

機関番号：32641

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21740291

研究課題名(和文) F1分子モーターの非平衡揺らぎの測定

研究課題名(英文) Measurement of nonequilibrium fluctuations of molecular motor F1-ATPase

研究代表者

鳥谷部 祥一 ( TOYABE SHOICHI )

中央大学 理工学部 助教

研究者番号：40453675

研究成果の概要(和文)：

回転分子モーターである F<sub>1</sub>-ATPase のエネルギー論を明らかにするために、回転電場法を用いて一定外部トルクおよび周期的トルクへの F<sub>1</sub>-ATPase の応答を測定した。その結果、F<sub>1</sub>-ATPase は ATP 加水分解で得られる化学自由エネルギー差を回転運動にほぼ 100% の効率で変換できることが分かった。

研究成果の概要(英文)：

In order to reveal the energetics of rotary molecular motor F<sub>1</sub>-ATPase, we measured the response of F<sub>1</sub>-ATPase against a constant and periodic torque by using an electrorotation method. We found that F<sub>1</sub>-ATPase can convert the chemical free energy change of ATP hydrolysis to mechanical motion.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：非平衡・非線形物理学

## 1. 研究開始当初の背景

これまでの分子モーターの研究は生化学的手法が主であり、研究対象も反応機構の解明がほとんどであった。しかし、分子モーターは化学エネルギーを力学的運動に変化する化学エンジンであり、反応機構の解明だけでなく、エナジエティクスに関する理解が動作原理の解明には不可欠である。F<sub>1</sub>-ATPase は、ATP を加水分解しながら一方方向に回転する

回転分子モーターであるが、生体内では、逆方向に回転させられ、ATP を合成している。ATP は生体内でのエネルギー通貨と呼ばれ、生命が活動するための燃料となっている。したがって、F<sub>1</sub>-ATPase のエナジエティクスを明らかにすることは、生命系のエネルギー代謝を理解する上で極めて重要である。それにもかかわらず、方法論の欠如により、分子モーターのエネルギー論の理解はほとんど進んでいなかった。一方、昨今、非平衡統計熱

力学は理論面での理解が急速に進んでいる。非平衡統計熱力学は、非平衡系のエナジェティクスを扱う方法論を提供するが、分子モーターの実験に応用した成功例はほとんどなかった。

## 2. 研究の目的

回転分子モーター $F_1$ -ATPase (図1) のエナジェティクスを理解することが本課題の目的である。特に、回転電場法を用い、化学力学エネルギー変換の出力である熱や仕事を測定することを目指す。その過程で、昨今の非平衡熱統計力学における理論的成果を応用し、分子モーターのような、熱揺らぎが支配的な微小スケールで働く自律系のエナジェティクスを理解するための方法論を構築する。

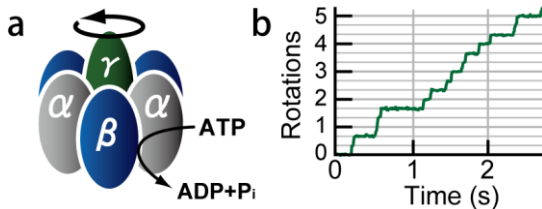


図1 : a, 回転分子モーター $F_1$ -ATPase. ATP を加水分解しながら、中心の $\gamma$ 軸が一方方向に回転する。b, 回転のトラジェクトリ. 1つの ATP 加水分解で、 $\gamma$ サブユニットは  $120^\circ$  回転する。

## 3. 研究の方法

$F_1$ -ATPase のエナジェティクスを理解するため、回転電場法を用い、一定外部トルクや周期的トルクへの応答を測定し、その結果から、化学力学エネルギー変換の出力である熱や仕事を見積もった。

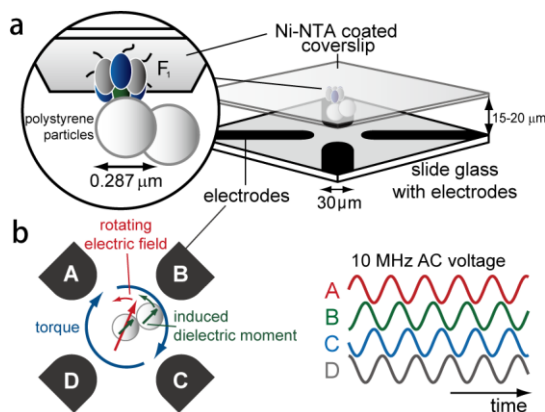


図2 : 回転電場法. 高速で回転する電場をかけることで、粒子に一定のトルクを課す。

一定外部トルクへの応答から、 $F_1$ -ATPase が出せる最大仕事を求め、また、回転速度の非平衡揺らぎや周期的外力への応答を測定し、

Harada-Sasa 等式などの非平衡等式を応用し、回転を通して溶媒へ散逸する熱を測定した。

## 4. 研究成果

$F_1$ -ATPase のストールトルク (ATP 合成方向の回転に必要なトルク) を測定し、 $F_1$ -ATPase が 1 ステップで出せる最大仕事を測定した。その結果、 $F_1$ -ATPase が 1 ステップで出せる最大の仕事は、1つの ATP 加水分解反応で得られる化学自由エネルギー差 (ATP 加水分解反応から取り出すことのできる最大の仕事) とほぼ等しいことが分かった (図3)。

