真空環境下におけるナノ・マニファクチャリング・ワールド*

中尾 政之**・佐藤 知正**・畑村洋太郎**

(受理1993年12月27日, 掲載決定1994年4月2日)

Nano Manufacturing World under Vacuum Environment

Masayuki NAKAO, Tomomasa SATO and Yotaro HATAMURA

(Faculty of Engineering, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113)

(Received December 27, 1993, Accepted April 2, 1994)

1. はじめに

技術の進歩によって人間が接する世界が広がっている。広がる方向の一つは拡大で、もう一つは縮小である。人類はトンネル顕微鏡の発明を機に、物理学的に極小の世界に踏み込み始め、 $10\text{\AA}$ の全体寸法の個々の原子を、 $\text{\AA}$ の精度で操作できた。

一方、現在、工学的に量産されている製品は、全体寸法も精度も、今だにその $\text{\AA}$ には達していない。工学的な微細加工法を大別すると、従来の機械加工を微細化した精密機械加工と、集積回路のマスク加工とに分けられるが、たとえば、前者では、磁気ディスク基板や光ヘッドを、全体寸法 1 mm 、精度 $1\text{ }\mu\text{m}$ のオーダーで、後者では、半導体や薄膜磁気ヘッドを、全体寸法 0.1 mm 、精度 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ のオーダーで、それぞれ量産しているが、もちろん $\text{\AA}$ には達していない。

このように、物理学的と工学的の手法の間には、全体寸法では $1\text{ nm}\sim 100,000\text{ nm}$ ($100\text{ }\mu\text{m}$)のオーダーの空白域が、精度では $0.1\text{ nm}\sim 100\text{ nm}$ ($0.1\text{ }\mu\text{m}$)のオーダーの空白域が、それぞれ存在する。近年、まず、前者の全体寸法の空白域を埋めるために、各種の工学的な試みがなされている。すなわち、多くの研究者が、全体寸法が $1\text{ }\mu\text{m}\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ と小さな微小物で、マイクロマシン、医療器具、情報機器、などに用いるものを試作している。

特に、上述の精度 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ のオーダーのマスク加工を応用して、全体寸法が $100\text{ }\mu\text{m}$ のオーダーの、圧力センサ、ギア、静電モータ、などを作成する試みが、電気関係の研究者によってなされている。これらは、数年前から毎年開催される、IEEE (アメリカ電気学会) の一つの分科会であるMEMS (Micro Electro Mechanical Systems)を通して、盛んに発表されている。

これらの微小物は、集積回路技術を基に、傾斜的に成分を変化させる積層技術や、最後に溶出させて空間を作り出す犠牲層技術などを駆使して、局所的には3次元構造が形成されている。だが、全体形状は依然として平面の2次元である。

ところが、力学的な仕事をするために、出力・変形・運動などを要求機能に持つ機械には、全体形状も3次元構造が不可欠である。動くマイクロマシンとしてモータ、ポンプ、バルブ、ピンセットなどがMEMSで紹介されているが、これらの駆動端、流路配管、作業端が3次元的に構成されなければ、実際に仕事を取り出すことは困難である。しかし現状は、上述の集積回路技術の発達が著しく、自動車用の微小圧力センサの成功が衝撃的であったため、逆に、マイクロマシンは2次元構造のシリコンを出発点に考えるとよい、という設計思想さえ生じている。これは、機械設計の下位概念である加工方法の制約条件が、上位概念である機構・構造の創造を拘束することであり、明らかに好ましくない。

また、このことを危惧して、各種の素材を3次元的に加工することを目的に、精密機械加工の応用も一部行われている。上述の電気関係の研究者のマイクロマシニン

* 平成5年10月2日 第71期日本機械学会全国大会で講演

平成6年1月27日 IEEEのMEMS'94で発表予定

** 東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)

d 加工実感の伝送に求められる機能

図1 ナノ・マニファクチャリング・ワールド (NMW) に求められる基本機能

グに平行して、一部の機械関係の研究者が MEMS において微細な光造形法やワイヤ放電加工法を発表している。しかし、これらも、個別の方法のみに注目しているため、そこに新たに別の加工方法の制約条件が生じていることも確かである。

