

## セッション 1

## 「シリコンマイクロマシン技術」

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

## 1. はじめに

私 (藤田) と増沢教授のほうから、基盤技術の一つになるマイクロマシンの作り方を紹介します。私は半導体技術に基づいて小さいものをつくって動かすという技術、増沢教授からは、従来のメカニカルな加工法を延長して三次元的なマイクロ構造を作る技術について、両方からのアプローチのお話をさせていただきたいと思います。

## 2. 半導体マイクロマシニング

シリコンの半導体の技術を使ってマイクロマシンをつくるには、いろいろなやり方があります。機械ですから立体的につくるのが大事なわけで、三次元的なマイクロマシンをつくる方法の一、二をお話しして、ビデオを使って、その動くところを見ていただきます。様々のマイクロアクチュエータについて、大体 100 ミクロンぐらいの大きさのモーターが回るとか、そういったところも見ていただきます。それからもっと小さな、10 ナノ、100 ナノといったような構造も似たような技術でつくることができますので、その辺のことを簡単にお話をします。また、あとの話とつなげるために、マイクロマシンの応用としていろいろな分野を概観いたしまして、一例としてバイオテクノロジー等への応用について、うちの研究室の例を紹介させていただきます。

最後に、所長先生からのお話もありました、「フランスとの共同研究について」が一番最後にフランス側の責任者である JJ Gagnepain, CNRS 工学部門長からのお話がありますが、そのイントロダクションにあたるお話をさせていただきたいと思っています。

マイクロマシンの研究が、どんなものかという、大体 10 ミクロンとか 100 ミクロンとか、目で見えないぐらいの大きさのモーターやリニア・アクチュエータや、立体的な構造をつくって動かそうという研究です。虫めがねでもなかなか見えないぐらいの大きさです。それをどう作るかという、手をつくって、組み立てたのではなかなかうまくできないし、これでは工業的な技術とは言えないわけで

す。そこで、シリコンのチップをつくる技術、いわゆる半導体技術に基く機械的な加工技術を新たに開発いたしました。マイクロマシンを簡単に、大量に、だれでもつくれることをめざしているわけです。

では、マイクロマシンの部品はどんなものでしょう。アリの思い浮かべていただくといいのですが、目とか触角とか、そういうものに当たるセンサーの部分があります。それから脳みそや神経系に当たる部分がプロセッサや電子回路になるわけです。この 2 つはいままで比較的開発が進んでいて、秋葉原へ行っても電子回路のチップであるとか、プロセッサであるとか、センサーとか買えるわけです。けれども、「マイクロモーターをください」といっても、たぶん小指ぐらいの大きさのマイクロと名付けたものがある程度で、せいぜいミリ単位のものしか手に入りません。これより 1 ケタ以上小さい 100 ミクロンのモーターや立体構造など、いわゆる筋肉とか手足、骨格に当たる部分を新しく作る、そしてほかのものと一緒に組み合わせたメカトロニクスのシステム全体をつくりあげることが研究の主眼になります。モーターを動かすために静電気の力を使うとか、熱膨張の力を使うとか、風の力を使うとか、いろいろな方法を試しているのが現状でございます。

今さら申し上げることもないと思いますけれども、皆さんのノートブックパソコンなどを開けますと、シリコンのマイクロプロセッサが入っています。その中をのぞいてみると、こういうようなトランジスタと配線が細かく入っているわけです。現在の一番細かい設計ルールですと、0.2 ミクロンとかそのうち 0.1 ミクロンとか、そのぐらいの線幅でもものをつくるわけです。こんなに小さい回路がつけられるなら、この技術を使って今度は微小な機械をつくってみたらどうだろうというところにマイクロマシンの最初の発想があったと、私自身は理解をしています。

最初の頃機械をつくるのにシリコンのような脆いものはよくないのではないかというご批判があったわけですが、いろいろ考えてみますと、実はいいことがたくさんあります。「眠っていても研究が進む」と冗談のような書き方を

していますけれども、シリコンのテクノロジーというのは多大の設備投資とマンパワーの投入があって研究が進んでいるわけです。私自身が特に力を入れなくても加工できる最小線幅というのはどんどん狭くなります。これは全世界のマーケットが微細化を要求しているからです。ですからその技術の進歩をうまく利用して微小な機械をつくるのができたら、ものすごくパワフルなテクノロジーを全く別のところに利用して役立てられるわけです。これが可能だという点に半導体のマイクロ加工の最大の利点があります。

それから、生産設備に関しても、現在存在している設備をうまく流用すればマイクロマシンがつくれるわけです。正直いって 0.1 ミクロンとか 0.2 ミクロンとかいう細かさは必要ありません。少し古いテクノロジーでもマイクロマシンには十分役に立つので、減価償却が終わってしまった昔のラインを使って生産できます。そういう意味でも魅力があると思います。

先ほど申し上げたセンサーやマイクロプロセッサと一緒に集積化して、同じチップの上になんなものをつくるのが容易にできるわけで、その辺が半導体マイクロマシニングの魅力であります。

### 3. 立体的マイクロ構造

機械をつくる場合には立体的な構造が特に大事です。いろいろな加工技術がございまして、ウエットのエッチング技術であるとか、X線のリソグラフィを使う方法であるとか、反応性イオンエッチング (RIE) と呼ばれるプロセスを使って、非常に深いトレンチ構造をつくる技術。それからシリコン薄膜を通电加熱してガラス細工みたいに軟かくして立体的に曲げてしまう、こんなようなこともできます。

細かいことはお話ししませんけれども、こんな構造ができるのだなと思っていただければ結構です。

図1はシリコンの50ミクロンの厚みの膜を反応性イオンエッチングというもので削ったところです。幅が5ミクロン、高さが50ミクロンぐらいの非常に幅の狭い、壁のような構造とか柱のような構造とか、2つの櫛刃が噛み合った複雑な構造、こういうものが非常にシャープにできることがわかります。

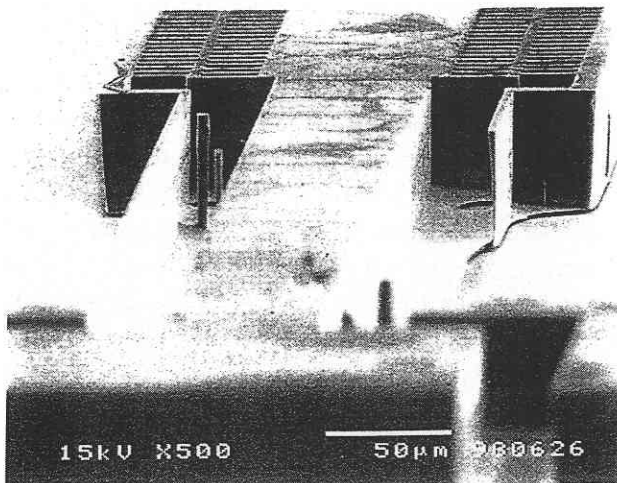
櫛刃部分のクローズアップが図2ですが、図中の目盛りが10ミクロンですから、3ミクロンぐらいの線幅の構造が、その形を保ったまま垂直にすばっと、ちょうどグランドキャニオンのように彫れているのが見えていただれます。

前図では、同じ厚みの形があるだけで、大して立体的ではないではないか、という見方もあるわけですが、いろいろ工夫をしますと、何段階かに厚さの差を持つ構造もつくることが可能です。

図3も私の研究室で作った例ですが、小さいギアの上に大きいギアがある。3段階の深さに井戸みたいなものが彫れていたり、逆にメキシコのピラミッドのように段になって突き出した構造とか、前方後円墳みたいな形とか、いろいろな立体的形状を自由自在につくるができるわけです。

本当はどうやってつくるか、ゆっくりお話ししたいのですが、きょうは時間がないのでそこは省略いたします。

さてサイコロを小学校の授業でつくるときに、2通り作り方が考えられます。大きな木の切れ端を持ってきて、ノコギリで切ってくれば、中まで充満したサイコロができます。今までの構造は、シリコンの基板を彫っていたので、そういうつくり方をしていたわけです。でも気のきいた子どもだと、ボール紙を持ってきて展開図をかいて、それを折りあげてサイコロをつくるでしょう。そういうマイクロ加工



ICP/RIEによるシリコンの加工例

図1

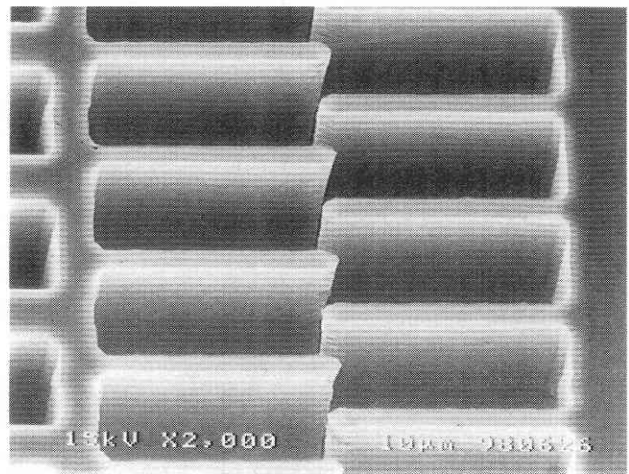


図2 図1の拡大写真

も十分可能なわけで、紙の代わりに多結晶シリコンの薄膜をうまく折り上げていくと立体的な構造ができるわけです。

図4は一例ですが、太鼓橋に支えられたシーソーのような構造ができています。厚みが2ミクロンぐらいの多結晶シリコンの膜を、マイクロアクチュエータという力を出す装置で押して立体的にします。曲がったところに熱を加えて、ちょうどガラス細工のように焼き固めると、こんな形になるわけです。また、門みたいなところにバネがわたっているという机のような構造もできています。こういう形を全部マイクロアクチュエータが自分で組み立てて、次にその形を三次元的に保つというやり方で作ることができます。

#### 4. ナノ構造

さて、以上は、ミクロン単位の寸法を持つ構造だったのですが、それをもう少し突き詰めていきますと、ナノメートル、ミクロンの1000分の1の寸法を持った構造をつく

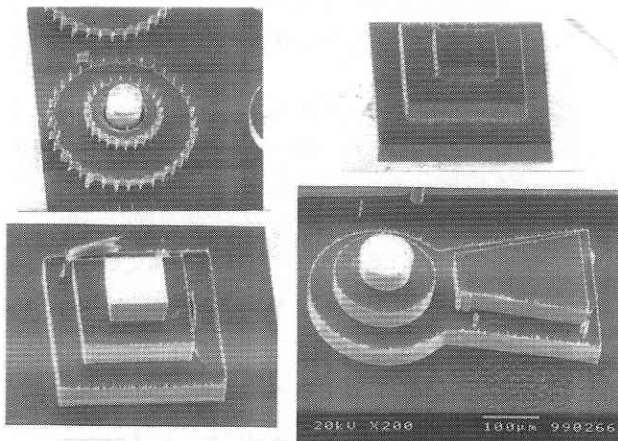


図3 多段の立体マイクロ構造

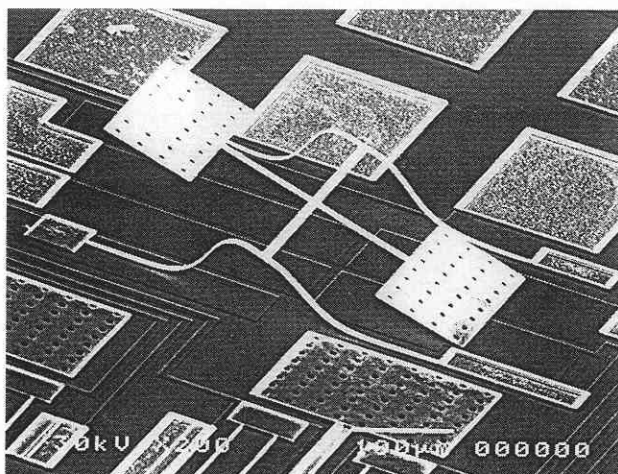


図4 シリコン薄膜の塑性変形による立体構造

ることもできます。図中にあるのは1ミクロンのスケールですが、図5に示すように幅が85ナノメートル、高さが60ナノメートルという非常に細い線ができます。

この線は非常に細いので、透過電子顕微鏡で見ますと、実は三角柱の形をしています。中央の部分を拡大してみると単結晶シリコンでできているのでシリコンの結晶格子が透けて見えるぐらい小さな構造です。この三角形の断面の中にシリコンの原子が千個ぐらいしか入っていない。極めて小さな構造もつくれるようになっていきます。

さらに、1本の線ではおもしろくないので、図6に示す

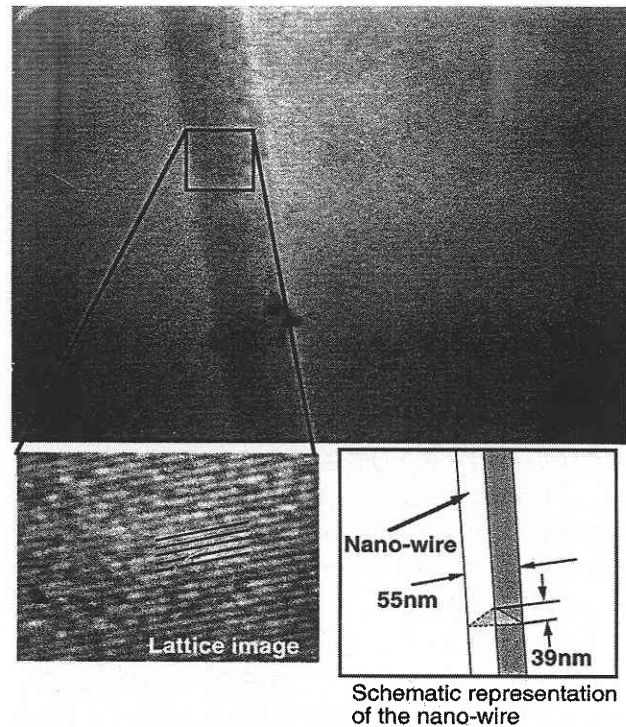


図5 ナノワイヤの電子顕微鏡写真

#### Twin nano probe in TEM

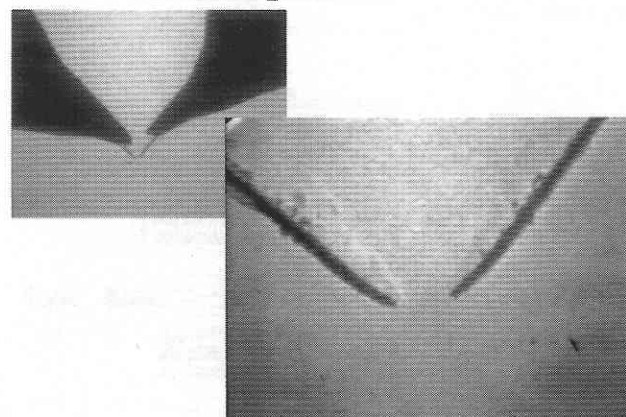


図6 2本のナノプローブ (太さ200 nm)

ようにこれを2本、ちょうど触角のようにつくることを試みました。こういう構造がありますと半導体のナノ構造のような非常に微視的な要素に対して2本のプローブを近づけて電気的な特性等を計ることができます。それからこのプローブの間に、例えば鎖状の分子をトラップして、単一の分子の評価をすることも期待できます。実はまだ最後の工程でプローブの片方が折れてしまって、完全なものできていないのですが、280ナノメートルの細さの針を2本、非常に近接して作れました。これも偶然できたのではなくて、リソグラフィとエッチングをきちんと系統立てて行うことでできる方法を確認しております。こういう研究を進め、いわゆるナノテクノロジー（原子、分子を扱う研究分野）において、マイクロマシンのツールで単独の分子、原子を自由に扱いその性質を明らかにしたり、それを利用することが可能になると期待しています。

さて次に応用の話をして、その中でバイオの応用ということで細胞にDNAを注入するデバイスをご紹介します

5. マイクロマシンの応用

今まで十数年にわたって研究をしていて、モーターが回ったのを皆様にお見せすると、「いったい何に使うの？おもしろいけど、全然役に立たないじゃないか」、という反応される方が多かったです。実際は既に、身近な製品が販売されています。例えば皆さん持っていらっしゃるインクジェットプリンターのヘッドの部分はマイクロマシンそのものです。プリンターのヘッドは小さなノズルにヒーターなりピエゾ素子のアクチュエータなりが付いていて、それを1000個以上も並べたアレイになっており、そこから微小な液滴を吐き出して、美しいプリントをするわけです。

それから、可動のマイクロミラーを画素の分だけ並べ、それを動かして光を反射し投射型のディスプレイを実現するマイクロミラーアレイ・デバイスというのも売られてお

ります。また光通信用のスイッチであるとか、エアバック用の加速度センサー、圧力センサーなどの各種センサー、そういうものがたくさん売られています。それから、すぐにでも市販されると思われるものにマイクロマシンを組み込んだハードディスク装置、化学分析用のマイクロマシンチップ、などが目白押しで実用化を待っているのが実情です。この後のお話でも、より詳細な紹介をいただけたと思います。

マイクロマシンの応用を考えるときに、ここを押さえるという応用分野が見つかるいくつかのポイントがあります。まず小さくすることに意味がないとだめです。携帯にも象徴されるように、小さいことが良い場合は多いです。それから、電子部品、光部品と一緒に使ってメリットを出すことも大切です。単体でモーターがまわっても、じゃあ何なんだと一笑に付されてしまいます。しかし例えばモーターがレーザーと組み合わせさっていて、レーザーの光をモーターでいろいろの方向にスキャンするといったことができれば意味があります。この意味で、マイクロマシンをいろんなものと一緒につくれることを生かして、システムとしてのメリットが出るような応用を考えていただくのがいいと思います。

これはどちらかというとする側の都合ですが、望むらくは、あまりに大きな力を外に取り出さなくて済むと実現が易いです。医用マイクロロボットが、血管の中を泳いで行って病気を直すというのはなかなかまだ難しいのですが、蚊が吸ったぐらいで血液分析することはできます。また、光を遮ったり、ルートを変えたり、スキャンをしたりとか、情報の細かい記録を読んだり書いたりするとか、バイオ系に応用するとか、こういうところが狙い目ではないかと思います。

私の研究室の大学院の学生、共同研究員、講師の先生とみんなで研究したバイオ関係の応用を紹介します。

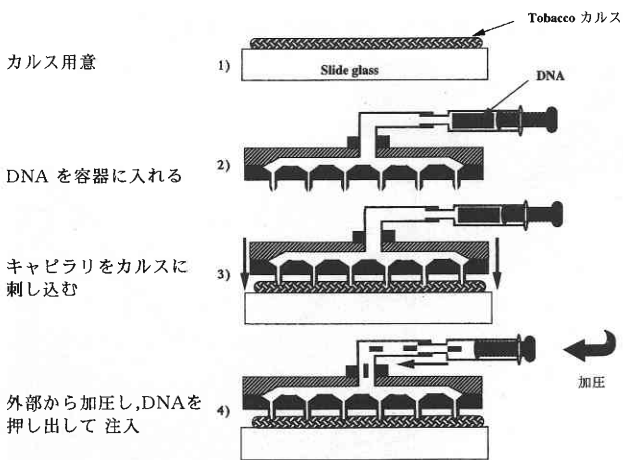


図7

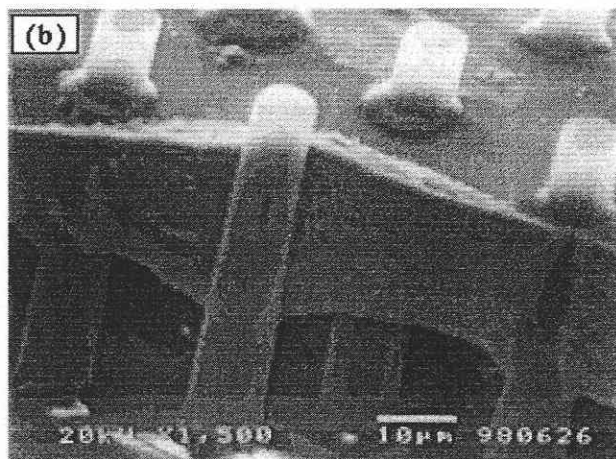


図8

この頃遺伝子操作はあまり流行らなくて、スーパーに行っても遺伝子操作をしていない大豆で作った豆腐とかが高いのによく売れているようです。しかし、悪いことばかりではなくて、逆に農薬を使わなくてすめば、その分残留農薬の問題が減るわけです。遺伝子操作の利点も見てほしいと思います。しかし、いくら遺伝子がうまく操作できても、それを細胞に入れて初めて遺伝子が発現し、有用な蛋白質が生産されたり、細胞の性質を変えたりするわけです。ですから、現状では細胞をガラスのピペットで吸いつけて、もう一本の、非常に細くしたガラスの針を突き刺して遺伝子を入れます。とても小さな細胞を顕微鏡の下でつかまえて刺すという作業ですから、熟達者が、1日300個ぐらいやるともうヘトヘトで、これ以上できないというような大変高度のテクニックを要する作業だったわけです。

図7に示す通り僕らのアイデアは、マイクロマシンでまとめて面倒みようという乱暴なものです。針1本ではなくて、1000本とか10000本とかのアレイをつくって、細胞のかたまり(カルス)に刺してやればまとめて入れられるでしょう。もっといえば、細胞をちゃんと整列して保持し、これと同じピッチの針のアレイを刺せば、細胞への1対1のDNA注入が並列に1000個とか10000個とか同時にできるわけです。

先ほど紹介したディープRIEエッチングやその他の技術を使いまして、図8で示すように高さが30ミクロン、直径5ミクロンの中空針を20ミクロンピッチで剣山のようなアレイにして、これを細胞に突き刺して液を細胞内に注入できるかどうか試しました。

実際の、手順としては、スライドガラスの上に多数の細胞を平らに伸ばしておき中空針のアレイを突き刺しました。アレイの裏側にガラスで空洞を作りそこに注射器を付けて、ここからDNAの入った液を押し込みます。DNAを入れた細胞培養し、DNAがコードするたんぱく質が生産されることを確かめることができました。

## 6. マイクロメカトロニクス国際研究センター

最後に、フランスとの共同研究の話をちょっとだけさせていただきます。日本とフランスをつなぐLIMMSというラボをつくっております。

生研とフランスの国立科学研究センター(CNRS)との共同研究ラボで、大体10人から12人ぐらいのフランスの研究者が2~3年生産研に滞在して一緒に研究をします。フランスのCNRSとしては初めての海外の共同研究ラボであったということです。

生研側はマイクロマシンの製作の基盤技術を持っていますので、それにCNRSのマイクロマシンに対するニーズを足して役に立つ応用を探すのが第一の目的です。

それから学生の国際化も目的の一つです。言わば研究室留学で、研究室に来ればいつも英語をしゃべって外国の方と交流ができる。目標は、「学生が卒業した時、世界のどこでも一流の研究者として通用する」ことです。

こうした活動の実績に基づき、お蔭さまでマイクロメカトロニクスの国際研究センター(Center for International Research on Micromechanics)を2000年4月からつくっていただきました。ヨーロッパを手始めに諸外国にマイクロマシンの研究ネットワークをつくって、相互に交流をすることで、共同の研究を深めていきたい。また、生産研だけではなくて、いろいろな日本の大学、それからヨーロッパもフランスのみならず他の国へも広げていきたいと考えております。

マイクロマシンの基礎と応用、特にバイオ、医用、ナノテクノロジー、光通信等への応用を狙って、2000年4月から10年間、マイクロメカトロニクス国際研究センターができますので、皆様方のご支援・ご指導をお願いしたいと思います。

(了)