

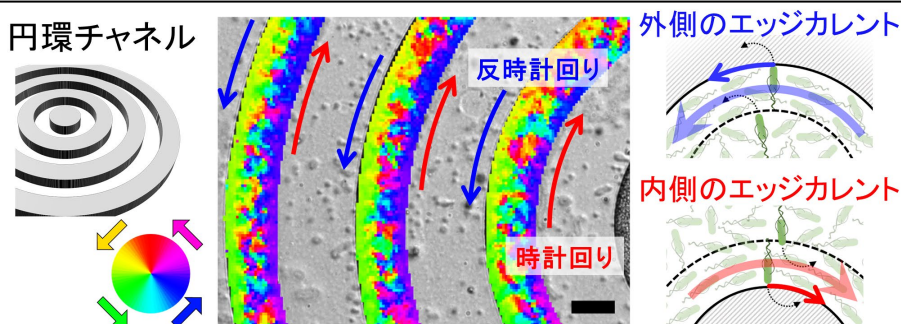
遊泳微生物における新たなキラル集団運動現象を発見

水中を泳ぐ微生物や魚のように、自律的に動き、群れや渦といった秩序だった集団運動を示す物質群をアクティブマターといいます。このような集団運動を理解し、複雑な動きや流れを操ることは物質輸送の制御という観点からも重要な課題であります。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ました。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理解されていませんでした。

九州大学大学院理学研究院 前多裕介 准教授、別府航早 同博士課程学生、Ziane Izri 同学術研究員（研究当時）、東京理科大学理学部第一部 応用物理学科 住野豊 准教授らの研究グループは、九州大学大学院工学研究院 山西陽子 教授、佐藤匡 同博士課程学生（研究当時）らと共に、遊泳微生物のバクテリアにおいて運動のキラリティーが誘起する新たな集団運動現象を発見しました。

研究チームは独自のマイクロ流体デバイスを用いて、遊泳微生物のバクテリアを高密度に保ちながら円筒型マイクロウェル内に封入する技術を開発しました。すると集団運動は一方向（上から見て反時計回り）に定まったキラルな渦運動となることを発見しました。これはマイクロウェルの壁近傍で安定した流れ（エッジカレント）が出現することに起因し、複数のキラル渦が入り乱れる状況においても、エッジカレントが渦同士の回転方向を揃えることを明らかにしました。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示しています。本研究で明らかにした新たな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ます。

本研究成果は、2021年9月24日（米国東部時間）に米国科学雑誌「Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America」で公開されました。



（参考図）遊泳バクテリア集団が示すキラル集団運動現象。
バクテリアは壁に沿ってエッジカレントと呼ばれる安定な集団運動を形成する。

研究者からひとこと：上面の材料を変えるという非常にシンプルな発想から、渦の対称性が破れるということの世界で初めて発見しました。本研究が今後のキラリティーによる集団運動制御に関する研究の先駆けとなることを期待しています。また、大学院に入学してから目標にしていた論文誌に掲載できて、とても達成感を感じています。

遊泳微生物における新たなキラル集団運動現象を発見

【研究背景】

自然界ではしばしば、鳥や魚などの生物が多数集まることで群れを成し、集団秩序を形成します。そのような自発的に運動する機構をもつ物質群をアクティブマター(注 1)と呼びます。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(注 2)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ます。ミクロな運動、中間サイズの渦ペアの秩序形成、マクロな集団運動が複雑に相互作用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世界中で研究が行われています(図 1)。

これまでに、アクティブマターの運動や向き
の性質を変えることで、集団運動に及ぶ影響
が調べられてきました。しかし、自然界に広く
見られる集団運動を理解するという点では、
遊泳微生物、鳥や魚、そして私たち人間にも
備わる、ある重要な性質が十分に考えられて
いませんでした。その性質とは、アクティブマ
ターの利き手、キラリティー(注 3)です。

【研究内容】

私たちの右手と左手が回転させても同一に
ならないように、物体を鏡に写した時に、その
像と重ね合わせることができない性質をキラ
リティー(または鏡像対称性の破れ)といいま
す。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ますが、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「運動のキ
ラリティー」が知られています。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ります。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ます。しかし、
測定手法が未発達であったため、運動のキラリティーと集団運動の関係は十分に理解されていませんでした。

そこで本研究では、Polydimethyl siloxane (PDMS) で作られた円筒型の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(注 4)を開発しました。側面は滑らかでバクテリア
の運動方向に偏りを生むことはありません。ところが、こ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ました(図 2)。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り
ました。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ます。さらに、バクテリア集団を円環状のマイクロチャンネルに封じ込めた
ところ、チャンネルの曲率によらない安定な流れが壁面(端)に沿って生み出されることから、この集団運動を「エ
ッジカレント(端の流れ)」と名付けました。エッジカレントは決まった方向に流れており、外側の端では反時計回
りに、内側の端では時計回りにと、運動のキラリティーを反映したものであることが明らかとなりました(図 3)。

