

Geometric design principle for active ordering: From bacterial turbulence to cytoskeletons

別府, 航早

<https://hdl.handle.net/2324/4784404>

出版情報 : Kyushu University, 2021, 博士 (理学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 別府 航早

論 文 名 : Geometric design principle for active ordering:
From bacterial turbulence to cytoskeletons
(アクティブマターが示す秩序構造の幾何的設計原理:
バクテリア乱流から細胞骨格系まで)

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

局所的なエネルギーを消費し自己駆動する物質群をアクティブマターという。微生物の群れから魚群の渦や鳥の群れなど、アクティブマター集団は要素間の相互作用を介して多彩な秩序形成（集団運動）を示す。その中でも、最も難解で注目を集めている現象がアクティブ乱流である。局所的な配向秩序を保ちつつも、運動方向を不規則に変化させることで、粘性領域にもかかわらず、古典乱流を彷彿とさせる乱流のようなダイナミクスが、遊泳バクテリアや精子、真核細胞など多種多様な系で観測されている。それらの普遍的理解の枠組みは未だ明らかになっておらず、アクティブマター物理学の中心的な課題となっている。さらに、古典乱流と同様、その制御原理の解明はアクティブ乱流の基礎的な理解のみならず、応用面にも発展する重要課題である。アクティブ乱流は、時計回りや反時計回りの多数の渦から構成されており、先行研究では、それらに幾何学的な空間拘束を課すことで、相互作用する秩序渦に幾何学的な性質があることが示唆されたものの、その詳細な幾何原理は未解明である。我々は、アクティブ乱流の組成たる相互作用する秩序渦の幾何学的制御を通じて、アクティブマター集団に潜む幾何的普遍性の理解を目指す。

まず我々は、アクティブマターのモデル生物である遊泳バクテリアを用いて、バクテリア乱流に内在する秩序渦の幾何学的制御原理を究明した。アクティブ乱流中に出現する渦には特徴的なサイズがあり、二つの相互作用する渦には、互いに同方向に回転する渦ペア（Ferromagnetic vortices, FMV）と反対向きに回転する渦ペア（Anti-ferromagnetic vortices, AFMV）の二種類ある。これらの秩序渦は、渦の半径 R と中心間距離 Δ の二つの幾何学量で特徴づけられる。秩序渦の幾何学依存性を明らかにするため、Polydimethylsiloxane (PDMS)を用いた微小流体デバイスを設計し、様々な R と Δ で規定される双子型円境界のマイクロウェルに高密度バクテリア集団を拘束した。実験の結果、渦の中心間が近いと FMV、離れていると AFMV が出現し、これら渦ペアパターンは、無次元量 Δ/R が 1.4 程度で転移するということが見出された。この幾何学に基づいた転移メカニズムを明らかにするため、集団運動の最小モデルである Vicsek モデルを用いて理論解析を行った。我々は、二つの渦が衝突する代表点（円が交差するチップ）で粒子が極性配向相互作用した結果、FMV や AFMV のパターンが出現すると考え、 Δ/R で決まる衝突角度の制約を含む粒子の配向ダイナミクスから平均場モデルを構築した。この理論解析により、FMV と AFMV が等確率に出現する点が $\Delta/R = \sqrt{2}$ となることが明らかになり、相互作用する秩序渦には極性配向の対称性があることが示唆された（図1上）。

FMV/AFMV 転移の幾何法則が明らかになった一方で、同時に長距離の長さスケールになると渦ペアにおいては AFMV が頑強に出現することが示唆された。これは、アクティブ乱流のエネルギースペクトルにおける逆カスケードが特徴的な長さスケールまでで限定されることとも一致する。このような限界を打破し、巨視的な回転流に制御できる鍵となるのが、ミクロな対称性の破れであ

るキラリティー（掌性）である。過去の研究では、アクティブ乱流におけるキラリティーの影響は未解明問題となっているため、我々は運動のキラリティーを誘起する界面の物性に着目し、キラルアクティブマターの実現に取り組んだ。遊泳バクテリアは界面との流体相互作用により表面上を（上から見て）時計回りのキラルな遊泳運動をする。そこで、上下非対称界面（上面：oil, 下面：PDMS）を持つ新たな流体デバイスを作製し、キラリティーのバイアスの影響を調査した。実験の結果、円形マイクロウェルにおいて、95%以上の確率で反時計回りのキラルな渦が出現した。重要なことに、大きなウェルやチャンネルにおいては、境界から離れた領域でアクティブ乱流が形成される一方で、境界近傍では常に反時計回り集団運動（エッジカレント）が出現することが見出された。さらに、巨視的な回転流を誘起するキラルなエッジカレントが相互作用する秩序渦にどのような影響を与えるかを調査した。その結果、反時計回りの FMV が支配的に出現し、FMV と AFMV の転移点が $\Delta/R = 1.9$ 程度となることがわかった。個々のキラリティーによる境界付近における配向のバイアスをエッジカレントの効果として粒子の配向ダイナミクスに取り入れ、理論解析を行ったところ、エッジカレント無しの転移点 $\Delta/R = \sqrt{2}$ からのずれが、極性配向相互作用の強さとエッジカレントの強さの無次元量の比で記述されることが見出され、アクティブ乱流を構成する秩序渦のキラリティーを介した新たな幾何学的制御原理が明らかとなった（図1下）。

