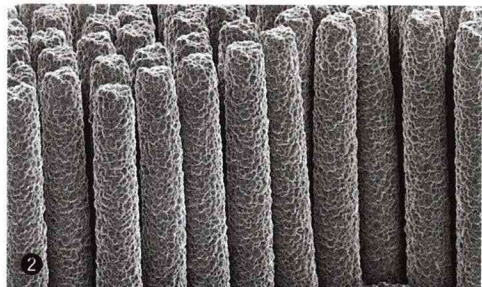
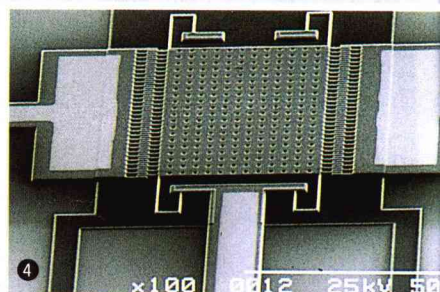


話題の
PROJECT
プロジェクト
マイクロマシン



10mm



SFの世界を現実のものにする マイクロマシン

産業から医療まで幅広く利用可能な技術体系

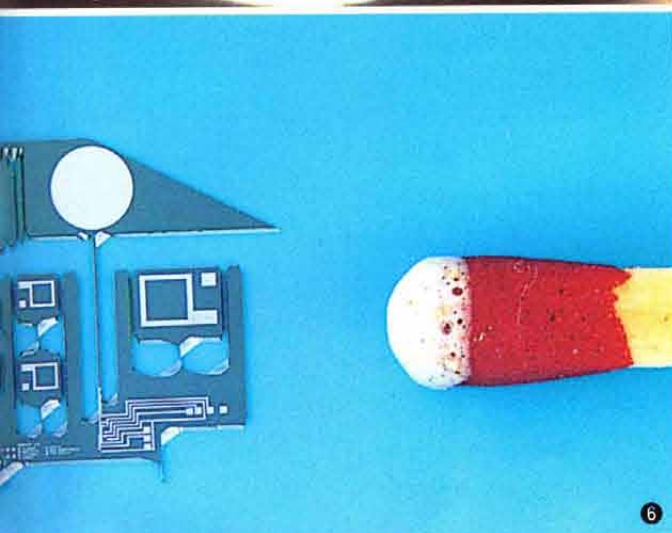
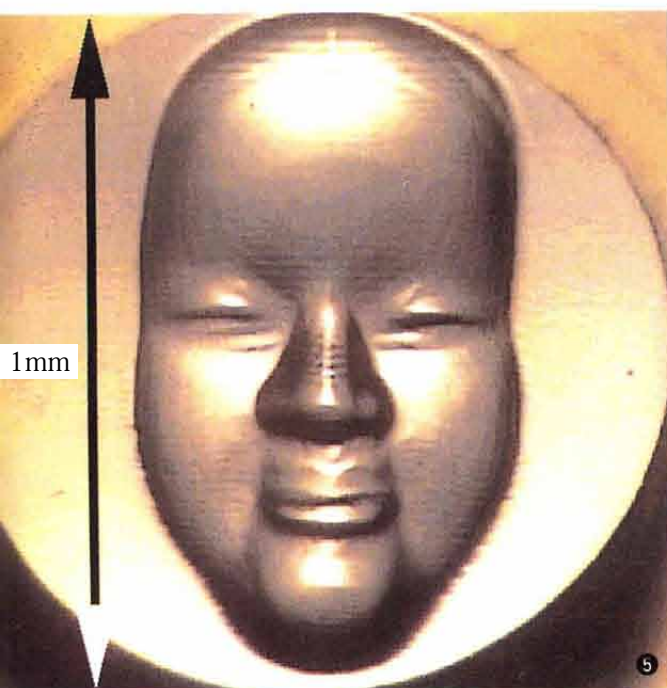
数十年前には夢物語にすぎなかったことが現実のものとなる。

