

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：32407

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14379

研究課題名（和文）粉体系と液体系における重力不安定化現象の普遍性解明

研究課題名（英文）Common Properties of Gravitational Instability in Liquid Systems and Granular Systems

研究代表者

小林 和也（Kobayashi, Kazuya）

日本工業大学・基幹工学部・助教

研究者番号：00849474

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：粉体の重力不安定性現象に着目し、液体系のレイリー・テイラー不安定性との共通性解明を目指した。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調査した。ゲルは下面からの熱伝導に伴って順々に固体-液体転移が起こり、液体転移箇所から指状パターンが形成された。この指状パターンは粉体系のパターンと非常に類似していた。さらに、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、両者の重力不安定性現象に明確なリンクを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題によって、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、流体系と粉体系の重力不安定性現象との間に明確なリンクがあることを見出した。この共通性は、粉体のかかわる自然災害（例えば液状化現象や地震、粉塵爆発等）や、粉体を使用した製品の開発・製造等の工業プロセスにおける問題点の解決、さらに、粉体の流動制御技術など、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）：Focusing on the phenomenon of gravitational instability occurring when granular materials are dropped under gravity, research was conducted to elucidate the parallels between this phenomenon and the well-known Rayleigh-Taylor instability in liquid systems. The pattern of gravitational instability formed during the liquid transition was experimentally investigated using physical gels, which can undergo a reversible solid-liquid transition through heating or cooling, as a model similar to a granular system. The solid-liquid transition of the physical gel initiated sequentially from the lower surface due to heat conduction, leading to destabilization at the transition point and the formation of a fingering pattern. This pattern closely resembled that observed in gravitational instability phenomena in granular systems. Systematic experiments demonstrated that the dominant parameter for the destabilization dynamics is the width of the upper flowable region, revealing a quantitative link.

研究分野：ソフトマター物理学

キーワード：粉体流動 高分子ゲル Rayleigh-Taylor不安定性

1. 研究開始当初の背景

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、自然現象だけでなく工業分野等にも関わることから大変重要な系である。自然界においては、液状化現象や粉塵爆発といった粉体に関わる現象は数多く存在しており、関連した様々な研究が行われている。近年、粉体による他の流動現象との類似性に着目した研究が行われており、本研究課題で着目す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などが報告されている。ここで、重力不安定性現象(レイリー・テイラー不安定性)は、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つくり出した際に、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現象を指している。特に、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について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。しかしながら、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。そこで、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。物理ゲルを下から加熱すると、徐々に高分子間の架橋が解けてゾル-ゲル転移が起こる。これによって粉体系のような固体層と流動層が共存した流動特性が実現され、粉体の落下挙動に類似するのではないかと考えた。

2. 研究の目的

本研究ではこれまでに提案した人為的攪乱をとまなわない流体力学的不安定性の実験手法(Kobayashi and Kurita, *Phys. Rev. Fluids*, 2019)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、そのダイナミクスと共通性を解明することを目的にした。

3. 研究の方法

本研究に使用するサンプルセルは擬二次元 Hele-Shaw セルであり、寸法は(H, L, W) = (30 mm, 156 mm, 2.4 mm)である。実験では、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、ガラスで密封して反転させた。反転後は密度逆転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。最後に、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、熱伝導により熱が上方に徐々に伝達される。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、不安定化パターンが形成される。ここで、加熱すると温度は使用する物理ゲルのゾル・ゲル転移温度を基準に制御する。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。室温はエアーコ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ことを確認している。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。

物理ゲルにはゼラチン(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。さらに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。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、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度カメラ(VW-600M, KEYENCE Co.)を用いて観察する。なお、液体中で実験する場合には、同じ実験容器に純水を満たし、そこに上記と同様の珪砂を一定量堆積させて密閉する。これを上記と同様に回転させることで不安定化挙動を観察する。なお、粉体の充填率は、粉体を堆積させる際に容器をある角度で傾けることによって簡易的に制御した。

