JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	水中遊泳する自走粒子の群れ運動中の普遍則
Author(s)	永井，健
Citation	科学研究費助成事業研究成果報告書: 1-5
Issue Date	2018-06-01
Type	Research Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/15408
Rights	
Description	挑戦的萌芽研究，研究期間：2014～2017，課題番号：26610112，研究者番号：40518932，研究分野：非線形非平衡物理

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ３０ 年　 ６ 月　 １ 日現在

機関番号：１３３０２
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2014～2017
課題番号：２６６１０１１２

研究課題名（和文）水中遊泳する自走粒子の群れ運動中の普遍則

研究課題名（英文）Universal laws of collective motion of swimmers

研究代表者
永井　健（Nagai, Ken）

北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・講師

研究者番号：４０５１８９３２

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では形状と遊泳の様相に密接な関係性があるソフトマターの自走微粒子を作ることが出来た。ソフトマターはその名のごとく柔らかい物質なので、更に研究を発展させることで、外場による形状制御を通じて遊泳を制御できるであろう。また、大腸菌を使い、アスペクトレシオに対する遊泳微生物の集団運動の依存性を実験的に解明した。実験セル全体で運動方向が揃い、長距離相関を持つ密度ゆらぎを伴う相は20年以上前に理論的に存在が予測されていなかったものの実験的には見出されていなかった。そのため、この結果は自走粒子の集団運動の統計物理において大きな意義がある。

研究成果の概要（英文）： In this study, two kinds of swimmer made of softmatter were developed. The type of motion highly depends on the shape of the particle. Considering the high deformability of softmatter, the motion may be able to controlled through the deformation of the self-propelled particles by external field.
In addition, the dependence of the collective motion of E. coli on the body length was studied. We found the long-range orientationally ordered phase along with the long-range correlated density fluctuation when the aspect ratio was large enough. This was the first experimental realization of the phase which had been predicted more than twenty years before. Hence, this result was of great significance in the statistic physics of active matter.

研究分野：非線形非平衡物理

キーワード：アクティブマター　ソフトマター　生物物理

１．研究開始当初の背景

近年、鳥、魚や化学発的に運動する粒子(以下「自走粒子」と呼ぶ)の集団運動に関する統計物理学的研究が盛んに行われている。例えば Vicsek らの数理モデルの研究などから対称性で決まる非平衡相転移が発見された(T. Vicsek *et al*., *Phys*. *Rev*. *Lett*. (1995).)。また、Vicsek のモデルと同じ対称性を持つ一様に運動方向の揃った集団運動には異常な密度ゆらぎが普遍的に存在することが理論的に予言されている。対称性による集団運動の記述は研究代表者らの報告(Y. Sumino, K. H. Nagai *et al*., *Nature* (2012).)などにより実験的にも妥当性が確認されている。そのため、個々の粒子の運動方向や粒子同士の相互作用の対称性によって決まる集団運動のユニバーサリティークラスの存在が期待されている(図 1)。

水中微生物など遊泳する自走粒子の群れ運動を考えると、水の流れによる長距離相互作用が存在するため、鳥などの短距離相互作用による集団運動とは異なったユニバーサリティークラスに属すると考えられる。遊泳は体表面での流れ場によって実現されるため、粒子の形状と運動の対称性との間に強い相関があるといえる。そのため水中の集団運動に普遍的な性質の解明には自走粒子の形状を系統的に変化させた群れ運動の実験研究が必要となる。

２．研究の目的

本研究は魚の群れや水中の微生物の群れの様な自走粒子の群れ運動に関する研究である。これまでの統計物理的な研究から、運動方向の対称性や粒子同士の相互作用の対称性で決まる普遍的な群れ運動の性質が存在すると考えられている。本研究では水中を遊泳する自走粒子の群れ運動に焦点を当て、実験研究を行った。粒子が持つ対称性への群れ運動の依存性を調べるため、形状を制御した自走する微小粒子や微生物の運動を解析した。実験で

