

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01872

研究課題名（和文）アクティブマターのキラルな秩序渦と乱流状態の幾何的普遍性の研究

研究課題名（英文）Geometric universality of ordered vortices and turbulent states in chiral active matter

研究代表者

前多 裕介（Maeda, Yusuke）

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：30557210

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：遊泳バクテリアのように自ら動く物体の集団（アクティブマター）は、相互作用を介して群れなどの秩序形成を示す。本研究は、運動の左右対称性が破れたキラルアクティブマターの秩序形成を明らかにし、その集団運動の制御法の開発を目的とする。高密度な遊泳バクテリア集団をマイクロウェルに封じ込めたところ、境界に沿う遊泳のキラリティーを反映した反時計回りのキラル秩序渦が現れることを発見した。さらに、相互作用するキラル渦ペアでは、秩序形成のパターンをキラリティーと配向相互作用の強度比で制御できることを明らかにした。この結果は、群れとなり巨大な流れを安定化するため、運動のキラリティーが重要であることを示すものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得た知見は、遊泳バクテリアに限らず、分子モーターに駆動される細胞骨格集団にまで広がる包括性を持つ。渦の幾何学は物質の詳細によらない不変量の抽出を可能にするものであり、広くアクティブマターの集団運動を制御する原理につながると考えられる。将来的には、生体組織の集団運動をアクティブマターの幾何的ルールから理解し制御する研究へと発展することが想定され、生物の動的な発生現象を非平衡物理学から理解する新たな学術領域の創出につながる。さらに、キラル集団運動の理解をもとに、水中を泳ぐマイクロロボットによる複雑な流れの制御や、運動のキラリティーで物質輸送を制御するデバイス設計への応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Active matter, such as swimming bacteria and molecular motors, exhibit the emergence of ordered patterns driven by their interactions based on orientation. This study aims to elucidate the ordered structures observed in chiral active matter, where the spontaneous motion symmetry is broken, and to develop a method to control its collective motion. When a dense bacterial suspension was enclosed in microwells, it was found that chiral ordered vortices with counter-clockwise rotation at a near-perfect rate of 100%, reflecting the chirality of bacterial swimming along the boundary. Furthermore, when examining pairs of interacting chiral bacterial vortices, the transition in their pairing order could be controlled by the strength ratio between chirality and polar orientation interactions. These findings provide physical insights for controlling the geometric properties of chiral ordered vortices, which holds promise for the development of robust microscopic stirring devices.

研究分野：生物物理学

キーワード：アクティブマター 集団運動 非平衡物理学 秩序形成 バクテリア 分子モーター マイクロ流体デバイス

1. 研究開始当初の背景

鳥や魚、バクテリアのようにエネルギーを費やしながら自律的に動き、群れなどの秩序形成を示す物質(アクティブマター)が注目を集めている^[1]。アクティブマターとしてよく知られる遊泳微生物のバクテリアは、高密度になると多数の渦が出現する集団運動や、乱流のような複雑な流れ(アクティブ乱流)をつくることが知られていた。マイクロな自発的運動から中間サイズの渦ペアの秩序形成へと至り、さらには大小様々な渦が入りみだれる乱流状態へと複雑に変化するアクティブマターには謎が多く、その物理法則の理解と集団運動の制御に向けて研究が行われている。近年になり、バクテリアのアクティブ乱流は多数の渦が集まる秩序性をもち、局所的な集団運動は渦の幾何学から理解できることが明らかになりつつある^[2,3]。

