

日本学術振興会ナノプローブテクノロジー第 167 委員会企画 「非接触原子間力顕微鏡で拓くナノテク最前線」

金大理工 新井 豊子

1980 年代に走査型トンネル顕微鏡 (STM) と原子間力顕微鏡 (AFM) が登場して以来、その原理を応用して多様な走査型プローブ顕微鏡 (SPM) が開発されてきた。2 つの物体 (試料と探針) 間の位置を原子スケールの分解能で制御できる “ SPM ” という発明は、ナノスケールの表面観察法に留まらず、ナノスケールの物性測定法や原子・分子操作技術を飛躍的に進歩させた。現在、SPM は材料研究・ナノテク研究の最先端の研究・開発ツールとして、また汎用装置の一つとして大活躍している。SPM の一つである非接触原子間力顕微鏡(nc-AFM)は、FM 検波方式による高感度力検出機構を採用し、1995 年に Si 表面の原子分解能観察を達成した。それを皮切りに、化合物半導体、金属、絶縁体材料の表面で原子分解能観察に成功し、さらに、水溶液中でもマイカ表面の原子分解能観察、分子分解能観察に成功した。今や nc-AFM はナノテク研究に欠かすことのできない超高分解の顕微鏡となり、なお発展を続けている。ここで注目すべきことは、nc-AFM 発展の大きなブレークスルーとなった研究の多くが日本の研究者によりなされてきたことである。この背景のもと企画された本シンポジウムでは、日本の研究者が世界をリードする、高感度・高分解能・高速力検出機構の開発、ボトムアップ原子組み立てへとつながる室温原子操作、nc-AFM と STM の複合的 surface 解析、絶縁体・生体材料への応用、電気化学への応用の最新の成果が紹介された。会場には常時 50-100 名の参加があった。来年 2010 年 8 月には金沢で第 13 回非接触原子間力顕微鏡国際会議が開催されることも付記しておく。

FM 検波法はカンチレバーの Q 値が高いほど分解能が上がるとされている。一方、液中環境下では Q 値が超高真空環境下に比べて数桁下がり、高分解能観察が困難であった。この困難を克服した京大・山田啓文氏が、高感度・高分解のためのノイズ解析・除去の物理・技術的ポイント、最適化条件の探索と成功例を紹介した。続いて阪大・菅原康弘氏から、液中での高分解能・高速測定のためのカンチレバーの振動振幅を一定にする位相変調 AFM・Q 値制御法の提案があった。高 Q 値が実現できる超高真空環境下では市販の nc-AFM 装置もあり、像観察のみであれば既に汎用技術になった nc-AFM であるが、低 Q 値になる液中・ガス雰囲気中での応用展開に向けて高い関心が寄せられた。

阪大・阿部真之氏は、探針と試料の相対的位置決めを高精度に行いながらフォーススペクトロスコピー (周波数シフトの距離依存性 ($\Delta f-Z$) 曲線から、力、ポテンシャル解析を行う) を行う測定技術を開発し、熱ドリフトが存在する室温環境で $\Delta f-Z$ 曲線測定の S/N 比を 10 倍近く改善した。特定した異なる原子上での $\Delta f-Z$ 曲線を測定することに成功し、原子識別が可能であることを示した。試料表面の力場を可視化できるフォースマッピングやトンネル電流との同時測定、原子操作にも利用できることを示した。金大・新井豊子氏はナノ力学的電子分光法とトンネル分光、散逸エネルギーの関連について解説した。nc-AFM は単に表面形状をトレースする装置ではなく、原子尺度の空間分解能を持つ 3 次元的エネルギー分光が可能解析装置として発展していることが示された。

東大・江口豊明氏は水晶振動子を用いた自己検知型力センサーの実用例と共に、ケルビン・プローブ

フォース顕微鏡 (KFM) を用いた表面電位・電荷分布の高分解能マッピングの実施例を紹介した。KFM の高空間分解能は 0.5 nm、表面静電ポテンシャル変化のエネルギー分解能は 3 meV 以下に達している、KFM が強力な表面状態解析法であることを示した。阪大・松本卓也氏は KFM を応用して、縁体基板上的タンパク質や DNA の誘電物性を 1nm レベルの分解能で画像化できることを紹介した。さらにリガンド - 受容体相互作用による引力をカンチレバーの共振周波数シフトとして検出し、トポグラフ画像と同時に分子認識力画像として取得した。この方法で、従来得られなかったエネルギー領域の解析が進展する可能性を指摘した。阪大・福井賢一氏は、電気化学環境下で稼働する周波数変調検出型 AFM (EC-FM-AFM) を開発し、電極界面の分子が真電荷をもつときに局所構造がどう変化するのかを解析した結果を報告した。nc-AFM 法が、電極界面分子の局所構造解析、絶縁体の局所表面電位解析、生体関連物質の機能解析へと急速に広がり得ることを示した。本手法によって、応用物理の従来の枠組みをさらにブレイクし、縦横に分野を貫くナノサイエンス・テクノロジーの新潮流が産まれることが期待される。