

# やわらかな固体・流体・混合体の複雑挙動と 地球惑星現象への応用



研究室紹介

桂木 洋光\*

Complex behaviors of soft granular and fluid materials and  
their application to earth and planetary phenomena

Key Words : Soft matter, Lab experiment, Granular matter, Fluid

## はじめに

地球上のゆたかな生命活動は、液体としての水や気体としての大気存在抜きでは成立しない。そのため、生命活動の舞台は固体である地球のごく薄い表面層に局在している。この地球表面層部分では、固体成分は細粒化して砂礫層や土壌を構成している場合が多い。これらの固体粒子群が気体や液体と混合することによって、様々な現象が生み出され、地球表面層における生命活動や地形形成の多様性が維持されている。

気体や液体がほとんど存在しない（生命活動もない）太陽系固体天体においても、その表面は砂礫で覆われている場合が多い。気体や液体との相互作用がない固体砂礫粒子群の運動は、初等力学で理解可能なはずである。すなわち、固体天体表面における地形の形成過程は、初等力学の演習問題に過ぎないと考えられる。しかし、そうは問屋が卸してくれない。小さな固体粒子が多数集まった状態である「粉体」の挙動は、固体・液体・気体とは一味も二味も異なる複雑なものとなる。粉体は、ときに固体のように固く、ときに流体のように流れる「やわらかい複雑物質」の一例である。やわらかい複雑物質は粉体以外にも数多くあるが、本研究室では地球や固体天体表面層部で重要となる粉体と流体（とその混合）に特に焦点を絞り、その物理挙動を主に実験的手法により研究している。

粉体や流体は、地球や固体天体の表面過程のみでなく、日常生活や様々な産業応用においても重要な構成要素となる。例えば、日々我々が口にする食料の多くが粉体の形をもっている。もの作りの現場においても、粉体材料を制御するシーンは数多い。また、片栗粉の濃厚懸濁液で遊ぶと、固体的振る舞いと流体的振る舞いが切り替わるさまを体感することができる。我々の研究室では、これらの日常現象、産業応用、身の回りの不思議な現象などについても、その物理素過程を解明したいと考えており、常に広い視野を持つことを心がけている。図1に様々な粉体現象と我々がこれまで取り組んできた実験例を示す。

以下で、いくつかのキーワードをもとに我々が最近とくに関心を持っている現象等について紹介する。

## 衝突・クレーター形成

大気や水が存在しない固体天体表面で起こる最も重要な地形形成イベントは衝突現象だ。衝突により天体表面に形成されるクレーター形状は、衝突の爪あとと言え。その爪あとの意味を正しく解釈することができれば、固体天体や太陽系の歴史を解明するさまざまなヒントが得られることになる。そのため、クレーター形成過程については古くから研究が盛んに行われてきた [1]。

一般に、クレーター形成を起こす天体衝突は高速で起こることが多い。しかし、最近になり、低速での衝突クレーター形成機構も興味を持たれるようになってきた [2]。例えば、探査機の天体表面への着陸等の工学的応用のシーンでは、低速での衝突現象の物理機構解明が重要となる。また、隕石のような固体の衝突だけでなく、液滴や気流の衝突によるクレーター形成の研究も最近では活発に行われており、様々な特異クレーター形状が次々に発見されている。我々の研究室でも、そのような衝突クレーター形成現象の物理機構や形状の多様性に関する実験研究を



\* Hiroaki KATSURAGI

1973年6月生まれ  
九州大学大学院 工学研究科 応用物理学専攻修士課程 (1998年)  
現在、大阪大学大学院 理学研究科  
宇宙地球科学専攻 教授 博士(理学)  
専門/ソフトマター物理実験  
TEL : 06-6850-5799  
E-mail : katsuragi@ess.sci.osaka-u.ac.jp