技術開発の驚異をまざまざと見せつけられる瞬間だ。

SFの世界ではお馴染みのミクロの世界への進出も、

基礎的な要素技術の段階では現実のものになってきている。

日本が世界の最先端を走っているというマイクロマシンについて、
現状を報告しよう。



- ① 直径8mmの曲がった配管内を毎秒6mmで移動しながら数 μm の亀裂を検知できるマイクロ検査マシン。直径5.5mm×全長20mm。
- ② セラミックスを直径20 μm 、高さ140 μm の圧電柱列に加工するX線リソグラフィ技術。
- ③ 外径0.2mmのイメージファイバースコープと外径76 μm のSMAコイルバネによる首振り構造体からなる環境認識デバイス。
- ④ 厚さ5 μm のポリシリコンに一体成形された400×800 μm のマイクロジャイロ。
- ⑤ 直径1mmの円柱上に鏡面の肌を持つ能面が浮き彫り加工されている。
- ⑥ 光を2方向に反射するミラー部分と受光素子、位置検知機能の3つを外形10mmのシリコン振動子に集積した小型物体検知センサ。
- ⑦ 半導体製造技術を用いてシリコンウエハー上にモーターや歯車などをつくり込むことに成功した。

半導体製造技術から始まったマイクロマシン

人や機械を縮小してミクロの世界を探検するというシチュエーションが、SF映画でよく使われる。これ自体は夢物語にすぎないが、人間の技術が、ミクロの世界に及んでいるのは、紛れもない事実だ。その最たるものが、MPU（micro processor unit）などの製造工程で使われる集積回路技術だろう。

1987年、アメリカのAT&T研究所において、シリコンウエハー上に、フォトファブ리케이션（photofabrication）技術を用いて400 μm の小さな歯車やモーターを作り込み、動作させることに成功した。これ以降、半導体製造技術がマイクロマシーニング（micromachining：微細加工）に急速に利用されることになる。

機械を製造するとき、これまでの技術では、各パーツを別々に製造し、部品を順番に組み立てていくという方法が一般的だった。しかしこの方法では、目的物が小さくなればなるほど、加工精度の誤差の影響が大きくなる。フォトファブ리케이션技術を応用することで、部品の製造工程と組立を同時に行うことが可能になった。

こうした研究はMEMS（micro electro mechanical system）と呼ばれ、すでに実用化されている。最近、自動車の安全装置として急速に普及が進んでいるエアバッグを、衝突した瞬間に膨らませるための加速度センサなどがその例だ。

一方、メカトロニクス（mechatronics）の分野からのアプローチも行われている。それがマイクロマシン（micromachine）だ。

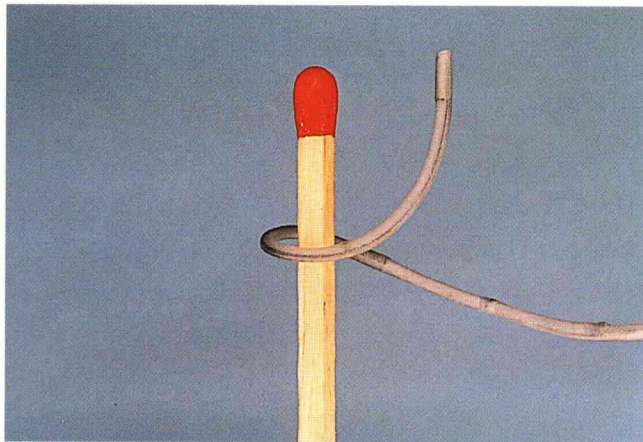
マイクロマシンとは、どのようなものだろうか。この言葉が最初に使われたのは、1988年に発足したマイクロマシン研究会の「小さな機械である」といわれている。財団法人マイクロマシンセンターでは、「マイクロマシンは、微細で複雑な作業を行うために大きさ数mm以下の高度な機能要素から構成された微小な機械」と定義している。

マイクロマシンとして考えられている技術範囲は、微細な世界での物理学から加工技術、材料技術、設計技法、電子回路技術、センサ、アクチュエータ、制御技術、インターフェース技術など多岐にわたっている。このため、具体的な定義がしづらいことは否めない。「高度な機能を持った小さな機械を製造・利用する技術の体系」とでも考えればよいのだろうか。

社会の幅広い分野に応用が可能

では、マイクロマシンの利用分野とはどのようなものなのだろうか。

最近の工業製品はユニット化が進み、熟練者が修理するのではなくユニットごと交換することが多くなった。効率化を考えれば致し方ないことだが、原子力発電所など大型施設とな



SMAを使った管状マイクロマニピュレータ。全体はシリコンゴムチューブで覆われている。

ると、交換されるユニットも大がかりとなり資源の無駄も大きい。また交換時に施設を停止する必要がある、運用上のロスも無視できない。

発電施設の配管内といった狭隘な部分において、高度な検査・補修を自動で行えるマイクロマシンが実用化されれば、安全性の確保と運用の効率化が両立できると考えられる。また光ファイバー網やガス管、電線など、ライフラインの保守・点検といった分野でも大きな効果が期待されている。

