

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13891

研究課題名（和文）多体ソフト粒子流の時空間構造と流動特性

研究課題名（英文）Spatiotemporal structure and rheological property of many body soft particle flow

研究代表者

伊藤 弘明 (Ito, Hiroaki)

千葉大学・大学院理学研究院・助教

研究者番号：10783186

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、やわらかな粒子懸濁液系の流動性を制御するための指針となる基礎的な流動原理の解明を目指し、マイクロ流体実験と解析を行った。具体的には、平面方向の長さに比べ厚み方向の長さが十分に短い擬2次元マイクロ流路を用いて粒径の揃った油中水滴集団系の流動を種々の密度で調べた。その結果として、低密度から高密度にわたって現れる変形の空間構造および、その物理学的なメカニズムである相互作用描像を明らかにした。低密度の流れでは液滴が周囲に生み出す流れ場を介した流体相互作用の寄与が支配的であったが、高密度の流れでは多数の液滴との流体相互作用や直接接触による相互作用の寄与が特徴的に現れていた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

やわらかな粒子懸濁液系の流動特性を制御するための基礎的な流動原理を解明することで、様々な工学的応用や産業プロセスにおける流動制御の基礎的理解を深めたと言える。特に、低密度から高密度における液滴間の相互作用のメカニズムを明らかにしたことで、複雑流体系における物理現象の理解が進化した。また、マイクロ流路を用いた精密な実験を通じて、ミクロスケールでの流動特性を詳細に解析する技術の発展にも寄与しており、マイクロ流体技術の応用範囲を広げるための重要なステップである。これらの研究成果や技術発展は、化粧品、食品、医薬品などの分野で利用される懸濁液製造プロセスにおいて、品質向上や効率化にも資する可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we performed microfluidic experiments to elucidate the fundamental flow principles that guide the controllability of fluidity in soft particle suspension systems. Specifically, we investigated the flow of monodisperse water droplets in a continuous oil phase at various droplet densities using a quasi-two-dimensional microchannel with a thickness much shorter than its planar dimensions. As a result, we identified the spatial structure of deformation and the underlying mechanisms of droplet interactions in low and high density conditions. In low-density flows, hydrodynamic interactions, which are mediated by the flow field generated around each droplet, were dominant, whereas in high-density flows, contributions from hydrodynamic interactions and contact interactions with multiple droplets became dominant.

研究分野：ソフトマター物理学

キーワード：懸濁液 エマルジョン マイクロ流路 レオロジー 流体相互作用

1. 研究開始当初の背景

多数の微粒子が流体に懸濁した系は、自然界、産業界に普遍的に存在する。特に長距離の相互作用が働く多体粒子系は、ダストプラズマ[1]や外場駆動されるコロイド集団[2]、流動するマイクロ液滴集団[3]、血管を流れる血球細胞集団[4]などの例が挙げられる。その中でも、液滴や細胞などの例はそれぞれの粒子が変形能をもつため、粒子がどのように相互作用しながら集団的に流れ、変形するのは未解明であり、流動と変形がカップルした系の振る舞いを理解することは懸濁液系にまつわる重要な課題となっている。これまでに、このような非平衡多体現象を捉える系の一つとして、擬2次元空間で流動する油中液滴 (water-in-oil droplet) 系の実験研究が進み、流体力学的な長距離相互作用に由来する衝撃波伝搬[5]、異方的な速度場ゆらぎ[6]、hyperuniformity[7]などの特徴的な時空間構造を示すことが明らかにされてきた。一方で、前述のような多くの現実の系では粒子がやわらかく変形するために、粒子の配置や運動だけではなく変形応答を考慮してこれらの現象を理解する必要があった。

2. 研究の目的

本研究では、これら粒子懸濁液系の流動性を制御するための指針となる基礎的な流動原理の解明を目指し、マイクロ流体実験と解析を行った。特に、1で記した背景を踏まえ、粒子の形状変形を伴う擬2次元多体流動系を実験的に構築し、その流動と変形を実験的に観察し、その流動と変形の振る舞いの解析から物理的なメカニズムを検証することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、均質な擬2次元マイクロ液滴を形成するマイクロ流体デバイスを用いた実験と解析を行った。マイクロ流体デバイスは、まずCADで設計した鋳型をSU-8フォトリソグラーフによるフォトリソグラフィーで作製し、その鋳型からソフトリソグラフィーによりpolydimethylsiloxane (PDMS) 樹脂を用いて作製した。作製したマイクロ流路内では、flow-focusingの機構により連続相である油相中に分散相として粒径単分散な水滴が形成される。形成されたマイクロメートルスケールの単分散液滴の集団を、厚みに対して十分に広い流路に流すことで、流れ場や衝突を介して液滴同士が相互作用する擬2次元系を構築することができる。この系は低レイノルズ数の擬2次元ストークス流れで特徴付けられ、個々のマイクロ液滴は近似的に他の液滴がつくる双極子型流れ場の重ね合わせの下で移動と変形を示す。さらに、本研究では液滴密度の濃縮を流路内で行う機構を採用し、種々の密度条件に対する実験データを網羅的に取得した。この系を用いて、相互作用しながら時間発展する多体粒子系の時空間構造の解明を行なった。

