

令和 3 年 4 月 14 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13686

研究課題名(和文)分散体群が自己集団流動化する転移機構の解明

研究課題名(英文) phase transition mechanism on self-induced collective motion in swarm of dispersed bodies

研究代表者

渡村 友昭 (Watamura, Tomoaki)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：40777736

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：流体中に分散した無数の粒子や気泡など密度差をもつ物体が重力に従って運動する際に生じる粗密分布構造の形成を対象に研究を実施した。レーザ誘起蛍光法と画像速度計測ならびに分子タグ速度計測法を用い、高濃度粒子流の液相速度分布を取得した。時空間速度分布から速度変動強度と分散体相対速度を求めた。その結果、懸濁液の自己集団化流動は、慣性重力不安定性による転波の出現、ならびに濃度界面の解像度が示す清澄分離の鋭敏さにより決まることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分散体と連続相との間に生じる密度差に起因する密度対流すなわち集団運動の発現や非正常流動が生じる力学を実験的に明らかにした。得られた成果は英国Nature誌の姉妹雑誌であるScientific Reportsに掲載され、2019年Most Downloaded 50を記録した。本研究で議論した現象の物理的な解釈と無次元数による整理は、分散体の集団的な挙動の予測や制御する上で重要な知見と言え、タンパク質や金属結晶の成長や細胞の培養に役立つと期待できる。

研究成果の概要(英文)：We studied the formation of number density distribution in particle/bubble suspension, in which the dispersed bodies rise/sink because of the density difference. We measured the liquid phase velocity of dense particle suspension via particle image velocimetry applying laser induced fluorescence and photobleaching molecular tagging velocimetry. The intensity of velocity fluctuation of the liquid phase and the particle velocity relative to the liquid phase were measured. We found the collective motion of dispersed bodies are related to the gravity current instability, i.e. roll wave, and border resolution of concentration interface, i.e. sharpness of density clarification.

研究分野：流体力学

キーワード：混相流 蛍光計測 不安定

1. 研究開始当初の背景

創薬や新材料を開発する際に、微小な分散体の取り扱いが急増し、これらを効率的かつ正確に分離や混合することが課題となっている[1-3]。流体中に分散した無数の粒子や気泡など密度差をもつ物体が重力に従って運動するとき、分散体が自己選択的に粗密分布構造を形成し、集団的な運動をすることにより大規模対流が形成される。体積率が1%程度と小さく、粒子レイノルズ数も小さいため、粒子間の衝突が生じない系であるにも関わらず、分散体の粗密分布構造が出現する。さらに、流動場中出现した粗密分布構造は集団として密度流を誘起し、粗密分布を均一化する混合作用として働くが、粗密分布の時空間増は長時間に渡り観察される。この密度差対流を原因とした周囲流体の駆動や攪拌により結晶や細胞の成長が阻害されることが、種々の研究や開発の妨げとなっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、分散体の集団的運動に誘起される非定常流動や三次元流動の遷移と発達を解明することである。単一の分散体が無限流体中に存在する場合、十分に理解された運動方程式によりその運動を記述できる。しかし無数の分散体が存在する場合、分散体同士は周囲流体を介して相互作用力が作用し、集団的な運動を行う。研究対象とする系は、一般的に透明でありながら分散体が高い濃度で分散しており、液体の運動や分散体個別の運動を観察すること自体が困難である。そこで本研究は周囲流体の速度と分散体の速度を個別かつ精緻に計測可能な計測系を構築する必要がある。個々の分散体同士の位置関係、粗密分布構造中に現れる(分散体よりも)大きな流動現象を理解し、流体力学的に規則や法則を整理することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究が対象とする粒子懸濁液は、直径約100マイクロメートル、比重約0.1の軽量粒子を用いる。直径小さく、分散体体積率が小さいため、清澄分離に伴う密度流は最大でも速度は50mm/s、清澄層厚さは1mm程度である。流れの長さスケールと速度スケールが共に小さいことから、接触計測は適切でない。そのため、本研究では非接触光学計測であるフォトブリーチング分子タグ法(PB-MTV)[4]とレーザ蛍光誘起法(LIF)と画像速度計測法(PIV)を組み合わせたPIV-LIF[5]を用いる。図1(a)はPB-MTVの概略を表し、撮影とレーザ照射のタイミングを図1(b)に示す。高速度ビデオカメラとレーザの動作はパルスジェネレータで同期されている。また、図1(c)はPIV-LIFの概略を表す。両計測系は共にレーザを用いた蛍光計測であり、高速度ビデオカメラには照射波長を遮断し誘起波長のみを透過する光学フィルタを取り付けてある。

