

無重力では堅くても脆くても関係ない!?

～階層粉体の衝突膨張動力学を惑星形成過程研究の中で解明～

名古屋大学大学院環境学研究科の桂木 洋光 准教授は、ドイツ・ブラウンシュヴァイク工科大学の Jürgen Blum 教授との共同研究により、実験室落下塔^{注1)}を用いて高空隙率（こうくうげきりつ）粉体クラスター^{注2)}の微小重力環境下での衝突応答の物理法則を明らかにしました。高空隙率粉体クラスターは太陽系形成の初期段階における微惑星形成の材料物質に相当すると考えられていますが、その衝突応答等の物理特性理解は未だ十分に進んでいません。また、この高空隙率粉体クラスター（集合体）と砂のような稠密（ちゅうみつ）固体粒子^{注3)}による粉体との物理的相違点（もしくは類似点）の詳細についても、これまで具体的に明らかにされることはありませんでした。このような背景の中、この研究では、宇宙空間に相当する真空・微小重力環境を模擬した実験室内落下塔を用いて、粉体クラスターに固体球を低速衝突させる実験が行われました。その結果、粉体を構成する粒子の空隙率に依らない衝突エネルギー分配則^{注4)}を発見し、更に、このエネルギー分配則が簡単な粒子衝突連鎖モデルにより説明可能なことを明らかにしました。この成果は、惑星形成初期段階の凝集体成長ダイナミクス^{注5)}に対して新たな知見をもたらすと同時に、堅い稠密粒子と脆（もろ）い高空隙率粒子による粉体の衝突応答特性の類似性を初めて明らかにしたものです。また、本研究は、微小粒子の集合により形成される脆い粒子が更に階層的に集合して全体として粉体状態をなす「階層粉体」という新たなソフトマター^{注6)}材料の物理的研究の端緒を開くものでもあります。

研究成果は、平成 30 年 11 月 13 日付で米国科学雑誌 Physical Review Letters 誌オンライン版に掲載されました。本論文は注目論文として Editors' suggestion に選定され、米国物理学会の web サイト Physics においてもその内容が一般向け記事”Throwing Dust at Planet Formation”として紹介されています。

この研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業の国際共同研究強化（課題番号：15KK0158）および基盤研究(A)（課題番号：18H03679）、Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, Grant No.BL298/24-1)、Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR, Grant No. 50WM1536)の支援のもとで行われたものです。

【ポイント】

- 室内落下塔実験により高空隙率粉体クラスター（集合体）と固体弾の衝突実験を世界で初めて実施
- 堅い粒子による粉体クラスターと高空隙率粉体クラスターの衝突による膨張を统一的に説明するエネルギー分配則を発見
- 階層粉体という新たな粉体材料の物理特性の研究を世界に先駆けて開始

【研究背景と内容】

太陽系形成の初期段階では、マイクロメートル以下程度のサイズを持つ微小な固体粒子が凝集を繰り返してできた空隙率の高い粉体クラスターが多数存在していたと考えられています。この粉体クラスターが数 km～数千 km 程度の大きさを持つ微惑星まで成長し、それらが更に集積することにより最終的に惑星が形成されたと考えられています。しかし、微惑星の形成過程において、どのように高空隙率粉体クラスターが成長したのか、その物理的過程の詳細は未だ解明されていません。この問題が未解決のまま残っている一つの要因として、高空隙率粉体クラスターが衝突に対してどのように膨張するか、どのように破壊されるか等の特性が十分に解明されていないという点が挙げられます。

また、この研究で用いた高空隙率粉体クラスターを構成する個々の粒子（直径 1 mm 程度）は、更に小さい粒径 1 μm 程度の微小な固体粒子の脆い凝集体であり、このことは高空隙率粉体クラスターが様々なサイズの階層構造を持つ「階層粉体」であることを意味しています。このような階層粉体の物理特性については、これまでほとんど注目されることがありませんでしたが、いわゆるダマを作る粉体系は様々な自然現象や産業応用のシーンで普遍的に見られるため、その基礎物理を明らかにすることは様々な分野への波及効果が大きいと考えられます。

このような背景を受けて、ドイツ・ブラウンシュバイク工科大学の Jürgen Blum 教授の研究グループにより開発された高さ約 1.5 m の実験室落下塔（図 1）を用いた自由落下最中の粉体衝突実験（固体弾の粉体クラスターへの衝突）を行いました。落下塔内は真空・微小重力という宇宙空間を模擬した環境となっておりと同時に（空気抵抗や地球重力の効果などが無視できるため）粉体物理の理想的実験環境にもなっています。粉体を構成する粒子としては稠密なガラスビーズおよび高空隙率のダスト凝集体（階層粉体粒子）を用い、0.045-1.6 m/s の衝突速度範囲で系統的に条件を変化させて実験を行いました。衝突の様子を高速度カメラで撮影し（図 2）、画像解析により粉体クラスターの膨張の様子を解析しました。その結果、固体弾の衝突により誘発されるターゲット粉体クラスターの膨張動力学が粒子の階層構造には依らず、密度の違いを考慮することにより、全ての実験結果が同一のエネルギー分配法則（衝突エネルギー分配則^{注4）}で説明できることが見出されました。具体的には、衝



図 1：ブラウンシュバイク工科大学で開発された実験室落下塔

突前の弾丸が持つ運動エネルギーのうち約 15%は弾丸に残り，約 5%が粉体クラスターの膨張に分配され，およそ 80%あまりが粉体クラスター内の散逸的衝突の連鎖などにより失われてしまう（クラスター内の変形や熱となる）ことが明らかにされました。

