

論文要旨

粉粒体における動的ジャミング転移 —高速流抵抗則からのアプローチ—

竹原 由佳

粉粒体を一般的な連続体とみなして流体力学や弾性論を適用すると、その振舞を説明することはできない。その背景には不均質に分布する応力鎖や、液体・固体の性質を併せ持つ独自の振る舞いなどが複雑に絡んでおり、未だ経験的・断片的に理解されているだけである。物理学者たちも15年程前からこの重要性に気付き、ソフトマター物理の重要問題とみなして、その物理の解明に取り組んできた。とりわけ流れ中の障害物に働く“引きずり抵抗”の理解は最も基本的、かつ非平衡統計物理学における不可逆過程の重要な問題である。一方、粉粒体研究において“ジャミング転移”（密度の増加に伴って、固体のように有限の降伏応力が生じる臨界現象）は、ガラス転移に関連した近年注目を集めるテーマである。1998年にジャミング相図が発表されてから [1]、スケーリング現象論やガラスのモード結合理論に基づく拡張理論の提案、シミュレーション及び実験による臨界指数の決定など、その進歩は著しい。密度とせん断応力に大きく依存する引きずり抵抗には、ジャミング転移に絡めた理解が求められている。

本論文では、極力簡潔な実験からこの大問題の本質に迫る。近年、我々は閉じ込められた2次元系において粒体中の円形障害物に働く引きずり抵抗を測定する実験を考案した [2]。その独自性を以下に挙げる。(i) 実験による引きずり抵抗研究は以前から多くの研究者が取り組んできたテーマであるが、そのほとんどが速度 \sim 数1 mm/s程度と低速であったのに対し、我々の装置では \sim 数100 mm/s程度の高速領域での実験を可能にした。(ii) これまで高速での引きずり抵抗実験は難しく、障害物を粉体層に落下衝突させ画像解析による間接的な抵抗力の算出が主流であった [3]。しかしこの方法では重力など他の寄与を無視できず（残念ながら3次元粉体に働く重力は水圧ほど単純ではない）、さらに衝突中の流れ速度は常に変化する。我々の2次元実験は重力の影響を取り除き、定速度での直接計測を可能にするものである。(iii) 2次元系での実験によって粉粒体媒質密度を自由に変化させることが初めて可能となり、ジャミング転移密度近傍での引きずり抵抗実験が実現した [4]。

こうした自ら考案した実験の独創性から恩恵を受けて、他研究者にも大きく影響を与えうる成果を得た。以下、本文中の大きな成果を挙げる。(I) 拡張慣性項の提案：これまで高速領域での抵抗の多くは流体力学に置ける慣性項として理解されてきた（実験 [3]、シミュレーション [5]）。しかし、我々の結果は流体など完全な連続体用の慣性項のままでは説明出来ない。そこで“粒子同士が衝突しながらクラスターを形成し、多重衝突が起こる”という粉粒体らしい特有の効果を取り入れた明確なスケーリング法則を構築し、新しい概念を提案した。また画像解析から、クラスターに関連する相関長を確認している。(II) 新しい臨界現象の発見：本研究により可能となったジャミング転移近傍での実験では、初めての臨界現象を観測した。あらゆる物理量（抵抗力を構成する2つの要素および揺らぎの大きさ）がジャミング転移密度に向かって発散するのである。そして、その全ての臨界指数を前述

クラスターのサイズが発散するとした理論で説明することに成功した。(III) 揺らぎの統計解析による抵抗力起源の解明：我々は抵抗力揺らぎの特徴的時間や確率分布を計算し、抵抗力の由来する物理の解明を試みた。すると、ジャミング転移近傍でのせん断負荷系でよく議論される応力鎖が支配的になる状況 [6] とは物理的に異なることが分かった。この結果は、衝突による運動量交換から抵抗力を導いた我々のスケーリング理論 (I) をよく支持するものである。

以上、本研究によって得られた成果は、ほとんどがこれから理解されるであろう粉粒体力学の分野において、基礎構成方程式構築のための布石となることが期待される。

参考文献

- [1] A. J. Liu and S. R. Nagel, *Nature* **396**, 21 (1998).
- [2] Y. Takehara et. al, *EPL* **92**, 44003 (2010).
- [3] H. Katsuragi and D. J. Durian, *Nature Phys.* **3**, 420 (2007).
- [4] Y. Takehara and K. Okumura, *Phys. Rev. Lett.* **Accepted**, (2014).
- [5] C. R. Wassgren, et. al, *Phys. Fluids* **15**, 3318 (2003).
- [6] E. I. Corwin, et. al, *Nature* **435**, 1075 (2005)