

令和 5 年 5 月 20 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03670

研究課題名(和文) 流れる固体の物理：「粉体力学」の確立に向けた包括的研究

研究課題名(英文) Physics of flowing solids

研究代表者

大槻 道夫 (Michio, Otsuki)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授

研究者番号：30456751

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：砂や粉などのマクロな固体粒子の集合体である粉体は、状況に応じて流体的な振る舞いも固体的な振る舞いも示す、ある種の「流れる固体」として考えられる。こうした粉体の流れについて、一様な剪断を受けた場合の力学的特性について、数値計算と理論解析をもとに非線形応答に関するスケーリング則などを発見した。また、そうした一様な系の力学的特性をもとにした連続体モデルを用いて、様々な流れ場についての解析を行い、その結果を数値計算と実験と比較した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

類似の連続体モデルに基づいた粉体のマクロな流動・変形の解析に関しては、これまで主に土木工学的な視点から研究が進められてきた。しかし、既存の枠組みでは、粉体の力学的特性として多数のパラメータを含む経験則を仮定した上で複雑なシミュレーションを実施するしかなく、実際の現象の理解には不十分な面がある。本研究の遂行により、連続体モデルに、微視的観点から得られる力学的特性の知見を組み合わせることで、ある種のミクロな土台に基づいた粉体ダイナミクスの理解が進んだと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Granular materials consisting of macroscopic solid particles can be considered as "flowing solids" that exhibit both fluid-like and solid-like behavior depending on the situation. Based on numerical simulations and theoretical analysis, we have revealed scaling laws for the nonlinear response of granular materials under uniform shear. Using a continuum model based on the constitutive equations obtained from the above analysis, we have analyzed various flows. The analytical results are compared with those of numerical simulations and experiments.

研究分野：非線形物理

キーワード：粉体 ジャミング転移 レオロジー

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

一般に、物質は固有の形を持った固体か、固有の形を持たない流体に区分される。ところが、問題の砂は、構成する粒子自体は固体であるが、集団としての振る舞いは流体とも固体とも言い難い奇妙なものとなっている。例えば、砂時計の中に形成される砂山を注意深く見ると、底面に近い層は全く動かず、固有の形を持った固体とみなせる。一方、表面の層は明らかに流れており、ある種の流体とみなせる。つまり、砂は状況に応じて固体的な振る舞いも流体的な振る舞いも示す「流れる固体」と考えることができる。

砂時計の流れを見ると、粒子の密度(充填率)が固体的な層と流体的な層で異なっていることがわかる。つまり、砂の振る舞いが密度で切り替わっていると推測される。こうした密度変化による固体的な振る舞いから流体的な振る舞いへの切り替わりはジャミング転移と呼ばれ、近年になって注目を集めている。実際、ジャミング転移は泡、コロイド分散系、エマルジョンなどのマクロな粒子の高密度集合体で普遍的に観測されるため、主に統計・物性物理の観点から、新たな非平衡相転移として現在まで様々な研究が実施されている。

近年の粉体物理は、こうした転移現象に着目し、一様で摩擦のない球形粒子の集合体をモデルとして、その臨界的性質を微視的な観点から解き明かすことで発展してきた。しかし、そのような理想化された系の理論が、砂時計のような現実の粉体のマクロな挙動の解明に繋がるかは不明な状況であった。

### 2. 研究の目的

通常の流体や弾性体の挙動は、それぞれ応力とひずみ速度・ひずみの比例関係に基づいた連続体力学(流体力学・弾性力学)によって完全に理解でき、それらの物性を特徴付ける粘性係数と弾性係数は、物質を構成する分子の微視的な構造から統計力学を応用することで決定できる。上記のような粉体の挙動の理解のために、このような流体力学・弾性力学の枠組みと並ぶ「粉体力学」の確立を目指した。

具体的には、粒子間摩擦を含む現実的な系での粉体の力学的特性の微視的な視点からの解明と同時に、その知見を取り入れた連続体モデルによる粉体のマクロな流動現象の理解を相補的に発展させる。類似の連続体モデルに基づいた粉体のマクロな流動・変形の解析に関しては、これまで主に土木工学的な視点から研究が進められてきた。しかし、既存の枠組みでは、粉体の力学的特性として多数のパラメータを含む経験則を仮定した上で複雑なシミュレーションを実施するしかなく、実際の現象の理解には不十分な面がある。本研究の遂行により、連続体モデルに、微視的観点から得られる力学的特性の知見を組み合わせることで、ある種のミクロな土台に基づいた粉体ダイナミクス理解が可能となることを期待し研究を進めた。

