

報道関係各位

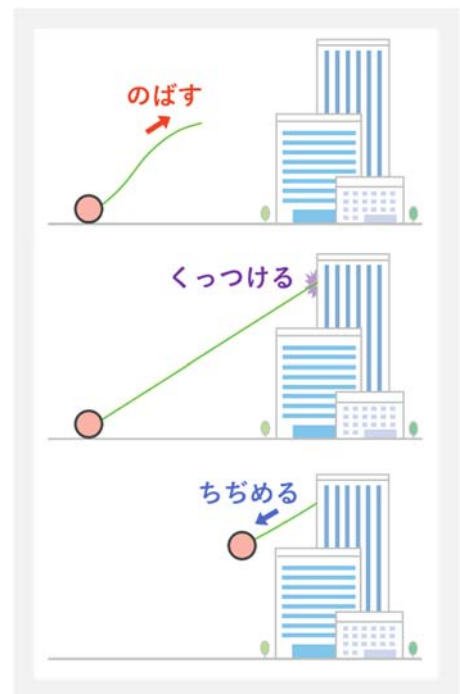
本件の報道については、下記の解禁日時以降です。日時厳守をお願いします。
日本時間 2017年6月6日（火）午前4時以降

スパイダーマンのように動く微生物 学習院大学理学部 西坂崇之教授の研究グループ 「米科学アカデミー紀要」にて掲載予定

■概要■

学習院大学 理学部 西坂崇之教授の研究グループは、「スパイダーマン」のように動く微生物の運動とその制御メカニズムを世界で初めて明らかにしました。

「バクテリア」は、もっとも単純な生命体の1つであり、大きさは1ミリの1000分の1程しかありません。ところが、動く仕組みに注目すると、実に多様で複雑な様式を発達させていることが知られています。同研究室中根大介助教らは、光合成微生物のラン藻が、細い糸のような繊維状構造物を持ち、その伸長収縮を繰り返す様子を撮影することに成功しました。さらに、独自の光学顕微鏡を駆使することで、この生命体は、指向性のある光という外部シグナルによって、その運動を制御する能力を持つことを明らかにすることができました。



これは「視覚を備えたバクテリア」という点でも画期的です。光を感知するだけでなく、光の向きを認識するという事実は、単純な生命体が、高度な情報処理を達成していることをあらわしています。スパイダーマンのようなバクテリアは、非常に単純ではあるが初歩的な視覚を備えることで、自身の持つ「糸」を伸縮させる方向を自由自在に制御していると考えられます（[上図参照](#)）。この成果は、同様の「糸」を持つ病原菌の制御にも応用できる可能性があります。この研究内容は、「米科学アカデミー紀要」において、原著論文として発表されます。

【報道関係者からの問い合わせ先】

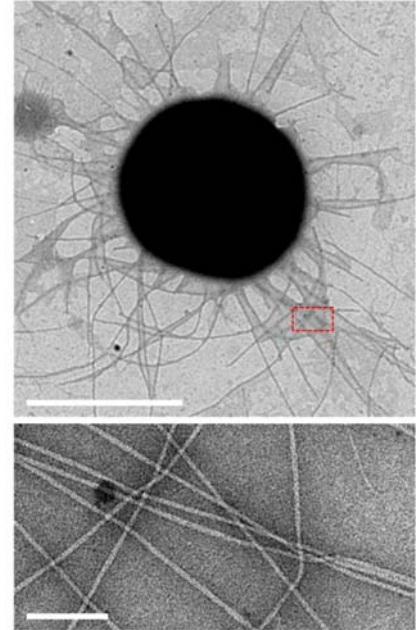
学校法人学習院 総合企画部広報課
担当：円谷・松井・湯元

TEL: 03-5992-1008 FAX: 03-5992-9246
Email: koho-off@gakushuin.ac.jp

■背景■

「バクテリア」はもっとも単純な生命体の1つであり、大きさは1ミリの1000分の1程しかありません。ところが、動く仕組みに注目すると、実に多様で複雑な様式を発達させていることが知られています。一般的なバクテリアは、「べん毛」と呼ばれる繊維構造をイオンの流れを使って回転させることで水中を泳いでいます。べん毛は、遺伝学、分子生物学、生物物理学などによって、その詳細が何十年にわたり調べられてきました。一方、べん毛を持たないバクテリアについては運動する能力を持つことが知られていましたが、その詳細な仕組みはこれまで明らかになっていませんでした。

研究グループは、世界中で広く研究されているラン藻の一種のシネコシスティス (*Synechocystis* sp. PCC 6803) に注目しました(右図参照)。これまでの研究から、細胞の表面には、IV型線毛と呼ばれる「糸」状の構造物が生えており、これは固体表面を運動するために重要な構造であることが知られていました。ところが、この糸の細さはたった8ナノメートル(1ミリの10万分の1程度)しかなく、この繊維がどのように運動に使われているのか、その動きを直接観察することは容易ではありませんでした。

