

難波啓一

大阪大学大学院生命機能研究科

科学技術振興機構 ICORP 超分子ナノマシンプログジェクト

細菌の多くはべん毛と呼ばれるらせん型繊維をスクリュープロペラとして回転させ、数十 μm /秒の速度で活発に泳ぎ回る。そうして栄養や温度など最適環境を探して集まるのを走性と呼ぶ。体長僅か1~2 μm の単細胞が、さまざまな化学センサーや温度センサー、信号伝達処理システム、運動器官とその制御系を備え、環境変化を的確に捉えて生き延び繁殖するための複雑な機能システムを持っている。

大腸菌やサルモネラ菌など周毛性細菌の典型的な運動パターンは、2~3秒間の直線の泳ぎと0.1秒以下の方向変換の繰り返しである(図1)。移動にともなう環境変化を細胞膜上のセンサー蛋白質が検出し、方向変換頻度を制御する。べん毛は長さ十数 μm にも達するが、直径は20nmの細長い繊維である。細胞の周りに数本生えていて、それぞれの根元に細胞膜に固定された直径30nm程の回転モーターがあり、200~300Hzで回転する。直進運動時は数本のべん毛が束になり、同期回転をして推進力を発生する。



図1 細菌の運動パターン。直進、方向変換、直進を示す模式図。直進時に左巻らせんの束が推進力を発生し、方向変換時にはモーター反転により右巻きに変換し束がほぐれる。



図2 細菌べん毛の自己構築過程。約25種類の蛋白質が順序通りに組み込まれ、べん毛が構築される。左上から右下へ。<http://www.npn.jst.go.jp> に動画を掲載。

べん毛の構築はモーター部分から始まり、細胞外に長く伸びる軸構造の構成蛋白質は細胞内で合成され、べん毛の根元にある専用の輸送装置によりべん毛中心を貫通する細長い穴を通して先端に運ばれ、常に構造の先端に組み込まれる(図2)。長いらせん部分はべん毛繊維と呼ばれ、1種類の蛋白質フラジェリンが非共有結合で重合した繊維である。長さ10 μm のべん毛繊維を構築するのに約2万1千分子のフラジェリンが必要で、2~3時間かけて十数 μm まで伸びる。フラジェリンの組み込みは常にべん毛先端のキャップ構造の直下で起こり、キャップなしでは繊維構築は起こらない。

べん毛繊維は左巻らせんで、数本の同期回転により推力を発生し菌体は直進するが、方向変換時にはモーターの急反転トルクによりらせんが瞬時に右巻きが変わり、束がほぐれて推力バランスが崩れ、その結果菌体が方向変換する。べん毛はただの硬いスクリューではなく、ダイナミックな形態スイッチ機構をもつ構造体である。

高速回転するべん毛モーターは、一見摩擦もせず摩擦も小さな軸受けに支えられ、回転子や固定子に加えて反転制御装置もあり、見かけは人工のモーターと変わらない。ただし、そのエネルギー消費量は 10^{-16}W 程度と熱ノイズレベルに近く、100%に近いエネルギー変換効率を持つと言われる。見かけは滑らかな高速回転をしているが、慣性が無視できて粘性のみが意味をもつナノスケールの世界では、十分に高い空間時間分解能で回転速度のゆらぎやステップを計測すれば、その真の動態とトルク発生機構を解明できる可能性がある。

一種類の蛋白質からなるチューブ状構造体がどのように曲率を生じるのか、べん毛先端に強く結合しながらフラジェリンの繊維構築を促進するキャップ構造はどのようなしくみで働くのか、そして分子モーターのトルク発生を支えるタンパク質分子の構造変化とその機構とはどのようなものか。物理学的にも大変興味深い超分子機械の動作機構を解明すべく、極低温電子顕微鏡や高輝度放射光X線によって得られたデータによる立体構造解析の工夫や、光学ナノ計測技術の開発によって得られた分子モーターの動態計測データから、これらの謎を解き明かす作業を進めている。

高速回転するべん毛モーターは、一見摩擦もせず摩擦も小さな軸受けに支えられ、回転子や固定子に加えて反転制御装置もあり、見かけは人工のモーターと変わらない。ただし、そのエネルギー消費量は 10^{-16}W 程度と熱ノイズレベルに近く、100%に近いエネルギー変換効率を持つと言われる。見かけは滑らかな高速回転をしているが、慣性が無視できて粘性のみが意味をもつナノスケールの世界では、十分に高い空間時間分解能で回転速度のゆらぎやステップを計測すれば、その真の動態とトルク発生機構を解明できる可能性がある。

一種類の蛋白質からなるチューブ状構造体がどのように曲率を生じるのか、べん毛先端に強く結合しながらフラジェリンの繊維構築を促進するキャップ構造はどのようなしくみで働くのか、そして分子モーターのトルク発生を支えるタンパク質分子の構造変化とその機構とはどのようなものか。物理学的にも大変興味深い超分子機械の動作機構を解明すべく、極低温電子顕微鏡や高輝度放射光X線によって得られたデータによる立体構造解析の工夫や、光学ナノ計測技術の開発によって得られた分子モーターの動態計測データから、これらの謎を解き明かす作業を進めている。