

令和 6 年 9 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18H03679

研究課題名(和文) 階層粉体の基礎物理特性解明と衝突応答

研究課題名(英文) Fundamental physics and impact response of hierarchical granular matter

研究代表者

桂木 洋光 (Katsuragi, Hiroaki)

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：30346853

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,800,000円

研究成果の概要(和文)：微小粒子が凝集して形成される巨視的粒子の集合で構成される階層粉体の物理特性を明らかにする実験的研究を行った。とくに、階層粉体に衝突、圧縮、振動、せん断などの様々な擾乱を加えた際の物理的応答について系統的に調べた。その結果、階層粉体の衝突破壊が衝突抵抗力におよぼす影響、階層粉体の圧縮時にみられる特徴的な圧縮力振動現象、微粉末の振動における亀裂進展現象、回転遠心力によりせん断にかかる砂山の変形などについての物理機構を明らかにした。これらの成果により、階層粉体の物理特性解明に大きく貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微小粉末が凝集することで形成される階層粉体の状態を持つ物質は身の回りにあふれている。階層粉体は、食材から工業材料、宇宙空間にまで、正に至るところに遍在している。本研究では、階層粉体が様々な外力環境下でどのように振る舞うかについて系統的实验を行い、その基礎物理法則を明らかにした。得られた成果は、直接的に粉体材料の制御技術等に即座に適用できるものではない。しかし、本研究で階層粉体の挙動に関する基礎物性を明らかにしたことにより、今後のさまざまな粉体関連現象の理解や応用に資する基礎知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：Experimental studies were conducted to elucidate the physical properties of hierarchical granular matter, which is composed of macroscopic aggregates of microscopic particles. In particular, the physical responses of hierarchical granular matter to various disturbances such as impact, compression, vibration, and shearing were systematically investigated. As a result, the physical mechanisms of the effects of particles fracturing on the impact drag force produced by hierarchical granular matter, the oscillation in compressive force observed in the compressed hierarchical granular matter, the crack propagation in the vibrated fine granular columns, and the deformation of sand piles subjected to shear due to rotational centrifugal force were clarified. These results have significantly contributed to the elucidation of the physical properties of hierarchical granular matter.

研究分野：ソフトマター物理

キーワード：粉体 階層構造 衝突

1. 研究開始当初の背景

粉体を構成する個々の粒子の典型的サイズはどの程度か？という問に対する可能な答えの幅は非常に広い。自然界は粉体とみなすことができる対象であふれかえっている。構成粒子サイズが小さなスケールの極限では惑星形成の材料物質と考えられているダスト微粒子 (μm サイズ) が挙げられ、日常的スケールにおいては砂利や河原の小石群 ($\text{mm} - \text{cm}$ サイズ) が典型的な粉体となる。大きなスケールの極限としては、宇宙空間での小惑星群 (km サイズ) や人工物起源のスペースデブリなども固体粒子集団としての粉体の性質を持っている。すなわち、粉体を構成する粒子サイズは μm から km まで実に 9 桁にも渡って様々な値を取り得る。いずれの粉体も基本的にニュートン力学に従うマクロ粒子群という点では類似している。しかし、これだけ広いサイズレンジを持つ対象を本当に同一の「粉体」としてひとくくりに扱って良いのだろうか？答は「否」である。構成粒子のサイズによって支配的となる物理は異なる。例えば、微小粒子においては表面の付着力や空気抵抗の影響が大きくなり、凝集体を作る傾向にある。これに対し、粗大な粒子では重力などの体積力が支配的となり、強い散逸の影響などもあって、複雑な変形・流動特性が現れる。これらの違いは、実は我々の「微粉末と粗粒はそれぞれ異なる振る舞いを示す」という感覚的理解と対応したものとなる。しかし、それらの異なるスケールの物理要素が複雑に混ざりあった場合に、系全体がどのような挙動を示すのかについては、これまで系統的かつ定量的な研究がなされてこなかった。そこで本研究では、サイズが大きく異なる粉体が階層的に混合した「階層粉体」を新たなソフトマターの種類としてとらえ、その物理的性質に迫ることとした。

従来の粉体研究では、対象とするスケールを絞り「代表粒子サイズ (+パラツキ)」を決めた固体粒子群を主な対象としてきた。このような手法は、例えば比較的粒子サイズが一様である砂漠での砂丘形成問題等については極めて有効となり、実際、砂丘の形状や移動に関する物理機構の理解は格段に進んでいる。しかし、代表粒子サイズを絞ったアプローチが適切ではない場合もある。例えば、粉体摩擦による滑り現象や小天体の形状保持という問題を考えると、構成粒子サイズに階層構造を持った粉体の効果が重要となる。前者については、滑り面に存在する大小粒子の混合が滑り摩擦特性に影響する可能性があり、後者については、小天体表面を覆う微小粒子の付着力が小天体の骨格構造(岩石の集合体)の形状安定性に貢献している可能性が示されている。これらの現象は従来の単一粒子サイズの粉体によるモデルでは十分にその複雑な挙動を再現することが出来なかったものである。これらの現象の詳細理解のためには、共通する性質である「構成粒子サイズの階層性」の概念を統一的にとらえ、その物理を解明する必要がある。