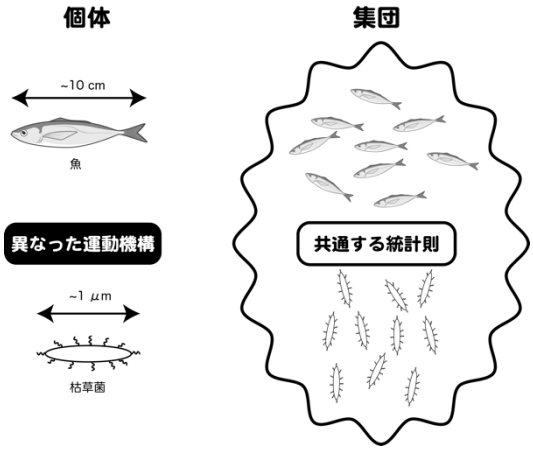

図 1 :自走粒子の群れ運動。群れ運動中には自走粒子の詳細に寄らない普遍的な統計則があると考えられている。

観測された結果と現象論的数理モデルの比較から、水中の自走粒子の群れ運動において、系の詳細によらない性質の解明を目指した。

３．研究の方法

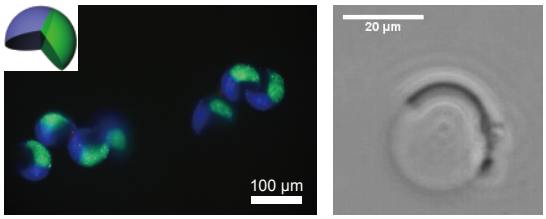

図 2: (左)CDSD を用いて作成した非球形のゲル粒子と(右)相分離したリポソーム。線張力のためにリポソームは非球形になる。

centrifuge-based droplet shooting device (CDSD) を用いて作成したゲル粒子とリポソームを自走粒子の骨格としてそれぞれ用いた。

CDSDを用いると濃度構成の異なるいくつかの部位からなるゲルを作成できる。この特性を活かして様々な形状のゲル(図2左)を作成し、様々な運動様相の実現を目指した。エネルギー源として化学反応と一様な交流電場を用いた。

リポソームは脂質二重膜から構成されるので柔らかい。そのため、リポソーム周りの浸透圧調整などを用いて形状制御可能な自走粒子となる。運動のエネルギー源として交流電場を用いた。

また、体長を伸ばすことが容易な微生物で

ある大腸菌を用い、アスペクトレシオに対する集団運動の依存性を調べた。

４．研究成果

当初の計画にあった光吸収によるゲルの運動実現が困難であったため、過酸化水素水の分解反応や電場を駆動力として用いた。まず、過酸化水素水の分解反応による自発運動を誘起するため、ゲルの中に反応触媒である白金の微粒子を封入した。この時に一部分だけに白金微粒子を封入するとゲル周りに非対称に泡が発生し、自走につながる。この分解反応に駆動された運動は形状に様相が強く依存することを見出した。

次に、電場によって自発運動を誘起するため、ITOガラス二枚に挟まれた空間にアルギン酸カルシウムからなるゲル粒子を含む水を封入した。ここに1000 Hzほどの周波数の交流電場を印加すると、ゲル周りに電気浸透流が生じる。生じた流れはゲルの前後で非対称であることを水中に分散したポリスチレンの微粒子を使って確認した。CDSDで真球を作成することは困難であり、微小な歪みのため流れ場が非対称になると考えられる。PLL-PEGによるガラス修飾により、ゲルのガラスへの吸着を防ぐと、自発運動が誘起された。周りの流れの速度と自発運動の速度に相関があるため、ゲルの形状のゆがみに起因する非対称な流れ場によりゲル微粒子は自発運動すると結論づけた。

ゲルの組成をアガロースに変えて交流電場を加えると、アルギン酸カルシウムゲルの場合と逆向きの流れが生じる。このときアルギン酸カルシウムの時と同様に自発直進運動を示す。CDSDの特性を生かして半球状のアガロースゲル微粒子を作成し、交流電場を加えると回転運動をすることがわかった。このように微粒子の構成物や形状に対する運動依存性を明らかにできた。

リポソームを含む水溶液を2枚のITOガラスではさみ、ITOガラス間に数百ヘルツの交流電場を加えるとリポソーム周りに円対称な電気浸透流が生じる。リポソームに脂質塊や微小コロイドを付着させると誘電率分布が非対称になるため、非対称な電気浸透流が生じる。観察セルのITOガラスをPluronic F-127でコーティングするとリポソームの吸着を阻害でき、電場に垂直な平面上を自発運動する。リポソームが運動する平面は等方的で一様であるため、運動方向はゆらぎ、徐々に変化する。

飽和脂質(DPPC)と不飽和脂質(DOPC)の混合物からなるリポソーム表面は室温でゲル相と液晶相の二相に分離する。この二相の間には線張力が働くため、面積の小さい相が出っ張る(図2右)。この相分離したリポソームを含む溶液に交流電場に加えたときも形状に起因する非対称な流れ場が生じ、自発運動が生じることを見出した。この場合も運動方向に特定の方向はなく、徐々に変化する。

微生物の形状に対する集団運動の依存性を調べるため、抗生物質を用いて体長を変えた大腸菌の集団運動を観察した。その結果、大腸菌のアスペクトレシオが高いと一様に運動方向が揃った集団運動が生じ、運動方向が揃う事によって長距離相関を持つ密度ゆらぎを持つことを明らかにした。

本研究では形状と遊泳の様相に密接な関係性があるソフトマターの自走微粒子を作ることが出来た。ソフトマターはその名のごとく柔らかい物質なので、更に研究を発展させることで、外場による形状制御を通じて遊泳を制御できるであろう。また、大腸菌を使い、アスペクトレシオに対する遊泳微生物の集団運動の依存性を実験的に解明した。実験セル全体で運動方向が揃い、長距離相関を持つ密度ゆらぎを伴う相は 20 年以上前に理論的に存在が予測されていなかったものの実験的には見出されていなかった。そのため、この結果は自走粒子の集団運動の統計物理において大きな意義がある。

