

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2009～2011

課題番号：21684021

研究課題名（和文）

粉体流抵抗力物理の統一的理解

研究課題名（英文）

Unified understanding of physics on granular drag force

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

研究成果の概要（和文）：

粉体はその離散性ゆえにバルク（集団）としても通常の流体や固体とは異なる挙動を示す。そのため、粉体挙動の基礎的理解はまだ十分ではない。粉体の基礎理解を深めるために、本研究では特に粉体の作る抵抗力に注目することとした。最近になり、いくつかの研究グループが独立に粉体抵抗力についての実験を行い、それぞれに独立な結果を得ているが、それらは未だ統一的理解されている状態にはない。以上のような状況を鑑み、本研究では「粉体と液滴の衝突」と「粉体層への固体塊低速侵入による抵抗力と壁圧力」という二種類の実験を行った。前者の実験から、これまで発見されなかった新たなクレーター形状を液滴と粉体の衝突により複数種発見することに成功した。更に、クレーター径の従うスケールリング則を無次元量を用いて見出し、現象を支配する基礎物理を解明した。一方、後者の実験より、低速の固体塊侵入により粉体層が作る抵抗力と壁圧力の関係を表す非線形なスケールリング則を導出した。このスケールリング則より、粉体中の圧力伝播の非線形性が粉体粒子境界での減衰や散逸の効果によりもたらされることを示すことに成功した。これらの実験により、粉体抵抗力の基礎物理的理解を深めることが出来たと言える。

研究成果の概要（英文）：

Due to its discreteness, the behavior of bulk granular matter is much different from usual fluids or solids. Therefore, the fundamental understanding of the unique behavior for granular matter has not been enough yet. Particularly, we focus on the granular drag force to understand the fundamentals of the granular physics, in this research project. Recently, some research groups have independently performed granular drag force experiments, and obtained various results. However, there has not been any unifying concept. We carried out two kinds of experiments in order to solve this desperate situation. The one is the impact between a granular layer and a liquid droplet. The other one is the simultaneous measurement of drag force and wall pressure by a solid penetration into a granular column. From the former experiment, we have found some novel crater shapes that have never observed in other impact experiments. In addition, we have revealed the scaling relation for the crater radius using a dimensionless parameter. From the latter one, on the other hand, we have found nonlinear scaling laws for slow granular drag force and induced wall pressures. By detailed analyses of the experimental results, we have concluded that the origin of nonlinearity of the scaling relates to the attenuation at grains boundaries. Through these experimental results, we have now obtained some fundamental understandings for the granular drag force.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	14,000,000	4,200,000	18,200,000
2010年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2011年度	3,300,000	990,000	4,290,000
総計	20,800,000	6,240,000	27,040,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：粉体，衝突，応力伝播

### 1. 研究開始当初の背景

粉体は、ときに流体のように振る舞い、またあるときは固体のように振る舞う。特に粉体層に固体の塊を接触・移動させたときに生じる抵抗力は、流体もしくは固体の抵抗力でみられる粘性抵抗や慣性抵抗、摩擦抵抗などが複合的に作用し、未だにその性質の完全な理解はなされていない。

粉体における抵抗力は近年になりやっと盛んに研究されはじめている。具体的には、粉体層の中で固体塊に変位を与えその抵抗力を測定する研究、粉体層に固体弾を衝突させてその減速過程を通して抵抗力を測定する研究、粉体層表面に固体を接触させて摩擦抵抗を測定する研究、などが行われている。しかし、それらは独立で行われており、それぞれ独自の抵抗力モデルを提唱している。例えば我々も先行研究では、粉体-固体衝突の抵抗力を高精度で測定したが、その際の自由表面変形の効果や容器壁の効果は考慮しておらず、他の研究グループにより得られた結果との直接比較検討は必ずしも簡単ではなかった。

本研究開始当初の段階では、このような状況を整理して基本的な実験に基づいて粉体抵抗力の基礎物理を確立することが、粉体の基礎・応用の両面から重要な課題であると言える状況にあった。

### 2. 研究の目的

以上で述べた背景を受け本研究では、粉体の抵抗力を考慮する上で特に重要と思われる「自由表面変形の効果」と「境界壁の効果」についての実験的研究を行うこととした。これにより、これまでいくつかの研究グループにより独立に得られた断片的な成果（それらは互いに相容れないようなデータを示している場合もある）のギャップを埋め、粉体抵抗力の総合的理解を目指す。

