

財団法人マイクロマシンセンター

目 次

はじめに	3
I マイクロマシンとは？	4
1. マイクロマシンの特徴	4
1) マイクロな世界	4
2) 自然界でみられる小さなメカニズム	6
3) マイクロ化の流れ	8
マイクロマシンの歴史	11
4) 大きな機械と小さな機械	12
2. 現在の取り組み	13
II マイクロマシンの将来	15
1. マイクロマシンの効用 (何の役に立つの?)	15
2. 将来展望	16
1) 健康と医療	16
2) 情報通信	17
3) 環境の保全	17
4) 生産・流通	19
5) 楽しい生活	19
III マイクロマシンの最前線	21
1. プラントや機械の検査・修理用マイクロマシン	22
1) 細いパイプの中を走って検査するマイクロマシン	22
2) 複数がつながってパイプの外側を検査するマイクロマシン	24
3) 複雑な機械の内部に入って作業するマイクロマシン	26
2. マイクロファクトリ	27
3. 医療応用マイクロマシン技術	30
4. マイクロマシンを支える技術	32
1) マイクロマシンを作る技術	33
(1) 微細加工技術	34
(2) 微細組立技術	37
2) 開発されたマイクロデバイスの例	37
(1) マイクロアクチュエータ	37
(2) マイクロセンサ	38
(3) マイクロ機構	38
(4) マイクロエネルギー供給	39
おわりに	39

● はじめに ●

マイクロマシンは小さな機械のことです。少し専門的にいうと、微細で複雑な作業を行うために、大きさが数mm以下の高度な機能要素からなる微小な機械で、全体の大きさが数cmから数 μ mくらいの範囲に入るものです。

今世界的にマイクロマシンの研究開発が盛んになっています。このわけはいろいろあります。現在私たちの身の回りの自動車、飛行機、家庭電気製品などに使われている技術は、18世紀の産業革命から数えても200年もかかって出来上がったもので、私たちの生活をより豊かに充実したものにしてくれています。これと同じような効果がマイクロマシンにも期待できそうなためです。このマイクロマシンを実現するためにはいろいろ違ったたくさんの新しい技術が必要になります。こうした技術をまとめて技術体系とも呼びます。

まだ研究が始まったばかりのマイクロマシンではありますが、すでに商品になっているものがあります。例えば、自動車のエアバッグ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は身近にあります。

また、マイクロマシンは医療分野で診断や治療にも使われています。内視鏡は口や、腹に開けた小さな穴から体の中に挿入する長いチューブ状の医療器具で、体の悪いところを観察するだけでなく、検査や手術を行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。口から挿入して胆管や胆のうを検査したり、結石を取るなどの治療に使われています。写真は、胃用の内視鏡です。先端部が直径9mmで、自由に曲がり悪いところを切り取ることが出来ます。こうした内視鏡がない頃には、メスやはさみのような手術用機

器を用いて、お腹を切り開いて手術をしていました。ですから内視鏡により、患者さんには苦痛が少なくなり、入院の期間が短くなったり、入院が不必要になりました。マイクロマシンの技術はこの内視鏡に組み込まれた検査や治療に必要な機器に役立っています。

このように、マイクロマシンは大変役に立つものですが、人間が手や指で操作する道具には適当な大きさが必要です。しかし、マイクロ化することによって、多くの機能を持った部品を組み込むことができ、便利な道具になることは確かです。

マイクロマシンの研究開発が進み、この技術体系が出来上がれば、われわれの生活はもっと快適なものになります。また、小さいのでエネルギーの消費が少なく、使う材料も少なくすみ、地球環境を守ることにになります。

この本は、こうしたマイクロマシンを小学校高学年から中学校までの皆さんに理解してもらおうと書かれたものです。小学生の皆さんには少し難しいかもしれませんが、がんばって読んでください。



I マイクロマシンとは？

1. マイクロマシンの特徴

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。

反対に、私たちの身の回りには小さな宇宙がたくさんあるのです。例えば、ハエやアリなどの昆虫はおおよそ1～10mm（ミリメートル）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、ハエの目は複眼ですが、その大

きさはおおよそ500 μ m（マイクロメートルと読む）であり、一つ一つの眼は10 μ mです。

ここで長さの単位を整理してみましょう。1mmは1m（メートル）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 μ mです。さらに、1 μ mの千分の1、つまり1mの十億分の1が1nm（ナノメートルと読む）と呼ばれます。図1-1は大きさを1/10ごとにとった物差しと、その大きさの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は50～100 μ mの

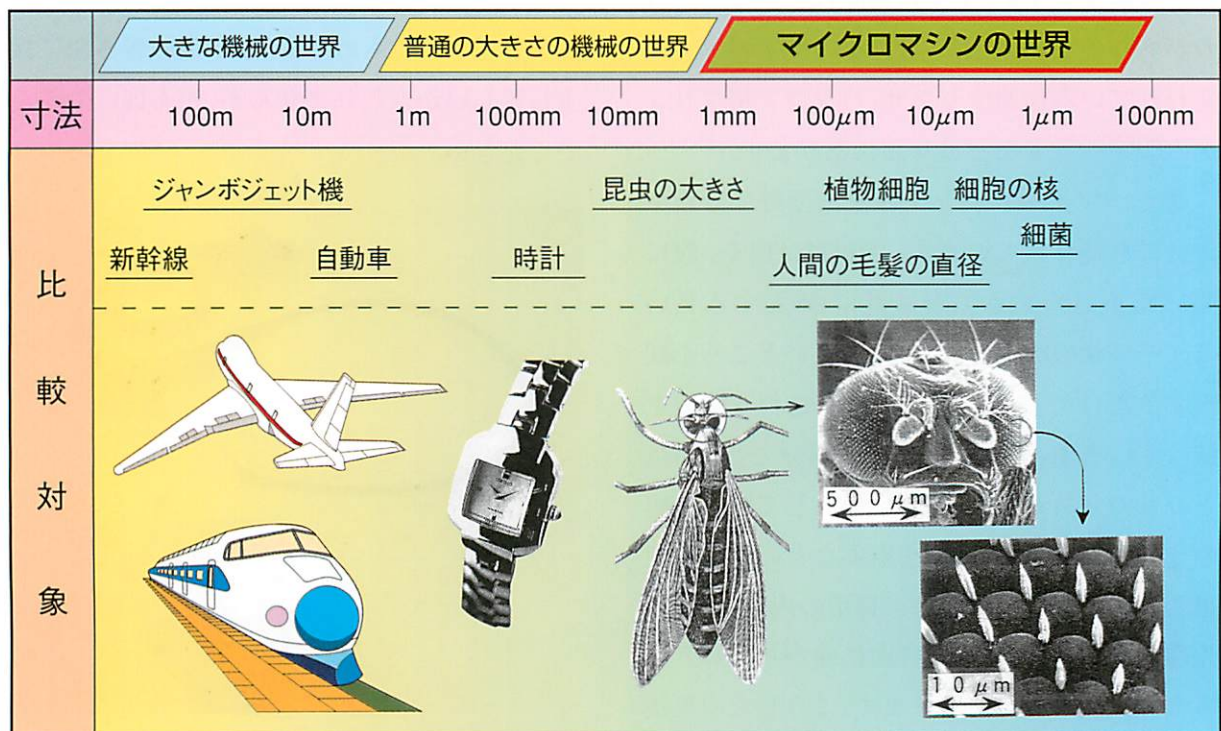


図 1-1 マイクロマシンの世界

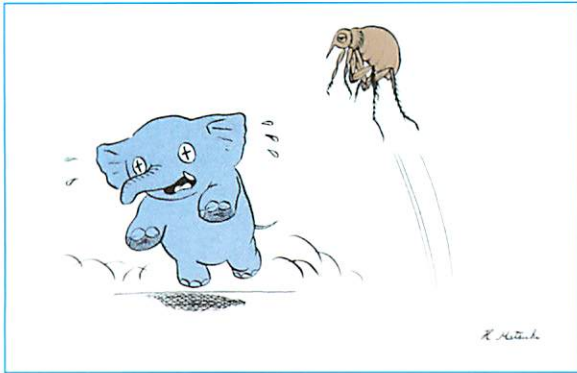


図 1-2 象とノミのジャンプくらべ

太さです。1 μ 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、分子や原子の大きさのレベルとなってきます。

では、ハエやアリ、ノミなどが住んでいる世界とは一体どのような世界なのでしょう。図 1-2 に示すように、象はいくらジャンプしたとしても、ノミが自分の体に比べて飛び上がるよりは高く飛べません。また、雲から落ちてくる雨の粒は直径5 mm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なのです。

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



図 1-3 忍者とアメンボウ

きません。しかし、アメンボウは池の上をスイスイと歩きます。小さくなると重力の影響が小さくなるからです。マイクロな世界では重力に代わって、表面張力や付着力、静電気力、さらには摩擦力などが大きな影響を及ぼし始めます。付着力とは、物と物とがくっつき合う力です。ぬれた指で薄い紙などをさわるとのりのようにくっついて、なかなか紙が指から離れないことがあります。これは紙の重さよりも、指と紙との付着力の方が大きいからです。静電気とは、寒いときにセータをぬいだり、ドアのノブをさわった時などに、バチッというあれです。プラスチックの下じきを服でこすって、髪の毛や小さく切った紙切れに近づけると、引き寄せられてくっついてしまうのも、静電気のしわざです。これらの静電気によって発生する力が静電気力です。マイクロの世界では、物の大きさが小さく重さが軽いので、一度くっついてしまうと、この付着力や静電気力のせいで自分の重みだけでは落ちて離れることができなくなります。私たちのふつうの世界では、なんの問題もないことでも、マイクロの世界では、このようなさまざまな現象が起きているのです。

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、同じ体積に対して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表面張力の影響が増してくるために、その影響が少しでも少なくなるように球のような形になるので

I マイクロマシンとは？

しょう。小さなハエやカは空を飛ぶことのできる最も小さな生き物だと思います。そして、彼らはチリやホコリ、さらには水蒸気などがごうごうと渦巻く中を飛んでいるのに違いありません。また、私たち人間にとってほぼとんど無視できる空気の粘性（ねばねばした性質）や空気との摩擦は、彼らが生きていく上での大問題なのでしょう。

体がもっと小さくなると、例えば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。彼らにとっては、普通の水もねばねばした性質を示すのです。

このように、小さな生物は、私たち人間とは異なり、重力よりも大きな問題となる粘性による影響に適した方法によって移動しているのです。

以上のように、私たちの身近にも、私たちの想像を超えたマイクロの世界が広がっているのです。

2) 自然界で見られる小さなメカニズム

自然界には、クジラからバクテリアまで、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、大変良い参考になります。ここでは、バクテリア、チョウ、カの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。

顕微鏡で見ると、バクテリア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。バクテリア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（糸のようなもの）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1-4にべん毛モータの模式図を示します。私たちがふだん使っている電磁式モータ（ミニ四駆のモータもこれです）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があります。ロータ部分の直径は、数10nm（十万分の1mm = 0.00001mm）です。べん毛モータは、生物界で現在見つかったただ一つの回転するモータです。

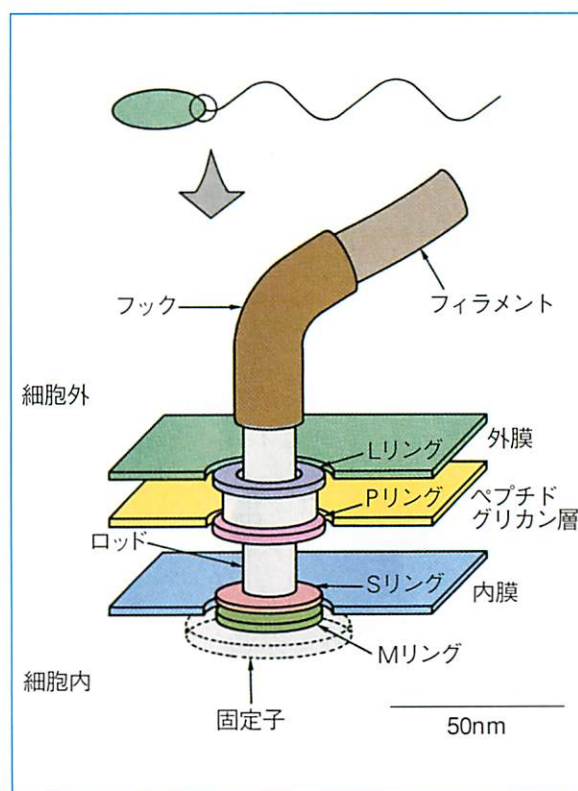


図 1-4 ベん毛モータの模式図



図 1-5 アゲハチョウの平面図

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。細胞内膜の上にあるMとSのリングが、回転するロータに相当する部分です。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、細胞外膜などに結合しているドーナツ状のLとPのリングが、軸を支える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(ユニバーサルジョイント)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間に、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、メカニズムがかくされているのです。

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の面積

が大きく、また羽ばたきの数も少ないので、ゆっくり飛びます。1回ご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見てわかります。代表的なチョウとして、アゲハの形を図1-5に示します。前羽根、後羽根を合わせた形は、扇子(せんす)を左右に2枚横に広げたかっこうになっています。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したり、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広がった羽根を、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下ろしによりできる空気の流れを、図1-6に示します。羽ばたきを繰り返すことによって、揚力を得る

