

令和 元年 6 月 13 日現在

機関番号： 13901
 研究種目： 国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）
 研究期間： 2016～2018
 課題番号： 15KK0158
 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（国際共同研究強化）

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

 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） 11,000,000円
 渡航期間： 8ヶ月

研究成果の概要（和文）：ミクロンサイズの微粒子の凝集によるダスト凝集体およびダスト粒子群をターゲットとして固体弾を低速衝突させた際の固体弾・ターゲットの運動・変形ダイナミクスを解析した。解析によりターゲットの衝突応答物性の物理モデリングに成功した。ダスト凝集体の衝突では、固体弾の受ける抵抗力の定式化に成功し、抵抗力を特徴付ける塑性変形、衝突によるターゲットの破壊を特徴付ける強度などの値を実験結果に基づいて見積もった。ダスト微粒子群をターゲットとした衝突ではターゲットの膨張速度が衝突エネルギーによりスケールされることを明らかにした。これらの結果を通してダストの衝突応答の基礎物理の理解を深めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微小粒子が凝集体や粉体のような構造を取ることは、小麦粉等が簡単にダムを作ること等から普段の生活の中でも随所に感じることができる。本研究ではこのようなダムを作る凝集粉体構造の力学的な特性の解明を実験に基づいて行った。このような凝集粉体構造は実は太陽系形成の初期段階に惑星形成の材料物質として普遍的に存在していたと考えられており、その力学特性を解明することは惑星系のルーツを探る上でも重要な知見となる。本研究では、このように日常生活から惑星形成までの幅広い現象に関係する凝集体の衝突物性を国際共同研究の実験により明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Using macroscopic dust aggregate and collection of dust particles as targets, solid-projectile impact experiments were performed to analyze the projectile motion and target deformation. From the analysis results, physical models describing the impact response of target materials were developed. In the dust aggregate impact, drag force exerted on the projectile was revealed. In addition, the plastic deformation strength and material strength determined by the impact-induced fragmentation were properly estimated on the basis of experimental results. In the dust particles experiment, energy-based scaling for the expansion rate of the impacted target particles was found. These results revealed the fundamental physics of the impact response of dust targets.

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

岩石型（地球型）惑星や小惑星などの太陽系固体天体の表面はレゴリスと呼ばれる砂粒子に覆われていることが多い。そのような固体天体の表面地形の観測から天体上で過去に起こった様々な現象の痕跡を読み解くためには、固体粒子群（粉体）とみなせるレゴリスの物理挙動の正しい理解が必要不可欠となる。また、太陽系形成の初期段階では、ミクロンサイズの微粒子の凝集により構成される高空隙率ダスト凝集体が衝突合体を繰り返していたと考えられている。ダスト凝集体が衝突によりどのような進化をたどるのかを正確にモデル化するためには、やはりある種の粉体とみなせる固体微粒子集合体の衝突に対する応答の基礎物理の理解が必要となる。これらの背景を受け、本国際共同研究の基課題では、主に粉体物理と天体地形の関係について実験を中心に研究を進めてきた。そこで本国際共同研究では、これに加えて太陽系形成の初期に重要となるダスト凝集体の衝突特性の研究について焦点を絞ることとした。

惑星科学的研究と粉体物理研究の融合は、その重要性が叫ばれてから久しく、国際的にはいくつかの研究グループが両者の学際的領域についての研究を初めている。しかし、実験を中心として、天体地形から太陽系形成に至るまでの様々な段階・プロセスに注目した研究はこれまで十分に行われていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、太陽系形成時に重要な役割を果たすダスト凝集体の衝突物性に関する実験研究の専門家であるドイツ・ブラウンシュバイク工科大学のブルム教授と共同で、ダスト凝集体の衝突物理の基礎研究を進めることとした。ブルム教授の研究室では、宇宙空間（微小重力、真空環境）を模擬した実験室ドロップタワーが独自に開発されており、太陽系形成初期のダスト衝突に関する実験的研究で世界をリードしている。また、ブルム教授のグループは、欧州宇宙機関による彗星探査によって得られたデータの解析や彗星表面のダイナミクスに関連する実験研究にも精力的に取り組んでおり、天体地形に関する様々な研究議論等を自由かつ幅広く行いやすい環境にある。一方、本研究の代表者はこれまで主にガラスビーズ等のモデル的粉体を用いた物理実験を主に手がけてきた。天体表面やダスト凝集体についての知見をブルム教授の研究グループから学び、同時に代表者の持つ粉体物理の知見をあわせることにより、惑星科学・粉体物理の両分野に意義深い進展をもたらすことが本国際共同研究の大きな目標となる。前述の通り、惑星科学的現象の多くは粉体と深い関わりをもっている。本研究では惑星科学分野の専門的研究者と粉体物理実験の研究者の共同により、新たな学際的研究領域を立ち上げるための素地を固めることも目指した。

