

## A03 細胞組織の動力学の理解へ向けた自己駆動粒子の集団運動の解析

東北大学 材料科学高等研究所 (WPI-AIMR) 義永 那津人

細胞組織では、個々の細胞が自発的に運動・変形しながら集団で構造を形成し機能をコントロールしている。細胞運動は生体分子の協同性から生まれる非常に複雑な現象であり、一細胞の運動であっても、その理論的理解に向けて解決すべき点が多く残されている。一方で、自発的に運動する物体の集団に注目すると、個々の物体の個性は重要ではなくなり、ある種の普遍的な集団運動が実現されることが期待される。Vicsek モデルやアクティブブラウン粒子と呼ばれるモデルは、粒子ベースの理論モデルの代表例であり、非常に簡単でありながら様々な集団運動を再現し、また、少なくとも定性的には、多くの実験で見られる現象を説明することができるため精力的に研究が行われている[1]。

我々は、自発的に運動する粒子の中でも、周囲の流体の運動を伴うものに注目し理論的研究を行ってきた。各粒子が周囲の流体を駆動する *squirmers* や、非等方な化学反応によって自発的に粒子周辺に温度や濃度の勾配を作ることによって運動する自己泳動現象に注目してきている。前者は、例えば微生物の集団などの数理モデルとして知られており、後者はヤヌス粒子の運動のモデルになっている。これらのモデルでは流体力学的相互作用を考慮する必要があるが、そこには多くの困難を伴う。流体相互作用は、長距離力であり、多体相互作用であり、さらに、近距離で発散を伴う。そのため、流体中で粒子が運動する懸濁液のダイナミックスの理論的な解析は、数値計算であっても非常に困難である。我々は、流体相互作用の近距離で生じる大きな力に注目し、様々な粒子配置に対して系統的にこの相互作用を近似的に計算することによって、この近距離での相互作用が *squirmers* の集団配向に重要な役割を

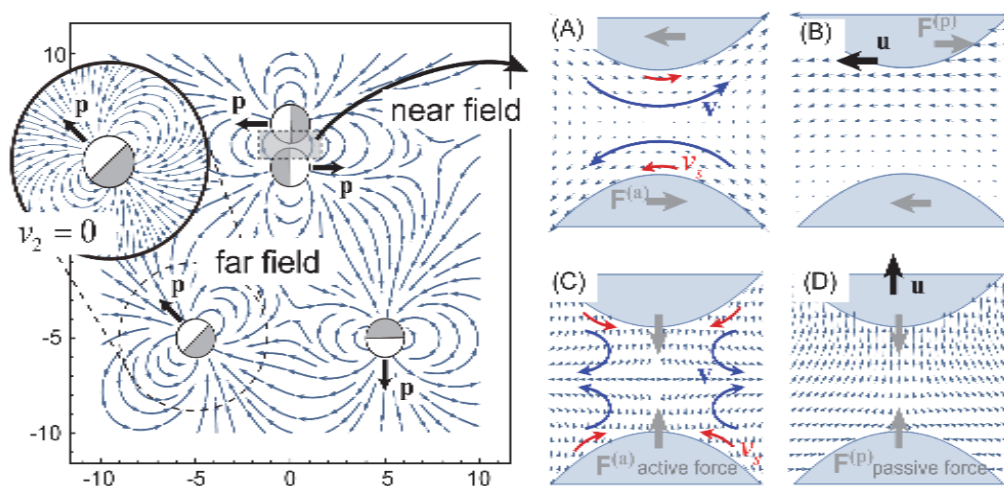


図1. 自己駆動粒子の周囲の流れ場と近距離での相互作用

各粒子の向きに応じて周辺に流れ場を生じ、粒子が孤立している場合には挿入図のような流れ場を周囲に作る。粒子間の距離が十分離れている場合には、この流れ場がゆがむことによって相互作用が生じるが、粒子間の距離が十分近い場合には、粒子間に方向に対して平行 ((C),(D)) か垂直 ((A),(B)) な運動に対して、アクティブな力 ((A),(C)) とパッシブな力 ((B),(D)) がバランスすることによって相互作用が決まる。

