

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：12605

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2021

課題番号：19K23428

研究課題名(和文) 粉体系・液体系の重力不安定化現象におけるパターン形成および輸送現象の普遍性探求

研究課題名(英文) Gravitational Instability in Liquid Systems and Granular Materials

研究代表者

小林 和也 (Kobayashi, Kazuya)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・特任助教

研究者番号：00849474

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：粉体系と類似した系として、加熱・冷却によって可逆的に固体-液体転移可能な物理ゲルに着目し、重力下において2層密度不安定状態下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パターンが形成された。ここで形成された指状パターンは粉体系の気体中における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性現象との間に明確なリンクを定量的に見出すことに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題ではこれまで個別に取り扱われることが多く、共通の性質は未解明のままであった粉体系の重力不安定性現象について、性質が類似している系として新たに物理ゲルに着目し、両者の類似性を系統的な実験を通して共通性を明らかにしている。今回明らかにした液体系および粉体系の重力不安定性現象の共通性は、製品の開発・製造等の工業プロセスにおける問題点の解決や粉体の制御技術など、物理学にとどまらない幅広い分野への応用が期待できると考えている。

研究成果の概要(英文)：Gravitational 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. 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.

研究分野：ソフトマター物理学

キーワード：粉体 レイリーテイラー不安定性 非平衡

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

粉体とは粒径が数マイクロ～数ミリ程度の大きさを持った粒子群を指し、化粧品や塗料、医薬品などの工業的製品に応用されているだけでなく、地震や液化化現象、粉塵爆発といった災害等にも関わる大変重要な系であり、これまでに様々な研究が行われている。近年、粉体系と液体系との類似性に関する研究結果が発表されており、粉体の動力学を理解するための糸口になるのではないかと期待されている。本研究では、粉体系の重力下における気体や液体への沈降挙動に着目して、液体系との類似性について検討する[1-2]。

重力下において軽い流体の上に重たい流体を重ね合わせることで密度逆転状態を実現すると、不安定状態を解消するために、次第に両者の界面が凹凸になり、上下方向に流れが生じる。このような現象はレイリーテラー不安定性(重力不安定性現象)と呼ばれる。近年、粉体を空気中で沈降させた際に形成される粉体-空気界面のパターン形成に関する研究がいくつか報告されており、特徴的な尖鋭指状構造など、液体系では見られない不安定化挙動も報告されている。一方で、液体系との不安定化機構の類似性を解明するまでには至っていない。例えば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切断によって固体層と流動層が共存する特性が流動現象に大きく関わることが知られている。このような特性は通常の液体系では観察することができない。一方で、粉体系と類似する可能性のある系を液体系において見つけることができれば、これまでの液体系における様々な理論を応用することによって、粉体系の理解を促進できる可能性がある。我々は粉体系との類似性を示す可能性がある物質として、物理ゲルに着目した。物理ゲルとは高分子鎖が3次元に架橋することによって網目構造を形成し、その内部に溶媒を内包して膨潤することができる機能性物質である。物理ゲルは固体状態(ゲル)と液体状態(ゾル)を加熱や冷却によって可逆的に転移(ゾル・ゲル転移)できる性質を持つ。物理ゲルを一方向から徐々に加熱すると、次第に高分子間の架橋が解けるゾル・ゲル転移が起こる。すなわち、液化した領域と固化した領域が共存するような流動特性が現れると考えられ、これが粉体系特有の流動特性と類似するのではないかと考えた。

2. 研究の目的

本研究では、このような粉体系の重力不安定性現象におけるダイナミクスを、液体系として物理ゲルを用いた実験結果と比較することによって、両者における共通性を議論することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 物理ゲルを用いた実験方法

