

## STM ノーベル賞&AFM 発明 30 周年記念シンポジウム ～プローブ顕微鏡のこれまでとこれから～

今年 2016 年は、走査トンネル顕微鏡 (STM) の発明者 (Binnig, Rohrer) に対して ノーベル物理学賞が授与されて 30 周年にあたる。さらに、STM の発展形である原子間力顕微鏡 (AFM) も、ちょうど 30 年前に提案された (G. Binnig, C.F. Quate, and Ch. Gerber, *Physical Review Letters* 56 (1986) 930)。なお、AFM の発明者 3 氏は、2016 年にカブリ賞 (ナノ科学分野) を受賞している。

STM は、鋭い針の先端を測定試料の表面に近づけ、針と試料の間に流れるトンネル電流を計測する。そして、針を表面に対して水平に走査して、表面の像を取得する。トンネル電流が、表面の局所的な情報を含むので、個々の原子を解像するほどの高い空間分解能を得ることができる。このように、鋭いプローブ先端から試料の局所的な情報を得る顕微鏡を総称して、走査プローブ顕微鏡 (SPM) と呼ぶ。例えば、AFM では針先端にかかる相互作用力を板バネによって計測することで、絶縁体も含む様々な試料表面を高分解能でイメージングすることができる。

この 30 年間で SPM は劇的な進歩を遂げ、測定環境は超高真空から大気・液中環境へ、分析対象は金属・半導体などの無機材料から有機・バイオなどのソフトマテリアルへと大きな広がりを見せてきた。また、単純な構造分析だけではなく、電気電子・力学・光学・磁気物性など多様な物性計測を可能としてきた。本シンポジウムでは、SPM のこれまでの実績を振り返るだけでなく、これからの産業・学術双方においてどのような役割を果たすことができるか、SPM に関連する様々な分野の最先端の研究を取り上げ、幅広い観点から議論することを趣旨とした。

シンポジウムの始めとして、STM 発明当時の状況を知り、STM 発明者の Rohrer 先生と親交が深かった橋詰富博氏に、STM の原理と発展について解説して頂いた。顕微鏡の分解能の一般論から、STM の発明に至った歴史、当時の日本の STM の開発の状況を、橋詰氏にしか知りえない当時の様子を、様々なエピソードを交えて講演頂いた。原子を観察できるという STM が、当時驚きをもって受け取られた様子を生き生きと感ずることができた。次に、山田豊和氏にスピン偏極 STM について講演頂いた。スピン偏極 STM は、スピン偏極したトンネル電流を用いることで、表面のスピン情報を得る顕微鏡である。スピン偏極 STM の原理を詳しく説明頂き、開発の歴史について解説頂いた。その後、スピン偏極 STM の技術に関して説明され、スピン偏極 STM の発展は、スピン偏極した電子を供給するための針を作成する技術の発展であると端的に述べられた。そして、いくつかの実験例を示し、特に分光法を行う際の注意点について詳しく解説された。スピン偏極 STM は、最近日本を中心としたアジアで発展が著しく、今後も技術的な発展が期待でき、さらにスピントロニクスを含む様々な分野での応用が期待される。次に、井村考平氏に近接場顕微分光について講演頂いた。走査型近接場光顕微鏡 (SNOM) は、針先端に局在する近接場光を用いる顕微鏡

