

非平衡揺らぎを通して考える細胞の力学知覚の物理メカニズム

(九州大学 高等研究院) 水野 大介

【はじめに】

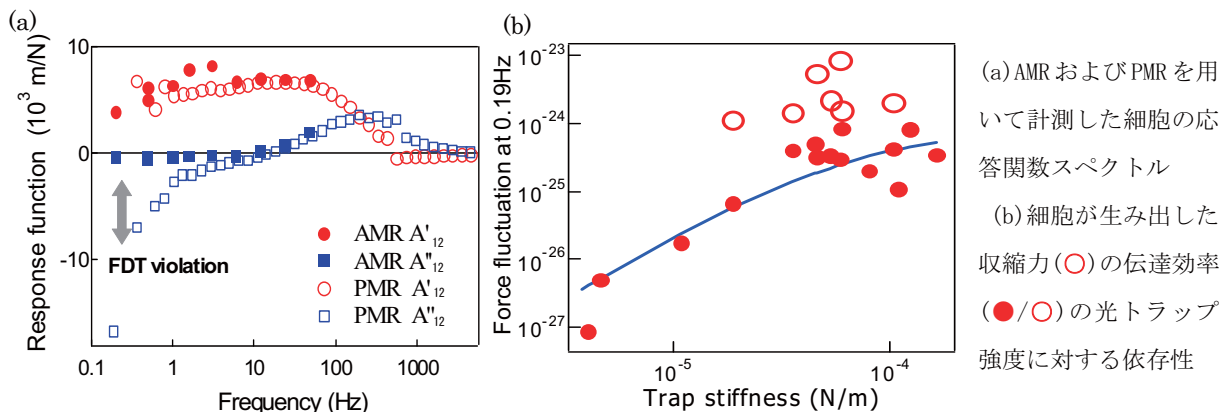
最近、細胞は周囲の環境の化学的な性質のみならず、力学的な性質にも依存して自らの振る舞い(分化、成長、運動、物質生産等)を決定することが明らかになって来た¹。それでは細胞はいかにして細胞外物質の力学特性を測っているのでしょうか? 物質の力学的な性質を調べるには、力を加えてその応答を計測する必要がある。したがって細胞が生み出す力とそれが外部環境に及ぼす力学的な影響を調べることは、細胞の力学知覚のメカニズムを解明するうえで本質的に重要である。

【結果と考察】

そこで本研究では、単純な球状を保った細胞の両側にコロイド粒子を接着させ、これらを光トラップすることで細胞の力学特性と牽引力の両者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、active マイクロレオロジー (AMR), passive マイクロレオロジー (PMR) の2種類に分けられる [2]。AMR では、コロイド粒子1に外力 $f_1(\omega)$ を加え、他方の粒子2の変位 $u_2(\omega)$ を計測することにより、応答関数 $A_{12}(\omega) \equiv u_2 / f_1$ を直接求める。それに対して PMR では外場を加えずに2つのコロイド粒子の揺らぎの相関 $C(\omega) = \langle u_1(\omega) u_2^*(\omega) \rangle$: クロスパワースペクトル) を計測し、平衡状態において成立する揺動散逸定理 ($A_{12}''(\omega) = \omega C(\omega) / 2k_B T$) を介して応答関数の虚部 A_{12}'' を求める。

このようにして求めた応答関数の周波数スペクトルを下図に示す。AMR, PMR を用いて計測した応答関数は、揺動散逸定理が成り立つ平衡状態では一致するはずであるが [3]、細胞がコロイド粒子に非平衡力を及ぼす低周波数域で、両者の間に顕著な違いが見られた。この揺動散逸定理の破れから、細胞が生み出している全収縮力と、そのうちコロイド粒子に対する牽引力として外部環境に伝達された成分の両方が定量的に求められることが分かった [4]。

この計測方法では、光トラップの強度が通常細胞にとっての外部環境の力学特性に相当する。そこで光トラップ強度を調節しつつ上記実験を行った結果、細胞が生み出した力が細胞外物質に伝播する効率は外部環境の力学特性に強く依存することが分かった。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示している。



【参考文献】

- [1] D. E. Discher, P. Janmey, and Y. L. Wang, Science 310, 1139 (2005).
- [2] D. Mizuno, D. A. Head, F. C. MacKintosh, and C. F. Schmidt, Macromolecules 41, 7194 (2008).
- [3] D. Mizuno, C. Tardin, C. F. Schmidt, and F. C. MacKintosh, Science 315, 370-373 (2007).
- [4] D. Mizuno, R. G. Bacabac, D. A. Head, and C. F. Schmidt, Phys Rev Lett 102, 168102 (2009).