一方で、アクティブマターの性質として、運動方向にわずかな偏りがあり、左向きになる頻度と右向きになる頻度が等しくならない運動のキラリティーがあることが知られていた。水中を泳ぐバクテリアは鞭毛を回転させることで水中を泳ぎ、直進する際の鞭毛の回転方向が決まっているために遊泳方向が左右でわずかに偏りが生じる。バクテリアのみならず、私たちの体を構成する細胞の形や動き、細胞内の物質運搬を支えるタンパク質の運動にもキラリティーがある。したがって、運動のキラリティーが集団運動や乱流構造にどのような影響を与えるかを明らかにすることは、生物学にも発展する重要な課題といえる。しかし、この性質が巨大な集団運動の形成にどのような影響を与えるのかは十分に明らかにされていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、アクティブマターの秩序形成において運動のキラリティーが与える影響を明らかにするため、遊泳バクテリアや滑走する微小管集団の集団運動の実験的研究を行った。運動のキラリティーを介してアクティブ乱流に内在する秩序渦が安定化することを検証し、多数のキラルな秩序渦を制御する幾何学的ルールを明らかにする。さらに、得られる知見から、運動のキラリティーが集団運動を操る重要なファクターとなることを示し、微小空間で物質攪拌などを行う機能的デバイスの設計指針を提案する。

3. 研究の方法

本研究では、集団運動の幾何学的制御と理論的解析という2つの点を特徴とし、アクティブ乱流状態に内包される秩序渦の形成メカニズムについて研究を進めた。

3-1: 幾何学的制御

アクティブ乱流は多数の渦が集まる秩序性をもち、局所的な集団運動を渦の幾何学的性質に基づいて制御を行う。具体的には、Polydimethyl siloxane (PDMS) で作られたマイクロウェルにバクテリアを封入し、上面をミネラルオイルで封じる独自のマイクロ流体デバイスを開発した。境界形状は2つまたは3つの円を重ねたものを設計し、渦のサイズを規定する円のサイズ R 、円の中心間距離 Δ で定める。封入されたバクテリア集団の秩序渦の回転方向が変化する転移点を調べると、同方向回転する渦ペアから逆方向回転へと転移する条件が $\Delta/R = \sqrt{2}$ で定まる。

3-2: 理論的解析

2つの相互作用する渦は、向きを揃えるか反対の回転方向で回るかの2つのパターンをとる。渦を電子のスピンとなぞらえれば、同じ向きに回転する渦ペアはスピンの向きが揃う「強磁性的秩序」、反対の回転方向になる渦ペアはスピンの向きが逆になる「反強磁性的秩序」とみなせる。強磁性的秩序から反強磁性的秩序への転移は、円の半径 R と2つの円の中心間距離 Δ の比で定まる仰角 ϕ ($\Delta/R = 2\cos\phi$) で決定される。上下面で非対称性を与えずキラリティーのバイアスを与えない場合、 $\phi = 45^\circ$ の境界形状が強磁性的秩序と反強磁性的秩序のパターンを等確率で出現させるため、 $\Delta/R = \sqrt{2}$ で転移する。一方、キラリティーをもつ渦では同じ回転方向の強磁性的秩序が安定化されると考えられ、転移点が $\Delta/R > \sqrt{2}$ になると期待される。このように強磁性的秩序から反強磁性的秩序への転移点を計測し、キラリティーが渦ペアを安定化させるかを解析した。

4. 研究成果

4-1. 遊泳バクテリアが示すキラル集団運動と秩序渦転移

上面をミネラルオイルで封じた PDMS デバイス内のバクテリア集団では、渦運動の回転方向が95%もの確率で反時計回りになることを発見した。マイクロウェルの半径を大きくしても、壁際(端)を泳ぐバクテリアは反時計回りの集団運動を示すことから、自発的にキラルな渦運動(キラル渦)が出現することがわかった(図1)^[4]。キラル渦の回転方向は、個々のバクテリアのキラルな運動方向と一致しており、集団運動に運動のキラリティーが反映されたものと考えられ

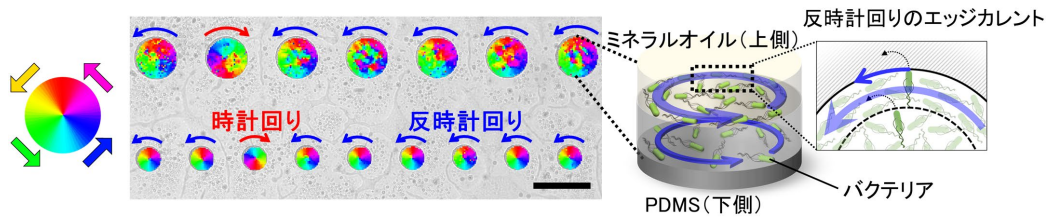


図1 バクテリア集団運動のキラル秩序渦. 95%以上の確率でバクテリア集団は反時計回りのキラルな渦運動を示す. マイクロウェルの底面はPDMS, 天井面は油水界面になり, この境界条件の差が運動のキラリティーが集団運動に現れる要因となる.