4. 研究成果

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。図 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ている。なお、白色が粉体層、黒色が気体層である。不安定化の初期段階($t = 0.06 \text{ s}$)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る($t = 0.1$ および $t = 0.14 \text{ s}$)。さらに粗大化しながら次第に成長する($t = 0.24 \text{ s}$)。このような不安定化過程が観察できるが、これは過去の研究にて報告されているものとも類似している。

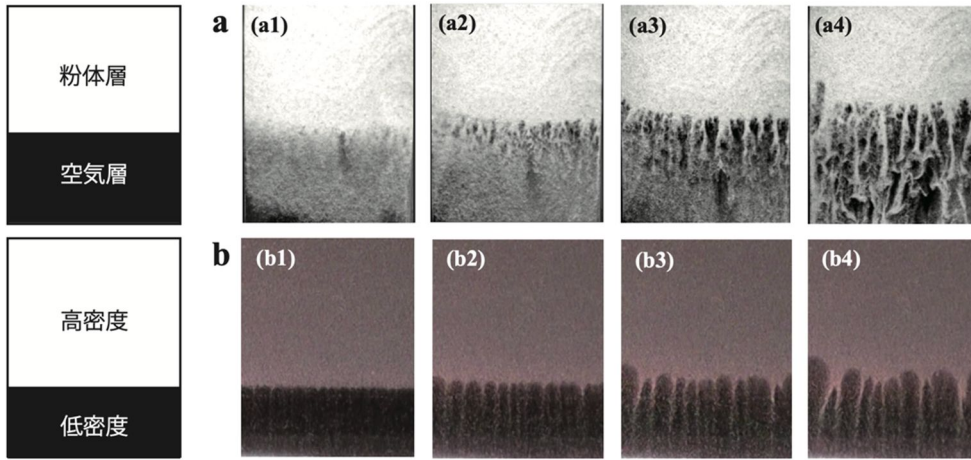


図 1 (a)粉体系における重力不安定性の時間変化 . (a1) $t = 0.06$ s, (a2) 0.1 s, (a3) 0.14 s, (a4) 0.24 s . (b)物理ゲルにおける重力不安定性の時間変化 . (b1) $t = 250$ s, (b2) 350 s, (b3) 425 s, (b4) 450 s . ゼラチン溶液の濃度は, 上層が 6 wt% , 下層が 5 wt% である . ヒーター温度は 26°C とした . 粉体系における指状パターンと成長過程は, 物理ゲル系と定性的に類似している .

次にゲル系における重力不安定化現象を図 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, 次第に指状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 .

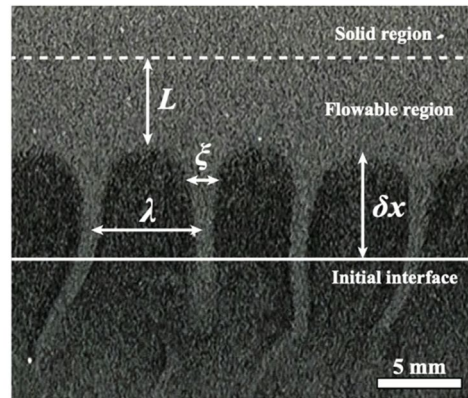


図 2 粉体系および液体系のパラメータ定義

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明らかにするため, 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界面フロントの移動 δx や指状パターンの幅 ξ , 波長 λ , δx の直上に存在する流動可能な領域の幅 L に着目して, それぞれの時間変化について調べた . これらのパラメータの定義は図 2 に示す通りである .

図 3 は上層・下層さまざまな組み合わせにおいて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示したものである . なお, 縦軸は各実験における不安定化初期の波長 λ_0 を用いてスケールリングを行い, 横軸は成長率 σ を用いてスケールリングする . 成長率 σ はフロントの初期成長 δx が指数関数的であるとし, $\delta x = \delta x_0 \exp(\sigma t)$ より得た .

