

令和元年6月13日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03707

研究課題名(和文) 衝突・振動による粉体の過渡レオロジーとその天体地形への応用

研究課題名(英文) Transient rheology of granular matter probed by impact and vibration and its application to astronomical terrain dynamics

研究代表者

桂木 洋光 (Katsuragi, Hiroaki)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：30346853

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,910,000円

研究成果の概要(和文)：レゴリスと呼ばれる粒子群(粉体)で覆われる固体天体表面で起こる地形進化の基礎物理を理解するために、粉体層に衝突・振動等を加えた際の過渡レオロジー則について研究を進めた。特に振動による粉体対流、振動による砂山の流動化とそれに伴う傾斜地形の緩和、付着性粉体による傾斜地の衝突による崩壊などについての実験研究を行った。更に粉体対流については、小惑星表面の衝突誘起対流による表面更新年代を見積もるモデルについても構築し、表面更新が小惑星の寿命より短い時間で起こる可能性が高いことを明らかにした。また、実際の火星衛星フォボス上のクレーター地形の観測結果より、衛星に特有なクレーター緩和についても考察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粉体に関する自然現象は我々の周囲に普遍的に存在する。本研究は特にその中でも天体表面地形と粉体物理に関する研究を行った。研究は実験を中心としながらも数値計算や惑星探査データの解析などにも取り組み、対象・手法ともに学際的共同研究が行われた。得られた成果は主に天体地形進化の基礎過程に関するもので、同時に粉体物理の基礎理解を推進するものでもあった。特に、室内実験の結果をもとに小惑星表面の対流による更新時間が小惑星の寿命より短くなり得ることを示すモデルの構築では、実験・理論モデル・観測による情報などあらゆる知見を総合させる必要があったが、最終的に定量的評価に成功した。

研究成果の概要(英文)：To understand the principles governing the development of surface terrains on astronomical bodies covered with regolith, we studied the transient rheology of impacted and/or vibrated granular matter. Specifically, we performed experiments (and numerical simulations) on granular convection, slope relaxation of a vibrated granular heap, and impact-induced collapse of an inclined cohesive granular layer. Particularly, we estimated the timescale of convection-induced resurfacing of small asteroids and revealed that the resurfacing timescale is shorter than the asteroids lifetime. In addition, the peculiar crater relaxation on Martian satellite Phobos was also analyzed.

研究分野：粉体物理実験

キーワード：粉体物理 天体地形

## 1. 研究開始当初の背景

片栗粉と水を混ぜた懸濁液を素早くつかむと一瞬で固まる。しかし、それはすぐに流動化して指の間から流れ落ちる。このシア・シックニング現象は、粉体-流体混合系の示す反直感的現象の代表例として実演されることも多いが、その基礎物理過程は良く理解されていない。これは、粉体系のレオロジー挙動が複雑なためである。高分子系をはじめとするソフトマター研究において、正弦振動等による動的定常状態下でのレオロジー(粘弾性)計測の技術はほぼ確立されている。しかし、粉体に関しては定常状態下での計測が必ずしも容易ではなくレオロジー基礎の研究が立ち後れている。粉体现象におけるレオロジー研究の複雑性として以下の2点を例としてあげることができる。

- ① 衝撃のような急激な変化への過渡応答理解の複雑性
- ② 離散的構成粒子ネットワークによる振動・波動伝播特性の複雑性

我々はこれまでもこれらの複雑性の解明を目指した研究に取り組んできており、既にいくつかの成果を挙げてきた。例えば①については、粉体への固体弾衝突現象の研究によって衝突抵抗力の基礎方程式を確立してきた[1]。一方、②に関しては、粉体への低速押込力の非線形性が粉体の離散性と関連することを実験的に明らかにしてきた[2]。しかし、これらの先行研究では、①、②の要素についてそれぞれ個別に迫るアプローチをとっていた。そこで、本研究では両者を融合させ、衝突により誘起される振動・波動および自由表面変形の計測を行い、粉体の過渡レオロジー理解の更なる深化を目指す。