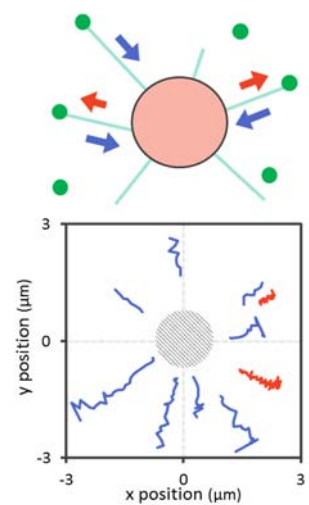


Synechocystis sp. PCC 6803 の電子顕微鏡写真。丸い細胞表面から生えているたくさんの繊維がIV型線毛。下は拡大図。繊維の細さは8nm。

■研究の成果■

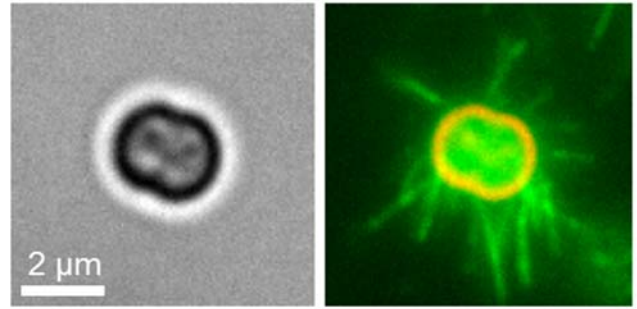
「糸」の動きを見る IV型線毛の機能を調べる最も単純な方法は、その動きを直接映像として捉えることです。しかし、線毛は細く、通常の観察では見ることはできません。学習院大学 西坂研究室に在籍する中根大介助教は、この問題点を克服し、IV型線毛の光学顕微鏡下での可視化、および、動態計測に成功しました。

その方法はシンプルで、微小なビーズを目印として線毛に付着させることで、その動きを検出する、というものです。ビーズは線毛よりも厚みがあり、明るく光るため、その動きを検出することができます。これにより、細胞が自身の線毛繊維の伸長・収縮を繰り返す様子を撮影することに成功しました(右図参照)。これは、ちょうど「スパイダーマン」が「糸」を伸ばしたり、手繰り寄せたりする様子とよく似ています。自身の体長の数倍程度のテリトリーの中で、1分間に10本程度の糸を毎秒0.3-0.8ミクロンの速さで伸縮していました。



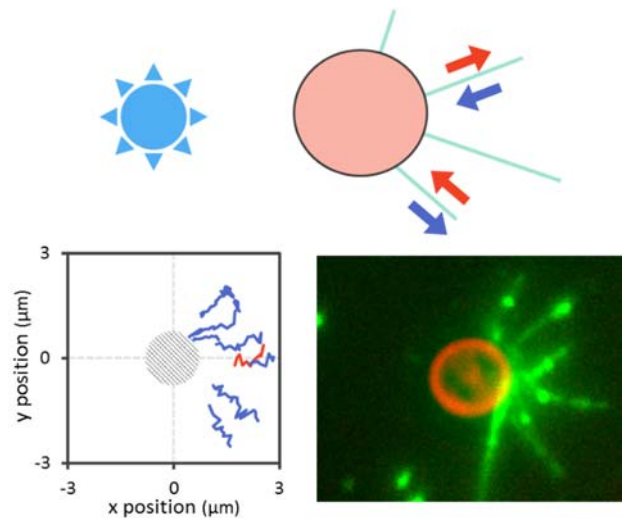
線毛の動態計測。上は模式図。赤は伸長、青は収縮をあらわしている。

「糸」を可視化する さらに、研究グループは糸を光学顕微鏡下で直接観察する方法も構築しました。偶然にも、アビジンという生物工学用途で汎用されるタンパク質が、IV型線毛に特異的に結合することを発見しました。そこで、蛍光色素で標識したアビジンを用いることで、線毛1本1本を画像化することができました（右図参照）。線毛の長さや、本数は、電子顕微鏡観察の結果や、動態計測の結果とも一致していました。



