

細菌の遊泳運動におけるフリッキング現象とフックの関係性

狩野 遥斗*1・吉澤 恒太*1・浦里 珠羅*1・濱松 篤洋*1

指導教員：横田昌章*2

Email: yokota7771@news.ed.jp

*1: 長崎県立長崎南高等学校普通科3年

*2: 長崎県立長崎南高等学校

◎Key Words フリッキング、細菌、べん毛、プログラミング、ロボット

1. はじめに

私たちの身の回りに存在している細菌、中でもビブリオ菌はそのモーターを高速回転させて、生存に適した環境を目指して遊泳する。ビブリオ菌は後退運動から前進運動に切り替わった直後に、図1のように菌体を翻すような動きをして方向転換をすることが分かっている。この方向転換はフリッキングと呼ばれている。

本研究では、細菌の遊泳運動で発生するフリッキングは細菌の器官とどのような関係があるのかを解明するため、細菌べん毛モデルや細菌ロボットを作製し検証した。フリッキングの再現までには至らなかったが、細菌のべん毛接合部であるフックが高回転によってもねじれないための条件が存在する可能性が示唆された。

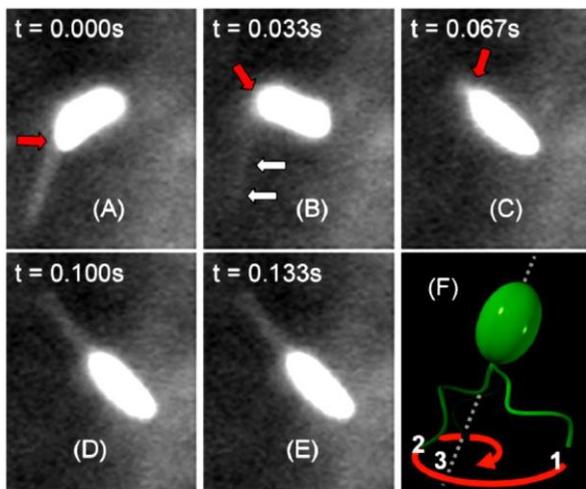


図1 フリッキング(Xie et al., 2015⁽²⁾)

2. 細菌べん毛の再現

2.1 本章の目的

細菌べん毛は、その性質上らせん形状をとっている。本章では、その特徴を再現した人工べん毛を作製するとともに、作製したべん毛が遊泳においてスクリューとしての働きをしているかを確認することを目的とした。

2.2 べん毛モデルの作製

先行研究⁽¹⁾をもとに表1のようなパラメータを設定し、3Dプリンタを使って、べん毛モデルを作製した。

表1 作製したべん毛のパラメータ

べん毛長 (mm)	らせん数	らせん半径 (mm)	べん毛断面 直径(mm)
130.0	1.0	250.0	3.0

2.3 べん毛の機能性について

細菌はべん毛の左巻きらせんのスクリューを回転させ、水を押し出した反作用で推進力を得て運動する。べん毛はスクリューとして機能するフィラメント、H⁺やNa⁺によって駆動されるモーター、そしてスクリューとモーターをつなぐユニバーサルジョイントであるフックから構成される(図2)。また、べん毛とモーターの回転方向によって細菌の運動形態は変化する。例えば、モーターが左回転をしているときに前進し、右回転をしているときに後退する。

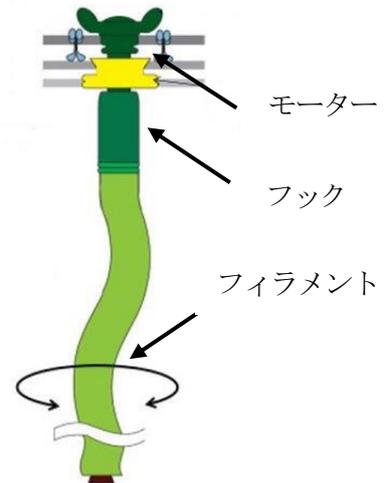


図2 べん毛の模式図

2.4 作製したべん毛モデルの機能性

べん毛を構成するフックを内径 3mmのシリコンチューブを使って、べん毛モデルを作製した(図3)。また、べん毛モデルをシリコンオイル中で回転させることで、細菌の慣性を無視できる環境を再現した。先行研究⁽¹⁾では「モーター軸とべん毛軸のなす角が 10° 以下になることで、べん毛がスクリューとして働く」ことが分かっている(図4)。

