



平成 27 年 12 月 28 日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学
国立大学法人大阪大学

回って、廻る、細菌べん毛
～ コマのような新しいべん毛運動が明らかに ～

概要

下権谷祐児（東北大学学際科学フロンティア研究所 助教）及び石川拓司（同大学院工学研究科 教授）は、石島秋彦（大阪大学大学院生命機能研究科 教授）、井上裕一（東北大学多元物質科学研究所 助教）、澤野耀一郎（同大学院生命科学研究科 大学院生）及び分部寛道（元同大学院生命科学研究科 大学院生、現同大学院医工学研究科 大学院生）との共同研究において、細菌のべん毛（細菌の表面から生えている細長い繊維）が「スピン+旋回運動」というコマのような回転挙動をしていることを実験により見出しました。また独自の理論により、その回転メカニズムは、べん毛が作り出す流れで説明できることを明らかにしました。

本研究の成果は、細菌のべん毛運動の裏に潜む物理法則をあぶり出すものであり、べん毛モーターの理解と制御に向けた重要な一歩となることが期待されます。

本成果は、2015 年 12 月 22 日（火）10 時（UK 時間）、Scientific Reports 誌（オンライン版）に掲載されました。

なお、本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金の助成を受けて行われました。

背景

大腸菌などに代表される「細菌」は体長が数マイクロメートル程度（“マイクロメートル”は“メートル”の100万分の1）であり、肉眼では見ることのできない小さな世界に生きています。体の表面からは、ぐるぐると螺旋を巻いた細長い毛が生えており、これは「べん毛」と呼ばれています。べん毛の根元には「べん毛モーター」と呼ばれる回転装置が繋がっています。べん毛とべん毛モーターは何のためにあるのでしょうか？それは、細菌が水中を泳ぎ回るためです。「毛」と「モーター」は、船の「スクリュプロペラ」と「エンジン」に相当します。べん毛モーターが回転し、それに接続された螺旋状のべん毛が回転することで、水をかき、水中を進むことができるわけです。細菌が持つこうした巧みな仕掛けは非常に興味深く、多くの研究者を魅了し、精力的に研究が続けられています。

べん毛はこれまで、長手方向の軸を回転軸としてくるくると回っている、と考えられてきました。フィギュアスケート選手のスピンのような状態と言えるかもしれません。生物物理学の分野では、べん毛回転に関するそのような共通理解のもとで、べん毛モーターの回転特性、例えばトルクと回転スピードの関係などが調べられてきました。しかしながら実際には、べん毛の回転様式は単純なスピンではなかったのです。それを実験により見出し、理論的な定式化を与えたのが今回の研究です。

成果

石島秋彦（大阪大学大学院生命機能研究科 教授）と井上裕一（東北大学多元物質科学研究所 助教）らの研究グループは、独自の**ビーズアッセイ**^{解説1}と光学顕微鏡技術を駆使した実験中に、べん毛が奇妙な回り方をしていることに気が付きました。これまで観察されていた「スピン」に加えて、それとは明らかに様相が異なる、より大きな回転半径の軌道も同時に見られたのです。それはまるで、回転するコマが「旋回運動」をするかのようで、べん毛も「スピン+旋回運動」の2軌道回転をしていることが明瞭に観察されました。すなわちべん毛は、回りながら、廻ってもいたのです。過去、べん毛の旋回運動について言及した研究は理論的研究がわずかにあるのみで、実験による観察例は全く報告されていませんでした。（今回の論文の補足情報として、以下のリンク先で実際の動画を入手いただけます。<http://www.nature.com/articles/srep18488>）

この観察をきっかけとして、下権谷祐児（東北大学学際科学フロンティア研究所 助教）と石川拓司（同大学院工学研究科 教授）は、べん毛の「スピン+旋回運動」のモデル化と定式化を試みました。モデル化するうえでのポイントは、べん毛モーターとべん毛との接続部（フックと呼ばれる）が一種の「**ユニバーサルジョイント(自在継手)**」^{解説2}になっている、