粉体の過渡レオロジー挙動は基礎物理の未解決問題であるだけでなく、様々な応用においても非常に重要となる。上述のシア・シックニング現象のほか、地盤の液状化や土石流なども粉体の関わる自然現象の典型例であり、化学工学における物質輸送問題においても、粉体系の制御は最も難しい課題の一つである。これらの現象の素過程にはいずれも粉体の過渡レオロジーが深く関わっている。

本研究では、具体的応用現象として、多くの太陽系固体天体の表面を覆うレゴリスと呼ばれる砂礫粒子の隕石衝突等への応答とそれに伴う天体表面地形進化に注目する。天体の表面進化は様々な要因の影響を受ける(図1)。例えば、隕石などの天体衝突がクレーターを形成することは比較的良く知られているが、同時に衝突起因の振動により既存クレーター地形の緩和がもたらされることはあまり知られておらず研究が十分に進んでいない。これらの効果を統一的に理解するためにはソフトマター物理の立場から粉体衝突の過渡レオロジーを理解することが必要不可欠となる。また、天体表面地形は天体上で起こった過去の現象に関する大規模実験データベースとみなすこともでき、その室内実験との比較はソフトマター物理の発展のためにも有益と言える。

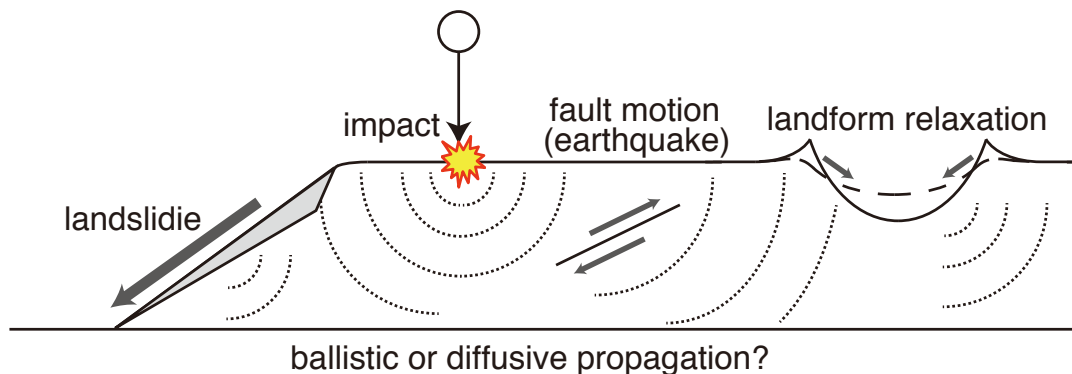


図1：衝突で誘起される振動・波動伝播による地滑り，断層運動，(クレーター)地形緩和等の過程の模式図。

## 2. 研究の目的

以上のような背景を受け、本研究では粉体層に衝突や振動を加え、結果としてどのような自由表面変形が起こるかを明らかにする。これにより粉体の衝突過渡レオロジー則を確立することが目標となる。手法としてはまずは実験的手法を用い、必要に応じて数値計算も試みる。続いて実験で得られたデータを元に、粉体過渡レオロジーに関する構成関係モデルを確立する。また、小天体表面地形の進化を定量的に評価するために天体衝突頻度や全球振動時間などについてもモデル化を行い、小惑星表面のレゴリス運動の時間スケールを見積もる。更に、実際の惑星探査データにおよぶクレーター形状の緩和の解析結果等とモデルを比較し、固体天体の衝突史解明も目指す。具体的には、惑星や小天体等の探査データから適切な表面地形(クレーター等)をピックアップし、その形状(地形)緩和とレオロジー則との関係を解析する。

