

原子間力顕微鏡を用いた動物細胞のひずみ計測とその理論解析

Strain measurement of animal cells by atomic force microscopy and its theoretical analysis

奈良先端大物質, °(M2)名村 怜於, (D)山崎 勇輝, 岡野 和宣, 丹賀 直美, 細川 陽一郎

Div.of Mat.Sci., NAIST, °Reo Namura, Yuki Yamasaki, Kazunori Okano, Naomi Tanga, Yoichiroh Hosokawa

E-mail: namura.reo.ns5@ms.naist.jp

細胞の機械特性は細胞の生理機能（増殖、移動、分化、死）を理解するうえで重要な因子である。特に細胞の剛性は、細胞の形状変形に関係し、その生理機能の理解においての重要な要因であるが、細胞の構造を考慮した特性は複雑である。我々は原子間力顕微鏡（AFM）のひずみ計測により、細胞の剛性を解析する方法を検討しており、その物理特性と更には生理に及ぼす影響を明らかにすることを目標としている。これまでに植物細胞を試料とし、AFM によるひずみ計測と表面形状測定をおこない、そのデータを、ヘルツの接触理論（HCT）を用いずに解析し、細胞壁弾性と細胞内の膨圧を別々に推定する方法を提案している¹。本研究では、この解析技術を用いて動物細胞の細胞膜の弾性と細胞内の粘弾性（細胞内圧）を個別に解明することを目指した。

動物細胞試料としてイヌ腎臓尿管上皮細胞（MDCK）を使用した。MDCK はガラス基板上で、牛胎児血清とダルベッコ改変イーグル培地を体積比 1 : 10 で混合した液体培地を用いて培養した。先端形状が放物線状で先端球径 30 nm の AFM 探針を用いて、培地中で細胞のひずみ計測（フォースカーブ計測）と表面形状計測を行った。

一般にフォースカーブは HCT によって解析されるが、押し込みによるひずみ測定では、細胞が Fig. 1 に示すように、探針の接触部分のみでなく、細胞全体が変形することが想定され、この場合、HCT が適用できない可能性がある¹。これをふまえ、得られたフォースカーブを、HCT と線形弾性を仮定したフックの法則の両方で解析した (Fig. 2)。その結果、探針の変位量 (indentation) が約 300 nm より大きい場合、フォースカーブは線形に変形し、HCT での説明が困難となる。フックの法則で得られる細胞の見かけの弾性率（ばね定数）は約 75 pN / μm であった。一方で変位量が小さいときの変形は HCT に概ね従い、得られる弾性率は約 20 Pa であった。本研究ではさらに細胞の形状も考慮し、探針のまわりの変形も仮定した弾性シェル理論による解析を試みた。発表では、弾性シェル理論による解析結果をふまえ、動物細胞の細胞膜の弾性と細胞内圧（細胞の粘弾性）について議論する。

1. Tsugawa, S., Yamasaki, Y., Horiguchi, S. *et al.* Elastic shell theory for plant cell wall stiffness reveals contributions of cell wall elasticity and turgor pressure in AFM measurement. *Sci Rep* **12**, 13044 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16880-2>

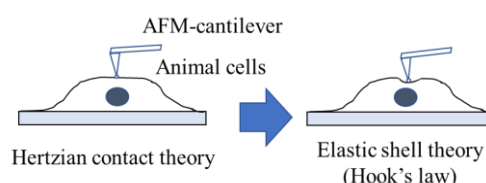


Fig. 1. Adaptation of Hertzian contact theory (HCT) to cell deformation. Left and right pictures are adaptable and non-adaptable cases, respectively.

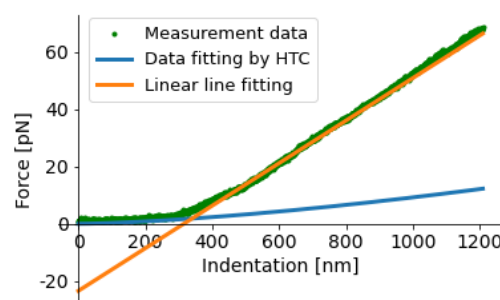


Fig. 2. Force curve measurement at the top of MDCK cell.