3. 研究の方法

主に実験によりダスト凝集体と固体弾の衝突現象を研究した。具体的に行った実験については以下の2種類となる。

- ① サイズが 20 mm 程度の高空隙率ダスト凝集体に固体弾を真空条件下で衝突させ、固体弾の陥入ダイナミクスの高精度計測結果を元にダスト凝集体の力学的性質を議論する実験
- ② ミクロンサイズの固体微粒子の凝集により形成される 1 mm 程度の直径を持つ粒子群を実験室ドロップタワー内で自由落下中に固体弾と衝突させ、ターゲット微粒子群クラスターの膨張ダイナミクスを解析する実験

このほかにも、彗星地形やマクロ粉体流の物理などについても議論を進め、研究代表者が日本で別途取り組んでいる研究についても様々な議論を行うことができた。また、滞在中に欧州内の多様な研究機関を積極的に訪問し、議論を重ねることにより、地球惑星科学と粉体物理の境界領域に関心の高い国際的研究コミュニティの形成にも努めた。

4. 研究成果

上記の2種類の実験研究についてそれぞれ得られた成果を以下に概説する。

① ダスト凝集体への固体弾衝突実験

図1（左）に示すように円柱状のダスト凝集体サンプルに球形の固体弾を衝突させ、固体弾の運動の様子を高速度カメラで撮影した。実験は図1（右）に示すように真空チャンバー内で行った。高速度カメラによる固体弾の運動の撮影は 0.02 mm/pixel の空間分解能、42,000 fps のレートで行った。これらの比較的高い空間・時間分解能でデータ取得を行うことにより、固体弾の運動が従う動力学モデルを構築することに成功した。具体的には、固体弾は、衝突によって引き起こされる以下の2種類の抵抗力を受けながら運動することが明らかになった：(i)速度の二乗に比例する慣性抵抗力、(ii)陥入深さに比例する変形由来の抵抗力。この抵抗力則は研究代表者らが過去にガラスビーズ等を用いてその有効性を明らかにしてきた形式（Katsuragi & Durian, *Nat. Phys.* **3**, 420 (2007); Katsuragi & Durian, *Phys. Rev. E* **87**, 052208 (2013)）に立脚しており、同様の形式を用いてダスト凝集体への固体弾衝突のダイナミクスが記述可能であることを

明らかにしたということは、ガラスビーズや砂粒のような通常の粉体とダスト凝集体のような高空隙率ターゲットが類似の衝突応答を示すことを意味している。しかし、抵抗力則の中にある具体的なパラメータの値等は両者で異なる部分もあることが分かった。

また、比較的簡単な近似により固体弾の衝突速度 v_0 と減速の最大加速度 a_{\max} 、陥入最大深さ z_{\max} の間に $a_{\max}z_{\max} = v_0^2$ というシンプルな法則が導出され、この関係が実験的にも成立することを明らかにした(図2(左))。図2(左)に示される直線($a_{\max}z_{\max} = v_0^2$)はフィッティングパラメータのない関係式であるにもかかわらず、実験データを非常に良く特徴付けていることが分かる。