4. 研究成果

本研究の実験で得られる典型的な液滴多体系の擬2次元流動の模式図とスナップショットを図1に示す。半径40 μm 程度の単分散な液滴集団が、画像の左から右に向かう流れに押し流され流動している。図1(b)のスナップショット中に示した緑色線と白色マーカーは、それぞれ液滴の変形を楕円近似した際の楕円長軸方向および、液滴の重心位置を示している。液滴を擬2次元空間に拘束したことで、撮影画面内を運動する全ての液滴の位置と近似的な楕円形状の時間発展が取得できる。得られた配置と変形のデータから、2次元テンソル配向秩序パラメータを用いて液滴周りで実現している他の液滴の平均変形場を解析した。

図2に、面積分率 $\phi = 0.18$ の低密度条件の実験から得られた2次元テンソル配向秩序パラメータ Q の xx 成分 Q_{xx} を示す。ここでは、液滴周りの角度方向について3回回転対称の変形場が得られた。これまでに速度場ゆらぎとして報告されていた液滴速度の空間相関[6]は4回回転対称の空間構造を持つことを鑑みると、変形に関する空間構造に速度(運動)に関する空間構造とは異なる対称性が現れていることは興味深い結果である。我々は、ストークス方程式とダルシー近似に基づいた流れ場の理論的な検討を行い、理論的なテンソル配向秩序を得た。その各成分からは、図3の xx 成分の例に示すように、実験で見られた3回回転対称性をもつ変形場を再現した。

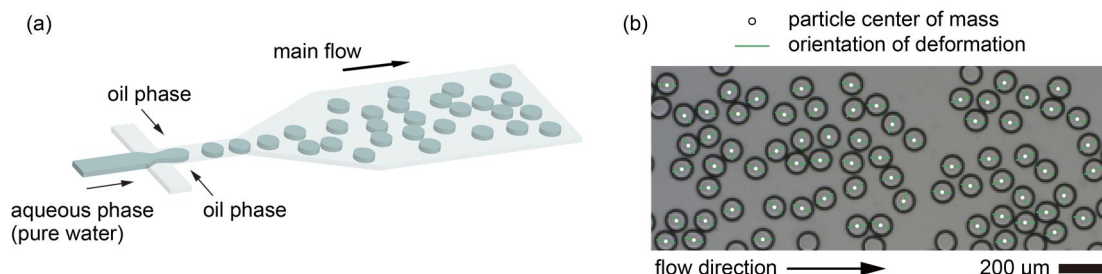


図1: (a) マイクロ液滴集団の擬2次元流れの模式図。(b) 典型的なスナップショット。

また、この変形場が動径方向には距離の -3 乗に比例する大きさの分布となることも、実験結果と理論で一致した。

さらに、高密度条件の実験結果についても同様の解析を行なった。高密度条件においては、変形場が空間的に動径方向に振動し、同じ角度方向でも正負両方の値を周期的に取るのが発見された。この結果は当初の研究計画時には予想できなかった非自明なものであるが、高密度の変形粒子の多体流れを明確に特徴づけるものであり、高密度の変形粒子の相互作用描像について重要な情報が現れているものと期待できる。我々は、この変形場を解析することで、注目している液滴の周りに分布する液滴間の相互作用について、変形方向を決定する支配的な相互作用が注目している液滴からの動径距離に応じて細かく切り替わっていることを明らかにした。特に、高密度条件では同型分布関数が振動的に振る舞い、液滴配置が層状の周期的な空間構造をとるが、注目している液滴から動径方向に見て二層目にあたる近傍の範囲内において、(i) 中心の液滴との排除体積相互作用、(ii) 中心の液滴との流体相互作用(中心の粒子が周囲につくる流れ場を介した相互作用)、(iii) 1層目の粒子との排除体積相互作用、(iv) 1層目の粒子や2層目の粒子との流体相互作用、(v) 2層目の粒子との排除体積相互作用、と目まぐるしく切り替わっていることがわかった。これは、液滴の変形配向という観察可能な情報からこれまでアクセスできなかった物理的な相互作用描像を紐解くことができたという意味で、意義深い結果であると考えている。上記の種々の相互作用のうちいくつかは注目粒子との相互作用のみではなく多体の液滴間の相互作用の結果である。我々はさらに、多体の液滴の相関を取り入れた流体相互作用を考えることで、長距離で働く流体相互作用の理論解析を多体系に拡張した。この解析によって高密度条件の実験から得られた振動的な変形場に対する流体相互作用の寄与を説明することにも成功した。