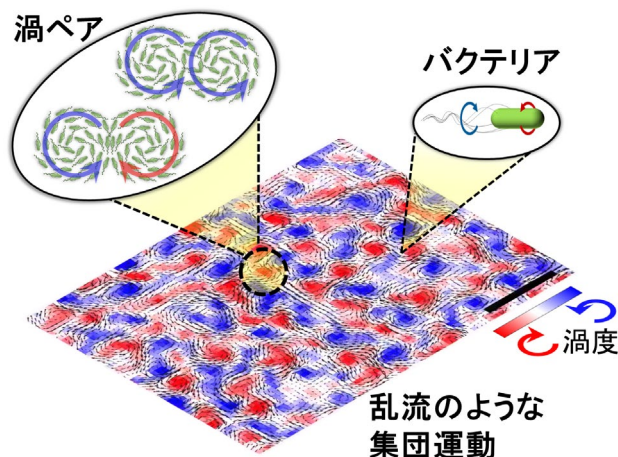


図 1. 遊泳バクテリアの集団運動とアクティブ乱流。水中を
遊泳するバクテリアが高密度になると、運動方向を揃えて
渦を巻き、多数の渦が激しくうごめく不規則な集団運動が
起こる。これはアクティブ乱流と呼ばれ、集団運動の物理
法則を理解する上で重要な現象の1つである。

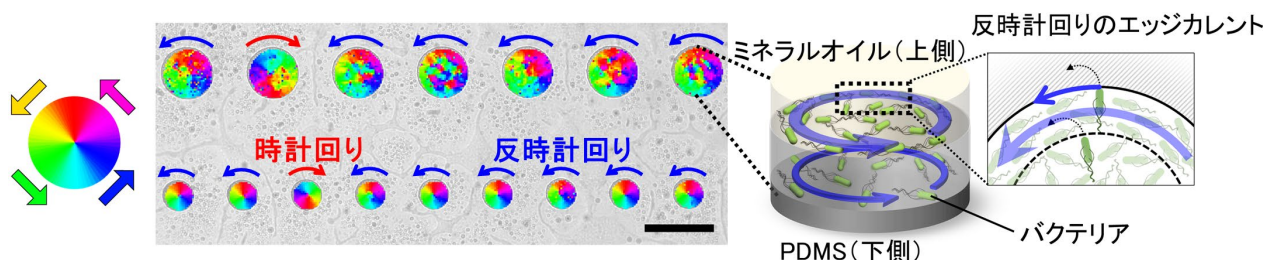


図 2. マイクロウェルに封入した遊泳バクテリアのキラル集団運動現象。カラーマップは運動方向を色で表して
おり、実験では反時計回りの渦運動が支配的に出現した。右にはマイクロウェル内でのキラル集団運動の模
式図と、壁面(端)と衝突したバクテリアが反時計回りのエッジカレントをつくる模式図を示している。

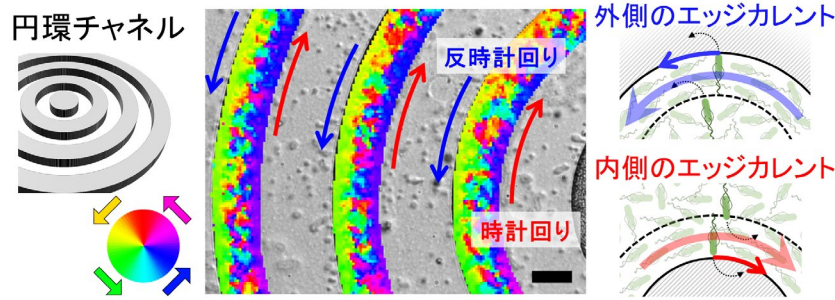


図 3. 円環マイクロチャンネルにおけるキラル集団運動現象とエッジカレント。マイクロチャンネル外側の壁面（端）では反時計向きのエッジカレントが起こり、内側では端に沿った時計回りのエッジカレントが生じる。

このエッジカレントは壁に沿って起こるため、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します。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、図 4）において、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ました（図 4）。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、Vicsek モデル（注 5）による理論解析から明らかにしました。これらの結果は、運動のキラリティーが集団運動を制御する重要なファクターとなることを意味しています。

