

第12回青葉工学振興会賞



生体分子マシンの1分子熱力学量測定法の開発

東北大学大学院工学研究科
 応用物理学専攻
 准教授 鳥谷部 祥一

生体内では多種多様なナノマシンが働いている。ただの高分子であるたんぱく質が、10 nm程度に折りたたんでナノマシンを構成し、燃料を分解しながら自律的に動いて、多様な機能を果たしているのだ。このようなナノマシンが、熱揺らぎの激しいナノスケールで、どうやって動いているのか、また、その効率はどれぐらいか。動作原理の解明は、生物学、化学、物理学を総動員して解くべき大きな問題である。また、さらに欲を出せば、このような分子モーターを真似て、人工的に自律的なナノマシンを作りたいと思うのだ。これは、ナノテクのひとつの目標であろう。

我々が研究している F_1 -ATPase（以下、 F_1 モーター）は、燃料のATP分子を分解しながら軸が一方方向に回転する（図1 a）。固定子をガラス上に貼り付けて、軸にサブミクロンの大きな粒子を付けることで、たった1分子の回転を光学顕微鏡で観察できる（図1 b）[1]。さらに、我々の発展させた回転電場法を用いることで、外からトルクをかけて、モーターの応答を測定できる（図1 c）。この方法を駆使して、1分子の仕事や熱といった熱力学量を計測している。

これまでの実験により、このモーターが、ストール状態（外部トルクとつりあって止まっている状態）では、ほぼ100%の熱力学効率を実現していることが分かった（図1 d）[3]。また、くるくると回転している状態でも、ATP分解で得た自由エネルギー変化を、ほぼ100%、回転運動につぎ込める。つまり、モーター内部では全く無駄がなく、内部摩擦はほぼ無視できるということが分かった[4, 5]。

なぜ、こんなにも効率が良いのか？ マクロなエンジンでは、速く動かすと摩擦が大きくなり、ミクロな自由度を通して熱としてエネルギーが散逸して効率が落ちる。しかし、 F_1 モーターはそれ自体がミクロであり、ミクロな自由度でエネルギーの流れを制御できている可能性がある。

そのメカニズムを理解するため、我々は新規の解析方法を開発し、回転の軌跡のみから、エネルギー変換機構を推定することに成功した[6]。分かったことは、 F_1 モーターは、回転軸の熱揺らぎを「観て」、その角度に応じて上手く化学状態を切り替えるというフィードバック操作により、エネルギー変換効率を高めているようだ。これは、ナノサイズの機械だからこそできる制御であろう。なお、このように、熱揺らぎを観測し、その情報に基づいて動くという動作は、「マックスウェルの悪魔」として知られている[7]。

このような高効率なモーターが自然界に存在し、我々の体内でエネルギー変換を担っているという事実、また、進化の過程で得たメカニズムの巧みさには、驚嘆する。現在、自律的に運動する人工ナノマシンの実現を目指して研究を進めている。今後の発展に期待して欲しい。

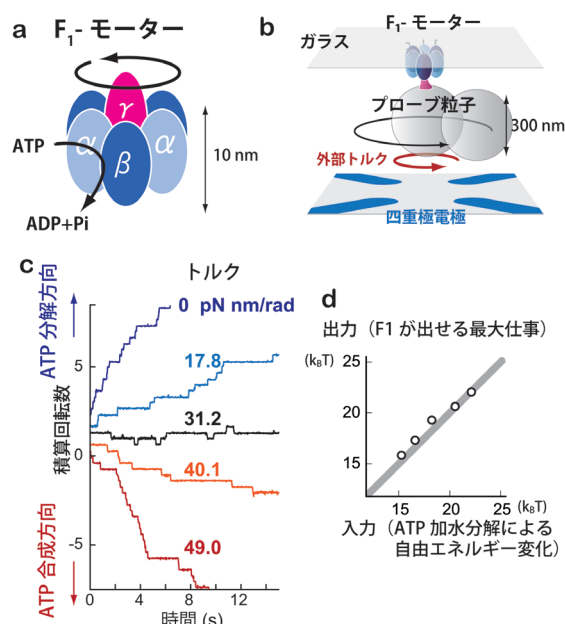


図1: a、 F_1 モーター。b、たった1分子の動きを観察し、また、回転電場法を用いて外部トルクをかけられる。c、外部トルク存在下での回転軌跡。d、 F_1 モーターが出せる最大仕事。傾き1の原点を通る直線にのる。これが、熱力学効率100%を表している。

- 1) Noji, Yasuda, Yoshida, Kinoshita: Nature 386, 299 (1997)
- 2) Watanabe-Nakayama, Toyabe, Kudo, Sugiyama, Yoshida, and Muneyuki: BBRC 366, 951 (2008)
- 3) Toyabe, Watanabe-Nakayama, Okamoto, Kudo, and Muneyuki: PNAS 108, 17951 (2011)
- 4) Toyabe, Okamoto, Watanabe-Nakayama, Taketani, Kudo, and Muneyuki: PRL 104, 198103 (2010)
- 5) Toyabe and Muneyuki: New J. Phys. 17, 015008 (2015)
- 6) Toyabe, Ueno, and Muneyuki: EPL 97, 40004 (2012)
- 7) Toyabe, Sagawa, Ueda, Muneyuki, Sano, Nature Phys. 6, 988 (2010)