厚く御礼申し上げます。望月教授には、社会人である私に大学院で学ぶ道筋を開いていただきました。入学前から自社の製品開発における様々な課題克服に対して幅広い知見と理論を基にご指導をいただき、入学後も技術者として研究に向かう姿勢と具体的な方策まで丁寧に指導をしていただきました。窪田准教授には、不得意な英語の論文投稿において細部にわたり丁寧に指導をいただきました。

吉田善一教授には、社会人として技術者として哲学の大切さを井上円了の話を交え示唆に富む教えをいただき感銘を受けました。田中尚樹教授に教えていただいた、確率や統計学で複雑な脳神経信号を処理する内容は未知で刺激的な世界でした。そして、社会人である私を快く迎えていただきサポートしていただいた生体医工学の先生方と望月研究室の皆様にご御礼を申し上げます。さらに研究と仕事が両立できるように支えてくれた全社員に感謝を申し上げます。

本論文の研究にあたり、土壌の基礎的な物理データ試験として、一般社団法人日本総合建築研究所(GBRC)様には大変お世話になりありがとうございました。また、埼玉県産業技術総合センター(SAITEC)様には、土壌の含水量測定・化学組成分析にご協力いただき心より感謝申し上げます。そして、北部研究所の高橋勝氏には一軸圧縮試験の動画撮影にも快く応じていただき貴重なデータと映像を撮ることができたことに感謝します。さらに、埼玉県の次世代産業参入支援事業費補助金に採択いただき遊星式ロッドミルを開発することができましたことに深く感謝いたします。

最後に、これまで私をあたたく応援してくれた妻 幸代、娘 佳奈恵、智恵と夫の中村龍治、そして孫の優弥、莉央渚、勇翔たちに心から感謝を申し上げます。

2020年6月

あとかき

遊星式ロッドミルの開発当初は失敗を繰り返し試行錯誤が続いた。この論文をまとめていてその当時のことを思い出すと、笑えるようなことを数多くしていたと思う。恥をしのんで一例をここに披露する。開発当初から、粉碎と篩分けを同時に、しかも土埃を出さない、世の中になく土壌専用の粉碎装置を開発するというコンセプトはできていた。その目的達成のために、篩を容器の中に入れるという今の容器の原型となるアイデアは既に私の中にはあった。従来の製品も他社の製品にも必ず粉碎媒体として金属ロッドやジルコニアボールなどを土と一緒に入れて粉碎しているのは周知の事実であった。しかし、粉碎ロッドやボールはコンタミ防止の観点から毎回洗浄をする必要があり作業性の向上とコスト削減を狙って、粉碎媒体無しでも粉碎できる方法はないかと考え、粉碎容器の篩部分(この上に粉碎する土壌が入る)に突起を付けることを考えた。考案したのが付図-1 (a) と (b) の2種類であった。



(a) 篩に突起を2個付けた



(b) 篩にプロペラ状の突起を付けた

付図-1 篩の上部に邪魔板を取り付けた試作品

成功を期待して、実際に土壌で試してみた。その結果を付表-1 に示す。容器を粉碎装置に取り付け2分間回転を与えてみたが、粉碎された粒子が篩を通過して下容器に回収できた量は、投入量の10%以下と大失敗。このアイデアはお蔵入りとなり、粉碎ロッドの採用を検討することになった。容器の中の土は容器と一体となって回転するという簡単な粉碎メカニズムがわかっていたら、この失敗は防げただろう。

付表-1 試作品で土壌投入量に対して篩を通過した土粒子の量

容器形状	土壌投入量 (kg)	2分後の土壌通過量 (kg)	土壌通過率 (%)
(a) 突起付	30×10^{-2}	14×10^{-3}	4.7
(a) 突起付	15×10^{-2}	13×10^{-3}	8.9
(b) プロペラ付	30×10^{-2}	10×10^{-3}	3.4
(b) プロペラ付	15×10^{-2}	8.4×10^{-3}	5.6