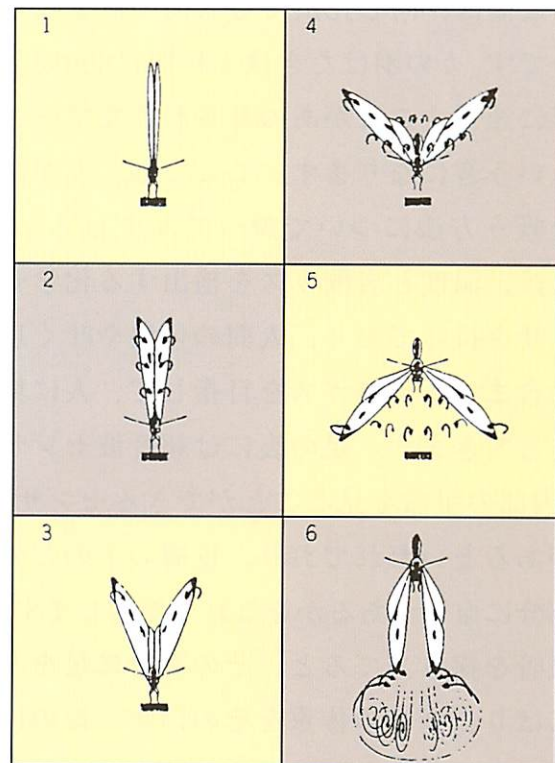
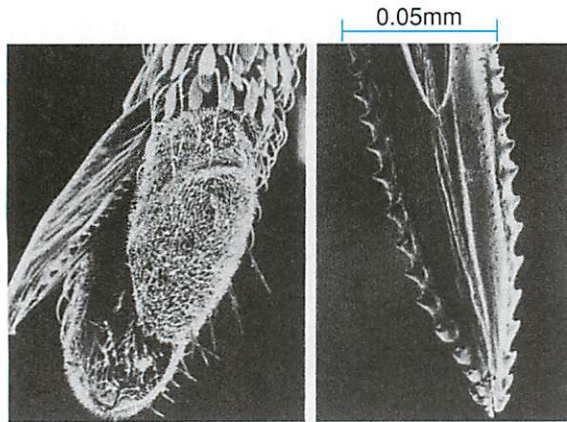


図 1-6 チョウの羽ばたき打下ろし (Kingsolver, 1985)

I マイクロマシンとは？



(レナード・ニルソン：クローズアップネイチャーP66より)

図 1-7 カの針(口吻)にはノコギリがついている(左は吻の先端、右は吻針)

ことができます。チョウはただよ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が秘められています。

最後は、同じ昆虫でも人間の血を吸うカです。カの羽ばたきは1秒間に800回と実に速く、これがあの耳ざわりなプーンという音になります。ここでは、カが血を吸う方法について調べてみましょう。カは、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目指して、人に集まってきます。足の裏には超音波センサ(内部の組織を見ることができるセンサ)があるといわれており、皮膚の下のど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(蚊の口=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

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、刺された人間に痛みはありません。口吻と吻針の写真を、図1-7に示します。ノコギリの先端が血液にふれると、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、血管内の血を吸い上げます。全身にはまわりの空気の流れを検知するセンサがついており、人がカを叩こうと手を動かすと、空気の流れの変化からそれを感じて、さっと逃げます。

このように、カ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(モータのように動きを作り出す部品)を含んだシステムを作っており、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) マイクロ化の流れ

さて、次にこれまで見てきた自然界にある小さな生物のメカニズムから、現在私たちが便利に使っている工業製品に目を転じてみましょう。

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ブロックのようなものが、何個も置いてあるのがみえるはずです。これは、LSI(大規模集積回路)と呼ばれ、大きさは親指の爪ぐらいですが、この中には数千万個もの電子部品を集めたものが作り込まれています。

このLSIは、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ます。

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（電気を通したり通さないことができる材料）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、トランジスタでは、小指の先ぐらいにすることができるようになりました。その後、半導体の材料として、ゲルマニウムから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を一緒に作り、それらを金属の配線で結ぼうというアイデアが実現されました。電気回路をシリコンの基板（薄い円盤のようなもので、ウェハと呼ばれる）の上にたくさん作ることができるようになったのです。図1-8は直径約100mmのシリコンウェハ上に31個のLSIを作った例です。

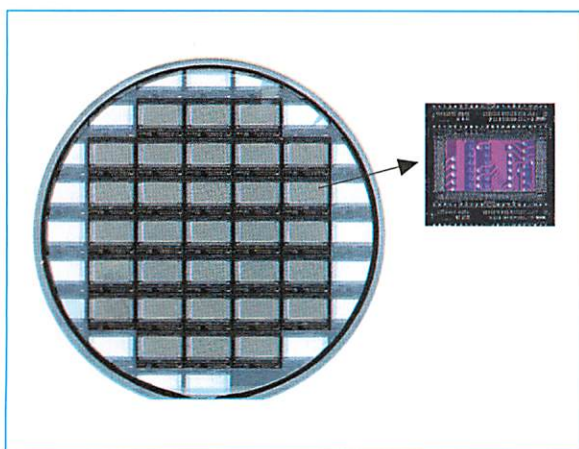


図1-8 シリコンウェハ
(直径約100mm)

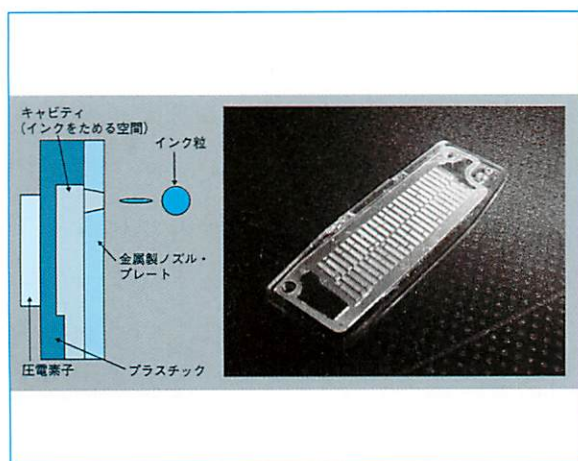
ウェハ上に作るトランジスタの大きさは、電気を通す配線の幅で決まります。幅が小さいほどトランジスタも小さくなり、たくさんのトランジスタをウェハ上に作ることができるのです。1個のチップ上にたくさんのトランジスタを作ること「集積化する」といい、トランジスタの数が増えることを、「集積度が向上する」といいます。現在のメモリ（メモリとはおぼえていくという意味で、文字や数を記憶しておくためのLSIです）は集積度が大変に向上し、1個のメモリで新聞だと200ページ以上の情報を記憶することができます。ここで使われている配線の幅は $0.3\mu\text{m}$ （1mmの三千分の一）という肉眼ではみることのできない寸法です。髪の毛の太さが $50\sim 100\mu\text{m}$ 程度ですので、髪の毛を三百分の1にしたぐらいの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、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ます。

さて、以上述べてきたことはエレクトロニクスの世界でのことですが、機械の世界でのマイクロ化はどのようなになっているのでしょうか。先程述べたようにエレクトロニクスの世界では、マイクロ化が急速に進み、LSIの集積度などが大変に向上しました。それに対して、機械のマイクロ化は遅れていました。これは、機械はエレクトロニクスと異なり、モータ

I マイクロマシンとは？

などの動く部分があるからで、この動く部分をマイクロ化することが大変に難しかったからです。ところが最近この動く部分を含めた機械の部品を、非常に小さく作る技術ができてきたことなどにより、機械をマイクロ化するための研究が活発になってきました。後ほどまた述べますが、大きさが非常に小さい機械のことを、私たちはマイクロマシンと呼んでいます。このマイクロマシンを実現するための研究が世界中で活発に行われるようになってきたのです。

ここで、現在私たちが身近に使っている非常に小さな機械の代表例を2つご紹介しましょう。図1-9はインクジェットプリンタのヘッド部です。電圧をかけると伸びる性質をもつ圧電素子（写真で表面についているウロコのようなもの。全部で48個ついている。）によってインクが入っているキャビティに圧力を加え、ノズル（数 μm オーダの小さな穴）から大変に小さいインクの粒を吐き出させます。そして、これを紙の上に吹き付けること

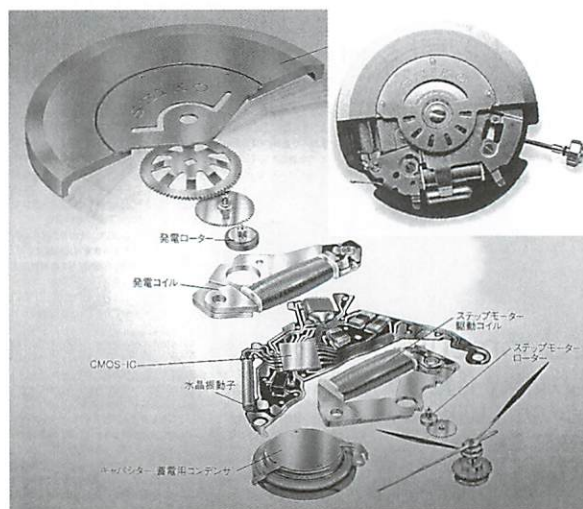


(日経エレクトロニクス, 2000, No.764, p185)

図 1-9 インクジェットプリンタのヘッド部

によって、インクの粒の点々で文字や絵を描くものです。この部品の中で大変重要であるものの作るのが難しい部分がノズルですが、マイクロマシン技術（マイクロマシンを実現するための技術）によって、これを作ることが容易になりました。

次に図1-10は新しいタイプの腕時計の中の構造を示しています。AGS（自動発電システム）と呼ばれているもので、人間が腕にはめて腕を動かすと、振り子が回転し、この回転によって発電機（発電ロータと発電コイル）から発生した電気をバッテリーに充電します。この電気によりステップモータを回転させ、針を動かす仕組みになっています。発電機が内蔵されているために、普通の腕時計のようにバッテリーがなくなっても交換する必要がなく、原理的には永久に使える大変すぐれた腕時計です。図をみてもわかるように、腕時計という小さな機械の中に数多くの小さな部品がギッシリと詰め



(THE SEIKO BOOK, Good Press Special, p105, 徳間書店)

図 1-10 腕時計の AGS (自動発電システム)

込まれています。マイクロマシンと言うには、寸法がちょっと大きいような気がします。機械のマイクロ化の見本といってもよいものでしょう。これら機械の部品は、マイクロマシン技術によってさらに小さく作ることが可能になるでしょう。

さて、ここで、マイクロマシンの歴史を見てみましょう。マイクロマシンという非常に小さな機械のアイデアが世の中にはじめて出たのは、1966年に公開されたSF（サイエンスフィクション）映画「ミクロの決死圏」でしょう。この映画は、超空間投影法という方法によって非常に小さく縮小化された潜行艇プロメテウス号が人間の血管の中に入っていく、脳にある患部をレーザ光線で治療して、目から涙と一緒に出てくるというお話です。おわかりのように、あくまでもSFであり、夢物語であったわけですが、小さな機械に対する夢が描かれていて、当時大いに注目を集めたものでした。その後約20年たった1980年代の後半にアメリカからさきほどご紹介したLSIを作る技術によって、直径が1 mm以下の小さなモータや歯車、リンクなどの機械部品が作れるという発表があり、微小な機械部品を作るためのいろいろな加工技術の研究が世界各国で精力的に行われるようになりました。また、これら微小な部品などを観察する技術として、これまでは光学式の顕微鏡しかなく、拡大倍率に制限がありましたが、近年電子顕微鏡、さらに走査型プローブ顕微鏡が開発され、微小な形状

が大きな拡大倍率で容易に観察できるようになりました。これらの加工技術や観察技術などが進歩してきたおかげで、約30年前の「ミクロの決死圏」に登場した世界、マイクロマシンの実現が今や夢ではなくなっているのです。

さて、これまでエレクトロニクスや機械の分野におけるマイクロ化の流れを述べてきました。ここで、その他の分野におけるマイクロ化の流れを簡単にふれておきましょう。まず、医療の分野です。医療用の機器も近年小形化が進み、例えば胃の中を検査するための内視鏡はより細くなり、人間が比較的飲みこみやすくなりました。図1-11に示した胃の内視鏡は、現在実際に使われているものですが、直径は約9 mmです。また、これまで体を大きく切り開かなければできなかった手術にかわって、体にほんの小さな穴をあけ、そこから体の中へカテーテルという細いチューブを入れることによって手術ができるようになりました。これらができたおかげで、人間はあまり苦痛を伴わずに、検査や治療を受けることができ



図 1-11
胃用の内視鏡

外径約9mm

I マイクロマシンとは？

るようになっていきます。これらの医療機器^{いりょう}は、さらにより一層小形化することや、多くの種類の検査や治療^{ちりょう}ができるようにすることが求められています。次にバイオテクノロジーの分野です。生物は、それぞれ異なった遺伝子をもっています。これらの遺伝子を組み合わせることによって新しい野菜などを作る研究が進められています。さらに、人間も一人一人異なった遺伝子をもっていますが、この遺伝子を明らかにし、それぞれの人にとって最も効果がある薬を調合しようとする研究なども始まっています。

これら医療機器^{いりょう}やバイオテクノロジーの分野に対しても、マイクロマシン技術は、大いに役立つものと期待されています。

〔参考文献〕

日経エレクトロニクス, 2000, No. 764, p185

THE SEIKO BOOK, Good Press Special, p105, 徳間書店

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 있습니다。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るクレーンや、大空を飛ぶ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かなった大きさに作られているということです。大きな物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るのです。第2の要因は、私たちが作ることが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3 m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きなかったのです。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、一つ一つの部品を小さくすることが必要です。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^{けいたい}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。始めの頃の携帯時計^{けいたい}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ような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、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

らすぐ曲がってしまうとか、見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、現在の腕時計の大きさは、第1の要因で決まっているのです。

以上の腕時計についてのお話は、現在多くの人が持ち歩いて便利に使っている携帯電話やPHSについても、同じことがいえるでしょう。

「腕時計より小さい機械はいらないの？」

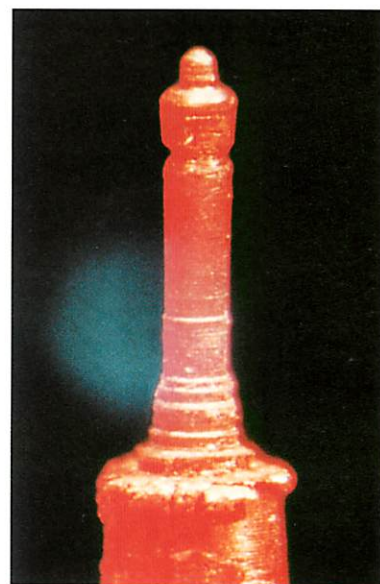
それでは、腕時計や携帯電話より小さな機械は必要ないのでしょうか。決してそんなことはありません。私たちが暮らしていく中で、小さな機械がきっと役に立つと考えられることがたくさんあります。もっと小さくないと非常に不便であるとか、役に立たないとかいう機械がたくさんあります。また、まだ完全ではありませんが、このような小さな機械を作れそうな技術も少しずつできてきました。こうして生まれてきたのがマイクロマシンと呼ばれる小さな機械です。マイクロマシンというのは非常に小さな役に立つ機械という意味です。例えば、すでにお話した内視鏡です。体の中に入って検査や治療をするためにはできるだけ小さくなければいけません。小さければ、人に与える苦痛も少なくて済みます。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、あったらいいなと思われる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。きっと細い棒を使っ

