3P125

フラッシュイングラチェットの不等式 (易動度でなく微分易動度を測る重要性)

○林 久美子¹、佐々 真一¹ (¹ 東大総合文化、² 東大総合文化)

ラチェット系で、外力 f に対する粒子速度 v の変化を応答として測定することはよく知られているが、応答に以下の2種類が存在することは認識が薄い。

$$\mu = \frac{v}{f} \quad (1)$$

$$\mu_d = \frac{dv}{df} \quad (2)$$

μ を易動度、 μ_d を微分易動度といい、平衡系近傍では両者は等しい。ラチェットでも激しい非平衡状態では $\mu \neq \mu_d$ で、量の縮退が解ける。どちらが重要か?、つまりどちらがより多く他の量と関係を持ち豊かな理解を我々にもたらすか? という問いを發すると、答えは、実は、微分易動度 μ_d のほうなのである。微分易動度 μ_d の重要性を示すために発表者が提案する μ_d を含む関係式は、拡散係数、温度をそれぞれ D 、 T として、

$$D \geq \gamma(\mu_d)^2 T \quad (3)$$

である。(3) は広いクラスのラチェットで成立する普遍的な不等式だ。この非自明な不等式は、粒子の運動の時間反転軌道 (確率的な意味) の持つ対称性の帰結で、この対称性は激しい非平衡状態においても保持される (Hayashi-Sasa, 論文投稿準備中)。

現代の1分子計測において『操作と観測』ともに高い精度を誇る時代になった。精度の向上から、我々は μ と μ_d の値の違いまで検知することができるだろう。ラチェット系のような平衡状態から遠く離れた非平衡状態では、平衡で定義された量の縮退が解けるので、その違いを理解し量の整頓を行うことが大事だと思う。分子モーターの研究に於いては地味であるが、 μ と μ_d の違いなど、我々はさまざま量の相互関係、重要性を問いていきたい。

K. Hayashi and S. Sasa : The new inequality among measurable quantities in a flashing ratchet

3P127

分子モーターの非平衡熱力学 - 現象論的エネルギー論によるアプローチ

○原田 崇広 (京大院・理)

生体分子モーターの化学-力学変換の機構についての理論的研究はこれまで盛んに行われ、熱ラチェットに代表される様々なモデルが提案されている。しかしそうした抽象的なモデルには物理的意味の不明確な仮定やパラメータが色々含まれ、それらを実験的に検証することはきわめて困難である。その意味でラチェットは、分子モーターのモデルとして定量的検証可能性に課題を残していると言える。このような状況では、もし最小限の仮定 (エネルギー保存則や応答の線形性など) に基づいて、実験的に測定可能な物理量の間に閉じた関係式が得られるとすれば、実験データを整理してモデル化する上で有用である事は間違いない。我々はそのような現象論の試みの一つとして、分子モーターの速度、ゆらぎの相関、また外力に対する感受率などの測定量とエネルギー効率との関係を与える式を提案している [1]。本発表ではこの枠組みにより西山らによるキネシンの実験結果を定量的に説明できる事を示す。また理論の妥当性や適用可能範囲を明らかにするために熱ラチェット等の簡単なモデルについて数値的検証を行った結果を報告する。[1] T. Harada, submitted; cond-mat/0310547.

T. Harada : Nonequilibrium Energetics for Molecular Motors - A Phenomenological-Energetics Approach

3P126

協同性がもたらすブラウンモーターの自律性

○江崎 誠治¹、石井 由晴²、柳田 敏雄^{1,2} (¹ 阪大院・生命機能・ナノ生体、² 科技振・ソフトナノマシン)

一分子計測系の発展により、多分子系の実験結果から帰納された描像と、一分子の挙動とが根本的に異なる事例が報告されている。決定論的な収縮運動と考えられていた分子モーター・ミオシンの運動が確率論的な運動の集合であった事はその最たる例であろう。我々はこのミオシンの運動をモデル化すべく、ミオシン単分子の挙動に焦点を当て、揺らぎを利用して動くモデルを構築した (Esaki et al., 2003)。このモデルでは、ミオシン一分子の運動がブラウン運動様である点に注目し、ミオシンの生み出す変位をアクトミオシン相互作用のポテンシャル場の下でのブラウン運動として記述している。これによりポテンシャル場の擾乱が運動に方向性をもたらすことが示され、ATPase サイクルに伴うミオシンの動きや負荷依存性が再現された。

次に我々は、複数分子が集合した際に見られる協同現象を説明すべく、モデルの拡張を目指した。単分子の分子モーターは確率論的な挙動をしても、多分子系の運動は、確率現象の平均化というより、状況に応じて決定論に従うかのように振る舞う。この確率論的挙動と決定論的挙動との接点を探る為、複数のブラウン粒子を弱い相互作用で繋ぎ、その個々の挙動を逐次追跡することで、運動の速度・滞在時間 (dwell time)・方向性を評価した。その結果、粒子どうしを弾性定数 1 pN/nm 程度の線形ばねで繋ぎ、ばねの自然長をポテンシャル周期の半分の長さにした場合などで、重心の運動に単分子の運動よりも強い方向性が生じ、決定論的に機能し得ることを確認した。

こうした運動の効率化をもたらす要素を特定し、その生理的根拠を探ることで、単分子と多分子との振る舞いの違いを議論し、状況に応じて自律的に振舞う生体分子システムの動く仕組みに迫る。また、ATPase との関連も視野に入れ、より現実的なモデルの構築を目指す。

S. Esaki, Y. Ishii and T. Yanagida : Model describing cooperative movement of molecular motors under fluctuating potential

3P128

相関する揺らぎによる双方向自由エネルギー変換のモデル

○宗行 英朗 (東工大・資源研)

分子モーターによる運動やイオンポンプによる輸送は、しばしばラチェットモデルを基本としたモデルで説明される。しかし多くの場合、ラチェットモデルでは入力と出力が等価に扱われておらず、入力の自由エネルギーを定義しようとすると、エネルギー源のATPの化学ポテンシャルなどを含んだ形でモデルの系が定義されることが多い。この結果、反応の進行に伴い分子モーターやイオンポンプの状態はサイクル的な変化をしてもとの状態に復帰するのに、モデル系のポテンシャルは一方的に低下するという結果となったりする。このような扱いに矛盾がある訳ではないが、より自然な形のモデル化を目指して、ラチェットモデルを出発点として入力と出力を対等に扱うモデル化を行った。このモデルでは入力から出力へのエネルギーの伝達は分子機械の中での入力側と出力側の状態の揺らぎの相関を介して行われる。この相関を強くしないと入力と出力の間のエネルギー変換効率はほとんど0になるが、現在探索しているパラメーターの範囲で、入力と出力のfluxの比は最大90%、自由エネルギーの変換効率は最大40%となるものが見つかった。入力と出力の自由エネルギー差を逆転させればそのまま逆反応をすることが示され、入力と出力がほぼ拮抗する場合にはどちらも自由エネルギーを消費する状態が出てくる。入力側でエネルギーを消費しつつ出力側は外力と釣り合って踏ん張っている、というような状態も表現できており、現在様々な条件下でモデルの振る舞いについて検討している。

E. Muneyuki : A Model for free energy transduction by correlated fluctuation