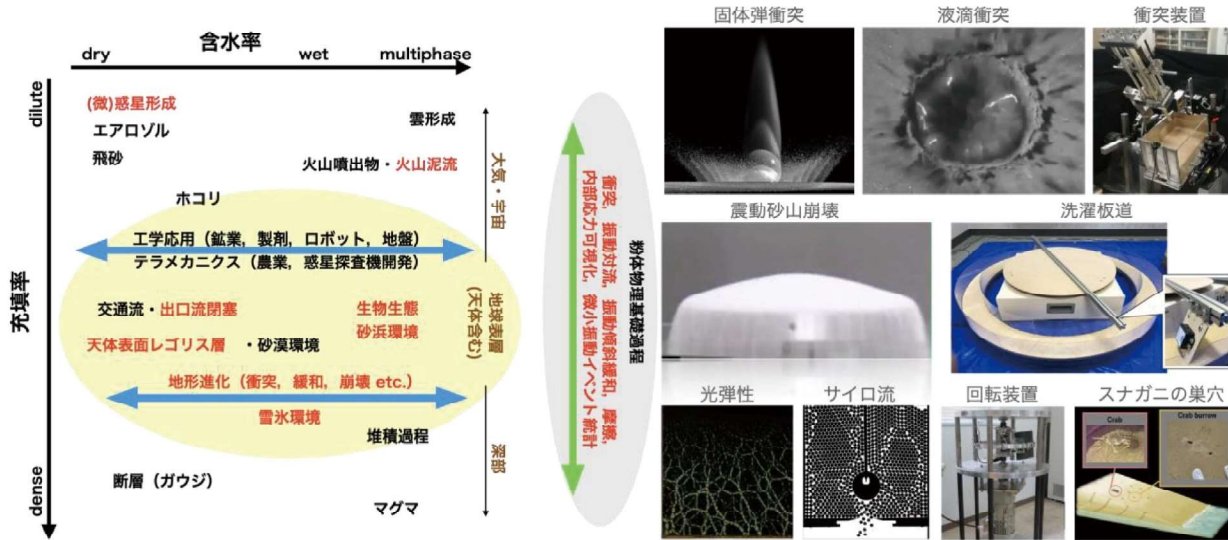


図1 粉体现象の普遍性 (左) と実験等の例 (右)

近年進めている。

衝突クレーターの形状は、衝突の条件により変化する。また、一度形成されたクレーター形状は、その後、長い時間をかけて徐々に緩和する。クレーター形状やその緩和の程度から衝突現象の起きた状況や年代を推定することができれば、天体進化史の解明に寄与する情報を、クレーター形状の観測から得られることになる。

この背景に基づいて取り組んだ「傾斜した粉体層に固体弾を斜め衝突させる実験」について、ここで簡単に紹介する。この実験では、粉体層表面の傾斜角が大きくなると、衝突後に斜面の崩壊が起き、クレーター形状が複雑に変化する。その様子を系統的实验により調べた (図2)。この研究では、実験に基づき「①衝突クレーターそのものがどのような形状となるか [3]」と「②斜面を巨大なクレーター壁面の一部と考えた場合、衝突によりどのような傾斜緩和が起こるか [4]」、という2つの問題について同

時にアプローチした。それぞれの結果の詳細については割愛するが、このような一石二鳥的アプローチを実現するためには、スケーリングという概念を用いることが重要となる。スケーリングの概念を用いれば、衝突クレーター形成は、日常スケールと天体スケールを結ぶ現象と見なすことさえも可能となる [5]。

### 粉体で挑む森羅万象

衝突やクレーター形成以外にも地球や惑星現象と深く関係する粉体现象は多い。例えば惑星系形成の初期段階で起こる微惑星形成過程では、ミクロン程度の大きさの固体粒子群が凝集してホコリのような高空隙率ダストが形成されたと考えられている [6]。このような高空隙率ダストの物理挙動を実験的に調べることは簡単ではなく、様々な挑戦的課題が残されている。その他にも、揮発性成分を含む地形の進化や緩和、振動やせん断により引き起こされる砂礫

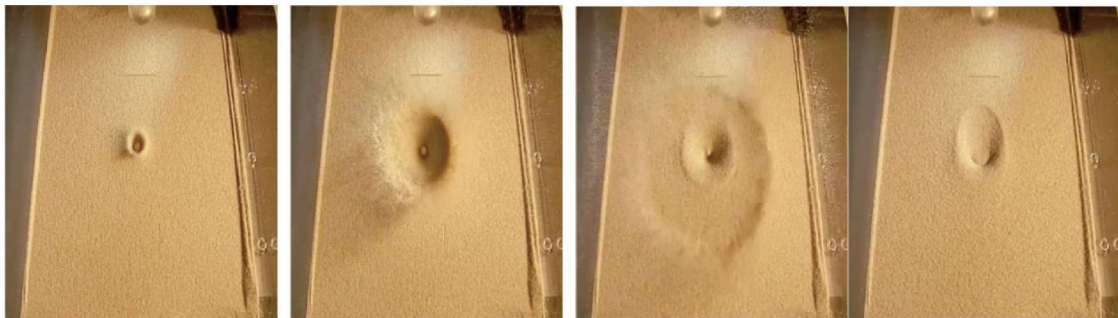


図2 斜面への衝突クレーター形成の実験例

粒子群の分級現象、濡れた粉体の物性など、地形形成プロセスに関連する興味深い現象は尽きない [7]. これらの問題に関係する物理素過程の実験的研究にも本研究室では取り組んでいる。