という過去の報告でした。それを表す適切なモデル化を行い、高精度の数値計算手法により水中のべん毛挙動を詳細に解析しました。その結果、実験で観察された「スピン+旋回運動」という特徴的な挙動の再現に成功しました（図1）。次に、スピンと旋回運動、それぞれに寄与するモータートルク（回そうとする力）・粘性抵抗（回りにくさ）・回転角速度（回るスピード）の関係を、流体力学の理論を用いて定式化しました。この理論式から計算された回転角速度は、スピン・旋回運動ともに、数値計算による詳細な解析結果とよく一致し、理論式の妥当性が確認されました。

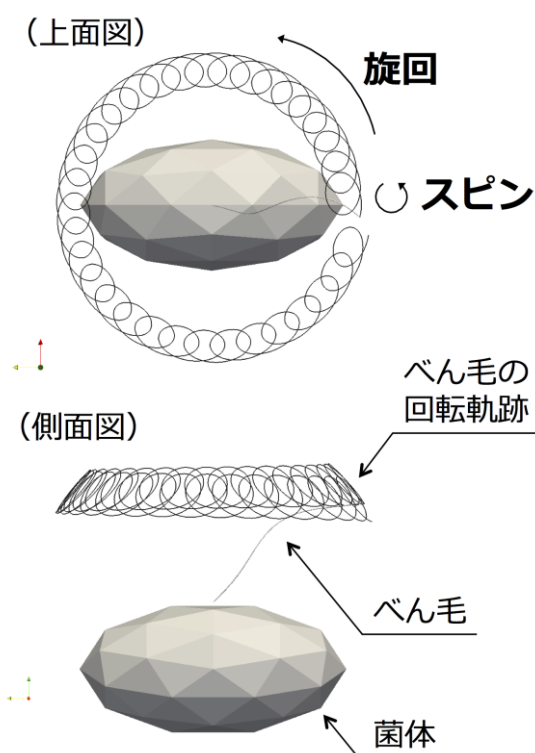


図1 べん毛の「スピン+旋回運動」。べん毛の回転軌跡を連続的に繋げて図示している。

さらに、提案した理論式から予測される結果と実験結果との比較を行いました。実験では、前述のビーズアッセイにより、大腸菌のべん毛のスピンと旋回運動、それぞれの回転半径と回転角速度を同時計測しました。その結果、回転半径と回転角速度の関係は、理論予測と実験結果の間でよい傾向の一致を示しました。さらに、提案した理論式を実験データに当てはめることで、べん毛モーターが発生しているトルク（現状では実験による計測が困難）を見積もり、提案した理論式の有用性を示しました（図2）。

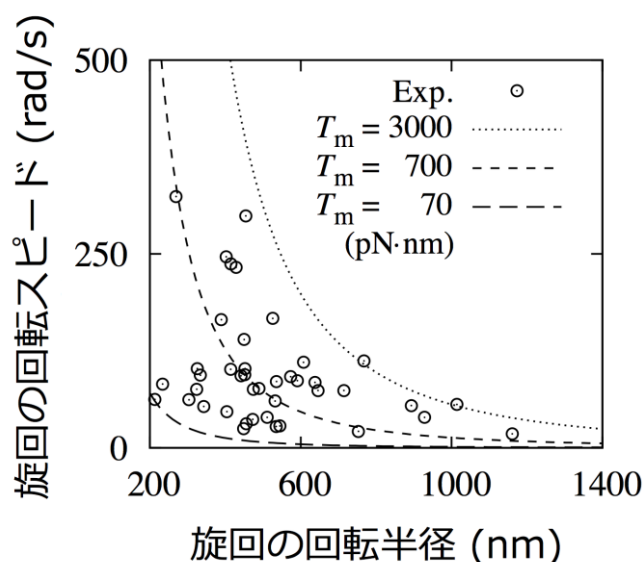


図2 旋回運動の回転半径と回転スピードの関係。シンボルが実験結果、線が理論式の結果で、よい傾向の一致を示した。図中の T_m はモータートルクの大きさ。

展望

これまで、べん毛モーターの回転特性、例えばトルクと回転スピードの関係などは、べん毛の「スピン」という1軌道回転を前提として調べられてきました。今回明らかになった「スピン+旋回運動」という2軌道回転は、べん毛モーターの回転特性の研究において新たな視点を与えるものです。さらに、べん毛モーターとべん毛との接続部を「フック」と呼びますが、べん毛の2軌道回転はフックの力学的特性とも深く関係します。フックの力学的特性はこれまでほとんどわかっていませんでした。今後はべん毛の2軌道回転の存在を前提とし、実験・数値計算・理論を融合することで、フックの力学的特性の理解が進むことが期待されます。