今後は自走微粒子の集団運動の粒子形状依

存性を中心に研究を進める。本研究期間内にはゲルやリポソーム同士の吸着を避ける方法開発には至らず、多粒子のダイナミクスの研究を行うことができなかった。ゲル表面のPEG 修飾などで吸着を阻害する実験方法を確立後、集団運動の研究を行う予定である。

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 7 件）

1. Kazuki Shigyou, Ken H. Nagai, Tsutomu Hamada, "Lateral Tension-Induced Penetration of Particles into a Liposome", Materials, 査読有, 10, 2017, 765.
2. Daiki Nishiguchi, Ken H. Nagai, Hugues Chaté, Masaki Sano, “Long-range nematic order and anomalous fluctuations in suspensions of swimming filamentous bacteria”, Physical Review E, 査読有, 95, 2017, 20601.
3. Kazuki Shigyou, Ken H Nagai, Tsutomu Hamada, “Lateral diffusion of a submicron particle on a lipid bilayer membrane”, Langmuir, 査読有, 32, 2016, 13771-13777.
4. Masayuki Hayakawa, Hiroaki Onoe, Ken H. Nagai, Masahiro Takinoue, “Influence of Asymmetry and Driving Forces on the Propulsion of Bubble-Propelled Catalytic Micromotors”, Micromachines, 査読有, 7, 2016, 229-339.
5. Ken H. Nagai, Kunihito Tachibana, Yuta Tobe, Masaki Kazama, Hiroyuki Kitahata, Seiro Omata, Masaharu Nagayama, “Mathematical model for self-propelled droplets driven by interfacial tension”, The Journal of Chemical Physics, 査読有, 144, 2016, 114707.
6. Masayuki Hayakawa, Hiroaki Onoe, Ken H. Nagai, Masahiro Takinoue, “Complex-shaped three-dimensional multi-compartmental microparticles generated by diffusional and Marangoni microflows in centrifugally discharged droplets”, Scientific Reports, 査読有, 6, 2016, 20793.
7. Ken H. Nagai, Masayuki Hayakawa, Masahiro Takinoue, “Self-Propelled Particles with Rotationally Asymmetric Shape”, Current Physical Chemistry, 査読有, 5, 2015, 73-81.

〔学会発表〕（計 8 件）

1. 永井 健, 伊藤 浩史, 杉 拓磨,「*C. elegans* 集団の動的ネットワーク形成 」, 日本物理学会第72回年次大会, 2017年03月17日, 大阪大学(大阪府・大阪市)
2. Ken H. Nagai, Masayuki Hayakawa, Masahiro Takinoue, “Synthesis of gel particles with various shapes using tabletop centrifuge”, Workshop on Soft and Nano Materials Orchestrated with Wisdom from Japan, 2017年01月09日, 舎炉夢(北海道・ニセコ町)
3. Ken Nagai, “Collective motion of running microtubules in in vitro motility assay”, 第54回生物物理学会年会, 2016年11月25日, つくば国際会議場(茨城県・つくば市)
4. Ken H. Nagai, Masayuki Hayakawa, Masahiro Takinoue, “Self-propelled gel particles of various shapes”, Symposium on Nonlinear Sciences, 2016年09月27日, 産業技術総合研究所臨海副都心センター(東京都・江東区)
5. 永井 健, 「自発的に運動する粒子の集団運動」, 物性物理学・一般物理学分野の展開と大型研究計画, 2016年3月11日, 日本学術会議(東京都・港区)
6. 永井 健, 早川 雅之, 瀧ノ上 正浩,「電場に駆動される自発遊泳ゲル」, 日本物理学会2015年秋季大会, 2015年09月19日, 日本物理学会2015年秋季大会, 関西大学(大阪府・吹田市)
7. 永井 健, 早川 雅之, 瀧ノ上 正浩,「電場に駆動される自発運動ゲル」, 第53回日本生物物理学会年会, 2015年09月13日, 金沢

大学(石川県・金沢市)

8. 永井 健, 早川 雅之, 瀧ノ上 正浩,「様々な形状の自発運動ゲル」, 日本物理学会第70回年次大会, 2015年03月22日, 早稲田大学(東京都・新宿区)

〔図書〕（計 0 件）
なし

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）
名称：細胞構造体の内部へゲスト物質を導入する方法
発明者：執行 航希, 永井 健, 濵田 勉
権利者：国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学
種類：特許
番号：特願2016-136138
出願年月日：2016 年 7 月 8 日
国内外の別：日本

○取得状況（計 0 件）
なし

〔その他〕
ホームページ等
https://sites.google.com/site/inonakanokaeru/

６．研究組織
(1)研究代表者
永井 健（NAGAI KEN）
北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・講師
研究者番号：４０５１８９３２
(2)研究分担者
なし
(3)連携研究者
なし
(4)研究協力者
なし