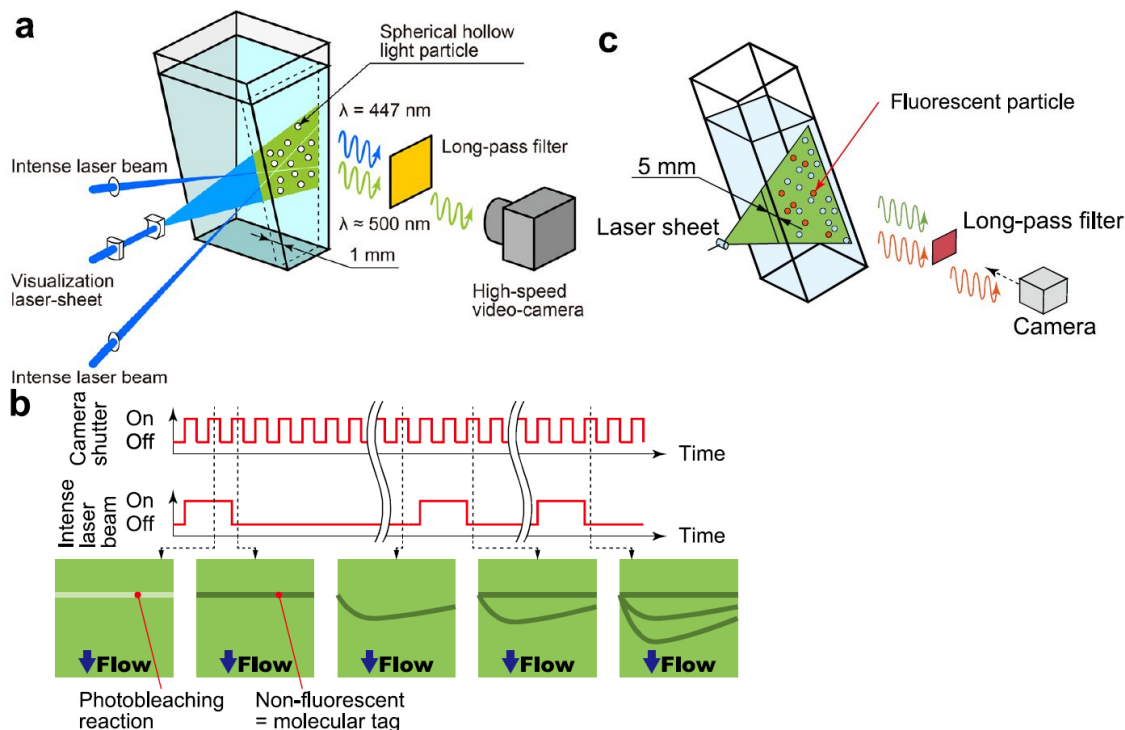


図1 (a)フォトブリーチング分子タグ法を用いた実験系と(b)計測機器のタイミングチャート。(c)レーザ誘起蛍光法と画像速度計測法を用いた実験系。

4. 研究成果

A. 粗密分布発現の力学

清澄分離に伴う密度流の不安定流動を解明するため、粒子空間分の可視化に取り組んだ。傾斜壁面を有する台形容器に粒子懸濁液を入れ、粒子の空間敵的な粗密分布が生じる様子を観察した。その結果、粒子体積率の増加に従い、粗密分布の空間的スケールが小さくなること(図2)、ならびに、ある一定の傾斜角度以上で粗密分布が出現しなくなることを示した。分散体の粗密分布構造は清澄部の厚みと関係することから、清澄層の速度分布の計測を PIV-LIF により行った。図3(b上)は液相速度の時間平均値、図3(b下)は液相速度の変動強度を表す。平均速度は容器壁面の傾斜角度の増加と共に増加し、ある角度から最大速度は一定の速度となる。一方で速度変動強度は傾斜角度が小さい場合に大きく、傾斜角度が大きいと極めて小さな値となる。これらの結果は図2で示した可視化結果と良好に一致し、模様と速度の関連性を表している。図3は速度変動強度をレイノルズ数とフルード数で整理した結果を表す。円形管内の内部流など一般的なせん断流はレイノルズ数の増加に伴い、層流から乱流へと遷移し、乱れなしの層流状態から乱れありの乱流状態になる。その遷移は管直径と管断面平均流速により定義されるレイノルズ数が2000程度で生じる。本研究の結果から、レイノルズ数の増加に伴い乱れ強度が減少する様子、ならびにレイノルズ数が100以下であることが分かる。つまり、粗密分布の発現はせん断誘起不安定であることを否定している。一方で乱れ強度はあるフルード数約1を境界として、大きな値を示すことが分かる。この値は傾斜壁面を流下する液膜の慣性重力不安定である転波の臨界フルード数2と概ね一致する。これらの結果から、分散体が自己誘起する密度差対流に生じる分散体の粗密分布、すなわち、分散体の集団的な不安定流動は転波により生じると結論付けた。