る。この集団運動はエッジカレント（端の流れ）と呼ばれ、多数のキラル渦が相互作用する状況で重要な役割を果たす。

次に、2つのキラル渦が相互作用するマイクロウェル（半径 R の2つの円が、中心間距離 Δ を隔てて重なる形状）を解析すると、同方向回転の渦ペアパターンが支配的に出現し、同じ方向に渦運動を続けるパターンを安定化することを見出した。この同方向の渦運動を維持する要因が、エッジカレントによる安定化であることを理論解析から明らかにした。具体的には、エッジカレントの強さと配向相互作用の強さの比 S で表される分だけ転移点が移動し、幾何的ルールは $\Delta/R = \sqrt{2} + S$ となり、エッジカレントがより顕著に現れるほど同方向の渦回転が系全体を支配するようになることを意味する（図2）。これらの結果は、群れとなり巨大な流れを安定化するために運動のキラリティーが重要であることを指摘すると共に、集団運動の理解をもとに水中を泳ぐマイクロロボットによる複雑な流れの制御などへの応用につながるものである。

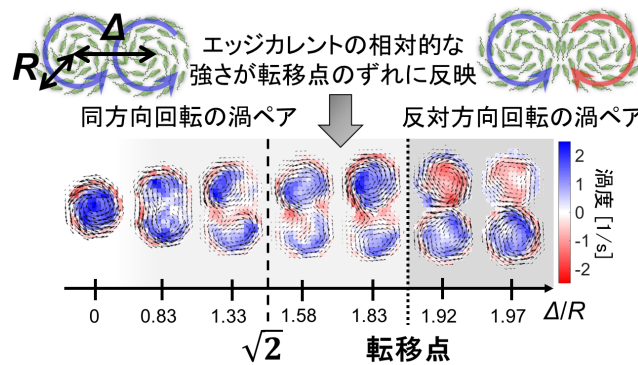


図2. キラル秩序渦の渦ペアパターン. 双子型円のもとでキラルな渦ペアは同方向に回転するパターンが安定しており, キラリティーが渦の相互作用に重要であることを意味している.

4-2. 集団運動を制御する幾何的ルールの解明

次に、渦という構造単位に着目することで、アクティブマターの集団運動を制御する幾何的手法を開発した。細胞骨格フィラメントが群れる際に運動の方向を揃えていく点に着目し、運動方向の揃え方を精密に制御できる新しいマイクロ流体デバイスを構築した。その結果、細胞骨格フィラメントの衝突角度を制御することで、集団運動の方向制御もまた $\Delta/R = \sqrt{2}$ という幾何的ルールとなり、バクテリアの秩序渦の転移と同様に成立することを明らかにした^[5]（図3）。本実験で用いた滑走する微小管集団ではキラリティーの影響が大きく現れなかったものの、理論モデルをもとに検証した結果、遊泳バクテリア集団での結果と同様に、運動のキラリティーが集団運動の幾何的ルールを変化させ、微小管の左右対称性の破れの強さと配向相互作用の強さの比 S で表される分だけ転移点が移動し、幾何的ルールは同様に

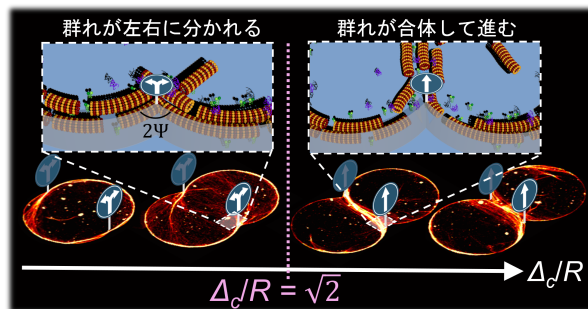


図3. 集団運動を制御する幾何的ルール. バクテリア集団のみならず, 細胞骨格タンパク質の集団運動もまた同様のルールに従う.