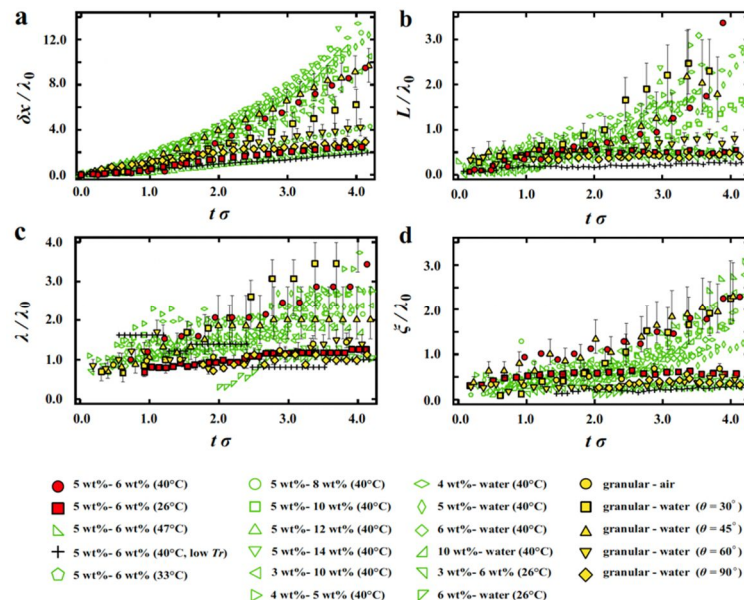


図 3 (a)界面フロントの移動 δx , (b)流動可能な領域幅 L , (c)不安定化波長 λ , (d) 指状パターンの幅 ξ のスケールリング結果

図 3(a)は界面フロントの移動 δx , (b)は実効的に流動可能な領域幅 L , (c)は不安定化波長 λ , (d) は指状パターンの幅 ξ の時間変化を表し

ている．なお，黄色シンボルが粉体系，それ以外はゲル系を示している．ここから，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 の変化によって決まっている可能性が示唆された．

そこで次に，不安定化波長とフロントの移動速度 V_f について，流動可能領域幅 L でプロットしたものを図 4(a)(b) に示す．このように，不安定化波長や移動速度 V_f が粉体系やゲル系に関わらず，概ね一致していることがわかる．特にゲル系では下面温度に関わらず L でスケールリングできる．このことから，重力不安定化に伴う不安定化波長 λ などの時間変化は，ゲル系または粉体系よらず，流動可能領域の幅 L というパラメータの大きさによって決まっている可能性を明らかにした．