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たいへん苦勞しそうです。ここで、この狭いすき間に入って行って100円玉を取ってきてくれる機械があったらどんなに便利でしょう。こういうこれまではできなかった仕事をしてくれるのがマイクロマシンなのです。

このようなマイクロマシンの大きさは、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。

2. 現在の取り組み

それでは「マイクロマシンはもうできているのか？」という質問が出ると思いますが、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



(提供：東京大学佐藤知正教授)

図2-1 マイクロこけし（直径は0.2mm）

I マイクロマシンとは？

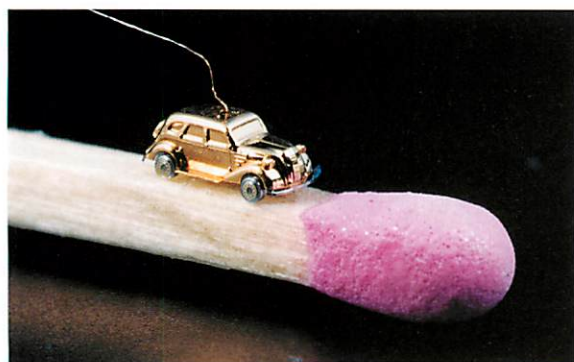


図 2-2 マイクロカー

ん。しかし、役に立つマイクロマシンの実現をめざして、現在いろいろ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。

図 2-1 に示したものは、「マイクロけし」です。これは、皆さんがよく使われているシャープペンシルの芯（太さ 0.5 mm）を材料として削って作ったものです。もちろん、人間が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開発したからできたものです。

図 2-2 に示したものは、「マイクロカー」です。もちろん、人間が乗ることはできません。大きさは、米粒ぐらいの大きさです。小さくなくても自動車は、車輪で走ることができるのか、どこまで小さく作ることができるのか、などをためすために作られたものです。

図 2-3 に示したものは、「マイクロ走行ロボット」です。大きさは 1cm^3 です。

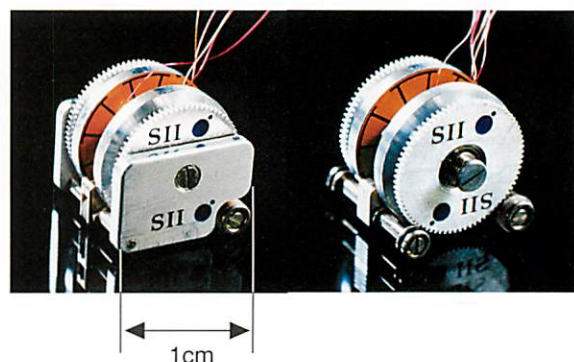


図 2-3 マイクロ走行ロボット

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。

さらに日本では、現在通商産業省工業技術院の産業科学技術研究開発制度のもとで、国のプロジェクトとして、「マイクロマシン技術の研究開発」が進められています。このプロジェクト中でどのようなことが行われているかについては、後で出てくる「マイクロマシンの最前線」のところで詳しく述べますが、発電所の中で人間が入っていけないところに入って行って点検や修理を行うマイクロマシン、人間の体を手術で切り開くことのできるだけ少なくして検査や治療を行うマイクロマシン、小さな物を小さな工場で作るためのマイクロファクトリなどの実現に必要な技術の研究開発を行っています。

〔参考文献〕

産業グラフ, 「マイクロマシンとその技術」, 財団法人日本経済教育センター, No. 174, 1994

Ⅱ マイクロマシンの将来

1. マイクロマシンの効用 (何の役に立つの?)

これまで、いろいろな工業製品が製造され、それが私たちの生活を豊かにしてきました。その反面、消費するエネルギーが著しく増えたり、からだに良くない物質が空気や水を汚したりするようになってきました。このようなことが今後も進んでいくと、地球の環境がますます悪くなり、私たちを含む生物が地球上で生存できなくなる恐れがあります。したがって、これからは地球の環境をよい状態に保ちながら、生活を豊かにする方法を考えていかなければなりません。そこではじめに、私たちがこれから生活する21世紀はどのようなになるのか想像してみましよう。

私たちがいつも使っている、あるいは生活を豊かにするためのいろいろな機械は、どんどん小さくなるでしょう。携帯電話などはそのよい例です。その小さな機械の中にテレビやCD、パソコンなどが入っていれば、遠く離れた友達と一緒にいるような感覚で会話や遊びを楽しむことができます。腕時計のような小さな機械で健康状態を調べ、そのデータを通信用回線を通して病院などに送り、異常があればお医者さんからすぐに注意しても

らうこともできます。高齢化が急速に進む21世紀では、このような携帯機械がたいへん威力を発揮します。外出していても、自宅にいるような感覚で家の中を見たり、電気製品を操作することができるようになります。

発電所や石油化学プラントのような大型で複雑な構造の装置は、私たちの快適な生活を支える基盤として欠かせないものとなっています。このような大型装置の安全を守るために、とりわけ性能の高いメンテナンスマシン（保全機械）が活躍します。

集中豪雨や地震は大きな被害を私たちに与え続けてきました。このような災害を予防する方法もやがて確立されるでしょう。

マイクロマシンはとても小さな機械です。この小さいことを活かして、非常に狭い場所に入れて仕事をさせることができます。様々な働きをするたくさんのマイクロマシンを組み込んだ携帯電話ほど大きさの装置を作り、持ち歩くこともできます。さらに、マイクロマシンは小さいので、消費する動力もわずかで済みます。

そこで、このとてもすぐれた能力を持っているマイクロマシンが、21世紀の社会や生活において、どのような役割を

はたすことになるかを考えてみます。

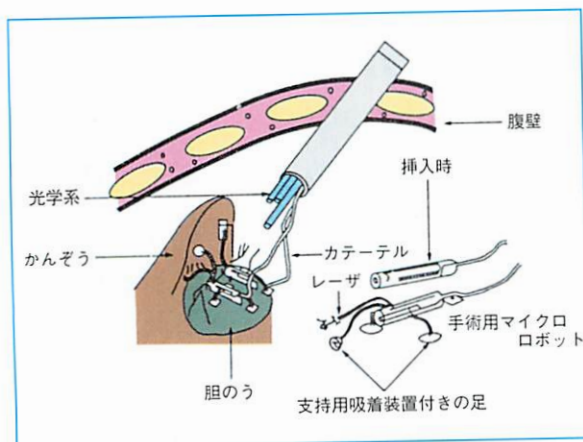
2. 将来展望

マイクロマシンは将来いろいろなものに使えるようになるでしょう。その中の主なものについて説明します。

1) 健康と医療

注射や手術が好きな人はいないでしょう。それは痛いからです。痛みや苦痛をできるだけ与えないで診断し治療する方法が、マイクロマシンによって実現する可能性があります。マイクロマシンは非常に小さいので、身体の深い部分まで入っていくことができるからです。

図3-1はこのような場合に使う医療用マイクロマシンを示しています。胃や肝臓などの治療では、しばしば、お腹を大きく切り開くような手術が必要になりますが、図のようなマイクロマシンを使うと、お腹に直径5ミリメートルほどの小さな穴をあけるだけで、様々な診断や治



(高山修一, 日本の科学と技術, 32, No. 263, p77, 1991)

図3-1 痛みを出来るだけ与えない
診断・治療システム

療を行うことができます。その結果、手術の苦痛は非常に少なくてすみ、治るまでの日数も、とても短くて済みます。これはまた、医療費を節約することにもなります。

非常に小さなカプセル型のマイクロマシンに薬を入れ、病気の部分まで運ぶドラッグデリバリーシステム (DDS) の研究が行われています。これが成功すると、薬の使用量が少なくてすみ、その副作用の心配がなくなります。

私たちは年に1~2回の健康診断を行い、病気の早期発見や治療に役立てています。もしも、時計をはめるような感覚で健康をチェックする機械を身につけ、いつも健康状態を調べ、そのデータをお医者さんのところに送り、適切な注意を受けることができるようになれば、重大な病気になるのを防ぐこともできます。図3-2は、腕にはめた健康チェックマシン

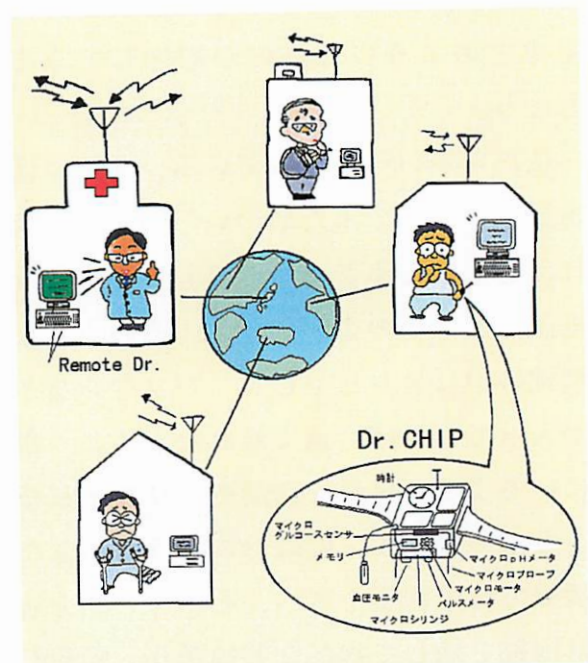


図3-2 自宅でできる健康管理システム

を医療通信ネットワークと結んで、健康管理を行うシステムを示しています。

私たちは、重い病気にかかった場合は入院して治療を受けます。これは病気の検査や治療に必要なたくさんの装置があるところで、緊急時にはお医者さんがすぐ診察し、治療に取り組めるようにするためです。しかし、病気の検査や治療を行う機械が非常に小さくなれば、それを借りて自宅に置き、病院と医療通信ネットワークで結んで、自宅にいながら入院と変わらない治療を受けることができるようになります。これはまた、通院が困難なお年寄りが、在宅のままで高度な診断や治療を受けるためにも必要な医療システムです。

〔参考文献〕

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, No. 263, p77, 1991

2) 情報通信

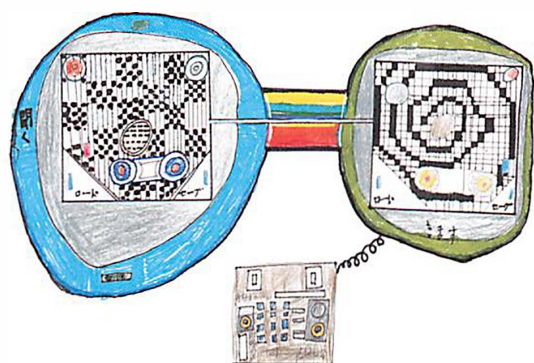
携帯電話が普及し、2010年頃にはほとんどの人が持ち歩くようになります。パソコンも最近では持ち歩くことができる大きさになってきました。持ち歩きがで

きるテレビもあります。さらに、通信回線と接続できる携帯型ゲーム機なども出始めています。でも、これをみんな持ち歩こうとすると大きな旅行かばんが必要になります。

手帳ほどの大きさの装置に、そのような機能を全部収めることができれば大変便利です。知らない土地を旅行するときには地図が必要ですが、これもその装置に入れます。さらに、健康チェック機能も入れたいものです。留守にしている家の中をみることもできれば安心です。図3-3のような通訳機能もほしいものです。こんなさまざまな情報を一台の携帯機器で処理できるようにするには、非常に小さな部品で作られているマイクロマシンがどうしても必要になります。

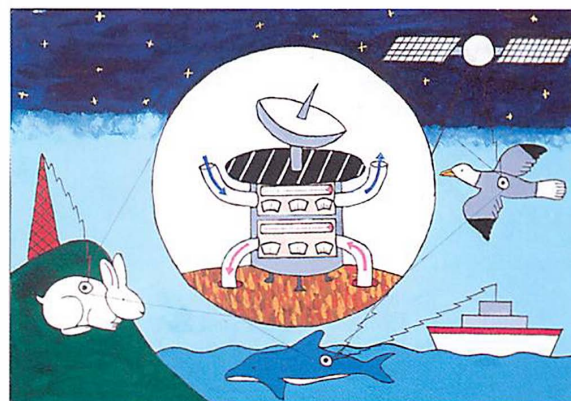
3) 環境の保全

大量のエネルギー消費で地球が温暖化したり、生活に役立つはずのものが有害物質を発生させたりしています。また、集中豪雨や地震などの自然現象が、しばし



T.Hさん 井ノ口小学校 5年生

図3-3 全国みんなと通話電話



K.Mさん 竹園東中学校 2年生

図3-4 地球環境観測ロボット
GE-nomi (ジェノミ)



Y.Mさん 伊那小学校3年生

図3-5 地震予知マシン

ば私たちの生活環境を破壊しています。このような災害を防ぐには、広い範囲にわたってさまざまな現象を調べ、まえもって十分な対策をたてておく必要があります。この自然現象などの調査には、非常にたくさんの測定装置が必要になり、その維持費やそれらを置く場所が問題になります。

自然現象や環境の状態を調査するための測定装置は、マイクロマシンを使うと

非常に小さくなり、それを使う費用も少なくてすむので、道路わき、山の斜面やダム、建物の壁などにたくさん置くことができます。また、図3-4のように異常を示す測定データは、情報通信ネットワークを通じて収集・分析し、即時に対処することができるようになるでしょう。

図3-5の絵のように、アリほどの大きさのマイクロマシンを地中に多数送り込み、地震の前兆を調べることもできるでしょう。地震で倒壊した建物の中に潜り込んで、閉じこめられた人を探すのに、現在は災害救助犬が使われていますが、これに代わってスネークレスキュー(図3-6)が活躍する時がくる可能性もあります。

空気中の有害物質を取り除くことも重要な環境対策の一つです。自動車では、排気ガスに含まれる二酸化窒素などを吸着する方法で取り除いていますが、もっと積極的に窒素と酸素に分解することができれば一層効果が上がります。例えば、図3-7に示すように、オゾン層を破壊するフロンガスを吸い込んで分解するマイ