$\Delta/R=\sqrt{2} + S$ となることがわかった。この結果は、バクテリアと細胞骨格系の相異なる物質であっても共通した幾何的ルールが成立することを示しており、アクティブマターが持つ普遍性の一端を明らかにしたという意義がある。さらに、この幾何的制御法を応用し、植物細胞に見られるような細胞骨格の壁構造を構築することにも成功した。将来的には、生体分子モーターの化学エネルギーで動作する革新的デバイスの開発につながると期待される。

4-3. アクティブゲルの秩序形成と自律的な細胞運動の力学原理

さらに、幾何的制御に用いたマイクロ流体デバイスの実験手法を用いて、モータータンパク質と細胞骨格の複合体が示す秩序形成についても研究を進めた。細胞内にもアクティブマターがあり、その代表例はミオシン分子モーターと細胞骨格の高分子複合体アクトミオシンである。このアクトミオシンは ATP の化学エネルギーで収縮力を発揮し、自律的にアクティブに変形する細胞骨格ゲル（以下ではアクティブゲルと呼ぶ）である。我々はアクトミオシゲルを細胞サイズの水滴カプセルに封入した人工細胞を構築し、細胞骨格の収縮力が細胞核の配置を制御する力学的メカニズムを解明した^[6]。さらに、人工細胞の膜とアクトミオシゲルとが接着する機能的脂質膜を与えたところ、アクチンの流れが人工細胞の表面と外部基盤の間に摩擦力を生み、人工細胞が自律的に運動することを発見した（図4）。人工細胞が狭い空間に拘束された運動を記述する新しい理論モデルを構築し、界面摩擦力と流体抵抗のバランスで運動速度が決まることを明らかにした^[7]。細胞膜を通じたアクティブゲルの効率的な力の伝達プロセスを明らかにしたことは、生体組織内における細胞運動のメカニズムの理解に貢献すると考えられる。

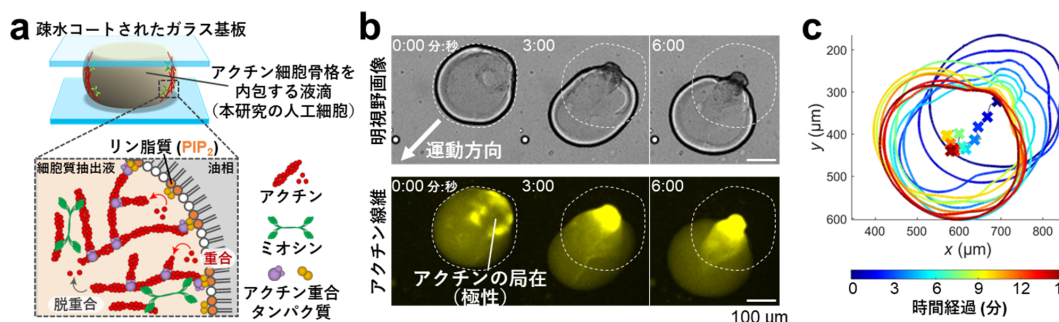


図4. アクティブゲルの収縮力の伝達で運動する人工細胞。(a) 人工細胞の模式図。人工細胞は油中水滴にアクチン、ミオシン、アクチン重合タンパク質を含む細胞抽出液を封入することで形成される。(b) 運動する人工細胞の顕微鏡連続写真。点線は人工細胞の初期位置を表す。(c) 運動する人工細胞の形の輪郭を重ね合わせて、時間発展を示した図。X印は重心位置を表す。

