

Review of Chemistry in 2007



2007 年の化学

●注目の論文●

- イオンの流れで駆動する生物分子モーター
- テルペン環化酵素の反応を巧みに制御
- イソプレンとポリケチドの融合合成システムにおける酵素機能解析
- 12 個のアミノ酸が植物の形を制御する?!

●最新のトピックス●

- 第三世代を迎えたスコルピオネート配位子
- バイオプラスチックの輪廻転生
- 光照射によって駆動する分子シャトル
- アルコール酸化プロセスはどこまで進歩したのか?

注目の論文

イオンの流れで駆動する生物分子モーター

Molecular Motor

Nishiyama Masayoshi
西山 雅祥

“Direct observation of steps in rotation of the bacterial flagellar motor,” Y. Sowa, A. D. Rowe, M. C. Leake, T. Yakushi, M. Homma, A. Ishijima, R. M. Berry, *Nature*, **437**, 916 (2005).

バクテリアのべん毛モーターは、細胞外から流入するイオン流を回転運動へと変換する生物分子機械である。この滑らかな回転運動の素過程となるステップ状の角度変化が検出された。

バクテリアのべん毛モーターは、自然界には数少ない回転運動を生み出す生物分子機械であり、その速度は毎分 1 万回転にも達している。バクテリアは、この回転モーターで長いらせん状のフィラメント(べん毛繊維)をスクリューのように回転させることで、水のなかを

自由に泳ぎまわっている^{1~3)}。

べん毛モーターは、数十種類ものタンパク質が何百個も集まってできている複雑な分子集合体である(図 1)。回転運動の発生にかかわる重要な部位として、べん毛繊維の根元に位置する「回転子」と、それを取り囲むように位置する約 10 個の「固定子」があげられる。各固定子は膜タンパク質の複合体であり、共役するイオン(大腸菌では H^+)を選択的に通過させるイオンチャネルとしての機能が備わっている。細胞内外では、共役イオンの濃度差や膜電位差により電気化学的な勾配が生じているので、共役イオンは自発的に細胞内へと流入することになる。その際に生じる自由エネルギー利得が、固定子-回転子間でのトルク発生へ

と変換される。べん毛の回転運動が実証された 30 年前から、ある一定量の角度変化が素過程として存在し、それが繰り返されることで回転が生みだされていると考えられてきた。しかしながら、べん毛モーターの回転速度があまりにも速すぎるなどの理由で、誰もその素過程を検出することができなかったのである。

曾和らの研究グループは、べん毛モーターの回転速度を遅くすることでブレークスルーを生み出した。海洋性ビブリオ菌のべん毛モーターは、 Na^+ を共役イオンとして駆動するユニークな性質があり、また、その構造や機能は大腸菌のべん毛モーターときわめて類似性が高いことが判明していた。曾和らは、ビブリオ菌の固定子を一部改変し、大腸菌内で発現させることで、細胞本体は大腸菌でありながら、 Na^+ を共役イオンとして駆動するべん毛モーターを作製した。水溶液中の Na^+ 濃度を減らし、かつ固定子の発

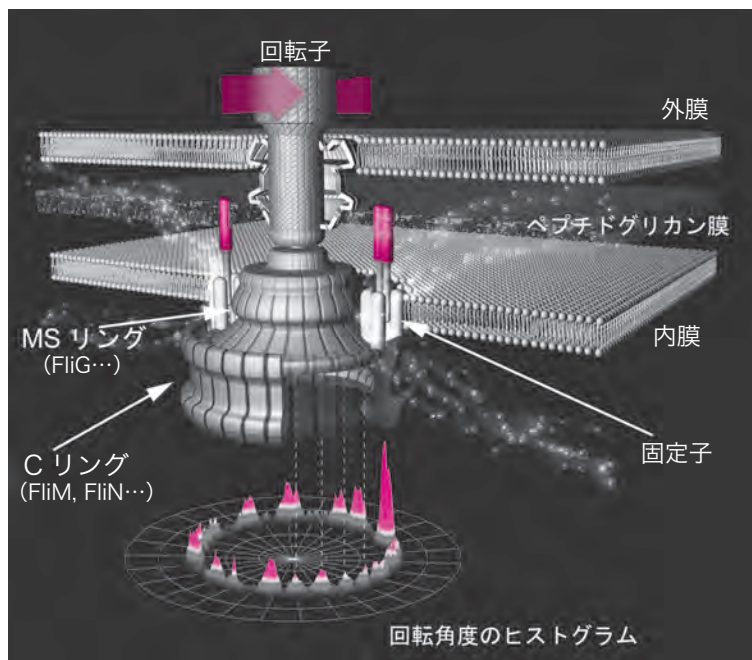


図1 ベン毛モーターの構造と回転角度のヒストグラム
CG 提供：石島秋彦教授（東北大学多元物質科学研究所）。

現量を制御することで、ベン毛モーターを通常の数百分の1の速度で回転させることに成功した。さらに、生体分子1個の動きをナノメートルの精度で検出できる光学顕微鏡技術を応用し⁴⁾、ベン毛モーターの回転運動を超高感度で計測

した。その結果、ベン毛モーターは 14° を単位とするステップ状の角度変化を26回繰り返すことで1回転することが明らかになった(図1)。この実験結果は、トルク発生にあたり最も重要とされる回転子のMSリング(26個のFliG分子が

リング状に配列)の周期構造と見事に一致する。つまり、1ステップの大きさにはタンパク質の立体構造が反映されており、決定論的な性質をもつことになる。さらに実験結果から、ステップの向きは必ずしもそろえられておらず、時おり逆向きのステップも生じることがわかった。これは、ステップ生成機構には確率的な性質も含まれることを意味している。興味深いことに、これらと同様の性質は、ATP合成酵素やキネシンなどのATP駆動型分子モーターからも報告されており⁵⁾、生物分子モーターに共通する動作原理を構築するうえで重要な手がかりになると考えられる。今後、ベン毛モーターのステップ状変位を詳しく調べることで、どのようにして細胞内に流入するイオン流がトルク発生へと変換されているのか、そのしくみが明らかになると期待される。

【京都大学大学院理学研究科】

1) 相沢慎一、『バクテリアのベン毛モーター』、共立出版(1998)。2) H. C. Berg, *Annu. Rev. Biochem.*, **72**, 19 (2003)。3) S. Kojima, D. F. Blair, *Int. Rev. Cytol.*, **233**, 93 (2004)。4) 柳田敏雄、『生物分子モーター』、岩波書店(2002)。5) M. Nishiyama, H. Higuchi, T. Yanagida, *Nature Cell Biol.*, **4**, 790 (2002)。