

力生成する細胞（骨格）が示す非平衡揺らぎの統計分布

(九州大学 理学研究院) 水野 大介

【はじめに】

細胞内部は、熱的な揺らぎよりもはるかに大きな非熱的な揺動力が絶えず生成して散逸しているために、典型的な非平衡状態にある。ここで、非熱的な揺動力とは、例えばモーターたんぱく質がATPを加水分解して得たエネルギーを利用して生み出す非平衡力のことを指す。平衡媒質の熱揺らぎを解析する従来のマイクロレオロジーでは、揺動散逸定理を用いて揺らぎの2次のモーメント（パワースペクトルや平均2乗変位）から周囲媒質の力学特性が求められてきた。これは熱平衡状態にある均質な連続体中におかれた球状粒子に加わる揺動力はガウス分布に従うことが期待されるために、分布の形状まで議論する必要がなかったことも一因であると考えられる。

【結果と考察】

これまで我々は、細胞（骨格）内部において生じている非平衡揺らぎに関しても、従来のマイクロレオロジー法と同様に揺らぎの2次モーメントを求め、その値が揺動散逸定理を破っている度合いを系の非平衡の程度として定義して使用してきた[1-3]。例えばプローブ粒子に直接エネルギーが注入される単一粒子非平衡系の場合（例えば光トラップやプローブ粒子に付着したモーターたんぱく質によりプローブ粒子が駆動される場合）には、非熱的な揺らぎの2次のモーメントから直接注入されたエネルギーのスペクトルを求める方法論が発見されている[4]。しかしながら、細胞（骨格）中の非熱的揺らぎは、媒質中の各所で自発的に生じた駆動が連続弾性体中を伝搬してプローブ粒子に伝えられているために、このことを考慮した理論モデルを構築する必要がある。また平衡状態とは異なり、非平衡状態における揺らぎの駆動力はガウス分布することを期待する理由もないために（事実モーターたんぱく質による力生成は最も単純な1分子系では指数分布をする）、揺らぎの分布形状を解析することで系の非平衡動力学に関するより詳細な情報が得られる可能性がある[5]。

細胞（骨格）中における非平衡揺動力は大雑把に距離の2乗の逆数に比例して系を駆動する。これは重力と同様の距離依存性であるために、細胞骨格中における非平衡揺らぎと、宇宙空間における重力の揺らぎ（分布）との間にはアナロジーが成立する。そのために我々は細胞（骨格）内で観測される非熱的な揺らぎは、1)力生成体の大数性、および2)プローブ粒子の有限サイズ効果のために truncate されたレビ分布として理解できると考えている。当日はこの考え方に従い、1)揺らぎの2次のモーメントを利用した通常のマイクロレオロジー解析、および、2)より高次のモーメントを含めた分布の形状全体の解析結果を紹介し、細胞（骨格）中で生起している非平衡な動力学を解釈したい。

【参考文献】

- [1] D. Mizuno *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 168102 (2009).
- [2] D. Mizuno *et al.*, Macromolecules **41**, 7194 (2008).
- [3] D. Mizuno *et al.*, Science **315**, 370 (2007).
- [4] T. Harada, and S. Sasa, Phys. Rev. Lett. **95**, 130602 (2005).
- [5] T. Toyota *et al.*, Soft Matter **7**, 3234 (2011).