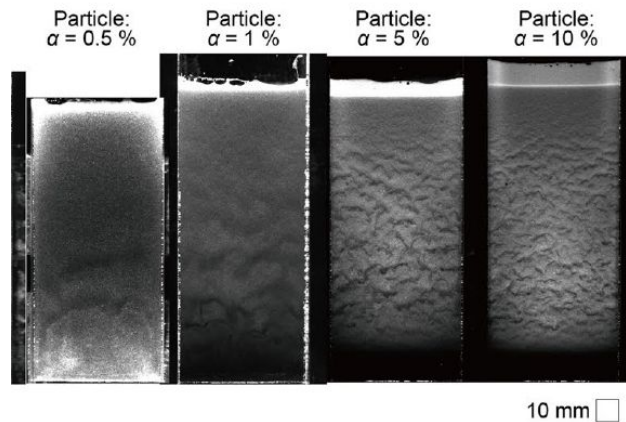


図2 傾斜壁面近傍に生じる分散体空間分布の濃度依存性。(Watamura et al., Sci. Rep., 2019)

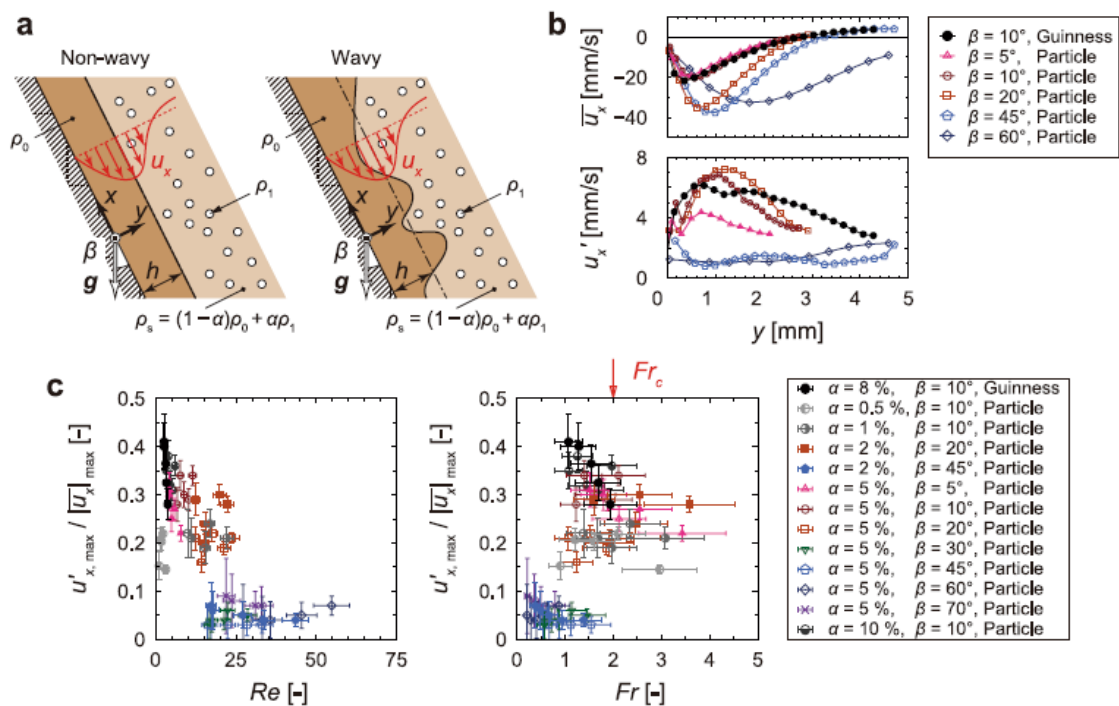


図3 流動不安定の液膜モデル。(a) 懸濁部(密度, ρ_0)と清澄部(密度, $\rho_s = (1-\alpha)\rho_0 + \alpha\rho_1$)の概略。不安定が生じると懸濁部と清澄部を隔てる濃度界面に揺らぎが生じる。(b) 速度(上)と速度変動強度(RMS値)(下)。(c) 規格化された速度変動強度のレイノルズ数依存性(左)とフルード数依存性(右)。(Watamura et al., Sci. Rep., 2019)