線毛の蛍光顕微鏡像。左は通常の観察法。右はあたらしい標識法。同一の細胞を見ている。

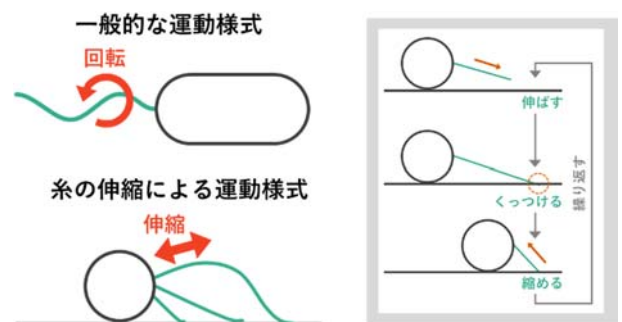
「糸」を光で制御する 以前から、細胞は光に対して応答することが知られていました。そこで、研究グループは、細胞の横方向から青色光を照射する実験システムを構築し、「糸」がどのようにふるまうかを検証しました。得られた結果は明らかで、太陽の直射日光程度の光強度に反応して、「糸」の伸縮方向を光で制御することができました（右図参照）。つまり、画像の左側から強い青色光をあてると、細胞は光源から逃げるように、右側にIV型線毛伸ばして、伸縮を活性化させます。これは「光の向き」を検出して、その情報を「糸」に伝達し、自身の動きを制御する、という細胞の意思決定過程であるようにもみえます。



線毛伸縮の光制御。上は模式図。左下は線毛の動態計測。右下は線毛の蛍光標識像。

■今後の展望■

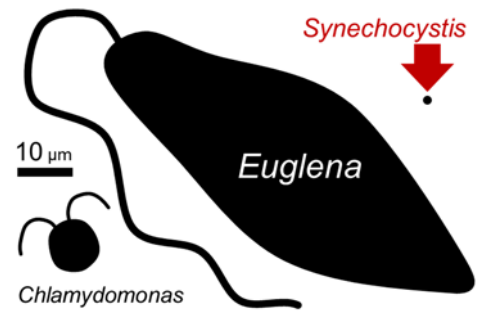
「糸」の伸縮による運動様式 一般的なバクテリアの運動様式、つまり、べん毛の回転とは対照的に、IV型線毛はその「伸縮」で運動します（右図参照）。今回の研究は、線毛の動態と光による一連の制御過程を光学顕微鏡によるイメージングで直接明らかにした初めての例と言えます。伸縮による運動様式は、緑膿菌や淋菌では、病原性に関わりがあることが知られていますが、いずれもべん毛のそれと比べて、その理解は十分とは言えませんでした。加えて、「糸」の伸縮を直接観察した例はほとんどありませんでした。今回、IV型線毛やそのシグナル応答の動態計測により、普遍的なメカニズムの手がかりを得ることができるかもしれません。



運動様式の模式図。左上は一般的なバクテリアべん毛による回転。左下はIV型線毛による「糸」の伸縮。右側は伸縮より達成される細胞の一方方向的な運動の模式図。



視覚を備えたバクテリア 一般的に光の方向を認識する生物は真核生物であるため、バクテリアと比べて高等で、その体長は何倍もの大きさになります(右図参照)。加えて、目のような器官をもっており、光を遮蔽することも可能になります。一方、バクテリアは、光の波長程度の大きさであり、目のような構造物は存在しません。本研究では、このような単純な生命体であっても高度な情報処理が可能であることを「糸」を可視化することで直接的に証明しました。ただし、光の向き認識に要する時間ははるかに遅く「1分」もの時間を必要とします。これはバクテリアの光の向き認識は、真核生物のそれとは本質的には異なることをあらわしているのかもしれない。



光の向きを認識する微生物。左：クラミドモナス。真ん中：ミドリムシ。右：シネコシスティス。

糸の制御とその応用 このような「糸」の伸縮を制御する装置は、実は小さな生物に広く見られることが知られています。緑膿菌や淋菌といった病原細菌では「糸」を使って宿主細胞の表面を認識すると考えられており、「糸」を欠損させるとその病原性が低下します。また、コレラ菌の病原毒素の分泌には「糸」の伸縮装置と遺伝的に類似した構造物を通して、細胞外への輸送が達成されています。「糸」の伸縮の仕組みとその制御メカニズムを明らかにしたという成果は、このような装置をもつ病原性細菌の理解やその制御といった医歯薬学分野での応用にもつながる可能性があります。

糸の伸縮とその役割 なぜ、一部のバクテリアは、「糸」の伸縮で動く仕組みを発達させたのでしょうか？一般的なべん毛運動の速さを「ジョギング」くらいだと考えると、糸の伸縮による動きは「ほふく前進」くらいの速さしか達成できません。これは、この仕組みは、単に運動の装置というだけでなく、それ以外の機能があることを示唆しているのかもしれない。今回、IV型線毛の可視化に関わる一連の研究基盤が構築できたことで、「糸」の制御や役割について、新たな研究アプローチを展開させることができるかもしれません。IV型線毛の研究は、今まさに、始まったばかりです。

論文情報

著者名： Daisuke Nakane, Takayuki Nishizaka

論文名： Asymmetric distribution of type IV pili triggered by directional light in unicellular cyanobacteria

雑誌名： Proceedings of the National Academy of Sciences