

局所高電界場における極限物理現象の可視化観測と制御

研究代表者 藤田博之（東京大学生産技術研究所・教授）

本研究の目的は、数 nm から 100nm 級のナノ構造や空間を直接見ながら、そこに電圧を加え極めて大きな電界を生じた時に、分子、原子、電子などがどう振る舞いをするかを観測することである。特にマイクロマシンの技術を用いて、ナノ構造の形状を精密に作り、nm の精度で動きを自在に制御する点に特徴がある。このため、(1) マイクロマシン応用ナノ領域探査ツール、(2) 位相差検出による超高分解能顕微鏡法、(3) 第一原理に基づく理論計算の 3 つの柱で研究を進めている。これまでに下記のような成果を挙げ、最終目標に向かって着実に進行中である。

マイクロマシン班：シリコン微細加工によるナノ構造製作プロセス

ナノの対象を操作したり、ナノギャップを制御する目的で、マイクロマシン技術を応用したナノ探査ツールを製作している。シリコンチップの微細加工技術を発展させ、現在のところ、10-100nm 程度の寸法を持つ構造を再現性よく作り、それを μm 寸法のマイクロアクチュエータなどと一体化することで、1nm 以下の精度で駆動することができる。プロセスの詳細はポスターで発表するが、作製したナノ探査ツールの例として、トンネル電流制御デバイスと、ツインナノプローブの電子顕微鏡写真を示す。

トンネル電流制御デバイスは、数 nm の曲率半径の針先を 1nm 程度に近づけ、そこに電圧を加えたときに流れる、トンネル電流を制御する。このギャップを超高分解能の透過電子顕微鏡で観察し、ギャップ中での原子の動き等を観察する。ツインナノプローブは、数 nm 程度に尖った 2 本のプローブを箸のように揃えて、先端部の間隔を 10-100nm 程度で制御できる。これを用いて、様々なナノ構造、ナノチューブや鎖状分子などに電流を流したときの電圧降下を評価する。また、ナノの対象物を直接扱うこともできるかもしれない。

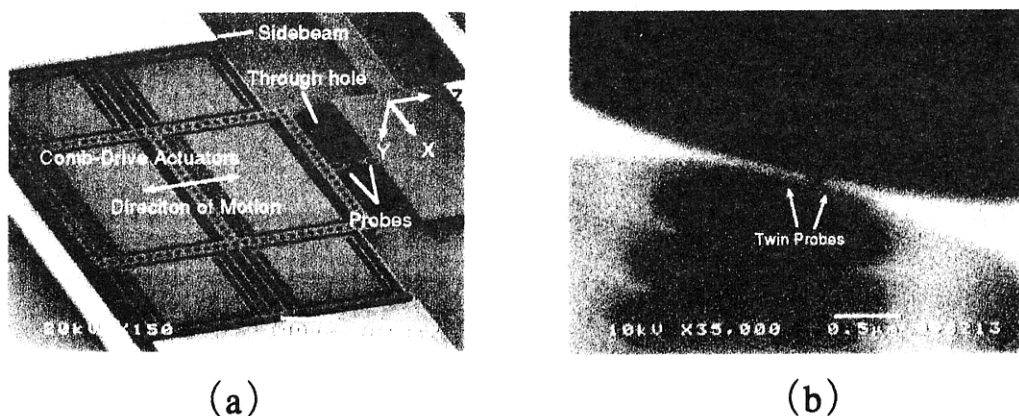


図1 トンネル電流制御デバイス

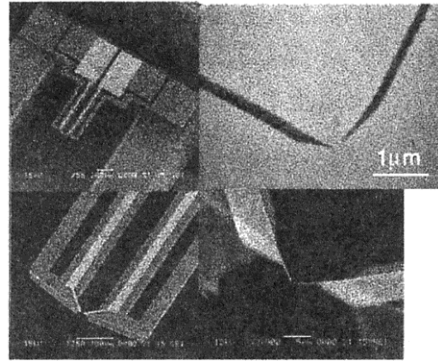


図2 ツインナノプローブ

可視化班

超高真空位相解析型電子顕微鏡 (図3)