K.Sさん 住吉小学校6年生

図3-6 スネークレスキュー



Y.Oさん 井ノ口小学校5年生

図3-7 オゾン破かいガスすい取り機

クロマシンのアイデアなどもあります。

4) 生産・流通

私たちが持ち歩いている時計やカメラ、カセットテープレコーダや携帯電話のような小さな工業製品を分解して、その部

品を見たことがありますか。大きさが数ミリメートルで、重さが1グラムにも満たない小さな部品がたくさん使われていることに驚かされます。この小さな部品や製品は、現在は人間よりも大きい生産機械を使って製造しています。これを、小

さな生産機械を使って作るようにすれば、工場は非常に小さくなり、そこで消費するエネルギーは大幅に節約できます。これは地球温暖化を防ぐ対策として有効です。

さらに、この超小型工場（マイクロファクトリ）は机の上に置けるほどの大きさですから、店先に置いて、注文したものをその場で作ることもできます（図3-8）。このマイクロファクトリをみなさんの机の上に置けば、世界に一つしかないおもちゃを作ることできるでしょう。

マイクロファクトリは広い敷地を必要としないので、住宅地の回りにたくさん



図 3-8 マイクロファクトリによる生産システム

Ⅱ マイクロマシンの将来

設置することができます。そして、お父さんやお母さんが遠くの工場まで通勤する必要はなくなります。さらに、トラックの荷台に工場が置ければ、原料を仕入れて、製品の納入先までの走る間に製造することも可能になります。この走る工場は工場用地さえ要らないことになります。このように、小さな工場ができると人や製品の流れが現在とは全く変わったものになると考えられています。

5) 楽しい生活

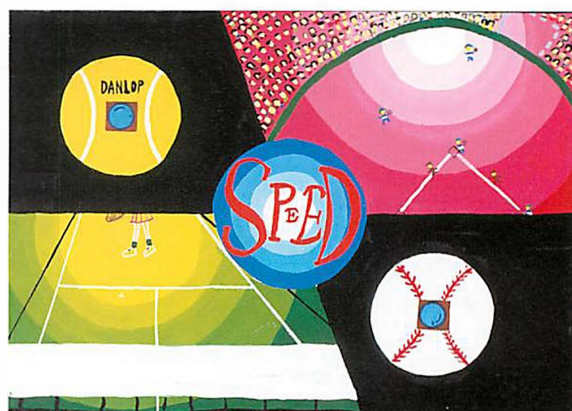
マイクロマシンは遊びの世界でもさまざまなに使われ、楽しみを増やしてくれます。釣りが大好きな人にみみよりな話ですが、釣りたい魚が寄ってくるような超音波を出すルアーを使えば、ほかの人の何倍もの魚を捕ることができそうです(図3-9)。

野球の実況放送では、ピッチャーが投球するボールの速度を測定して知らせています。もしもボールにカメラが埋め込まれていたら、バッターの反応までわかり、観戦の楽しみが倍加します。(図3-



Y.Uさん 曾根小学校6年生

図3-9 マイクロちょうおんぱルアー



E.Nさん 刈谷南中学校2年生

図3-10 ボールになっちゃった

10)

最近では、ロボットの犬や猫が日常生活にうるおいを与えてくれるようになりました。私たちと一緒に遊ぶことができるような、さまざまな、そして一層優しくて賢いマイクロマシンが生まれると、私たちの楽しみは驚くほど豊かになるでしょう。

Ⅲ マイクロマシンの最前線

大きな発電所を安全に動かすためには、ある時間運転したら機械を止めて検査・修理することが必要です。発電所には、熱い蒸気を作る部分、金属でできたたくさんの羽根にその蒸気を吹きつけて回す部分、などのいろいろな種類の機械があります。これらの部分を検査して傷を修理することを、メンテナンスと呼んでいます。これらの機械は、たくさんのパイプや小さなパーツでできており、手が入らないくらいに小さなすきまが多く、また複雑に入りこんでいます。いまは、それぞれの装置をばらばらにして調べており、そのメンテナンスにはおよそ100日間かかります。そこで、ばらばらにする→悪いところがないか調べる→悪い部分を直す→もう一度組み立てる、という仕事を、機械をばらばらにせずに行えるようなメンテナンスシステムを、マイクロマシン技術によって作ることが考えられています。また、その技術は、ほかのプラントやジェットエンジンのメンテナンスにも使えます。

つぎに、マイクロマシン技術のほかの使い道として、マイクロファクトリも考えられています。これは、いろいろな製品を作る工場全体を小さくしようとする新しい考えかたです。マイクロファクトリという考えかたは、時計やカメラなど

の小さな製品を作るときに、「こんな小さな部品を作って組み立てるのに、どうしてあんなに大きな工場や機械がいるのだろうか？」という、よく考えればすごく当たりまえな疑問から生まれました。部品を削ったり組み立てたりする機械を、マイクロマシン技術で小さくすれば、工場全体が小さくなり、エネルギー、材料、スペースをこれまでよりもうんと少なくできます。また、工場を小さくすることによって、どこでも製品を作れるようになります。つまり、これまでは工場でしか作れなかったものが、お店やオフィスや、ものによっては自分の家で作れるようになります。そうすると、ものを作るしくみや工場からお店までものを運ぶしくみを大きく変えて、うんと便利にすることができるかもしれません。

もうひとつ、マイクロマシン技術の使い道として、もっとも身ぢかでもっとも期待されているのが、医療^{いりょう}への応用です。21世紀には、治療^{ちりょう}の必要なお年寄りの数が今よりうんと増えます。また、このごろは医療技術^{いりょう}が発達して、身体を傷つけることのより少ない診断^{ちりょう}や治療技術が、ますます求められています。これからの医療技術^{いりょう}は、社会からのこうした要求にこたえる必要がありますが、これに対する答えのひとつが、お腹を切らずに

行う手術です。働きの悪くなった胆^{たん}のうを取りのぞくために、お腹に小さな孔を4つ開けて、そこからマイクロカメラや手術に必要な器具を体の中に入れて、胆^{たん}のうを取りだす方法が、1989年にアメリカやフランスで始まりました。お腹を大きく切らないこの手術法は、患者の体力の消もうが少なくて手術のあと早くに元気になる、入院している日数が短くなり治療にかかるお金を減らせる、などの大きな特長があります。これを可能にする大事なテクノロジーが、マイクロマシン技術です。

ここでは、発電所のメンテナンス、マイクロファクトリおよび医療^{いりょう}へのマイクロマシン技術の使い道について、具体的な例をいくつか紹介しましょう。

1. プラントや機械の検査・修理用マイクロマシン

1) 細いパイプの中を走って検査するマイクロマシン

(1) 研究開発のねらい

発電所にあるパイプの中を解体しないで検査できれば、傷が小さいうちに見つ

けだして修理することができますので、発電所を永く使うことができます。そこで、パイプの中を走る小さなマイクロマシンをめざして研究開発をおこなっています。

(2) 概要

このマイクロマシンは細いパイプの中を走ったり、登ったりしながら、傷や汚れなどをさがし、その場所を知らせてくれるマイクロマシンです。リモコンで操縦を行うので、世界一小さなラジコンカーのようなものです。このマイクロマシンを「管内自走環境認識システム」と呼んでいます。図4-1はこのシステムの完成予想図です。大きさは、太さが9.5mmで、長さが50mmです。重さは5gくらいです。このシステムの性能を紹介しましょう。

- ①直径10mmのパイプの中を、1秒間に2cmの速さで走ります。また、登るときは、1秒間に1cmずつ登っていきます。
- ②ラジコンカーと同じで、無線で操縦します。ただし、マイクロマシンに電池をのせると大きくなってしまいますので、電気も無線でおくります。
- ③傷を調べるための小さなカメラもつい

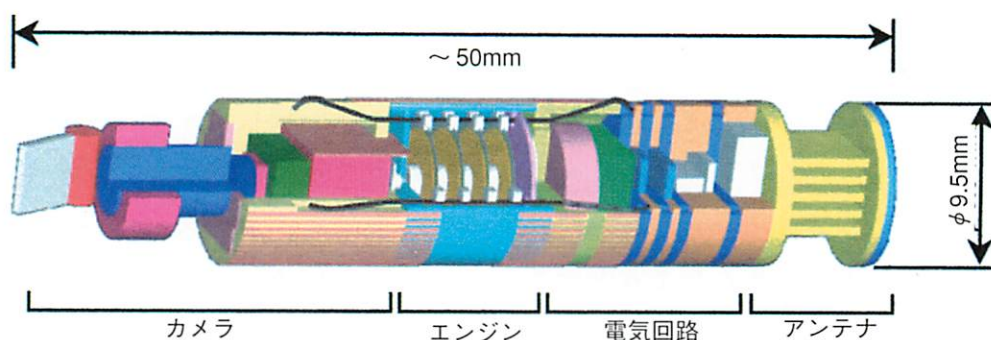


図4-1 管内自走環境認識システムの完成予想図

ています。もちろん、カメラの操縦もリモコンでできます。

このシステムは、走るためのエンジン、無線で送られた信号を受ける部品（アンテナ）、信号を電気にかえる部品、電気回路、検査のためのカメラなどからできています。

(3) 構成デバイス

走るためのエンジンは、ラジコンカーではモータを使いますが、このシステムでは、パイプの中を登っていかなければなりませんので、モータは使えません。そこで、パイプの中を登ることができるように考えられたのが、慣性力を利用したエンジンです。その仕組みは、電気を流すとのびたり、ちぢんだりする圧電体というものをシステムの中で動かすことで、進もうとする力（推進力といいます）を出すようにしてあります。これは、簡単な実験で試すことができます。ミニペットボトルに水を半分ぐらい入れてふたをしっかりとめてください。そしてそのペットボトルを握って上下に振って見て下さい。普通に持っているときよりも重く感じるところがあるでしょう。これが、

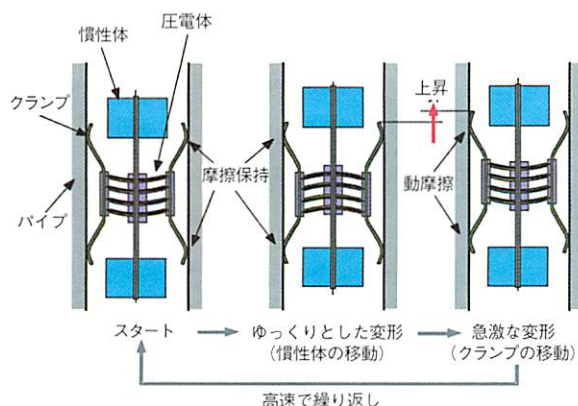


図 4-2 慣性力による推進の原理

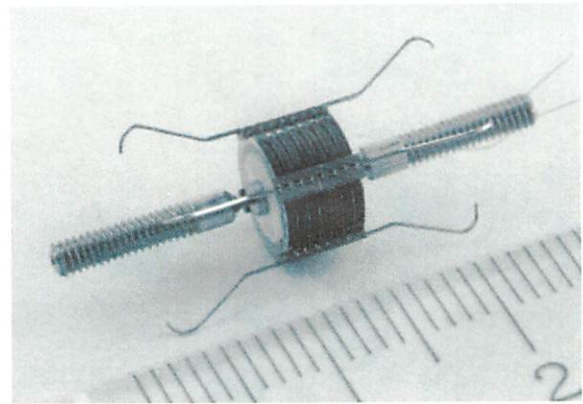


図 4-3 慣性力を利用したエンジン
(積層圧電アクチュエータ)

慣性力による推進力です。このシステムでは、図 4-2 に示すように、パイプの壁につばっている部分（クランプといいます）がありますので、電気を流さなければ止まっていますが、進もうとする力ができるくとクランプがすべって進んでいくのです。このエンジンの部分の写真が図 4-3 です。

無線を使って操縦するためには、アンテナが必要です。マイクロマシンにのせられるようにマイクロマシン技術を使って小さく作ったアンテナを図 4-4 に示します。

太陽電池は光があたると電気を作ります。同じように、マイクロ波という信号があたると電気をつくる部品も、このシ

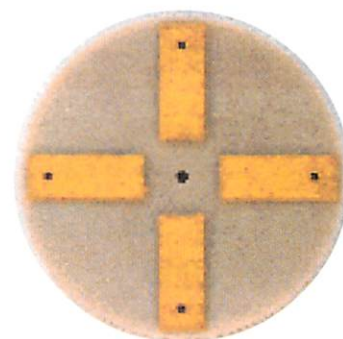


図 4-4 小型マイクロ波アンテナ

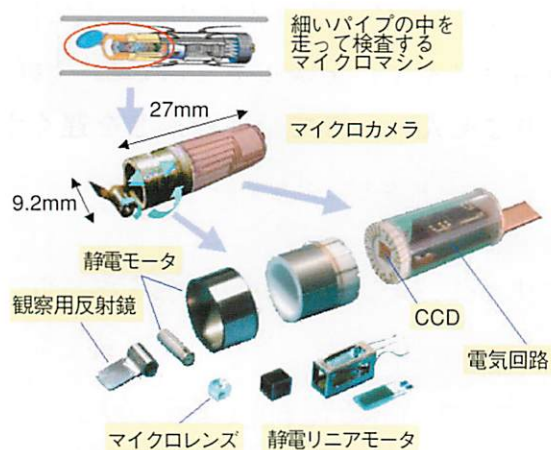


図 4-5 マイクロカメラの分解図

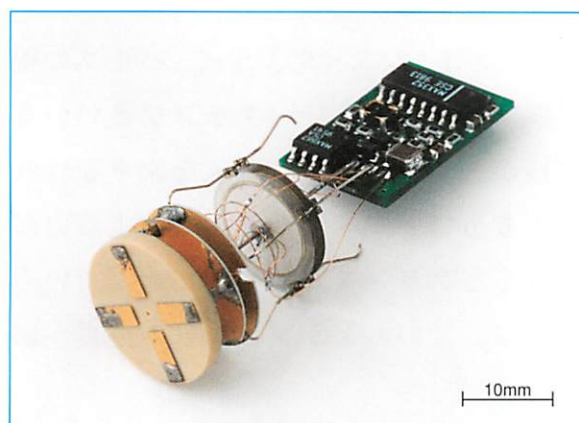


図 4-6 ワイヤレス配管内移動マシン

システムに、はっています。

図 4-5 は、マイクロマシン技術で作った小さなカメラの写真です。大きさは小指の先と同じくらいです。

これらの部品の中で、エンジンとアンテナの部分を組み合わせて作ったシステムの写真が図 4-6 に示した写真です。「ワイヤレス配管内移動マシン」と呼んでいます。

2) 複数がつながってパイプの外側を検査するマイクロマシン

(1) 研究のねらい

発電所で発電機を動かすために、水を

沸騰させて熱い蒸気を作る部分には、たくさんのパイプが並んで立っています。ですからパイプとパイプの間のすき間は小さく、大きな機械が入っていくことができません。マイクロマシンなら、小さいので、このすき間から入って行くことができます。そこで、このすき間からひとつずつ入って行って、中でつながって検査をすることができるようにするための研究開発をしています。

