

別紙 4

| | | | |
|------|---|---|---|
| 報告番号 | ※ | 第 | 号 |
|------|---|---|---|

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Relaxation dynamics of granular-heap structure under vertical vibration
 (鉛直振動下における粉体ヒープ構造の緩和ダイナミクス)

氏 名 辻 大輔

論 文 内 容 の 要 旨

本研究では、鉛直振動によって駆動される粉体流のダイナミクスを明らかにするために、粉体ヒープ（傾斜を持つ粉体層）に鉛直振動を加えてその形状発展を測定するという室内実験と数値計算を行った。そして、取得データを基にして粉体の流れを記述する連続体モデルを構築することに成功した。

粉体とは散逸性を持つ巨視的粒子の集合体として定義され、砂や小麦粉をはじめとして我々の身の回りにあふれている物質であり、状況に応じて流動化するという性質を持つ。例えば、静止している粉体層の傾きを徐々に急にしていくと、重力による駆動力が粒子間に働く摩擦抵抗力を上回り、粉体流れ出すということは容易に想像できる。このような流れる粉体を制御することは産業的にも重要な課題であるため、基礎物理的な側面からも盛んに研究が行われてきた。現在までも、粉体流の構成則を含む連続体モデルがいくつか提唱されており、理解が進んでいる。

一方で、粉体の性質は外的な摂動が加えられた系においては劇的に変化することも知られている。例えば、緩やかな傾斜角で静止した粉体層であっても、振動を加えると粒子は容易に流れ出す。この振動による粉体流動化という性質は我々に身近な環境問題とも密接に関わりを持ち、2018年9月に発生した北海道胆振東部地震では、地震動によって土砂が流動化して地滑りが誘発されて被害が生じた。また、惑星科学分野においても振動による粉体流動化は地形発展に関して重要な役割を果たすと考えられている。例えば、レゴリスと呼ばれる粉体層に覆われた小惑星表面で隕石が衝突した際には、発生した地震動が地滑りを誘発してクレーターなどの特徴的な地形を緩和するという議論がなされている。しかしながら、前述の重力駆動の粉体流とは対照的に振動駆動の粉体流の性質に関しては、様々な分野での応用が期待されるにも関わらずほとんど理解が進んでいない。

そこで、本研究では振動によって駆動される粉体流のダイナミクスを記述する連続体モデルを構築することを目的とした。この目的達成のアプローチとして、室内実験と数値シミュレーションの両方を使用してデータを取得し、複合的な解析を行うことによって粉体流の普遍的性質を抽出することを試みた。また、定常状態にある粉体流ではなく、比較的研究がなされていない時間と共に性質が変化する過渡状態における粉体流に着目する。

まず室内実験では、電磁式振動装置を用いて円錐状の粉体ヒープに鉛直振動を加える。振動加速度が重力加速度を超えるような強い振動であれば、粉体粒子が流動化して粉体ヒープの形状が徐々に緩和する。この過渡状態における粉体流の性質を定量化するために、レーザー変位計を使用して粉体ヒープの表面プロファイルを連続的に取得した。更に、粉体流の実験条件依存性まで明らかにするために、振動条件や使用する粉体物質を系統的に変化させた。この実験を行うにあたって、装置一式を同期制御するシステムは本研究で独自に構築した。

実験で得られた粉体ヒープの緩和過程を説明するために、先行研究 (Roering *et al.*, *Water Resour. Res.* **35**, 853-870, 1999) を基にして、Nonlinear Diffusion Transport (NDT) モデルを提唱した。NDT モデルは振動により駆動される粉体流の深さ平均輸送速度を記述する連続体モデルである。独創的な点として、鉛直方向から加えた振動エネルギーが水平方向の粉体輸送エネルギーに変換される割合（以下、エネルギー変換効率 c と呼ぶ）がモデルのフィッティングパラメータとして導入されていることが挙げられる。この指標は先行研究では使用されておらず、本研究において独自に提唱したものである。更に興味深いことに、様々な実験条件で得られたデータを比較した結果、このエネルギー変換効率 c は実験条件に依らず常に0.1程度の普遍的な値を示すことが明らかになった。これは、加えられた鉛直振動エネルギーのうち常に約 10%程度しか粉体の水平輸送エネルギーとして使用されていないということの意味する。また、NDT モデルより粉体流のフラックスを算出することもできるので、連続の式と組み合わせることにより、粉体ヒープの形状が時間とともに緩和する様子を整合的に再現することにも成功した。

上記のように NDT モデルはエネルギー変換効率 c を使って粉体のバルク輸送特性を説明することを可能にした。その一方で、粉体ヒープの内部における粒子の速度構造までは記述することができないという未解決問題が残された。そこで、本研究では同様の実験を数値シミュレーションで再現し、実験装置では技術的に計測が困難な粒子スケールの運動まで解析することを試みた。手法としては離散要素法 (DEM) を用いており、ソースコードは独自に開発した。離散要素法とは、粉体粒子間の接触・滑動を考慮した運動方程式を数値的に解くことにより、それらの力学的挙動を再現する数値計算モデルである。

数値シミュレーションの結果、粉体流の速度は表面層から深くなるにつれて指数関数的に減衰していくことが明らかになった。これは先行研究で報告されている重力駆動の粉体ヒープ流の性質とも整合的な結果である。内部速度構造が指数関数的減衰を示すので、シアバンド（特徴的な流動層）の厚さを定義することができる。数値結果を解析すると、シアバンドの厚さは粉体ヒープの高さに比例して大きくなることが明らかになった。これは、シアバンドが場所に依存せずおおよそ一定層厚を持つという従来の重力駆動の粉体ヒープ流の理解とは大きく異なる。更に、この指数関数的速度構造を積分すると、NDT モデルにより記述される深さ平均輸送速度を導くことができるので、この特徴的なシアバンド構造は室内実験においても同様に成立していると考えられる。

最後に、これらの結果の他分野における応用可能性を示すために、前述した小惑星表面における衝突励起地震によるクレーター緩和過程モデルに NDT モデルを組み込んだ。小惑星イトカワを応用例として使用した結果、クレーターの形状を完全に緩和するためには、単発の大きな隕石衝突だけでは不十分であり、いくつもの衝突イベントが累積する必要があることを示した。

以上より、本研究で得られた結果は振動系における粉体流のレオロジーに新たな知見をもたらしたのみならず、今後様々な分野で応用が期待できるものであると言える。