

「ナノ・マイクロマシンの展望」

藤田 博之 (東京大学生産技術研究所 教授・
マイクロメカトロニクス国際研究センター長)

ご紹介ありがとうございました。東大生産技術研究所の藤田です。ナノ・マイクロマシンの展望についてお話したいと思います。

まず最初に、マイクロナノの加工技術、マイクロマシンと呼ばれる機械の構造としてどのようなものができるのか、どのくらい小さくできるのかといったお話から始めたいと思います。

マイクロマシンの技術の基本というのは、半導体の技術、すなわちシリコンの集積回路に代表されるような微細加工技術です。それをトランジスタをつくるために使うのではなくて、ナノメートルやマイクロメートルの大きさをもった機械的な構造をつくることに一番の骨子があると思います。

シリコンチップの技術ですから、当然一つひとつの部品を組み立ててつくるのではなくて、あとでお話するフォトリソグラフィと呼ばれる方法で一括してつくります。例えばギアのトレインを考えると、ギアを1枚ずつつくて、中心軸にはめて、抜けないようにする、普通ですと、このように組み立てて機械をつくります。

ところがマイクロマシンの作製では、シリコンの薄膜を堆積し、それをエッチングで望みの形にすることを繰り返して、最後にその隙間を埋めていた層をエッチングで溶かしてしまうという手順を使うことによって、一切組立工程がなしに超高精度の構造をつくれます。そしてそれをナノメートルの単位で動かすことができるわけです。

もちろん材料もシリコンだけではなくて、光学的な材料、それからアクチュエータとなる材料、例えば形状記憶合金であるとか圧電膜であるとか、それから、あとで出てくるバイオ応用では生体高分子材料、などを取り込んでいくことが行われております。

いくつか印象的と思える写真を示します。これはいずれもアメリカの先駆的な例であります。1987年にAT & Tのベル研究所で、ポリシリコンでできたギアのトレインができました(図1)。直径が120ミクロンと80ミクロンだったと覚えております。その1年後には、カリフォルニア大学のバークレー校で静電マイクロモーター、直径120ミク

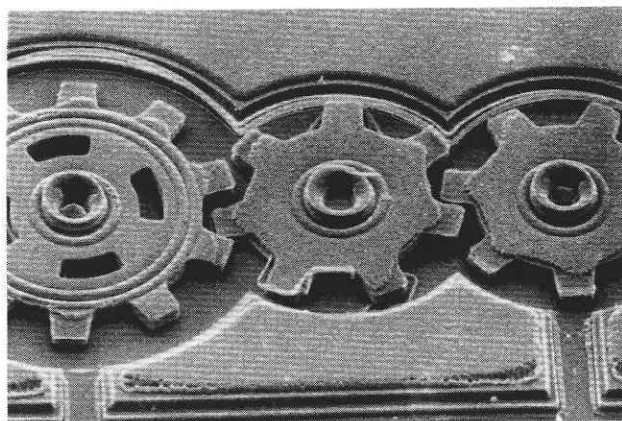


図1 AT&Tベル研究所で、1987年に作られたマイクロ歯車。直径は80から120 μm ¹⁾

ロンのもので静電気でくるくる回ることが証明されました。91年には、ちょうどボール紙を折り曲げて立体的にするような感じでシリコンの薄膜から立体的な構造をつくることまでできるようになったわけです。

半導体マイクロマシーニングの特徴はサブミクロンの加工精度、基板の上の一括大量生産の能力、組立てや調整なしに立体的なマイクロ構造、アクチュエータなどを組み合わせたマイクロマシンをつくりあげるといえる能力にあります(図2)。さらに、マシンだけではどう動けばいいか、どのようなスピードで動かしていいかわからないわけですから、センサとか制御用の電子回路を集積化して、いわばアリの手足だけではなくて、複眼もあれば神経節もあるといった形のマイクロマシンをチップ上に実現することが可能であるところに魅力があるわけです。

別の観点からいうと、マシンが小さいばかりが能ではなくて、シリコンのセンサとか回路を入れることによって、いろいろな電子デバイスを集積化することができます。例えばロボットを考えていただくと、機械機構やモーターがあって、センサは外付けで、コンピュータもケーブルでこれらの部品と接続している、こういうばらばらの要素を組み合わせたシステムになるわけです。それが1チップの中

にスマートにおさまってしまうという意味で、いろいろな高密度実装にも使える技術になっています。

それから、DRAMがたくさんのトランジスタからなるように、たくさんのマイクロアクチュエータやマイクロ構造を並べて、並列分散で作業をすることが期待されます。一つ一つは単純であっても、それがたくさん並ぶことで全体としては非常に複雑な機能を発揮することが可能になるわけです。この例も後々ご説明したいと思います。

ちょうど私は86年ぐらいからマイクロマシンの研究分野に携わりまして、これは諸先輩方のいい助言のおかげなのですが、1987年に東京であった国際会議に先ほどお見せしたミクロのギアとかが出てきた。その次の年にはマイクロモーターができたり、あれよあれよという間にいろいろなものができて、ともかく毎年が驚きの連続であった、

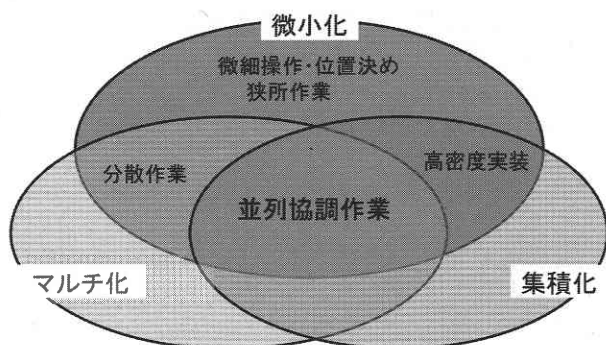


図2 マイクロマシンの三つの特長

という時代がございました。

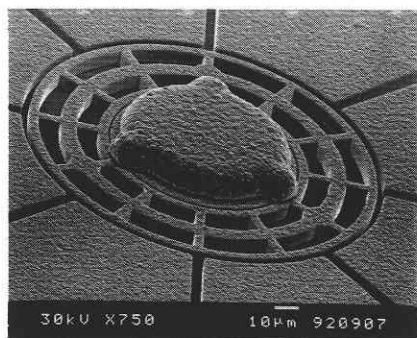
そのときに言われたことが二つありました。一つは、半導体技術のバックアップで微細化を進めるわけであるから、半導体の技術に対する非常に大きな投資と資産のうえに立ってマシンの小型化を進められて、これは必ずやうまくいくだろうとの見方です。でも一体全体何に使って役に立つのか疑問である、という相反した見方もあったわけです。

私のところで作った例をお見せします。図3は1993年にIBMの東京基礎研究所と一緒につくった直径が120ミクロンのマイクロモーターです。厚みが7ミクロンで、ニッケルをメッキした構造です。中心軸がありまして、ロータがあって、周りにステータがある。ステータに電気を加えて、ロータをくるくる回すという構造です。

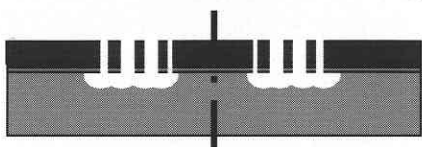
どうしてマイクロモータのように回るものが組み立てなしにできるかを説明するために簡単にプロセスの話をしてします。細かいことはわからなくて結構です。

ロータがぐるぐる回るためには基板にくっついてはいけなわけです。ロータを外してみると、実はその下はシリコン基板がえぐりとれていて、写真のような状態になっています。それに対して中心軸とか電極のところは基板にちゃんとくっついていています。

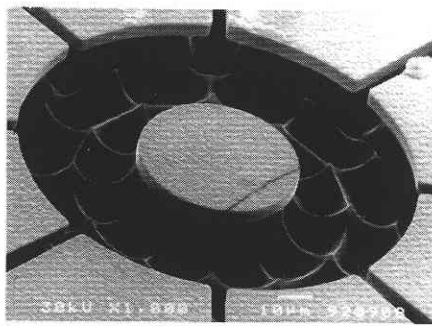
なんでこんなことができるかを説明します。電気メッキをするための種層をつけた上に、ここでは10ミクロンぐらいある厚いフォトレジスト（感光膜）を塗りました。そこにマイクロマシンの形を、フォトリソグラフィーで露光するわけです。現像しますと、形が表面に出てきます。断



全体図



断面図



ロータを取り除いたところ

図3 直径120μmの静電マイクロモータ。厚みが7μmのニッケル製。毎分一万回転した²⁾

面図で示していますが、中心軸とロータを隔てる隙間であるとか、ロータの間の穴の部分とか、ちょうどこれらの形状を反転したパターンができます。これを今度はメッキ液につけまして、この金属膜とメッキ液の間に電圧をかけるとメッキが成長するわけです。けれども、レジストの部分はプラスチックですから、ここには電気が流れないわけで、谷間だけ電気メッキが行われて、ちょうど複製をとるようにメッキされるわけです。フォトリソを溶かしてしまっただけで、余分な層をエッチングするということが形がだいたいできます。

でも、これでは中心軸もロータも全部基板に張り付いていますから、電気をかけても動きません。そこで、プラズマのエッチングを使ってこの隙間から裏面のシリコンをえぐり取るわけです。このように裏をちょうど砂場の砂を掘り取るように取り除きます。軸や電極は幅が広いので、なかなかえぐれません。ところがロータは幅が狭く設計してありますから、下が全部取れて、くるくる回るようになると、こういう仕掛けです。

東京のお台場にある日本科学未来館にマイクロマシンの展示がございまして、実際に回転しているところのCGがそこで見られます。

でも人を驚かすものを作るばかりではだめなので、何か実際に働く製品は何なのか問題になります。まずサーボ加速度型のセンサです。皆さん運転される車にエアバッグがついていると思いますが、エアバッグの始動用のセンサは、衝突の衝撃を検出する加速度センサーになっています。マイクロマシンの小さなおもりがあって、バネで吊られているのですが、地震計と同じにそれが衝撃で揺れると、揺れを静電電極もしくはひずみゲージで検出します。その波形を処理して、人が蹴っ飛ばしたぐらいで膨れてはいけませんから、確かに衝突だとわかったときにエアバッグを1秒以内に膨らますための処理をする電子回路があります。回路まで全部含めて1チップでそういう信号がとれるようになっています。

それから、インクジェットプリンターもよく使われると思いますが、小さな流路にヒーターがついていて、ヒーターを温めたときのあぶくの力でインクを噴き出すわけです。今ですと30キロヘルツでぐらいで動作できますし、一つ一つのインク滴は4ピコリットルというような非常に小さな量になります。

あと、ビデオプロジェクターでも、画素に対応した多数のマイクロミラーを動かし、光を反射して画像を写すものが米国の会社から出ています。あとグレーティングのアレイを使うものは、日本の会社で試作をされてサンプルを展示しておられます。この辺が市場に出ているものです。

それ以外に、DNAを分析するための細い流路を切ったチップが、製品化されています。その中に電気をかけて、

DNAの長さによって、細い管の中を走るスピードが違うということを利用して分析する装置です。それをDNAの短いものだけでなくいろいろ別のものに使えたり、あとタンパク質の分析に使うような、そういうほうにいま研究が進んでおります。

それから光スイッチを使って光通信ネットワークのコンフィギュレーションを変えとか、多数の波長のあるうちのひとつだけを抜いてきたり入れたりするというようなこと。あと、磁気ディスク装置の高密度化にマイクロアクチュエータを使うといったような研究はいろいろ世界で、うちの研究室でもやっておりますが、行われております。

最後に、ナノテクノロジーの関係では、生命科学、ナノテクノロジーの基礎となる理学的な研究にマイクロマシンのツール、いわば小さいものを扱うピンセットのようなものをマイクロマシンで提供するというようなことができるようになってきたわけです。

表1の市場調査は、96年と2003年を比較したものです。もう2003年は今年でこんなに大きくまだ育っていないのですが、絶対額ではなくて、どこが伸びそうかという倍数で見ていただくといいのです。いわゆる加速度計とかジャイロとか圧力センサー、この辺はかなり確立した市場がありまして、徐々に伸びていくレベルです。

それに対して無線通信用のマイクロマシンは新しい市場です。例えば携帯電話だと必ず水晶発信器とかが必要で、それは外付け部品になる。ところが発信器をシリコンでつくってチップの上にのせることができれば、1チップで全ての機能ができる。

あと、フィルターや可変のキャパシタンス、可変インダクタンス、こういったものもマイクロ構造でつくれる可能性があり、無線通信に基くユビキタス社会に、マイクロマシンの1チップ化したデバイスを使うことで、いままでは存在しなかったマーケットができると言われております。

光マイクロマシンの関係も、通信業界の発展に対し非常に期待がこの時点ではあったので、10倍、20倍となっています。ここも実際に製品が出だしております。新規の大きな増大が期待できる分野です。それからマイクロ流体システムは、医療関係等を中心に広く使われていくと期待しております。

各種センサとか光通信の応用は別の機会に譲り、バイオ、ナノの関係を中心に、研究例をお話したいと思います。

マイクロマシンのバイオ応用では、細胞を対象として1個ずつを扱うマイクロマシンがあります。それからチップの上で細胞を飼って、培養してセンサ等に使うもの、それから、DNAなどの生体高分子を単分子レベルで扱うシステムもあります。さらに、生体分子モーターと呼ばれる回転したり、直線運動しながら力を発生する分子や、酵素など、いろいろな化学反応を起こしている物質をきちんと理

解するためのツールを作ったり、マイクロマシンの中でそれを利用していく方向に今後進んでいこうと思っています。

マイクロマシンの寸法は、だいたい数十ナノメートルから数百ミクロンメートルです。一方細胞が数十ミクロン、生体高分子では DNA の太さが 2 ナノメートルで、ATP の合成酵素の直径が 10 ナノメートルです。両者がだいたい同じような寸法にあるので、マイクロマシンをツールにして細胞や生体分子を理解することができるわけです。

まず細胞をつかまえるチップです。チップの上に細胞が浮遊する培養液をたらし、基板に開けた穴から水をちょっとずつ裏面に引いてあげると細胞は水の流れにのって穴の口につかまるわけです。両側に電極とかいろいろなものを

付加できますし、規則的なアレイ状に穴を開けておくと、正確な位置に多数の細胞を、1 つずつきちんと配置できるというわけです。例えば、自動検査などをするときには普通のペトリ皿で培養してしまうと、個々の細胞がどこにどう生えていくのかさっぱりわかりません。そうすると、全体の平均値としてはいろいろなことがわかって、一つずつの細胞がどういうふうに変化をしていくのか、それから隣り合ったものにちょっと違う、例えば薬物を投入したものとしらないものを比較したいときに、どちらがどうであるのかということをはっきりと分けることができません。このためには、ある場所に一つの細胞もしくはその細胞から増殖したファミリーがいるということはとても大事なわけで、図 4 のチップではそういうことができるわけです。

表 1 マイクロマシンの市場調査³⁾
System Planning Co. (1999)

| マイクロマシンデバイスと応用分野 | 1996 | 2003 |
|--|----------|-----------|
| 慣性計測 (加速時計、ジャイロ) | 350-540 | 700-1400 |
| マイクロ流体システム (インクジェットプリンタ、流量センサ、バイオチップ、マイクロ化学分析システム) | 400-500 | 3000-4450 |
| 光マイクロマシン (ディスプレイ、光スイッチ、可変波長レーザー・フィルター) | 25-40 | 440-950 |
| 圧力センサ (自動車用、医用、産業用) | 390-760 | 1100-2150 |
| 無線用マイクロマシン (携帯電話用、レーダ用) | None | 40-120 |
| その他 (マイクロリレー、その他センサ、磁気ディスク) | 510-1050 | 1230-2470 |

百万ドル単位

捕獲した細胞

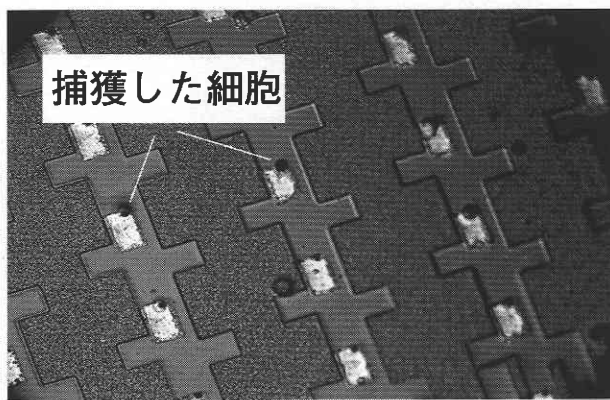
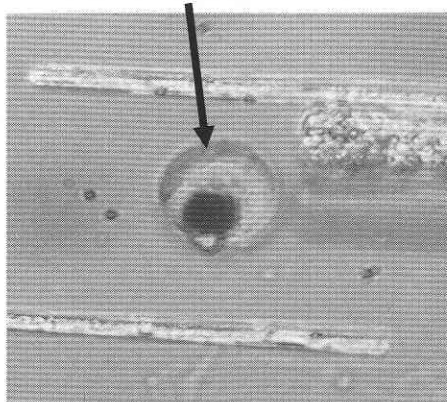


図 4 チップ上に整列して細胞を捕獲⁴⁾

上記のように細胞をつかまえる方法は、日立中研に当時おられて、いま名古屋大にいらっしゃる佐藤一雄先生が同じことを既にされておりました。もう十数年前の話です。ぼくらはさらに工夫をして、抗原抗体反応で細胞をきちんとつかまえておくための、のりを穴の回りにつけるとか、また裏に流路をつくっておいて、裏面から薬剤を投入するとか、微小な電極を利用して、DNA もしくは薬剤の細胞内への投入をするなどのことができるシステムとして完成したいと思っています。ただ、思いはあるのですが、遅遅として進まないのが現状で、現状では細胞をつかまえて両側の電極に電気パルスを加えて遺伝子注入を試みる程度にとどまっております。

今度は、チップ上で細胞を飼ってみる研究です。脳内に神経細胞がいっぱいあって、お互いシナプスというのでつながって、いろいろな情報処理をしています。それを人工的なパターンの中に閉じ込め、単純な形のネットワークをつくって働きを理解しようと考えました。いろいろ先駆的な研究をされている方が、たくさんいらっしゃるわけですが、ぼくらはマイクロマシーニングが得意なので、PDMS というシリコンゴムできちんとした流路をつくり、その中に細胞を入れて、この細胞同士の間にある流路に添って神経線維が走る、このような非常に精密に形を定めたネットワークをつくろうと、北陸先端科学技術大学の民谷先生の研究室と共同して仕事をしています。ぼくらは構造を提供する、民谷研では細胞を飼って測るという分担です。

ガラス基板の上に黒く見えるのが神経のシグナルを検出するための電極です。その電極にあわせて PDMS のパターンをのせまして、その中に細胞を入れて1週間ぐらい飼ったところですが、だいたい3週間ぐらいまでは連続して飼

うことができています。だんだんお互い同士に神経のコネクションができて活動が活発になってまいります。まだ完全に連携のとれた活動ではございませんけれども、あちこちで神経パルスが出ているのを測れました。これを使うことによって神経の情報処理の理解であるとか、ニューラルネットの理論と実験の対応であるとかをシンプルなモデル化しやすい系で行う予定です。それから、化学物質に対する神経細胞の反応をきちんと定量的に明らかにすることに使えればいいと思っています。

民谷研の学生が、マイクロ流体システムに関する国際会議で図5と図6に示す成果を発表し、ベストポスター賞をいただきました。

こうした研究の延長で、再生医工学とかティッシュエンジニアリングとか言われる分野で、マイクロ加工したチップの表面などに細胞や分子をくっつけたり増やしたりすることで生体の臓器の代わりをする機能を発揮させられないかと考えています。

人間の臓器を考えても、例えば肝臓の場合、多種の細胞がきれいな層状構造を作って各々の働きをしていますし、血管であるとか胆管であるとかが縦横に走っていて栄養源を与えたり、処理すべき物質を供給したり、処理した物質を外に出したりいろいろやっているわけです。これを全部分子や細胞レベルから再生してつくるのがいいのか、それともインフラストラクチャーにあたるポンプとか流路などミクロの構造は、マイクロマシンのような技術できちんと作るのがいいのか、考えが分かれるところです。マイクロ加工の技術でつくりこんだ構造中でタンパク質なり細胞なりを飼うことによって、臓器と同じようなものをより早くつくるという方向で、表面修飾をする、栄養を供給する、老廃物を除去する、環境を制御することを目指しています。

最後に、バイオナノテクノロジーへの応用について簡単にお話をします。

これは徳島大の薬学部の馬場先生、香川大の工学部の橋

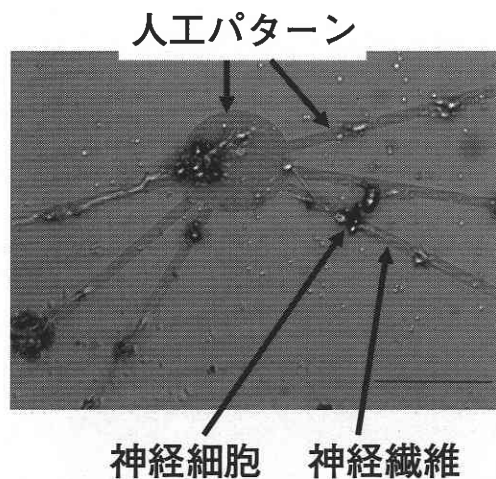


図5 チップ上で神経細胞を培養し、人工パターンに合わせて神経線維を誘導した結果⁵⁾

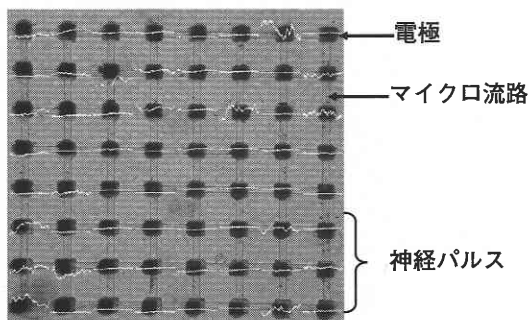


図6 神経電気パルスの検出結果⁶⁾

口先生と共同研究をした成果です。

非常にとがった針先を向かい合わせたもの(図7)をつくって、その間にDNAをつかまえました。対象は、長さが16ミクロンのラムダDNAという非常に短いDNAです。それから1本だけつかまえたのではなくて、何百本、何千本という束でつかまえたことを予めお断りしておきます。

それから、分子の長さに合わせてグリッパーのとがった先端の間隔は16ミクロン程度にしてあります。一番とがったものは10ナノメートルのオーダーです。つまりDNAの太さの5倍ぐらいまで先をとがらせるということです。

あとで表面にアルミニウムをくっつけて、DNAが来るとぴたっとくっついてはがれなくなるように化学的な親和力をもたせております。

実験では、顕微鏡の下に置いたガラスの板の上にDNAを含む水滴をたらしします。DNAは蛍光染色といって紫外線を当てると光るようになっています。水滴の表面に先ほどのグリッパーを近づけて交流の電圧をかけますと、光るDNA分子が電圧に引かれてつかまります。何千本もの分子をいっぺんにつかまえてしまった例では、あんまり太い

ので非常に強い結合ができてまして、水の中から空気中に取り出しても一向に壊れませんでした。では本当にDNAなのと心配になったので、蛍光顕微鏡で見たら、確かに光りました。周りにゴミとかついているかもしれませんが、確かにDNA分子の束をつかまえることができました。押ししたり伸ばしたりしても壊れないことを確かめました。

つかまえる分子の数が少ないほうがいいわけで、ゆくゆくは一本にしたいわけです。どうすればいいかというと、電圧をかける時間を短くすると、引かれてくるDNAの数が減ってまいります。実際グリッパーの間にかける時間を、先ほどより短くいたしますと、前の例に比べてずっと弱い発光になりました。

図8は真空中で走査電子顕微鏡でとった例です。うまくやると透過電子顕微鏡で見られるのではないかと、そういう実験も試みるようにしています。

せっかくうまくつかまったので、何とか分子の性質を調べたいと思っています。これは、これから先にやりたいと思っていることで、川合先生の前で話すのは恥ずかしいのですが、例えば力を加えて分子を引き伸ばしながら測ると、ピエゾ抵抗効果が見えるのではないのか。また、あるところで全く塩基配列が違うようなものを測ってやると、PN接合になっているのではないかと。こういった測定をやりたいと思ったときに、2点でつかまえて測るのでは、接触抵抗が問題です。

針の間につかまえてただ電流・電圧を測っても、分子と針の接触点の抵抗と分子そのものの抵抗との区別が付きません。これを解決するのが、4端子測定というやり方で、電流端子と電圧端子を分けて、分子中央部での電圧降下測定をハイインピーダンスで行えば、電流端子での接触抵抗は関係がなくなります。

この4端子測定を実現するのに、またマイクロマシンが

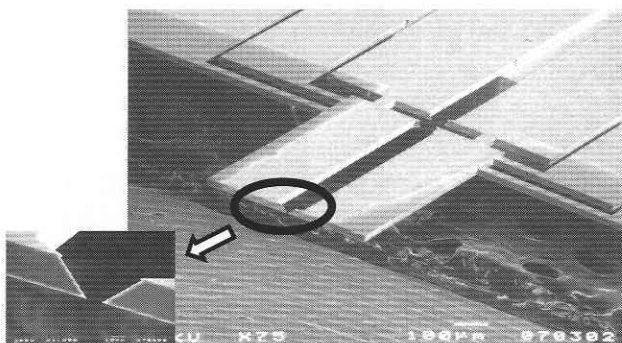


図7 DNA捕獲用ナノグリッパー⁷⁾。捕獲対象λ-DNA(太さ2nm, 長さ16μm)ナノグリッパー(先端間隔16μm程度, 曲率半径10nm以下, 先端にAl蒸着)

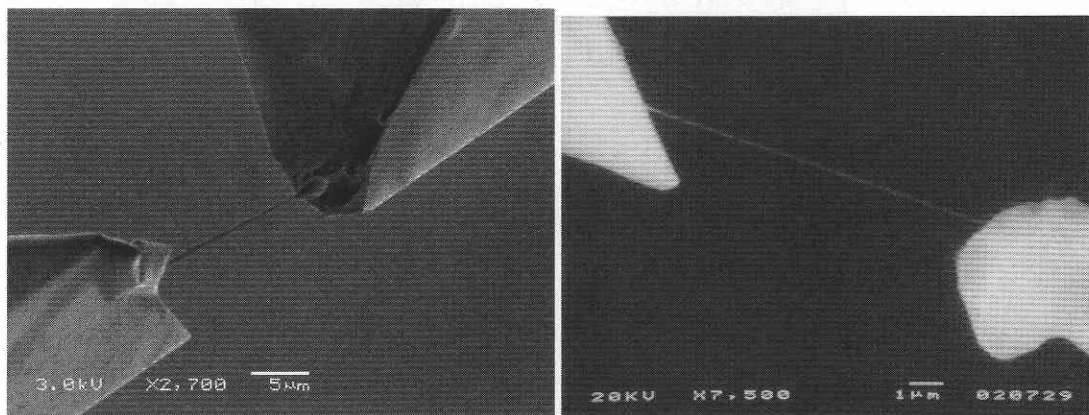


図8 捕獲したDNA分子の走査電子顕微鏡写真⁷⁾

出てくるわけです。

電圧を測るために、直径が100ナノぐらいの非常に細い2つのプローブをマイクロアクチュエータにつけて動くようにしたデバイスを図9に示します。

顕微鏡でプローブの先の観察ができるように、基板に穴が開いていて、そこからU字型をした二本の、いわば指が出ております。指の先をずっと見ていくと、白く見えるもう一層のシリコンの膜がついています。先端が細いプローブになっています。100ナノメートルぐらいの太さで、先が鋭く三角錐状にとがったプローブが、200ナノから300ナノの間隔で二つあります。

これはプラチナが蒸着してありますので、一応導電性が

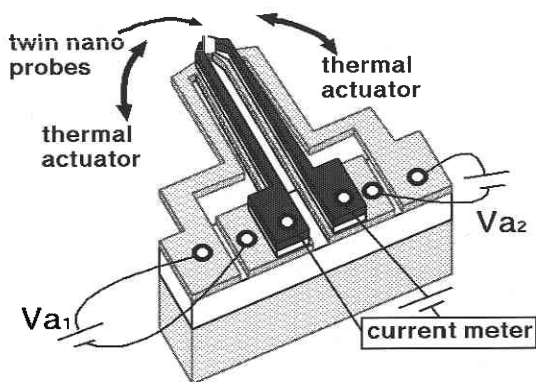


図9 ツインプローブデバイスの模式図⁷⁾。「コ」の字型をした熱駆動型アクチュエータの組み込みにより2本のプローブをそれぞれ独立に位置決めすることが可能な設計である。

保たれています。マイクロアクチュエータに電流を流し出すと、透過電子顕微鏡の中でちゃんと開けたり閉じたりすることができます(図10)。

まだ完全に測れたわけではないのですが、分子や量子ナノ構造の測定に使えるのではないかといま一生懸命研究をしています。

いままでは、マイクロマシンでバイオやナノの世界を理解するためのツールをつくるという話でした。これからはバイオやナノ技術で得られる機能を取り込んで、より小さく、より高機能のマイクロシステムをつくる方向で研究を進めたいと思っています。

いま機能が明らかなのはバイオ分子なので、それを用いたバイオ融合ナノシステム(図11)を研究しています。

例えば、ミクロの流路をつくってにおいて、流路の底にレールになる分子を付け、レールの上で力を発生する分子をまぶしたナノ物体を入れます。流路内の溶液の組成などの化学的な制御に従って、望み通りに物体が運ばれるといった仕組みを作るのが夢なわけです。

細胞の中で実際に物質が運ばれる時は、膜で包まれた小胞というもののの中に物質が入って運ばれる。将来はそれを人工的に作る夢があるわけです。

いま使っているのは微小管と呼ばれるレール分子で、これが新幹線のレールになります。それからキネシンと呼ばれるのがモーター分子です。マイクロ構造にキネシンをくっつけて、レールの上で動かすわけです。

5ミクロンぐらいの大きさの物体を作り、表面はキネシンというモーター分子でコーティングしました。他方はガ

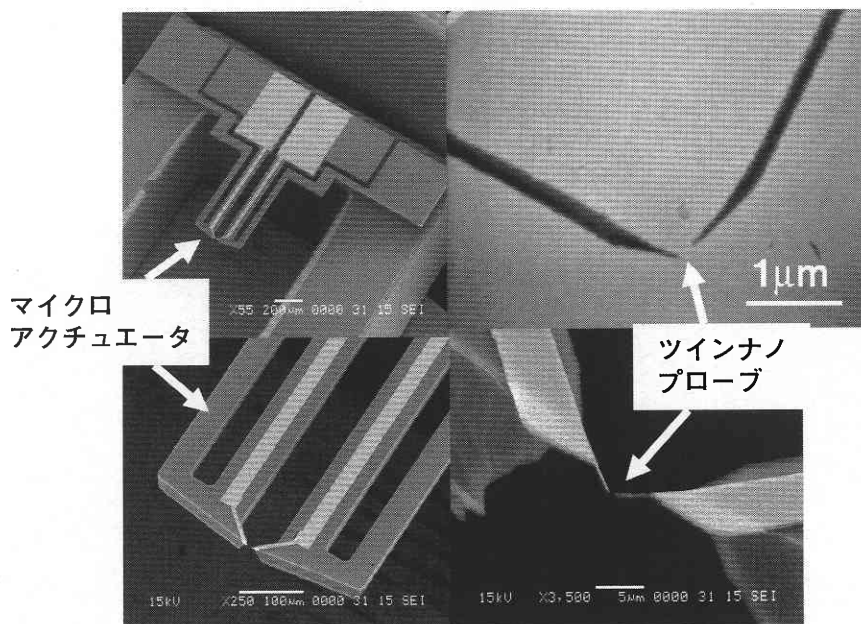


図10 独立駆動可能なツインナノプローブ⁷⁾

ラスの基板で、表面に微小管という分子がレールとして引いてあります。図 12 に示すように、ガラス基板の上に物体を置き、溶液中に ATP というエネルギー源になる分子を入れると、物体が一方方向に運ばれました。一応人工物体を、生体から得たバイオアクチュエータを使って動かすことができました。今後ナノ輸送システムをつくることができるかもしれません。

ナノテクノロジーにおいて、原子からミクロのサイズの

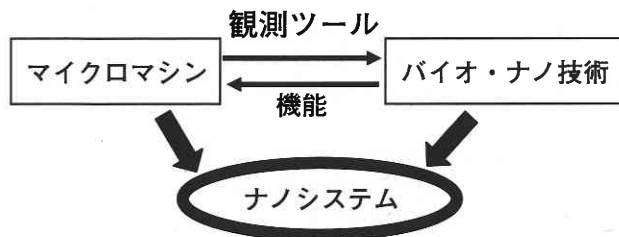


図 11 バイオ融合ナノシステムの概念

オーダーまで、ボトムアップですべてを作るだけではなくて、トップダウンで微細化した MEMS のようなものと、ボトムアップで組み上がったバイオ分子、こういうものを 10 ナノメートルから 100 ナノメートルの領域で融合します (図 13)。それでバイオ融合ナノシステムとか、もちろん無機的なものと一緒にした分子融合ナノシステムもできるでしょう。こうやって 0.1 ナノから数千、数万ナノまでシームレスにつないでいくのがよいのではないかと考えている次第です。

以上をまとめると、まず半導体技術を利用してナノ構造や立体マイクロ構造ができます。応用製品も販売されるようになりました。特にバイオ化学技術、ナノテクノロジーへの応用は盛んであります。ここではトップダウンの技術である MEMS の技術とボトムアップの技術であるバイオナリナノの合成という技術をうまくつなげて、ほくらのマクロ世界とナノ世界の間を橋渡しするということが大切であると考えております。以上でございます。

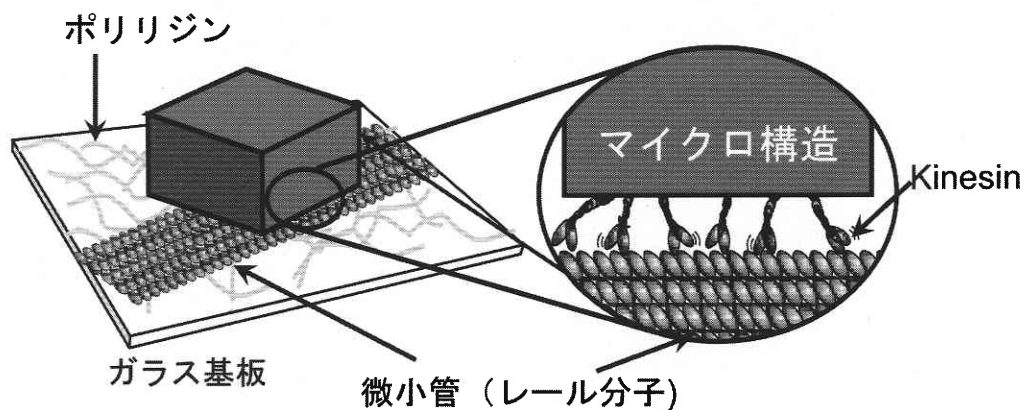


図 12 生体分子モータを用いたマイクロ構造の搬送⁸⁾

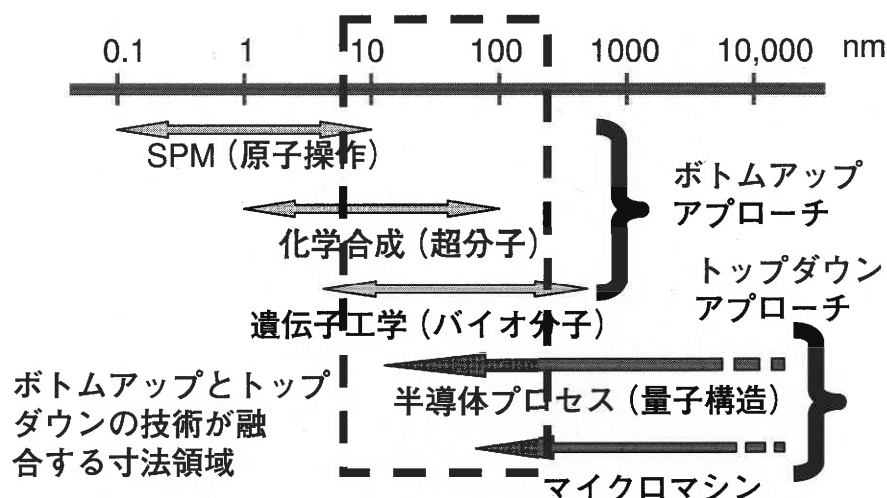


図 13 トップダウンアプローチとボトムアップアプローチを融合し、ナノ、マイクロ、ミリの世界を連続的につなぐ

□質疑応答

○質問 DNA を捕獲されるという実験をご紹介いただきましたが、その際に何か電流値はモニターしていらっしゃるのでしょうか。

○藤田 特に今はしていません。それはいい質問で、短い時間だけ電圧をパルス状にかけて、ピクッと電流が流れたら分子1個つかまったとか、そういうのがわかるといいなと思うので、そういうことも試したいです。ただ、溶液自体に導電性がありますので、本当に区別できるかどうか、なんともわからないというのが現状です。

○質問 引き上げたあと、バンドル状の DNA について、抵抗は測っているのでしょうか。

○藤田 それは測ってみました。だけど二端子測定しかしていないので、測定毎にまるで特性が違いました。これはほとんど接触抵抗の問題であろうという結論になったので、皆さんにお見せできるようなデータはとれていません。

引 用 文 献

- 1) W. S. N. Trimmer, G. J. Gabriel 「ミクロの機械システム」日経エレクトロニクス 1987 年 12 月号 14 日号 209 ページ
- 2) T. Hirano, T. Furuhashi, H. Fujita "Dry-Released Nickel Micromotor with Low-Friction Bearing Structures" IEICE Trans. on Electronics, Vol. E 78-C, pp. 132-138 (1995)
- 3) System Planning Corporation, "MicroElectroMechanical Systems (MEMS), An SPC Market Study," January, 1999.
- 4) H. Fujita, A. Tixier, L. Griscorn: Micromachines for Cell Manipulation. SEISAN-KENKYU, vol. 53, No. 3, p. 162, March 2001
- 5) P. Degenaar, B. Le Pioufle, L. Griscorn, A. Tixier, Y. Akagi, Y. Morita, Y. Murakami, K. Yokoyama, H. Fujita, and E. Tamiya: A Method for Micrometer Resolution Patterning of Primary Culture Neurons for SPM Analysis, J. Biochem. Vol. 130, pp. 367-376 (2001)
- 6) Fabrice Morin, Matthieu Denoual, Laurent Griscorn, Bruno LePioufle, Hiroyuki Fujita, Eiichi Tamiya: Controlling Cell Development by Microfluidic Techniques: a Step towards Whole-cell Biosensors with Defined Biological Features, Y. Baba et al. (eds.), Micro Total Analysis Systems 2002, Volume 1, 515-517.
- 7) G. Hashiguchi, Y. Wada, J. Endo, H. Toshiyoshi, H. Fujita, "A Micromachined Device and its Application to Visual Observation of Nano Phenomena in a Transmission Electron Microscope" Proc. of 19 th Sensor Symposium, pp. 35-38 (2002).
- 8) R. Yokokawa, S. Takeuchi, T. Kon, R. Ohkura, M. Edamatsu, K. Sutoh, H. Fujita, "Transportation of Micromachined Structures by Biomolecular Linear Motors" Proc. of IEEE 16 th Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS-03), pp. 8-11 (2003).