

生き物の非平衡揺らぎと力学物性

(九州大学 高等研究機構) 水野大介

【はじめに】

細胞骨格とは剛性を持った蛋白質フィラメント（アクチン、マイクロチューブル）、その上で働くモーター蛋白質、および架橋物質からなる複合体のことである。細胞はこの動的なシステムを介して力を発生し、また、内外から加えられた力に対して敏感に反応することで、多様な生命現象（運動、輸送、信号変換等）を営んでいる。平衡状態にある“死んだ細胞”の力学物性は、細胞構成物質とその構造により一意に決定されるが、典型的な非平衡系である“生きた細胞”ではどうか。

本研究では、1)アクチン・ミオシン II・架橋剤の 3 要素からなる”生きた細胞骨格のモデルシステム”と、2)”本当に生きている培養細胞”を用い、その動態（モーターたんぱく質による力生成に伴う非平衡揺らぎ）と力学物性をマイクロレオロジーと呼ばれる手法を用いて計測した。マイクロレオロジーとは、コロイド粒子の運動から周囲の媒質の力学的な性質を求める手法の総称であり、大きく分けて active マイクロレオロジー、passive マイクロレオロジーの 2 種類に分けられる。active マイクロレオロジーではコロイド粒子に外力 $F(\omega)$ を加え、変位 $x(\omega)$ を計測することにより応答関数 $\alpha(\omega) \equiv x/F$ を直接求める。それに対して passive マイクロレオロジーでは外場を加えずにコロイド粒子の揺らぎ ($C(\omega)$: パワースペクトル) を計測し、平衡状態において成立する揺動散逸定理

($\alpha''(\omega) = \omega C(\omega) / 2k_B T$) を介して応答関数の虚部 α'' を求める。我々は、揺動散逸定理が成り立たない非平衡状態においても、便宜上 $\omega C(\omega) / 2k_B T$ を応答関数と呼ぶ。

【結果と考察】

Fig. 2 に (a) 平衡状態、および (b) 非平衡状態におかれたモデル細胞骨格中に埋め込まれたコロイド粒子を用いて計測された応答関数の周波数スペクトルを示す (● : active $\alpha''(\omega)$ 、— : passive $\omega C(\omega) / 2k_B T$) [1]。両スペクトルは平衡状態において完全な一致を示したが、非平衡状態においては低周波域に桁以上の明確な不一致が観測された。同様な、active・passive マイクロレオロジー間の不一致は、コロイド粒子にレーザートラップ等を用いて直接外力を加えた場合にも観測されるが、その際の揺動散逸の破れは観測する系にお

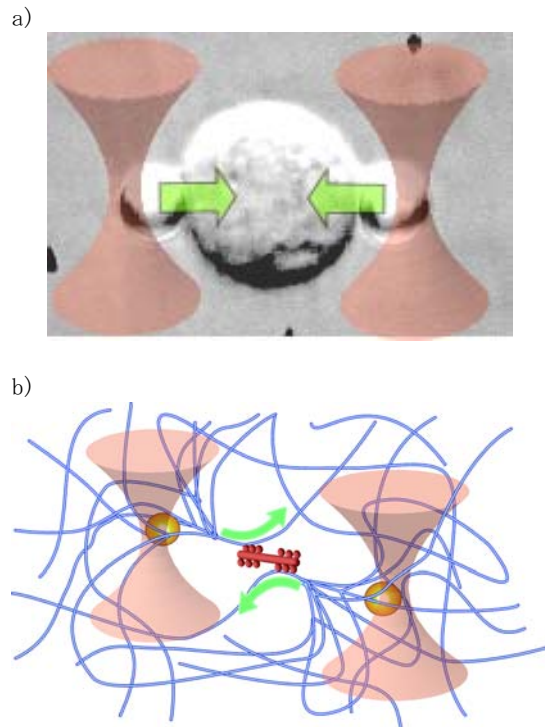


Fig. 1 a)培養細胞とb)アクチン・ミオシンゲルを用いたマイクロレオロジー計測

けるエネルギー散逸と関係していることが知られている[2, 3]。それに対して本モデルシステムでは、モーターたんぱく質が発生させた力が弾性場を介してコロイド粒子に作用する結果として揺動散逸が破れる。講演ではそのプロセスをモデル化し、これを実験結果と比較する。

