

A03 低レイノルズ数における自己駆動素子の流体効果による集団運動

東北大学大学院理学研究科 内田就也

本課題では繊毛や鞭毛の流体力学相互作用による集団運動の数理的解明を主テーマとし、アクティブコロイドの流体相互作用による集団運動を副テーマとして研究を進めている。2015年度の研究活動は以下の通りである。

・アーキアのべん毛運動による遊泳のモデル作成と解析 (1, 図1)

西坂崇之氏 (学習院大学、A03 班) のグループで行われているアーキア (古細菌) のべん毛運動の研究に参加し、流体力学モデルを作成して遊泳運動の解析を行なった。フィラメント状物体の流体抵抗を解析する近似法として slender body theory を用い、高精度顕微鏡観察によって得られたべん毛ラセンおよび菌体の形状パラメーターから流体抵抗係数を評価した。次にべん毛ラセンの回転率から遊泳速度、回転速度を評価し、実験結果と比較した結果、概ね良い一致を得た。特に、べん毛が菌体軸に対して傾いているために菌体がラセン運動を示すことを示し、遊泳速度の傾き角に対する依存性を解析した。このようなラセン運動はバクテリアの遊泳では確認されておらず、アーキアの特徴とみなせる。

・バクテリア乱流による粒子輸送のモデル作成と解析 (2, 図2)

Hartmut Löwen 氏 (デュッセルドルフ大学) との共同研究により、バクテリア乱流の中に置かれたコロイド粒子のダイナミクスの数値シミュレーションを行なった。バクテリア乱流のモデルとして Toner-Tu タイプの流体力学方程式を用い、コロイド粒子表面でのスリップなし境界条件を数値的に効率よく扱うため、Smooth Profile Method を適用した数値モデルを構築した。シミュレーションの結果、コロイド粒子を添加することにより乱流場の平均流速および粒子の拡散係数が増加することを見出した。これはコロイド粒子が表面に生成した渦を伴って自走することにより流体をアクティブに攪拌することによると解釈できる。さら

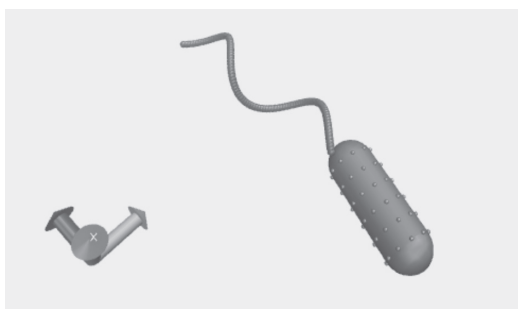


図1. アーキアの流体力学モデル

べん毛が菌体の軸に対して傾いているためラセンを描きながら遊泳する。

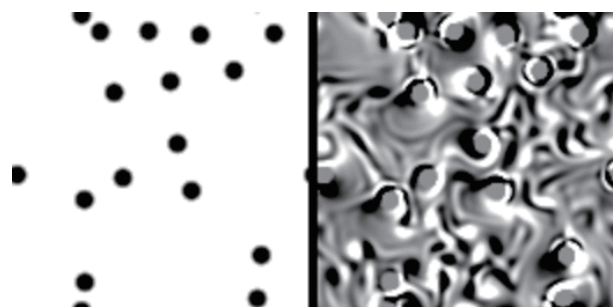


図2. バクテリア乱流のシミュレーション

(左) 粒子の密度場。(右) 流体の渦度場。粒子の近傍で渦が誘起されている。

に粒子数密度を上げたところ平均流速は減少に転じ、粒子を添加しない場合よりも遅くなるという非単調な密度依存性が見られた。これは斥力相互作用によって運動を妨げられた粒子がパッシブな障害物として流れを抑制するためと解釈される。

・ バクテリアカーペットのアクティブ相転移の解析 (3)

Wei-Yen Woon 氏 (国立中央大学、台湾) の実験グループとの共同研究を昨年度に引き続き行い、バクテリアカーペットにおけるべん毛の集団同期転移の解析を行なった。2種類のバクテリア(NMB136 と VI05) を混合して吸着させた単層膜カーペットにおいて、べん毛が整列することにより生成する集団的な流れを、溶液の Na^+ 濃度をコントロールパラメータとして測定した。VI05 の混合比を変えたところ、0~25% までは転移点が Na^+ 濃度の高い方にシフトする一方、25%~50% では秩序変数(流れの強さ)が弱まり、転移挙動の鈍化が見られた。理論モデルとの比較から、これらは相転移の原因が時間的ノイズからクエンチドノイズ(空間不均一性)にシフトしたものと解釈され、クエンチドノイズの強さを推定することができた。

・ 光駆動コロイドの流体同期現象の解析

Pietro Cicuti 氏 (ケンブリッジ大学) の実験グループとの共同研究を昨年度より継続し、光ツイーザーによって駆動されるコロイド粒子の流体力学相互作用による同期現象を解析した。駆動力の変調の振幅とコロイド粒子間の距離を制御することにより、同位相同期と逆位相同期を切り替えることに成功した。解析的計算および Brownian 動力学シミュレーションにより同期状態の相図および粒子の位相ダイナミクスを記述する有効ポテンシャルを計算したところ、実験結果と非常によく一致を得た。

・ 繊毛メタクロナル波による輸送効率の解析

Ramin Golestanian 氏 (オックスフォード大学) との共同研究を昨年度より継続し、繊毛が流体力学相互作用を介して自発的に形成する進行波(メタクロナル波)による流体輸送の効率を解析した。繊毛を粗視化した回転子モデルを用いて回転子の形状パラメータや駆動力の変調パターンを変えて平均流速および仕事率(粘性によるエネルギー散逸率)を解析したところ、回転面の平面基盤からの傾きに応じてこれらは単調増加すること、これらの比で定義される輸送効率は非単調な依存性(増加→減少)を示すことが分かった。このことは中間的な傾き角でメタクロナル波が最も見られやすいことと符合している。

参考文献:

- (1) Y. Kinoshita, N. Uchida, D. Nakane, and T. Nishizaka, in Gordon Res. Conf.: Sensory Transduction in Microorganisms (Jan.18,2016,Ventura,USA); manuscript in preparation.
- (2) N. Uchida and H. Löwen, in Yukawa Intl. Seminar 2015: New Frontiers in Non-equilibrium Statistical Physics (Aug.18, 2015, Kyoto, Japan); manuscript in preparation.
- (3) Y.-T. Hsiao, K.-T. Wu, N. Uchida and W.-Y. Woon, submitted.