大粒子と小粒子を混合して階層粉体を構成しても、その物理特性はそれぞれの極限の中間の状態が発現するだけと感ずるかもしれない。しかし、現実にはそれほど単純ではなく、付着力や摩擦力などが各階層で複雑に影響し合うため、結果的に階層構造を持つ粉体において現れる巨視的現象は、非自明なものとなる可能性が高い。このような階層性を持つ粉体は、自然界に普遍的に存在するにもかかわらず、これまで系統的研究が行われることはなかった。そのため、本研究では、これらの「階層粉体」の基礎物理特性の解明に注目することとした。

2. 研究の目的

以上のような背景を受け、本研究では従来の粉体研究で採用されてきた「代表粒子サイズ」の概念を拡張し、複数の粒子サイズが混在する階層粉体の物理特性の研究に取り組んだ。現段階では、具体的な自然現象を過度に意識せず、階層粉体をソフトマター物理の一領域として確立すべく、その基礎物理法則の解明に集中する基礎的実験研究を行った。本研究は、これまで高次効果とみなされて詳細が検討されてこなかった「構成粒子サイズの多様性・階層性の影響」についての系統的研究を世界に先駆けて行ったものとなる。「粒子サイズの階層性が単なる高次効果ではなく粉体系の物理挙動をつかさどる本質的な要素になる」という発想は、個別の現象・トピックについて部分的に議論されることはあっても、これまで大局的な観点から提唱されたことはなかった。

3. 研究の方法

本研究により様々な階層粉体にまつわる実験研究を展開した。とくに代表的なトピックとしては、(1)階層粉体への固体弾の衝突、(2)階層粉体層の圧縮、(3)階層粉体層の振動、(4)階層粉体層の回転によるせん断誘起変形が挙げられる。これらは、本研究の当初計画で構想していた基礎的な力学試験に相当するものとなる。本研究では、以上に挙げたそれぞれの項目について、物理的に新たな現象や法則の発見に成功した。すなわち、本研究を通して当初計画予定の主要部分について本質的成果を得ることに成功したと言える。更に、以上で挙げた階層粉体についての基礎的な力学試験の他に、水を含む濡れた粉体層の強度や、階層粉体の保水性能評価などの研究も手がけた。これらのトピックは当初計画には含まれていないテーマであったが、研究を進めるに中で重要性に気づいたものとなる。本研究では、これらの付加的な研究についても一定の成果を得ることができた。

本研究で用いた階層粉体を作る方法としては、 $5 \mu\text{m}$ 程度の粒径を持つ微小ガラスビーズを直径数 mm 程度の巨視的粒子まで凝集させる方法を主に採用した。得られた凝集粒子を多数集める

ことにより、階層粉体とした。一部の実験では、凝集粒子の機械的強度を制御するために、凝集粒子を高温で焼結させることも行った。衝突実験においては、主に階層粉体により構成される標的層に固体弾を低速で衝突させる実験系を用いた。衝突は通常の重力環境下のほか、微小重力環境下での実験の解析も行った。実験実施においては、既存の装置類を転用しながら、新たに開発が必要となる部分については積極的に装置開発も行って取り組んだ。データ解析は主に画像解析に基づくものが多いが、一部では力学計測の時系列データ解析等も行った。

4. 研究成果

以下では、上記の主要4トピックについて得られた成果を順に概説する。

(1) 階層粉体への固体弾の衝突

固体弾の階層粉体への衝突については、主に2種類の実験と解析を行った：①固体弾の階層粉体クラスターへの自由落下衝突実験（地上重力環境下および微小重力環境下）、②固体弾の粒子濃厚懸濁液層への自由落下衝突実験（地上重力環境下のみ）。それぞれについて得られた成果は以下の通り。

① 固体弾の階層粉体クラスターへの自由落下衝突

階層的構造を持つ粉体層に固体弾丸を衝突させた際に生じる衝突抵抗力を調べる実験を行った（図1）。ガラスビーズや砂などの通常の硬質な粒子からなる粉体層への衝突と階層粉体層への衝突の両者を比較すると、階層粉体層への衝突では、固体弾のターゲット粉体層への浸透深さが通常の粉体層への衝突時に比べて小さくなることが分かった。実験で得られたデータを先行研究により得られた（通常の粉体層への衝突に基づいて確立された）粉体衝突抵抗力モデル [Katsuragi & Durian Nat. Phys. 3, 420 (2007), Phys. Rev. E 87, 052208 (2013)] にフィッティングさせ、階層粉体における抵抗力の主要部分は粒子の破壊によるエネルギー散逸で支配されていることを明らかにした [Okubo & Katsuragi, Astron. Astrophys. 664, A147 (2022)]。