もう一つの事例は、あるユーザーから廃プラスチック(付図-2)を粉砕できないかと相談された。他の用途にも使えると売上が伸びるのではないかという単純発想で、この装置の粉砕メカニズムなど全く考えることもせず試みた。粉砕2分後、廃プラスチックは全く粉砕されなかった(付図-3)。粉砕ロッドの数も2本、3本、4本と増やしてみたが結果が変わることはなかった。その結果を付表-2 に示す。試す前に結果は想定できたはずで、もしかしたらという安易な考え方であった。



付図-2 廃プラスチック片



付図-3 粉砕2分後の状態

付表-2 廃プラスチック投入量に対して篩を通過した粉砕物の量

粉砕ロッド数	廃プラスチック の投入量	2分後の通過量	割合
		$\times 10^{-3}$ kg	%
2本	15×10^{-3} kg	0.20	1.3
2本		0.10	0.67
3本		0.10	0.67
4本		0.10	0.67

付録

登録特許

本論文で研究対象とした、遊星式ロッドミルと粉碎容器に関連する登録特許を紹介する。
発明者は大石正行。

特許 5055524 【発明の名称】土壌ふるい器 【登録日】平成 24 年 8 月 10 日(2012.8.10)

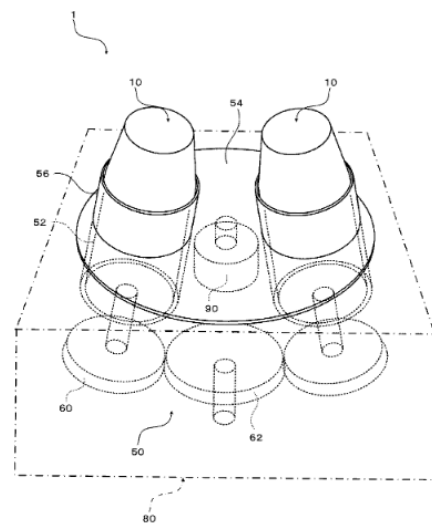
【要約】

【課題】土壌ふるい装置の分離効率を高めて、作業者の負担を軽減する。

【解決手段】この土壌ふるい器1は、土壌が収容される複数の土壌ケース10を回転装置50に対して着脱自在に搭載する。回転装置50は、この土壌ケース10を自転及び公転させる。土壌ケース10は、上方に配置されて土壌収容部20と、複数の開口によって土壌を分離する土壌ふるい部30と、土壌ふるい部の下側に配置される土壌回収部300を有するようにして、自転・公転中に、土壌ケース10内で完結的に土壌のふるいが完了するようにした。

【選択図】図1

【図 1】



特許 5828530 【発明の名称】容器 【登録日】平成 27 年 10 月 30 日(2015.10.30)

【要約】

【課題】高い作業効率、コンタミネーションの抑制、効率よくふるい処理等を実現する容器を提供する。

【解決手段】容器10は、外側容器40と、外側容器40に収容された内側容器30とを備える。容器10は、内側容器30に収容された物体に対し所定の処理を行なうものである。内側容器30は、物体のふるい処理を行なうためのふるい孔30Xが周部に形成された内側有底筒を有する。

【選択図】図3A

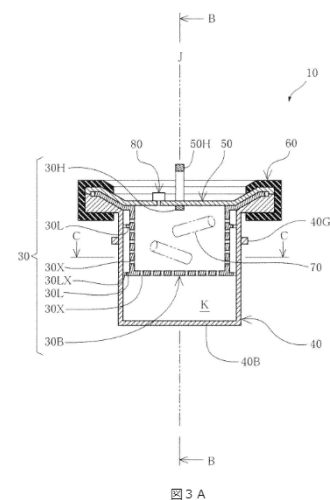


図 3 A

特許 6590383 【発明の名称】土壌ケース 【登録日】令和1年9月27日(2019.9.27)

