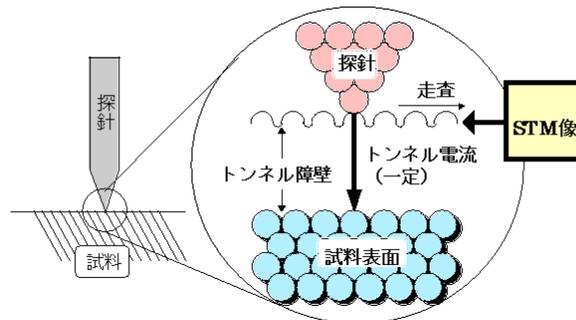


走査プローブ顕微鏡—ナノの世界を見るツール

走査プローブ顕微鏡の原理

走査トンネル顕微鏡(Scanning Tunneling Microscope, STM)は原子・分子を一個ずつ直接見ることのできる手法です。STM の原理は図 1 に示すように いたって簡単です。



「探針」と呼ばれる導電性を持つプローブと試料の間にバイアス電圧をかけて、探針—試料表面間距離を 1 ナノメートル程度まで近づけると、トンネル電流が流れます。このトンネル電流は探針—試料表面間距離に対して非常に敏感で、指数関数的に変化します。トンネル電流は次の式で表されます。

$$I \propto V\rho \exp(-\sqrt{\phi}z)$$

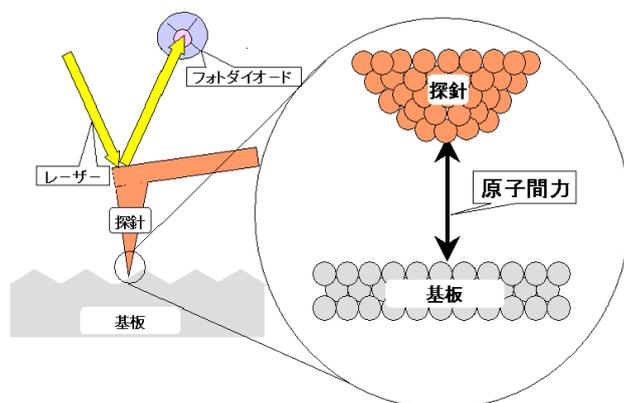
I : トンネル電流、 V : バイアス電圧、 ρ : 状態密度、 ϕ : トンネル障壁、 z : 探針—表面間距離

この式から距離(z)が 0.1 ナノメートル変化すると、トンネル電流は約 1 桁変わることがわかります。原子・分子の像を得るには、トンネル電流を一定に保ちつつ、圧電素子を用いて探針を試料表面に沿って走査します。このときトンネル電流を一定に保つために圧電素子に加えた制御電圧を記録・画像化すれば試料表面の原子や分子を見ることができるようになります。また、探針の動きを一時的に止めて、バイアス電圧とトンネル電流の関係 ($I-V$ 測定) を測定すれば、トンネルスペクトルを得ることができます。このトンネルスペクトルは試料表面の局所的な状態密度を反映しているので、試料表面の電子構造をしる手がかりとなります。

走査トンネル顕微鏡 (STM) では、試料が電気伝導性を持つことが必要です。しかし、DNA やタンパクなどの、かさ高い分子に電流を流すことは容易ではなく、この条件は STM の生体試料への応用における制約となっています。これに対して、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いれば、絶縁体試料を観測することが可能です。

原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscopy, AFM)は STM の兄弟分とも言うべき手法で、図 2 に示すように「カンチレバー」と呼ばれる AFM のプローブと試料表面間に働く力を検出することを根本原理にしています。カンチレバーは、柔らかいバネの先端に鋭い探針がついています。一般に試料表面—探針間に働く力はバネのたわみをレーザー光を使って検出します。試料表面の画像 (AFM 像) を得るためには、表面

一探針間に働く力を一定に保ちつつ、圧電素子を用いて針を試料表面に沿って走査します。このとき表面一探針間に働く力を一定に保つために圧電素子に加えた制御電圧を記録・画像化することによりAFM像が得られるわけです。AFMの最大の特徴は「力」を検出するので、観察試料の導電性を要求しない、つまり絶縁性の試料も観察できることです。



STM・AFMのように極微なプローブを走査することによって像を得る顕微鏡のことを「走査プローブ顕微鏡」と呼んでいます。

非接触モード原子間力顕微鏡の原理

最近、AFMの技術が飛躍的に進歩し、真の原子分解能が達成されました。原子分解能を持つAFMでは、非接触モードと呼ばれる方法が使われます。この動作モードは、カンチレバーを固有振動数で共振させたときの周波数変化を利用します。カンチレバー先端の探針を試料表面に接近させると、先端と試料表面の間に働く力によって、振動の周波数が変化します。これはちょうど図3のように振動しているバネ先端の重りに力を加えているのに対応し、簡単な運動方程式で記述することができます。周波数の変化は、力の微分に対応しますから、探針先端と表面の間に働くポテンシャルエネルギーの変化を感じ取ることができるわけです。私たちのグループでは、この極めて高感度な原子間力顕微鏡と走査トンネル顕微鏡を組み合わせ、分子エレクトロニクス材料としてのDNAの可能性について研究を行っています。

