

## 複数の鞭毛を持つ遊泳バクテリアの流体力学

東北大学大学院工学研究科 石川 拓司

Takuji Ishikawa

Dept. Bioeng. Robotics, Grad. Sch. Eng., Tohoku University

Philipp Kanehl

Institute of Theoretical Physics, Germany

### 1. 諸言

大腸菌や枯草菌などの鞭毛を持つバクテリアは、複数の鞭毛を1つの束にして泳ぐことが知られている[1]。鞭毛と菌体の接続部には回転するモーターが備わっており、全てのモーターが反時計回りに回転すると鞭毛の付け根のフックが曲がって複数の鞭毛が束になる。一方、モーターが反時計回りに回転すると、鞭毛がバラバラに解けて菌体はその場で回転する。こうした運動に流体力学が重要な役割を果たしていることは、過去の実験的な研究[2]および数値シミュレーション[3,4]によって示唆されている。しかしながら、従来のモデルでは菌体と鞭毛の総合的な運動を考慮せず、固体壁に取り付けられた鞭毛同士の干渉のみを議論したり、流体力学の解析精度が不十分であるなどの問題点があった。そこで本研究[5]では、複数の鞭毛を持つバクテリアの流体力学を精度良く解析することで、鞭毛同士の干渉や同期現象、バクテリアの遊泳効率などを定量的に解明することを目的とする。

### 2. 解析手法

バクテリアの菌体を剛体楕円体と、鞭毛をらせん状の剛体とモデル化する。鞭毛の付け根にはフックと呼ばれる変形能の高い部位があり、本研究では曲げ剛性ゼロのピン接合でモデル化する。鞭毛にはらせん中心軸方向の一定トルクを印加することとし、このトルクによってバクテリアモデルは遊泳する。菌体と鞭毛を含めたバクテリア全体では外力ゼロ、外トルクゼロと仮定するため、鞭毛の回転と反対方向に菌体は回転しながら遊泳する。

流れ場はストークス流れと仮定し、境界積分型の支配方程式を境界要素法で解析する。計算格子は菌体に 140、各鞭毛に 340 生成した。解析手法の詳細は Ishikawa ら[6]と基本的に同じである。変形するフックにより、鞭毛と菌体が接触することが無いよう、Watari [4]と同様のポテンシャルによる斥力を与えた。また、鞭毛同士が近付いた際にも、接触を避けるために近距離の斥力を作用させた。

### 3. 結果と考察 [5]

まず始めに、3本の鞭毛を持つモデルで解析を行った。全ての鞭毛を反時計回りに回転させたところ、各鞭毛が作り出す流れで鞭毛が引き合い、鞭毛の束が形成されて遊泳した。2本の鞭毛を時計回りに回転させたところ、各鞭毛が作り出す流れで鞭毛が反発し、菌体はその場で回転運動した。これより、鞭毛の束の形成や解ける過程は、流体力学的に説明できることが明らかとなった。鞭毛回転の位相を調べたところ、初期条件や鞭毛の本数によらず、全てのケースで鞭毛回転が同期することが分かった。鞭毛の同期により回転速度が速くなり、遊泳速度も上昇することが明らかとなった。

鞭毛の本数を増加させると遊泳速度も増加したが、遊泳効率は低下した。これは、束になった複数の鞭毛間の隙間が狭くなるため、鞭毛間で強いせん断流れが生じて抵抗が増大したためである。これより、バクテリアにとって複数の鞭毛は遊泳速度の観点からは有利であるが、エネルギーの観点からは不利であることが分かった。

鞭毛が束になる時間は、菌体の回転によってかなり短縮される。鞭毛の本数を増加させると、本数の平方根に反比例して束になる時間が短縮されることが明らかになった。束になる時間は、方向転換後に再スタートするのに要する時間であるため、鞭毛数の増加はキレのある方向転換をする上でも重要である。

#### 4. 結言

複数の鞭毛を持つバクテリアの遊泳に関する数値シミュレーションを高精度で行った。その結果、複数の鞭毛は遊泳速度や方向転換にとって有利であるが、エネルギーの観点からは不利であることが明らかとなった。

#### 参考文献

- [1] Berg, H. C., *E. Coli in Motion* (Springer, New York, 2004).
- [2] Kim, M., et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **100**, 15481 (2003)
- [3] Reigh, S. Y., Winkler, R. G. & Gompper, G., *Soft Matter*, **8**, 4363 (2012)
- [4] Watari, N. & Larson, G., *Biophys. J.*, **98**, 12 (2010)
- [5] Kanehl, P. & Ishikawa, T., *Phys. Rev. E*, **89**, 042704 (2014)
- [6] Ishikawa, T., et al., *Biophys. J.*, **93**, 2217 (2007).