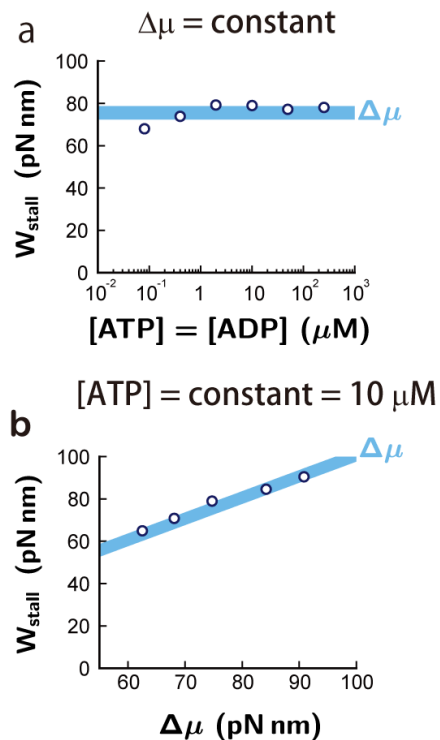


図3 : 1ステップあたり、 $F_1$ -ATPase が出せる最大仕事 ( $W_{\text{stall}}$ ) は、1ATP の加水分解反応から取り出せる最大仕事 ( $\Delta\mu$ ) とほぼ等しい。a,  $\Delta\mu$  は一定のまま、ATP, ADP の濃度を変化。b,  $\Delta\mu$  を変化。

これは、 $F_1$ -ATPase における化学反応と力学的ステップが 1 対 1 で対応することを示唆し、さらに、 $F_1$ -ATPase のエネルギー変換効率がほぼ 100%であることを示唆している。

また、 $F_1$ -ATPase の回転速度の非平衡揺らぎと周波数応答を測定し (図4)、揺動散逸定理の破れを熱散逸に結び付ける Harada-Sasa 等式 (Harada and Sasa, 2005) を用いて、回転で散逸する熱を測定した。その結果、 $F_1$ -ATPase は、ATP 加水分解で得られる自由エネルギー差をほぼ 100% 回転運動に変換できることを発見した (図5)。

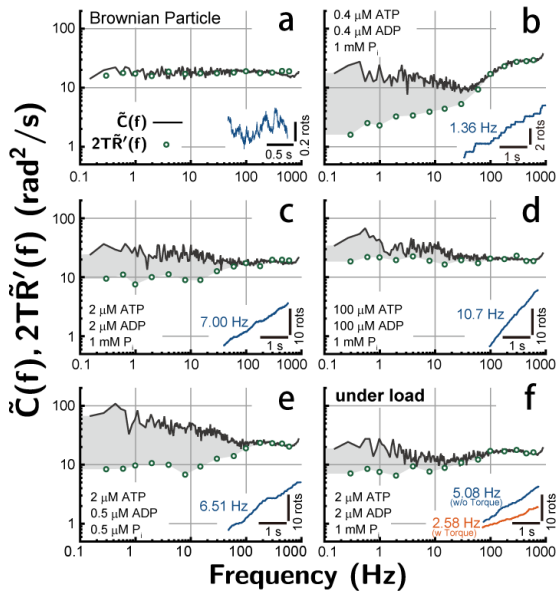


図4:  $F_1$ -ATPase の回転速度の揺らぎ (実線) と応答 (シンボル). Harada-Sasa 等式を用いると、これらの差から、回転運動を通して散逸する熱を見積もることが可能。

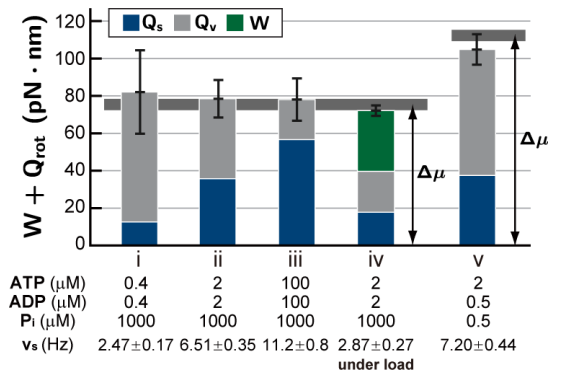


図5: 回転を通して散逸する熱 ( $Q_{rot}$ ).  $Q_s$  は平均的な一方向の回転による熱.  $Q_v$  は、非平衡揺らぎによる熱。

これらの結果は、 $F_1$ -ATPase が非常に効率の高い化学エンジンであることを示している。しかし、激しい熱揺らぎにさらされた微小系で、このような非常に効率のよいエネルギー変換がなぜ可能かは、今のところ分からない。今後の課題である。

##### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

1. Shoichi Toyabe, Takahiro Sagawa, Masahito

Ueda, Eiro Muneyuki, and Masaki Sano, "Experimental demonstration of information-to-energy conversion and validation of the generalized Jarzynski equality", Nature Physics 6, 988 (2010), 査読有

2. Shoichi Toyabe, Tetsuaki Okamoto, Takahiro Watanabe-Nakayama, Hiroshi Taketani, Seishi Kudo, and Eiro Muneyuki, "Nonequilibrium energetics of a single  $F_1$ -ATPase molecule", Phys. Rev. Lett. 104, 198103 (2010), 査読有

3. 鳥谷部祥一, 宗行英朗, "Single-molecule nonequilibrium energetics of a molecular-motor  $F_1$ -ATPase", 物性研究 95, 320 (2010), 研究会報告, 査読無

4. Sho Fujii, Katsuaki Kobayashi, Katsuhiko Kanaizuka, Tetsuaki Okamoto, Shoichi Toyabe, Eiro Muneyuki, and Masa-aki Haga, "Observation of DNA pinning at laser focal point on Au surface and its application to single DNA nanowire and cross-wire formation", Bioelectrochemistry 80, 26 (2010), 査読有

5. Sho Fujii, Katsuaki Kobayashi, Katsuhiko Kanaizuka, Tetsuaki Okamoto, Shoichi Toyabe, Eiro Muneyuki, and Masa-aki Haga, "Manipulation of Single DNA Using a Micronanobubble Formed by Local Laser Heating on a Au-coated Surface", Chem. Lett. 39, 92 (2010), 査読有

[学会発表] (計 12 件)

1. 鳥谷部祥一, 上野博史, 宗行英朗, "1分子トラジェクトリから分子モーターのポテンシャルを推定する", 日本物理学会(新潟大学), 2011年3月26日

2. 鳥谷部祥一, "情報-自由エネルギー変換と回転分子モーター", 日本磁気学会スピンエレクトロニクス専門研究会「スピンと力学系」, 東京大学, 2011年1月7日

3. 鳥谷部祥一, "情報を自由エネルギーに変換する", 基研研究会「非平衡系の物理 - 非平衡ゆらぎと集団挙動」, 京都大学, 2010年11月18日

4. 鳥谷部祥一, 沙川貴大, 上田正仁, 宗行英朗, 佐野雅己, "非平衡フィードバック制御

- による情報-エネルギー変換”, 日本物理学会, 大阪府立大学, 2010年9月23日
5. Shoichi Toyabe, Takahiro Sagawa, Masahito Ueda, Eiro Muneyuki, Masaki Sano “Information-heat engine as a model system of molecular motors”, 日本生物物理学会, 2010年9月22日
  6. Shoichi Toyabe, Takahiro Sagawa, Masahito Ueda, Eiro Muneyuki, Masaki Sano “Experimental demonstration of information-energy conversion”, StatPhys 24, Cairns Convention Center (Austoraria), 2010年7月23日
  7. Shoichi Toyabe, “Single-molecule nonequilibrium energetics of a molecular-motor  $F_1$ -ATPase”, Mini-synposium on Liquids, 九州大学, 2010年6月26日
  8. Shoichi Toyabe, Takahiro Watanabe-Nakayama, Tetsuaki Okamoto, Seishi Kudo, Eiro Muneyuki, “Nonequilibrium energetics of a single  $F_1$ -ATPase molecule”, Biophysical society, Annual meeting, SanFrancisco (USA), 2010年2月
  9. Shoichi Toyabe, “Mechanochemical coupling and energetics of  $F_1$ -ATPase”, International Workshop on Dynamic Cross-effect in Softy Condensed matter, 東京, 2009年11月5日
  10. 鳥谷部祥一, 中山隆宏, 岡本哲明, 工藤成史, 宗行英朗, “ $F_1$ -ATPase のストールトルク”, 日本生物物理学会, 徳島, 2009年10月31日
  11. 鳥谷部祥一, “ $F_1$ -ATPase の1分子非平衡熱力学”, FoF1 勉強会, 横浜市立大学, 2009年10月20日
  12. 鳥谷部祥一, 中山隆宏, 岡本哲明, 工藤成史, 宗行英朗, “回転分子モーター  $F_1$ -ATPase のストールトルク”, 日本生物物理学会, 熊本大学, 2009年9月21日
6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
鳥谷部 祥一 (TOYABE SHOICHI)  
中央大学・理工学部・助教  
研究者番号: 40453675