「スピン+旋回運動」という2軌道回転は、誰もが子どもの頃に一度は遊んだことがあるであろう「コマ」で見られる身近な現象です。一方もっと大きなスケールに目を向ければ、地球の自転軸も約2万6千年の周期で旋回運動をしていることが知られています。反対にもっと小さなスケールに目を向ければ、電子などの素粒子の世界にも旋回運動が存在することがわかっています。今回の研究は、コマより小さく電子より大きい、微生物の世界でも同様の回転運動が見られるという、興味深い事実を明らかにしました。今後、他のスケールでも同様の現象が見つかっていく可能性があります。

用語解説

解説 1 ビーズアッセイ

べん毛の回転を観察する手法の一つです。べん毛の直径は数十ナノメートル程度（“ナノメートル”は“メートル”の10億分の1）と非常に細く、光学顕微鏡を使ってもべん毛の回転をそのまま観察することは困難です。そこで、べん毛の10倍から100倍程度の直径のビーズ（球）を目印としてべん毛に接着させます。そうすることで、ビーズの動きを介してべん毛の回転の様子を観察できるようになります。なお、べん毛以外の部分（菌体）は特別な処理を施してガラス面に固定しておきます。そうすることで、菌体が移動できない状態で、べん毛の回転のみを選択的に観察できるようになるのです。これは例えば、船が座礁し、スクリュープロペラのみが回転している状態に近いかもしれません。

解説 2 ユニバーサルジョイント

2つの部材を接続する方法の一つです。自在継手とも言います。例えば、船のエンジンとスクリュープロペラを接続し、エンジン側の回転力をスクリュープロペラ側に伝える状況を考えます。このとき、スクリュープロペラの中心軸がエンジンの回転軸に対して斜めになっている状況があり得ます。そのような状況でも回転力を伝えられるようにする賢い仕掛けがユニバーサルジョイントです。ユニバーサルジョイントは、実際に産業界で広く使われています。次に細菌に目を向けると、べん毛モーター自体は菌体内に固定されています。一方で、べん毛はその根本（べん毛モーターとの接続部）を支点として様々な方向を向くことができます。したがって、べん毛モーターの回転軸とべん毛の中心軸は必ずしも方向が一致しないわけですが、それでも回転力をうまく伝えられているのは、接続部がユニバーサルジョイントになっているためと考えられています。

論文情報

著者：Yuji Shimogonya, Yoichiro Sawano, Hiromichi Wakebe, Yuichi Inoue,

Akihiko Ishijima, Takuji Ishikawa

題目：Torque-induced precession of bacterial flagella

雑誌：Scientific Reports

URL：<http://www.nature.com/articles/srep18488>

お問い合わせ先

(研究関連)

東北大学 学際科学フロンティア研究所 新領域創成研究部 助教 しもごんや ゆうじ 下権谷 祐児

Phone: 022-795-6958

Fax: 022-795-6959

E-mail: yujish@pfs1.mech.tohoku.ac.jp

大阪大学 大学院生命機能研究科 教授 いしじま あきひこ 石島 秋彦

Phone: 06-6879-4650

Fax: 06-6879-4650

E-mail: ishijima@fbs.osaka-u.ac.jp

(報道関連)

東北大学 学際科学フロンティア研究所 企画部 鈴木 一行

Phone: 022-795-4353

Fax: 022-795-7810

E-mail: suzukik@fris.tohoku.ac.jp

大阪大学 大学院生命機能研究科 庶務係 中西 祥子

Phone: 06-6879-4692

Fax: 06-6879-4420

E-mail: seimei-syomu@office.osaka-u.ac.jp