

粉体粒子の変形とレオロジー

高田智史*

東京農工大学工学研究院先端機械システム部門

粉体は我々の身の回りに存在している。そのような粉体系のレオロジーを理解することは、工学の様々な分野と関わっており、産業的な応用も幅広い。さらに土星のリング構造や地震、交通流の理解につながる可能性があり、学際的な広がりを持つ。しかしながらこれまでの多くの、特に理論的な研究においては粉体は変形しない球であると仮定していることが多く、実際の粉体を扱う際には避けることができない粒子の変形や破砕などを無視することが多かった。そこで本研究においてはそのような変形や破砕をシンプルな形で取り入れ、それが粉体系のレオロジーにどのように影響を与えるかについて調べた。

まず、粉体の破砕性の影響を調べるため、破砕する粉体粒子のモデルを構成した [1, 2]。具体的には初期において近接している粒子同士をボンドで結合させた。このボンドはある閾値を満たした場合には破壊され、それ以後それが再生することはない。このように構成した粒子を壁に衝突させるシミュレーションをすると、衝突速度の大小により小さな破片に分解してしまう状態や、粒子の一部が壊れるものの全体的には形を保ち跳ね返っていくなどの現象を確認した。またこの粒子を多数集め、その系に剪断を加えた結果、剪断率が十分大きな場合においては粒子の破砕は全体で起きる一方、剪断率が小さな場合には局所的な破砕が起こり粒子の形を保ったままのものも多く残ることがわかった [2]。

その一方、破砕過程を無視し、破砕の結果生じる粒径分布に着目した研究も行った [3]。この研究においては粒子は剛体球と仮定するものの、岩石実験など [4, 5] で報告されている粒径分布が冪分布であると仮定した際のレオロジーが冪やサイズにどう依存するかを調べたものである。剪断下における多分散系の粉体ガスが満たす Boltzmann 方程式からレオロジーを記述する方程式を導出し、その方程式の定常状態を求めることでレオロジーを決定した。その結果、粒径分布だけでなく、粘性率なども冪的な振る舞いを示すこと、下限の粒子サイズを小さくすると系の粘性率が減少することなどを発見した。後者については小さな粒子が存在すればするだけ粘性率が減少することを示しており、現実の系との対応がつかないように思われる。このあたりの議論については今後のさらなる研究が必要な箇所となっている。

以上においては粉体粒子が真空中に存在する場合を考えていた。次に粉体粒子が溶媒中に浮いているような状況でのレオロジーについても考察した [6-9]。これは慣性サスペンション系と呼ばれる系であり、エアロゾルなどを理想化したような状況に対応する。運動論から導かれる応力が満たす時間発展方程式を解析した結果、定常状態において低密度では不連続シアシックニング (DST) 的な粘性率の不連続なジャンプ見られること [6]、密度が有限になると連続シアシックニングに転移すること [7, 8]、さらに中程度の充填率 ($\phi \lesssim 0.5$) までシミュレーション結果をフィッティングパラメータなしで再現すること [8] を報告した。一方、緩和過程においては、Mpemba 効果 [10] と呼ばれる初期に高温の系が低温の系よりも先に低温になりうる現象が見られることを報告した。これは初期条件の用意の仕方の違い、具体的には粘性発熱の項を初期に持つかどうかで決まることがわかった。

しかしながら今述べた系においては粒子同士が衝突した際の粒子の変形が無視されていた (つまり剛体球からなる系を考えていた)。したがって、この系に粒子変形の効果を取り入れた系の解析も行った [11, 12]。この系においては、粒子のかたさをコントロールすると DST 的な振る舞いが 2 度現れること (つまり粒子の軟らかさに起因した DST が現れること) [11]、有限濃度の系においても軟らかさ由来の DST が残ること [12]、シミュレーションにおいても同様の現象が確認されることなどを発見した。

以上の系においては粒子が溶媒から受ける抵抗力として Stokes 抵抗を仮定している。実際、流体力学においては流体中に一つの球粒子を置いた時に球に作用する抵抗として、Reynolds 数の大小により Stokes 抵抗 (Reynolds 数: 小) や Newton 抵抗 (Reynolds 数: 大) が現れることが知られている [13]。これに対応して、大きな粒子が一様に流れる小さな粒子の集まり (粒子流) の中にある場合に、大きな粒子が受ける抵抗についても調べた [14]。これは粒子流の並進速度 V と粒子流が持つ熱速度 v_T の比によって変化し、Epstein 則 (V/v_T : 小) から Newton 則 (V/v_T : 大) へとクロスオーバーすることがわかった。また、これらの法則は、大きな粒子と粒子流の衝突モデルの簡単な解析によって再現することができる。さらに低速 (V/v_T : 小) 領域において、時間発展により Epstein 則から Stokes 則への遷移も見られ、粒子流と流体との関連についても調べた。

[1] 石川通登, 高田智史, 交通流と自己駆動粒子系シンポジウム論文集, **26**, 67 (2020).

[2] H. Ishikawa, S. Takada, and Y. Matsumoto, EPJ Web Conf. **249**, 07007 (2021).

[3] 山路大樹, 石川通登, 高田智史, 交通流と自己駆動粒子系シンポジウム論文集, **27**, 31 (2020).

[4] N. Brilliantov, P. L. Krapivsky, A. Bodrova, F. Spahn, H. Hayakawa, V. Stadnichuk, and J. Schmidt, Proc. Natl. Acad. Sci. **112**, 9536 (2015).

- [5] H. Stünitz, N. Keulen, T. Hirose, and R. Heilbronner, *J. Struct. Geol.* **32**, 59 (2010).
- [6] H. Hayakawa and S. Takada, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2019**, 083J01 (2019).
- [7] H. Hayakawa, S. Takada, and V. Garzó, *Phys. Rev. E* **96**, 042903 (2017); [Erratum] **101**, 069904 (2020).
- [8] S. Takada, H. Hayakawa, A. Santos, and V. Garzó, *Phys. Rev. E* **102**, 022907 (2020).
- [9] S. Takada, H. Hayakawa, and A. Santos, *Phys. Rev. E* **103**, 032901 (2021).
- [10] E. B. Mpemba and D. G. Osborne, *Phys. Educ.* **4**, 172 (1969).
- [11] S. Sugimoto and S. Takada, *J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 084803 (2020); [Addendum] **89**, 127001 (2020).
- [12] S. Takada, K. Hara, and H. Hayakawa, in preparation.
- [13] 今井 功, 流体力学 (前編) (裳華房, 1973 年).
- [14] S. Takada and H. Hayakawa, *Phys. Rev. Research* **2**, 033468 (2020).