

A03 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

九州大学理学研究院物理学部門 前多裕介

(1) バクテリア集団運動の幾何学的な性質と制御手法の確立

自律的に動く粒子群をアクティブマターとよび、粒子間の配向相互作用に由来する集団運動が生じる特徴を持つ。代表的なアクティブマターであるバクテリアは、境界のない2次元系において多数の渦やジェット流が混在する乱流のような集団運動を示すが、円形境界のような幾何的制約の下では単一の渦運動が現れ、それらの渦同士を相互作用させる幾何的制約では渦同士の回転軸が平行の強磁性体的な渦(Ferro-magnetic vortices, FMV)と反平行の反強磁性体的な渦(Anti-ferromagnetic vortices, AFMV) の二つの集団的回転モードが出現する[1]。しかし FMV-AFMV の遷移に関するメカニズムは明らかではなく、集団運動と境界形状の間にひそむ物理的なルールの解明が急務である。本研究では境界形状を自在に設計する新たな手法を開発し、集団渦運動の転移に関わる幾何法則の解明を行った。

本研究ではバクテリア大腸菌 (*E. coli*) の直進性変異体 RP4979 を用い、Polydimethylsiloxane チャンバーにバクテリア懸濁液を高密度に封入する手法を確立した。図 1(a)に示すように、半径 R の2つの円が中心間距離を Δ だけ隔てた形状のピーナツ型境界において、2つの渦を一定の相互作用距離で拘束するようにバクテリアを封入すると、2つの渦が対をなした「渦ペア」が出現した。渦ペアには、同じ向き of 強磁性ペア FMV と反対向きの反強磁性ペア AFMV があり、その転移は幾何パラメータの比 $\Delta/R=1.4$ を境にして起こることがわかった (図 1(b))。バクテリア極性的な配向相互作用をする自己駆動粒子とみなし、さらに境界と Nematic 相互作用をすることを考えた Vicsek モデルを平均場近似の下で解くと、 $\Delta/R=\sqrt{2}$ で2つのパターンが等確率で出現し、その前後でパターンが変化することがわかった [2]。以上の結果から、バクテリア集団運動には一定のサイズをもつ渦としての性質が潜んでおり、渦同士の相互作用に関する幾何法則が巨視的なパターンを支配することを明らかにした[2]。

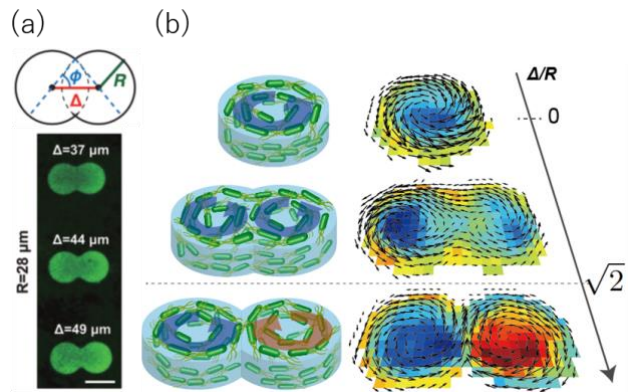


図 1. 境界形状が誘起するバクテリア集団渦運動. (a) 作成したマイクロウェルのデザインと拘束された細胞集団. スケールバー: 50 μm . (b and c) 強磁性的渦ペア、および(d and e) 反強磁性渦ペアの渦度マップと速度場の方向マップ.