本研究では定常状態ではなく衝突もしくは緩和という過渡状態にあえて注目し、粉体衝突・

振動による自由表面変形特性（地形緩和）を解析することにより、粉体の過渡レオロジーに迫る。また、関連する粉体物理の基礎についても振動層やサイロ流などの設定で実験を行いその理解を深める。衝突による粉体の過渡レオロジー挙動は、上述のように砂礫で覆われる固体天体表面における隕石衝突時の表面地形進理解のためにも必要となる物理素過程であり、本研究では、実験・理論・探査の手法を総合し、ソフトマター物理と惑星現象の深い洞察を同時に目指す。

### 3. 研究の方法

実験、モデリング、探査データ解析、数値計算などの様々な手法を用いて、粉体の振動・衝突・流れによる過渡レオロジー則の確立と、天体表面史理解に取り組む。具体的には、以下のような項目の研究を行う。

- ① 天体衝突頻度モデルと粉体対流速度のスケーリング則を組み合わせて小惑星表面の対流による表面更新時間を見積もる手法を確立する
- ② 静的には安定な砂山に振動を加えることにより傾斜が緩和する際のダイナミクスをモデル化する
- ③ 傾斜地形へ固体弾を衝突させその応答を実験的に観察する
- ④ 火星衛星の実際の天体表面形状よりクレーターの形状緩和などの様子をモデル化し衛星特有の地形緩和過程を理解する

### 4. 研究成果

上記の各トピックについてそれぞれ得られた成果を以下に概説する。

#### 4-1. 小天体表面更新のモデル化

比較的規模の小さい小惑星では隕石衝突により天体全体が振動する状態になり得る。そのような全球振動状態ではレゴリスの対流が起こり、小惑星の表面が更新されるかもしれない。小惑星の表面が対流により更新されるとするとどの程度の時間スケールで更新が起こるかが重要な問題となる。この間に答えるために、我々は実験的に調べた粉体対流速度のスケーリング形式[3]を用いて、小惑星表面更新の時間スケールを見積もった。その結果、小惑星の表面で起こり得る対流による表面更新のタイムスケールは小惑星の寿命より十分小さくなること became 明らかになった[4] (図2)。

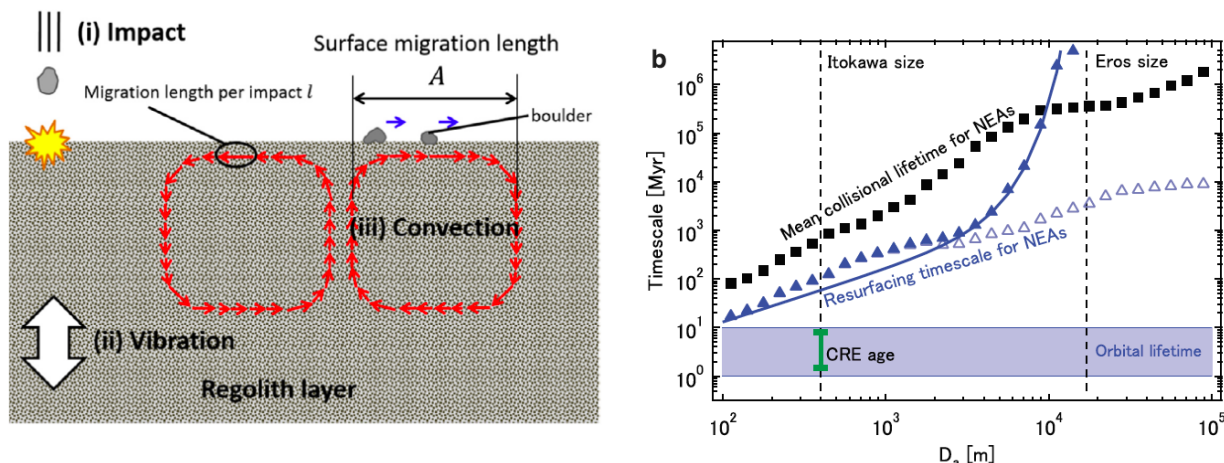


図2：(左) 隕石衝突による天体表面レゴリス対流の概念図。(右) 小惑星の寿命(黒)と表面更新時間(青)の小惑星サイズ  $D_0$  依存性。ともに[4]より引用。