以上の結果により、低密度条件から高密度条件にまでわたる擬2次元流れについて、実験的および理論的に多体の変形・流動現象の新たな知見が得られたと言える。今後は、これらの結果を論文にまとめ出版を目指す。

<引用文献>

- [1] G. E. Morfill and A. V. Ivlev, Rev. Mod. Phys. 81, 1353 (2009).
- [2] S.-R. Yeh, M. Seul, and B. I. Shraiman, Nature 386, 57 (1997).
- [3] T. Beatus, I. Shani, R. H. Bar-Ziv, and T. Tlusty, Chem. Soc. Rev. 46, 5620 (2017).
- [4] T. W. Secomb, Annu. Rev. Fluid Mech. 49, 443 (2017).
- [5] T. Beatus, T. Tlusty, and R. Bar-Ziv, Phys. Rev. Lett. 103, 114502 (2009).
- [6] I. Shani, T. Beatus, R. H. Bar-Ziv, and T. Tlusty, Nat. Phys. 10, 140 (2014).
- [7] J. H. Weijs, R. Jeanneret, R. Dreyfus, and D. Bartoro, Phys. Rev. Lett. 115, 108301 (2015).

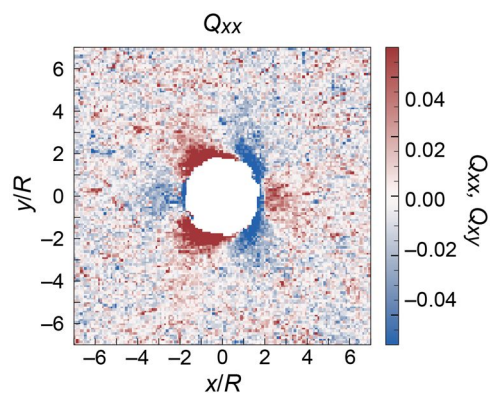


図2: 液滴周りの変形配向秩序テンソル場の xx 成分の例。 $Q_{xx} > 0$ (赤色)の領域は周りの液滴が横方向に伸長する傾向を、 $Q_{xx} < 0$ (青色)の領域は縦方向に伸長する傾向を示す。面積分率 $=0.10$ 。

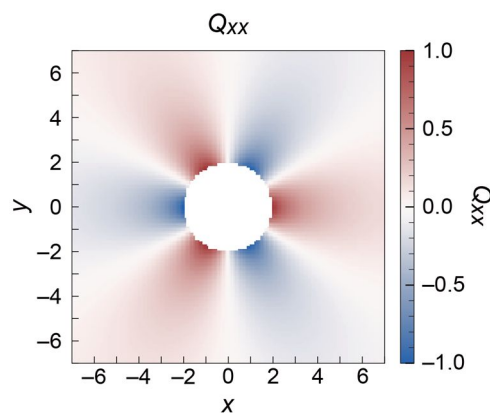


図3: 液滴周りの変形配向秩序テンソル場の xx 成分の理論。実験と定性的によく一致する空間構造が見てとれる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Lee Dongkyu, Kitahata Hiroyuki, Ito Hiroaki	4. 巻 12
2. 論文標題 Fabrication of Microparticles with Front?Back Asymmetric Shapes Using Anisotropic Gelation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 1121
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/mi12091121	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 Ito Hiroaki, Shimokawa Naofumi, Higuchi Yuji	4. 巻 127
2. 論文標題 Lateral Transport of Domains in Anionic Lipid Bilayer Membranes under DC Electric Fields: A Coarse-Grained Molecular Dynamics Study	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 8860 ~ 8868
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acs.jpcc.3c04351	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 Okishio Yudai, Ito Hiroaki, Kitahata Hiroyuki	4. 巻 453
2. 論文標題 Horizontal transport in the bouncing ball system with a sawtooth-shaped table	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physica D: Nonlinear Phenomena	6. 最初と最後の頁 133754
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physd.2023.133754	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 Higuchi Yuji, Bohinc Klemen, Re?i? Jurij, Shimokawa Naofumi, Ito Hiroaki	4. 巻 19
2. 論文標題 Coarse-grained molecular dynamics simulation of cation distribution profiles on negatively charged lipid membranes during phase separation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 3640 ~ 3651
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/d3sm00222e	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 該当する

1. 著者名 Takeda Nana, Ito Hiroaki, Kitahata Hiroyuki	4. 巻 107
2. 論文標題 Two-dimensional hydrodynamic simulation for synchronization in coupled density oscillators	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 34201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.107.034201	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20件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 伊藤弘明
2. 発表標題 荷電リン脂質膜-電解質系の自己組織化構造形成
3. 学会等名 PF研究会「物質・生命研究における小角散乱法の展開:現状と展望のための討論会」
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 伊藤弘明
2. 発表標題 マイクロ流体デバイスで測る赤血球細胞の膜物性・流動特性
3. 学会等名 第6回生体膜デザインコンファレンス (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 伊藤弘明、荒川陽輔、北畑裕之
2. 発表標題 粒子集団の擬2次元流れに現れる変形配向秩序
3. 学会等名 第11回ソフトマター研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤弘明、荒川陽輔、北畑裕之
2. 発表標題 擬2次元流れにおけるマイクロ液滴集団の変形配向秩序
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 佐藤慎一郎、北畑裕之、伊藤弘明
2. 発表標題 楕円領域に拘束した上皮細胞の集団回転秩序
3. 学会等名 第22回関東ソフトマター研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤慎一郎、北畑裕之、伊藤弘明
2. 発表標題 楕円領域に拘束した上皮細胞の集団運動
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 伊藤弘明、下川直史、樋口裕次
2. 発表標題 人工細胞膜における荷電脂質分子の相分離とドメイン輸送
3. 学会等名 細胞を創る研究会16.0 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Ito, Yosuke Arakawa, Hiroyuki Kitahata
2. 発表標題 Orientational patterns of deformable microdroplets under a quasi-two-dimensional flow
3. 学会等名 Advanced core-to-core network for the physics of self-organizing active matter (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Ito, Yosuke Arakawa, Hiroyuki Kitahata
2. 発表標題 Hydrodynamic ordering of deformable particles in a quasi-two-dimensional flow
3. 学会等名 International Soft Matter Conference 2023 (ISMC2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Ito
2. 発表標題 Orientational order of deformable microparticles under a quasi-two-dimensional flow
3. 学会等名 Japan-China Workshop on Bio-Soft Matter 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Ito, Yosuke Arakawa, Hiroyuki Kitahata
2. 発表標題 Orientational order of deformable microdroplets under a quasi-two-dimensional flow
3. 学会等名 StatPhys28 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Ito
2. 発表標題 On-chip manipulation platform for deformability measurements of red blood cells
3. 学会等名 8th Ajou-Chiba Joint Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤弘明、下川直史、樋口祐次、菱田真史
2. 発表標題 積層荷電リン脂質膜に対する低分子電解質の添加効果
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 荒川陽輔、伊藤弘明、北畑裕之
2. 発表標題 擬2次元流れにおけるマイクロ液滴集団の拡散運動
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 伊藤弘明、下川直史、樋口祐次、菱田真史
2. 発表標題 積層荷電リン脂質膜に対する電解質添加効果
3. 学会等名 第73回コロイドおよび界面化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小澤穰、北畑裕之、伊藤弘明
2. 発表標題 マイクロ液滴列に対する圧力変動印加による配置分布の制御
3. 学会等名 第73回コロナおよび界面化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 荒川陽輔、北畑裕之、伊藤弘明
2. 発表標題 擬2次元流れにおけるマイクロ液滴集団の運動と変形
3. 学会等名 第21回関東ソフトマター研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroaki Ito
2. 発表標題 On-chip manipulation for revealing novel aspects of red blood cell mechanics
3. 学会等名 ESCHM- ISCH- ISB 2021 FUKUOKA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroaki Ito, Dongkyu Lee, Hiroyuki Kitahata
2. 発表標題 Fabrication of microparticles with front-back asymmetric shapes by droplet-based microfluidics
3. 学会等名 International Conference on Advanced Mechanism and Machine Technology 2021 (ICMMT 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤弘明、下川直史、樋口祐次
2. 発表標題 DC電場に駆動される荷電脂質相分離ドメインの粗視化シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Hiroaki Ito http://nonlinear.s.chiba-u.jp/~ito/researchmap https://researchmap.jp/hiroakiito

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		
スロベニア	University of Ljubljana		