

粉体現象がみせてくれる風景



桂 木 洋 光

大阪大学大学院理学研究科
katsuragi@ess.sci.osaka-u.ac.jp

米や小麦などの穀物、風に舞う砂、すし詰め満員の電車内の人々、これらはいずれも「粉体」とみなせる。粉体は「散逸を伴う固体粒子群」として物理的には定義され、多くの自然現象において登場し、極端に言う、万物と何らかの関係を持っている。そのため、粉体は様々な自然現象に多様性をもたらす主要な構成要素の一つとなっている。

言うまでもなく、地球や太陽系固体天体の表面は砂礫や土砂によって覆われている。そのため、地球を含めた固体天体表面の地形進化はもちろん、地表に生息する生物の生態でさえ、粉体の物理挙動による制約を大きく受けている。

粉体現象の多くは、驚くほどシンプルな物理実験の積み重ねによって、その深淵に潜む仕組みが紐解かれつつある。粉体の示す多彩な複雑挙動や物理風景について、特に摩擦や付着性が大きな役割を果たすいくつかの現象を以下に紹介する。

例えば、砂山を回転させると遠心力の影響により変形する。この回転による砂山の変形は、重力・遠心力・摩擦力のバランスのみを考えたモデルで良く説明されることが最近の系統的实验で明らかになった。また、この系における**安息角**を特徴付ける粉体の摩擦係数が遠心力の影響を受けて変化し得ることも、この実験により示された。このような砂山の回転による変形は、小惑星などの自転する微小重力天体の表面地形進化という風景の素過程と関連する。

また、粉体粒子に比べて大きな固体塊を粉体層に準静的に陥入させると、特有の抵抗力が生じる。この抵抗力は、摩擦による**滑り線モデル**で定量的に記述され、陥入体

積に比例する項を持つことから、粉体におけるアルキメデスの原理に対応すると解釈されている。

一方、濡れた粉体は、その付着性により有限の付着強度を持つ。この性質は砂浜に生息するスナガエの巣穴の崩壊条件と関係する。この関係性は、状況を単純化した物理実験により定量的に明らかにされている。同様の空洞崩壊の力学は、彗星表面に見られる地盤沈下の地形の解釈にも有用であり、付着性粉体が見せてくれる物理風景の普遍性を表す要素となっている。

液層に浮遊する柔らかい粒子群に**せん断**を加えると、間欠的な滑りイベントが発生する。この滑りイベントの統計分布は**スロー地震**と同様の特徴を示すことが、最近の実験により明らかになった。このように、地球規模の現象を室内実験で再現できる点も粉体実験研究の利点の一つである。

これらの一見異なる現象群の研究に共通する問いは「粉体の力学応答は、どのような素過程の組み合わせとして理解できるのか」である。上記のように多様な自然現象と関連する粉体現象の背後にある物理的共通点として、摩擦や付着性のほかに、粉体の粒子ネットワーク構造が作る**フォース・チェーン(力鎖)**がある。フォース・チェーンや粒子配置が複雑な現象をもたらす過程を物理的に理解する試みは、現在様々な角度から活発に研究されている。

粉体物理の基礎的理解の深化は、粉体の関わる多様な自然現象の詳細な機構解明に欠かせない要因であるとともに、自然界に遍在する複雑現象を統一的に理解するための重要な手がかりを与えるとも考えられ、今後も一層の発展が望まれる。

用語解説

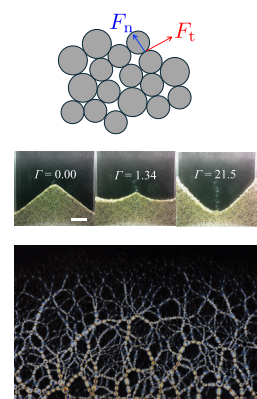
安息角：
重力の影響下で砂山を形成した際の傾斜角。

滑り線モデル：
摩擦構成則と境界条件を与えて、連続体中で内部滑りが起こる線の形状を記述するモデル。

せん断：
物体内部の各部分が互いに横方向へ滑るように相対変位する変形。容器の壁面に垂直に力をかけつつ横ずれの力をかける試験等で特性が評価される。

スロー地震：
通常の地震と比べて非常にゆっくりと滑るため、体感可能なゆれを伴わない地震。

フォース・チェーン(力鎖)：
粉体層中で力が伝播する鎖状の通常ランダムなネットワーク構造。



上段：粒子接触ネットワーク概念図。中段：回転により変形する砂山 (T. Irie et al., Phys. Rev. E **104**, 064902 (2021)より一部改変のうえ転載)。下段：光弾性効果で可視化されたフォース・チェーン (M. Bandi 氏、飯川直樹氏との共同研究による)。