粉体抵抗力を実験的に議論するに当たっ

て本研究では基本的に粉体を流体のような連続体として近似できるレベルでのマクロ挙動に注目することとする。マクロレベルでの主な抵抗力は、粘性抵抗、慣性抵抗、それに摩擦抵抗となる。粉体には一般に流体のレイノルズ数に相当する無次元量はない（その他の無次元量はいくつかある）とされており、それぞれの抵抗力が支配的になる領域とその遷移の様子は明らかになっていない。無次元量やスケーリング解析を用いた「自由表面変形」と「容器壁摩擦」の粉体抵抗力へ及ぼす効果の定量化が目標となる。

また、可能性としては、従来の流体や固体における典型的な粘性抵抗、慣性抵抗、摩擦抵抗とは全く異なる形をした新たな抵抗力が粉体で見つかることも考えられる。その場合は新しいタイプの抵抗力の物理機構解明にも取り組むこととする。

### 3. 研究の方法

粉体抵抗力における「自由表面変形の効果」と「境界壁の効果」を確認するために本研究では「粉体と液滴の衝突による液滴と粉体層の変形実験」と「粉体層固体塊低速侵入時の抵抗力と容器壁への圧力伝播についての実験」の二種類の実験を実施した。それぞれについて以下に研究の方法を概説する。

#### (1) 粉体と液滴の衝突

粉体層に液滴を自由落下により衝突させ、その様子を高速度カメラにより撮影し、粉体層の自由表面変形と液滴の変形の動的状態を直接観察する。データより液滴の変形や浸透の時間スケールを計測し、その物理的意義を考察する。また、液滴が粉体層中へ浸透した後に残った衝突クレーター形状をレーザー変位計および電動ステージを用いて高精度で計測する。以上の計測結果を元に、粉体衝突による自由表面変形の効果を明らかにする。

用いた実験系の概略を図1に示す。

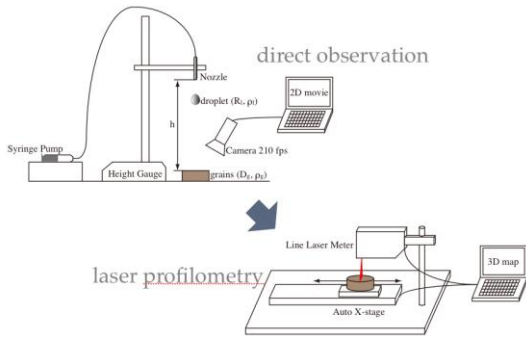


図1：粉体層と液滴衝突実験系の概略

(2) 粉体層への低速侵入抵抗と壁圧力

容器壁内の粉体層に固体塊を侵入させた際にどのような抵抗が働き、その圧力がどのように容器壁へ伝播するかを実験的に調べる。具体的には粉体を円筒容器に入れ、万能試験機により固体塊を低速で侵入させその時の抵抗を計測する。それと同時に容器壁での壁圧力を圧力センサーにより計測し、粉体層内での圧力伝播則を実験的に求める。これにより粉体抵抗力における容器壁の効果と同時に粉体内での圧力伝播則を議論することが可能となる。構成した実験系概念図を図2に示す。

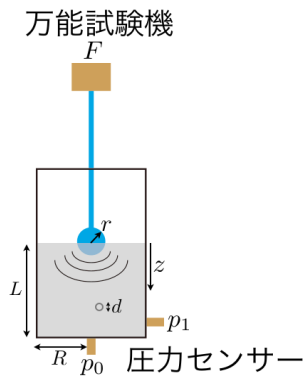


図2：粉体層への固体塊侵入抵抗と容器壁での圧力計測の実験系概念図。Fは抵抗力、rは固体塊半径、L、Rは粉体層の厚さおよび半径、dは粉体粒子径、zは侵入深さで、 $p_0$ 、 $p_1$ はそれぞれ壁圧力を表す。

4. 研究成果

研究の方法で述べた二種類の実験系〔(1)粉体と液滴の衝突による液滴と粉体層の変形実験、(2)粉体層固体塊低速侵入時の抵抗力と容器壁への圧力伝播についての実験〕それぞれについて得られた結果を以下にまとめる。

