

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400425

研究課題名(和文) 微生物系の集団運動に及ぼす近接流体力学的相互作用の効果

研究課題名(英文) The effects of near-field hydrodynamic interactions on collective dynamics of microorganisms

研究代表者

古川 亮 (Furukawa, Akira)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：20508139

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)：本研究プロジェクトにおいて、モデルアクティブ系の集団運動に及ぼす近接流体力学的相互作用の効果について研究を行い、以下の事柄を明らかにした：アクティブ粒子間の流体力学的相互作用は、粒子サイズ程度の距離に近接すると、自己推進性そのものに強く影響を及ぼす。特に、流体力学的相互作用による自己トラップ効果により、過渡的な巨大構造形成が低密度領域で促進される。関連して、コロイド分散系のゲル化における流体力学的相互作用の役割や高密度ガラス形成液体の非線形レオロジーについて研究を行った。

研究成果の概要(英文)：In this project, I studied the effects of near-field hydrodynamic interactions (HIs) on the collective dynamics of model active suspensions and found the following: When the separation between swimmers is comparable to their size, the swimmers' motions are strongly affected by activity-induced hydrodynamic forces. With HIs, the dynamic clustering is enhanced at a relatively small volume fraction, which can be attributed to the active force induced hydrodynamic trapping of one swimmer by another. In this relation, I also studied the role of HIs on the colloidal gelation and the nonlinear rheology in high density glassy liquids.

研究分野：ソフトマター、複雑流体

キーワード：アクティブマター ソフトマター 流体力学的相互作用

1. 研究開始当初の背景

アクティブマターとは、外界から何らかの形でエネルギー源を得て、それを内包する変換機関によって能動的な運動を引き出す物質群の総称である。広義には、食物を摂取し活動するマクロな生物もアクティブマターに含まれるが、通常、ソフトマター物理の研究課題としてアクティブマターを取り上げる場合、マイクロメートルオーダーの自己推進粒子を指す。バクテリアや藻類などの実際の微生物系はその代表例であり、また、粒子媒質境界に化学的・物理的特性を人工的に与え、化学反応などを利用して自己駆動するモデル系なども、この狭義のアクティブマターに含まれる。このように多岐に渡る物理系を対象とする今日のアクティブマター研究では、高分子、液晶、コロイド、膜などのソフトマター物理における基幹分野で長年にわたって培われた知識、概念、手法を総合的に利用しながらの取り組みが展開されており、ソフトマター研究の最先端分野の一つであると言える。アクティブマターそのものの本質に根差した非平衡性により、従来の平衡系では見出しえない多種多様な集団運動や秩序構造が発現しうることが近年の実験的研究により次々に明らかにされてきた。「これらの物理現象の背後に未知の原理が存在しうるか否か?」「真に新しいパラダイムが拓かれるか否か?」といった根源的な問題に対する解答は現段階において判然としないが、構成要素そのものが能動性を有するアクティブマターの新奇性は、単なるソフトマター物理、あるいは物性物理の一研究分野という枠組みを超えて、非平衡統計物理や生物物理などの学際領域に展開する新しい学問分野を創出しうる可能性を十分に持つ。

2. 研究の目的

流体中に分散して存在する微生物系ではその媒質である流体を介した相互作用 (= 流体力学的相互作用) がその輸送、レオロジー特性を理解する上で重要な鍵であることが期待されてきた。生物に本質的なアクティビティに由来する運動は、それ自体の運動量自由度だけでなく、常に流体の自由度を励起しており、微生物の位置・運動量自由度は流体場の自由度と不可避的に結合する。この動的結合の効果を理解することは、複雑な非平衡現象を理解するうえで必要不可欠なものであろう。微生物の泳動メカニズムの基本的特性を備えたミニマルモデル系の系統的な数値実験により、流体力学的相互作用の効果を検討する。

3. 研究の方法

モデル微生物系を用いたコンピューターシミュレーションにより、アクティブマター系の集団運動におよぼす流体力学的相互作用の問題に取り組んだ。多粒子間に働く流体力学的相互作用そのものが極めて困難な問題

であり、この困難を回避するために FPD (流体粒子ダイナミクス) 法と呼ばれるハイブリッドシミュレーションを援用した。この FPD 法を微生物の運動の特徴を備えたミニマルモデルに適用し、系統的な数値実験を通じて、集団運動に与える流体力学的効果の一般性、任意性の別を検討した。併せて剪断流れ下のレオロジーや相分離現象など複雑な諸現象への拡張を試みた。

4. 研究成果

一連の研究で以下の点を明らかにした:

- (1) エジンバラ大学の M.E. Cates (現ケンブリッジ大学) 教授と D. Marenduzzo 講師との共同研究として、ハイブリッドシミュレーション法の一つである Fluid-Particle-Dynamics 法を用いた数値実験を行い、モデル微生物系の集団運動に及ぼす多体の流体効果を検討した。流体力学的相互作用がある場合、アクティブ粒子は相互に影響しあい、自己推進性そのものが強く影響を受ける。特に (多くのバクテリアで見られる) 双極子の自己推進力を備えたアクティブ粒子系では、流体力学的相互作用による自己トラップにより、引力的なポテンシャル相互作用がない場合でも、過渡的な巨大構造形成が促進される。さらに系統的な調査により、このような流体効果を反映したアクティブ粒子のモビリティは密度や泳動メカニズムにも強く依存することも併せて示した。また、シミュレーションコードを剪断流れ下に拡張し、アクティブマター系の非線形レオロジーについて調査を行った。