で、光の回折限界を超える分解能を得ることができる。まず、光学顕微鏡の空間分解能と SNOM の空間分解能についての説明を頂いた。そして、開口型の SNOM で得られたプラズモンの可視化の実験例が示された。プラズモンの様々な空間モードが、時空間で捉えられることが示された。プラズモンの位相緩和時間などダイナミクスが捉えられるという点が印象深かった。次に、吉田昭二氏より時間分解 STM について講演頂いた。SPM は高い空間分解能が得られるのに対して、通常、時間分解能が高くない。光学的なポンププローブ法を、STM に組み込むことで、高い時間分解能が得られることが説明された。実験のセットアップが説明された後、半導体中のキャリアのダイナミクスやスピン緩和が捉えられる実験結果が示された。また、最新の結果として、高速で試料電圧を変調できるテラヘルツ光パルスの実験が示され、STM が空間と時間両方に対して高い分解能を持つに至ったことが説得力を持って示された。休憩をはさみ、森田清三氏より原子分解能を有する AFM の発展の歴史について講演頂いた。AFM は、針と表面の間を制御する距離として、接触領域、非接触領域、疑似接触領域へと発展してきたことが解説された。非接触領域で針が制御できるようになり、安定して表面の原子分解能観察が可能になり、最近では疑似接触領域で精度の高い原子操作ができるようになった。特に、AFM を用いた室温での原子操作の結果と機構に関する説明がなされた。次に、福間剛士氏より液中 AFM の技術と応用に関して講演頂いた。AFM によって、原子分解能観察を行うための条件が明解に示されたあと、液中でいかにして原子分解能が達成されるに至ったかを歴史と共に解説された。現在では、測定試料を基板に固定する方法が問題の中心になると述べられ、液中 AFM の技術が成熟したことがよく理解できた。次に、古寺哲幸氏より、高速 AFM の開発とそのバイオ応用に関して講演頂いた。液中 AFM は、生体試料を無染色でかつ高い空間分解能で観察することができる利点を持つことが説明され、生体分子の構造と動きを直接観察する高速 AFM の重要性が示された。ただし高速 AFM も長きにわたる技術開発によって現在の性能に至っている。特に、高速と低侵襲性という相反することを実現する必要があった。活きた生体分子の構造形態をナノメートルの空間分解能、サブ秒の時間分解能で観察できるようになったことが実験例によって示され、様々な分子プロセスのダイナミクスが捉えられるようになったことが印象深かった。次に横田泰之氏に電気二重層トランジスタの微視的理解に向けたイオン液体/有機半導体界面の構造評価に関して講演頂いた。研究が活発に行われている有機トランジスタの原理について解説頂いたあと、イオン液体/固体界面の研究に周波数変調 AFM が有用であることが説明された。特に、イオン液体と固体界面の構造を知ることは、トランジスタの特性と直結した情報を得ることになる。イオン液体/ルブレンの電気二重層のデバイス動作時の界面構造観察の結果が例示され、電気二重層トランジスタの性能が表面形状に大きく左右されることが明らかにされていた。次に小林圭氏に時間分解静電気力顕微鏡による有機薄膜トランジスタのキャリアダイナミクス可視化について講演頂いた。AFM をベースとした静電気力顕微鏡の歴史と、時間分解能付与に向けた試みについて解説があった。特に、カーボンナノチューブの動的トラップ電荷の可視化について説明があり、マイクロ秒の

時間分解能を得るための実験セットアップの紹介があった。最後に、東芝の臼田宏治氏より Si 及び Beyond Si トランジスタ動向と SPM 技術と題して、産業界から SPM 技術が期待されていることについて講演された。まずムーアの法則と Si および beyond Si トランジスタのロードマップが示された。The International Technology Roadmap for Semiconductor (ITRS) によるガイドラインが 2013 年を最後に更新されなくなったことが説明され、現在では ITRS2 によって、単なるスケールダウンに捕らわれない多角的な技術革新（ポストスケーリング）を目指す方向になっている現状が説明された。それを受けて、SPM がどのように貢献しうるのかを産業界の視点から、応用課題が提示された。例えば、3D MOSFET の構造の観察や物性評価への要望や、シリコンとは異なる元素を用いたデバイスの評価の要望があった。

本シンポジウムの会場は立ち見が多く見受けられるほど大変盛況であり、産学双方において、この分野に関する注目度の高さと期待の高さを実感した。

2016 年 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 6. 薄膜・表面

2016 年 9 月 13 日

シンポジウム世話人： 一井崇（京大）、杉本宜昭（東大）