



微生物集団の渦巻き運動を操る幾何法則を発見

海中や水族館で目にする魚の群れなど、自律的に動き、時に集団となって群れや渦といった大きな構造を形成する物質群を「アクティブマター」といいます。アクティブマターは美しい生態現象と関係がありますが、農業被害をもたらすイナゴの大群や、人間を死に至らしめるがん細胞集団など我々の生活に悪影響を及ぼすものもあり、その動きの制御は社会的にも重要な課題と言えます。

九州大学大学院理学研究院の前多裕介准教授の研究グループは、アクティブマターの代表例である微生物バクテリアの集団渦運動を最新の微細加工技術で解析し、微生物集団の複雑な渦巻き運動がシンプルな幾何学的法則で制御できることを初めて明らかにしました。示された集団運動の制御原理は、群れる生物に共通する運動メカニズムを明らかにする鍵となることが期待されます。

今回の研究では、半径 R の円を二つ、それらの中心間距離を Δ だけ離し、2つの円が重なった形の小さな容器を作成し、容器内でバクテリアの集団運動を計測しました。すると、2つの渦からなる「渦ペア」パターンが出現すること、そして Δ/R の値を調節することで渦ペアを制御できることがわかり、この幾何法則を Vicsek モデルという群れ運動に関わる理論的モデルから導出することに成功しました。さらに、より多くの渦が存在する場合でも Δ/R の値を調節するだけで、渦運動の組み合わせを自在に統制できることが明らかになりました。

今回見出された幾何法則は、そのシンプルさから他の集団運動にも適用することができると考えられます。例えば、人工知能が搭載された自動車の渋滞の回避や、互いに衝突せずに安全かつ効率的な運転が求められるドローンの集団的な自動運転の実現に大いに貢献すると期待できます。

本研究成果は、2017年7月13日に英国科学雑誌「Soft Matter」のオンライン速報版に掲載されました。近日中に確定版が掲載される予定です。

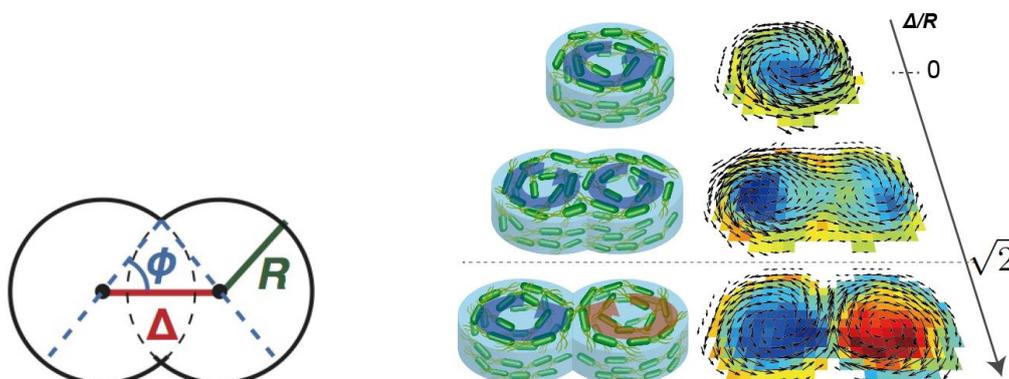


図1. (左)設計したマイクロウェルの幾何形状とその幾何的パラメータ。

(右) 渦ペアの転移: Δ/R の値によって、回転方向が同一の渦ペアから反対向きの渦ペアへ転移する。

■背景

水族館で誰もが目にする美しい魚の群れ、時に恐怖さえ感じてしまうほどの大空を黒く染め上げる鳥の大集団、肉眼では見えないが我々の体内に確かに存在する無数の菌など、自然界には自律的に動く要素「アクティブマター」で溢れています。その代表例である微生物バクテリアは、高密度になると局所的に運動方向がそろい大小さまざまなサイズの渦やジェット流が混在する集団運動を示すことが知られています。しかし、アクティブマターの渦運動に潜む物理的・数理的な法則性は十分に理解されていません。我々は、集団運動の一種である「渦」の制御を通じて、その物理的メカニズムの解明を行いました。

■内容

Polydimethyl siloxane (PDMS) マイクロウェルを用いて、 $10\mu\text{m}$ から $50\mu\text{m}$ まで様々な半径の円を二つ組み合わせた幾何形状の微小な入れ物を作成しました。この形状は①円の半径 R 、②二つの円の中心間距離 Δ で特徴付けられます(図1左)。ウェルに閉じ込められたバクテリア集団(大腸菌 *Escherichia coli* RP4979) は、二つの渦をつくるような集団運動を示し、渦同士が衝突する「渦ペア」を形成しました。中心間距離 Δ が小さいウェルでは回転の向きが揃った渦ペアが、 Δ を大きく設定したウェルでは回転が反対となる渦ペアが現れました。興味深いことに、2つのパターンの切り替わりには法則性がありました。 Δ/R 、すなわち[2つの渦の中心間距離]÷[渦のサイズ]を意味する数を詳細に調べると、渦ペアが切り替わるのは「 $\Delta/R=1.4$ 」のときであることがわかりました。集団運動の物理モデルである Vicsek モデルに基づいた理論的解析を行ったところ、2つの異なる渦ペアが等確率に発生する幾何的条件として $\Delta/R=\sqrt{2}=1.414\dots$ という解が存在することがわかりました。発見された幾何法則を応用することで、四つの円を組み合わせた複雑な境界に対しても、渦パターンの組み合わせが理論と実験で一致しました。

■今後の展開

アクティブマターの代表例であるバクテリアの集団運動を制御する幾何法則は、生物にとどまらず磁性体や超伝導体とも関連があると考えられます。超伝導体には、磁場をかけると内部に渦電流の格子が出現するタイプとそうでないものがあります。その転移もまた幾何に由来するパラメータの比によって区別されることが知られており、その詳細を今後明らかにすることで相転移現象の普遍法則の解明につながると期待されます。さらに基礎物理学のみならず、アクティブマターの集団運動の制御を通じて、人工知能を搭載した車の渋滞回避やドローンの集団飛行といった将来的な課題に対しても有益なモデルを与えると期待されます。

■論文情報

Geometry-driven collective ordering of bacterial vortices

Kazusa Beppu, Ziane Izri, Jun Gohya, Kanta Eto, Masatoshi Ichikawa, and Yusuke T. Maeda

Soft Matter, 2017年7月13日(木) オンライン版掲載

本研究は、科学研究費補助金：新学術領域研究(研究領域提案型)「バクテリア集団運動にみるアクティブ液晶の秩序形成と制御」(研究代表者：前多裕介)の一環で行われ、国立研究開発法人科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業(さきがけ)、Human Frontier Science Program 研究グラントの支援も受けました。

■用語解説

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。

集団運動

アクティブマターの集団において、運動方向を揃える近距離の相互作用が粒子間でおこり、長距離にわたって向きが揃い一体となって動く現象。渦では、微生物の渦、イワシの渦、アリのデススパイラル、音楽ライブでのモッシュなど様々なスケールに出現する。

マイクロデバイス

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（1000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おり、生体適合性も高い Polydimethyl-siloxane というシリコン素材で様々な形状の流路を作成することができる。

Escherichia coli (*E. coli*)RP4979 株

原核生物で微生物バクテリアの一種。そのうち変異体 RP4979 株は常に直進運動を示すことが知られており、アクティブマターとして理想的な性質を持っている。

Vicsek モデル

アクティブマター集団の数理モデル。点粒子の運動方向が、一定の距離内にいる他の粒子の運動方向との平均の向きになろうとする相互作用を導入したもの。