物理ゲルを用いた実験では、我々が以前に開発した手法[3]を応用する。これは重ね合わせる溶液の一方(または両方)に物理ゲルを用いることによって密度逆転状態でも安定させることができるというものである。本実験の概要を図1(a)に示す。サンプルセルは擬二次元 Hele-Shaw セルであり、寸法(H, L, W) = (30 mm, 156 mm, 2.4 mm)を用いた。さらに、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することで、熱伝導により底面部から次第にゾル・ゲル転移点を越え、二層界面付近で重力不安定性現象が誘起される。本実験では下層の厚みを5 mm、上層の厚みを25 mmに統一して実験を行った。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。トレーサー粒子はポリスチレンラテックス(粒径 10.5 μm , 密度 1.05 g/cm³) 0.05 wt%を用いた。出現する指状パターンはデジタルカメラ(HC-V520M, Panasonic Co.)で撮影を行なった。

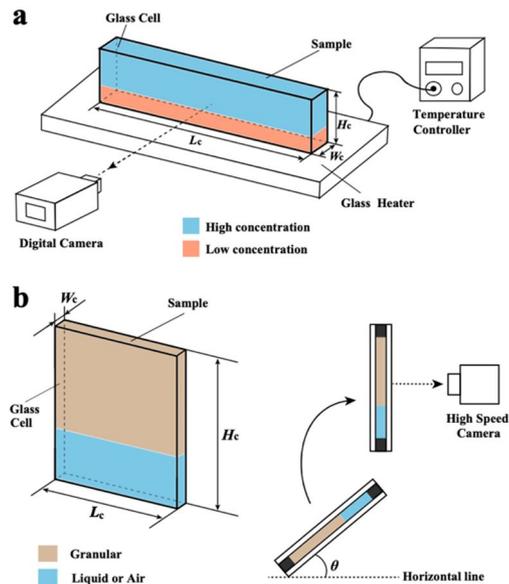


図1: 実験セットアップ[4-5]。(a)は物理ゲルを用いた場合の実験方法。(b)は粉体系における実験方法を示している。

(2) 粉体における実験方法

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 $0.425 \pm 0.150 \text{ mm}$)を用いて実験を行った。概略を図1(b)に示す。実験容器の寸法は(H, L, W) = (150 mm, 75 mm, 1.2 mm)である。実験では、気体中および液体中における粉体の沈降挙動を調べた。粉体・空気系では、容器内に砂を一定量堆積させ、粉体層の上に空気層を作り密閉する。その後、密度安定状態からセルを瞬間的(およそ0.3 s)に回転させることによって重力不安定状態(空気層の上に粉体層)を作り出し、砂と空気との界面における不安定化パターンを高速度カメラ(VW-600M, KEYENCE Co.)を用いて500 fpsで観察を行った。粉体・液体系では、容器に蒸留水を満

たし、そこに粉体を一定量堆積させることで、粉体層の上に液体層を作り密閉する。なお、粉体を液体中で堆積させる際、床面に対していくつかの角度において粉体を堆積させることで充填率を制御した。そして密度安定状態からセルを瞬間的に回転させることによって重力不安定状態を作り出し、ビデオカメラで観察を行った。

4. 研究成果

(1) 物理ゲルおよび粉体の不安定化パターン類似性

図 2(a)は粉体系における重力不安定化現象を示している。ここで白色が粉体層、黒色が気体層である。不安定化初期($t=0.06\text{ s}$)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、次第に指状パターンが形成され始め($t=0.1\text{ s}$)、さらに粗大化しながら成長する過程が観察された($t=0.14\text{ s}$)。ここで上層部の固化した領域は側壁との摩擦によって支えられている。次にゲル接合系における重力不安定化現象を図 2 (b)に示す。ここでは上層を 6 wt%、下層を 5 wt%とし、底面を $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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。加熱後、次第に熱伝導によってゾル・ゲル転移が起こり、不安定化初期($t=350\text{ s}$)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、次第に指状パターンが形成され始め($t=425\text{ s}$)、粗大化しながら成長する過程を観察することができた($t=450\text{ s}$)。このように、ゲル系および粉体系における不安定化現象のパターン形成および成長過程が非常に類似していることが明らかになった。

