2PD045

Na⁺駆動型モータータンパク質 PomA の分子間架橋
○依光朋宏、浅井友香子、佐藤 健、本間道夫 (名大院・理)

Vibrio alginolyticus の Na⁺駆動型モーターでは、トルク発生ユニットが 4 種類のタンパク質(PomA、PomB、MotX、MotY)で構成されることが考えられている。この複合体は Na⁺チャネルを形成し、イオン流をモーターの回転力へ変換していると考えられている。本研究では、細胞膜上で 2 つの PomA 分子が細胞外ループで近接していることを示唆する結果が得られたので報告する。

最近、PomA の細胞外ループ領域の 167 番目から 180 番目のアミノ酸残基を Cys 残基に置換した PomA (Cys-PomA)が作成された。このうち 170～177 番目の残基で、DTT 存在下では western blot により 25 kDa の PomA のバンドが検出されるが、DTT 非存在下では新たに 43 kDa の位置にバンドが検出された。この 43 kDa バンドは Cys 残基を持たない野生型 PomA では検出されず、P172C 置換体で最も強く現れた。P172 の Ala、Ile、Ser への置換体は野生型 PomA と同じバンドパターンであった。この 43 kDa バンドは、菌体を DTT 処理後、SH 基修飾剤 NEM で処理すると見られなくなり、酸化剤 CuCl₂ で処理すると促進された。さらに、DTT→NEM→CuCl₂ の順で処理を行うと 43 kDa バンドは現れないが、NEM 処理を行わないとバンドは現れた。実際に Cys-PomA が NEM で修飾されていることが、¹⁴C-NEM ラベルにより確認できた。以上のことより、PomA の細胞外ループは単なる膜貫通領域のつなぎ役ではなく、PomA 同士の分子間相互作用を行っていることが考えられる。

T.Yorimitsu, Y.Asai, K.Sato, M.Homma: Intermolecular crosslinking of PomA, the Na⁺-driven flagellar motor component of *Vibrio alginolyticus*

2PD046

タンパク質のエネルギー蓄積とマクロな揺らぎへの力学的アプローチ
中川尚子 (茨城大理)、金子邦彦 (東大院総合)

タンパク質 1 分子に着目した実験では、タンパク質が非常にゆっくりとしたマクロな揺らぎを持つこと、ATP との反応により非平衡状態におかれた時、非常に長い時間に渡って熱平衡に達することなく、内部に過剰なエネルギーを保持し続けること、が示唆されている。これは、タンパク質という巨大分子が、通常の熱平衡への緩和の範疇に納まらない現象を示すことを意味する。ここでは、力学系の立場として、この問題を以下のように置き換える。熱欲に浸された大きなシステムが、その内部の複雑なダイナミクスにより緩和時間を長くしたり、普通では考えられないような長時間の揺らぎを示したりすることはできるだろうか。

この問題に対し、我々は以下の 2 つのアプローチをとった。

(1) 簡単な複数の要素からなるハミルトン系を用意し、このシステムが平衡状態から特殊なずれ方をした場合の緩和のあり方を議論する。各要素への熱浴の影響が一樣ではない場合（つまり、内と外のような構造が存在し、熱浴の強い直接的影響を受けるものと、あまり影響を受けないものが分化しているような場合）には、非平衡状態からの緩和は長いものとなり、簡単なメカニズムの下、システムの中にある程度の長時間エネルギーを貯め込むことは可能になる。

しかし、この簡単モデルではエネルギーをある場所に蓄えるのみで、その伝搬やタンパク質のマクロな変形、仕事へのエネルギー利用について議論することはできない。そこで、積極的に、タンパク質のマクロな揺らぎと非平衡状態での大変形という問題に取り組むために、次の議論を行なう。

(2) タンパク質の構造を見ると helix-loop-helix という基本単位の存在が目につく。この基本構造のモデル化として、スケールの違う 2 種の双極子が混在するシステムを考える。異なったスケールが混在することに起因して、マクロな揺らぎ（ここではスケールの大きな双極子 (α-helix) 同士の揺らぎとする）が一種間欠的ともいえる性質を持つようになる。この揺らぎは f^{-α} 的な揺らぎになっており、実験で見えているマクロな長時間揺らぎと関係があるかもしれない。