この装置は、日立製作所製 HF2000 型電界放射電子顕微鏡を基本として、試料室を超高真空にしたものである。さらに、マイクロマシン試料に電圧を印加し、あるいは電流を測定するために、9 接点を有する試料ホルダを開発すると共に、高精度な計測を行うために、位相シフト型の回転電子線バイプリズムを開発した。電子波の位相は、試料の原子的な構造、試料内外の電場、磁場によって変化するので、この位相を正確に求めることにより、試料の原子的な構造や挙動と印加された電界との関わりを計測することができる。

電子干渉計測の光学系 (図4)

この電子顕微鏡を用いた計測は以下のように行われる。まず、電子線通路の片側に置かれた試料にほぼ平行な電子線を照射し、透過像を拡大する。対物レンズと拡大レンズの間に設置された電子線バイプリズムは、試料透過電子波と試料のないところを通った参照電子波とを観察面で干渉させ、直線上の干渉縞からなる干渉画像を形成するはたらきをする。電子線バイプリズムをたとえば上方向に微動すると、試料透過電子波の位相は蝕み、参照電子波の位相は遅れるため、観察面において試料像は不動のまま干渉縞だけが上方向に移動する。そこで、干渉縞をその間隔の $1/M$ ($M:3$ 以上の正数) ずつ移動させながら M 枚の干渉画像を計算機に取り込み、位相シフト法に従って試料透過波の位相分布を計算すると、試料各部を透過した電子波の位相変化を求めることができる。

透過型位相シフトレーザ干渉顕微鏡 (図5)

電子干渉系と等価なレーザ干渉系は、微小領域の屈折率分布を高精度に計測できる、顕微鏡の新しい方式である。屋根型の断面を有するバイプリズムをピエゾ駆動ステージに搭載し、試料透過波と参照波の干渉画像を観察面に形成し、位相シフト法により試料内部の屈折率分布を計測する。

導波路計測結果 (図6)

SiO_2 基板上に形成された導波路 ($\text{SiO}_2 + 1 \text{ W t } \% \text{TiO}_2$) の屈折率分布を計測

した例である。左は導波路を上方から計測したもの、右は厚さ 120 ミクロンにスライスした導波路の断面を計測したものである。上段は屈折率分布を濃淡表示したもの、中段は図中の直線上の屈折率分布のプロファイル、下段は屈折率を等高線表示したものである。