図1：固体球衝突の様子
[Okubo & Katsuragi, (2022)]

また、同様の衝突を微小重力環境下で行った実験（図2）についても解析・モデル化を行った。

微小重力環境下で、固体弾が粉体クラスターに低速で衝突すると、衝突を起点としたクラスターの膨張が起こる。この膨張が衝突点を点源とみなして放射的に広がっていることを画像解析により明らかにした。この特性は、ターゲットが、通常の粉体クラスターでも階層構造を持つ粉体クラスターでも同様に成立するものであることが、詳細な実験と解析により明らかにされた [Katsuragi & Blum, Phys. Rev. Lett. 121, 208001 (2018)]。また、使用する弾丸や粉体の詳細特性も関係なく、弾丸が保持していた運動エネルギーの約5%が衝突により粉体クラスターの膨張へ伝達されることも発見した。このようなエネルギー伝達効率を決める物理的要因等については、クラスターを構成する粒子間の接点でのエネルギー散逸の繰り返しにより近似的に理解できることを確認した。より詳細なモデリング等は今後の課題となる。

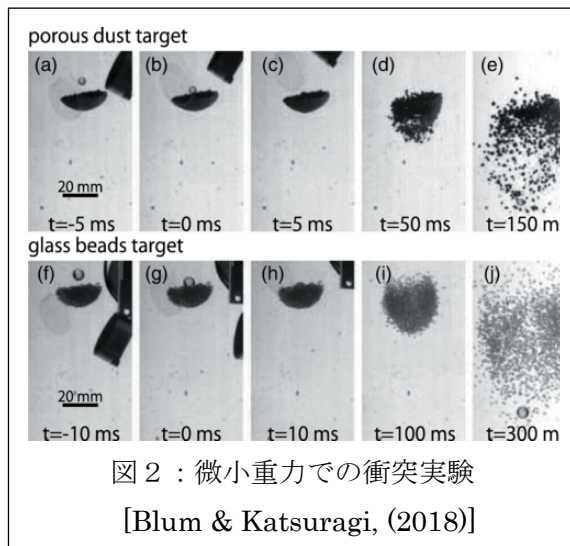
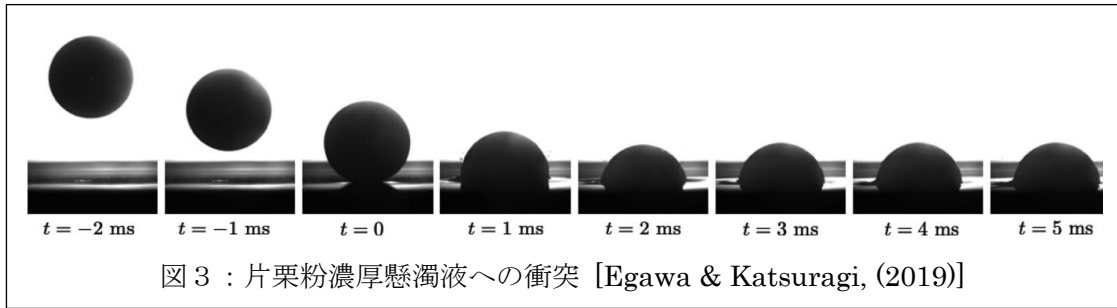


図2：微小重力での衝突実験
[Blum & Katsuragi, (2018)]