この混在系のもとで、(1) で見るような長時間緩和のメカニズムが発現する可能性を模索し、マクロな構造変化とエネルギー蓄積の関係について議論を進めていきたい。

2PD047

確率共鳴型筋肉モデルの機械特性
○松浦弘幸、中野正博 (政策研究大学院大学、産業医科大学)

我々は、外部より与えられた振動で駆動する、非対称の鋸歯状の微小機械系の動作特性を研究してきた。この微小機械系の寸法の縮小に伴い、入力エネルギーを小さくしたとしても、機械効率は、指数的に悪化することを指摘した³⁾。つまり、入力エネルギーと微小機械系の寸法の比率(釣り合い)の悪化と熱ノイズに起因する。他方、生物機械は、「熱雑音の高々10 倍程度の入力エネルギーで効率よく動作する」という特性がある。そこで、我々は、「熱ノイズと共存・利用する微小機械で、エネルギーの伝播は、共鳴現象を通じて行う微小機械(Stochastic Dynamics に基づく、確率共鳴機械)」を考えた^{2, 3)}。この確率共鳴機械の寸法は、筋のアクチン・ミオシン系の大きさと同程度であり、ATP の加水分解で生じた熱エネルギーを、水分子の熱ノイズに変換して、この熱ノイズを利用して駆動される確率共鳴機械である。この機械では、ミオシン頭部は、質量、寸法及びバネ定数で決まる固有振動運動(確率共鳴現象)を行い、球形のアクチン分子と分子間力相互作用を通じて、一方向運動するSIRM(Stochastic Inclined Rods Model)^{1,2)}。SIRM のすべり速度は、10⁻⁶m/s、出力は、10⁻¹¹N となり、測定されている実験結果と非常に良い一致を示した³⁾。また、機械効率と寸法入力比も実在のアクチンミオシン系と同程度の数値となり、生物機械の特質である「ノイズレベルの入力エネルギーで効率よく動作」する性質が、極めてよく再現された。SIRM は、ナイクスト定理に基づく、ランジュバン型超音波モーターである。フラインマンラッチェットの観点からは、傾いたロッドと、球形をしたアクチン分子により、揺らぎの非対称性を生み出している。また、Z 膜に固定されたアクチン分子は、ミオシン頭部に対して、板バネ(拘束条件)として作用する。これは、ラッチェットに負荷のある運動に相当し、系が散逸構造を持ち、ATP のエネルギー連続供給可能なならば、等温度下でもバイアスのある機械系のラッチェットは、一方向に回転しつづける。SIRM 系は、複数の熱源を持つ。ATP、媒質の温度、ラッチェットに掛かるバイアス、開放系で熱の捨て場としての遠方の低熱源である^{4, 5)}。これら SIRM の持つ性質は生物内で、一般的に見出されるであり、熱力学の第二法則を破らない。

1. H. Matsuura, M. Nakanno: Theoretical Approach To Actin-Myosin System as an Example of Complex system, Biomedical Fuzzy and Human Science, Jr. of Biomedical Fuzzy Systems Association, 3(1),47-52, 1997

2. H. Matsuura, M. Nakanno and N Noda: Theoretical Actin Myosin Systems Based on the Stochastic Resonance, Biomedical Fuzzy and Human Science, Jr. of Biomedical Fuzzy Systems Association, 4(1), 23-31, 1998

3. H. Matsuura, M. Nakanno, et al : Physics of Small Systems : Micromachine, Jr. Of Micromachine Society, 7(1), 54-126, 1994

4. H. Matsuura, M. Nakanno: Movement of Actin Myosin System Induced by Random Noise: A Model of based on Stochastic Resonance, Mathematical Topics in Biology, (now printing, 1999)

5. 松浦弘幸・中野正博：熱ノイズ型分子機械（確率共鳴型筋肉モデル）、東京理科大学出版会、SUT.7 または 8 月号、1999 掲載予定

H. Matsuura, M. Nakanno :Mechanical Characteristics of Muscular Model based on Stochastic Dynamics