【要約】

【課題】各部の結合にかかる手間を最小限にした土壌ケースを提供する。

【解決手段】収容される土壌に対してふるいをかける土壌ケースであって、土壌が収容され、第一の開口を有する有底筒状の収容部11と、第一の開口と対向する第二の開口を有し、ふるいをかけられた土壌を回収する回収部12と、第一の開口と第二の開口と間に配され、互いの内部空間同士を連通する貫通孔133を有し、貫通孔の通過により収容された土壌にふるいをかける土壌ふるい部13と、収容部の有底側の端面に当接しつつ端面を横断すると共に、少なくとも2箇所回収部と繋がって、収容部を回収部へ向かって押圧する押圧部14と、を備える。

【選択図】図5

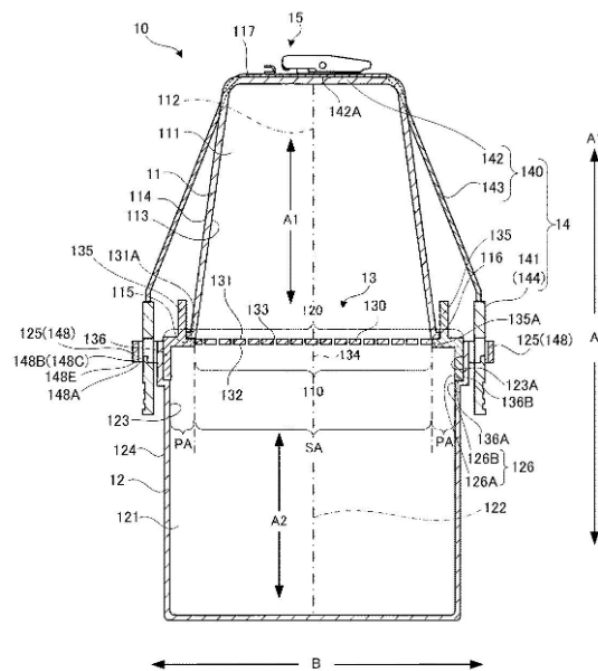


図5

本研究以外の発明一覧表(登録特許)

特許番号	発明の名称	発明者	登録日	出願日
6541112	土壌硬度測定装置	大石正行	2019年6月21日	2017年5月2日
6517256	反射光検出装置	大石正行	2019年4月26日	2017年2月27日
6703276	液分測定装置	大石正行	2020年5月12日	2017年1月13日
6583890	透水試験装置	大石正行	2019年9月13日	2016年4月28日
6573359	土壌水分測定装置およびテンシオメータ	大石正行	2019年8月23日	2015年2月10日
6124396	実容積計測器	大石正行	2017年4月14日	2013年1月22日
5904576	透水試験装置及び透水試験設備	大石正行	2016年3月25日	2012年1月17日
5747324	発生ガス検出装置	大石正行	2015年5月22日	2011年5月9日
5733748	土壌中揮発性物質抽出装置	大石正行	2015年4月24日	2011年4月6日
5636563	デジタル土壌物理性計測装置	大石正行	2014年10月31日	2012年3月8日
5779753	土壌中揮発性物質抽出装置	大石正行	2015年7月24日	2010年4月6日
5374791	水滴形成装置	大石正行	2013年10月4日	2009年12月7日
4565041	デジタル土壌物理性計測装置	大石正行	2010年8月6日	2009年3月12日

上記は2020年5月31日現在、権利はすべて存続している。

受賞履歴

本論文で研究対象とした、遊星式ロッドミルについて2件の受賞をした。

2014年2月5日に埼玉県主催の第12回渋沢栄一ビジネス大賞特別賞(テクノロジー部門)を受賞した。



左:埼玉県知事上田清司氏(当時)より表彰状が授与された

2016年2月18日 一般社団法人機械振興協会主催、第13回新機械振興賞・審査員特別賞を受賞した。



表彰状と受賞記念盾