#### 4-2. 砂山の振動緩和

振動による傾斜粉体層の地形緩和のモデル実験として、円盤状にコーン形状の粉体層を作成し、鉛直振動を加え形状の緩和を追跡する実験を行った(図3)。振動の周期や振幅、粉体粒子の種類等を系統的に変化させ、形状緩和の様子をレーザープロファイラで観察した。得られたプロファイルの時間発展の解析の結果、形状の緩和を決定する輸送速度が傾斜に非線形的に依存し、振動の速度と安息角から求まる摩擦係数の逆数の二乗に比例することが分かった[5]。これにより、粉体の摩擦特性と振動の特性が分かれば、傾斜粉体地形の形状緩和の様子が少なくとも数値的には求まる表式を得ることに成功したと言える。ただし、実験に用いた粉体層全体のサイズが小さいことの影響、粉体層内部の流動化状態など今後更に検討を進めるべき課題も本研究遂行の中で明らかになってきた。





図3：円盤状の粉体砂山が鉛直振動により緩和する様子（矢印の方向に時間発展）。[5]より引用。

#### 4-3. 傾斜粉体層への固体弾衝突

衝突による傾斜粉体地形の緩和現象を観察するために、水平容器に充填した粉体層をジャッキで傾斜させ、固体弾を空気銃で粉体層の中心に衝突させる実験を行った。乾燥粉体では傾斜の角度が安息角までに限られるため、本実験では濡れた粉体層を用い、急傾斜の粉体層への衝突実験も行った。

粉体層の傾斜角度と含水率を系統的に変化させて実験を行った結果、特定の条件下では、衝突による傾斜粉体層の全層崩壊が起こることが確認された。具体的には、傾斜角度が緩やかな場合は衝突によるクレーター形成のみが起こるが、傾斜角度が急峻になった場合に粉体層の全層崩壊が起こることが分かった（図4）。

このクレーター形成相と崩壊相の相境界を特徴づける要因として、粉体層底面での振動による実効的摩擦の低減を考え、シンプルな固体ブロック摩擦モデルを構築した。モデル化により導入したパラメータの値は実験および数値計算で決定し、崩壊（滑り出し）条件を検討した結果、推定されたパラメータ値を用いてモデルで推定された崩壊条件が実験的に得られたクレーター形成相と崩壊相の相境界をほぼ説明可能であることが見出された[6]。

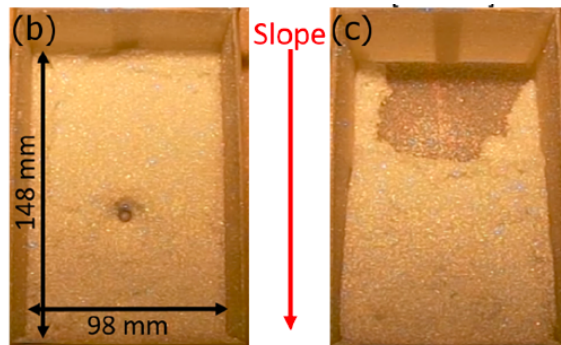


図4：（左）衝突によるクレーター形成(b)と（右）全層崩壊(c)。[6]より引用。

#### 4-4. 実際のクレーター形状の緩和

上記のような実験や数値計算による傾斜地形緩和のモデル化、物理機構解明と同時に実際のクレーター形状の緩和に関する研究にも取り組んだ。具体的には、火星の衛星であるフォボス上のクレーター形状緩和の解析に取り組んだ。フォボスのように惑星を周回する衛星では、衝突クレーター形成により放出された放出物が宇宙空間に飛散した後、火星の重力圏を脱出できず、再びフォボスに降り積もるといった衛星特有のプロセスが起きていると考えられている。このようなプロセスが実際に起きている場合は、クレーター形状の緩和の進行もその影響を受けるはずであると考え、実際のクレーター形状の緩和度等についての系統的調査を行った。その結果、フォボス上のクレーターの緩和度は上記のような放出物の再堆積の影響を受け、小惑星エロスのクレーターの緩和度と比べて地形緩和の時間スケールが異なることを発見した。この結果は天体間の衝突環境や表層物質の物理特性などの違いを反映している可能性を示唆している。

#### 4-5. まとめと今後

以上のように、本研究では傾斜粉体層の緩和に関する基礎物理の確立と、天体表層で起こる対流による表面更新、クレーター形状の緩和などについてのモデル構築などに成功した。以上で紹介した主な研究成果の他にも、粉体サイロ流での粉体流と障害物の相互作用などいくつかの関連するトピックについても研究成果を得ることに成功した。これらの成果により、当初の目標はほぼ達成することができたため、今後は得られた結果をまとめて順次出版・発表しつつ、モデルの高度化などに引き続き取り組んでいきたい。

## 引用文献

- [1] H. Katsuragi, D. J. Durian, *Nat. Phys.* **3**, 420 (2007).
- [2] H. Katsuragi, *Phys. Rev. E* **85**, 021301 (2012).
- [3] T. M. Yamada, H. Katsuragi, *Planet. Space Sci.* **100**, 79 (2014).
- [4] T. M. Yamada, K. Ando, T. Morota, H. Katsuragi, *Icarus* **272**, 165 (2016).
- [5] D. Tsuji, M. Otsuki, H. Katsuragi, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 128001 (2018).
- [6] S. Takizawa, H. Niiya, T. Tanabe, H. Nishimori, H. Katsuragi, *Physica D* **386**, 8 (2019).

## 5. 主な発表論文等

雑誌論文] (計 12 件)

- ① T. Furuta, S. Kumar, K. Anki Reddy, H. Niiya, and H. Katsuragi, Packing-dependent granular friction exerted on a rod withdrawn from a granular layer: the role of shear jamming, *New J. Phys.*, Vol. 21, 023001:1-13 (2019) 査読有  
DOI: 10.1088/1367-2630/ab00c8
- ② S. Takizawa, H. Niiya, T. Tanabe, H. Nishimori, and H. Katsuragi, Impact-induced collapse of an inclined wet granular layer, *Physica D*, Vol. 386-387, 8-13 (2019) 査読有  
DOI: 10.1016/j.physd.2018.08.002
- ③ H. Katsuragi, K. Anki Reddy, and K. Endo, Shape dependence of resistance force exerted on an obstacle placed in a gravity-driven granular silo flow, *AICHe J.*, Vol. 64, 3849-3856 (2018) 査読有  
DOI: 10.1002/aic.16205
- ④ N. Iikawa, M. M. Bandi, and H. Katsuragi, Force chain evolution in a two-dimensional granular packing compacted by vertical tappings, *Phys. Rev. E*, Vol. 97, 032901:1-10 (2018) 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevE.97.032901
- ⑤ D. Tsuji, M. Otsuki, and H. Katsuragi, Relaxation Dynamics of a Granular Pile on a Vertically Vibrating Plate, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 120, 128001:1-5 (2018) 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.128001
- ⑥ K. Endo, K. Anki Reddy, and H. Katsuragi, Obstacle-shape effect in a two-dimensional granular silo flow field, *Phys. Rev. Fluids*, Vol. 2, 094302:1-16 (2018) 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevFluids.2.094302
- ⑦ H. Katsuragi and J. Blum, The Physics of Protoplanetary Dust Agglomerates. IX. Mechanical properties of dust aggregates probed by a solid-projectile impact, *The Astrophys. J.*, Vol. 851, 23:1-10 (2017) 査読有  
DOI:10.3847/1538-4357/aa970d
- ⑧ K. Endo and H. Katsuragi, Statistical properties of gravity-driven granular discharge flow under the influence of an obstacle, *EPJ Web of Conferences*, Vol. 140, 03004:1-4 (2017) 査読有
- ⑨ T. Furuta, K. Katou, S. Itoh, K. Tachibana, S. Ishikawa, and H. Katsuragi, Geometry-dependent constitutive law for granular slow frictional drag, *Int. J. Mod. Phys. B*, Vol. 31, 1742006:1-11 (2017) 査読有  
DOI: 10.1142/S0217979217420061
- ⑩ T. M. Yamada, K. Ando, T. Morota, and H. Katsuragi, Timescale of asteroid resurfacing by regolith convection resulting from the impact-induced global seismic shaking, *Icarus*, Vol. 272, 165-177 (2016) 査読有  
DOI: 10.1016/j.icarus.2016.02.032
- ⑪ 桂木洋光, 天体・日常・微小スケールをつなぐクレーターの物理, *日本物理学会誌*, Vol. 70, 855-858 (2015) 査読有
- ⑫ H. Katsuragi, Bottom pressure scaling of vibro-fluidized granular matter, *Sci. Rep.*, Vol. 5, 17279:1-6 (2015) 査読有  
DOI: 10.1038/srep17279