### 3. 研究の方法

上記の目的のために、以下の二つの課題と並行して進めた。

#### 課題1：ジャミング転移を含む粉体の特異的な力学的特性の微視的解明

粉体は応力を加えると、低密度状態ではせん断速度で特徴付けられる流れが発生する一方、ジャミング転移点を越えた高密度状態では応力が降伏応力を超えるまで全く流れない。摩擦のない粒子系では、臨界性が平均場解析で明らかにされているが、摩擦や粒子形状の影響によって、その理論では説明できないシアシックニングやシア・ジャミングといった特異的な現象が発生する。これらの影響を粒子シミュレーションで調べるとともに、その知見をもとにこうした非線形応答を記述する理論的な枠組みの構築を試みた。

#### 課題2：粉体のマクロな流動に関連した多様な問題の解明

近年、非局所性を取り込んだ連続体モデルの粉体における有効性が示されている。課題1で結果を踏まえて、具体的な粉体の系においてそのような連続体モデルを用いることでさまざまな未解明現象の解明を目指した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 雑誌論文 1,3,5,6,8,9

課題1の力学特性の微視的な理解に対して、特に剪断を加えた際の粘弾性応答に関する成果を得た。まず、雑誌論文1,3,5に関しては周期的な剪断を受けた粉体の複素弾性率を離散要素法によって数値的に解析し、歪みが大きい場合に発生する非線形応答について、それが充填率や摩擦係数によって大きく変化することを発見した。特に粒子の軌道に着目することで塑性変形と合わせた解析を実行し、塑性変形によって非線形応答が発生するという従来の描像が成り立たないソフトニングと呼ばれる現象が存在することを明確に示した。この結果について雑誌論文6,8において、軌道のフーリエ解析と簡単な低次元有効モデルの理論解析により、それらが発生メカニズムを明らかにした。理論から得られた結果は、図1と2に示したように、数値計算で得られた貯蔵弾性率の振る舞いを完全に再現する。