(2) フラストレートされたバクテリア渦ペアの転移点シフト

渦同士を直接衝突させる双子型マイクロウェルにおいては、FMV と AFMV の二つの渦ペアパターンが出現し、渦の中心間距離と渦の半径の比率が閾値 $\sqrt{2}$ を越えると AFMV パターン

へ転移する[2]。次に、3つの渦が相互作用するフラストレーションがある系においてFMVおよびAFMVの転移点を詳細に解析した。3つの渦ではFMVもしくはAFMVとFMVが共存する状態が安定となり、パターンの転移点は $\Delta/R=\sqrt{2}$ ではなく $\Delta/R=1.7$ の近傍で転移するようになることが分かった。転移点シフトは文献[1]でも見られており、矛盾しない結果である。今後は理論的な解析を進めることで、フラストレーション下の幾何法則を明らかにしてゆく。

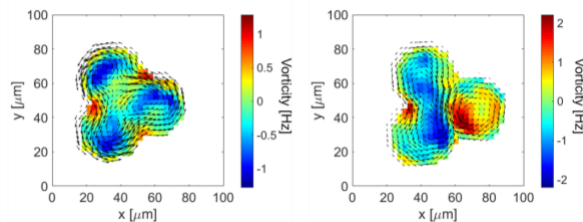


図2: 三つ子型マイクロウェルにおける集団運動の渦度マップ(左: $\Delta/R=1.58$, 右: $\Delta/R=1.83$)

(3) 無細胞遺伝子発現の幾何学的スケーリング則

さらに、集団運動のみならず、生命現象の基本的反応過程である遺伝子発現に体する幾何学的な高速の影響も明らかにした。遺伝子発現はmRNAへの転写そしてタンパク質への翻訳過程の連鎖的な化学反応からなり、細胞を支える中心的な化学反応である。細胞のサイズはバクテリアから受精卵まで、数 μm から1mmと 10^3 倍も大きさが異なりながらも、自律的に遺伝子発現は制御されている。表面の寄与が大きくなる微小な細胞では、遺伝子発現にどのような特徴がみられるかを明らかにするため、油中水滴に遺伝子発現する抽出液を封入し、遺伝子発現実験と理論モデルの解析を行った。

中性脂質に囲まれる細胞サイズの油中水滴内で、DNAからmRNAそして緑色蛍光蛋白質GFPへの転写・翻訳を行うセルフフリー遺伝子発現を実装した。すると、水滴の半径Rと内部の遺伝子発現量を定量的に調べると、液滴の体積($\propto R^3$)の増大に対して遺伝子発現量は比例せず、遺伝子発現量は R^4 で増大する非線形性を示すことを見出した。この非線形な依存性は、水滴表面における抑制的な翻訳過程を考慮することで説明できる。転写翻訳が起こるバルクの体積と表面近傍の抑制層の体積の比率が、系のサイズが変化するためである(図3)[3]。この結果は、細胞の区画化が遺伝子発現を制御する機能を持つことを示唆する。

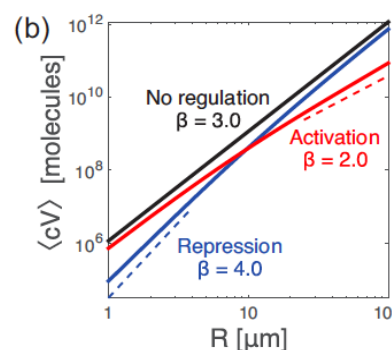
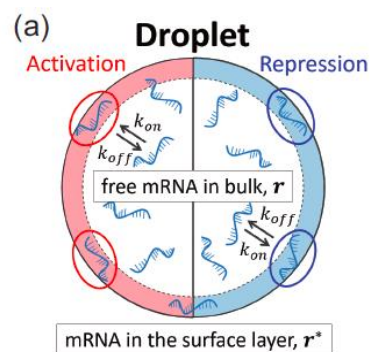


図3: 遺伝子発現量の区画サイズ依存性。

参考文献:

- (1) H. Wioland, et al. *Phys. Rev. Lett.* 110, 268102 (2013); *Nature Phys.* 12, 341 (2016).
- (2) K. Beppu, Z. Izri, J. Gohya, K. Eto, M. Ichikawa, Y.T. Maeda. *Soft Matt.* 13, 5038-4043 (2017)
- (3) R. Sakamoto, V. Noiraux, Y.T. Maeda, *bioRxiv*:251306 (2018)