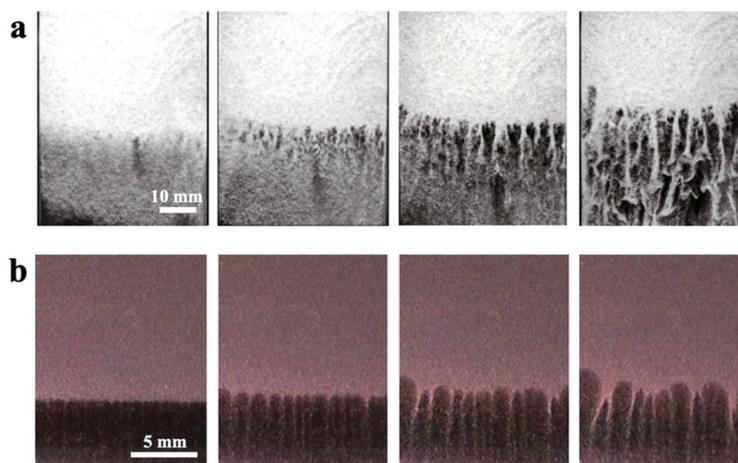


図 2 : (a)粉体系における重力不安定性の時間変化[4-5]。ここで左から $t = 0.06\text{ s}, 0.1\text{ s}, 0.14\text{ s}, 0.24\text{ s}$ である。(b)上層に 6wt%、下層に 5wt%を重ね合わせたゲル系における重力不安定性の時間変化。左から $t = 250\text{ s}, 350\text{ s}, 425\text{ s}, 450\text{ s}$ である。

(2) スケーリング

図 2 で明らかになった類似性を定量的に評価し、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明らかにするために、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、界面フロントの移動 δx や指状パターンの幅と、波長 λ 、 δx の直上に存在する流動可能な領域の幅 L それぞれの時間変化について詳細に調べた。パラメータの定義は図 3 に詳細を示す。図 4 は様々な条件(上層・下層の組み合わせ)において複数回実施した実験のうち、代表的な 1 つの実験について、各パラメータの時間変化を表している。ここで、縦軸は各実験における不安定化初期波長 λ_0 を用いてスケーリングを行い、横軸は成長率 σ を用いてスケーリングを行っている。なお、成長率 σ はフロントの初期成長が指数関数的であると、 $\delta x = \delta x_0 \exp(\sigma t)$ と近似することによって得た。

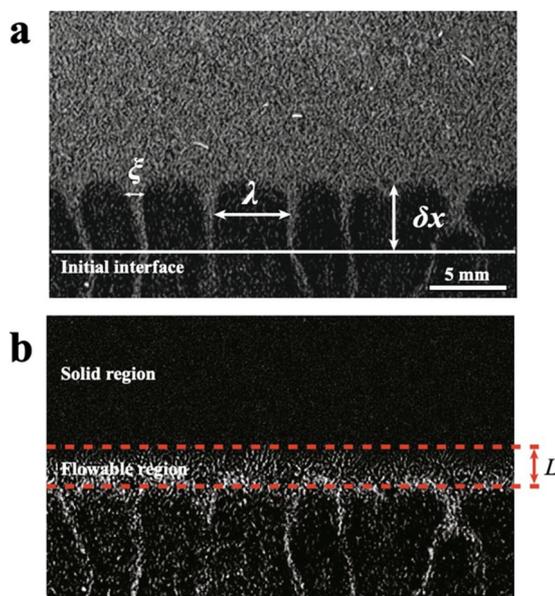


図 3 : 実験パラメータの定義[4-5]