多数の固体粒子群として定義される粉体状の物質は自然界にありふれている。そのため、しばしば、粉体はどんな興味関心にも寄り添うことができると豪語される。この「粉体万能性」を証明するため、我々の研究室では、配属された卒研究生や大学院生の研究テーマを決める際に、「あなたの好きなことは何ですか?」という質問から始める。そして、議論を経て「そのような対象や現象が好みであれば、こんな粉体関連の問題がある」とテーマの候補を提案する。このようなテーマ設定の議論が不可能であれば、粉体万能性は「看板に偽りあり」ということになる。しかし幸いにして、今のところこの粉体万能作戦はまずまずうまくいっている。これまでも、農業に関連する土壌団粒の特性研究、スナガニ巣穴の強度研究、出口流の目詰まり問題の研究など、学生の多様な興味に即した幅広い粉体研究に着手してきた。ただし、さすがにこの作戦が百発百中でないことは白状しておく。また、最初から粉体以外の研究テーマの希望が明確な場合はもちろんそのテーマに沿った研究指導を行うし、それにより研究の幅が広がることも楽しいことである。それでも、このような「なんでも粉体（およびその関連）に絡める」というチャレンジを旨としているという点は、本研究室の特色の一つである。

### 複雑混相系からさらなる広がりへ

衝突クレーターを中心とした地形問題、粉体に関わる科学、といった上述の問題の他に、研究室としては流体に関係する現象にも興味を持って研究に取り組んでいる。研究室の他の構成教員は、生物物理や流体力学、計測開発などの専門性を持っており、協力して学生の研究指導にあたっている。そのため、生物物理的実験、ライデンフロスト現象（熱い鉄板等の上で小さな液滴が浮遊する現象）やマイクロプラスチックの回収技術、新しいレオロジー測定法の開発など様々な研究テーマに積極的に取り組んでいる。粉体（固体成分）と流体（液体・気体）は、それぞれ単体でも奥深い挙動をしばしば示すが、さらにそれらが混合した複雑混相系の挙動は極めて複雑となる。そのような複雑流動体の基礎物性を明らか

にすることで、地球や惑星・生命現象の理解に資する知見をひねり出すことが、本研究室の大きな目標となる。その中で、基礎物理・工学的応用・身近な不思議現象の理解など、幅広い分野への波及効果も常に狙っている。

### おわりに

身近な現象の解明から地球や惑星スケールの現象に思いを馳せる研究アプローチは、100年ほど前に寺田寅彦が切り開いた道に近いのかもしれない。我々の研究室のモットーの一つに『我々にしか測れない』実験ではなく、『我々くらいしか測らない』実験を目指す』というものがある。大型研究予算には縁がなく、研究テーマも当世の主流や流行とはかけ離れているために、他では測れない世界最高精度の計測ができるというような装置は当研究室では持ち合わせていない。むしろアイデアひとつで「他の人は（バカバカしいので?）研究することすら思いつかない現象」を愚直に見つめ直し、その物理機構を描き出す、そんなスタイルの研究をいつも目標としている。浅学非才の身には、実はこの目標はつらく厳しいものとなっている面もある。しかしながら、これからもへこたれずに、我々でなければ取り組まないとと思われるような問題を探し続けたい。

### 参考文献

- [1] H. J. Melosh, *Impact Cratering*, Oxford University Press (1989); G. R. Osinski and E. Pierazzo eds., *Impact Cratering*, Wiley (2013); H. J. Melosh, *Planetary Surface Processes*, Cambridge University Press (2011)
- [2] J. C. Ruiz-Suárez, *Rep. Progr. Phys.* **76**, 066601 (2013); D. van der Meer, *Annu. Rev. Fluid Mech.* **49**, 463 (2017); H. Katsuragi, *Physics of Soft Impact and Cratering*, Springer (2016)
- [3] S. Takizawa and H. Katsuragi, *Icarus* **335**, 113409 (2020)
- [4] T. Omura et al., *MNRAS* **502**, 293 (2021)
- [5] 桂木洋光, *日本物理学会誌* **70**, 855 (2015)
- [6] J. Blum, *Space Sci. Rev.* **214**, 1 (2018)
- [7] B. Andreotti et al., *Granular Media*, Cambridge University Press (2013); S. Harminghaus, *Wet Granular Matter*, World Scientific (2013)