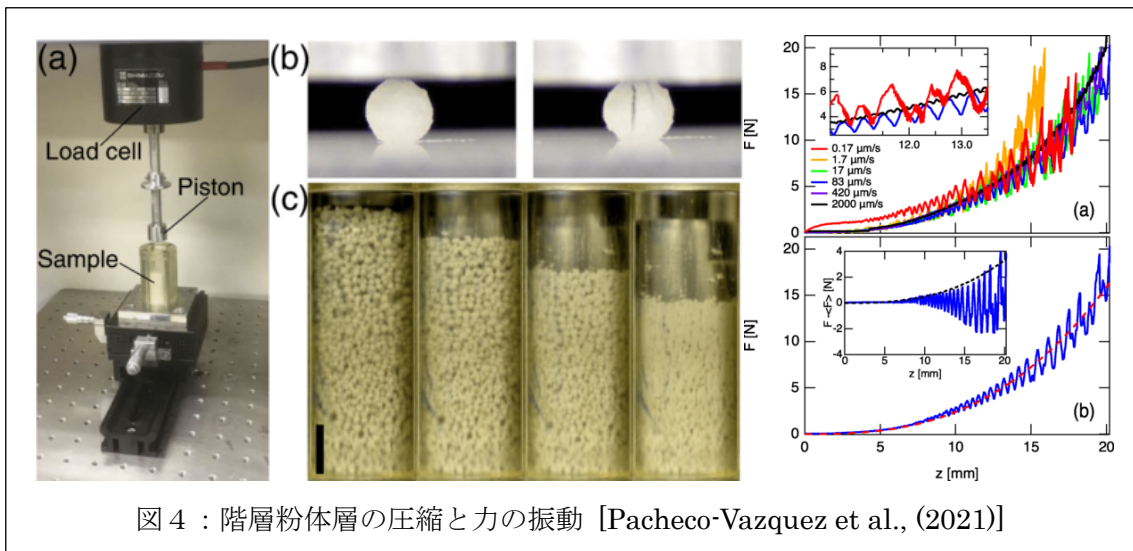
② 固体弾の粒子濃厚懸濁液への自由落下衝突

高濃度の片栗粉懸濁液（ダイラタント流体）へ固体弾丸を自由落下衝突させる実験を行った。その結果、図3に示すように固体弾丸の運動を高速度カメラにより観察した。得られた弾丸の運動学データより、衝突による反発係数と反発後に弾丸が停止するまでの時間を測定した。跳ね返り挙動を説明するために線形粘弾性モデルを仮定し、有効弾性率と粘度の値を実験データから推定した。推定された弾性率と粘度は他の研究による計測結果とおおむね一致していた。さらに、衝突後に弾丸が比較的長い時間をかけて沈降するフェーズの計測も行った。具体的には、このフェーズでの終端速度を測定することで、ストークス抵抗を推定した。これにより、片栗粉粒子群が液体の中で瞬時固化などの階層構造を形成し、それが衝突抵抗力に与える影響について評価することに成功した [Egawa & Katsuragi, Phys. Fluids, 31, 053304 (2019)]。



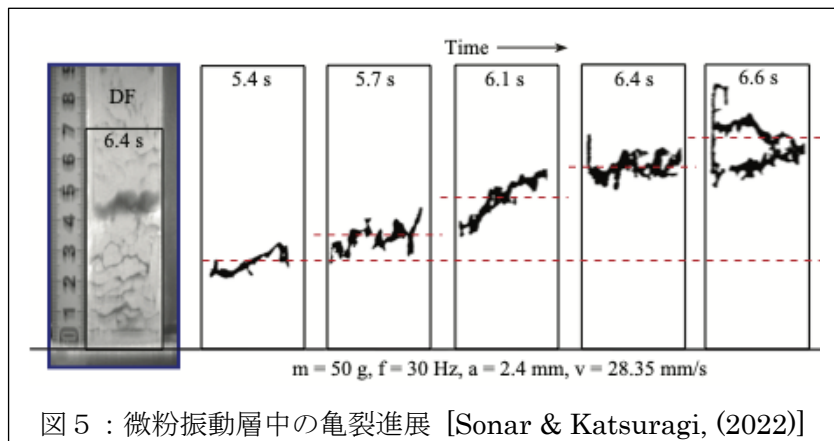
(2) 階層粉体層の圧縮

階層粉体における階層性の影響を根本的に特徴づけるため、円筒形容器に閉じ込めたダスト粒子（階層粉体）とガラスビーズ（通常の粉体）の一軸圧縮・緩和試験を実施した（図4）。両者の粒子の巨視的サイズ（典型的直径）は約1 mmとして共通化した。ただし、ダスト粒子の方は微小な（およそ5 μm）ガラスビーズの凝集体粒子で構成されている。圧縮の実験結果より、階層粉体および通常粉体の双方の粒子において、圧縮力はストロークの増加とともに非線形的に増加することが明らかになった。加えて、ダスト粒子を用いた圧縮試験では、圧縮力の増加中に周期的なゆらぎが発生することも明らかになった。この周期的振動（ゆらぎ）成分は、押し込み速度等に依存して周期や振幅を変化させることも、系統的实验により明らかにした。しかし、本研究の中で、この圧縮力振動現象の物理的起源について完全に解明することはできなかった。この圧縮力振動の物理機構の解明は今後の重要な課題となる。また圧縮後の時間経過による応力緩和は複数の指数関数と対数関数の組み合わせで表現されることが分かった [Pacheco-Vazquez, Omura, Katsuragi, Phys. Rev. Research 3, 013190 (2021)].



(3) 階層粉体層の振動

階層粉体を構成する凝集体粒子の材料物質となる微粉末を容器に入れて振動させる実験を行った。その結果、単純な微粉末の圧密のほか、静的な亀裂成長、亀裂の容器上方への移動などのモードがみられることを実験的に見いだした。図5に本実験で観察された「容器上方に伝播する亀裂」の運動の例を示す。さらに、上方に移動する亀裂の移動速度は振動の条件にはほとんど依存せず、重力と微粉末の付着力のバランスにより決定されていることを実験より見出した。これにより、亀裂の上方への移動は、小さな微粉末クラスターの連続的落下崩壊の連鎖により実現されていることを解明した。さらに、振動層の上面（自由表面）では、大小様々な凝



集体が形成されることも実験的に確認し、凝集が効率的に進む実験条件などについて、系統的实验により明らかにした [Sonar & Katsuragi, Phys. Rev. E 106, 014905 (2022), Powder Technol. 421, 118405 (2023)].

(4) 階層粉体層の回転によるせん断

砂山（階層粉体と通常粉体の両者により構成されるものそれぞれ）に回転遠心力を加え、その変形の様子を観察する実験装置を開発し、系統的实验を行った（図6）。とくに、階層構造を持たない粉体により構成される砂山の表面変形を摩擦力・遠心力・重力の合力により記述するシンプルなモデルの開発に成功した [Irie, Yamaguchi, Watanabe, Katsuragi, Phys. Rev. E 104, 064902 (2021)]. このモデルを用いて、实验結果のフィッティングから粉体摩擦の重力（体積力）依存性を議論することにも成功した。さらに、砂山の変形に履歴依存性があることも实验的に明らかにした [Irie, Yamaguchi, Watanabe, Katsuragi, Adv. Powder Technol. 33, 103692 (2022)]. また、階層粉体による砂山の変形では、非対称性や不均一性が大きくなることが实验により明らかになった。さらに、階層構造を持つ粉体砂山の変形から粒子間付着力の評価を行うことにも成功した [Irie, Yamaguchi, Watanabe, Katsuragi, Meas. Sci. Technol. 32, 125301 (2021)].

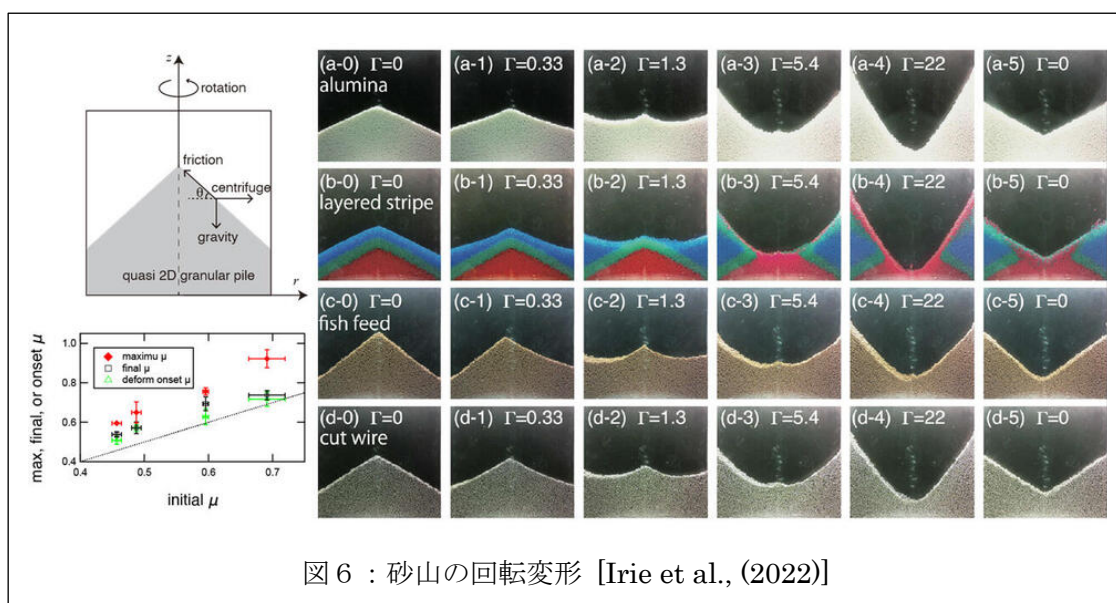


図6：砂山の回転変形 [Irie et al., (2022)]

(5) まとめ

これらの主要成果の他にも、濡れた粉体層の構造強度、階層粉体層における保水・乾燥現象、複雑な粉体系におけるパターン形成や崩壊現象、液滴の濡れた粉体層への衝突現象などについても研究を行い、それぞれについて成果を得た。また、得られた成果は粉体物理の知見として物理系学術誌で発表した他、地球惑星科学的応用、化学工学的応用等についても検討し、それぞれの専門学術誌で研究論文を発表した。これらの研究を通して、階層粉体という新しい粉体の概念を確立することに成功した。今後は、階層粉体のさらなる深い基礎理解とともに、得られた知見の様々な現象への応用についても取り組んでいきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 23件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Irie Terunori, Yamaguchi Ryusei, Watanabe Sei-ichiro, Katsuragi Hiroaki	4. 巻 33
2. 論文標題 History-dependent deformation of a rotated granular pile governed by granular friction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 103629 ~ 103629
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.appt.2022.103629	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sonar Prasad, Katsuragi Hiroaki	4. 巻 106
2. 論文標題 Decompaction wave propagation in a vibrated fine-powder bed	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 014905-1:11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.106.014905	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Okubo Fumiaki, Katsuragi Hiroaki	4. 巻 664
2. 論文標題 Impact drag force exerted on a projectile penetrating into a hierarchical granular bed	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A147 ~ A147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202243787	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yasuda Hyuga, Katsura Makoto, Katsuragi Hiroaki	4. 巻 34
2. 論文標題 Grain-size dependence of water retention in a model aggregated soil	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 103896 ~ 103896
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.appt.2022.103896	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sonar Prasad, Katsuragi Hiroaki	4. 巻 421
2. 論文標題 Fracturing-induced fluidization of vibrated fine-powder column	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Powder Technology	6. 最初と最後の頁 118405 ~ 118405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.powtec.2023.118405	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fukumoto T., Yamamoto K., Katsura M., Katsuragi H.	4. 巻 109
2. 論文標題 Energy dissipation of a sphere rolling up a granular slope: Slip and deformation of the granular surface	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 014903-1:8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.109.014903	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okubo F., Katsuragi H.	4. 巻 35
2. 論文標題 Force chain structure in a rod-withdrawn granular layer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Modern Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 2150206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217984921502067	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Irie Terunori, Yamaguchi Ryusei, Watanabe Sei-ichiro, Katsuragi Hiroaki	4. 巻 32
2. 論文標題 Measurement of surface deformation and cohesion of a granular pile under the effect of centrifugal force	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 125301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6501/ac1b25	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Irie Terunori, Yamaguchi Ryusei, Watanabe Sei-ichiro, Katsuragi Hiroaki	4. 巻 104
2. 論文標題 Deformation of a rotated granular pile governed by body-force-dependent friction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 64902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.104.064902	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hata Shunto, Katsura Makoto, Katsuragi Hiroaki	4. 巻 45
2. 論文標題 History-dependent growth and reduction of the ripples formed on a swept granular track	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The European Physical Journal E	6. 最初と最後の頁 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epje/s10189-022-00165-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Pacheco-Vazquez Felipe, Omura Tomomi, Katsuragi Hiroaki	4. 巻 3
2. 論文標題 Undulating compression and multistage relaxation in a granular column consisting of dust particles or glass beads	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 13190
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.013190	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 該当する

1. 著者名 Omura Tomomi, Takizawa Shinta, Katsuragi Hiroaki	4. 巻 502
2. 論文標題 Centroid migration on an impacted granular slope due to asymmetric ejecta deposition and landsliding	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 293 ~ 299
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa3982	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 KATSURAGI Hiroaki	4. 巻 34
2. 論文標題 片栗粉懸濁液の上を走るための粘弾性特性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JAPANESE JOURNAL OF MULTIPHASE FLOW	6. 最初と最後の頁 395 ~ 402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3811/jjmf.2020.T011	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Takizawa, R. Yamaguchi, and H. Katsuragi	4. 巻 91
2. 論文標題 A novel experimental setup for an oblique impact onto an inclined granular layer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Rev. Sci. Instrum.	6. 最初と最後の頁 014501:1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5127087	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Takizawa and H. Katsuragi	4. 巻 335
2. 論文標題 Scaling laws for the oblique impact cratering on an inclined granular surface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 113409:1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2019.113409	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 D. Tsuji, M. Otsuki, and H. Katsuragi	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 Phys. Rev. E	6. 最初と最後の頁 062902:1-12
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Egawa and H. Katsuragi	4. 巻 31
2. 論文標題 Bouncing of a projectile impacting a dense potato-starch suspension layer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Fluids	6. 最初と最後の頁 053304:1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5095678	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A. Shinoda, S. Fujiwara, H. Niiya, and H. Katsuragi	4. 巻 14
2. 論文標題 Physical constraints on sand crab burrows: mechanical properties of wet sand explain the size and spatial distributions of burrows on beaches	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0215743:1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0215743	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 篠田 明友子, 藤原 慎一, 新屋 啓文, 桂木 洋光	4. 巻 56
2. 論文標題 スナガニ巣穴の力学的安定性の議論へ向けた濡れた粉体層中の横穴構造の強度推定実験	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 粉体工学会誌	6. 最初と最後の頁 194-202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4164/sptj.56.194	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Furuta, S. Kumar, K. Anki Reddy, H. Niiya and H. Katsuragi	4. 巻 21
2. 論文標題 Packing-dependent granular friction exerted on a rod withdrawn from a granular layer: the role of shear jamming	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 New J. Phys.	6. 最初と最後の頁 023001:1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/ab00c8	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 該当する

1. 著者名 S. Takizawa, H. Niiya, T. Tanabe, H. Nishimori, and H. Katsuragi,	4. 巻 386-387
2. 論文標題 Impact-induced collapse of an inclined wet granular layer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physica D	6. 最初と最後の頁 8-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physd.2018.08.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Katsuragi and J. Blum	4. 巻 121
2. 論文標題 Impact-induced energy transfer and dissipation in granular clusters under microgravity conditions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 208001:1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.208001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 A. Shinoda, S. Fujiwara, H. Niiya, and H. Katsuragi	4. 巻 8
2. 論文標題 Void structure stability in wet granular matter and its application to crab burrows and cometary pits	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sci. Rep.	6. 最初と最後の頁 15784:1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-33978-8	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 H. Katsuragi, K. Anki Reddy, and K. Endo	4. 巻 64
2. 論文標題 Shape dependence of resistance force exerted on an obstacle placed in a gravity-driven granular silo flow	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIChE J.	6. 最初と最後の頁 3849-3856
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aic.16205	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計46件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 14件）

1. 発表者名 桂木洋光, F. Pacheco-Vazquez, 大村知美
2. 発表標題 微粒子凝集体群の圧縮により生じる圧縮力の周期的ゆらぎ
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 保田彪賀, 桂誠, 桂木洋光
2. 発表標題 団粒構造による土壌の保水性評価
3. 学会等名 混相流シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大久保文暁, 桂木洋光
2. 発表標題 階層的構造を持つ粉体における固体弾自由落下衝突ダイナミクスの実験的研究
3. 学会等名 混相流シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 P. R. Sonar and H. Katsuragi
2. 発表標題 Physical characterization of novel phenomena found in a vibrated powder bed
3. 学会等名 The 8th Asian Particle Technology Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Yasuda, M. Katsura, and H. Katsuragi
2. 発表標題 Water retention in model soil aggregates
3. 学会等名 The 8th Asian Particle Technology Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Okubo and H. Katsuragi
2. 発表標題 Impact dynamics in hierarchically structured granular materials
3. 学会等名 The 8th Asian Particle Technology Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Katsuragi, T. Irie, R. Yamaguchi, and S. Watanabe
2. 発表標題 Measuring cohesion by rotating a granular pile
3. 学会等名 The 8th Asian Particle Technology Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桂木洋光
2. 発表標題 宇宙・地球・生態を貫く粉体の物理
3. 学会等名 航空宇宙学会関西支部 第480回航空宇宙懇談会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 保田彪賀, 桂誠, 桂木洋光
2. 発表標題 団粒構造による土壌の保水性評価
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 入江輝紀, 山口隆正, 渡邊誠一郎, 桂木洋光
2. 発表標題 粉体ヒープの回転による付着力評価
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桂木洋光
2. 発表標題 粉体内の巨視的応力分布のガラス的不規則構造
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桂木洋光, F. Pacheco-Vazquez, 大村知美
2. 発表標題 粉体層の一軸圧縮時に現れる圧縮力振動
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桂木洋光, F. Pacheco-Vazquez, 大村知美
2. 発表標題 階層構造を持つ粉体層の圧縮力振動
3. 学会等名 粉体工学会 2020年度秋期研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桂木洋光
2. 発表標題 衝突による粉粒体の変形と流れ
3. 学会等名 混相流シンポジウム2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大久保文暁, 桂木洋光
2. 発表標題 階層的構造を持つ粉体における衝突ダイナミクスの実験的研究
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 入江輝紀, 山口隆正, 渡邊誠一郎, 桂木洋光
2. 発表標題 遠心力による砂山の形状変化および流動特性
3. 学会等名 日本惑星科学会 2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大村知美, 滝澤真太, 桂木洋光
2. 発表標題 衝突クレーター形成に伴う粉体斜面崩壊に関する実験的研究
3. 学会等名 混相流シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大久保文暁, 桂木洋光
2. 発表標題 2次元粉体層からの棒引き抜きによる応力鎖構造の実験的研究
3. 学会等名 混相流シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 入江輝紀, 山口隆正, 渡邊誠一郎, 桂木洋光
2. 発表標題 回転実験による砂山形状変化のヒステリシスと自転コマ型小惑星の形状安定性
3. 学会等名 混相流シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Omura, S. Takizawa, and H. Katsuragi
2. 発表標題 Experimental study on the relaxation of slope terrain due to small-scale impact
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桂木洋光, J. Blum
2. 発表標題 ダスト凝集体および階層粉体への固体弾衝突実験
3. 学会等名 第36回Grain Formation Workshop
