

## 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 前多裕介

自律的に動く要素（アクティブマター）が多数あつまると、運動方向の相関が長距離にわたって持続する集団運動が出現する。アクティブマターの代表例はロッド形状をしたバクテリアである。これまでに枯草菌 *B. subtilis* の懸濁液を円柱状の油中水滴に封入すると、菌が配向した渦を形成することが報告されていた[1]。従来の研究では与える境界形状が球・円型に限定されており、より多様な境界形状下でのアクティブマターの秩序形成を探求するため、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、バクテリア集団が示す新たな集団運動の探索とそのメカニズムの解明を目指している。

実験では、バクテリア大腸菌 (*E. coli*) の直進性変異体 RP4979 を用いており、タンブリングによる方向転換のゆらぎを減じている。さらに、酸素透過性に優れ、境界形状を光造形手法で設計可能な Polydimethylsiloxane (PDMS) チャンバーを作成した (図1)。

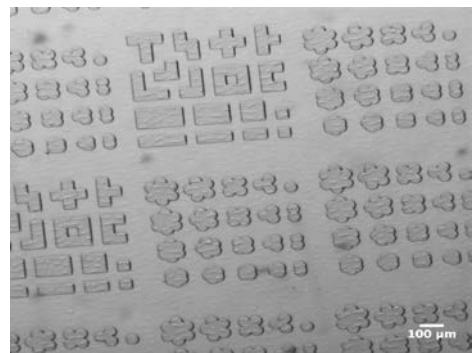


図1. 作成したマイクロウェル

まず我々は、円形境界に封入されたバクテリアの集団を計測し、PIVによりその運動パターンを解析した。微小な円形境界内でバクテリア集団は一方向の回転流れを示し、単一の渦を形成することがわかった (図2)。

この渦は円形境界の半径を大きくしてゆくと、単一の渦とならず乱れたパターンとなる。Vortex order parameter から、その閾値は直径  $70 \mu\text{m}$  の円形境界であり、これは擬二次元平面で RP4979 がメソスケール乱流構造をとる際に現れる特徴的な渦サイズの2倍に相当する値であり、渦の共存が乱れたパターンを誘起したと考えられる。集団運動を単一渦に制御するには、境界サイズと自由境界における相関長の対応が重要であることを示している。

