

Fluctuation-Response Relation in Thermal Ratchet

京都大学大学院理学研究科 原田崇広¹

Takahiro HARADA Department of Physics, Graduate School of Science, Kyoto University

分子モーターについての最近の一分子計測実験は、それらの動作特性について様々な興味深い側面を明らかにしてきている。例えば、大きなノイズの中で確率的に動作しているということや、非常に高効率で化学-力学変換を行っているらしいといったことである [1, 2]。これらの結果を理解するためには、平衡から遠く離れて作動している分子モーター（Carnot 機関とは全く異なるメカニズムで動いているように見える）に適用できるように熱力学をいかに拡張するべきかを考えなくてはならない。

従って、こうした問題にアプローチするためには著しい非平衡系である分子モーターに対して、温度などの平衡熱力学の諸概念がいかに拡張されうるかを検討する必要がある。ところで、熱平衡系における物理量の揺らぎと微小な外力に対する応答との関係について、よく知られた揺動散逸定理が成立する。ブラウン運動するコロイド粒子の拡散係数と移動度の間に成立する Einstein の関係はその一例である。従って分子モーターにおいて揺らぎと応答の関係がどうなっているかを調べることで、上述の問題への端緒をつかむことが出来ると考えられる。

そこで我々は分子モーターのモデルとして熱ラチェットを採用し、その揺らぎと応答の関係を調べた [3]。本講演では熱ラチェットの一種である Rocking ratchet [4] について Einstein の関係がどうなっているかを調べた結果を報告する。まず始めに、走査型光ピンセットとポリスチレン微小ビーズ（直径 $0.20\ \mu\text{m}$ ）を用いて、実験的に Rocking Ratchet を構成した。光ピンセットを高速で走査すると、走査軌道に沿って非対称周期ポテンシャル（周期 $2.5\ \mu\text{m}$ ）を形成することが出来る [5]。ここにビーズをトラップするとビーズはポテンシャル上を一次元拡散運動する。さらに形成したポテンシャルプロファイルを sine 型に揺すってやると、ビーズの熱運動に一方向性が現れた。この時、ビーズの拡散係数と外力に対する移動度をそれぞれ測定すると、揺すりの振幅と共に増大しており、両者の間には線形に近い正の相関関係があることが分かった。

以上の実験結果をうけて、我々是对応する Langevin 方程式の解析も行った。数値計算の結果、Langevin モデルは実験の結果を定性的に再現できることが分かり、また拡散係数と移動度の間に正の相関があることも確認された。しかしより詳しい解析の結果、両者の関係は Einstein 型の線形関係からずれていて、拡散係数の移動度に対する比（これを実効温度と定義する）は、熱浴の温度よりも大きくなった。また同様の結果が、揺すりが遅い極限における解析的な計算によっても示された。

¹E-mail: harada@chem.scphys.kyoto-u.ac.jp

以上の結果から、非平衡定常状態にある熱ラチェット系では、拡散係数と移動度の比として定義される実効的な温度が、環境の温度よりも大きくなるということが分かった。このような高い実効温度は熱浴との間に余分な散逸を引きおこし、エンジンとしての熱ラチェットの効率を下げる効果がある。

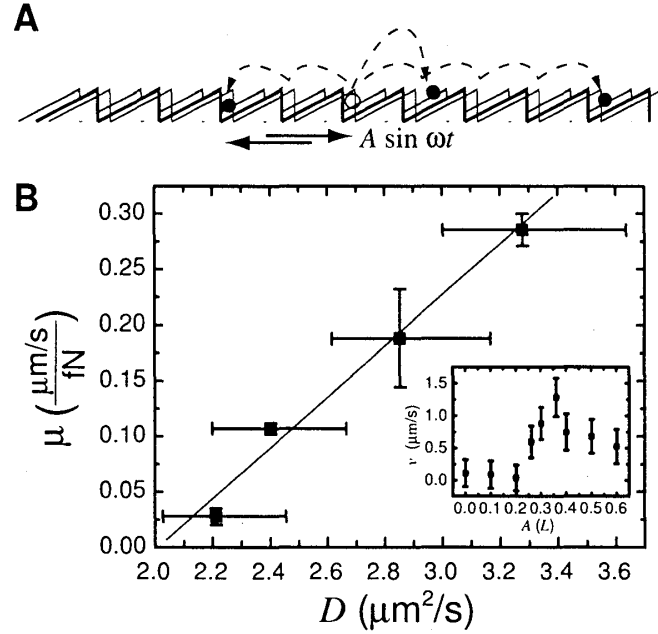


図 1: **A** Rocking Ratchet の模式図。走査型光ピンセットにより実現した非対称周期ポテンシャルを sine 型に揺るとトラップされたビーズの拡散運動に方向性が生じる。**B** 光学 rocking ratchet における拡散係数と移動度の関係。ポテンシャルを揺らした状態で拡散係数と移動度をそれぞれ測定し、両者の関係をプロットした。左下から振幅 $A = 0L$, $0.20L$, $0.26L$, $0.40L$ でのデータを表す。ただし L はポテンシャル周期 ($2.5 \mu\text{m}$)。Inset: 各振幅 A における、無負荷でのビーズの平均速度。A の右方向を正にとってある。

参考文献

- [1] K. Svoboda, C. F. Schmidt, B. J. Schnapp, and S. M. Block, *Nature* **365**, 721 (1993).
- [2] H. Tanaka *et al.*, *Nature* **415**, 192 (2002).
- [3] T. Harada and K. Yoshikawa, *in preparation*.
- [4] M. O. Magnasco, *Phys. Rev. Lett.* **71**, 1477 (1993).
- [5] L. P. Faucheux, G. Stolovitsky, and A. Libchaber, *Phys. Rev. E* **51**, 5239 (1995).