更に、固体弾の衝突運動エネルギー E とターゲット凝集体が被る最大圧力 $\max(p_{dy})$ の間にも比例関係が成立することが分かった(図2(右))。ここで、図2(右)における実線は $E \propto \max(p_{dy})$ という関係を示しており、その傾きは圧力を受けた部分の体積に相当する。また、図2(右)において E が 4×10^{-4} Jより大きなケース(実線のフィットが表示されていない領域)ではターゲット凝集体の破壊が起こっており、そのときの $\max(p_{dy})$ がターゲット凝集体の実効強度となることことも明らかになった。この実験に関する更に詳細な解析や物理モデル、天体現象への応用などについては Katsuragi & Blum, *Astrophys. J.* **851**, 23 (2017)にまとめられている。

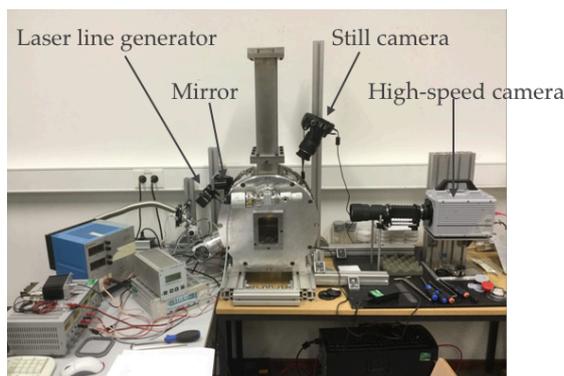
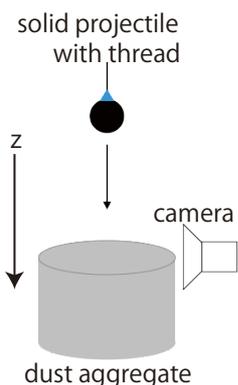


図1：(左) 実験系の概念図[Katsuragi & Blum 2017]。円柱状ダスト凝集体ターゲットに固体弾を衝突させ、固体弾の運動を高速度カメラで撮影した。(右) 実験系全体の写真。

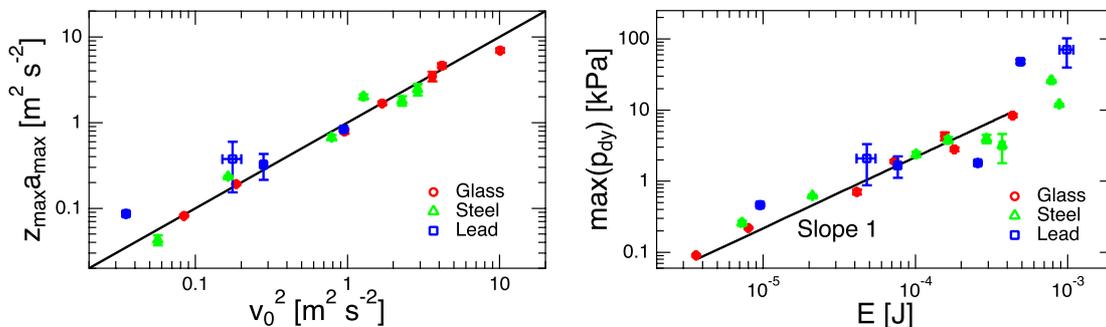


図2：(左) ダスト凝集体への固体弾衝突実験における固体弾の衝突速度 v_0 と減速の最大加速度 a_{\max} 、固体弾陥入の最大深さ z_{\max} の関係(直線は $a_{\max}z_{\max} = v_0^2$)。シンボルの色と形は固体弾の材質を表す。(右) 最大動圧 $\max(p_{dy})$ と E の関係。[Katsuragi & Blum 2017]より。

②ダスト微粒子群の微小重力衝突実験

続いて、実験室ドロップタワー(図3(左))を用いた、ダスト微粒子群の微小重力環境下での衝突実験の結果について概説する。実験では、固体微粒子を凝集させて生成したダスト微粒子群(図3(右)(i))と、通常のガラスビーズ(図3(右)(ii))をターゲットとして用い、固体弾をターゲット粒子群クラスターに自由落下最中に衝突させた。衝突の様子を高速度カメラで撮影し(0.21 mm/pixel, 3,000 fps)、画像解析により、ターゲット粒子群クラスターの膨張の様子を定量的に解析した。図4に高速度カメラで実際にとらえられた衝突の様子の連続写真を示す。いずれのターゲットを用いた衝突においても、ターゲット粒子群クラスターが膨張し、遂には分裂している様子が分かる。これらのデータより、ターゲット微粒子群クラスターの膨張の様子を注意深く解析した結果、膨張の初期段階では膨張が等方的に起こっており、なおかつ膨張の速度は、衝突エネルギーによりスケールされることが分かった。衝突エネルギーが重要な物理量となることは、膨張が等方的であることと調和的であり、固体弾と粉体粒子群の衝突においては自然な結果と言える。