そこで著者らは、マスク加工・機械加工を統合して、微小物の生産システム全体を考える。すなわち、加工のプロセスを設計された機構・構造に応じて検討し、さらに、従来の機械工程と同じように、成形・組立・調整・検査などのプロセスまで検討する。そして、これらの微細なプロセスが、通常の大きさの世界にいる操作員の意志通りに運転できる「微小機械製作用の工場」の構築を目指す。また、そこでは微小な製品の全体寸法を $1\mu\text{m}$ と小さくするばかりでなく、最終的には精度も $0.1\sim 100\text{nm}$ に達することも目指し、この工場を「ナノ・マニファクチャリング・ワールド (NMW と略する)」と呼ぶ^{1,2,3,4)}。

機械設計では一般に、要求機能→基本構成→詳細機構→機能要素→加工方法・材料・寸法、の順に思考するので、本報でもこの順番で NMW を述べることにする。

2. NMW に要求される基本機能

著者らは7年前より「ナノロボット」と称する微細作業機械を開発してきた¹⁾が、それを通して得られた NMW の要求機能は、図1に示すようなものである。図から、これら機能は、被加工物の大きさに関係なく、

図2 ナノ・マニファクチャリング・ワールドの具体的な構成の例

加工にとって普遍的な機能(a)(b)と、通常の大きさの加工では自動的に実現できるため特に意識されないが、微細加工ではわざわざ実現に向けて準備しなければならない機能(c)(d)とに大別されることがわかる。

たとえば、NMW の特徴である、(c)の「ナノ加工に求められる機能」には、「同時性・同所性・実時間性」が挙げられている。これは特に作業と観察との間に必要であり、これらが実現されないと、作業で生じている現象を操作者が把握できない。たとえば、加工具を作用させて、ある部分を除去できたとしても、観察していなければ、その所で、たとえば、削り取り切削現象、くっつく吸着現象、静電気による放電現象、のいずれが生じているか容易に判断できない。さらに(c)には「再所性 (Spot Returnability)」があるが、これは作業と観察とが別の場所で行われる場合に必要であり、これが満足していないと、操作者は両者間を移動するたびに、作業や観察をしたかった所を改めて捜し出さねばならない。

3. NMW の基本構成

NMW の基本構成の例として、著者らが試作を始めているものを図2に示す。これはバッファ・作業・成形の3つの真空室から成り、被加工物は各室間を走行台によって搬送され、上述の再所性が確保される。半導体のように、ウェットのエッチングや洗浄を多用すると、そのたびに真空室から取り出して、再び、固定、位置合わせ、搬送が必要となるので、NMW では真空中でのドライ工程を積極的に採用している。

作業室には、立体視 SEM (走査形電子顕微鏡)¹⁾や光

学顕微鏡, STM (走査形トンネル顕微鏡) などの観察具を初めとして, 加工具や分析具, それらを運動させる円弧走行具, などが, 被加工物を中心にして球面配置しており, 上述の同所性, 同時性が確保される。成形室には, 後述する直線母線を利用した加工具が配してあり, 特殊なガス環境を要する場合のために作業室と分離してある。

4. 真空環境を必要とする理由

上述の図1と図2を再び見てみると, 図1の基本機能の中には真空環境が含まれていないが, 図2の基本構成にはそれが含まれていることがわかる。その理由は現在, 満足に微細作業を観察できる手段がSEMしかないためである。

観察は微細作業には不可欠である。図3に微細作業の例を示す。まず, 顕微鏡観察があり, 作業はその視野内で行なう。実際に作業してみると容易にわかることだが, 被加工物を視野外に飛ばすと見つけどすことが非常に困難になる。最近の画像処理技術の進歩は著しく, 視野内のものならばビデオレイトで常時追跡・監視が可能であるが, そのように視野から出てしまえば, この技術をもってしても対処できない。