果たすことを明らかにした(図1)。また、近距離の流体相互作用のみを取り入れた簡略化モデルを提案し、排除体積相互作用が重要な役割を果たすことを明らかにした。さらに、二流体モデルを用いて、一様配向状態の実現が、流体の遮蔽効果によって生じることを連続体モデルの立場から議論した[2]。

また、千葉大学の北畑裕之氏と共同で、化学反応によって生じるマランゴニ効果で自己駆動される樟脳粒子の周りの化学物質の場の拡散係数が、流体の流れ場によって元の拡散係数よりも非常に大きくなることを理論的な計算によって示し、数値計算によってその正当性を確認した[3]。この結果は、これまで実験と理論との定量的な比較において不自然に大きな拡散係数が必要であったことの原因がマランゴニ効果による流れ場であることを示唆している。

最後に、慶応大学の藤原慶氏のグループと共同で、大腸菌の Min たんぱく質が膜面上で示す振動現象についての理論的研究を行った。膜面の MinD および MinE の濃度場と内部の濃度の双方を考慮したモデルを解析することによって、実験で見られる回転波、極の間を行き来する定在波を再現することができた。また、細胞内の濃度場のダイナミクスを断熱的に消去することによって、波の発生の条件を解析し、また、細胞の形状依存性について明らかにした(図2)。実験では球形のベシクルを用いているために進行波が出やすいが、実際の大腸菌のように細長い形状の場合には定在波がより安定になりやすいことを示すことができた。また、球状であっても、対称性を破って定在波を形成することが可能であることも明らかになった。これらの結果は実験結果と定性的に一致している。

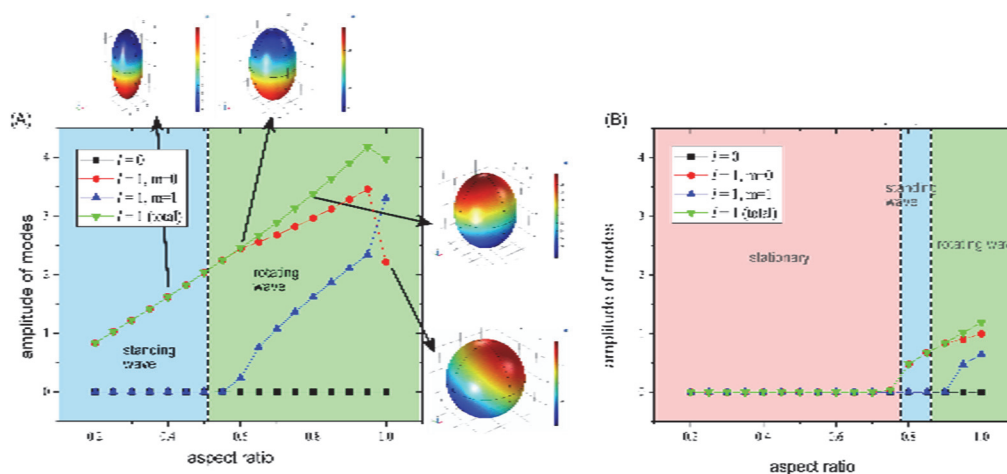


図2. Min たんぱく質が示す楕円体上での濃度場の振動現象

長軸が大きい場合(A)と小さい場合(B)を示す。アスペクト比を変えることによって、球に近い場合には球面上を回転する波が生じるが、形が細長くなるにしたがって二つの極の間を行き来する定在波が安定になる。サイズが小さい場合には、アスペクト比を変えることによって振動状態は消える。振動状態でのスナップショットを各点に示している。

#### 参考文献：

- (1) N. Yoshinaga, *J. Phys. Soc. Jpn.* **86**, 101009 (2017).
- (2) N. Yoshinaga and T. B. Liverpool, *Phys. Rev. E* **96**, 020603(R) (2017).
- (3) H. Kitahata and N. Yoshinaga, *J. Chem. Phys.* **148**, 134906 (2018).