光ポンプ-プローブ STM/AFM の新展開

筑波大数理　〇茂木 裕幸

走査プローブ顕微鏡（SPM）は、表面・界面の構造や電子状態、力学応答をナノスケールで可視化する手法として発展してきた。近年では、光パルス励起と SPM を組み合わせることで、試料内に生成した非平衡状態の緩和・輸送・再結合過程を、探針直下の局所応答として追跡する光励起時間分解 SPM が進展している。時間分解 STM では光励起に伴うトンネル電流変化を通じて局所電子状態や表面ポテンシャルを検出でき、AFM と組み合わせれば静電力、光誘起力、近接場応答などを介して、絶縁体を含む幅広い試料へ対象を拡張できる。時間分解計測では、ポンプ光とプローブ光の遅延時間を掃引し、探針信号の光励起前後の差分を取得することで、定常光照射では平均化される過渡応答を局所的に抽出する。一方、STM と AFM では検出量や相互作用距離が異なるため、得られた信号を同一のキャリア過程に直結させるのではなく、電荷、誘電応答、熱応答などの寄与を慎重に切り分ける必要がある。時間分解能に加えて、空間分解能、信号感度、試料損傷の回避を両立させる測定設計も重要である。

本講演では、講演者らが取り組んできた光励起多探針時間分解 STM（tr-MPSTM）および時間分解 AFM の研究例を紹介する。tr-MPSTM では、超短パルス光と多探針 STM を組み合わせ、原子層半導体デバイス構造における光励起キャリア・励起子ダイナミクスの評価を進めてきた[1]。また、時間分解 AFM では、光励起後の表面誘電応答に起因する過渡的な力ダイナミクスを検出する手法を開発した[2,3]。光励起に伴う応答は、トンネル電流だけでなく、静電力、表面電位、近接場など多様な物理量に現れるため、観測対象と試料特性に応じた検出モードの選択が重要となる。また、それぞれの信号が反映する時間・空間スケールを比較することで、単一の測定量では分離しにくい励起・輸送・緩和過程を相補的に理解できる可能性がある。関連して、異種の AFM モードへの応用展開についても当日議論する。

[1] H. Mogi et al., npj 2D Mater. Appl. 6, 72 (2022). [2] H. Mogi et al., Appl. Phys. Express 17, 015003 (2024).
[3] K. Iwaya et al., Imaging & Microscopy 26, 34 (2024).