また, 図3のように微小作業を3次元的に行うと, 顕微鏡には分解能だけでなく焦点深度が必要になってくる。たとえば, 加工具を被加工物に近づけていって接触したら即時停止しようとしても, 焦点深度が浅いと, 加工具は焦点下に現れるや否や被加工物に衝突してしまう。ところが光学顕微鏡では, 分解能と焦点深度がトレードオフの関係にあり, 両者を同時に満足することができない。

一方, SEMは, はほぼ平行光で観察する天体望遠鏡のように, 平行電子で観察するので両者を同時に満足することが可能である。光学顕微鏡でも共焦点顕微鏡や光切断法のように, 焦点を深さ方向に動かしながら, 高い分

図3 3次元微小加工の特徴

解能と浅い焦点深度とを持つ何枚かの像をとり, 後でそれらを積み重ねるように合成して, 見かけ上, 焦点深度を深くするという方法も試みられている。しかし, 現在はその合成速度が遅く, 動画はとれていない。画像処理技術の発展によって, 5年後にはそれが動画速度に達するかも知れないが, 現在では不可能である。

このような理由で, NMWにとってSEMが図2のように不可欠になり, それに伴って真空環境も不可欠になる。

5. NMWに必要な機能要素

上述の基本構成を実現するために, NMWには多くの機能要素が新たに必要となる。たとえば, 図2に示した球面配置を助ける円弧走行具や, 真空空間のバルブのために切断されたガイドを渡る直線走行具, などである。

また, 図4にNMWに必要な成形技術の例を示すが, (a)の収束FAS (高速原子線) ガンや(c)の超音波切削工具などの加工具や, (c)のレーザ旋盤や(b)のマスク+回転加工などを実現する芯振れゼロの回転ベアリングなども, 同様に必要である。

なお, 図4(b)に示すような加工で作成された被加工物の表面は, 直線の加工具 (この図ではビーム) が生成する, 直線母線の包絡面であることがわかる。実際に微細加工を行なってみると, (a)や(c)のように点である工具を被加工物に対して相対運動させるより, (b)のように線である工具を相対運動させる方が, 必要な自由度が一つ減り, 微細加工には有利であることがわかる。この直線母線である工具として, 著者らは, 高速原子線, 紫外線レーザ, ワイヤカット機のワイヤ, 放電加工の放電

図4 ナノ・マニファクチャリング・ワールドに必要な成形技術の例

工具, などを準備している. これらは, 各々, 別の成形室 (図2では省略) で実現され, そこでは図2の高速原子線用の成形室と同様に, 成形方法に最適な環境 (たとえばワイヤカットでは水中) が用意され, 再所性を満足する走行台によって作業室と連結される.

6. NMW の概念の有効性の確認

図1, 2, 4などに示したNMWの概念の有効性を確認するために, 実際に3次元の微小物を製作して, その結果を検討した.

6.1 成形方法

本報では, まず, 前述の直線母線を用いる成形方法として, 高速原子線 (Fast Atom Beam, 略してFAB) を基板に照射して反応・蒸発によってエッチングする方法と, 紫外線レーザを基板に照射して分解・飛散によってエッチングする方法とを試みた. 前者は真空中で, 後者は空気中で行ったが, 後者はもちろん真空中でも何ら問題はない.

図5にそれぞれの一般的な成形方法の概要を示す. この方法では, 被加工物をビームに対し相対運動をさせないので2次元成形しかできないが, NMWではこれに加えて, 図4(b)に示すように, 非接触マスク下で被加工物を回転させて3次元成形を試みた.