(2) 概要

図 4-7 に示したのが、研究をするために作っているマイクロマシンで、「細管群外部検査試作システム」と呼んでいます。このシステムは、パイプの間を一台ずつ目的のパイプまで動いていき、パイプの根元でたくさんのマイクロマシンがつながってパイプをぐるっと取り巻き、いっせいに登っていきます。この状態を示したのが図 4-7 です。このシステムでは、登りながら、パイプにできた小さな傷などを見つけていきます。図 4-8 に示すように、一台のマイクロマシンは、移動のためのモーター、進む速さを遅くする部品（減速・走行デバイス）、つながるための部品（コネクタといいます）、傷を見つけ

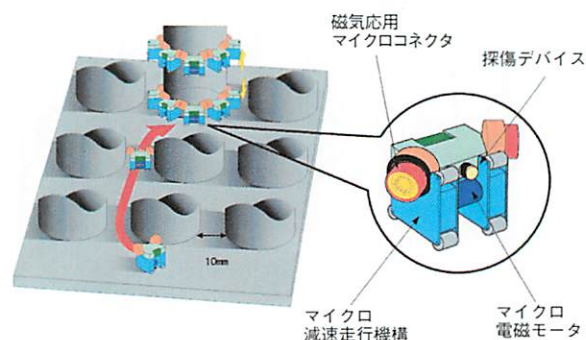


図 4-7 細管群外部検査試作システム

る部品などからできています。

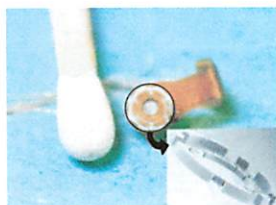
(3) 構成デバイス

移動のためのモータはマイクロマシンの中に入るように小さくしなければなりません。また、マイクロマシンを動かせる力も必要です。電線を鉄の棒に巻いて、電気を流すと磁石のように、鉄や磁石をひきつける力が生まれます。この力を利用したのが電磁モータと呼ばれるモータです。このひきつける力は、電線をたくさん巻くほど強くなります。このマイクロマシンでは、小さくてもできるだけ多くの電線を巻けるように、形や作り方に工夫をしています。そのモータの写真が図4-8の(a)です。

このマイクロモータは、非常に速く回

りますので、ゆっくり走らせるためには、車輪（タイヤ）をゆっくり回さなければなりません。そこで、進む速さを遅くするための部品（減速・走行デバイス）を作りました。この部品は、放電加工という方法で作った、いくつかの小さな歯車で作られていて、モータの回る速さを1/200位にします。つまり、モータが200回まわると車輪が1回回るようにできるのです。この減速・走行デバイスの写真が図4-8の(b)です。

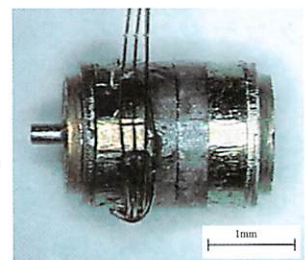
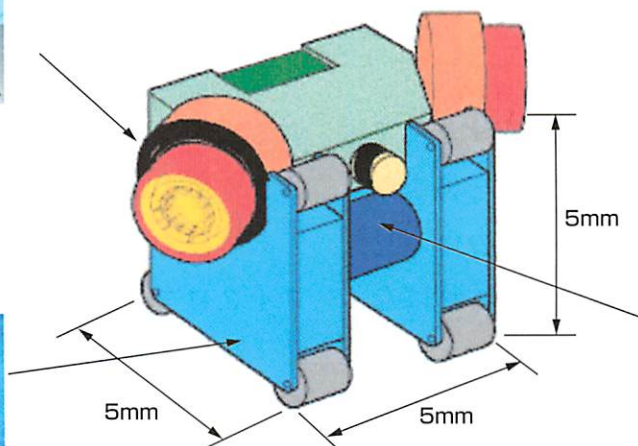
つながるための部品（コネクタ）は、磁石と電磁石でできています。自動でつながったり、はなれたりするために、形や作り方に工夫をしています。このコネクタの写真が図4-8の(c)です。



(c) マイクロコネクタ



(b) 減速・走行デバイス



(a) マイクロモータ

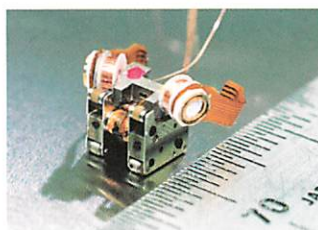


図4-8 単体走行マイクロマシンの仕組み

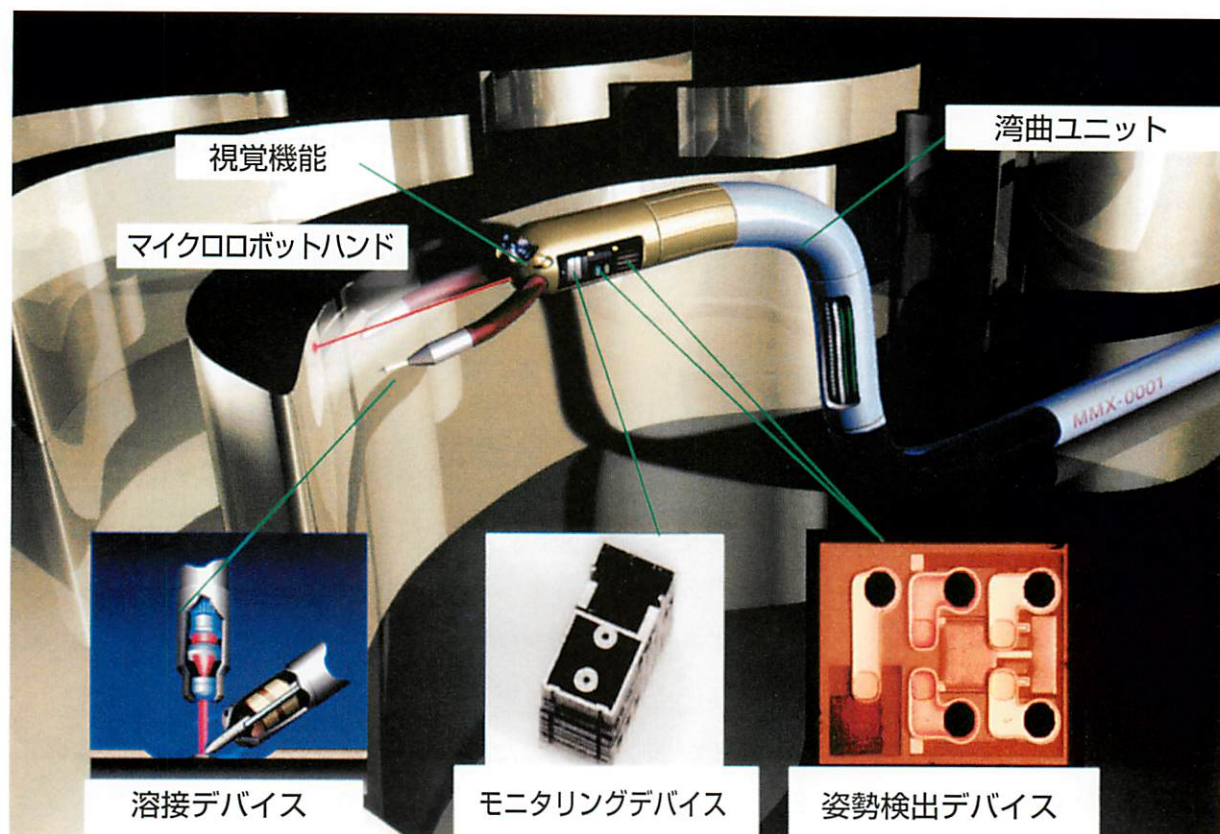


図 4-9 複雑な機械の内部に入って作業するマイクロマシン

3) 複雑な機械の内部に入って作業する マイクロマシン

(1) 研究開発のねらい

「細いパイプの中を走って検査するマイクロマシン」や、「パイプの外側を検査するマイクロマシン」で、パイプの傷が見つかったら、その傷をなおさなければなりません。せっかくパイプを分解しないで検査できたのですから、修理も分解しないでおこないたいものです。そこで、パイプの傷を修理するマイクロマシンの研究をしています。

(2) 概要

このマイクロマシンは、図 4-9 に示すように、8 mm の太さで、へビのような細長い形をしています。パイプは、まっ

すぐなものばかりではなく、曲がっているところもあるので、そこをうまく通れるように、工夫がしてあります。作業をする人が操作すると、先端の部分が曲がるように湾曲ユニットという部品が入れてあるのです。その他に修理をする道具、マイクロマシンの向きを教えてくれる部品（姿勢検出デバイスといいます）、傷の大きさや傷のある場所をみるための部品（モニタリングデバイスと呼んでいます）などが、このマイクロマシンの中に入っています。それでは、マイクロマシンの中に入っている道具や部品をもう少し詳しく紹介しましょう。

(3) 構成デバイス

先端を曲げるための湾曲ユニットとい

う部品は、小さな風船を3つつなぎ合わせたもので、空気の入れ方によっていろいろな方向に曲げることができます。

修理をするための道具は、レーザ溶接デバイスです。傷にレーザ光線をあてて溶かしてしまいます。このとき、できるだけ傷に正確にレーザ光線があたるようにマイクロロボットハンド(図4-10を見てください)をつかいます。また、溶接で熱くなってしまうのを防ぐため、冷やすためのガスがマイクロマシンから吹き出すようにしてあります。

マイクロマシンをパイプの中に入れたとき、暗いトンネルの中を行くのと同じです。私たちがトンネルの中を進むとき、トンネルの中でどちらが上でどちらが下かは考えるまでもなくわかります。これは、私たちの体の中に「さんはんきかん」という上か下かを感じる部分があるからです。ところが、暗いトンネルの中で、どちらが北で、どちらが南かはわかりません。私たちの体には、北の方角を感じる部分がないからなのです。同じように、マイクロマシンにも上と下をわかるような

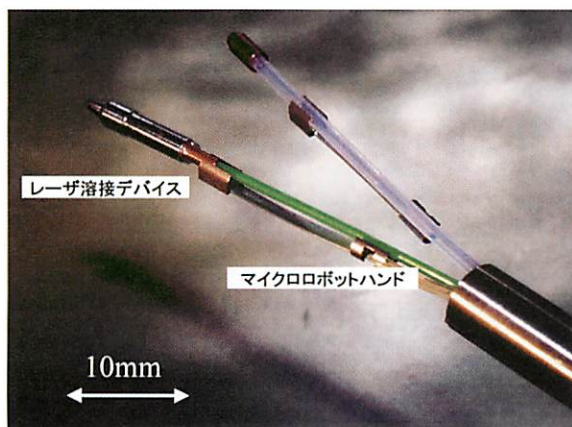


図4-10 レーザ溶接デバイスとマイクロロボットハンド

部品が必要です。なぜなら、パイプの中を進んでいくと分かれ道にあるパイプが上にのびているのか、下にのびているのかわからなくなってしまうからです。マイクロマシン技術で小さな姿勢検出デバイスを作りました。

モニタリングデバイスは、「細いパイプの中を走って検査するマイクロマシン」に使ったものと同じような小さなカメラです。

2. マイクロファクトリ (マイクロマシンをたくさん使った小さな工場)

(1) 研究開発のねらい

ファクトリというのは、工場という意味です。ですから、マイクロファクトリというのは、“小さな工場”という意味になります。マイクロマシン技術が発達してくると、いろいろな物を小さく作ることができるようになります。工場で使われている機械を小さくすることによって、マイクロファクトリ(小さな工場)ができる可能性があります。しかし、大きな工場で使われている機械をそのまま小さくするだけでは、マイクロファクトリはできません。なぜなら、機械が小さくなると出せる力が小さくなったり、動ける範囲が狭くなったりするからです。そこで、マイクロマシン技術を使って機械やそれを構成する部品を小さくすると同時に、機械が小さくなっても、きちんと役に立つようにするためにはどうしたらよ

いかを研究開発しています。この研究開発では、いろいろなことを試すために、マイクロファクトリのひとつの例としてギヤボックスを製造するマイクロファクトリを作っています。

それでは、ギヤボックス製造マイクロファクトリを紹介しましょう。

(2) 概要

ひとくちに工場といっても、自動車をつくる工場、時計をつくる工場、乾電池をつくる工場、テレビをつくる工場など、いろいろな工場があります。そして、工場の中では、作っている物に合わせて、たくさんの機械があります。ですから、マイクロファクトリもひとつだけではありません。いろいろなマイクロファクトリ

があるのです。しかし、工場の機械は、物をつくる機械（加工）、作ったものを運ぶ機械（搬送）、物を組み立てる機械（組立）、作った物を検査する機械（検査）の4つに分けられます。

ギヤボックス製造マイクロファクトリは、腕時計の中に入っている歯車のような小さくて精密な物を作り、組み立てる工場です。このマイクロファクトリでは、工場にある4種類の機械（加工機械、組立機械、搬送機械、検査機械）を全部まとめて、机の上に載るくらいの大きさにしようとしています。

