

粉体系・液体系の重力不安定性現象における共通の性質

Close relation between gravitational instability of liquid systems and granular materials

小林 和也 (都立大・理) 栗田 玲 (都立大・理)
 Kazuya U. KOBAYASHI, Tokyo Metropolitan University
 Rei KURITA, Tokyo Metropolitan University
 E-mail: kobayashi-ukai@tmu.ac.jp

Gravitational instability (Rayleigh-Taylor instability), which is a typical example of hydrodynamic instabilities, occurs due to density difference. When a heavy fluid lies over a light fluid in a constant gravitational field, fluctuations at the interface gradually increase and then macroscopic flows occur. The gravitational instability can be found not only in liquid-liquid interface but also in the gravitational settling of granular materials (granular-gas interface). However, the gravitational instability of liquid systems and granular systems have been discussed individually in most cases. We find an interesting relationship between the granular system and the physical gel. We also find that those behaviors are determined by the depth of the fluidization.

1. はじめに

粉体は直径数十マイクロメートル程度の大きさを持った粒子多体系であり、工業製品や生産プロセス等に大きく関わることから大変重要な系である。さらに自然界においても、液状化現象や粉塵爆発といった粉体が関わる現象は数多く存在し、粉体を理解することは重要であり、様々な研究が行われている¹⁾。

近年、粉体による他の現象との類似性に着目した研究が盛んに行われており²⁻³⁾、粉体の理解がより一層進むことが期待される。重力不安定性現象においても、液体中・気体中における粉体の沈降に伴う不安定化現象⁴⁻⁵⁾などが報告されているが、現象の個別的な取り扱いにとどまっておらず、液体系としてこれまで盛んに研究されているレイリー・テイラー不安定性現象との類似性は報告されていない。粉体の重力不安定性現象には、粉体の応力鎖ネットワークの形成と、その切断によって固体層と流動層が共存した流動特性が大きく関わることが知られている。つまり気体との界面付近のみが流動層となり、他は固体層となっている。このような流動特性は通常の液体系では観察することができない。粉体の重力不安定性現象と流体系との類似する系を見つければ、これまでの流体系の多くの知見を適用することで粉体系の理解が大きく進められると期待される。

我々は、粉体との類似性を示す可能性がある系として、高分子鎖が網目構造を形成している物理ゲルの性質に着目した。この物理ゲルを下から加熱することで徐々に高分子間の架橋が解けていくことから、これが粉体の落下挙動に類似しているのではないかと考えた。そこで、これまでに我々が提案した人為的攪乱をともしない流体力学的不安定性の実験手法⁶⁾を応用し、物理ゲルと粉体における重力不安定性の実験的研究を行い、共通性を明らかにし、そのダイナミクスを解明することを目的にした⁷⁾。

2. 実験方法

本研究に使用するサンプルセルは流れの解析や構造を正確に調べられる擬二次元 Hele-Shaw セルであり、寸法は (H, L, W) = (30 mm, 156 mm, 2.4 mm) である。まず、はじめに密度の大きい (高濃度) ゼラチンを高温で容器内に注入し、低温でゲル化させる。その後、密度の小さい低濃度ゼラチン (または水) を上部注ぎ、空気が入らないように上

をガラスで密封して反転させた。反転後は重力不安定状態になっているが、ゼラチンがゲル化しているため、静止した状態が実現される。サンプルセルを下面からガラスヒーターを用いて一様に加熱し、熱伝導によって、熱が上方に徐々に伝わる。二層の界面付近がゾル・ゲル転移点を越えることで重力不安定性が誘起される。下面の温度は使用するゲルのゾル・ゲル転移温度を基準に制御しており、今回はゾル・ゲル転移点近傍の 26°C、転移点より十分高温である 40°C に設定した。室温はエアークンディショナーによって 20°C に制御されており、これはゾル・ゲル温度以下である^{6,8)}。本実験では下層の厚みを 5 mm、上層の厚みを 25 mm として行った。