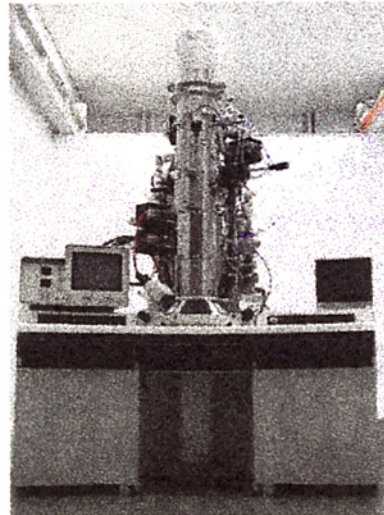


図3 超高真空位相解析型電子顕微鏡

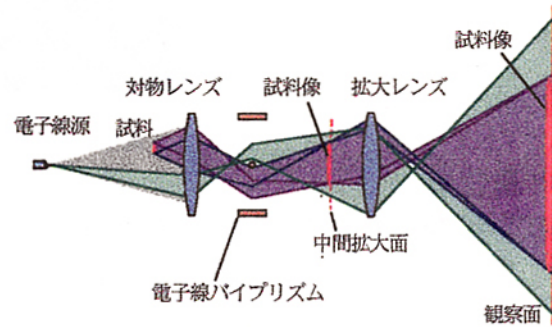


図4 電子干渉計測の光学系

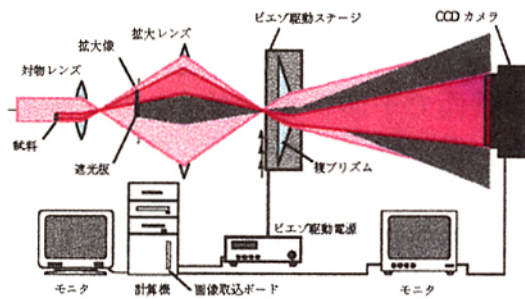


図5 透過型位相シフトレーザ干渉顕微鏡

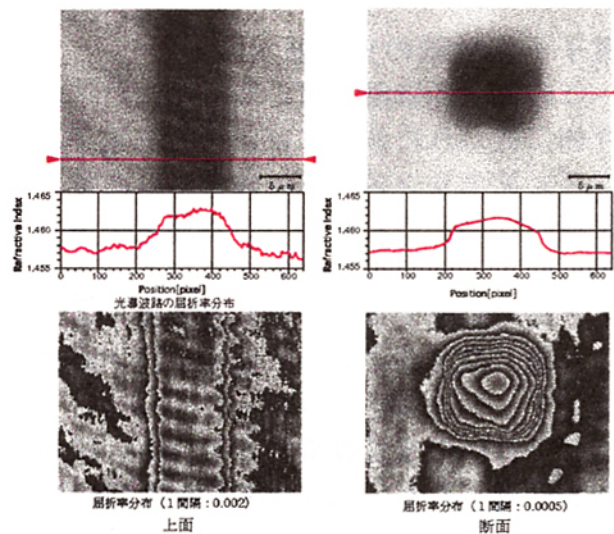


図6 導波路計測結果

理論班

局所高電界場中の物理現象を原子・電子レベルから理論解析するために、電極内部-表面間の電子移動も考慮しながら定常電流下での電子状態を計算する方法論、複数個の物体からなる系において物体間の電流が無視できる状況での電子状態を正しく求めるための方法論、過渡的な電流変化を計算するためのプログラム、などの新しい方法論やプログラムを開発した。

これらを用いることにより、従来は扱えなかった問題を解析できるようになった。まずカーボンナノチューブからの電界蒸発現象の反応経路を明らかにし、その活性化エネルギー障壁の値をはじめて見積もることができた(図7)。次に原子サイズの細線の両端に電位差を与えた場合の電位(ポテンシャル)変化を調べた結果(図8)、原子位置(図中の黒丸)での電位降下量が左から右に単調に増加していくのではない複雑な挙動を示すことを見出した(図8)。また電界電子放出現象では、放出源の先端が同じ単原子であっても先端を含むナノメータサイズの突起の大きさが違うと電子放出特性が大きく異なることや、仕事関数が小さい方が同じ電界での放出電流値が小さい場合があることなど、単純化したモデルでの考察に基づく従来の常識を覆す新しい知見を得た。

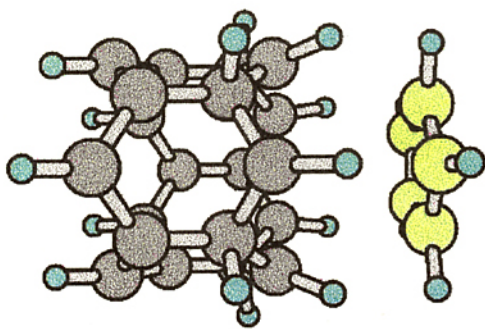


図7 カーボンナノチューブからの $C_5H_5^+$ 電界蒸発

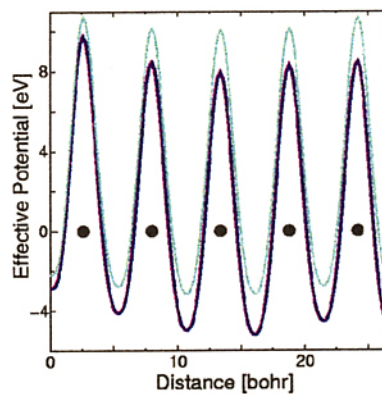


図8 アルミニウム 5 原子の両端の電位差が 0V の場合(緑色)と 3V の場合(紫色)のポテンシャル