図5-1は、このシステムの完成予想図と主な構成デバイスの写真です。右側の部分が加工の機械と検査の機械、真ん中

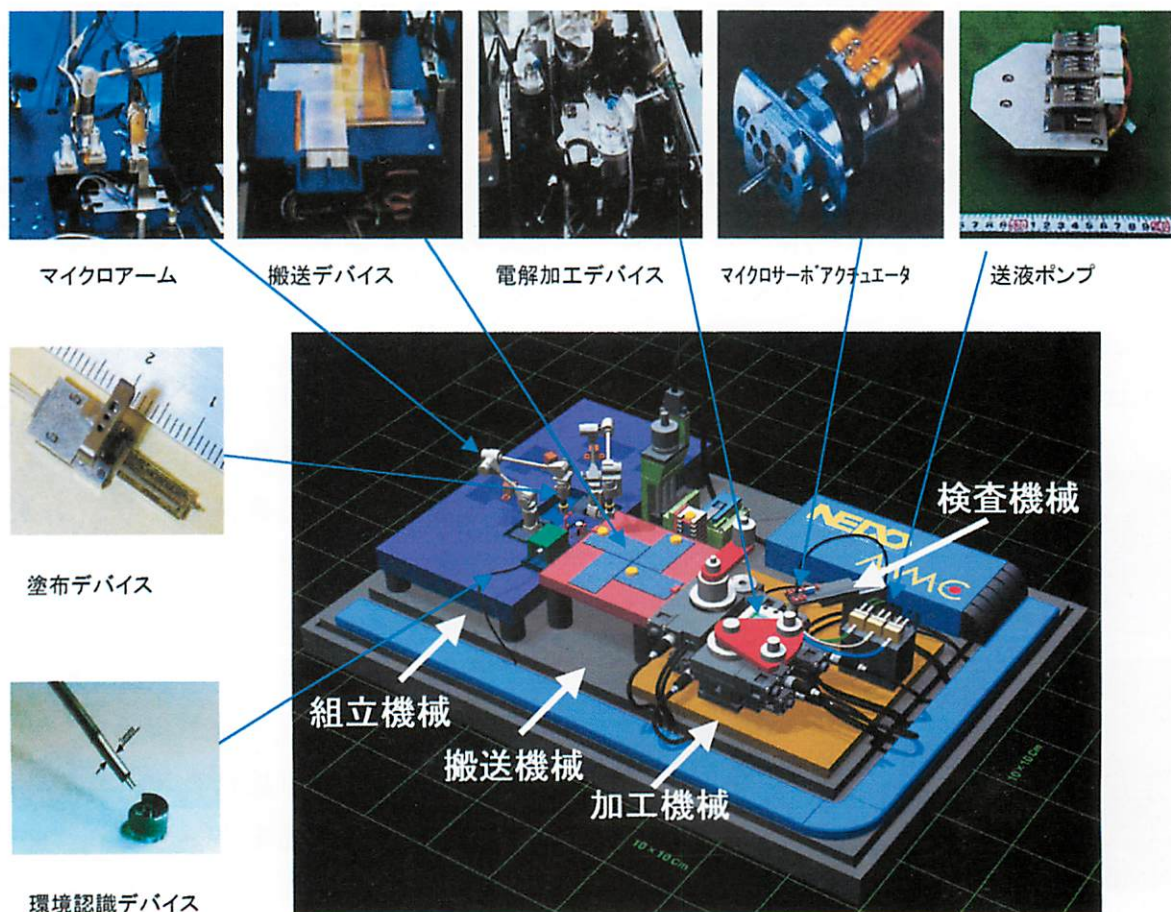


図5-1 マイクロ加工・組立用試作システムの完成予想図と主なデバイス

の部分で搬送機械、左側の部分が組立機械と検査機械です。大きさは、約1 m × 1 mです。以下に、おもな構成部品とその働きを紹介します。

(3) 構成デバイス

まず、右側の加工機械では、細い針で作りたい物の形を作ります（この機械を電解加工デバイスと呼んでいます）。電解加工というのは、特殊な液（加工液）の中で電気を流しながら金属材料の一部分を溶かしたり、逆に、金属をつけたりしながら思いのままの形をつくる方法です。この方法では、かたい金属を削り取るのにも、力はほとんど必要ありません。そのために機械をがっちりと作る必要がないので、軽く小さな機械とすることができのです。なお、加工液や洗浄する水を加工する容器に入れるために、何台ものポンプが必要です。そこで、場所をとらない小さなポンプも開発しています。図5-2に示したのは、この機械で作った歯車の形（型といいます）です。

図5-1に示した完成予想図の真ん中の部分は、搬送の機械です。マイクロマシン技術で電磁石（電気を流すと磁石にな

るもの）をいっぱい並べてあります。ひとつの電磁石の大きさは1 mmで、搬送機械の中には、12,800個の電磁石がはいっています。これらの電磁石をうまく切り替えていくことで、この機械の上にある磁石に載せて部品を思った方向に運ぶことができます。大きな工場で使われているベルトコンベアと比べると大きさを小さくすることができます。

完成予想図の左側にあるのは、組立の機械です。マイクロアームが歯車などをつかんで組み立てていきます。

マイクロアームは、小さな腕という意味です。人間のかわりに仕事をするのでロボットいわれることもあります。このマイクロアームには、超音波モータという力の強いモータを使っていますので、小さくても大きな力で仕事ができます。また、どれだけモータが動いたかを正確に計るエンコーダという部品も入っているので、正確な動きを繰り返すことができます。このエンコーダもマイクロマシン技術で作っています。ひとつのマイクロアームには、6つの超音波モータがくみこまれていて人間の腕のような様々な動きをすることができます。

この組立機械には、いろいろな物をつかめるように、3つの道具があります。マイクロアームは、つかむ物にあわせて、道具を自動的に取り替えて使います。マイクロアームの先端に取り付けて物をつかむ道具のひとつが真空チャックです。吸い付けることで物をつかみます。これは、簡単な実験で確かめることができます。

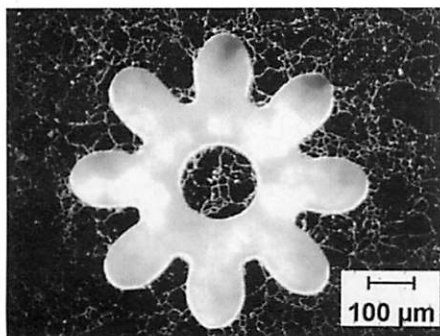


図5-2 歯車の型

（大きさは、シャープペンの芯の太さくらい）

ストローと10円玉くらいの大きさに切った紙を一枚用意して下さい。次にストローをくわえて紙を吸い付けて下さい。簡単にストローの先に吸い付けることができるでしょう。真空チャックは、この原理を利用しています。ところで、同じように、10円玉を吸い付けて下さい。多分、吸い付けることができないでしょう。なぜなら、10円玉は紙よりもはるかに重いからです。マイクロファクトリで組み立てるものは、小さくて軽いものなので、この吸い付ける方式が使えるのです。ところで、この真空チャックは、スクロールタイプというもので、図5-3にその本体部を示します。中のうずまきを回転させることで、吸い付ける力を作っていきます。

組立機械では、組み立てた小さな部品がバラバラにならないように接着剤をぬる道具も持っています（塗布デバイスといいます）。光をあてるとふくらむ物質を使って、接着剤をほんの少しずつ正確に絞り出すことができます。真空チャックや塗布デバイスなどの道具は、小さなアームの動きの邪魔にならないように、マイクロマシン技術を使って軽く、小さ

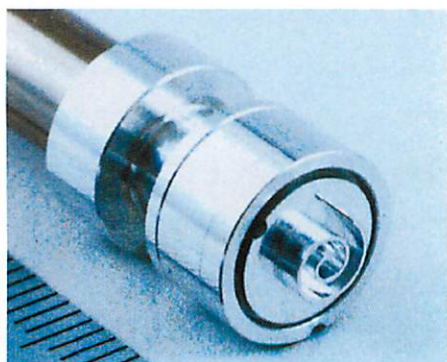


図5-3 真空チャック（本体部）

く作られています。

ところで、組み立てた歯車などは小さいのでちょっと見ただけでは、うまく組み立てられているかどうかわかりません。そこで、小さな隙間に入り込んで、歯車に近づける小さな細長いカメラ（環境認識デバイスと呼んでいます）が取り付けられています。また、このカメラを正確に動かすための小さなモータ（マイクロサーボアクチュエータといいます）もマイクロマシン技術で作られています。

3. ^{いりよう}医療応用 マイクロマシン技術

（1）研究開発のねらい

人のからだを傷つけることをできるだけ少なくして診断・治療^{ちりょう}を行うために、からだの内部の複雑で狭い空間に入り、病気におかされている部分に直接近づき、診断や治療^{ちりょう}を行うマイクロマシンの実現を目指して以下の研究開発を行っています。

（2）概要

図6-1に示すように^{いりよう}医療応用マイクロマシンは、人体内部の狭い空間に容易に進入可能なように、外形1.5mmの細長いチューブ状の形（カテーテルといいます）をしています。先端部にはあらゆる方向に曲がるためのしかけ（湾曲機構^{わんきよく}）がついており、その外壁には、からだの内部の組織に当たったこと（接触圧力）を感じる圧覚センサが複数取り付けられています。ひとのからだの組織は傷つきやすいものですが、この圧覚センサと曲がるし

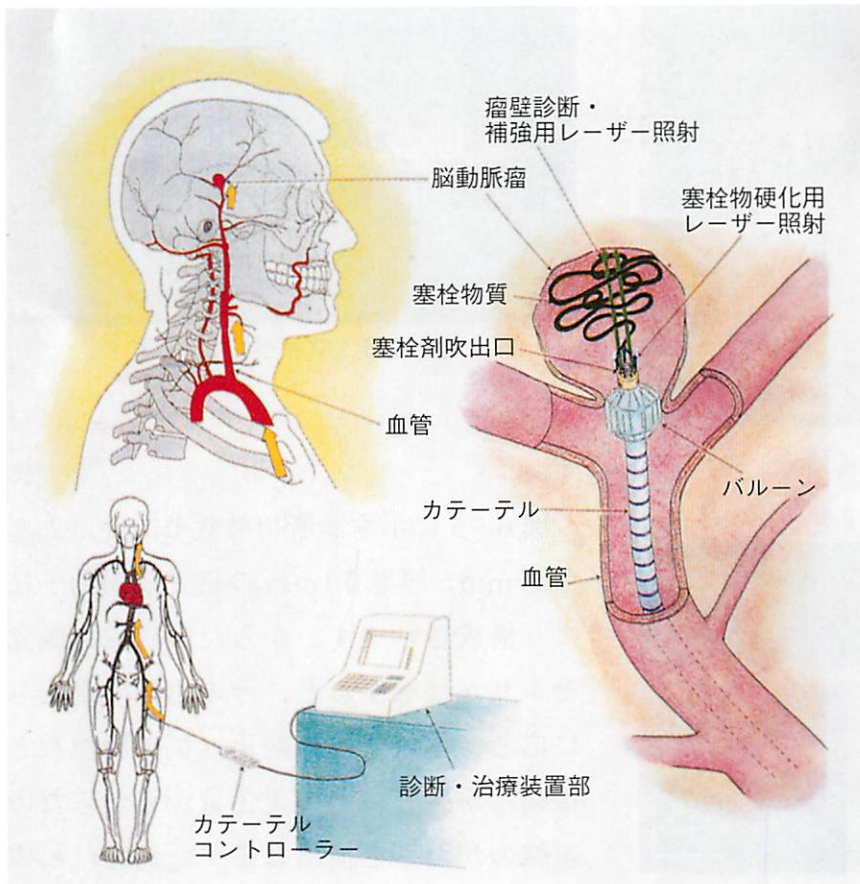


図 6-1 医療応用マイクロマシンシステム概念図

かけを組み合わせることにより、カテーテルの先端部が大きな力で組織に衝突することをふせぐことができます。からだの組織の観察や、診断・治療は、チューブの真ん中に空いている空間を利用して行います。病気におかされている部分を診断するために、からだの組織のかたさを検出するマイクロ触覚センサを開発し、治療をするために、病気におかされている部分だけを熱的に治療するマイクロレーザの開発を進めています。

(3) 構成デバイス

このチューブ状のマイクロマシンは図 6-2 に示すように、中空部に観察用の極細内視鏡や診断・治療用のプローブを通して使用することになります。これらの

装置を組みこんだ状態で先端部を曲げるしかけとして、チューブの肉の部分に、熱したり冷やしたりすると伸び縮みする材料（形状記憶合金）で出来た細いワイヤーを配置した曲がるしかけ（湾曲機構）を開発しています。形状記憶合金は体積当たりの力の発生量が大きく、内視鏡を通して先端部を 90° 以上曲げることが可能です。図 6-3 に示す先端部の圧覚センサはシリコン半導体ひずみセンサと

いうデバイスを用いて、直径 1.5mm の先端部材の周囲に 3 個以上配置する研究を行っています。このセンサの出力は図 6-4 に示すように、チューブの外壁にレーザ加工とメッキの技術によって銅線をらせん状にした電気配線により根元まで送られます。そして、からだの内部の組織に当たったこと（1g 程度の小さな圧

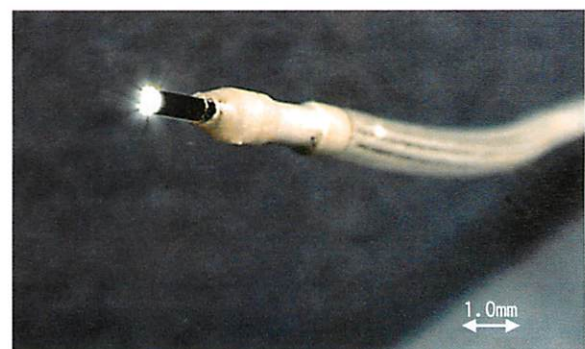


図 6-2 マイクロ湾曲カテーテル

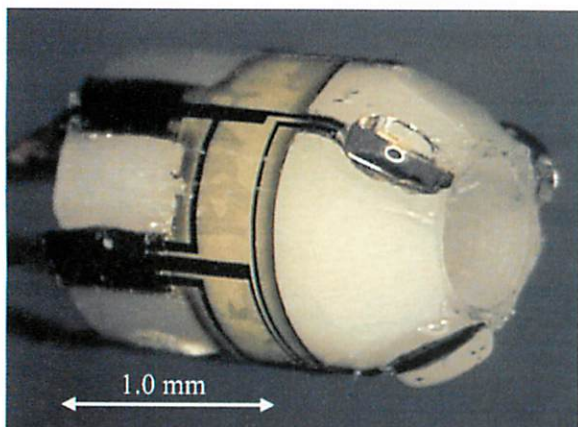


図 6-3 圧覚センサ

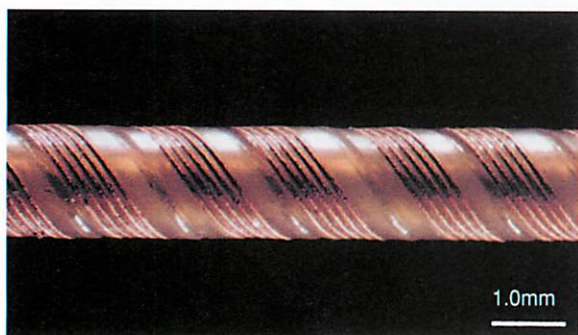


図 6-4 螺旋（らせん）配線

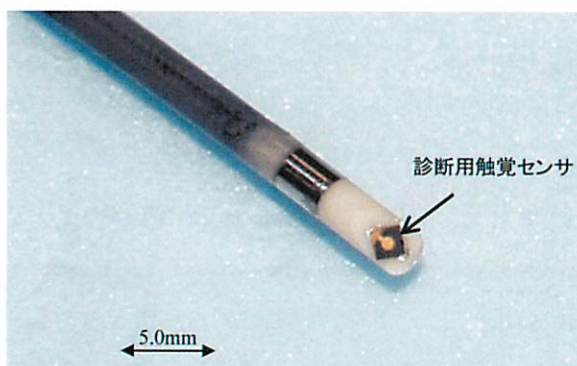


図 6-5 診断用触覚センサ

力)を感じると、当たった側と反対方向に自動的にチューブ先端部を曲げる動作をしてからだの組織をきずつけるのを防ぐことができます。この自動的に曲がるしかけにより、例えば脳の血管のように、複雑に曲がった細い血管でもこのマイクロマシンは容易に進入することができます。