B. 集団性発現の力学

上述した分散体の集団運動において、離散的な分散体分布と清澄分離を厳密に区別することは不可能であり、両者の区別には便宜上の空間スケールを定義する必要がある。本研究では、代表長さを決めて空間的な平滑化や粗視化する指標を検討した。ここでは液体の速度分布と、分散体の分布と速度を同時に解像する PB-MTV の手法を開発し、得られた実験結果に基づき、代表長さスケールを提案した。二本の退光用レーザを可視化平面上で交差させ、移流によるタグの移動から、交点が再生成される。タグの位置を画像相関法により求め、その時間変化から液相の速度を取得した(図4)。時系列の液相速度と分散体の速度より、液相の乱れ強度および分散体と連続相との平均相対速度を得ることが可能となった。また、ここで平均粒子間距離と清澄層厚さの比である濃度界面の解像度と定義する[6]。液相の乱れ強度ならびに分散体と連続相の平均速度差を濃度界面の解像度で整理すると、濃度界面の解像度が0.5付近で、前者は減少し、後者は増加することを明らかにした(図5)。このことは、粒子間平均距離が清澄層厚さよりも十分に小さい時、分散体は集団的に振る舞い、一方で粒子間平均距離が清澄層厚さよりも十分に大きい時には、分散体は個別の振る舞いをすることを意味する。つまり、分散群が誘起する流れの非定常性は、分散体の集団性が必要であり、さらに密度流の不安定が生じた場合のみ発現すると結論付けられる。

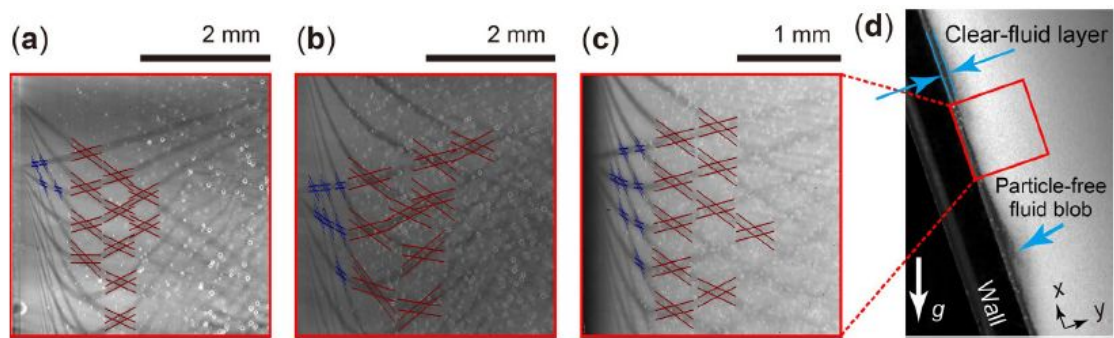


図4 分子タグの検出結果,(a) 平均粒子直径 $100\mu\text{m}$,(b) 平均粒子直径 $45\mu\text{m}$,(c) 平均粒子直径 $20\mu\text{m}$, 粒子体積率は全て 1.0% .(d) 清澄層厚さの可視化結果 .(Koyama et al., Exp. Fluids, 2019)