同様の方法論を本当に生きている培養細胞に適用することもできる。本研究では、培養液中に浮遊し球状を保っている細胞の両側にコロイド粒子を接着させ(Fig. 1a)、これらを光トラップすることで active/passive マイクロレオロジー計測を行い、細胞の力学物性と揺動散逸定理の破れから(Fig. 3. a)、細胞の収縮力を求めた。その結果、細胞の収縮力が外部環境への牽引力に変換される効率は、光トラップの強度と細胞の硬さの比に強く依存することが分かった(Fig. 3b)。本計測システムでは、光トラップの強度が細胞にとっての外部環境の力学特性を与えている。したがって、今回得られた結果は、細胞が自らの力学的な特性を「ものさし」として利用して、外部環境の硬さ・柔らかさを測っていることを強く示唆している[4]。

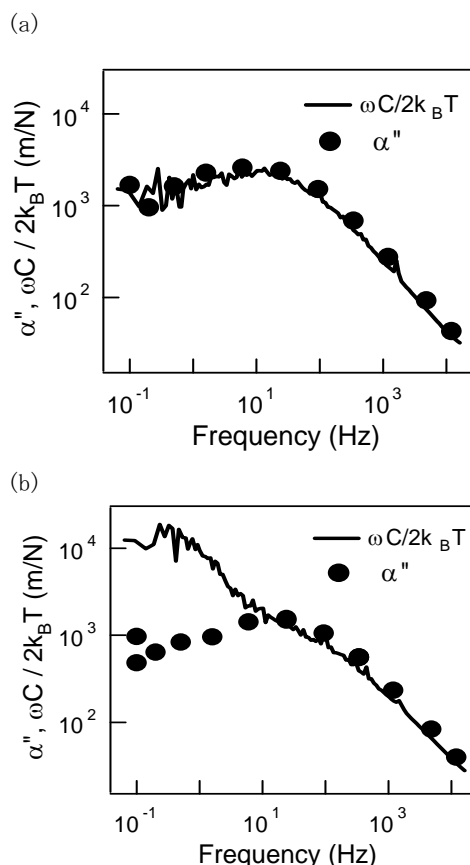


Fig. 2

(a) 平衡状態、(b) 非平衡状態の応答関数

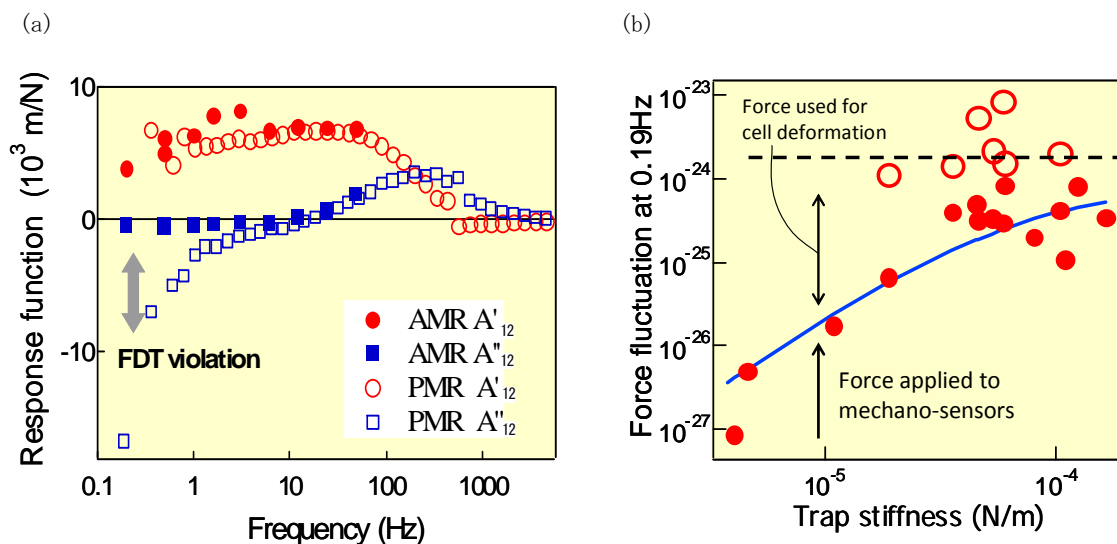


Fig. 3 a) 生きた細胞の応答関数スペクトルと b) 収縮力の伝播効率のトラップ強度依存性

【参考文献】

- [1] D. Mizuno, C. Tardin, C. F. Schmidt, and F. C. MacKintosh, Science 315, 370–373 (2007).
- [2] T. Harada, and S. Sasa, Phys Rev Lett 95, 130602 (2005).
- [3] S. Toyabe, and M. Sano, Phys Rev E 77, 041403 (2008).
- [4] D. Mizuno, R. G. Bacabac, D. A. Head, and C. F. Schmidt, Phys Rev Lett 102, 168102 (2009)