FM-AFMによる固液界面構造の分子スケール可視化

Molecular-scale visualization of solid-liquid interfaces by FM-AFM

山田啓文　京都大学（龍谷大学・慶應義塾大学）

Hirofumi YAMADA

Kyoto University (Ryukoku University, Keio University)

h-yamada@kuee.kyoto-u.ac.jp / yamada.hirofumi.s73@kyoto-u.jp

固液界面は、結晶成長、触媒反応、潤滑・摩擦など種々の物理化学現象、さらにはさまざまな生化学機能が発現する活性場として重要な役割を担っており、近年こうした現象の微視的過程の解明に向けて精力的に研究が進められている。一方、周波数変調原子間力顕微鏡（FM-AFM）は、超高真空における非破壊・高分解能観察法として表面科学分野では広く用いられている計測手法であるが、溶液環境においても、現在では高感度・高分解能イメージングが可能となっており、Fig. 1のようなDNAの二重らせん構造の直接観察[1]や、Fig. 2に示されるように、たんぱく質分子（annexin A5）内部のドメイン構造観察[2]など、その観察対象は格段に拡がりつつある。さらに、測定領域上でのフォースカーブ（相互作用力の探針–試料間距離依存曲線）を高い空間分解能で取得する、FM-AFMによる２次元/３次元（2D/3D）フォースマッピング法[3]が実現したことによって、固液界面上に形成される水和構造の直接可視化計測が急速に進展しており、Fig. 3に示すように、生体分子（*bacteriorhodopsin*）周囲の複雑な水和構造や[4]、ヘテロなドメイン構造をもつ結晶表面上の水和構造の可視化などが実現している[5]。

本講演では、FM-AFMの動作原理、高分解能 FM-AFMイメージングの現状について紹介するとともに、上記 2D/3Dフォースマッピング法およびその関連手法の基本動作を解説し、また、同手法によって可視化された、さまざまな試料上における分子レベル水和構造を紹介する。さらには、固液界面における電気２重層力をマッピングすることで得られる、試料の局所領域上の電荷分布計測[5,6]など新たな展開についても概説し、今後の固液界面の構造・物性/機能計測の展望について議論したい。

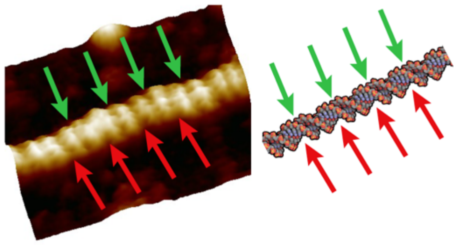

Fig. 1: (左) plasmid DNA (*pUC*18) ２重らせん構造 (3.6 nm 周期) の FM-AFM 像． (右) その構造モデル．図中の緑／赤矢印は，各々らせん部の主溝／副溝を示す[1].

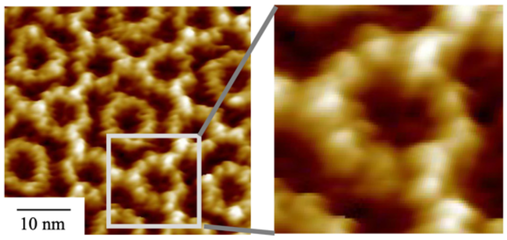

Fig. 2: (左) たんぱく質分子 (annexin A5) 3 量体の 2 次元結晶の FM-AFM 像． (右) 左図の四角部 (3 量体) の拡大像で，各単量体は，明るい３つのドメインと中央部に位置する暗いドメインから成る[2].

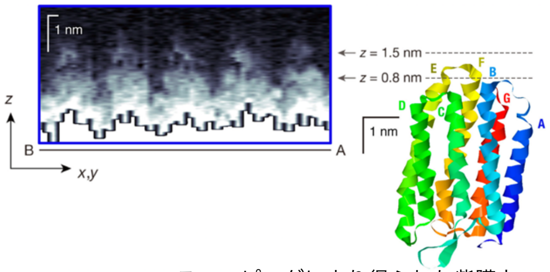

Fig. 3: 3D フォースマッピングにより得られた紫膜上の水和構造の 2 次元断面像 (*zx* 断面)．右図は紫膜を構成する *bacteriorhodopsin* 分子 (*bR* 単量体) のリボンモデル (*z* 位置を断面像内の *z* 座標に揃えて記載)[4].

参考文献

[1] S. Ido, S. Kimura et al and H. Yamada, *ACS Nano* **7**, 1817 (2013).

[2] H. Kominami, H. Yamada et al and K. Kobayashi, *Nanoscale Advances* **5**, 3862 (2023).

[3] K. Kobayashi, N. Oyabu et al and H. Yamada, *J. Chem. Phys.* **138**, 184704 (2013).

[4] S. Ido, K. Kobayashi et al and H. Yamada, *Nano Letters* **22**, 2391 (2022).

[5] K. Umeda, L. Zivanovic et al and H. Yamada, *Nature Commun.* **8**, 2111 (2017).

[6] H. Kominami, K. Kobayashi, H. Yamada, *Sci. Rep.* **9**, 6851 (2019).