実際に、シリコンオイル中でべん毛モデルを回転させたところ、モーター軸とべん毛軸のなす角が 10° 以下になったことより、作製したべん毛モデルがスクリューとして働いていることが分かった。



図3 べん毛モデル

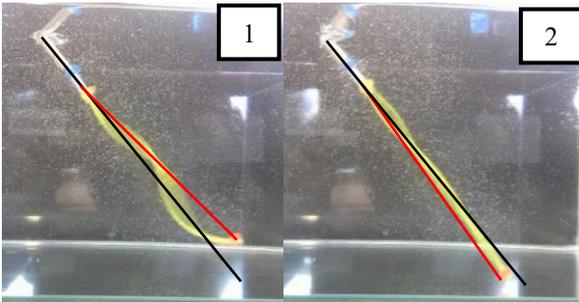


図4 モーター軸とべん毛軸のなす角
(Angle 1: 5.597 2: 3.466)

3. フリッキングの再現実験

3.1 本章の目的

前章で作製したべん毛モデルがスクリューとして働いていることが確認された。本章では、べん毛モデルを搭載した細菌ロボットを使用して、フックとフリッキングにどのような効果を与えているのかについての検証を目的とした。

3.2 細菌ロボットの作製

前章で作製したべん毛モデルが実際にスクリューとして働いているのかを確認するとともに、フリッキングについて細菌のフックがどのような効果を与えているのかを検証するため細菌ロボットを作製した(図5)。

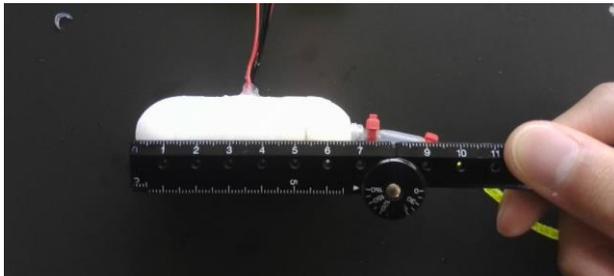


図5 細菌ロボット (菌体部)

3.3 フリッキングの再現実験 1

作製した細菌ロボットをシリコンオイル中で回転させるにあたって、細菌ロボットのモーター(HS-GM21-BLGS, T.L JAPAN)をarduinoで毎10秒ごとに逆回転するようにプログラムし、フリッキング時と同じような状況に再現した。

シリコンオイル中で1分間回転させたところ、左回転時には前進運動を、右回転時には後進運動が確認された。

しかし、フック部分にシリコンチューブを使用してもフリッキング現象は確認されなかった(図6)。

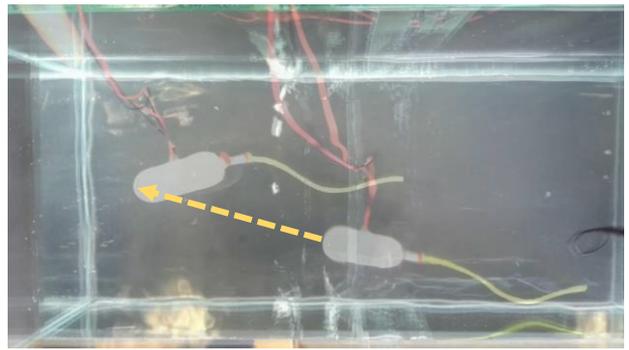


図6 細菌ロボットの軌跡(前進)

原因の一つに、シリコンオイルと、べん毛フィラメントの抵抗に対するモーターの出力が小さかったため、本来、高速回転中に起こるフリッキングを確認できなかったと考えられた。この問題を解決するために、次にべん毛フィラメントを小型化し、モーターにかかる抵抗を小さくした細菌ロボット(a)、べん毛フィラメントは変えずに、シリコンチューブの内径を小さくした細菌ロボット(b)、べん毛フィラメントとシリコンチューブのどちらも変える細菌ロボット(ab)でフリッキング現象の再現実験の検証を試みた。

3.4 フリッキングの再現実験 2

べん毛モデルを小型化した細菌ロボット(a)の作製を試みたが結果として、小型化したべん毛モデルのTPUを材質にした3Dプリンタでの印刷が困難であり、作製できなかった。さらに、細菌ロボットの電子回路系の不具合により、細菌ロボットを使用したフックがフリッキング現象に与える影響についての検証(b)(ab)ができなかった。そのため、フックのねじれについての検証実験を行うことにした。