物理ゲルはゼラチン (3 wt%, 5 wt%, 6 wt%, 8 wt%, 10 wt%, 12 wt%, 14 wt%) を用いた。なお溶媒には蒸留水を用いる。流れの可視化および温度場の可視化のため、上層側 (高密度側) にトレーサー粒子を注入する。トレーサー粒子として、ポリスチレンラテックス (粒径 10.5 μm) を用いた⁸⁻⁹⁾。また粉体系における重力不安定化機構を調べるために、珪砂 (Kitanihon Sangyo Co., サイズ 0.425 ± 0.150 mm) を用いて実験を行った。実験容器の寸法は (H, L, W) = (150 mm, 75 mm, 1.2 mm) である。実験手法は Vinningland らの方法を参考に、はじめに重力下において砂を一定量堆積させ、瞬間的にセルを回転させることによって重力不安定状態を作り出し、砂と空気界面における不安定化パターンを高速カメラ (VW-600M, KEYENCE Co.) を用いて観察している。

3. 結果・考察

粉体-気体系および密度の異なる物理ゲル接合系における重力不安定現象の実験結果を紹介する。以後、粉体-気体系を粉体系、物理ゲルを使用した系をゲル系と表現することにする。Fig.1(a) は粉体系における重力不安定化現象を示している。実験は Vinningland ら⁵⁾ のように、密度安定状態からセルを瞬間的 (0.3 s) に回転させることによって不安定状態を実現した。ここで白色が粉体層、黒色が気体層である。不安定化初期 ($t = 0.06$ s) では界面近傍の粒子が均一に沈降している様子が観察できる。その後、次第に finger パターンが形成され始め ($t = 0.1$ および $t = 0.14$ s)、さらに粗大化しながら成長する ($t = 0.24$ s)。このような不安定化過程が観察でき、これは過去に報告されているものとも類似している⁵⁾。

次にゲル系における重力不安定化現象を Fig.1(b)に示す. ここでは上層を 6 wt%, 下層を 5 wt%とし, 底面をゾル・ゲル転移点近傍である 26°Cに設定した. なお流れを可視化するため, 上層側にラテックス粒子を注入している. 不安定化初期($t = 250$ s)では全体的に均一に沈降している様子が観察できる. その後, 次第に **finger** パターンが形成され始め($t = 350$ s および $t = 425$ s), 粗大化しながら成長する($t = 450$ s). 驚くべきことに, このゲル系における不安定化過程とパターンの成長過程が粉体系と非常に類似していることがわかる. そこで, 両者のダイナミクスがどのようなパラメータによって支配されているのかをあきらかにするため, 上層・下層の密度差や粘性差, 加熱温度など, 系統的に条件を変化させた際の, 各パラメータの変化について詳細に調べた. その結果, 不安定化ダイナミクスを支配するパラメータが上層の流動可能領域幅であることを突き止め, 物理ゲルの不安定性現象と粉体の重力不安定性現象に明確なリンクがあることを量的に見出した. この結果については, 当日の講演にて発表を予定している.

4. おわりに

粉体系と類似した系として, 加熱や冷却によって可逆的に固体-液体転移 (ゾル・ゲル転移) 可能な物理ゲルを用いて, 重力下において2層密度不安定状態で液体転移後に形成される重力不安定化現象パターンについて実験的研究を行った. 物理ゲルは下面からの熱伝導に伴って下面から順々に固体-液体転移が起こり, 液体転移箇所から不安定化が起こりパターンが形成された. ここで形成された **Fingering** パターンは粉体系の重力不安定現象で見られているものと非常に類似していた. 系統的实验より不安定化ダイナミクスを支配するパラメータが上層の流動可能領域幅であることを突き止め, 物理ゲル系の不安定性現象と粉体系の重力不安定現象との間に明確なリンクがあることを量的に見出すことに成功した⁷⁾.

5. 謝辞

本研究は JSPS 科研費 (16K13865, 17H02945, 19K23428) および JSPS 特別研究員奨励費(17J03066)の援助を受けたものである.