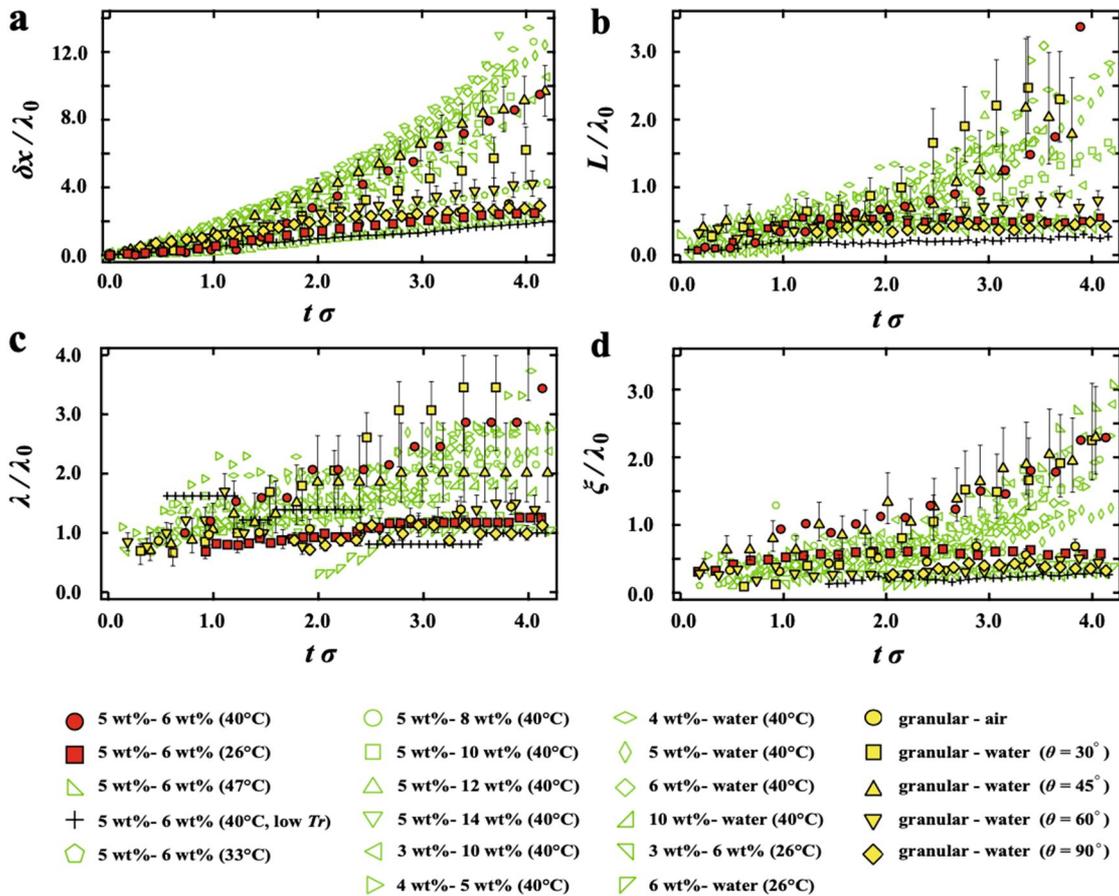


図4：各実験パラメータの時間変化[4-5]．(a)界面フロントの移動 δx ．(b) 上層の熱伝導に伴って形成される実効的に流動可能な領域幅 L ．(c) 不安定化波長 λ ．(d) 指状パターンの幅 ξ

図4(a)-(d)より、粉体系およびゲル系のダイナミクスの違いは、実験的にコントロール可能なパラメータである流動可能な領域幅 L によって支配されている可能性が示唆された。そこで次に、ゲル系および粉体系で得られた波長 λ について、コントロールパラメータである流動可能な領域幅 L でプロットすることを考える。図5は波長 λ と流動可能な領域幅 L の関係を示している。全ての実験データにおける λ が L に対して概ね一本の曲線上で一致していることがわかる。すなわち、 λ の変化は、コントロールパラメータである L と大きく関係し、 L が小さい場合には λ も小さくなり、 L が大きくなれば λ も大きくなる。ここで、波長や時間成長率などは一般に溶液の粘性や実験系の高さ、厚みにも依存することが知られている。今回の場合においても、各実験条件での波長等は大きさとして異なるが、規格化と流動可能な領域幅 L を考慮することによって図5のように一致することを付け加える。つまり、重力不安定化に伴う波長 λ やフロントの移動 δx 、指状パターン幅 ξ などの時間変化は、ゲル系または粉体系であったとしても、流動可能領域の幅 L の大きさによって決まっている可能性があることが明らかになった。