アクティブマターの普遍的理解の枠組みを探求するには、他のアクティブマター系への拡張が不可欠である。そこで我々は、モータータンパク質（キネシン）に駆動される細胞骨格（微小管）系の motility assay を用いて、同様のマイクロウェル設計により幾何法則を調査した。運動する微小管は遊泳バクテリアと異なり、無極性配向（ネマチック）相互作用を示すため、FMV/AFMV 転移は示さないことが理論的に予測されていた。双子型円境界を用いて実験を行ったところ、集団運動に特定の方向性はない一方で、 Δ/R が小さいときには境界に沿って水平に伸びるバンドルパターンが出現し、 Δ/R が大きいときにはチップ同士を繋ぐブリッジパターンが出現した。自己駆動ロッドモデルの理論解析によると、粒子の衝突角度が 90° を起点として、これらのパターンが転移する、すなわちバクテリアの秩序渦と同様、 $\Delta/R = \sqrt{2}$ の幾何法則が対称性の異なるネマチックなアクティブマター系にも存在することが明らかとなった。以上のような幾何学的制御原理の研究は、アクティブマターにおける幾何学的普遍性の解明からアクティブマター集団を自在に整流することを可能にする新たな技術の開発まで多岐に渡る分野での貢献が期待される。

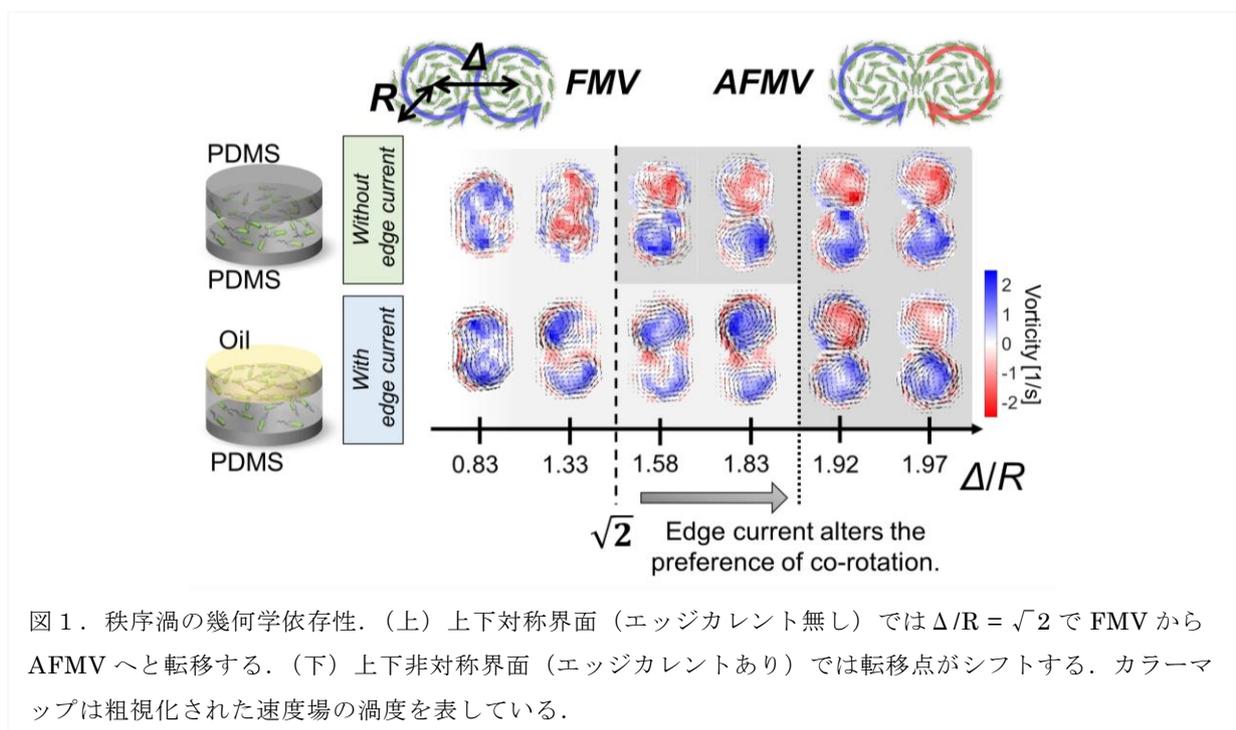


図1. 秩序渦の幾何学依存性。(上) 上下対称界面（エッジカレント無し）では $\Delta/R = \sqrt{2}$ で FMV から AFMV へと転移する。(下) 上下非対称界面（エッジカレントあり）では転移点がシフトする。カラーマップは粗視化された速度場の渦度を表している。