参考文献

- 1) J. Duran, *Powders and Grains: Introduction to the Physics of Granular Materials* (Springer-Verlag, New York, 1999).
- 2) B. Kou, et al., *Nature* **551** (2017).
- 3) J. R. Royer, et al., *Nature* **459** (2009).
- 4) C. Voltz, W. Pesch, and I. Rehberg, *Phys. Rev. E* **65**, 011404 (2001).
- 5) J. L. Vinningland, et al., *Phys. Rev. Lett.* **99**, 048001 (2007).
- 6) K. U. Kobayashi and R. Kurita, *Phys. Rev. Fluids* **4**, 013901 (2019).
- 7) K. U. Kobayashi and R. Kurita, submitted.
- 8) K. U. Kobayashi, Noriko Oikawa and R. Kurita, *Sci. Rep.* **5**, 18667 (2015).
- 9) K. U. Kobayashi and R. Kurita, *Sci. Rep.* **7**, 12983 (2017).

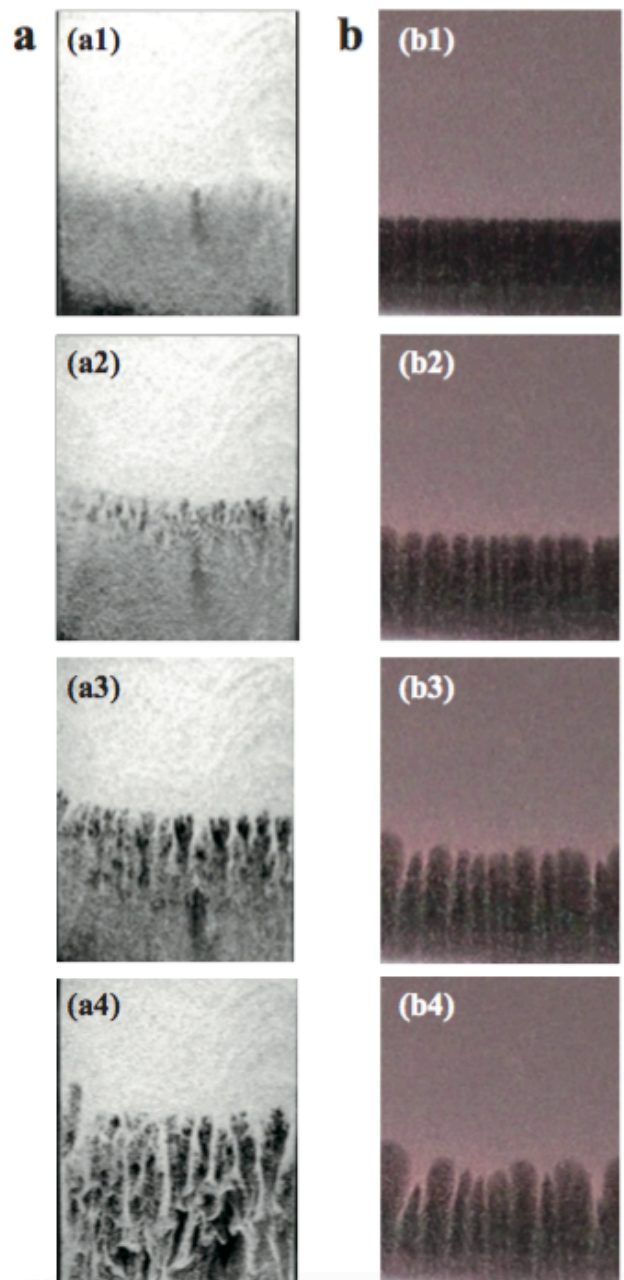


Fig 1 (a) Time evolution of the gravitational instability in the granular system. From top to bottom, $t = 0.06$ s, 0.1 s, 0.14 s, and 0.24 s. (b) Time evolution of the gravitational instability in a physical gel. From top to bottom, $t = 250$ s, 350 s, 425 s, and 450 s. The concentration of the gelatin solution is 6 wt% in the upper layer and 5 wt% for the bottom layer. The base temperature is set to 26°C. The fingering pattern and growth process in the granular system is qualitatively similar to that in the physical gel system.