

論文の内容の要旨

論文題目 走査型電子顕微鏡内サブミクロンマニピュレーションナノロボットシステムの構築

氏 名 森下 広

近年の科学技術の発展の一つの方向は微小世界である。微小なものを操作する手段としては、 $10\mu\text{m}$ 程度以上の大きさの比較的大きな対象物を操作する手段として光学顕微鏡下のマニピュレーションが細胞操作に多く用いられており、また原子レベルの操作には走査型トンネル顕微鏡のプロブが用いられている。しかしながら、その中間の大きさである、 $10\mu\text{m}$ からサブミクロン程度の大きさの対象物を操作することのできるマニピュレータシステムは少ない。この理由としては、動きが微小であることに加え、この大きさの領域では観察に電子顕微鏡を用いることになり、その真空チャンバー内の観察環境下で動作するマニピュレータを製作するための技術的な課題が多いことが挙げられる。

そこで、筆者は、 $10\mu\text{m}$ からサブミクロン程度の大きさの物や操作を対象とし、人間は通常の世界にしながら、実感をもって微小な作業を行うことを可能にするサブミクロンマニピュレーションシステムであるナノロボットシステムを考案した。ナノロボットシステムは、走査型電子顕微鏡の試料室内に設置した微細に動くロボットを電子顕微鏡の画像を見ながら操作することによって微細作業を行うマニピュレーションシステムで、本研究ではそのプロトタイプシステムであるナノロボットシステム I および更に実用的な微細作業の実現を目指したナノロボットシステム II を構築した。ナノロボットシステム II は、微小な操作の状況を操作者に立体的に見せる双眼走査型電子顕微鏡とその試料室内に置かれた左手ロボット、右手ロボット、ベースステージ、及び微小作業で発生する力を測定するための力センサ、発生する音を工具の振動から拾うための音響ピックアップ、ロボットを制御するジョイスティックボックス等からなる。右手ロボットは、微小世界での右手に相当するロボットで、ロボットの先端に装備されている工具交換用ターレット上の数

個の工具を、フルストローク $10\ \mu\text{m}$ 、最小分解能 $0.01\ \mu\text{m}$ で、XYZ 三軸方向に動かすことが可能である。左手ロボットは微小世界での左手に相当するロボットで、その上に被加工試料を搭載し、試料の被加工部位を右手ロボット上の工具の可動範囲内に導き入れる機能をもつ。左手ロボットは試料をフルストローク 25mm 、最小分解能 $0.2\ \mu\text{m}$ で大まかに位置決めし、更なるその位置からフルストローク $\pm 2.5\ \mu\text{m}$ 、最小分解能 $0.01\ \mu\text{m}$ で三軸に微細位置決め可能である。ベースステージは右手ロボットおよび左手ロボットを搭載し、これらをまとめて移動して、右手ロボット上の工具先端、すなわち作業の行われる領域を走査型電子顕微鏡の視野の中に導入する機能をもつ。

このナノロボットシステムの構築過程において、力センサの基本構造である平行平板構造の解析および、微小変位を発生する機構の基本構造である平行平板式微動機構の解析を行った。また、小型で剛性が高く大きな移動ストロークをとることができ、かつ走査型電子顕微鏡の試料室内で動作できる機構として、インチワームメカニズムを応用した粗微動機構を開発した。これは移動テーブルの両側に伸縮変位発生部とクランプ部を直列に設けた構造をもち、通常のインチワームメカニズムと同様にレールの把持・解放と伸縮を繰り返して大きなストロークで移動できる機能と、インチワーム動作の停止位置において伸縮変位発生部のプッシュプル動作により微動動作を行う機能を併せ持つものである。この粗微動機構はナノロボットシステムの左手ロボットおよびベースステージの基本構造となっている。

ナノロボットシステムⅡを用いて、いくつかの微小作業実験を行った。まず、LSI チップ表面のアルミ配線を切断する実験では工具に電解研磨で製作したタングステンの針を用い、幅約 $5\ \mu\text{m}$ の配線部分の切断を試みたところ、対象物が微小であるということほとんど意識することなく切断することができ、またその時の音と、加工力を測定することができた。さらに、LSI のボンディングパッドにタングステン針で文字を彫る実験では、約 $10\ \mu\text{m}$ 各の文字を 10 文字彫ることが出来た。

ナノロボットシステムⅡは、近年、物理学者に微小な球を並べるための手段として利用され、物理学の世界で成果をあげている。これまで、直径 $1\ \mu\text{m}$ 程度の球を思い通りに並べる手段は無かったが、ナノロボットⅡによってこれが可能となり、直径 $1.18\ \mu\text{m}$ のシリカとラテックスの球を交互に積み重ね、後でプラズマエッチングによってラテックスの球を取り除くことで、完全フォトニックバンドギャップをもつシリカの球によるダイヤモンド構造を製作しその特性を研究することが可能となった。また、中央にスタレ状の構造をもつ $25\ \mu\text{m}$ 角で厚さ $0.5\ \mu\text{m}$ の InP の板を 20 枚積み重ねることで、5 周期のフォトニック結晶を製作することにも成功している。

本研究では、 $10\ \mu\text{m}$ からサブミクロンの大きさをもつ対象物を走査型電子顕微鏡の観察下で操作するシステムについてその機能要求を考察し、要素技術を開発し、2 種類のシステムの構築を通じて走査型電子顕微鏡内サブミクロンマニピュレーションシステムの構築法を示した。この研究で培われた力センサ、微動機構、および走査型電子顕微鏡内にマニピュレータを設置するシステム技術が更に発展し、人間が更に違和感なく微小対象物を操作できるシステムの開発につながることを期待する。