

細菌が動く仕組みを明らかにする

名古屋大学理学研究科 教授 本間 道夫

【私の研究】

細菌はどのような仕組みで移動するのだろうか？

私の研究室では、分子レベルの解析が容易な細菌（世間ではバイ菌とも呼ばれている）を対象に、運動器官であるべん毛のエネルギー変換機構について研究している。また、細菌が細胞外の情報を感知し、処理するメカニズムの解析も進め、べん毛運動制御システムの総合的な理解も目指している。

細菌モーターのエネルギー変換

細菌べん毛は、動物がもつ運動器官である精子の鞭毛（細菌べん毛と区別するために漢字表記が慣例）とは構造的にも機能的にも全く異なる。動物の鞭毛が、ATP をエネルギー源とした鞭打ち運動をするのに対し、細菌のべん毛は、膜の外から内へのイオンの流れをエネルギー源として回転する。ガソリンエンジンと電気モーターエンジンとの違いだと思って欲しい。細菌べん毛は、細胞膜に埋まったべん毛基部がモーターになっていて、イオンの流入（水素イオンやナトリウムイオン）により直接回転運動を作り出している（図1）。モーターには、菌体長より数倍も長いらせん形をしたべん毛繊維がスクリューとしてつながっており、受動的に回転することで推進力を生み出す。これは身長 160cm の人が 4m の紐を回し、しかも、毎秒 1700 回転という F1 マシンのエンジン並の速度でそれを回転させているのと同じである。べん毛モーターは、多くのタンパク質で作られた超分子（特殊な能力を持っている分子のことを超分子と言う）複合体であり、イオンのエネルギーを力学的エネルギーに変換するモータータンパク質複合体や、モーターの回転の方向を制御するスイッチ複合体などの部分構造を含んでいる。

電気モーターは電流の流れを磁力に変換して、その磁力の引力と反発力を利用して回転しているが、イオンが生物モーターを流れる時には、何が起きているのだろうか？まさにこの疑問に答えるために、そのモーターの全体構造や、モーターの心臓部であるエネルギー変換器の構造解析を行なっている（図2）。原理究明につながる十分な解像度には到達していないが、分子の形については明らかになりつつある。

頭に毛が一本の謎

細菌は遊泳する時に、行き当たりばったりに動いているわけではない。例えば、栄養源となるアミノ酸であるセリンなどのある所に向かってべん毛を使って泳いで、行きたい場所へ移動する。細胞内には多く種類のタンパク質が局在し、それぞれ適切な数、適切な場所でそれぞれの機能を担っている。たとえば、細菌の感覚器官のひとつである走化性レセプターは、細胞の極に巨大な集団を形成して局在し、外界の情報を感じ取るセンサーの役目を果たす。細菌はこの走化性レセプターからの情報を元に、べん毛や線毛などの運動器官を用いてよりよい環境に移動することができるのである。また、これらの運動器官も、ランダムにどこにでも作られるわけではなく、その数と位置が適切に制御されており、ビブリオ菌のべん毛はこの数と位置制御に *flhF* と *flhG* という遺伝子が関与していることが明らかになっている。これら2つの遺伝子がつくるタンパク質が、グアノシン3リン酸(GTP)やアデノシン3リン酸(ATP)という生体中の重要な分子を分解する活性を持った酵素であることは分かっている。しかし、その活性がどのように場所を決める為に使われているかは明らかにされていない。バイ菌の頭に1本の毛が生える機構についても、明らかになっていないということである。

これらを研究することで、将来べん毛の研究がミクロのエネルギー変換における新しい原理解明につながり、世界のエネルギー問題の解決に役立つかもしれない。しかし、すぐに役に立たなくても、目の前に分からないことがあるから研究するというのが、今の自分の最大のモチベーションになっている。

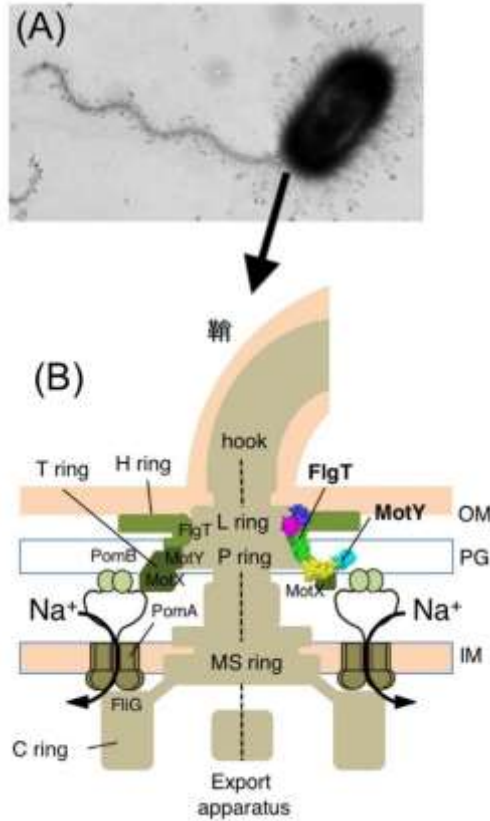


図1：ビブリオ菌べん毛モーター。(A) ビブリオ菌の電子顕微鏡写真。ビブリオ菌は細胞の端に一本のべん毛を持ち、スクリーウのように回転させて泳ぐ。(B) モーター部分の模式図。回転力を生み出すエンジン（べん毛モーター）はべん毛の根元に存在し、膜（外膜・内膜）に埋まっている。回転モーターは、固定子と回転子から作られている。さらに、回転子の回転を支える軸受け、自由継ぎ手として働くフック、スクリーウのように動くフィラメントで構成される。固定子は回転子の周囲に複数個設置され、ナトリウムイオン (Na⁺) が固定子内を流れる際に、固定子と回転子が相互作用して、回転力が生み出される。

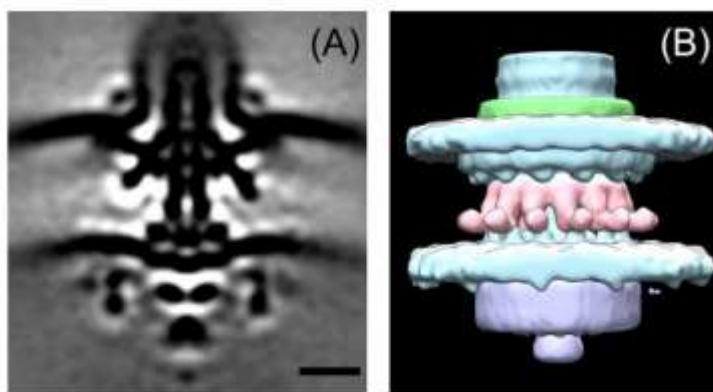


図2：(A) ビブリオ菌多毛株を急速凍結して、電子顕微鏡により撮影したべん毛基部体部分の像を重ね合わせて立体像を構築し、その断面を表示した。(B) ビブリオ菌べん毛モーターの低温電子断層撮影像から作られた3次元に再構成した表面レンダリング像。