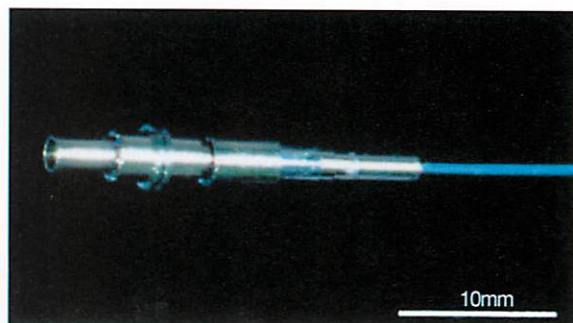


図 6-6 マイクロレーザ

す。

図 6-5 に示す診断用触覚センサは大きさ 1 mm、厚さ 0.1mm の超音波振動子により構成されます。からだの組織に触覚センサが接触すると、その組織のかたさに応じて電気信号の変化（振動周波数と振幅）が生じ、その変化量からからだの組織のかたさを検出します。例えば組織の一部にガンが発生するとその部分は周りの正常組織とはかたさが変わります。この触覚センサを用いることにより病気におかされている部分やそのおかされている程度を診断することができます。おかされている部分の治療は図 6-6 に示すマイクロレーザにより加熱治療を行います。このレーザはからだの組織で吸収されやすい波長（ $2.8 \mu\text{m}$ ）の光を使い、最小限のエネルギーで効率良く安全な治療（病気におかされている部分だけを加熱治療）を行うことができます。さらに、レーザファイバでは、この波長の光を効率よく通すことができないので、カテーテルの先端部で効率よく波長を変換するマイクロレーザデバイスの研究を進めています。

4. マイクロマシンを支える技術

人間に役に立つマイクロマシンを実現するためには、図7-1（テクノツリー）に示すように様々な技術が必要になります。小さな部品を作ったり組み立てたり

するための作製技術をはじめとする基盤技術、これらの基盤技術を使ってセンサやアクチュエータなどのマイクロマシン用の部品（微小機能要素）を開発するデバイス技術、いくつかのマイクロマシン用部品を組み合わせる実際に役に立つマイクロマシンを作り上げるためのシステ

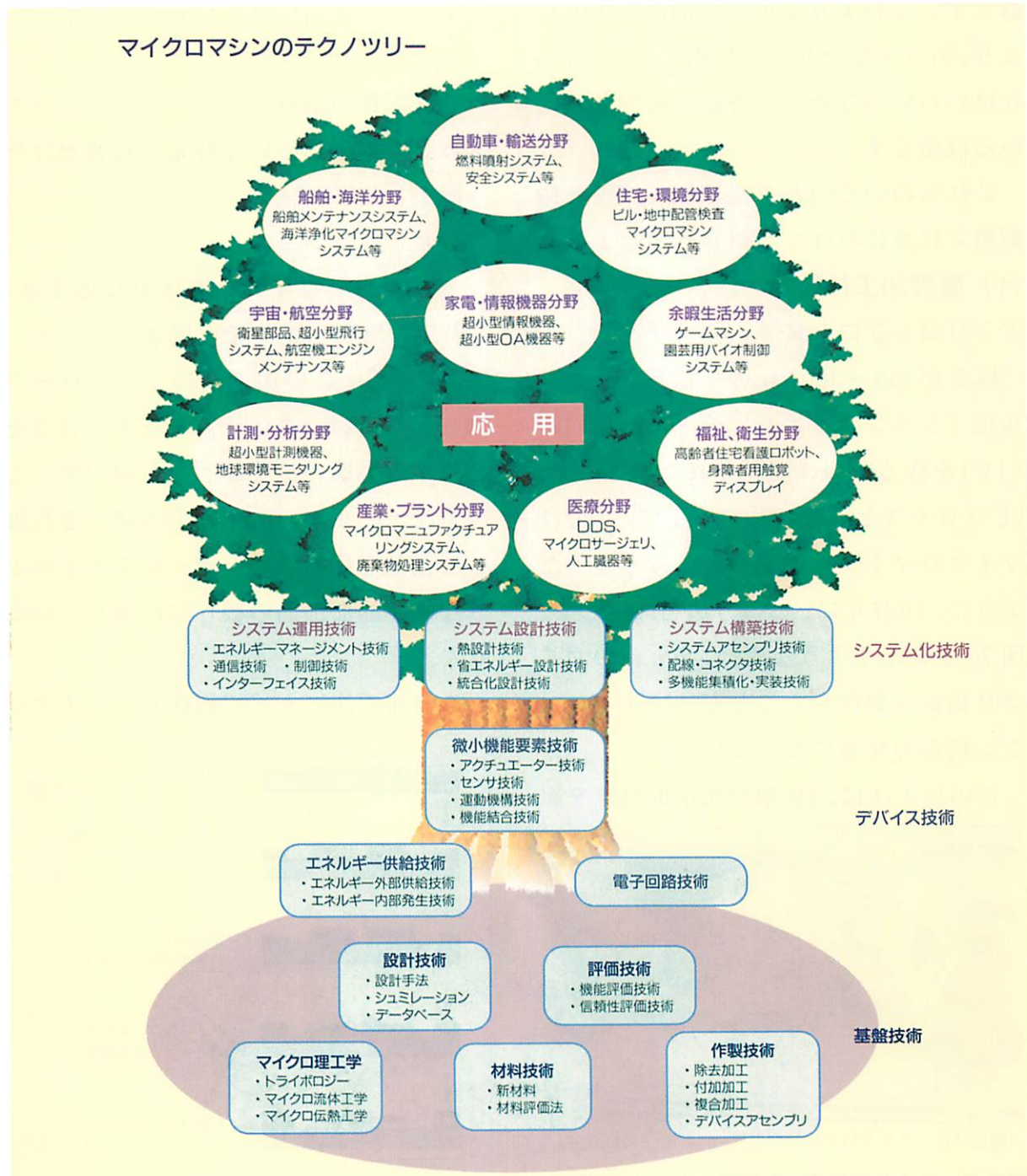


図 7-1 マイクロマシン技術のテクノツリー

ム化技術が必要です。ここでは、これら数多くの技術の中から、代表的な技術のいくつかを、まとめてご紹介しましょう。

1) マイクロマシンを作る技術(作製技術)

マイクロマシンは大きさが数百 μm から数 μm 程度の多数の微小な部品で作られます。このような小さな部品を加工したり、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。

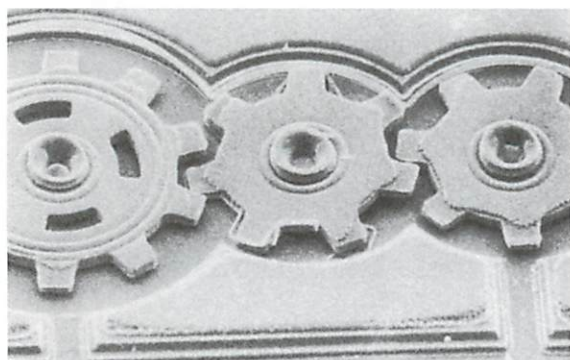
これらのいくつかを微細加工技術と微細組立技術にわけてご紹介しましょう。

(1) 微細加工技術

①シリコンプロセス

厚さが200～300 μm の単結晶シリコン基板（シリコンウエハ）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。すでにマイクロマシンの歴史のところで述べたように、1987年に、この方法を応用して、図7-2に示すような直径125 μm のマイクロ歯車を製作したことが、マイクロマシン技術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



(藤田博之：マイクロマシンの世界, p14, (株)工業調査会)

図7-2 マイクロ歯車(多結晶シリコンで作った直径125 μm のギアトレイン)

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)を一様な厚さで塗っ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当て、マスクによって光が通った部分、または光が通らなかった部分のレジストを薬品で溶かして取り除く。

(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の材質だけを溶かして取り除く。

(c) デポジション

ウエハ上でガスや液体を反応させ、特定の物質ウエハを堆積させる。

図7-3はこの加工法によってロータ(回転する円板)と、それを支える軸受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、ボールやネジのような立体的な部品の製作には適していません。

この加工法によって製作したマイクロ

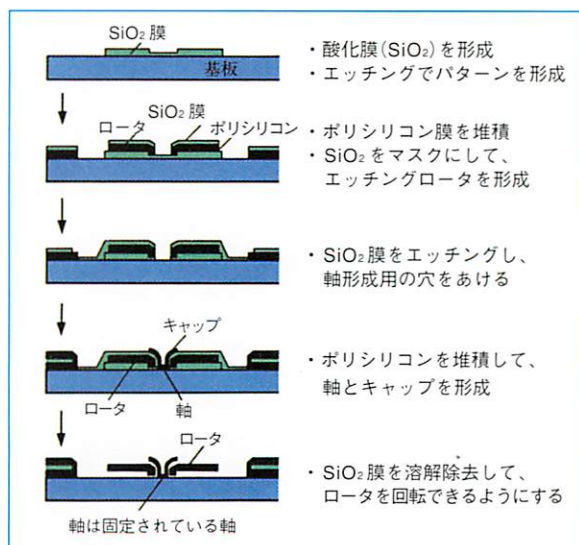


図7-3 シリコンプロセスの例

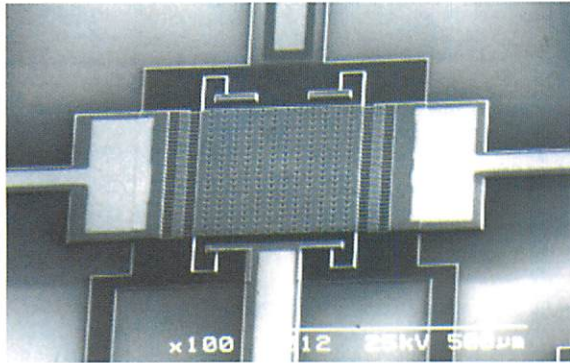


図 7-4 マイクロジャイロ

ジャイロを図 7-4（前出）に示します。厚さ $5\mu\text{m}$ のポリシリコンの薄い膜を加工してシリコンウエハ上に作った $400\mu\text{m} \times 800\mu\text{m}$ の大きさのマイクロジャイロです。ジャイロは、姿勢を検出するためのセンサで、ラジコンのヘリコプターなどにも使われています。

② LIGA プロセス

これはドイツのカールスルーエ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、「リソグラフィー」、「電気メッキ」、「成型」による加工を意味します。この加工法は、図 7-5 に示すように、上に書いた 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 線を用いたリソグラフィーにより、数百 μm を越える厚いレジストを感光させて、型を作ります。さらに、この型に電気メッキを行って、成型用の金型を作ります。この方法によって、微小部品をたくさん作る、すなわち量産することができるようになりました。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

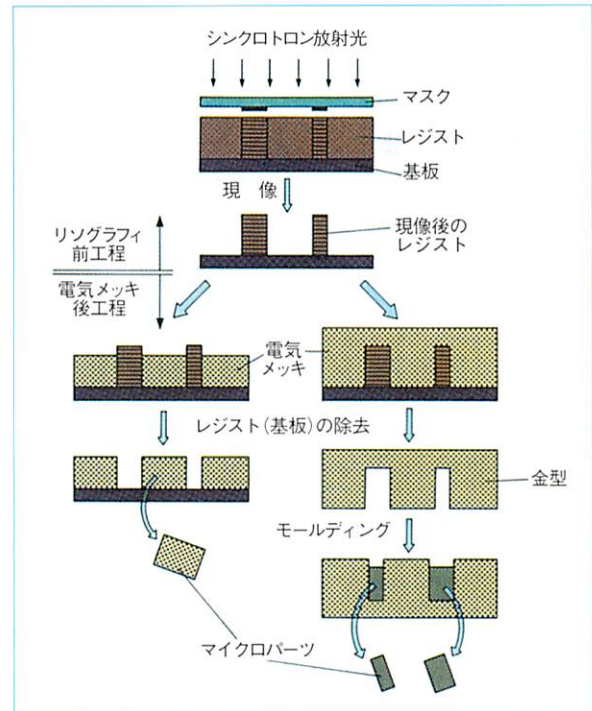


図 7-5 LIGA プロセスの例

図形を投射する方法であることから、部品の形状は、上に述べたシリコンプロセスと同様に、平面的なもの（高さ方向に形状が変わらないもの）に限られています。

この加工法によって製作した構造体を図 7-6 に示します。直径 $20\mu\text{m}$ 、高さ $140\mu\text{m}$ の圧電セラミックス製の柱が列をなして並んでいますが、この構造体は、人の体を超音波で検査するための超音波セ