また、得られたエネルギーに基づくスケールリング則は、ダスト微粒子群、ガラスビーズ群の両

方のターゲットと同様に成立していることも実験結果より明らかになった。この結果は、ダスト微粒子のような極めて脆く柔らかい粒子と、ガラスビーズのような稠密で硬い粒子のいずれによる粒子群クラスターも同様の衝突ダイナミクスを示すこと意味している。この結果は当初予想していなかった反直感的な結果であったが、この結果より、ダスト微粒子群と稠密粒子群で構成されている粉体はどこまで類似してどのような部分で差違が認められるようになるのか？という新たな問いが生じた。この点については、今後継続的に研究を進めていきたいと考えている。本実験の結果の詳細については、Katsuragi & Blum, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 208001 (2018)にて報告した。この論文は、注目論文として Editors' Suggestion に選定され、米国物理学会により Physics-Synopsis に一般向け紹介記事も掲載された。

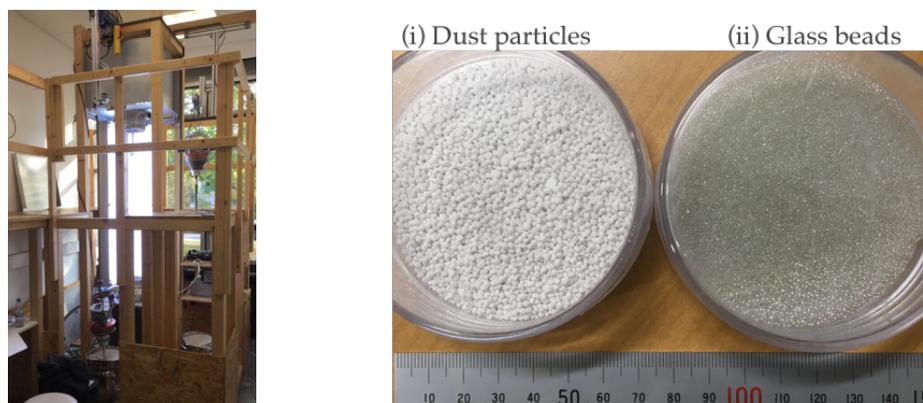


図3：(左) ブラウンシュバイク工科大学のブルム教授の研究グループにより開発された実験室ドロップタワーの写真。(右) ダストにより構成される微粒子群とガラスビーズ。