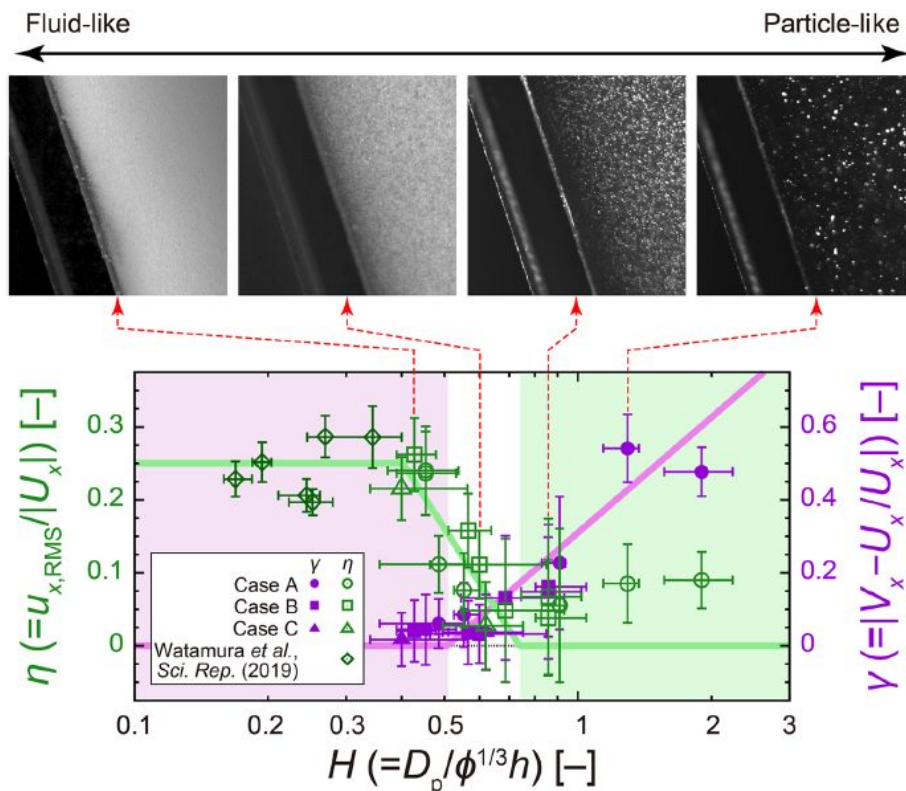


図4 規格化した速度変動強度 η ならびに規格化した分散体速度と周囲流体速度 γ の濃度界面解像度 H 依存性 .(Koyama et al., Exp. Fluids, 2019)

参考文献

1. http://iss.jaxa.jp/utiliz/field/utiliz_mg.html (2021年04月14日閲覧)
2. http://www.jaxa.jp/article/special/experiment/ishikawa01_j.html (2021年04月14日閲覧)
3. https://humans-in-space.jaxa.jp/protein/public/about/structural_analysis.html (2021年04月14日閲覧)
4. Koochesfahani MM, Nocera DG, “Molecular tagging velocimetry”, in: Foss J, Tropea C, Yarin A (eds) Handbook of experimental fluid dynamics, Chapter 5.4. Springer, Berlin.
5. Lindken, R. & Merzkirch, W. A novel PIV technique for measurement in multiphase flows and its application to two-phase bubbly flow. Exp. Fluids 33(6), 514–825 (2002).
6. Harada S., Mitsui T. and Sato K., “Particle-like and Fluid-like Settling of a Stratified Suspension,” Eur. Phys. J. E., Vol. 35, pp. 1-6, 2012.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Motoki Koyama, Tomoaki Watamura, Kazuyasu Sugiyama	4. 巻 60
2. 論文標題 Simultaneous photobleaching molecular tagging velocimetry for density-stratified flows of suspensions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00348-019-2794-2	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 Watamura Tomoaki, Kitagawa Atsuhide, Murai Yuichi	4. 巻 208
2. 論文標題 Cloud structuring of microbubbles ascending along a vertical wall	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Science	6. 最初と最後の頁 115132 ~ 115132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ces.2019.07.050	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 YOSHIOKA Ryo, WATAMURA Tomoaki, SUGIYAMA Kazuyasu	4. 巻 34
2. 論文標題 Numerical Investigation of Roll Wave in Guinness Beer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JAPANESE JOURNAL OF MULTIPHASE FLOW	6. 最初と最後の頁 205 ~ 212
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3811/jjmf.2020.021	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 Watamura Tomoaki, Iwatsubo Fumiya, Sugiyama Kazuyasu, Yamamoto Kenichiro, Yotsumoto Yuko, Shiono Takashi	4. 巻 9
2. 論文標題 Bubble cascade in Guinness beer is caused by gravity current instability	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-42094-0	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 TOMOAKI WATAMURA, KAZUYASU SUGIYAMA, FUMIYA IWATSUBO, Osaka University, KENICHIROYAMAMOTO, YUKO YOTSUMOTO, TAKASHI SHIONO
2. 発表標題 Roll wave instability in Guinness beer
3. 学会等名 72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoaki Watamura, Kazuyasu Sugiyama
2. 発表標題 BUBBLE TEXTURE IN A GLASS OF GUINNESS BEER
3. 学会等名 10th International Conference on Multiphase Flow (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡村友昭, 杉山和靖
2. 発表標題 ギネスビールの泡が作る非定常流動の数値計算
3. 学会等名 混相流シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡村友昭, 杉山和靖
2. 発表標題 傾斜壁面近傍に生じる分散体濃度界面と重力波について
3. 学会等名 流体力学学会年会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomoaki Watanura, Kazuyasu Sugiyama, Kenichiro Yamamoto, Yuko Yotsumoto, Takashi Shiono
2. 発表標題 Gravity wave in a glass of Guinness beer
3. 学会等名 The 71st Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018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
---------	---------