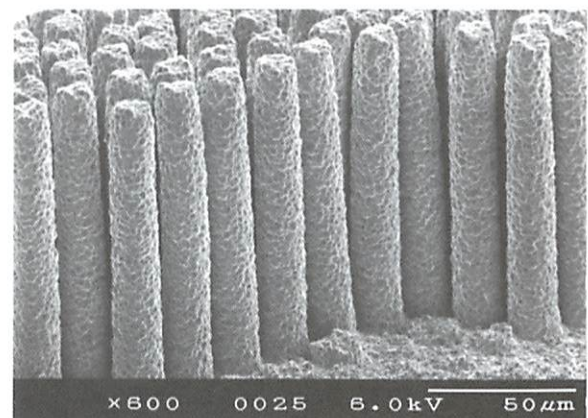


図 7-6 LIGA プロセスにより製作した構造体

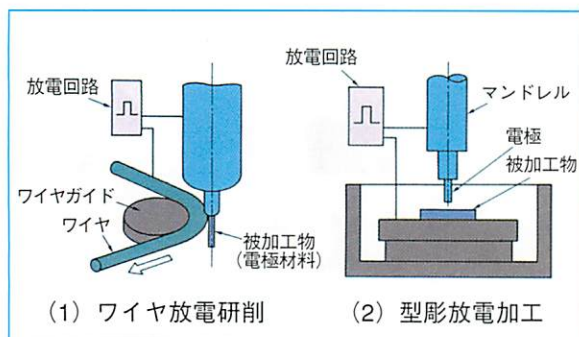


図 7-7 マイクロ放電加工

ンサに使われることになっています。

③放電加工

電極と加工したい材料との間で放電させ、材料の表面を一部分だけ溶かし、飛散させて取り除く加工法です。図 7-7 はその加工法の概略を示しています。細か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用いた型ほり放電加工を組み合わせ加工を行います。

この放電加工は、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。

この加工法によって製作した外径 2.2mm の遊星歯車機構を図 7-8 に示します。この歯車機構とモータを組み合わせ

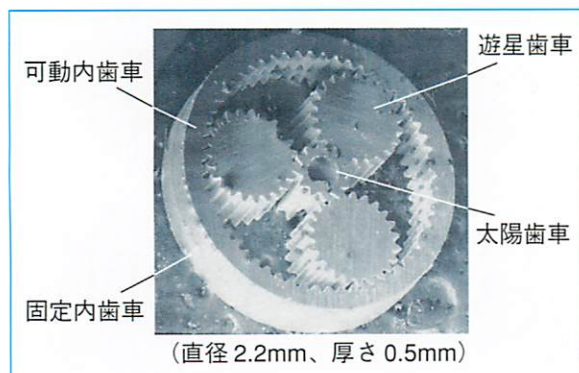


図 7-8 不思議遊星歯車減速機構

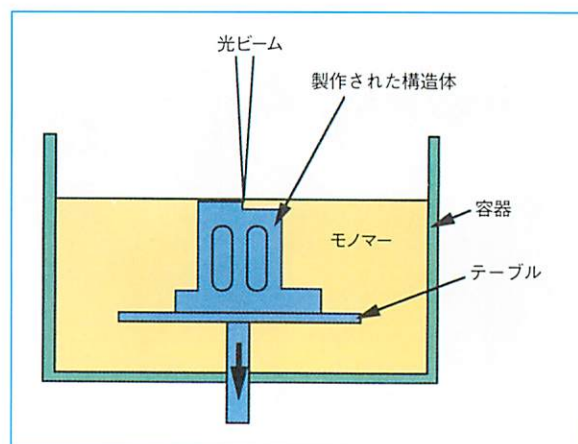


図 7-9 光造形法

せれば、モータの回転数を 200 分の 1 に減速させることができます。

④ビーム加工

レーザ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は適していません。

図 7-9 は光ビームを使う光造形法の例を示しています。光を当てると反応を起こし硬化するモノマー（液体）を容器に入れ、液体中にテーブルを置いて光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ると同様な操作を繰り返すと固化された立体形状ができます。

この加工法で製作したマイクロポンプを図 7-10 に示します。このマイクロポンプは 1 分間に $3n\ell$ ($1n\ell$ は、 1ℓ の 10 億分の 1 という非常にわずかな量) の液体を送ることができます。

⑤機械加工技術（超精密加工技術）

旋盤やフライス盤などの機械加工装置

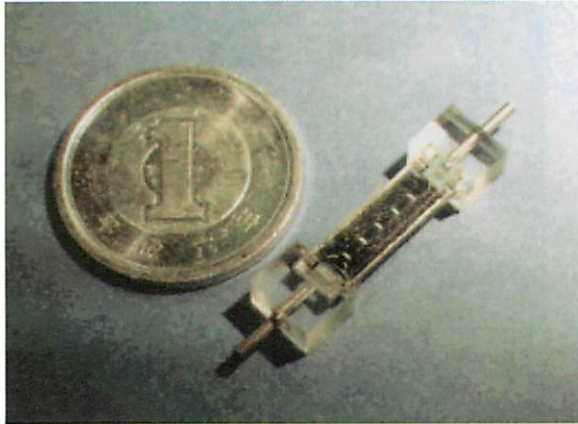


図 7-10 光駆動マイクロポンプ

を使い、材料を削り取って加工する方法です。加工するときに加工する物に力が加わるため、あまり小さなものの加工には適さないと言われていますが、複雑な立体的な形状の高精度な加工ができ、またいろいろな材料を加工できるため、よく使われる方法です。

この加工法の一つである、ダイヤモンドを工具とした切削加工法によって、直径1 mmの円柱の端に製作した能面を図7-11（ファナックの能面）に示します。能面の表面は鏡面になっています。

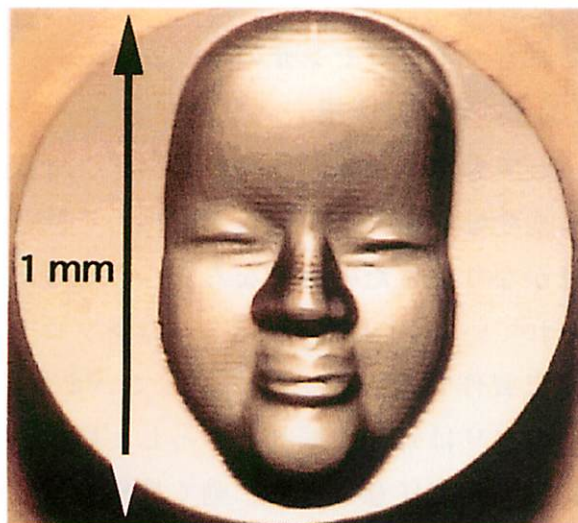


図 7-11 マイクロ超精密加工

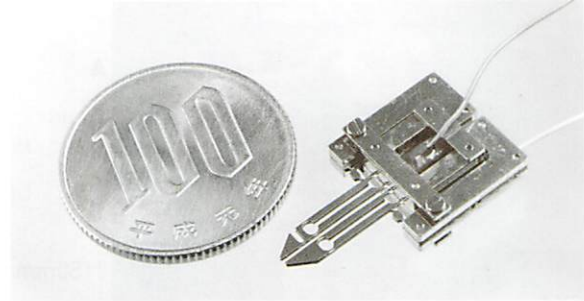


図 7-12 マイクログリッパ

(2) 微細組立技術

① マニピュレーション

微小部品を組み立てるには、それをつか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 μm の部品をピンセットなどでつか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言います。マイクロマシンの組み立てに使うためには、人間の手のように自由に動き、つかむ力を微妙に調節できる機能などが必要です。現在、微小部品をつかむためのマイクログリッパ（図7-12）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。図7-13は、アームの長さが80 mmの7自由度マイクロマニピュレータです。

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などが大変難しくなります。そこで、微量の接着剤を使ったり、組み立てる面を分子の大きさのレベルで平らになめらかにして、接着剤なしで接合したりする方法が研究されています。

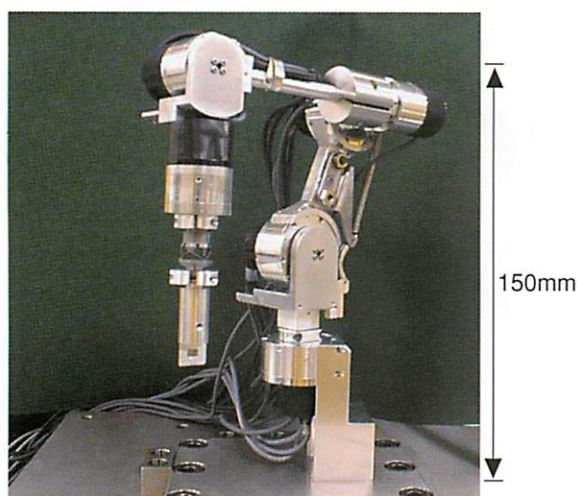


図 7-13 マイクロアーム

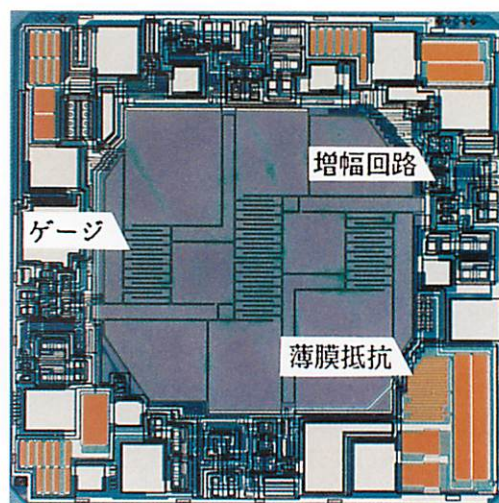


図 7-15 IC 一体型半導体圧力センサー

2) 開発されたマイクロデバイスの例

(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アクチュエータ（モータのように動きを作り出す部品、マイクロアクチュエータと呼びます）が必要になります。私たちが日常見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。図 7-14 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 1 mm で、最高毎分 100 回転します。また、図 4-8 の(a)(前出) は、直径 1.6 mm、

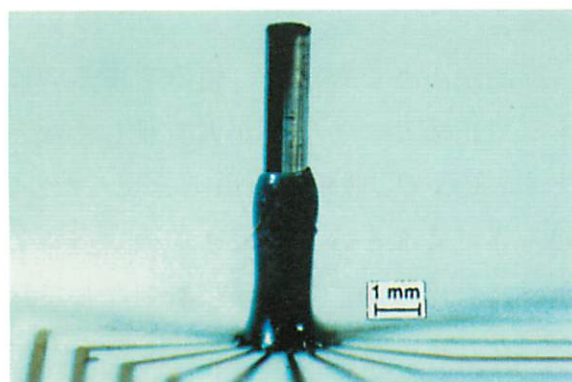


図 7-14 マイクロ静電モーター

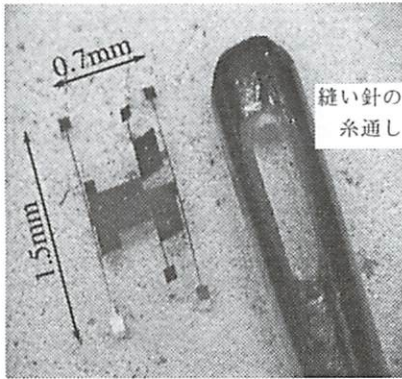
長さ 2 mm のマイクロモータで、毎分 2 万回転します。

(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（微小な動く部分の変形や振動から圧力、力、振動数などを検出するセンサ）、ガスセンサ、イオンセンサ、バイオセンサなどが開発されています。図 7-15 は圧力センサ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 部分がシリコンウエハ上で一体になって製作されています。図 7-4（前出）は、マイクロジャイロですが、これもマイクロセンサの一つです。

(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（メカニズム）は、大きな機械のそれとはかなり違ったものになるだろうと考えられています。図 7-16 はシリコンプロセスで製作した人工アリを示しています。このアリは外部の振動といっしょになって振動して任意の方向に動く機構を持っています。写真（デンソーの移動機構の



(提供：東京大学 下山勲教授)

図 7-16 人工アリ

写真＝前出)は、直径14mmのパイプの中を移動していくマイクロマシンの移動機構です。図4-2(前出)に示すように、圧電材料という電圧を加えると伸びる性質をもった材料をアクチュエータとして使い、伸び縮みをしながら、いも虫のような動きで移動していきます。

(4) マイクロエネルギー供給

マイクロマシンがそれ自身で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。図7-17は、これを実現するために開発されたマイクロ太陽電池を背中に積んだてんとう虫のようなマイクロマシンです。このマイクロマシンは、外部から光を当てただけで走らせることができます。また、図4-4(前出)は、図4-6に示したパイプの中を移動するマイクロマシンに、外部からマイクロ波でエネルギーを与えるためのアンテナを示しています。マイクロ波とは、私たちの家にある電子レンジで使われています。このアンテナと移動機構によって、このマイクロマシンは電線をひっぱることなくワイアレスで、パイプ



図 7-17 マイクロアクチュエータ

の中を自由に移動していくことができます。

〔参考文献〕

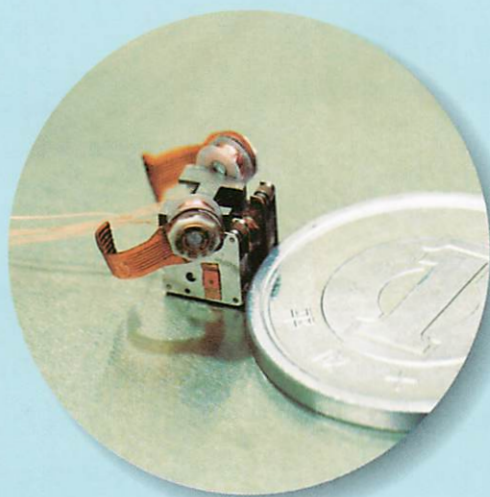
産業グラフ, マイクロマシンとその技術, 財団法人日本経済教育センター, No. 174, 1994

● おわりに ●

これまでの内容を読んできて、難しいなと思われた人もあると思います。一方で、マイクロマシンがどのような技術であるのか、将来の生活や社会や産業にどのように役立つのか、おぼろげながらも、わかってもらえたものと思います。

21世紀がどのような生活になっていくのか、いろいろ議論されていますが、その時に生活している多くの人が知恵を出して創造していくものと思います。現在取り組まれているマイクロマシン技術の研究の成果は21世紀には大きく花開き、こうした新しい生活環境の創造に役立っていくものと思います。

本書は次の世代の人達に現在の取り組みを伝えるために書かれたものです。



マイクロマシンってな～に!?

2000年3月

財団法人マイクロマシンセンター

〒101-0048 東京都千代田区神田司町2-2 新倉ビル5階

TEL.03-5294-7131 FAX.03-5294-7137

無断転載を禁じます