[学会発表] (計 40 件)

- ① D. Tsuji, M. Otsuki, and H. Katsuragi, Relaxation dynamics of a vibro-fluidized granular pile, *American Physical Society March meeting 2018*, 2018年3月
- ② 滝澤真太, 新屋啓文, 桂木洋光, 傾斜を加えた濡れた粉体層の固体弾衝突による変形・崩壊, *日本物理学会 2017年秋季大会*, 2017年9月
- ③ K. Endo and H. Katsuragi, Statistical properties of gravity-driven granular discharge flow under the influence of an obstacle, *Powders & Grains 2017*, 2017年7月
- ④ T. M. Yamada, K. Ando, T. Morota, and H. Katsuragi, A modified asteroid resurfacing model induced by regolith convection, *48th Lunar and Planetary Science Conference*, 2017年3月

- ⑤ 辻大輔, 大槻道夫, 桂木洋光, 鉛直振動下における粉体なだれの輸送則, 日本物理学会 第72回年次大会, 2017年3月
- ⑥ 山田智哉, 安藤滉祐, 諸田智克, 桂木洋光, 鉛直振動を受けた粉体層の対流速度のスケーリング, 日本流体力学会年会 2016, 2016年9月
- ⑦ D. Tsuji, M. Otsuki, and H. Katsuragi, Relaxation process of a sandpile shape caused by vibration, STATPHYS26, 2016年7月
- ⑧ H. Katsuragi, Constitutive law for granular slow frictional drag, Nonlinear Dynamics of Many Body Systems, 2016年4月
- ⑨ H. Katsuragi, Flow fluctuation and deformation in dense granular matter, Avalanches, plasticity, and nonlinear response in nonequilibrium solids, 2016年3月
- ⑩ 安藤滉祐, 諸田智克, 月表面におけるボルダーの細粒化とそのタイムスケール, 日本惑星科学会 2015年度秋季講演会, 2015年10月
- ⑪ 山田智哉, 安藤滉祐, 諸田智克, 桂木洋光, 粉体対流とその小惑星表面更新のタイムスケールへの応用, 日本地球惑星科学連合 2015年大会, 2015年5月

[図書] (計2件)

- ① 桂木洋光, 「地形現象のモデリング」(第10章クレータ～低速衝突実験と緩和・流動モデル～), 名古屋大学出版会, 243-268(2017)
- ② H. Katsuragi, Physics of soft impact and cratering, Springer, 1-307 (2016)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

諸田 智克 (MOROTA, Tomokatsu)  
 名古屋大学・大学院環境学研究科・講師  
 研究者番号: 30415898

### (2) 研究協力者

大槻 道夫 (OTSUKI, Michio)  
 島根大学・大学院総合理工学研究科・講師  
 研究者番号: 30456751