【今後の展開】

近年、アクティブマターの集団運動の理解と制御は、物理学、工学、生命科学で注目を集める重要な研究領域となっています。本研究で注目した運動のキラリティーは、バクテリアのみならず真核細胞や動くタンパク質、自発的に運動する微粒子など、広くアクティブマターに見出されるものです。エッジカレントの発現機構とその普遍性を明らかにすることで、アクティブ乱流のように複雑な物理現象の解明に新たな展開をもたらすと期待されます。応用面においても、キラル渦による物質攪拌およびエッジカレントによる物質輸送を行う新たなマイクロ流体デバイスの開発や、液体中を泳ぐマイクロロボット集団の自律的制御などの物質輸送工学の発展にもつながると考えられます。

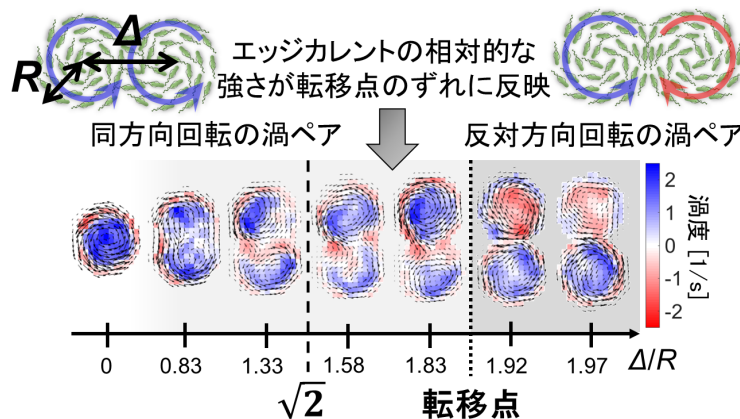


図 4. キラル渦の渦ペア秩序転移。エッジカレントが2つのキラル渦の同方向回転を安定化させる。

【論文情報】

タイトル: Edge Current and Pairing Order Transition in Chiral Bacterial Vortices
(バクテリアのキラル渦におけるエッジカレントと渦ペア秩序転移)

著者名: Kazusa Beppu, Ziane Izri, Tasuku Sato, Yoko Yamanishi, Yutaka Sumino, Yusuke T. Maeda

掲載誌: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America

DOI: 10.1073/pnas.2107461118

2021 年 9 月 24 日 (米国東部時間) オンライン版掲載

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 JP16H00805, JP18H05427, JP20H01872, JP21K18605(研究代表者:前多裕介)および JP16H06478, JP19H05403, JP21H00409(研究代表者:住野豊)の支援を受けて行われました。

【用語解説】

注 1) アクティブマター

自律的に動き、互いに相互作用しあう粒子の総称。小さくは微生物バクテリア、真核細胞、アリなどの昆虫、さらには魚や鳥、ヒツジやヒトなど大型動物も含む。近年は、自律的に運動するコロイド粒子も含み、生物・非生物を問わない広い概念となっている。

注 2) 集団運動

鳥の群れや魚群の渦など、自律運動する物体・物質群(アクティブマター)が多数集まって、互いに向きを揃えるなどの相互作用をすることで出現する特徴的な運動様相。微生物バクテリアも集団で渦を形成し、多数の時計回り・反時計回りの渦から成る複雑な乱流様のパターンを出現させる。

注 3) キラリティー

人間の手のひらのように、元の物体と鏡に写した鏡像とが重なり合わない(鏡像対称性がない)性質。微生物バクテリア(本研究では大腸菌)は後ろから見て、鞭毛を反時計回りに回転させ、菌体を時計回りに回転させて泳ぐためキラリティーを有している。特に、界面近傍では、面を転がるように泳ぐことで、底面に対しては時計回りの軌道を描く。この運動に現れるキラリティーこそが、一方向の渦が出現する要因となる。

注 4) マイクロ流体デバイス

微細加工技術を利用して 100 万分の 1 メートル(マイクロメートル)～1 万分の 1 メートル(100 マイクロメートル)程の幅や厚みをもつ微小な流路や容器からなる小さなデバイス。透明で顕微鏡観察に適している。

注 5) Vicsek モデル

アクティブマターの代表的な物理モデル。「自発的な運動」と「周りの粒子と向きを揃える」というアクティブマターの最も重要な性質を取り入れた理論モデルであり、運動方向を長距離にわたって揃える秩序相や群れ運動が現れることが知られている。

【お問合せ先】

＜研究に関するお問い合わせ＞

九州大学 大学院 理学研究院 准教授 前多 裕介

TEL:092-802-4071 Mail: ymaeda@phys.kyushu-u.ac.jp

＜報道に関するお問い合わせ＞

九州大学 広報室

TEL:092-802-2130 Mail: koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

東京理科大学 広報部広報課

TEL:03-5228-8107 Mail: koho@admin.tus.ac.jp