FABは, 塩素をグロー放電でイオン化させた後に数kVで加速させ, 次に原子線銃の出口に配した微小径の深穴内で中性化させて, 基板のガリウムひ素に直進衝突させる方法である⁹⁾. 2次元成形 (図5(a)) では, 基板に厚約1 μm のSi含有ポジティブ形レジストを塗布し, エッチングしたい場所をリソグラフィによって予めそれを除去した. 3次元成形 (図4(b)) では, マスクとして, パタンをウェットエッチングで作った厚さ10 μm のNi薄板を用いた.

(a) FAB etching method (b) Excimer laser etching method

図5 FABとレーザ加工の, マスクを用いた2次元成形方法

紫外線レーザは, 照射した光 (KrF, 波長 $\lambda=249\text{ nm}$) によって基板のポリイミドが分解・飛散する方法である. 2次元成形 (図5(b)) では, エッチングしたくない場所に光を照射しないように, 予め光路途中にステンレス鋼のマスクを配し, 3次元成形 (図4(b)) ではFABと同じマスクを被加工物の直上に配した.

本報では, さらに機械的なマイクロ工具として, 図4の(c)のように振動切削しながら押込むと, 角穴が明けられる角断面の切削工具を用いた^{4,6)}.

実験のために成形した部品は機能で分類すると2つあり, それは掘立柱と角穴である. 掘立柱として, $120 \times 100 \times 20\text{ }\mu\text{m}$ の2次元成形による「マイクロ鳥居」と, $280 \times 100 \times 100\text{ }\mu\text{m}$ の3次元成形に「マイクロ五重塔」を, 角穴として, 鳥居が入る深さ50 μm の $15 \times 25\text{ }\mu\text{m}$ の穴と, 五重塔が入る深さ50 μm の $50 \times 50\text{ }\mu\text{m}$ の穴とを, それぞれ用意した.

6.2 組立方法

本報では, 組立に用いるマニピュレータに, 筆者らが設計・試作した集動マニピュレータ⁷⁾を, 部品を把持する工具に, 同じく筆者らが試作したマイクロ工具⁸⁾を, それぞれ用いた. 前者を図6に示すようにワークと工具とに4方向の回転と3方向の並進の自由度を持たせたもので, 工具先端の作業点と工具/ワークの回転の中心とが顕微鏡の焦点と常に一致するように設計されている. 後者は先を直径約10 μm と尖らせたガラス管から空気を吸引させることでワークの把持を, 微量を吹き出すことでその切放を, それぞれ確実に行うものである.

なお, この環境は空気中で, 操作者は光学顕微鏡でワークと工具とを確察しながら, 工具を遠隔操作した. 著者らのグループではSEM中の組立として, 並進運動だけを有するマニピュレータで鳥居に組立を試みたが成功

図6 集動アクチュエータの機構

図7 SEMで観察した成形後の“鳥居”

図9 SEMで観察した組立後の“鳥居”

(a) 焦点を鳥居上部に合わせた場合
(b) 焦点を角穴表面に合わせた場合

図8 光学顕微鏡で観察した組立中の“鳥居”

図10 SEMで観察した組立後の“五重塔”

せず⁹⁾、現在は回転運動を含めたものを新たに設計中である。

6.3 成形・組立結果

上述の鳥居や五重塔は基板温度40～60°C、加速電圧3 kVの条件下のFABで、4～10 μm/hrのエッチングレートで加工した。図7に鳥居の組立前のSEM像を示す。組み立てる時に、回りと連結している喉部を工具で押して切り放すように形状が設計されている。エッチング側面の垂直壁は、表面から約88度で仕上がっている。また、角穴は照射エネルギー約3 J/cm²、周波数10 Hzの条件下でのエキシマレーザで、3 μm/secと高速のエッチングレートでドロスを発生せずに加工した。しかし、側面の垂直壁には約83度のテーパがついた。また振動切削は、振動数1 kHz、振幅3 μm p-pで、ポリイミドにバリを発生させずに角穴を明けた。

次に鳥居や五重塔を挿入する作業を行ない、これらを垂直に建てることができた。図8は光学顕微鏡で観察した鳥居の組立途中の写真（(a)は焦点を鳥居上部に合わせた写真で、(b)は角穴表面に合わせた写真、両者の焦点間の距離は100 μmである）、図9はSEMで観察した

鳥居の組立後の写真、図10はSEMで観察した五重塔の組立後の写真である。

本組立では観察のために対物レンズ12.8倍の実体光学顕微鏡を用いたが、図8からわかるように10 μm オーダの掘立柱の挿入作業を行うと焦点深さが小さくなり、立体視ができないばかりか、挿入部分における柱と穴のずれを見ようとすると全体像、特に柱の傾きがわからなくなった。将来は上面から立体視SEM、側面から補助用に光学顕微鏡を用いて、高分解能・大焦点深度・立体視・多面視の4つを満足させることが必要である。この時、環境は空気中から真空中へと変化するので、マイクロ工具も静電気を利用するもの⁸⁾が必要となる。

6.4 検討

以上に述べたように、機械加工を応用したNMWによって実際に3次元の微小物が生成でき、その概念が基本的に正しいことが確認できた。さらに、当初の目的であるナノメートルオーダの精度を得るために成形技術を改良すること、成形・組立だけでなく固定・補修・分析・検査などのマイクロ工程を確立すること、などが将来に

必要である。

7. おわりに

ナノメータオーダーの精度を有する微小物を作成するシステムとして、ナノ・マニファクチャリング・ワールド (NMW) の構築を試み、本報ではその基本構成を提案したのち、プロトタイプを試作を通して、実際に3次元の微小物を作成し、その結果、NMWの概念の有効性を明らかにした。また、微細作業において、少なくとも観察が必要であるが、光学顕微鏡では焦点深度が不足するので、現在、SEMしか満足する顕微鏡がないことを再確認した。このように、SEMを用いるために、NMWの作業室には真空環境が不可欠である。

なお、本研究のFABに関する部分は、(株)荏原総合研究所の畠山雅規氏、小畑忠輔氏と共同で行ったものである。

【文 献】

- 1) 畑村洋太郎；マイクロマニピュレーションと現実感，日本機械学会誌，1992-6 pp25-29 (1992)。
- 2) 畑村洋太郎，中尾政之，佐藤知正；ナノ・マニファクチャリング・ワールドの基本構成 (ナノ・マニファクチャリング・ワールドの構築—第1報)，日本機械学会講演論文集，No. 930-63 pp270-272 (1993-10)。
- 3) 中尾政之，佐藤知正，畑村洋太郎，他4名；ナノ・マニファクチャリング・ワールドにおける3次元作業の実現 (ナノ・マニファクチャリング・ワールドの構築—第2報)，日本機械学会講演論文集，No. 930-63 pp273-275 (1993-10)。
- 4) Yotaro Hatamura, Masayuki Nakao, Tomomasa Sato, et al.; Construction of 3-D Micro Structure by Multi-face FAB, Co-focus Rotational Robot, and Various Mechanical Tools, IEEE MEMS'94 投稿中 (1994-1)。
- 5) 下川，他；J. Appl. Phys. 66(6), 15 Sep. 1989, pp2613-2618。
- 6) 中尾政之，山宮広之，畑村洋太郎；各種のマイクロ切削工具の試み，日本機械学会講演論文集，No. 930-63 pp276-278 (1993-10)。
- 7) Tomomasa Sato, Koichi Koyano, Masayuki Nakao, Yotaro Hatamura; Novel Manipulator for Micro Object Handling as Interface between Micro and Human World, Proceeding of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp1674-1681 (1993)。
- 8) 中尾政之，佐藤知正，畑村洋太郎，他1名；各種のマイクロ工具の試み，日本機械学会講演論文集，No. 903-9 pp521-523 (1993-4)。
- 9) Hiroshi Morishita, Yotaro Hatamura; Development of Ultra Precise Manipulator System for Future Nanotechnology, Proceeding of IARP 1st Workshop on Micro Robotics and Systems, pp34-42 (1993-6)。