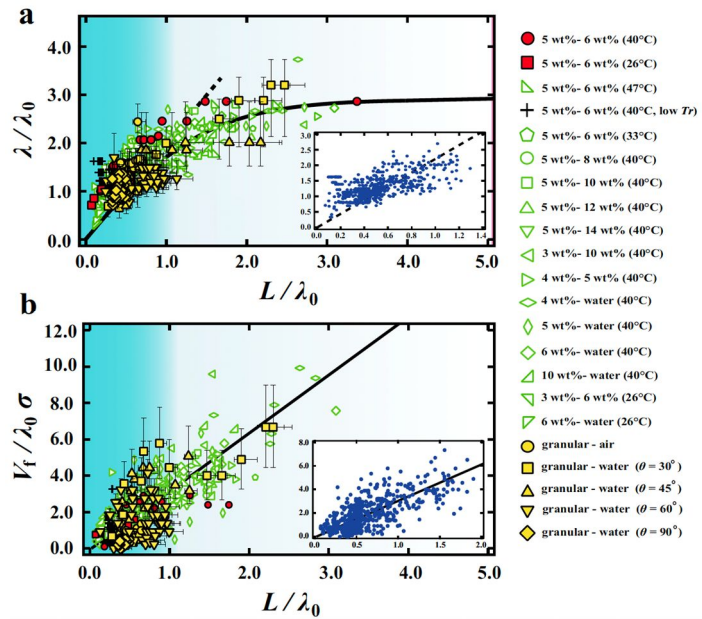


図 4 粉体系および液体系における(a)不安定化波長 λ ，(b)フロントの移動速度 V_f と流動可能領域幅 L の関係

このように，不安定化波長や移動速度 V_f が粉体系やゲル系に関わらず，概ね一致していることがわかる．特にゲル系では下面温度に関わらず L でスケールリングできる．このことから，重力不安定化に伴う不安定化波長 λ などの時間変化は，ゲル系または粉体系よらず，流動可能領域の幅 L というパラメータの大きさによって決まっている可能性を明らかにした．

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 1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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	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15件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Kazuya U. Kobayashi, Yuzuki Sato, and Yoshiyuki Tagawa
2. 発表標題 The generation and dynamics of a granular jet induced by a sudden acceleration
3. 学会等名 The 9th International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小林 和也, 田川 義之
2. 発表標題 撃力により駆動する粉体ジェットの生成と挙動解析
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小林 和也, 佐藤 悠月, 田川 義之
2. 発表標題 撃力による粉体ジェットの生成と挙動解析
3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Asuka Hosokawa, Hiroya Watanabe, Kyota Kamamoto, Hiroaki Kusuno, Kazuya U. Kobayashi, and Yoshiyuki Tagawa
2. 発表標題 Phase diagram of bungee-type behavior of impulsively-induced viscoelastic liquid jets
3. 学会等名 The 11th International Conference on Multiphase Flow (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shoto Sekigushi, Kazuya U. Kobayashi, Kei Morikawa, and Yoshiyuki Tagawa
2. 発表標題 Visualization of stress field in channel wall using unsteady photoelastic method
3. 学会等名 International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡部 裕也, 釜本 恭多, Jingzu Yee, 小林 和也, 田川 義之
2. 発表標題 高粘度液体吐出装置における吐出安定性の向上
3. 学会等名 日本機械学会 第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 細川 明日架, 渡部 裕也, 釜本 恭多, 楠野 宏明, 小林 和也, 田川 義之
2. 発表標題 撃力により生成する粘弾性液体ジェットの挙動解析
3. 学会等名 日本機械学会 第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関口 翔斗, 小林 和也, 田川 義之
2. 発表標題 レーザー誘起マイクロジェット生成に伴うガラス細管の破壊メカニズム解明および破壊抑制機構の開発
3. 学会等名 日本機械学会 第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林 和也, 中峰 健登, Worby William, 武藤 真和, 田川 義之
2. 発表標題 血液と血管の応力相互作用解明に向けた高速度光弾性法の開発
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 武藤 真和, 中峰 健登, Worby William, 小林 和也, 田川 義之
2. 発表標題 血液-血管応力相互作用の理解に向けた液体高分子と高分子ゲルの高速度光弾性法の開発
3. 学会等名 日本実験力学会 2022年度年次講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroya Watanabe, Kyota Kamamoto, Jingzu Yee, Kazuya U. Kobayashi, and Yoshiyuki Tagawa
2. 発表標題 Reproducible ejection of highly-viscos liquid jets
3. 学会等名 75th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>砂はどのように落下しているのか？を解明！粉体の流体近似とその応用に期待 https://esse-sense.com/news/33 What do jelly and sand have in common? https://www.eurekalert.org/news-releases/950949 砂はどのように落下しているのか？を解明！粉体の流体近似とその応用に期待 https://www.tuat.ac.jp/outline/disclosure/pressrelease/2022/20220419_01.html 砂はどのように落下しているのか？を解明！粉体の流体近似とその応用に期待 https://www.tmu.ac.jp/news/topics/31737.html</p>
--

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
---------	---------