(1) 粉体と液滴の衝突

最初に粉体として研磨粉（粒径数 $\mu\text{m}$ から数十 $\mu\text{m}$ 程度）を用い、これに水滴を数m/s程度までの速度で衝突させる実験を行った。衝突による水滴と粉体の複雑な自由表面変形の結果、様々なクレーターが形成されることを新たに発見した。実際に得られたクレーター形状の例を図3に示す。これらのクレーター形状は従来の衝突実験では得られることのなかった特異な形状ばかりであり、液体と粉体との相互作用の複雑さが作り出す芸術のようでもあった。得られたクレーター形状は室内実験特有のものであると当初は考えていたが、月の表面にも非常に似通った形状のクレーターがあることが後に分かり、今後この結果は基礎物理のみならず惑星科学等の分野にも応用展開できるものとなるかもしれない。

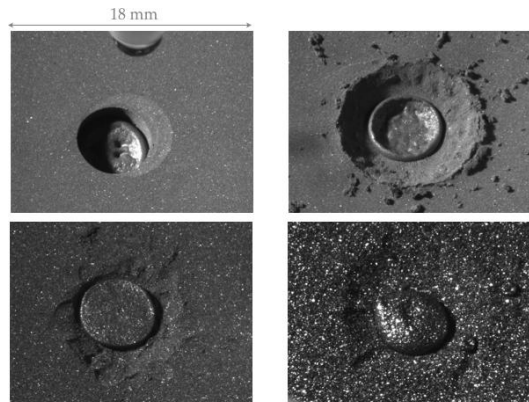


図3：粉体（研磨粉）に水滴を衝突させた際に出来る様々なクレーター形状。粉体の粒径と衝突速度を変化させることにより（左上）シンク型、（右上）リング型、（左下）フラット型、（右下）バンプ型が観察された。

上述のクレーター形態学的な成果は研究目的に当初からあったものではなく、実験を実施したことにより新たに見出された成果であった。一方で当初の目的に照らして自由表面変形の様子等の定量的解析も行った。その結果、クレーター形状が液滴の衝突による変形によりほぼ決定されることが分かった。その証拠として、クレーター半径Rを初期液滴半径 $R_l$ で規格化したもの $R/R_l$ が、液滴の衝突速度・粘性・表面張力を変化させた場合の特徴的無次元量であるウェーバー数Weを用いて $R/R_l - (\rho_g/\rho_l) We^{1/4}$ とスケールされることを示した（ここで $\rho_g$ 、 $\rho_l$ はそれぞれ粉体バルクと液滴の密度）。実際に得られたスケールリングの結果を図4に示す。

また、液滴が粉体層内に浸透する時間も定量的に求め、それが従来の多孔質媒体への液体の浸透とは異なる特性を持つ

ことも明らかにした。

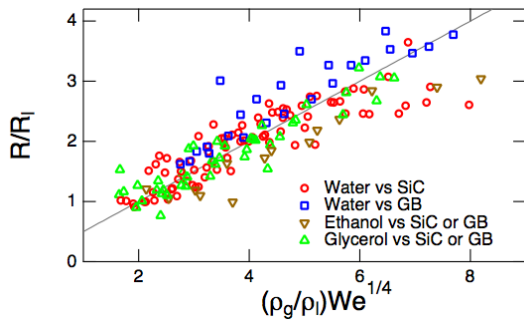


図4：液滴変形と粉体自由表面変形の結果を示すクレーター径とのスケーリング関係。色とマークは実験条件の違いを表す。

## (2) 粉体層への低速侵入抵抗と壁圧力

続いて、粉体抵抗力と容器壁の効果調べるために、円筒容器に粉体を積層し、そこに固体塊を低速 (1 mm/s) で侵入させ、抵抗力と容器壁での壁圧力とを同時計測した。その結果、固体塊の侵入抵抗力が侵入深さに対してべき的に増大することが分かった。このべき増加は定性的には過去に行われた類似の実験と一致していた。一方で壁圧力の挙動は侵入抵抗力に比べて非常に複雑であったが、侵入による圧力増加分  $\Delta p$  と侵入抵抗力の関係にある種の (非線形な) スケーリング則が成り立つことが分かった (図5)。このスケーリング則を吟味することにより、粉体での抵抗力および圧力伝播の非線形性は、粒子境界接点での散逸に由来することが明らかになった。この散逸のファクターと圧力増加の非線形性はスケーリングの中で密接に関連しており、粉体の離散性を定量的に表している。