関連論文

- [1] M. C. Marchetti, et al. *Rev. Mod. Phys.* **85**, 1143 (2013)
- [2] H. Wioland, et al. *Nat. Phys.* **12**, 341 (2015).
- [3] K. Beppu, et al. *Soft Matt.* **13**, 5038 (2017).
- [4] K. Beppu, et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **118**, e2107461118 (2021)
- [5] S. Araki, et al. *Nano Letters* **21**, 10478–10485 (2021)
- [6] R. Sakamoto, et al. *Nature Communications* **11**, 3063 (2020)
- [7] R. Sakamoto, et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **119**, e2121147119 (2022)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Kato Shuzo, Garenne David, Noireaux Vincent, Maeda Yusuke T.	4. 巻 22
2. 論文標題 Phase Separation and Protein Partitioning in Compartmentalized Cell-Free Expression Reactions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biomacromolecules	6. 最初と最後の頁 3451 ~ 3459
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.biomac.1c00546	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 Beppu Kazusa, Izri Ziane, Sato Tasuku, Yamanishi Yoko, Sumino Yutaka, Maeda Yusuke T.	4. 巻 118
2. 論文標題 Edge current and pairing order transition in chiral bacterial vortices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2107461118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2107461118	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 Araki Shunya, Beppu Kazusa, Kabir Arif Md. Rashedul, Kakugo Akira, Maeda Yusuke T.	4. 巻 21
2. 論文標題 Controlling Collective Motion of Kinesin-Driven Microtubules via Patterning of Topographic Landscapes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 10478 ~ 10485
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.1c03952	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 Kikuchi Kosuke, Fukuyama Tatsuya, Uchihashi Takayuki, Furuta Tadaomi, Maeda Yusuke T., Ueno Takafumi	4. 巻 18
2. 論文標題 Protein Needles Designed to Self Assemble through Needle Tip Engineering	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Small	6. 最初と最後の頁 2106401 ~ 2106401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/smll.202106401	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 Fukuyama Tatsuya, Maeda Yusuke T.	4. 巻 12
2. 論文標題 Opto-thermal diffusiophoresis of soft biological matter: from physical principle to molecular manipulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biophysical Reviews	6. 最初と最後の頁 309 ~ 315
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12551-020-00692-7	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 Sakamoto Ryota, Tanabe Masatoshi, Hiraiwa Tetsuya, Suzuki Kazuya, Ishiwata Shin'ichi, Maeda Yusuke T., Miyazaki Makito	4. 巻 11
2. 論文標題 Tug-of-war between actomyosin-driven antagonistic forces determines the positioning symmetry in cell-sized confinement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3053
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-16677-9	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 坂本遼太, 前多裕介	4. 巻 73
2. 論文標題 構成的アプローチで探る「発動する人工細胞」の設計原理	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 化学と工業	6. 最初と最後の頁 463-465
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Maeda Yusuke T.	4. 巻 12
2. 論文標題 Negative autoregulation controls size scaling in confined gene expression reactions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 10516
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-14719-4	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 Shigeta Kazuyuki, Fukuyama Tatsuya, Takahashi Riku, Beppu Kazusa, Tanaka Aya, Maeda Yusuke T.	4. 巻 12
2. 論文標題 Collective motion of epithelial cells along a wrinkled 3D-buckled hydrogel	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 20174 ~ 20181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2RA01768G	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 Sakamoto Ryota, Izri Ziane, Shimamoto Yuta, Miyazaki Makito, Maeda Yusuke T.	4. 巻 119