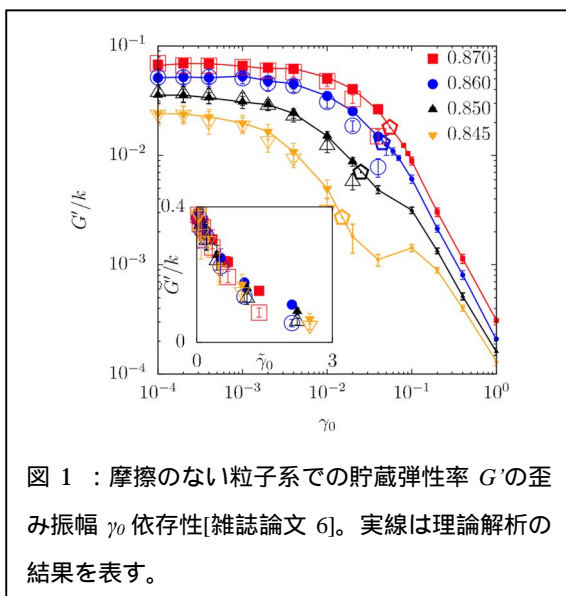


図1：摩擦のない粒子系での貯蔵弾性率  $G'$  の歪み振幅  $\gamma_0$  依存性[雑誌論文 6]。実線は理論解析の結果を表す。

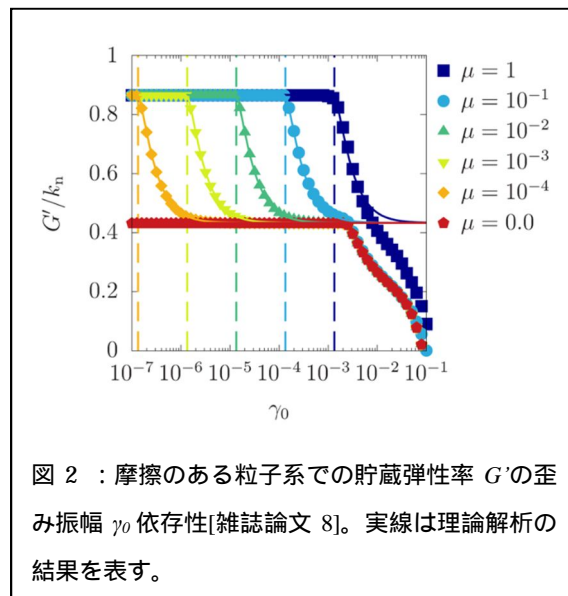


図2：摩擦のある粒子系での貯蔵弾性率  $G'$  の歪み振幅  $\gamma_0$  依存性[雑誌論文 8]。実線は理論解析の結果を表す。

##### (2) 雑誌論文 2,4,7,10

課題2のマクロな流動現象の理解に対して、複数の成果を得た。雑誌論文2では、上下方向の加振を受けた砂山の流動を解析し、数値計算、実験で成立する流量のスケールングを簡単な連続体モデルから示した(図3)。雑誌論文4,10では外力を受けたペースト、あるいは粉体について、その流れ場を課題1で得られた応力と歪み・歪み速度に関する構成関係を仮定した連続体モデルで解析し、応力場や速度場に関する理論と数値計算・実験との比較を行った。