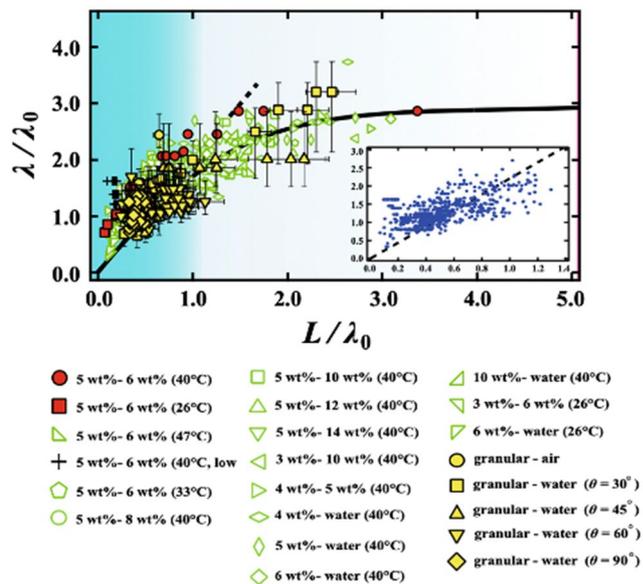


図5：波長 λ と流動可能な領域幅 L の関係[4-5]．ゲル系や粉体系に関わらず概ね一本の曲線上で一致している。

参考文献

[1] J. Duran, Sands, Powder sand Grains: Introduction to the Physics of Granular Materials (Springer,1999).

- [2] J. L. Vinningland, Ø. Johnsen, E. G. Flekkøy, R. Toussaint, and K. J. Måløy, Granular Rayleigh Taylor instability: Experiment and simulations. *Physical Review Letters* **99**, 048001 (2007). C. Völtz, W. Pesch, and I. Rehberg, Rayleigh-Taylor instability in a sedimenting suspension. *Physical Review E* **65**, 011404 (2001).
- [3] K. U. Kobayashi and R. Kurita, Unstable yet static initial state: A universal method for studying Rayleigh-Taylor instability and lock exchange, *Physical Review Fluids* **4**, 013901 (2019).
- [4] 小林和也, 栗田玲, 粉体系および液体系における重力不安定性現象の共通性, *Japanese J. Multiphase Flow* **35**, 1 (2021).
- [5] K. U. Kobayashi and R. Kurita, Key connection between gravitational instability in physical gels and granular media, *Scientific Reports* **12**, 6290 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kazuya U. Kobayashi and Rei Kurita	4. 巻 12
2. 論文標題 Key connection between gravitational instability in physical gels and granular media	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 6290
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-10045-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 小林和也, 栗田玲	4. 巻 35
2. 論文標題 粉体系および液体系における重力不安定性現象の共通性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 混相流	6. 最初と最後の頁 118-124
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3811/jjmf.2021.017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kazuya U Kobayashi, Ryoko Shinohara and Rei Kurita	4. 巻 33
2. 論文標題 Mechanism of transient stagnant formation in convection of binary mixtures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-648x/abf2fc	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Ryoko Shinohara, Kazuya U. Kobayashi, Marie Tani and Rei Kurita
2. 発表標題 Observation of inhomogeneous concentration field in a convection of a binary mixture
3. 学会等名 11th Liquid Matter Conference 2020/2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林和也, 栗田玲
2. 発表標題 粉体系・液体系の重力不安定性現象における共通の性質
3. 学会等名 第23回 応用力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林和也, 栗田玲
2. 発表標題 粉体系・液体系における重力不安定性現象
3. 学会等名 混相流シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林和也, 篠原良子, 栗田玲
2. 発表標題 コロイド分散系における異常対流
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林和也, 栗田玲
2. 発表標題 粉体系および液体系における重力不安定性現象の共通性
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林和也、栗田玲
2. 発表標題 大きな粘性差を伴った混和性2成分流体系の熱対流
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林和也、栗田玲
2. 発表標題 粉体系および液体系におけるレイリー・テイラー不安定性の共通性
3. 学会等名 第18回 関東ソフトマター 研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akemi Nagao, Kazuya U. Kobayashi, Yasufumi Sakamoto
2. 発表標題 Playground equipments for children to be familiar with the periodic table
3. 学会等名 8th International Conference Network for Inter-Asian Chemistry Educators (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------