

## 原子間力顕微鏡による応力緩和測定の数値解析

### Numerical analysis on stress relaxation measurements using atomic force microscope

北大情報科学<sup>1</sup>, 中田ももこ<sup>1</sup>, 岡嶋孝治<sup>1</sup>

Hokkaido Univ.<sup>1</sup>, Momoko Nakada<sup>1</sup> and Takaharu Okajima<sup>1</sup>

E-mail: sumomo\_va@ist.hokudai.ac.jp

原子間力顕微鏡(AFM)はカンチレバー先端のプローブをサンプルに押し込み、押し込み量( $\delta$ )と押し込み力(F)の関係から、硬さ像や形状像を得ることができる装置である。高い空間・力分解能を持ち、液中測定が可能のため、生体分子や細胞の力学測定に広く利用されている。また、応力緩和測定はサンプルを押し込んだ後カンチレバーの押し込み量を一定にする測定法である。粘弾性の測定が可能で、侵襲度が低く、表面形状に依存しにくいという利点がある。これまで単一細胞の測定が多数行われてきたが、近年は単層の細胞集団[1]や組織・臓器切片の力学測定[2]も可能になってきた。さらに、より複雑で力学特性が数桁にも変化する未処理の組織や臓器に対しての AFM の精密計測が求められているが、それには粘弾性計測の定量解析法の開発が必要である。実際の測定では、押し込み時の履歴を緩和応答時に考慮する必要がある。また、緩和応答時には押し込みを一定としているが、実際にはカンチレバーは少しずつたわんでいく。そこで本研究では、実際の AFM 測定で得られる緩和挙動をシミュレートし、(i)押し込みが瞬間的に発生し、押し込みが一定と仮定したモデル(Hertz model)や(ii)押し込みの履歴を緩和応答時に考慮し、押し込みが一定と仮定したモデル(Ting model)[3]での緩和挙動の解析精度を調べた。

応力を加えた時の応力とひずみの応答は、微小な応力の重ね合わせに等しいとする、ボルツマンの重畳原理に基づく AFM の F- $\delta$  関係式 [3]を用いて、時間依存の押し込み量  $\delta(t)$  を定義し、応力緩和時のカンチレバーのたわみ量の時間変化を考慮したモデルを作成した。ここで、緩和弾性率  $E(t)$  はべき乗則を仮定し、特徴的な時間における緩和弾性率  $E_0$  とべき指数(粘性指標)  $\alpha$  で表現できるとした。 $E_0$  と  $\alpha$  の変化に対する  $E(t)$  をシミュレートし、Hertz model と Ting model による解析精度を評価した結果、どちらの解析モデルでもカンチレバーのたわみの時間変化が大きい程解析精度が低くなり、それに加えて Hertz model では弾性率  $E_0$  が小さい程解析精度が低くなった。また、カンチレバーのばね定数が大きい程、解析精度は高くなった。当日はその詳細について報告する。

#### 【参考文献】

- [1] Y.Fujii, Y.Ochi, M.Tuchiya, M.Kajita, Y.Fujita, Y.Ishimoto & T.Okajima, Biophys. J. 116, 1152 (2019).
- [2] N.Antonovaite, S.V.Beekmans, E.M.Hol, W.J.Wadman & D.Iannuzzi, Sci. Rep. 8, 12517 (2018).
- [3] Y.M.Efremov, T.Okajima & A.Raman, Soft Matter 16, 64 (2020).