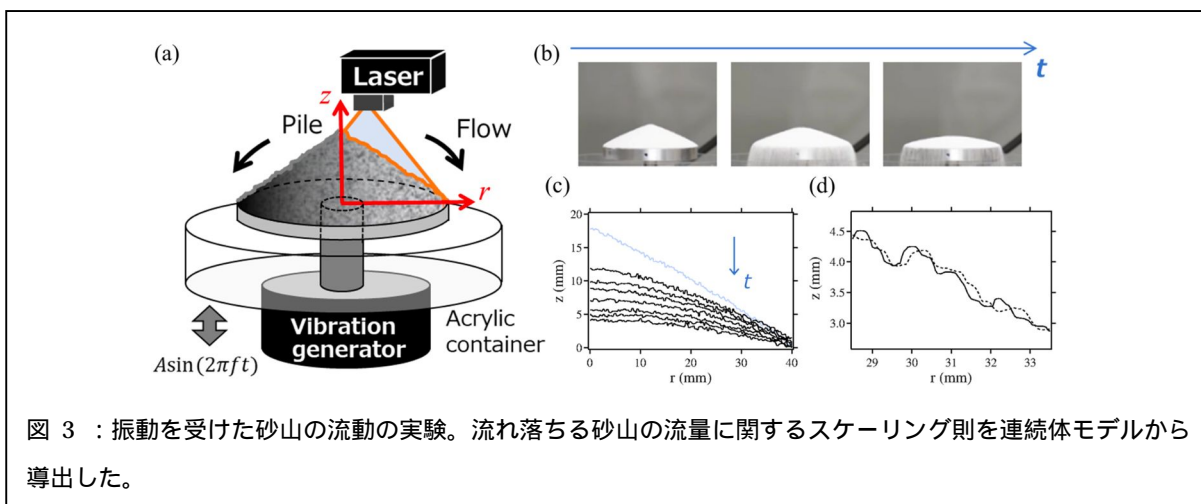


図3：振動を受けた砂山の流動の実験。流れ落ちる砂山の流量に関するスケールング則を連続体モデルから導出した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Otsuki Michio, Hayakawa Hisao	4. 巻 44
2. 論文標題 Shear modulus and reversible particle trajectories of frictional granular materials under oscillatory shear	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal E	6. 最初と最後の頁 70-1, 70-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epje/s10189-021-00075-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Morita Jumpei, Otsuki Michio	4. 巻 44
2. 論文標題 Memory effect of external oscillation on residual stress in a paste	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal E	6. 最初と最後の頁 106-1, 106-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epje/s10189-021-00111-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Otsuki Michio, Hayakawa Hisao	4. 巻 44
2. 論文標題 Shear modulus and reversible particle trajectories of frictional granular materials under oscillatory shear	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal E	6. 最初と最後の頁 70
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epje/s10189-021-00075-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tsuji Daisuke, Otsuki Michio, Katsuragi Hiroaki	4. 巻 99
2. 論文標題 Laboratory experiment and discrete-element-method simulation of granular-heap flows under vertical vibration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 62902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.99.062902	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Otsuki Michio, Hayakawa Hisao	4. 巻 101
2. 論文標題 Shear jamming, discontinuous shear thickening, and fragile states in dry granular materials under oscillatory shear	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 32905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.101.032905	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Otsuki Michio, Hayakawa Hisao	4. 巻 128
2. 論文標題 Softening and Residual Loss Modulus of Jammed Grains under Oscillatory Shear in an Absorbing State	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 208002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.128.208002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Iwashita Wataru, Matsukawa Hiroshi, Otsuki Michio	4. 巻 13
2. 論文標題 Static friction coefficient depends on the external pressure and block shape due to precursor slip	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 2511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-29764-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Otsuki Michio, Hayakawa Hisao	4. 巻 19
2. 論文標題 An exact expression of three-body system for the complex shear modulus of frictional granular materials	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 2127 ~ 2137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2SM01565J	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ishima Daisuke, Saitoh Kuniyasu, Otsuki Michio, Hayakawa Hisao	4. 巻 107
2. 論文標題 Eigenvalue analysis of stress-strain curve of two-dimensional amorphous solids of dispersed frictional grains with finite shear strain	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 34904
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.107.034904	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 林健太、吉井究、大槻道夫	4. 巻 41
2. 論文標題 粉体の平面ポアズイユ流れにおけるジャミングの連続体解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計24件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Michio Otsuki
2. 発表標題 Softening and loop trajectories of granular materials under oscillatory shear
3. 学会等名 Fluid Fracture Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大槻道夫
2. 発表標題 Softening and loop trajectories of jammed grains under oscillatory shear
3. 学会等名 ガラス転移と関連分野の最先端研究
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大槻道夫、早川尚男
2. 発表標題 周期的剪断を受けた高密度粉体における弾性応答とループ軌道
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Michio Otsuki
2. 発表標題 Softening and residual loss modulus of jammed grains under oscillatory shear
3. 学会等名 駆動散逸系の非平衡現象に関する理論的研究(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大槻道夫、早川尚男
2. 発表標題 摩擦を持つ粉体における複素弾性率のスケーリング
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大槻道夫、早川尚男
2. 発表標題 周期的剪断を受けた粉体のSofteningとループ軌道
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会(オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大槻道夫、早川尚男
2. 発表標題 周期的剪断を受けた高密度粒子系におけるループ軌道と異常弾性応答
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉井究、大槻道夫
2. 発表標題 濡れた高密度粉体系のレオロジー
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 (オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉井究、大槻道夫
2. 発表標題 濡れた粉体系の弾性応答
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鯨崎佑介、大槻道夫
2. 発表標題 付着力を持った粉粒体のふるいによる分離現象
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 黒田遼, 大槻道夫
2. 発表標題 平板間の粉体流の連続体解析
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒田遼, 大槻道夫
2. 発表標題 平板間における粉体流動の充填率依存性
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 (オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鯨崎佑介, 大槻道夫
2. 発表標題 ふるいによる粉体分離の最適化
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 (オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大信田丈志, 大槻道夫, 後藤晋, 松本剛
2. 発表標題 コロイド液体における変位相関の粘弾性モデルの数値的検証
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 (オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本剛, 大槻道夫, 大信田丈志, 後藤晋
2. 発表標題 オイラー、ラグランジュ記述の乱流速度フーリエ成分の相関関数と線形応答関数の時間スケール
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2020 (オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大信田丈志, 大槻道夫, 後藤晋, 松本剛
2. 発表標題 コロイド液体の変位相関のモデルに現れる係数の濃度依存性
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大槻道夫
2. 発表標題 周期的せん断を受けたジャミング転移点近傍の粉体レオロジー
3. 学会等名 日本地球惑星連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Michio Otsuki
2. 発表標題 Shear jamming, fragile states, and yielding in granular materials under oscillatory shear
3. 学会等名 4th Annual Packing Problems Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大槻道夫, 早川尚男
2. 発表標題 摩擦のある粉体におけるYielding transition
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Michio Otsuki
2. 発表標題 Shear jamming and yielding transition in frictional granular materials
3. 学会等名 2019 International Workshop on Glass Physics in Beijing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大槻道夫
2. 発表標題 ペーストの記憶効果の2次元弾塑性モデル
3. 学会等名 ソフトマター研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林健太, 吉井究, 大槻道夫
2. 発表標題 粉体の平面ポアズイユ流れにおけるジャミングと臨界スケーリング
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林健太, 吉井究, 大槻道夫
2. 発表標題 粉体の平面ポアズイユ流れにおけるジャミングの連続体解析
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Michio Otsuki
2. 発表標題 An exact expression of three-body system for the nonlinear response of frictional granular materials
3. 学会等名 Japan-France joint seminar "Physics of dense and active disordered materials"
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関