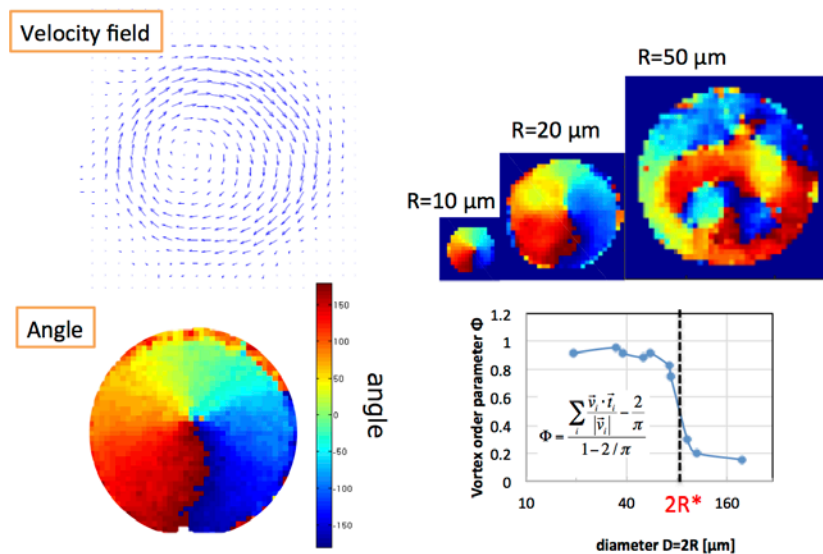


図2. 円形境界に封入されたバクテリア集団の渦運動と乱れたパターン

次に、2つの円が中心を同一線上にとりながら、部分的に重なり合ったピーナッツ型境界のもとでのバクテリア集団運動を計測した。2つの円の重なりが大きく、楕円形に近いような境界では単一の渦が形成されるに留まるが、次第に重なる領域を減じてゆくと渦同士が相互作用する境界形状となり、2つの渦が対をなした「渦ペア」が新たなパターンとして出現した。ペアをなす渦の回転は、互いに反対向き・同じ向きの双方が観測されることがわかった。しかし渦同士の相関距離を変化させたところ、単一渦、同じ回転方向の渦ペア、逆の回転方向の渦ペア、という順に遷移する” Collective ordering” を見いだした (図3)。

さらに、境界形状に誘起される渦ペア形成とその遷移メカニズムを理解するため、壁近傍で運動するバクテリアの Hydrodynamic trapping[2] を考慮した理論モデルの解析を行った。鞭毛回転のトルクによりバクテリアが壁と平行ではなく一定の角度を形成したまま泳ぐと、2つの円が接する境界領域の幾何学的な性質から、強磁性的な渦ペアから反強磁性へと遷移する collective ordering の存在を定性的に説明しうることを見出した。本年度の残りの期間内に、蛍光顕微鏡により1細胞が壁となす角度を解析し、渦ペア形成と遷移を実験・理論の両面から解明する。

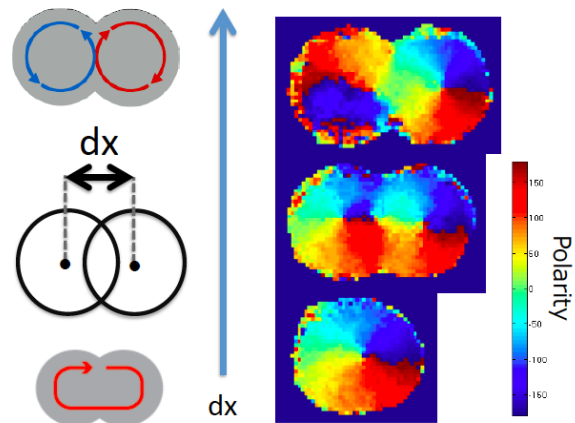


図3. バクテリア渦ペア形成の collective ordering

また平行して、自己駆動粒子多体系の計算機シミュレーションも行った。自己駆動粒子2体が近接したとき、極性を持たずに液晶分子のようにネマチック相互作用で配向するとし、壁と自己駆動粒子の衝突による配向もネマチックであるとした。個々の粒子の速度は一定で、配向相互作用にノイズを加えている。ノイズが小さい場合には、自己駆動粒子が壁に沿って配向しながら運動し、左回りまたは右回りのいずれかで周回運動した。現在、ハードコアポテンシャルやWCAポテンシャルで粒子に大きさを与えたモデルへ改良を進めている。

次年度の課題は、バクテリアの局所配向の光制御と秩序形成の制御である。高密度な懸濁液中で運動するバクテリア集団内には、液晶のように位相欠陥が出現すると考えられる。位相欠陥を制御することは、翻って集団運動の秩序形成の制御につながると期待される。我々は他の研究に関連して分子や細胞を制御する光技術の開発を行っている[3]。本手法を援用することで、バクテリア集団内の位相欠陥を制御し、その秩序形成の仕組みを明らかにしたい。

#### 参考文献：

- (1) H. Wioland, et al. *Phys. Rev. Lett.* 110, 268102 (2013).
- (2) O. Sipos, K. Nagy, R. Leonardo, and P. Galajda, *Phys. Rev. Lett.* 114, 258104 (2015).
- (3) T. Fukuyama, A. Fuke, M. Mochizuki, K. Kamei, Y.T. Maeda. *Langmuir* 31, 12567-12572 (2015); 前多 裕介, 福山 達也. 日本物理学会誌 (2016).