また対象物が微細になればなるほど、施設が大型化するというジレンマが指摘されている。工業製品を製造する際に、より精度を高め小型化しようとすればするほど、設備は大型化する傾向にある。当然、コストが飛躍的に増大するため、大量生産を前提としなければコスト対ベネフィットがバランスしなくなる。さらに、少品種大量生産から多品種少量生産へと、工業生産の傾向が移ってきている。

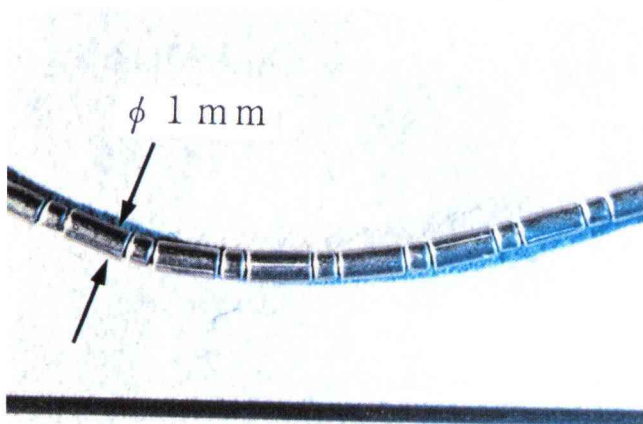
こうしたことを背景に、限られた空間内に加工、組立、搬送、検査といった製造工程にかかわる施設機械類を統合化し、小型工業製品の製造工程を小型化・省エネルギー化しようという試みも行われている。

しかし最も期待されているのは医療分野への応用だろう。

近年、内視鏡やバルーンカテーテルといった検査・治療技術の進歩はめざましいものがある。従来、こうした検査・治療には、患者に入院や手術といった大きな負担を与えていたからだ。さらに小型化が進むことによって、患者負担はより小さくなると期待されている。

またインテリジェント化の期待も大きい。循環器系のカテーテル治療や検査では、操作に熟練を要し、一部の医師・医療機関でしか実施できないという制約がある。触覚センサや自動制御されたマニピュレータ（manipulator）を備えたマイクロマシンによって、特に熟練を要さずにこうした検査・治療が行えるようになることが期待されている。

もう一つの方向として、人工臓器への利用が考えられる。人工臓器には、人工腎臓や人工心臓などの能動的機能を持つ



SMAは単位面積当たりの発生力が大きいので、アクチュエータ素材として有力視されている。

ものと、人工血管、人工骨・関節といった材料的なものが存在する。マイクロマシン技術の応用が期待されるのは、当然前者だ。

能動型の人工臓器といっても、現在開発・利用されているものは、人工透析施設など体外に置かれ、人体とはさまざまなチューブなどを介して接続されるものを中心。体内に埋め込まれるものとしては、心臓ペースメーカーくらいしかない。

最近、臓器移植をめぐる議論がかまびすしいが、現在の人工臓器が生体の機能を一時的に代替する能力しかなく、移植でしか根治の可能性がないことが大きな原因だろう。しかし、体内に埋め込み可能で、長期間にわたって生体機能を代替できる人工心臓などが開発されれば、脳死や移植をめぐる問題も解決される可能性がある。

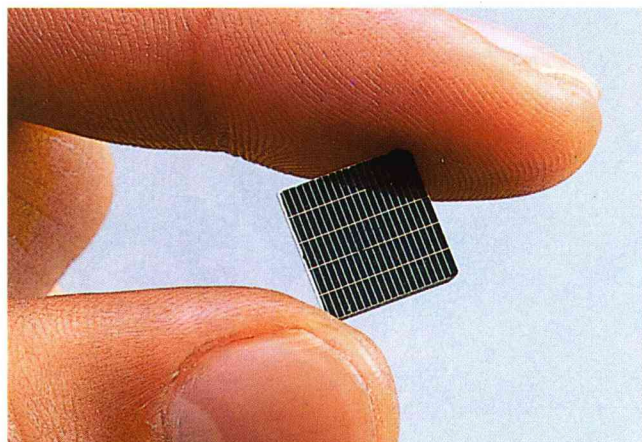
ただ人工臓器に要求される条件は大変ハードルが高く、研究開発は1940年代から始まっているものの、他分野の技術開発と比べて十分な成果があがっていない。生体適合性を解決するための材料分野からのアプローチなどは、これから手が付けられるという段階だ。

