

A03 アクティブフィラメントの運動の多階層モデリング

東北大学大学院理学研究科 内田就也

本課題では繊毛、べん毛、アクチン、微小管などの細胞運動に関わるアクティブなフィラメント群の運動を複数の粗視化レベルで記述することにより、これらの系の包括的な物理描像を構築することを目的として研究を進めている。2016年度の研究成果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エネルギー効率の解析 (1)

アーキア（古細菌）のべん毛運動に関して西坂崇之氏（学習院大学、A03 班）のグループと共同研究を前年度に引き続き行った。べん毛を単純らせんとした流体力学モデル（slender body theory）に実験で測定されたべん毛の構造長および回転数を当てはめて、粘性抵抗によるエネルギー散逸率およびモータートルクを評価した。またテザードセル法によって見出されたアーキアべん毛のステップ回転から ATP 加水分解による入力エネルギーを評価した。これらの結果を比較してアーキアの運動におけるモーターのエネルギー効率を 6~10% と見積もることができた。これは F1 モーターやバクテリアべん毛モーターの効率と比べて有為に低く、アーキアべん毛の駆動機構の特徴とみなせる。

・マウス気管繊毛のビーティング運動の解析 (2)

繊毛のビーティング運動に関して西坂崇之氏（学習院大学、A03 班）のグループと共同研究を行った。単離されガラス基板上に接着したマウス気管上皮繊毛を用いて測定された繊毛のビーティング軌道の解析結果から、繊毛のパッシブな弾性力およびダイニンが発生するアクティブな駆動力を評価した。理論モデルでは繊毛の弾性変形をフィラメントの曲げ弾性と繊毛基部と基板を結合するバネで記述し、実験で測定された曲率のデータにフィッティングすることで弾性定数が得られた。また光ツイーザーによって繊毛の先端をトラップすることで再活性化された繊毛の発生する力が測定され、その結果を上記弾性モデルから得られた弾性力、および流体力学モデルから得られた流体抵抗力と比較することによって、ダイニンが発生するアクティブな駆動力を評価した。これらの結果により繊毛ビーティング運動の直接的な測定に基づく定量的な理解が得られつつある。

・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継続して、バクテリアカーペットにおけるべん毛の非平衡相転移のモデル化と解析を進めた。ガラス基板上に接着された多数のバクテリアが整列することで、基板方向に向かう集団的な流れが発生することが確かめられている。流れ場の構造を理解するため、従来の理論モデルを拡張して、べん毛の 3 次元的な方向自由度、べん毛のロッド状形状、細胞本体とべん毛を結合するフックの弾性を新しい要素とした粗視化モデルを構築した。このモデルの数値解析により、べん毛はそれ自身との流体力学相互作用によって自発的に基板と平行になること、フックの弾性により初期配向が記憶され基板と垂直な流れを生み出すことが示された。また、べん毛の回

転率を上げることにより水平方向の方向相関（ドメイン）が発達し、ドメイン境界では上昇流または下降流が発生するという理論的描像が得られた。

・バクテリア乱流中における粒子の集団運動の解析

Hartmut Löwen 氏（デュッセルドルフ大学）との共同研究を前年度に引き続き行い、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。コロイド分散流体のシミュレーション手法である Smooth Profile Method を改良し、粒子の回転運動を扱えるようにした結果、バクテリア乱流中において粒子のクラスター化が起きることが示された。これは粒子の表面近傍において生成された渦が有効的な界面張力を生み出しているものと解釈される。また粒子表面における流れの境界条件に関して、複数の実験データを解析、比較して、大きいアスペクト比を持つバクテリアに対してすべりなし境界条件が近似的に成立することを見出した。これらによりアクティブ流体中が媒介する粒子間相互作用に関する知見が得られた。

・アクティブフィラメントの集団運動における排除体積効果のモデル化と解析

アクチン・ミオシン複合体、微小管・キネシン複合体などのアクティブフィラメントは流体中や固体基板上において方向秩序を形成したり、渦状や星状のパターン、バンドなど多様な集団運動を示す。曲げ弾性を持つ半屈曲性高分子のモデルに自己駆動力を加えることで、排除体積相互作用を持つアクティブフィラメントの汎用的な数値シミュレーションモデルを構築した。またこのモデルを、基板に頭を接着されたバクテリア列に適用し、自己駆動力 F が閾値 F_c を超えると集団的なウェービングが発生すること、その平均速度はおおむね $(F - F_c)^{1/4}$ に比例して増大することを示した(図1)。

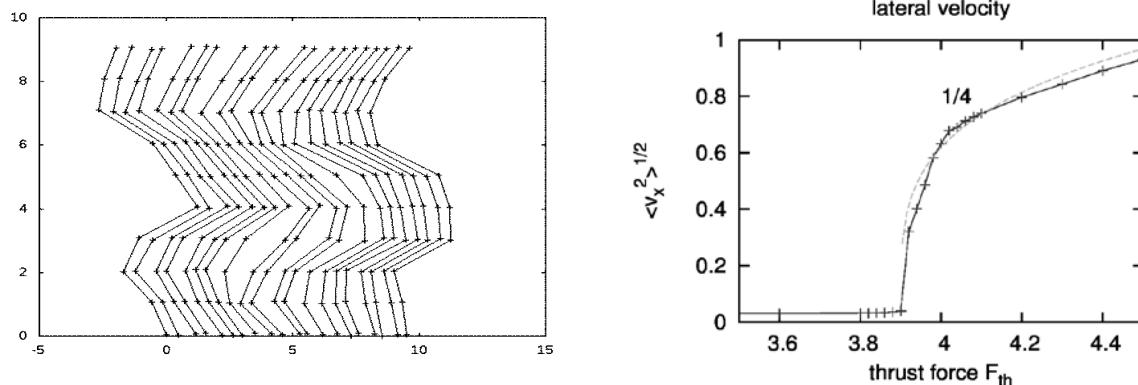


図1：(左) 排除体積相互作用を持つバクテリア列の集団ウェービングパターン。
(右) 平均速度の自己駆動力に対する依存性。

参考文献：

- (1) Y. Kinoshita, N. Uchida, D. Nakane, and T. Nishizaka, *Nature Microbiology* **1**, 16148 (2016).
- (2) T. A. Katoh, K. Ikegami, N. Uchida, T. Iwase, T. Masaike, M. Setou and T. Nishizaka, poster presentation in the 60th Annual Meeting of the Biophysical Society (Los Angeles, 2016).
- (3) Y.-T. Hsiao, K.-T. Wu, N. Uchida, and W.-Y. Woon, *Appl. Phys. Lett.* **108**, 183701(2016).