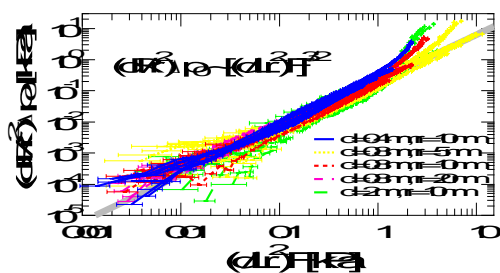


図5：抵抗力  $F$  と底面における圧力増分  $\Delta p_0$  とのスケーリング関係。記号の意味は図2と同様。色の違いは凡例の通り実験条件の違いを表す。

以上で概説したとおり、本研究では二種類の実験を通し、当初目的の通り、粉体抵抗力における「自由表面変形の効果」と「境界壁の効果」について定量的実験結果を得て、無次元量やスケーリングの概念を用いて基礎

的な物理法則を導出することに成功した。

得られたスケーリング等は様々な粉体系において成り立つ適用範囲の広いものと考えており、粉体における抵抗力について完全に統一的な理解にまでは至らずとも理解に前進を与え得たものと考えている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① H. Katsuragi, Material, preparation, and cycle dependence of pressure behavior in a slowly plunged granular column, Chem. Eng. Sci., 査読有, Vol. 76, 2012, 165-172.  
DOI:10.1016/j.ces.2012.04.027
- ② H. Katsuragi, Nonlinear wall pressure of a plunged granular column, Phys. Rev. E, 査読有, Vol. 85, 2012, 021301:1-5.  
DOI:10.1103/PhysRevE.85.021301
- ③ H. Katsuragi, Length and time scales of a liquid drop impact and penetration into a granular layer, J. Fluid. Mech., 査読有, Vol. 675, 2011, 552-573.  
DOI:10.1017/jfm.2011.31
- ④ H. Katsuragi, Morphology scaling of drop impact onto a granular layer, Phys. Rev. Lett., 査読有, Vol. 104, 2010, 218001:1-4.  
DOI:10.1103/PhysRevLett.104.218001

[学会発表] (計21件)

- ① Hiroaki Katsuragi, Nonlinear pressure transmission in a dense granular column, French-Japanese meeting on Jamming, Glasses and Phase transitions. (2011/12/09). Institute Henri Poincare in Paris, Paris, France
- ② Hiroaki Katsuragi, Wall pressure induced by penetration into a granular column, Japan-Taiwan meeting on non-equilibrium statistical physics and soft matter, (2011/10/29). National Taiwan University. Taipei, Taiwan
- ③ 桂木洋光, 液滴の粉体層への衝突と浸透, 粉体工学会 2010 年度秋期研究発表会. (2010/12/1). 東京ビッグサイト
- ④ Hiroaki Katsuragi, Liquid drop impact cratering on a granular layer, American Geophysical Union 2010 fall meeting. (2010/12/17). San Francisco, USA

- ⑤ Hiroaki Katsuragi, Impact of a liquid drop and a granular layer, Recent Progress in Physics of Dissipative Particles. (2010/11/25). YITP, Kyoto, Japan
- ⑥ 桂木洋光, ガラスビーズ層への固体塊陥入と壁圧力, 日本物理学会 2010 年秋季大会. (2010/09/24). 大阪府立大学
- ⑦ Hiroaki Katsuragi, Liquid drop impact cratering, Deformation, Flow and Rupture of Soft Matter (Franco-Japanese Joint Seminar). (2010/07/08). ENS Lyon, France
- ⑧ 桂木洋光, 水滴衝突による粉体層変形のスケーリング, 日本物理学会第 64 回年次大会. (2010/03/20). 岡山大学
- ⑨ 桂木洋光, 粉体と水滴の衝突現象, 平成 21 年度 衝撃波シンポジウム. (2010/03/18). 埼玉大学
- ⑩ 桂木洋光, 粉体と水滴の衝突, 天体の衝突物理の解明 (V). (2009/11/13). 北海道大学

[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]  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

桂木 洋光 (KATSURAGI HIROAKI)  
名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授  
研究者番号: 30346853

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし