

## マイクロマシンとその技術

はじめに

I マイクロマシンの生い立ち

II マイクロマシンを支える技術

III マイクロマシン技術研究開発の現状

IV マイクロマシンの将来

おわりに



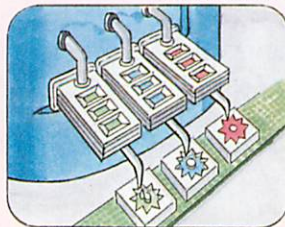
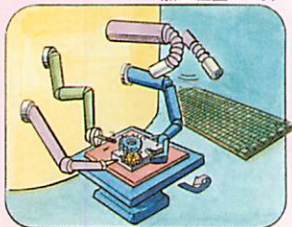
マイクロカー

### 「マイクロファクトリ技術開発」

デスクトップのシステム  
材料合成・加工組立・検査の3ユニット構成

加工組立ユニット

材料合成ユニット



てんとう虫型マイクロアクチュエータ

# マイクロマシンとその技術

## はじめに

マイクロマシンは、微細で複雑な作業を行うために大きさ数mm以下の高度な機能要素から構成された微小な機械で、全体の大きさは数cmから数 $\mu\text{m}$ くらいの範囲に入るものです。

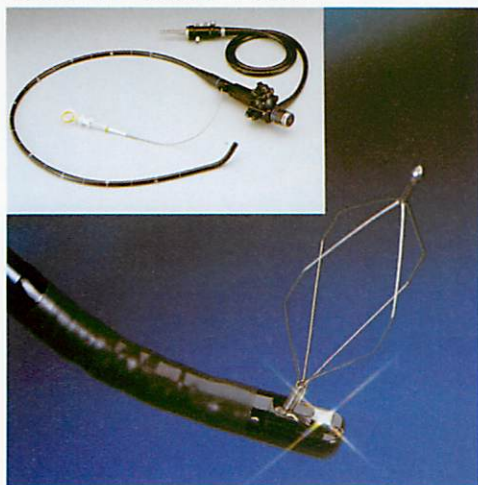
マイクロマシンというと、映画にもなった空想科学小説「ミクロの決死圏」を思い浮かべる人が多いのではないのでしょうか。私たちが夢に描いているマイクロマシンを作る技術は、まだ十分には確立されてはいませんが、最近では、この夢を実現する基礎になる技術がいろいろ開発されてきて、手の届くところにまでできています。マイクロマシン技術を応用して作られたものには、すでに商品化されているものが少なくありません。例えば、自動車のエアバッグシステムに使われている加速度センサ、パソコン用プリンタの印字ヘッドなど、意外と身近にあるのです。

マイクロマシンは、産業分野だけではなく医療の分野にも応用されています。内視鏡というのを知っていますか？内視鏡は、身体の中に挿入する長いチューブ状の医療器具で、患部を観察するだけでなく検査や手術を行なう機能を持っています。管の直径は、先端部分で2mm以下のものもあ

ります。口から挿入し胆管や胆のうを検査したり、胆管結石を取るなどの実際の治療に使用されています。写真1は、十二指腸用の内視鏡の例です。先端部は直径12mmで、自由に曲がり、病変部を切り取る機能をもっています。内視鏡が実用化されるまでは写真2にあるようないくつもの手術用器具を使ってお腹を切り開いて手術をしていました。内視鏡だとお腹に小さな穴を開けたり、口などから挿入したりして手術をするので、入院も必要ないことがあります。もちろん全ての手術が内視鏡で行えるわけではありませんが、このような細かい内視鏡の先に検査や治療に必要な機能を持たせるためにも、マイクロマシンの技術が役立っているのです。

マイクロマシン技術の開発は、まだ始まったばかりですが、人類の役に立つ多くの可能性が秘められています。しかし、なんでもかんでも小さくなれば良いというものではありません。人間が手や指で操作する道具には、適度な大きさが必要ですが、マイクロ化することにより多くの機能を持った部品を組み込むことが可能になり便利な道具になることは確かです。マイクロマシンが実用化されると、私たちの生活は、もっと快適なものになるでしょう。また、小さいためにエネルギーの消費が少なく、地球環境を守ることにもなるのです。

写真1 十二指腸用の内視鏡



提供：オリンパス光学工業株

写真2 手術用器具





# I マイクロマシンの生い立ち

## 1 マイクロな世界

山へ行き、澄み切った夜空に瞬く銀河を天体望遠鏡で眺めると、私たちがその上で生活を営んでいる地球がいかに小さいものかを思い知らされ、宇宙の広大さに感動することでしょう。

実は、私たちの身の回りにも小さな宇宙がたくさんあるのです。例えば、私たちの身の回りには、蠅や蟻などの昆虫はおおよそ1~10mmの世界に住んでいます。1mm以下はノミやダニの世界です。また、蠅の眼は複眼ですが、その大きさはおおよそ500 $\mu$ m（マイクロメートルまたはミクロンと読む）であり、一つ一つの眼は10 $\mu$ mです。

ここで長さの単位を整理してみましょう。1mmは1mの千分の1です。この1mmの千分の1、つまり1mの百万分の1が1 $\mu$ mです。さらに、1 $\mu$ mの千分の1、つまり1mの十億分の1が1nm（ナノメートル）と呼ばれます。図表1は大きさを1/10ごとにとった物差しと、その大きさの比較対象物の例としてどのようなものがあるかを

示したものです。

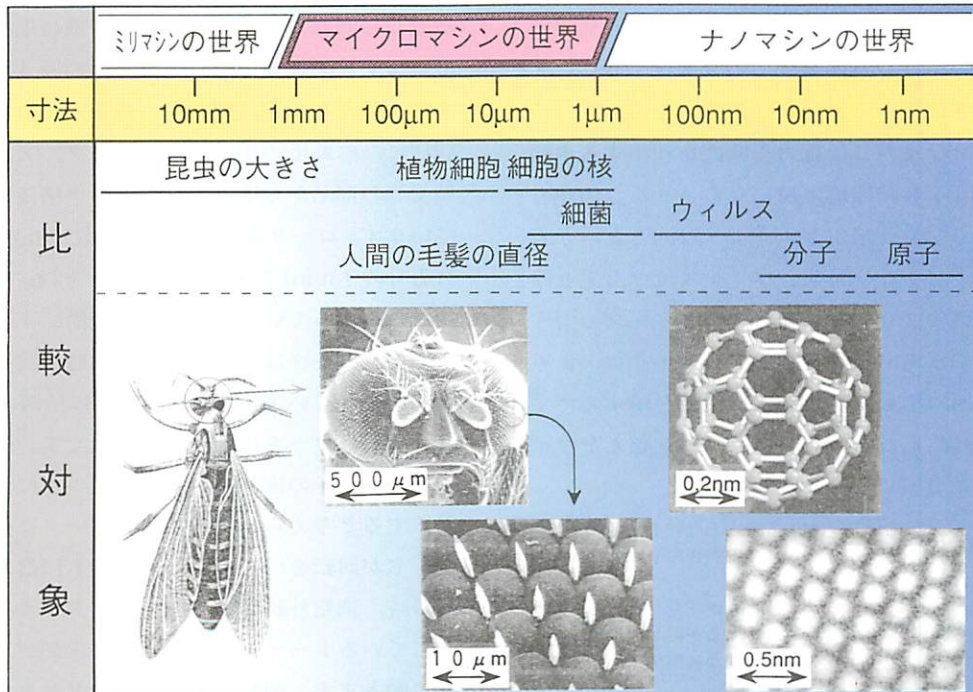
人間の髪の毛の直径も10~100 $\mu$ mの大きさです。1 $\mu$ m以下の生物はバクテリアやウイルスのようなものです。そしてナノメートルの大きさになると、分子や原子そのものの領域となってきます。

大きさの比較でいうと、太陽と月との大きさの比はクジラとネズミとの大きさの比とほぼ同じです。そしてこの比は、ノミとアメーバやタンパク質分子と原子との大きさの比とも同じなのです。

では、蠅や蟻、ノミなどが住んでいる世界とは一体どのようなものなのでしょうか。象がいくらジャンプしたとしても、ノミよりは高く飛びません（図表2）。また、雲から落ちてくる雨の粒は直径約5mmより大きくはなりません。どうやら小さい世界には特有の現象や仕組みがあるようです。

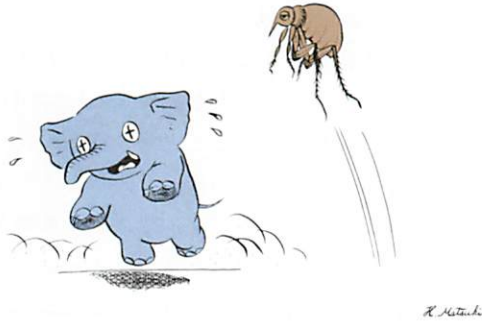
私たちが暮らしている世界では重力の影響を強く受けます。私たちは忍者のように水の上を歩くことはできませんし、スーパーマンのように空を飛ぶこともできません。しかし、アメンボウは

図表1 マイクロマシンの世界



池の上をスイスイと歩きます(図表3)。小さくなると重力の影響が小さくなるのです。マイクロな世界では重力に代わって、摩擦や表面張力<sup>注1</sup>、さらにはブラウン運動<sup>注2</sup>などの分子の振動などが大きな影響力を及ぼし始めます。そして最終的には電磁気力が重力にとって代わります。

図表2 象とノミのジャンプくらべ



ノミよりも小さな生物は、その形が球に近づいていきます。なぜでしょうか？球は最も単純で最も表面積が小さい形状です。つまり、体が小さくなるにつれて主に表面張力の重要性が増してくるのです。小さな蝇や蚊は空を飛ぶことのできる最小の生き物でしょう。彼らの重さはその表面積に比べればほとんどゼロに等しいといえます。そして、彼らはチリやホコリ、さらには酸素や窒素や水蒸気などが轟々と渦巻く中を飛んでいるに違いありません。私たち人間にとってほとんど無視できる空気の粘性や気体分子との摩擦は、彼らにとってはまさに生きるか死ぬかの問題なのです。

マイクロな世界では重力や摩擦を利用する車輪や足のような移動機構は役に立ちません。体がもっと小さくなると飛ぶというよりは泳ぐという表現の方が正しくなります。ウィルスはべん毛と呼ばれる一種のプロペラを回してマヨネーズのように粘りつく水の中を移動します。マイクロの世界では、普通の水もねばねばした性質を示すのです。

この様に、私たちの身近にも想像を超えたマイクロの世界が広がっているのです。

注1 液体または固体が自ら収縮してできるだけ小さな面積になろうとする力。表面付近の分子層と内部の分子層のエネルギーの違いによって生じる。

注2 1827年イギリスの植物学者ブラウンが発見した微粒子が示す一見不規則な運動。水中に浮遊する花粉から発見。微粒子に液体または気体の分子が各方向から無秩序に衝突することによって起きる。

図表3 忍者とアメンボウ



## 2 自然界でみられる小さな機構

自然界には、鯨から細菌まで、おびただしい種類の生き物が生活しています。彼らの体のつくりは、長い進化の歴史の中で、その生活環境に最も適した構造になっています。従って、マイクロマシンについて考える際に、特に小さな生き物の微小で精巧な構造を観察することは、大変良い勉強になります。ここでは、細菌、蝶、蚊の3種類の生き物について、その体の仕組みや動き方をみてみましょう。

顕微鏡でみると、細菌がたえず方向転換しながら、水中を自由に泳ぎまわる様子が観察できます。細菌は流体の中を泳ぐ際に、べん毛と呼ばれる左巻きのらせん状のフィラメントを根元から回転させることにより、前に進む力を得ています。図表4にべん毛モータの模式図を示します。私たちが普段使っている電磁式のモータと同様に、べん毛の根元には、ロータ、ステータ、軸受等の部品から構成されるモータ構造が存在しています。ロータ部分の直径は、数10nm(1nmは百万分の1mm)です。べん毛モータは、生物界で現在みついている唯一の回転機構です。

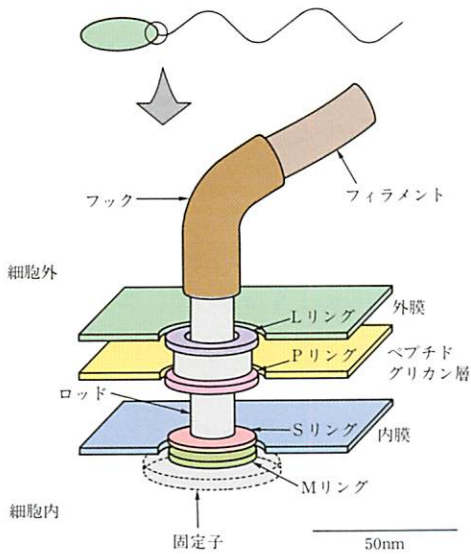
べん毛モータは、細胞内膜と細胞外膜を貫通して形成されています。細胞内膜上に位置するM/Sリングが、ロータに相当する部分です。細胞膜を通過する陽子の流れを力学的エネルギーに変換して回転すると考えられています。ロータに結合したロッドが回転をべん毛フィラメントに伝えます。その時、細胞外膜およびペプチドグリカン層に結合しているドーナツ状のL/Pリングが、軸受として働きます。細胞外には、ロッドとフィラメン



トをつなぐフックがあり、自在継ぎ手としての役目をします。べん毛の最高回転速度は1秒間に約250回転です。家庭にある扇風機を「強」で回しても1秒間に20回転くらいですから、べん毛の回転がいかにか速いかがわかります。しかも、泳ぐ方向を一瞬にして変えるために、千分の1秒という短い時間の中に、一時停止や回転方向の切り替えをしています。人間の目にみえないほどの小さなバクテリアの中に、人間にはとうてい作れないような精密で高性能な機械が内蔵されているのです。

次に、空気中を飛ぶ昆虫の中で、チョウの羽ばたきについて考えてみましょう。チョウは、体の大きさに比べて羽根の面積が大きく、また羽ばたきの数も小さいので、ゆっくり飛びます。1回ご

図表4 ベン毛モータの模式図



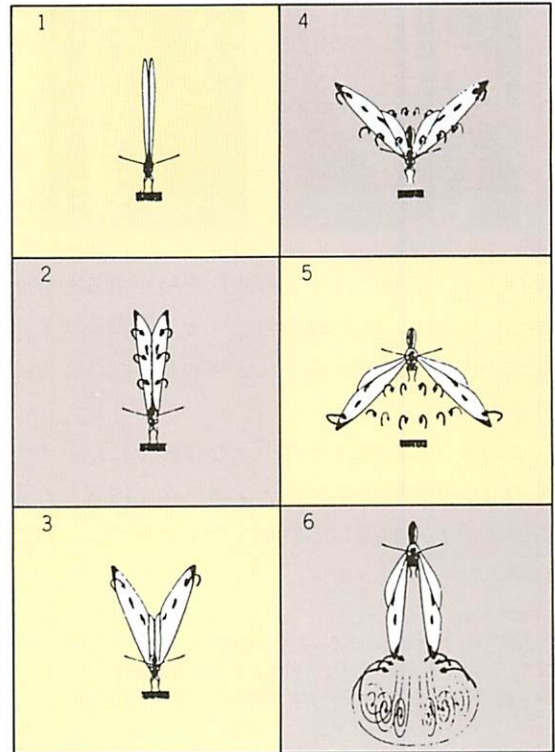
との羽ばたきで揚力（体を浮かす力）が増減し、ひらひらと上下に動いているのが目でもわかります。代表的なチョウとして、アゲハの形を図表5に示します。前羽根、後羽根を合わせた形は、扇子を左右に2枚横に拡げた格好になっています。チョウは他の昆虫と比べて、ヘリコプターのように空中で停止するホバリングや、それに近い低速飛行が得意です。鳥やトンボと比べて幅が小さく前後に拡がった羽根を、大きく上下に羽ばたくことに特色があります。羽根をすぼめて止まっていたチョウが、まっすぐ上に飛び立つ際の羽根の打

ます。羽ばたきを繰り返すことによって、揚力を得ることができます。チョウは漂うように飛ぶのに便利な羽根を持っているため、風の強いときにはそれに乗ってかなり遠くに飛ぶことができます。このように、チョウの小さな体の中には、より少ない力でより遠くへ飛ぶための仕組みと知恵が秘められています。

図表5 アゲハチョウの平面図



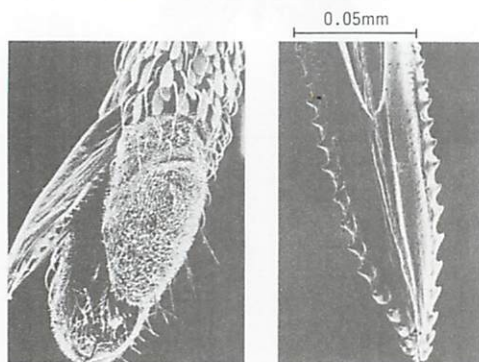
図表6 チョウの羽ばたき打下ろし (Kingsolver, 1985)



最後は、同じ昆虫でも人間の血を吸う蚊です。蚊の羽ばたきは1秒間に800回と実に速く、これがあの耳障りなブーンという音になります。ここでは、蚊の吸血機構について調べてみましょう。蚊は、温度と炭酸ガスを検出する化学センサを持っており、人間の体温や吐く息に含まれる炭酸ガスを狙って、人に集まってきます。足の裏には超音波センサがあるといわれており、皮膚の下のだ

の部分に血管があるかをこれで探索します。血管を探り当てると、その部分に足をふんばり、全身の体重をその口吻（蚊の吸血針のこと）にかけて、皮膚に差し込みます。口吻の内部には一対のノコギリ（吻針）が仕込まれており、これを振動させて皮膚を切開しますが、太さは約0.05mmですから注射針と違って痛みはありません。口吻と吻針の写真を、写真3に示します。ノコギリの先端が血液に触れると、その内側から吸血管を差し込み、強力な筋肉吸血ポンプにより、血管内の血を吸い

写真3 蚊の針（口吻）にはノコギリがついている（左は吻の先端、右は吻針）



（レナード・ニルソン：クローズアップネイチャー66頁より）

上げます。全身には空気の流れを検知するセンサがついており、人が蚊を叩こうと手を動かすと、空気の流れの変化からそれを察知して、さっと逃げます。

このように、蚊はその小さな体の中に、いくつものセンサや強力なアクチュエータを内蔵した複合システムを形成しており、マイクロマシンの良い見本になっています。

【参考文献】  
相沢慎一「分子機械とべん毛モータ」日本機械学会誌, 94, 872(1991), 566  
東昭「生物・その素晴らしい動き」共立出版(1986)  
藤正巖「驚異の医療機械マイクロマシン」講談社(1990)

### 3 微細化の流れ

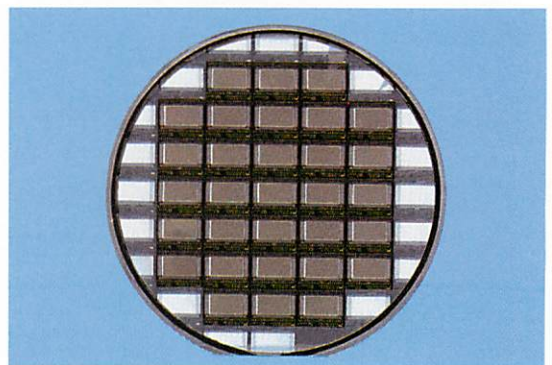
パソコンやワープロ、テレビゲームの中をのぞいてみると、そこには、プラスチック製の黒くて四角い板のようなものが、何個も置いてあるのがみえるはずですが。これは、LSI（大規模集積回路）と呼ばれ、この中のチップの上には、たくさんの電子部品を集めたものが入っています。チップの大きさは、親指の爪ぐらいですが、これには数千

万個もの電子部品が作り込まれていて、テレビゲームを例にすれば、画面上に絵を描くための計算をしたり、パスワードや得点をおぼえておくのに使われています。現在、最も進んだLSIでは、1秒間に数千万回の計算をすることができるのです。

LSIの歴史は、1947年のトランジスタの発明に始まります。これはゲルマニウムという半導体材料を用いたもので、それまでの真空管は親指ぐらいの大きさでしたが、それがトランジスタでは、小指の先ぐらいの金属の管に収めることができるようになりました。その後、半導体の材料がゲルマニウムからシリコンに変わりました。これは、ゲルマニウムのトランジスタでは、温度が50℃程度に上昇すると、電気的な動作が不安定になってしまうからです。

このシリコンが使えるようになったおかげで、同じチップの上に、たくさんのトランジスタと一緒に作り、それらを金属の配線で結ぼうという考えが実現されました。シリコンがそれを可能にした理由のひとつは、シリコンが酸素と結合してできたシリコン酸化膜がトランジスタの製作に応用できたからです。シリコン酸化膜は、シリコンの基板（薄い円板のようなもので、ウエハと呼ばれる）を、1000℃程度の高温の酸素ガス中に置くだけで、表面にできます。この酸化膜の一部を表面から取り除いて、この中にトランジスタを作り、

写真4 シリコンウエハ



それぞれのトランジスタを配線でつなぐことで、電気回路をシリコンウエハの上にたくさん作ることができます。写真4はシリコンウエハ上に31個のLSIを作った例です。

ウエハ上に作るトランジスタの大きさは、電気

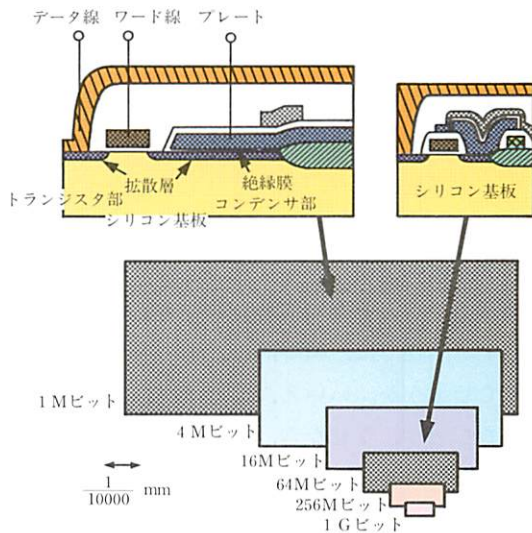


を通す配線の幅で決まります。幅が小さいほどトランジスタも小さくなり、たくさんのトランジスタをウエハ上に作る事ができるのです。1個のチップ上にたくさんのトランジスタを作れることを、集積化るといい、トランジスタの数が増えることを、集積度が向上するといいます。

メモリを例に集積化の歩みを紹介しましょう。メモリとはおぼえておく（記憶）という意味で、文字通り文字や数を記憶しておくためのLSIです。コンピュータの内部では、文字や数や色などの情報は、1と0の二つの数字として扱われています。このため、メモリLSIでは、電気があるかないかによって、1と0とを区別するのです。そのメモリを割ってみると、図表7のような断面になっており、前に説明したシリコンウエハの上に、幾つかの配線が作られています。そして、その配線の幅が小さくなることで、メモリの面積（図表7に示した長方形はメモリ1個の面積を示している）がだんだん小さくなり、集積度が大きくなってきました。図表7では、1か0を百万個記憶できるもの（1Mビットといいます。Mはメガと読み、百万を意味します。ビットは、1か0を記憶する最小の単位です）と、現在の6千4百万個記憶できるもの（64Mビット）の断面を示しています。また、面積の変化では、10億個記憶できるもの（1ギガ(G)ビットといいます）で示してありますが、非常に小さくなっているのが良くわかるでしょう。

この6千4百万個記憶できるものは、新聞だと200ページ以上の情報を蓄えることができます。ここで使われている配線の幅は0.3ミクロン（一万分の3ミリ）という肉眼ではみることのできない寸法です。髪の毛の太さが100ミクロン程度ですので、髪の毛を3百分の1にしたくらい細い配線でトランジスタが作られているのです。このような集積度の向上はこれからも続くと予想され、21世紀が始まるころには、0.1ミクロンの配線を使ったLSIが使われていると考えられています。そうすると、コンピュータはもっと小さく、もっと高性能になり、また、世界中の人と言葉の壁を越えて、自由に話ができる装置などが登場するものと期待されているのです。

図表7 メモリの断面と大きさの比較



## 4 大きな機械と小さな機械

### 「機械の大きさはなぜ違うの?」

私たち人間が使う機械には、様々な大きさのものがああります。例えば、大きなものでは、ビルの建築現場で鉄骨を持ち上げるのに使われているクレーンや大空を飛びジャンボジェット機などがあります。また、小さなものでは、腕時計がその代表といえるでしょう。

機械の大きさを決める主な要因は、2つあります。第1の要因は、それぞれの機械が使われる目的になかった大きさに作られているということです。大きなものを扱う機械は大きく、人間が持ち運びたい機械は適度に小さく作ってあり、それぞれ私たちが最も使いやすい大きさになっています。第2の要因は、私たちが加工できる大きさで決まっているということです。

この2つの要因について、時計を例にとって考えてみましょう。機械式の時計が出現したのは、西暦1300年頃です。当時の時計は、高さが3mもあり、重りが下がる力によって動いていたため、持ち歩けるものではありませんでした。人々には、時計を持ち歩きたいという要求はありましたが、小さい部品を作る技術がなかったからです。つまり、当時の時計の大きさは、第2の要因によって決まっていたのです。時計を持ち運べるようにするには、1つ1つの部品を小さく作ることが必要

です。また、持ち歩いても止まらない工夫も必要です。これらのことが解決されて、持ち運べる時計として携帯時計ができあがりました。そしてそれはより便利な形をめざして腕時計へと変わっていったのです。はじめの頃の携帯時計は、重く、厚く、よく遅れたり、進んだりしました。今の腕時計は、軽く、薄く遅れや進みもほんの少しです。これなら便利だなとみんなが思う時計を作る技術ができたからこそ今の腕時計ができあがっているのです。それでは、腕時計は、もっと小さく薄くなるのでしょうか。いいえ、もうこれ以上にはならないでしょう。なぜなら、今でも十分に薄く邪魔にならない大きさになっていますし、これ以上薄くしたり、小さくしたりすぐ曲がってしまうとか、みにくくなってかえって不便になるからです。現在の腕時計は、最も使いやすい大きさになっているのです。つまり、腕時計の大きさは、第1の要因で決まっているのです。

#### 「腕時計より小さい機械はいらないの?」

それでは、腕時計より小さな機械は必要ないのでしょうか。けっしてそんなことはありません。私たちが暮らしていく中で、小さな機械がきつと役に立つと考えられることがたくさんあります。もっと小さくないと非常に不便であるとか、役に立たないとかいう機械がたくさんあります。また、まだ完全ではありませんが、このような小さな機械を作れそうな技術も少しずつできてきました。こうして生まれてきたのがマイクロマシンと呼ばれる小さな機械です。マイクロマシンというのは非常に小さな役に立つ機械という意味です。そして、その大きさは、どれくらいかというとはっきりと決められているわけではありませんが、10mmより小さい大きさとするのが一般的です。例えば、「はじめに」でお話しした内視鏡です。体の中に入って仕事をするためにはできるだけ小さくなければいけません。また、人の手が届かないところへ入って行って働く機械も、あったらいいと思われる機械（マイクロマシン）の一つです。もし、タンスと壁の間に100円玉を落としてしまったら、どうしますか。きつと細い棒を使って取り出すことでしょう。あるいは、タンスを動かして

拾うかもしれません。しかし、どちらにしても取り出すまでには大変苦労しそうです。ここで、この狭い隙間に入って行って100円玉を取り出してくれる機械があったらどんなに便利でしょう。こういう仕事をしてくれるのがマイクロマシンなのです。

#### 「マイクロマシンはもうできているの?」

残念ながら、まだ、便利で役に立つマイクロマシンは実用化されていません。しかし、役に立つマイクロマシンをめざして、様々な研究が行なわれているので、そのいくつかを紹介しましょう。

写真5に示したものは、「マイクロこけし」です。これは、東京大学の佐藤知正教授らによって作られたもので、シャープペンシルの芯(太さ0.5mm)を材料として削って作ったものです。もちろん、手で削ったのではすぐに芯が折れたり細かなところが削れません。芯を折らずに細かな作業ができる特別な機械を作ったからできたものです。

写真5 マイクロこけし (直径は0.2mm)



提供：東京大学佐藤知正教授

写真6に示したものは、「マイクロカー」です。もちろん、人間が乗るものではありません。大きさは、米粒ぐらいの大きさです。小さくなくても車は、同じように車輪で走ることができるか、どこまで小さく作ることができるかなどをためすために作られました。

写真7に示したものは、「マイクロ走行ロボット」です。大きさは1cmです。手元の操作により、前後左右に思いのままに動かすことができます。

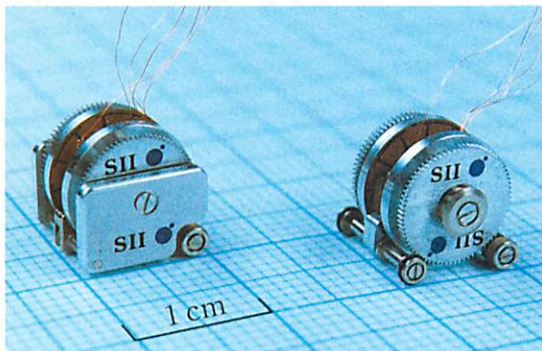


写真6 マイクロカー (まわりの白いものは米粒)



提供：日本電装（株）

写真7 マイクロ走行ロボット



提供：セイコー電子工業（株）

## II マイクロマシンを支える技術

### 1 マイクロマシンを作る技術

マイクロマシンは寸法が数100 $\mu\text{m}$ から数 $\mu\text{m}$ 程度の多数の微小部品で作られます。このような微小部品を加工したり、組み立てたりする技術について、現在は、いろいろな新しい方法が研究されている段階です。

これらのいくつかを微細加工技術と組立技術にわけて紹介しましょう。

#### (1) 微細加工技術

##### ①シリコンプロセス

厚さが200~300 $\mu\text{m}$ の単結晶シリコンの板（シリコンウエハと呼びます）の上に集積回路(IC)を作るために開発された加工法で、ICプロセスとも呼ばれています。1987年に、この方法を応用して直径125 $\mu\text{m}$ のマイクロ歯車を製作したことが、マイクロマシン誕生の発端になりました。

この加工法は、3種類の化学的処理を組み合わせたものです。

##### (a) 光リソグラフィ

感光性樹脂（レジスト）を一様な厚さで塗布したシリコンウエハの表面に、作りたい図形を描いたマスクを通して光を照射し、現像処理して図形を焼き付ける方法

##### (b) エッチング

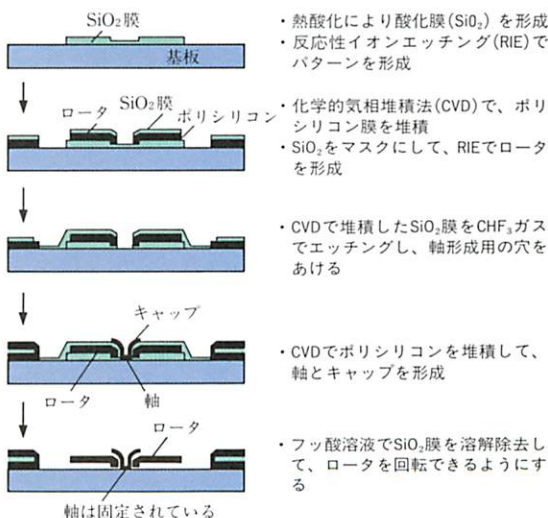
反応性の溶液やガスによって、ウエハ上で露出している特定材質だけを溶かして取り除く方法

##### (c) デポジション

ウエハ上でガスや液体を反応させ、特定の物質を取り出して堆積させる方法

図表8はこの加工法によってロータと軸受からなる回転機構を製作する手順の例を示したものです。この方法は、ウエハの平面上へ図形を投影して部品を作るため、球体やスクルーのような立体的な部品の製作には適していません。

図表8 シリコンプロセスの例



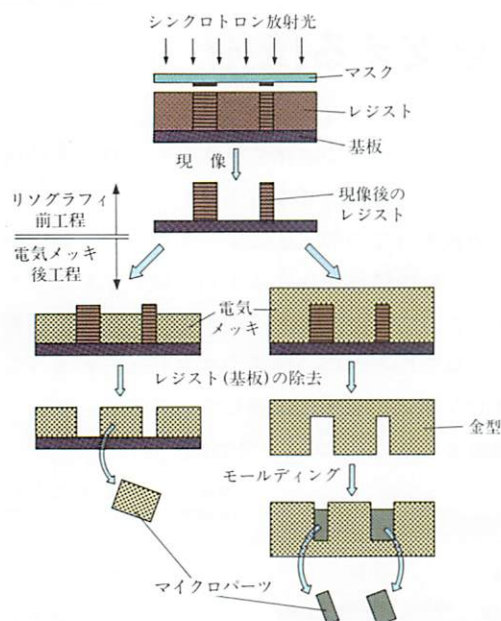
##### ②LIGAプロセス

これはドイツのカーlsruhe原子核研究所が開発した微細加工法で、名称はドイツ語Lithographie Galvanoformung Abformungの頭文字から採られ、「リソグラフィ」、「電気メッキ」、「プラスチック成型」による加工を意味します。そし

て、図表9に示すように、この3つの工程で構成されています。

この加工法は、波長の極めて短いX線をリソグラフィで使い、数100 $\mu\text{m}$ を越える厚いレジストを感光させて作ります。さらに、これに電気メッキを組み合わせ、プラスチック成型用の金型を作り、微小部品が量産できるようにしました。厚みのある部品を作ることができますが、リソグラフィで平面に図形を投射することから、部品の形状は平面的なものに限られています。

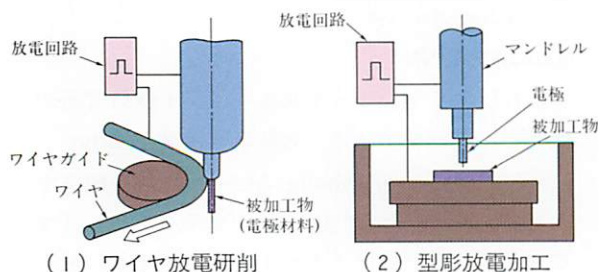
図表9 LIGAプロセスの例



### ③放電加工

電極と加工したい材料との間で放電させ、材料の表面を局部的に溶かし、飛散させて取り除く加工法です。図表10はその加工法の概略を示しています。細い金属線を送りながら材料との間で放電させるワイヤ放電研削と、これにより製作した微細電極を使う型彫放電加工を組み合わせます。

図表10 マイクロ放電加工



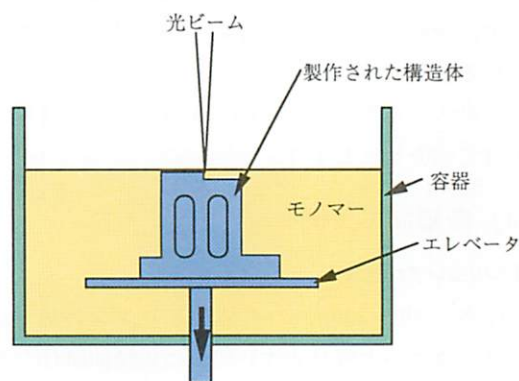
この放電加工法は、3次元の微細形状を自由に作ることができ、導電性の材料なら材質に関係なく加工できるなどの特徴があり、量産する方法も開発されています。

### ④ビーム加工

レーザービームなどを材料に照射し、その表面を局部的に取り除くなどして微細構造体を作る加工法の総称です。ビーム加工法では3次元の微細形状を作ることができますが、その反面、原理的に量産加工に適していません。

図表11はレーザービームを使う光造形法の例を示しています。光を照射すると反応を起こし硬化するモノマー（液体）を容器に入れ、液面下にテーブルを置いてレーザービームで図形を描き、モノマーを硬化させます。テーブルをわずかに下降させては同様な操作を繰り返すと固化された立体形状が出来上がります。

図表11 光造形法



## (2) 組立技術

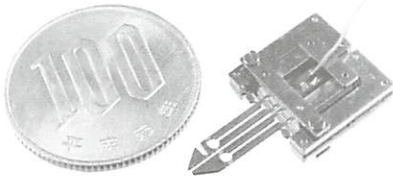
### ①マニピュレーション

微小部品を組み立てるには、それを掴んで運ぶ操作が必要です。しかし、私たちが指で感じることができるような力で、数 $\mu\text{m}$ の部品をピンセットなどで掴もうとすると簡単に壊れてしまいます。

微小部品を取り扱う機械をマイクロマニピュレータといいます。マイクロマシンの組立に使うためには、人間の手のように自由に動き、掴む力を微妙に調節できる機能などが必要です。現在、微小部品を掴むためのマイクログリッパ（写真8）や人間の手の動きに近い動作をするマイクロマニピュレータなどが開発されつつあります。



写真8 マイクログリッパ



### ②接合

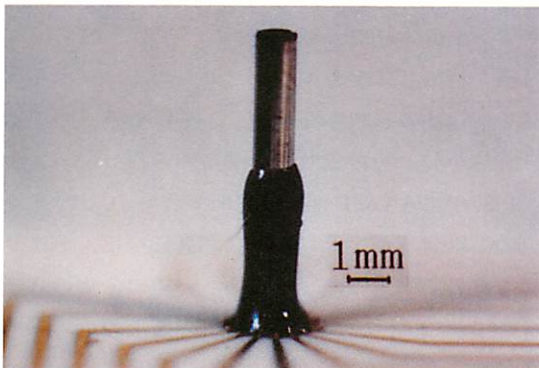
部品が小さくなると、組み立てるのにネジで止めることが難しくなります。そこで、微量の接着剤を使ったり、接合面を分子レベルで平滑にして接着剤なしで接合したりする方法が研究されています。

## 2 研究開発事例

### ①マイクロアクチュエータ

マイクロマシンを動かすにはとても小さなモータ（マイクロアクチュエータと呼びます）が必要になります。私たちが日常みかけるモータのほとんどは電磁力で動かす方式ですが、マイクロアクチュエータについてはいろいろな原理を使ったものが研究開発されつつあります。写真9は静電力で駆動されるアクチュエータの開発例です。回転軸の直径は1mmで、最高毎分100回転します。

写真9 開発例1：マイクロウォブルモータ

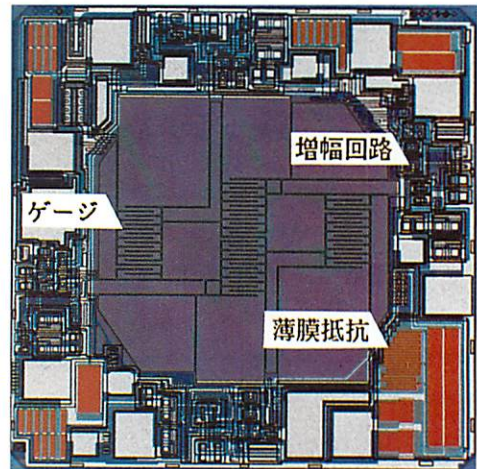


提供：松下技研（株）

### ②マイクロセンサ

シリコンプロセスで製作した各種のマイクロメカニカルセンサ（微小可動部の変形や振動から圧力、力、振動数などを検出する）、ガスセンサ、イオンセンサ、バイオセンサが開発されています。写真10は圧力センサデバイスの開発例を示しており、センサ部分とそのデータを処理するIC部分がシリコン基板上で一体製作されています。

写真10 開発例2：IC一体型半導体圧力センサ



提供：日本電装（株）

### ③マイクロ機構

とても小さな範囲で動かすマイクロ機構は、大きな機械のそれとはかなり異なったものになるだろうと考えられています。写真11はシリコンプロセスで製作した人工蟻を示しており、この蟻は外部の振動に共振して任意の方向に動く機構を持っています。

### ④マイクロフォトセル

マイクロマシンが独立して動くためには、できることなら電線をつながないで動力を供給したいものです。写真12はこれを実現するために開発されたマイクロフォトセル（太陽電池）を搭載したマイクロアクチュエータを示しています。これは外部から光を照射するだけで走らせることができます。

写真11 開発例3：人工蟻

提供：東京大学 下山勲助教授  
安田隆助手

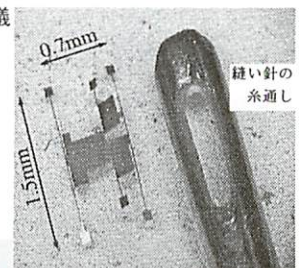
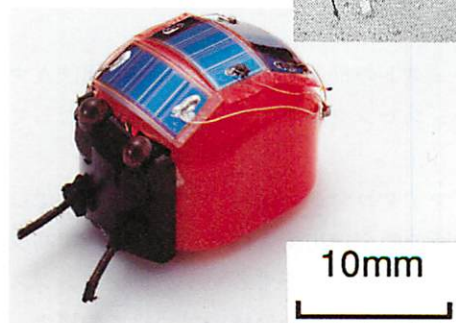


写真12 開発例4：  
マイクロアクチュエータ



提供：三洋電機（株）

# Ⅲ マイクロマシン技術研究開発の現状

## 1 日本のマイクロマシン技術研究

日本におけるマイクロマシン技術の研究開発は主要な大学、国立研究所および多くの企業で盛んに行われています。大学では機械工学・精密工学等を主体とした微小機械への取り組み、電子工学を主体とした半導体技術からの取り組みが特に盛んです。また、名古屋大学ではマイクロシステム工学専攻というマイクロマシンの研究を行う大学院の学科が1994年に世界で初めてできました。

国立研究所と多くの企業が、通商産業省工業技術院の産業科学技術プロジェクト「マイクロマシン技術」に参加し、精力的に世界に先駆けた研究を行っています。このプロジェクトは、平成3年から10年計画、総額250億円の研究開発費で行われており、研究には3つの国立研究所（工業技術院の機械技術研究所、電子技術総合研究所、計量研究所）と国内24の企業・団体、海外の2つの企業・団体と1大学が参加し大規模な研究が行われています。

日本のプロジェクトにおけるマイクロマシン技術は、機械加工技術を応用し、機械構造のマイクロ化を図り、エレクトロニクスとの複合化を行なおうとする研究開発が中心で、最近の成果には著しいものがあります。マイクロ放電加工による直径30 $\mu\text{m}$ の微細穴加工や、先端部分の直径が4.3 $\mu\text{m}$ の微細軸の製作等が報告されています。機械的加工でも直径20 $\mu\text{m}$ の穴明け加工や厚さ1 $\mu\text{m}$ の超薄板加工が可能になっています。LIGAプロセスで作製した30 $\mu\text{m}$ 角の柱などの加工も実現しています。

プロジェクトの推進にあたっては、財団法人マイクロマシンセンターが中心的な役割を果たしています。

この「マイクロマシン技術」プロジェクトでは、(i)発電所の熱交換用配管内などの狭い所で高度な検査・補修作業をするマイクロマシンシステムを実現するための技術についての研究

(ii)小型工業製品の製造工程のマイクロ化により省エネルギーを図るために、製造工程で使用される各種のマイクロ機械装置およびシステム（マイクロファクトリ）を組み立てるのに必要な技術についての研究

(iii)病気の診断や手術の際に人体を傷つけることをできる限り少なくするために、身体の中の診断・治療システムに必要な技術についての研究を行っています。

## 2 海外のマイクロマシン技術研究

海外においてもマイクロマシンの研究は盛んに行われています。中でも、アメリカ、欧州では、多くの大学、国立研究所等の公的研究機関を中心に精力的な研究が行われ、幾つかの国家プロジェクトも進められています。日本におけるマイクロマシン技術は、機械加工技術を応用した研究開発が中心ですが、海外は異なった方向で研究開発が進められています。

アメリカは半導体製造技術を応用した微細加工技術によるセンサ、アクチュエータの研究が盛んです。半導体(IC)の製造技術のうち、写真の転写技術を利用して半導体のシリコンの上に細かな部品や構造体の形状を写し撮り、現像して不要部分を溶かし、複雑で微細な構造体を作っています。

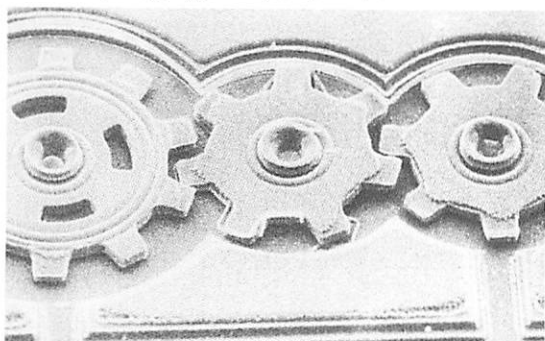
1987年にAT&Tベル研究所で作られたシリコンの歯車列（ギアトレイン 写真13）は、あまりにも有名です。この写真の小さい方の歯車の直径はわずか125ミクロンで、髪の毛の断面程度の大きさです。

欧州では、ドイツ、フランス、スイス、イギリスで研究が盛んです。アメリカと同様に半導体製造技術を利用したマイクロマシン技術が中心ですが、特定の用途に使うことを目的としたシステム研究が国家プロジェクトとして始まっています。

ドイツでは強力なエックス線を利用した独自の微細加工技術が開発されました。カールスルーエ原子核研究所では、広がり少ない強力なエック



写真13 多結晶シリコンで作った直径125～185 $\mu$ m、厚さ約4 $\mu$ mのギアトレイン



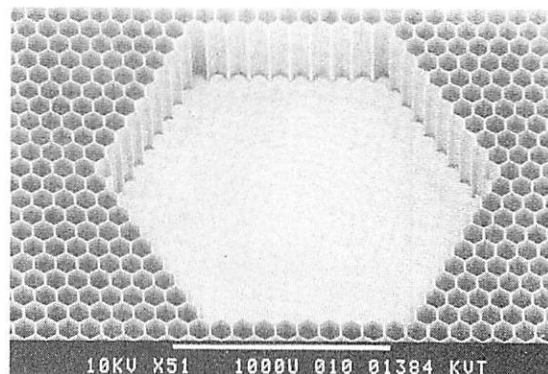
(藤田博之 マイクロマシンの世界 p14 (株) 工業調査会)

ス線を用いた転写技術により、これまで不可能だった厚さのある構造体を製作することを可能にしました。写真14はその一例で、フィルターに使える蜂の巣の形をした構造体です。この微細構造体を用いてマイクロフィルター、マイクロ熱交換器などを作っています。

ドイツ、スイス、フランスでは、マイクロセン

サとマイクロインジェクタ等を組み合わせ、人体に埋め込む医療機器の開発を目指しています。例えば、糖尿病患者の体内に入れ、血糖値をセンサで測定して最適な量のインシュリンを投与するシステムなどが考案されており、大きな期待が持たれています。

写真14 X線リソグラフィによる厚みのある蜂の巣構造



(藤田博之 マイクロマシンの世界 p29 (株) 工業調査会)

## IV マイクロマシンの将来

マイクロマシンは、将来どのように私たちの生活と係わってくるのでしょうか。マイクロマシンは様々な分野での活躍が期待されていますが、ここでは、産業分野と民生分野、そして医療分野を取り上げて応用例をご紹介します。

### 1 産業への応用

原子力発電所や火力発電所、ガスプラントなどの大規模な産業施設では、ひとたび故障が発生すると、私たちの家へ電気やガスがなくなり日常生活に多大な影響を及ぼします。そこで、このような施設では定期的な点検・補修を実施し、万が一にも故障や事故が発生しないようにしています。例えば、原子力発電所では1カ月にわたる定期検査を実施し、原子炉や配管に傷などの異常が無いかどうかを分解調査しています。

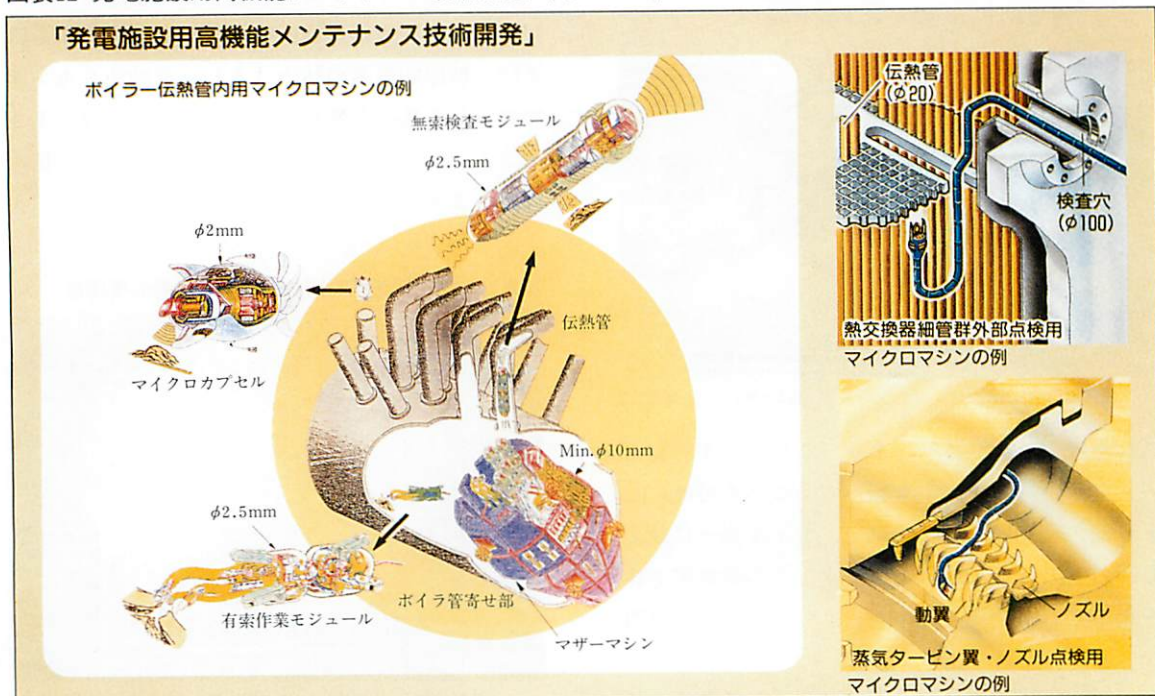
マイクロマシンが実現すれば、人間や従来の機械が入っていけないような狭くて複雑な機器や配管の中を移動し、小さな傷や付着物などの異常を検査し、さらには必要に応じて簡単な補修を行う

ことができます。機器を分解することなしに検査できれば、稼働率を向上させることができ、コストを少なくできますし、作業をする人たちの労力削減にもなります。

図表12は、通商産業省のマイクロマシンプロジェクトが要素技術開発の想定目標としている「発電施設用高機能メンテナンスシステム」です。このシステムでは、発電所の配管群の中をパトロールするマイクロカプセルが異常の発生場所をみつけて、コントロールセンターに通報します。その情報に基づいて、母船であるマザーマシンが出動します。異常発生場所の近くまでくると、マザーマシンから無索検査モジュールが出動します。無索検査モジュールは、マザーマシンが入れないような狭い配管内を無線で移動して異常状態を詳細に検査します。そして、必要に応じて有索作業モジュールがサンプル採取や簡単な補修を行います。有索作業モジュールは、作業のためにエネルギーを必要とするために有線で移動します。

将来には、このようなシステムが実現すること

図表12 発電施設用高機能メンテナンス技術開発 (イメージ)



も全くの夢物語ではありません。現実的には、従来のロボット技術とマイクロマシン技術とが組み合わされたシステムから実用化されていくことでしょう。

## 2 民生への応用

マイクロマシンは私たちの生活の場である家庭や職場においても活躍するでしょう。

現在、自動車では加速度や圧力を検知するセンサーがたくさん使われています。自動車の前後・左右からレーザー光を放射し、車や人との距離を測って事故を予防するためのマイクロ衝突防止システムなどが実現していくでしょう。

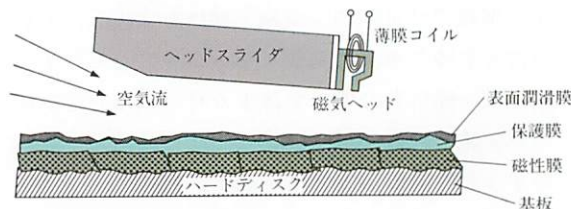
テレビや掃除機といった家電製品や携帯電話などのマルチメディア端末にもマイクロマシンは浸透していくことでしょう。動く小さな鏡をたくさん並べたディスプレイや、ダニや小さなホコリを吸い取るマイクロ掃除ロボットなども出現してくるかもしれません。

コンピュータに関連した機器では既にマイクロマシン技術が使われ始めています。パソコンに使われているハードディスク(固定型磁気記憶装置)を例に取ってみましょう。図表13に示すように、

磁性膜に非常に小さなS極・N極として記録された情報を読みとるために、磁気ヘッドは回転するディスクとヘッドとの間の空気の流れを利用して1 $\mu$ m以下の隙間を保って浮上しています。この磁気ヘッドには、マイクロ加工技術によって非常に薄膜として作られた薄膜コイルが使われています。

このように、私たちの生活の中の日々目に見えないところでマイクロマシン技術が使われ始めています。私たちの暮らしをもっと便利にすることができると同時に、環境に優しく、省資源化にも貢献できるマイクロマシンへの期待はますます高まっています。

図表13 ハードディスクと磁気ヘッド



## 3 医療への応用

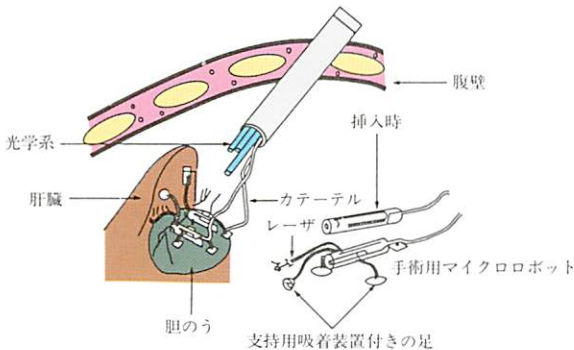
マイクロマシン技術は医療の分野でも、大切な役割を果たすようになってきています。注射や手



術は誰も好きではないでしょう。それは、痛いからです。マイクロマシン技術を利用すると痛みの少ない注射や手術ができるのです。患者に痛みや苦痛を与えることをできるだけ少なくすることを、難しい言葉で「低侵襲<sup>ていしんしゅう</sup>」といいます。ここでは、マイクロマシン技術が医療分野でどのような役割を果たすか将来の可能性を考えることにします。

医療用マイクロマシンは、低侵襲で体内のどこへでも入っていき、体内で直接診断・治療を行う機械で、内視鏡では到達できなかった部位へ近づき、より低侵襲で高度な診断・治療が行えるものと期待されています。図表14は、これを目的としたマイクロロボットの概念図です。お腹には小さな穴しか開けません。このようなマイクロマシンを使えば、これまでは到達が困難であった脳の奥

図表14 低侵襲体腔内手術システム



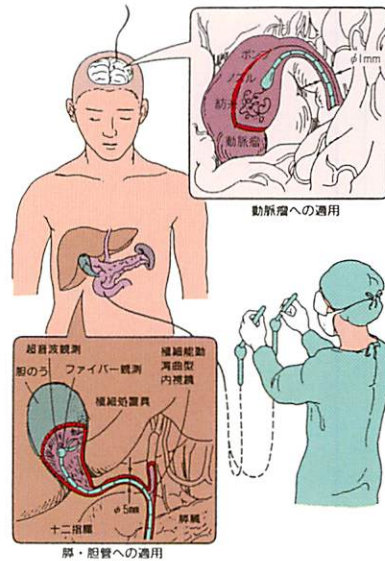
深いところにある動脈瘤や、完全に塞がった冠状動脈の先端部でいろいろな治療を行ったり、皮膚に開けた小さな孔から体内に入り、低侵襲で手術

を行うことができます (図表15)。

このような診断と治療が実現すれば、患者の肉体的、精神的苦痛を和らげるだけでなく、入院期間が短縮され、医療費の削減にも大きく貢献することになります。

内視鏡は、診断・治療における低侵襲化に貢献してきましたが、マイクロマシンの登場により、さらに低侵襲化し、いろいろな診断・治療に応用され、将来、マイクロマシンカプセルが体内を駆け巡り、気づかないうちに病気を治している時代が来るかもしれません。

図表15 体腔内診断・治療システム



〔参考文献〕

- 1) なの・ひこ：マイクロマシン、講談社、1993
- 2) 高山修一：内視鏡の現状と医療用としてのマイクロマシン、日本の科学と技術32(263)、1991

## おわりに

日本におけるマイクロマシン技術の研究と開発が、本格化したのは、産業科学技術研究開発制度の下で、通商産業省工業技術院が新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) を通じて1991年に国立研究所と産業界に研究開発を委託してからです。大学でも、もちろん盛んに研究が行われています。官学産一体となって研究開発を行っているのが日本の特徴で、その取り纏めの中心的役割を果たしているのが財団法人マイクロマシンセンターです。マイクロマシンセンターは、研究開発

の促進だけでなく、研究者の国際交流を促進させ、研究成果の展示発表会を開催したり、マイクロマシン技術の普及にも努め、実用化、企業化を支援するために積極的な事業活動を展開しています。

マイクロマシン技術は、21世紀の技術といわれ、21世紀には、重要な役割を果たすことが期待され、世界中で多くの組織、技術者、研究者が知恵を絞ってマイクロマシンの実用化を目指しています。きっと役に立つマイクロマシンができてくるでしょう。



編集・発行 財団法人 日本経済教育センター

〒105 東京都港区虎ノ門2丁目6番4号(第11森ビル) 電話(03)3503-3757

協力 財団法人 マイクロマシンセンター

〒108 東京都港区三田3丁目12番16号(山光ビル) 電話(03)5443-2971

平成7年1月発行

### ● 産 業 グ ラ フ 最 近 刊 ●

①65 わが国の環境装置産業

①68 わが国のロボット産業

①71 わが国の塗料工業

①66 戦後再開40周年を迎えたわが国航空宇宙産業

①69 わが国の通信機械産業

①72 わが国のゴム工業

①67 わが国の光産業

①70 わが国の電気事業

①73 わが国の都市ガス事業

KEIRIN 00

この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

印刷：阿部写真印刷株