関連して、以下の事柄を明らかにした:

- (2) コロイド分散系におけるゲル化に与える流体効果について、スーパーコンピューターを用いた大規模並列シミュレーションを実行し、実験との比較検討を行った。これにより、凝集初期における流体効果による (ゲル構造形成の核になる) 異方的構造の形成促進を定量的に明らかにした。
- (3) 非ブラウン粒子の懸濁液における流体力学的相互作用の役割について主に数値シミュレーションによる研究を行った: 溶媒を考慮する場合 (溶媒がない場合と比較して)、抵抗係数が劇的に増大し、その発散挙動は実効的に低密度側にシフトすることを見出した。これは (非圧縮性) 溶媒の介在に伴い、協同性が増幅すること、力の伝搬構造の形成促進と安定化がもたらされることから理解できることを見出した。
- (4) 種々のモデルガラス物質における流体輸送異常やレオロジーに関する研究を行った。流体輸送異常については、密度揺らぎの緩和が strong ガラス形成液体

と fragile ガラス形成液体の場合に、それぞれ非保存的、保存的(拡散的)ダイナミクスに従うことを見出した。この違いは両者における緩和の素過程にある本質的な差異に由来することを明らかにした。また、レオロジーの問題については、特に fragile ガラス形成液体の shear-thinning 現象について、剪断流下における有効密度の減少という視点から理論モデルを構成した。シミュレーションや実験では緩和時間スケールよりも数桁遅い時間スケールでニュートン粘性からの偏差が観測されているが、本理論モデルはこれを定量的によく説明することを示した。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

Akira Furukawa, Onset of shear thinning in glassy liquids: Shear-induced reduction of effective density the Role of Hydrodynamics, Physical Review E 誌、査読有、Vol. 95, Art. No.012613, pp1-5 (2017).
DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.95.012613>

Akira Furukawa and Hajime Tanaka, Significant difference in the dynamics between strong and fragile glass formers, Physical Review E 誌、査読有、Vol. 94, Art. No.052607, pp1-8 (2016).
DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.94.052607>

C. Patrick Royall, Jens Eggers, Akira Furukawa, and Hajime Tanaka, Probing Colloidal Gels at Multiple Length Scales: The Role of Hydrodynamics, Physical Review Letters 誌、査読有、Vol. 114, Art. No.258302, pp1-5 (2015).
DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.258302>

Akira Furukawa, Davide Marenduzzo, and Michael. E. Cates, Activity-induced clustering in model dumbbell swimmers: The role of hydrodynamic interactions, Physical Review E 誌、査読有、Vol. 90, Art. No. 022303, pp1-16 (2014).
DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.90.022303>

[学会発表](計 10 件)

古川亮、ガラス状液体におけるシアニングのオンセット機構、日本物理学会第 71 回年次大会、2017 年 3 月 20 日、大阪大学(豊中市)

古川亮、Shear-thinning in glassy liquids、ジャムドマターの非ガウス揺らぎとレオロジー、2017 年 3 月 10 日、京都大学基礎物理学研究所(京都市)

Akira Furukawa、Essential Difference in the Dynamics between Strong and Fragile Glass-formers、4th International Soft Matter Conference、2016 年 9 月 13 日グルノーブル(フランス)

Akira Furukawa、Essential Difference in the Dynamics between Strong and Fragile Glass-formers、26th International Conference on Statistical Physics、2016 年 7 月 21 日リヨン(フランス)

古川亮、過冷却液体の緩和機構について流体輸送解析から、日本物理学会 秋季大会、2015 年 3 月 18 日 関西大学 (大阪府・吹田市)

古川亮、過冷却液体の流体輸送解析、東京大学物性研究所短期研究会 ガラス転移と周辺分野の科学、2015 年 7 月 31 日 東京大学物性研究所 (千葉県・柏市)

古川亮、モデル微生物系における流体力学的相互作用の効果、物性研究所計算物質科学研究センター第 4 回シンポジウム・物性研スーパーコンピューター共同利用報告会、2014 年 11 月 14 日 東京大学物性研究所 (千葉県・柏市)

古川亮、モデルアクティブマター系における近接流体力学効果、第 62 回レオロジー討論会、2014 年 10 月 17 日、福井市交流プラザ(福井県・福井市)

古川亮、過冷却液体のマイクロレオロジー、第 62 回レオロジー討論会、2014 年 10 月 17 日、福井市交流プラザ(福井県・福井市)

古川亮、Activity-induced clustering in model dumbbell swimmers: The role of hydrodynamic interactions、文部科学省科学研究費補助金、新学術領域研究 ゆらぎと構造の狂奏 第 2 回領域研究会、2014 年 8 月 30 日 北海道大学 (北海道・札幌市)

[図書](計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.complexfluid.iis.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古川 亮 (FURUKAWA, Akira)
東京大学・生産技術研究所・准教授
研究者番号：20508139

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()