3.5 ねじれの起こらないフックの強度

この実験では、固定した回転数とフックの代わりであるシリコンチューブの関係性の解明を目指した。

はじめに、フックの内径を3mm~1mmまで0.5mmずつ変えたシリコンチューブを用意した。そのべん毛モデルをやや大きなモーター(マハダ ヲシデンモーター pro)を用いて、20000~24500rpmで回転させた(表2)。

表2 シリコンの内径(mm)とねじれの有無

内径(mm)	ねじれの有無
3.0	無し
2.5	無し
2.0	有り
1.5	有り
1.0	有り

その結果2.5mmまではねじれは発生しなかったが、2mmより小さな内径からはねじれが発生した(図7)。

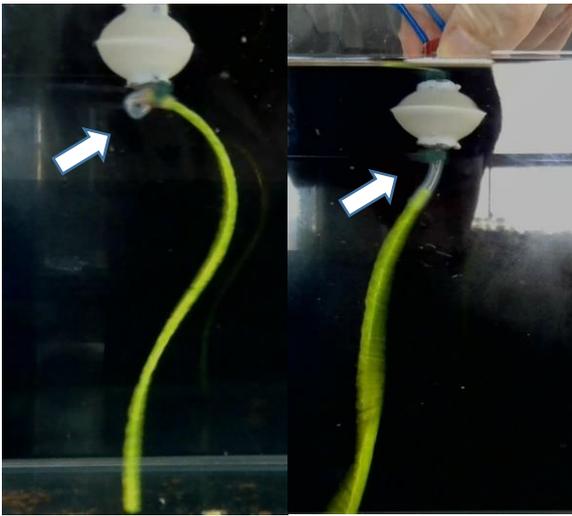


図7 フックのねじれ
(内径2 mm(左)、内径2.5mm(右))

3.6 本章のまとめ

細菌ロボットを作製しシリコンオイルを使うことで慣性の影響を小さくし、その遊泳を実際の細菌の生育環境に近づけた結果、作製した細菌ロボットに前後運動ができることが示された。しかし、フリッキング現象の再現までには至らなかった。次に、べん毛フィラメントを小型化し、モーターにかかる抵抗を小さくした細菌ロボット(a)、べん毛フィラメントは変えずに、シリコンチューブの直径を小さくした細菌ロボット(b)、べん毛フィラメントとシリコンチューブのどちらも変えた細菌ロボット(ab)でフリッキング現象の再現実験の検証を行ったが、作製段階で技術面での問題が発生したため実験を実行できなかった。しかし一方で、先行研究⁽¹⁾で発生していたフックのねじれについて、フックを模したシリコンチューブの内径とねじれの関係性を、固定した回転数の場合において明らかにすることができた。

以上より、本章では、フックのねじれにはその回転数に耐えられるだけのユニバーサルジョイントがフリッキング現象の発生に何らかの影響を与えている可能性が示唆された。

問題点としては、フックのねじれについての実験において、細菌ロボットを使用した検証実験を行えなかったことが挙げられる。そのため、今回行った実験のようにモーターを固定した状態の実験だけでなく、実際に運動を観察できる実験系を構築する必要がある。また、細菌ロボットを用いた実験については、シリコンチューブだけではなく、より回転数を上げてねじれに耐えられる素材でフリッキングの再現実験を行うことが今後の課題として挙げられる。

4 おわりに

本研究では、細菌の遊泳運動で発生するフリッキングは細菌の器官とどのような関係があるのかの解明を試みた。結果として、フリッキング現象のような大きな方向転換については再現するに至らず、フリッキングの発生条

件についてフックの関係性を検証できなかったが、このフックが一定の強度を持つことで、回転によるねじれを防ぐことが実験により分かり、フリッキング現象には、細菌のフックが「回転数の大きい場合でも左右に屈曲しつつ、ねじれていない状態である条件」が存在する可能性が示唆された。このことから、その発生に細菌のフックは重要な役割を果たしていると思われた。細菌は、このフックを発達させることで、フリッキングのような高度な方向転換運動を獲得できたのかもしれない

謝辞

本研究を進めるにあたり、長崎総合科学大学工学部 七條大樹先生、長崎大学工学部 矢澤孝哲先生には、多くのご指導ご助言等をいただきました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 多貫多一,
“単一べん毛細菌の運動メカニズムに関する研究”
東北大学大学院 工学研究科 応用物理学専攻
生物物理学分野 工藤研究室, (2017)
- (2) Li Xie, Chunliang Lu, and Xiao-Lun Wu,
Marine Bacterial Chemoresponse to a Stepwise
Chemoattractant Stimulus. *Biophysical Journal*,
vol. 108(3) 766-774(2015)