個々の技術は実用化段階に

現在マイクロマシンの研究開発は、どこまで進んでいるのだろうか。

マイクロマシンは、1991年に通産省工業技術院の産業科学技術研究開発制度に取り上げられている。10年間に250億円の予算が投入される予定であり、現在は第1期が終了した段階だ。この5年間はどこまで小さくできるのかといった要素技術の開発に当てられ、現在システム化技術の開発段階に入っている。

このプロジェクトは、通産省の総合管理のもと、計量研究所、機械技術研究所、電子技術総合研究所の3つの国立研究所と新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託を受けたマイクロマシンセンターによって進められている。



外部からの光で1cm²当たり最大207Vの電圧を発生させる光電変換デバイス。

マイクロマシンセンターでは、発電施設配管内を自走する検査・補修用マイクロマシン、マイクロファクトリー、体腔内診断治療システムのプロトタイプを完成させる予定だ。

またマイクロマシンセンターには、一般企業29社と日本ロボット工業会など7つの団体が賛助会員として参加している。これらの企業では、マイクロマシンに関するさまざまな研究開発を行っており、センターはそれらの調整と調査研究を中心に活動している。

たとえば、形状記憶合金（shape memory alloy：SMA）を利用した管状マイクロマニピュレータが開発されている。SMAは単位面積当たりの発生力が大きく、アクチュエータ（actuator）への開発研究が進められている。開発された管状マイクロマニピュレータは、直径1mm、全長80mm、幅0.5mm、厚さ0.15mmの板状のSMA一対を直交に配置し、駆動制御に必要なヒーター、センサなどを薄膜に集積化したMIF（multi-function integrated film）を接着してある。位置制御精度は±1mmで、5つの湾曲自由度をもち生物のように自由な動きを実現している。

マイクロマシンでは、作動させるためのエネルギー供給方法も問題となる。外部から有線で電気エネルギーを送り込むことが難しいからだ。このため、マイクロマシン自体にエネルギー供給源を組み込む試みがなされている。

光エネルギーを電気エネルギーに変換する光電変換デバイスは、太陽電池などに利用されているが、マイクロマシンへの利用では、実装面や変換効率の面で課題が多かった。現在、小さな表面積を有効利用するためフレキシブル構造とし、高電圧を確保するために直列接続形成された光電変換デバイスが開発されている。このデバイスでは、1cm²当たり207V、最大出力4.65mWと、世界最高電圧を発生している。

このほか、位置検出や姿勢制御に用いられる400×800μmのマイクロジャイロ、検査対象物を認識するためのマイクロスキャナや立体視認識デバイス、直径1mmの円盤状に複雑な3次元形状を加工できる超精密加工技術などが開発されている。



光電変換デバイスを1cm×1.5cmの昆虫型アクチュエータに曲面実装している。

今後、研究開発はシステム化へと進んでいくわけだが、個々の技術そのものにも産業界から注目が集まっているという。たとえばマイクロ超精密加工技術などは、シリコン以外の材料への利用が可能だからだ。

まったく新しい発想が生み出すもの

マイクロマシンの実現には、幅広い技術の集積・統合化が必要になる。たぶん10年といったタイムスパンでは、完成の領域には達しないのではないかと考えられている。実用化という側面から見ると、センサやデバイスの開発ということに目が向きがちなことも事実だ。逆説的にいえば、だからこそ何か非常にユニークなものが生まれるのではないかという期待も大きいことになる。

東京大学の三浦宏文教授や下山勲助教授は、昆虫規範型マイクロロボットを提唱している。従来のロボット研究が人間や動物の動きをメカニカルに再現する方向で進んでいたのに対して、条件反射に基づいて行動する昆虫をベースに考えたほうが、より生命を感じとれるということから始まった。

現在、下山助教授の研究室では、生きた昆虫の組織の一部や生体そのものを使ったハイブリッドロボット（生物とロボットの両方の資質をもったもの）の研究が行われている。

この世で最も効率の高いアクチュエータは、動物の筋肉組織だといわれている。わずか1万分の1cm³の容積で2kgの加重に耐え、数百gの加重に対しては数μm/secのスピードで動かすことができるという。しかし筋肉のメカニズムは、まだ完全には解明されていない。マイクロマシンの開発には、こうした生体組織のメカニズムからの発想が応用される可能性も高い。

現在の小学生の子供たちが大人になり社会の第一線に立つころ、マイクロマシンが日本の産業技術の基盤となっているかもしれない。

[取材協力・写真提供：財団法人マイクロマシンセンター]