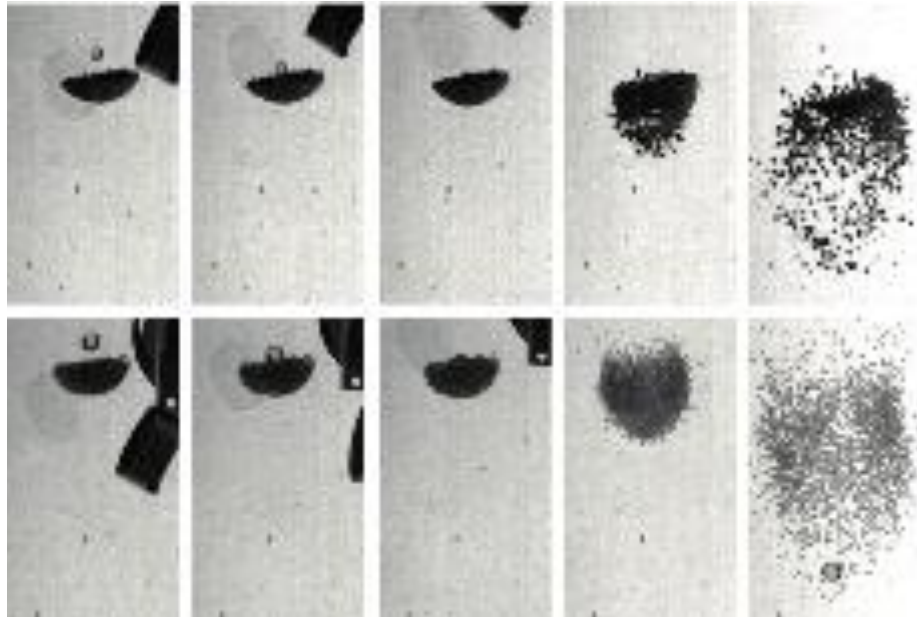


図 2 : 高空隙率粉体クラスター（上）及びガラスビーズクラスター（下）の固体弾衝突による膨張の高速度撮影写真

【成果の意義】

微小重力実験実施のためには，通常，大規模な落下塔や飛行機による自由落下飛行等が必要となるため，微小重力実験は大きなコストを要する場合がありますが，本研究で用いた実験室落下塔は低コストで微小重力実験を多数回行うことができます。実験室落下塔は規模が小さいため微小重力実現時間は限られたもの（約 0.5 秒）となりますが，衝突現象などの比較的高速な現象の実験のためには十分なものとなっています。本研究では，この実験室落下塔の特性を活かし，階層構造を持つ脆い粉体クラスターと稠密で堅いガラスビーズにより構成される粉体クラスターの両者（図 3）をターゲットとして，固体弾を用いた微小重力環境下での衝突実験を世界で初めて系統的に実施しました。得られた結果は，堅い粉体も脆い粉体も同じ膨張様式



図 3 : μm サイズの SiO_2 粒子の凝集による階層粉体（左）およびガラスビーズ（右）（粒子直径はどちらも約 1 mm）

に従うことを示しており、これは微惑星形成の詳細モデルを構築する際に、モデルを簡略化できる可能性があることを示唆しています。また、微小粒子のダマにより構成される階層粉体クラスターの動きを、従来の砂粒やガラス粒などによる粉体のそれと系統的に比較する研究はこれまでに他に類がありませんでした。しかし、ダマ構造を持つ粉体の動きが関連する現象は、なだれや粉体材料の貯蔵・輸送過程、ひいては日常のお菓子作りまで多種多様にあります。そのため、脆い高空隙率階層粉体と堅い稠密固体粒子による粉体の物理特性について類似点や相違点を系統的に調べることは、様々な応用上、今後ますます重要になると考えられます。本研究はそのような階層粉体の物理を初めて明確に意識して行った実験研究となり、今後、本研究を契機として「階層粉体の物理」という新規研究分野の急成長が期待されます。

【用語説明】

- 注1) 実験室落下塔：実験室内で微小重力実験を行うために開発された実験施設。実験サンプルを真空状態で自由落下させることができる。
- 注2) 高空隙率粉体クラスター：微粒子で構成された中身に隙間が多く含まれる脆いダマ構造の集合による粉体のひとかたまり。
- 注3) 稠密固体粒子：中身が固体で満たされ隙間のない固体粒子。
- 注4) 衝突エネルギー分配則：衝突エネルギーが衝突後に「固体球」、「凝集体の膨張」、「内部変形等での消費」にどのように分配されるかを表す法則。
- 注5) 凝集体成長ダイナミクス：微小固体粒子の集合で構成される高空隙率凝集体が成長して微惑星を経て惑星に至ったと考えられている。その成長の過程のダイナミクス。
- 注6) ソフトマター：高分子や液晶、粉体などの柔らかく独特の変形則などを持つ物体の総称。

【論文情報】

雑誌名：Physical Review Letters

論文タイトル：Impact-Induced Energy Transfer and Dissipation in Granular Clusters under Microgravity Conditions.

著者：Hiroaki Katsuragi and Jürgen Blum

DOI: [10.1103/PhysRevLett.121.208001](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.208001)

紹介記事： <https://physics.aps.org/synopsis-for/10.1103/PhysRevLett.121.208001>