2. 論文標題 Geometric trade-off between contractile force and viscous drag determines the actomyosin-based motility of a cell-sized droplet	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2121147119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2121147119	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 Fukuyama Tatsuya, Yan Lucan, Tanaka Masahito, Yamaoka Megumi, Saito Kei, Ti Shih-Chieh, Liao Chung-Chi, Hsia Kuo-Chiang, Maeda Yusuke T., Shimamoto Yuta	4. 巻 119
2. 論文標題 Morphological growth dynamics, mechanical stability, and active microtubule mechanics underlying spindle self-organization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2209053119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2209053119	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 Sakamoto Ryota, Miyazaki Makito, Maeda Yusuke T.	4. 巻 5
2. 論文標題 State transitions of a confined actomyosin system controlled through contractility and polymerization rate	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 13208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.5.013208	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40件(うち招待講演 8件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 繁田和幸, 別府航早, 前多裕介
2. 発表標題 上皮細胞における集団運動の幾何的制御と自律振動
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 家永竜, 別府航早, 前多裕介
2. 発表標題 筋芽細胞集団における位相欠陥と収縮流れによる形態制御原理
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yusuke T. Maeda, Kazusa Beppu
2. 発表標題 Ordered patterns and geometric rule of multicellular systems explored in swimming bacterial population
3. 学会等名 第45回日本分子生物学会年次大会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Archit Negi, Kazusa Beppu, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Geometry-induced dynamics of confined chiral active matter
3. 学会等名 第10回ソフトマター研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松浦海人, 前多裕介
2. 発表標題 溶液物性制御に基づく遊泳バクテリアのアクティブ乱流状態の解析
3. 学会等名 第10回ソフトマター研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 家永竜, 別府航早, 前多裕介
2. 発表標題 筋芽細胞集団が示す位相欠陥と収縮性流れの幾何学的制御
3. 学会等名 第10回ソフトマター研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoka Kashiwabara, Syeda Rubaiya Nasrin, Arif Md Rashedul Kabir, Akira Kakugo, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Single molecule observation of kinesin-1 on collectively aligned microtubules
3. 学会等名 第60回日本生物物理学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 家永竜, 別府航早, 前多裕介
2. 発表標題 筋芽細胞集団が示す位相欠陥と収縮性流れの幾何学的制御
3. 学会等名 第60回日本生物物理学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 繁田和幸, 別府航早, 田中あや, 前多裕介
2. 発表標題 上皮細胞の集団運動とペアリング秩序転移
3. 学会等名 第60回日本生物物理学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Geometry of phase transitions in confined active matter
3. 学会等名 the 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuyuki Shigeta, Tatsuya Fukuyama, Riku Takahashi, Kazusa Beppu, Aya Tanaka, Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Collective motion of epithelial cells in a 3D wrinkled hydrogel
3. 学会等名 The World Congress of Biomechanics (WCB2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤修三, David Garenne, Vincent Noireaux, 前多裕介
2. 発表標題 無細胞発現系における液滴形成と成長のダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 繁田和幸, 別府航早, 田中あや, 前多裕介
2. 発表標題 上皮細胞の集団運動とペアリング秩序転移
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 家永竜, 別府航早, 前多裕介
2. 発表標題 筋芽細胞集団が示す位相欠陥とエッジ流れの幾何的制御
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前多裕介
2. 発表標題 アクティブマター：生命システムの理解と制御の新展開
3. 学会等名 東京大学化学生命工学専攻 談話会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前多裕介
2. 発表標題 Understanding the instability of intracellular organization in synthetic cell
3. 学会等名 第59回 日本生物物理学会年会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂本 遼太, Ziane Izri, 島本勇太, 宮崎 牧人, 前多 裕介
2. 発表標題 アクティブな界面摩擦と流体抵抗の幾何学的バランスが決めるアクトミオシン液滴の自発運動