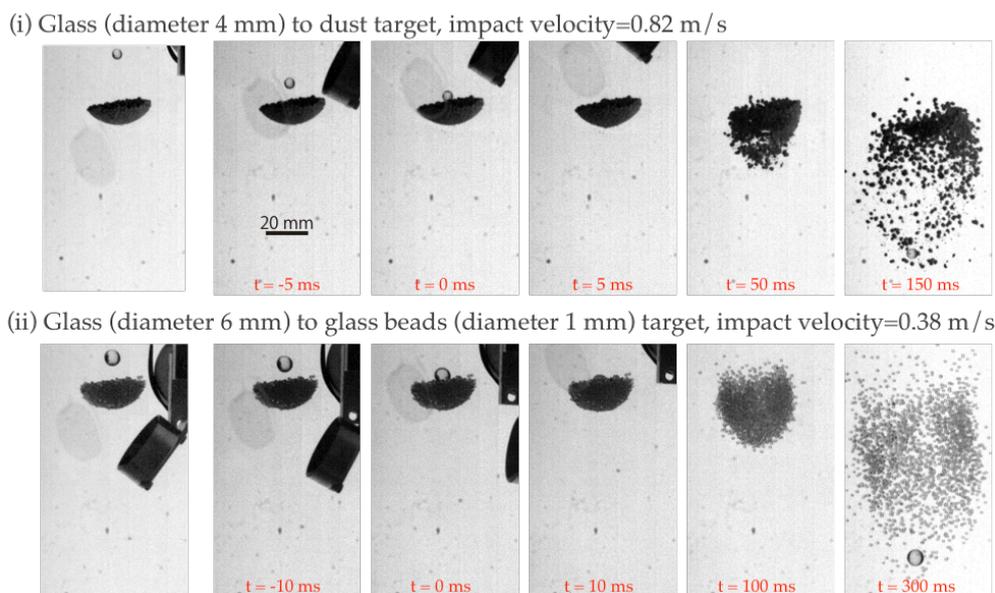


図4：固体弾の衝突によるダスト微粒子群(i)とガラスビーズ群(ii)の膨張の様子を高速カメラで撮影した生データ。[Katsuragi & Blum 2018]より。

結果のまとめと今後

以上のように、本研究ではダスト凝集体やダスト微粒子群、さらにはガラスビーズ群などをターゲットとして用い、それらに固体弾を衝突させた場合のターゲットの応答や固体弾の運動の様子を実験的に計測した。得られたデータよりダスト凝集体の力学特性や、粒子群クラスターの衝突誘起膨張を支配するエネルギーに基づいたスケーリング則などを求めることに成功した。これらの結果は惑星科学、粉体物理学の両者に大きな影響を与えるものであり、新たな学術的問いももたらした。

更に、本研究で欧州滞在中に彗星地形などについても多くの議論の機会に恵まれ、日本で独自に行っていたいくつかの研究の考察を進める上で有意義なポイントを得ることに成功した。また、実験やデータ解析の合間に欧州内の様々な研究機関を訪問し、共通の興味を持つ研究者間の国際コミュニティの形成に向けた準備も進めることができた。

今後は、本研究で得られた成果を土台に、新たに出てきた問いに答えるための研究を進めると同時に、国際共同研究を更に強化することに取り組んでいきたい。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① H. Katsuragi and J. Blum, Impact-induced energy transfer and dissipation in granular clusters under microgravity conditions, Phys. Rev. Lett., Vol. 121, 208001:1-5 (2018) 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.208001
- ② A. Shinoda, S. Fujiwara, H. Niiya, and H. Katsuragi, Void structure stability in wet granular matter and its application to crab burrows and cometary pits, Sci. Rep., Vol. 8, 15784:1-8 (2018) 査読有
DOI: 10.1038/s41598-018-33978-8
- 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 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

[学会発表] (計 6 件)

- ① 桂木洋光, J. Blum, ダスト凝集体への固体弾衝突による変形および破壊, 第 14 回衝突研究会 研究集会「天体の衝突物理の解明 (XIV)」, 2018 年 12 月 17-19 日, 神戸大学
- ② 桂木洋光, J. Blum, 高空隙率ダスト凝集体の衝突によるクレーター形成と破壊, 第 86 回形の科学シンポジウム, 2018 年 11 月 28-30 日, 千葉大学.
- ③ 桂木洋光, J. Blum, 高空隙率ダスト凝集体への固体弾衝突動力学, 粉体工学会 2018 年度秋期研究発表会, 2018 年 11 月 27-28 日, 東京ビッグサイト.
- ④ 桂木洋光, J. Blum, 高空隙率ダスト凝集体と固体弾の衝突動力学, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018 年 9 月 9-12 日, 同志社大学.
- ⑤ H. Katsuragi, Dynamics of a solid projectile impact onto a porous dust aggregate, Rheology of disordered particles - suspensions, glassy and granular materials, June 27 - 29, 2018, YITP, Kyoto University.
- ⑥ K. Endo and H. Katsuragi, Statistical properties of gravity-driven granular discharge flow under the influence of an obstacle, Powders and Grains 2017, July 3-7, 2017, Montpellier, France.

[図書] (計 0 件)

[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

[主たる渡航先の主たる海外共同研究者]

研究協力者氏名: ユルゲン ブルム

ローマ字氏名: Jürgen Blum

所属研究機関名: ブラウンシュバイク工科大学

部局名: 地球宇宙物理研究所

職名: 教授