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 滝澤真太, 桂木洋光
2. 発表標題 傾斜粉体層への斜め衝突クレータリングのスケーリング解析
3. 学会等名 第9回ソフトマター研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江川嘉寿也, 桂木洋光
2. 発表標題 非ブラウン粒子懸濁液への固体弾衝突とその跳ね返り
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 滝澤真太, 桂木洋光
2. 発表標題 Scaling of oblique impact cratering onto inclined granular layer
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江川嘉寿也, 桂木洋光
2. 発表標題 Viscoelastic characterization of a solid projectile impact onto a dense potato starch suspension
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桂木洋光, J. Blum
2. 発表標題 凝集体粒子群の微小重力下での衝突膨張
3. 学会等名 粉体工学会 2019年度春期研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桂木洋光
2. 発表標題 微粒子凝集粉体の衝突ダイナミクス
3. 学会等名 粉体工学会 「計算粉体力学研究会」(第57回)(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大久保文暁, 桂木洋光
2. 発表標題 2次元粉体層からの棒引き抜きによる応力鎖構造の実験的研究
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大村知美, 滝澤真太, 桂木洋光
2. 発表標題 衝突クレータリングによる粉体斜面崩壊に関する実験的研究
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大村知美, 滝澤真太, 桂木洋光
2. 発表標題 小規模衝突による傾斜地形緩和に関する実験的研究
3. 学会等名 第9回ソフトマター研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大村知美, 滝澤真太, 桂木洋光
2. 発表標題 小規模衝突による傾斜地形緩和に関する実験的研究
3. 学会等名 日本惑星科学会 2019年秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口隆正, 滝澤真太, 桂木洋光
2. 発表標題 地球惑星科学におけるクレーター形成実験に用いる10~100m/s可変の衝突実験装置の設計法と3Dプリンティング技術活用による開発について
3. 学会等名 日本機械学会 2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Egawa and H. Katsuragi
2. 発表標題 Probing viscoelasticity of dilatant fluid by solid projectile impact
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Takizawa, R. Yamaguchi, and H. Katsuragi
2. 発表標題 Cratering and collapse of an inclined granular layer by oblique impact of a spherical projectile
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Tsuji, M. Otsuki, and H. Katsuragi
2. 発表標題 Granular flow dynamics in a vibrating system from multiple points of view: Laboratory experiments, continuum modeling, and numerical simulations
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桂木洋光, J. Blum
2. 発表標題 階層粉体クラスターの微小重力下での衝突誘起膨張のエネルギースケールリング
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 滝澤真太, 桂木洋光
2. 発表標題 傾斜粉体層への斜め衝突クレータリング
3. 学会等名 第14回衝突研究会 研究集会「天体の衝突物理の解明 (XIV)」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Katsuragi
2. 発表標題 Solid projectile impact onto a porous dust aggregate consisting of micrometer-sized particles
3. 学会等名 Southern Workshop on Granular Materials 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 D. Tsuji, M. Otsuki, and H. Katsuragi
2. 発表標題 Granular flow driven by vibration and its application to the crater relaxation process on a small planet
3. 学会等名 AGU fall meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Furuta, S. Kumar, K. Anki Reddy, H. Niiya and H. Katsuragi
2. 発表標題 Large frictional drag by shear-induced solidification of granular layer
3. 学会等名 Physics of Jammed Matter (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Takizawa and H. Katsuragi
2. 発表標題 Cratering and collapse by oblique impact onto an inclined granular layer
3. 学会等名 Physics of Jammed Matter (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Egawa and H. Katsuragi
2. 発表標題 Probing viscoelasticity of dilatant fluid by solid projectile impact
3. 学会等名 Physics of Jammed Matter (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 D. Tsuji, M. Otsuki, and H. Katsuragi
2. 発表標題 Granular flow dynamics under a vibrating system
3. 学会等名 Physics of Jammed Matter (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古田尊経, 新屋啓文, 桂木洋光
2. 発表標題 Jamming-originated large frictional force exerted on a rod withdrawn from granular layer
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 篠田明友子, 藤原慎一, 新屋啓文, 桂木洋光
2. 発表標題 ぬれた粉体層中の横穴構造の安定性と砂浜のカニの巣穴の力学特性
3. 学会等名 粉体工学会 2018年度春期研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古田尊経, 新屋啓文, 桂木洋光
2. 発表標題 粉体層からの棒引き抜き抵抗とシア・ジャミング
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 2018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1件

国際研究集会 Discussion meeting on Granular dynamics & Planetary terrain	開催年 2019年 ~ 2019年
---	----------------------

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
---------	---------