3. 学会等名 第59回 日本生物物理学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤 修三, David Garenne, Vincent Noireaux, 前多 裕介
2. 発表標題 細胞区画内のセルフリー遺伝子発現における液液相分離現象とぬれ効果
3. 学会等名 第59回 日本生物物理学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前多裕介
2. 発表標題 アクティブゲルの対称性と動きの非平衡力学
3. 学会等名 日本物理学会2021年度秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福山達也, 菊池幸祐, 上野隆史, 前多裕介
2. 発表標題 タンパク質針の相互作用と凝集による2次元集団秩序形成
3. 学会等名 日本物理学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒木駿也, 別府航早, Arif Md. Rashedul Kabir, 角五彰, 前多裕介
2. 発表標題 アクティブ細胞骨格系における集団運動と幾何的制御
3. 学会等名 日本物理学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 別府航早, Ziane Izri, 住野豊, 前多裕介
2. 発表標題 バクテリア乱流ダイナミクスとフラストレートされた秩序渦の制御原理
3. 学会等名 日本物理学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤修三, David Garenne, Vincent Noireaux, 前多裕介
2. 発表標題 細胞区画内のセルフリー遺伝子発現における液液相分離現象と濡れ効果
3. 学会等名 日本物理学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 繁田和幸, 福山達也, 高橋陸, 田中あや, 前多裕介
2. 発表標題 3次元ハイドロゲルが誘起する上皮細胞の集団運動
3. 学会等名 日本物理学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke T. Maeda
2. 発表標題 Understanding symmetry breaking induced by cell-sized compartments: a minimal cell approach
3. 学会等名 International Workshop: From Soft Matter to ProtoCell 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福山達也, 菊池幸祐, 上野隆史, 前多裕介
2. 発表標題 タンパク質ニードルの末端間相互作用と2次元表面上における集団秩序形成
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤修三, 前多裕介
2. 発表標題 非平衡界面が誘起するセルフフリー遺伝子発現における液液相分離現象
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白井瑞穂, 前多裕介
2. 発表標題 温度勾配下における核酸高分子とペプチドの相分離液滴
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋原宙, 前多裕介
2. 発表標題 回転する弾性バブルの振動現象
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂本遼太, 宮崎牧人, 前多裕介
2. 発表標題 対称性の破れと界面摩擦が駆動するアクトミオシン液滴の自発運動
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 別府航早, Ziane Izri, 住野豊, 前多裕介
2. 発表標題 遊泳バクテリア集団が示すキラルなエッジカレントと秩序渦の制御原理
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazusa Beppu
2. 発表標題 Chiral edge current and pairing order transition in the bacterial vortices
3. 学会等名 アクティブマター研究会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryota Sakamoto
2. 発表標題 Symmetry-breaking induced adhesion-independent motility of actomyosin droplets under confinement
3. 学会等名 アクティブマター研究会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前多 裕介
2. 発表標題 高分子共存系の非平衡現象と生命システムへの展開
3. 学会等名 新潟大学化学科集中講義セミナー
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前多 裕介
2. 発表標題 Gene expression and artificial cells: Revisiting the role of interface
3. 学会等名 日本生物物理学会第58回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂本 遼太, 平岩 徹也, 田邊 優敏, 鈴木 和也, 石渡 信一, 前多 裕介, 宮崎 牧人
2. 発表標題 収縮するアクトミオシン構造の綱引きで決まる細胞サイズ液滴内の位置対称性
3. 学会等名 日本生物物理学会第58回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前多 裕介
2. 発表標題 高分子共存系の非平衡現象と生命科学への展開
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福山達也, 敵路燦, 島本勇太, 前多裕介
2. 発表標題 紡錘体の動的形状制御とアクティブゲルモデル
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 別府航早, Ziane Izri, 住野豊, 前多裕介
2. 発表標題 遊泳バクテリア集団のエッジカレントとキラルな秩序渦
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤修三, 坂本遼太, 宮崎牧人, 前多裕介
2. 発表標題 アクトミオシン液滴のダイナミクスと空間対称性の制御
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〕

遊泳微生物における新たなキラル集団運動現象を発見
<https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/666>
生体分子モーターによる群れ運動を操る幾何法則を解明
<https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/702/>
動いて並んでつながって。タンパク質が幾何学模様に！
<https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/712>
動きまわる人工細胞、その鍵は摩擦にあり～細胞が狭い空間を利用して運動する仕組みを解明～
https://www.kyushu-u.ac.jp/f/48871/22_0721_02.pdf

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
研究 分 担 者	宮崎 牧人 (Miyazaki Makito) (40609236)	京都大学・白眉センター・特定准教授 (14301)	
研究 分 担 者	島本 勇太 (Shimamoto Yuta) (80409656)	国立遺伝学研究所・遺伝メカニズム研究系・准教授 (63801)	

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			
米国	ミネソタ大学			