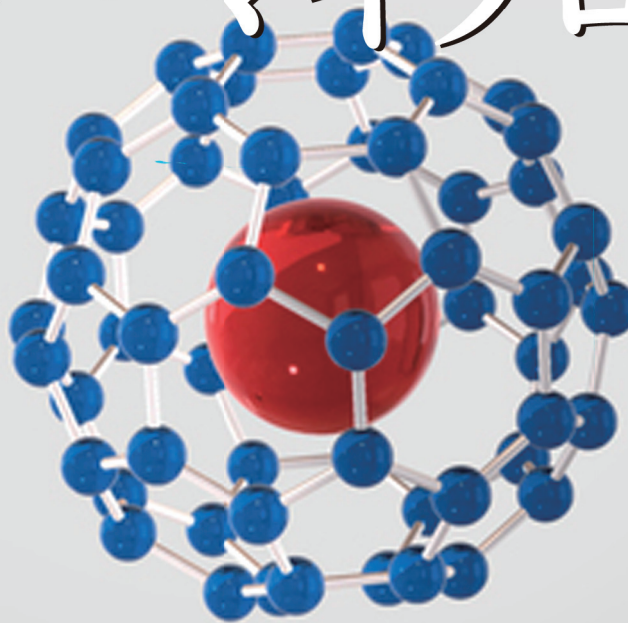




極小技術が切り開く世界 「ナノ・マイクロ技術」



明確な使命を持ったマイクロマシンが、人体内部を進んでいく。超微細な部位にまで進入し、やがて目的の患部に到達すると的確な治療を施こしていく…。こんな「ミクロの決死圏」(’66)という大ヒットSF映画の内容と見まかうようなマイクロ技術が、現実のものになりつつあるという。

また、これよりさらに微細な単位である原子や分子を直接的に制御するナノテクノロジーも、世界各国が国家プロジェクトとし、その研究開発にしのぎを削っている。

IT、医療、エネルギー、バイオ、新素材、環境問題等の多分野に飛躍的な発展をもたらすといわれる「ナノ」、「マイクロ」という極小技術の世界に迫ってみよう。

ナノ・マイクロテクノロジーとは？

ナノテクノロジー・マイクロテクノロジー。どちらも極小レベルの技術だがその内容は、単に扱う技術のスケールの差異ではなく、それぞれの技術を応用する対象も異なる。

マイクロテクノロジーとは 10^{-6}m (1mmの1000分の1) 単位の世界における技術に代表されるものであるが、マイクロマシン(超小型機械)などの、いわば極小機械分野の研究開発が主な対象となる。

一方、ナノテクノロジー(ナノテク)は、原子や分子レベルの制御技術を総称するものとされ、分子の直径が0.1nm (1nmは1mmの100万分の1) であることからこう呼ばれる。こちらは物質を構成する原子や分子を制御する分野での研究

開発が主な対象となるといえよう。

マイクロテクノロジーは冒頭で触れた医療分野をはじめ、各分野で実用化が間近になりつつあり、ナノテクノロジーも20年以内くらいで実用化されるといわれている。

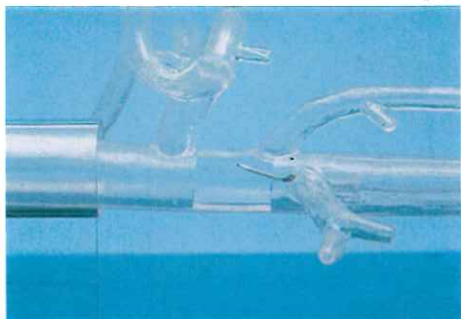
それでは両極小技術に関して、それぞれ詳しく見ていくことにしよう。

マイクロテクノロジー

機械システムのマイクロ化

—国家プロジェクトにもなったマイクロマシンの研究開発—

日本でのマイクロマシンの研究は、1980年代後半から注目され、電気学会や機械学会が研究委員会を設立した。また政府でもプロジェクト化への検討が始められ、1991年、工業技



極細内視鏡の
試作品

術院（現 産業技術総合研究所）が、通商産業省（現 経済産業省）の支援の下で産業科学技術開発制度を活用し、「マイクロマシン技術の研究開発」を立ち上げた。

このプロジェクトは新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）を通じて、（財）マイクロマシンセンターが主体となり、2001年3月までの10ヵ年計画で、国内24企業・団体、海外2団体が参加して実施された。その活動成果は、毎年11月に開催されるマイクロマシン展（2001年も10月31日～11月2日の3日間、東京の科学技術館で開催予定）で発表されている。

同プロジェクトで重点研究開発の3本柱と位置付けられた、「医療応用マイクロマシン」、「発電施設用高機能メンテナンスマシン」、「マイクロファクトリー」を例にとり、最近のマイクロマシンの状況をご紹介します。

■医療応用マイクロマシン

医療応用の分野は、レーザーやメスを搭載した無線式超小型内視鏡（カプセル型内視鏡）を、体外から無線で操作することで、開腹しないで診断・治療を行うという構想に基づいて進められている。

このカプセル型内視鏡が実現すれば、外科的手術ができない複雑な疾患部位の治療が可能になり、また従来のドラッグ・デリバリー・システムでは不可能なレベルの超ピンポイントの薬物治療も可能にする。これは、薬物投与部位周辺への影響及び副作用の危険性を大幅に低減できるので、投与の量・濃度の調整の自由度がさらに高まり、ひいては劇的な治療効果の向上が期待できるという。まさに冒頭で紹介した映画さながらに、様々な可能性が広がるのである。ちなみにアメリカでは腸内撮影用の無線式カプセル内視鏡がFDA（食品医薬局）の認可を得てすでに臨床試験が始められている。

こうしたカプセル型内視鏡の、いわば前段階ともいえる試作品は、すでに国内でも完成している。「極細内視鏡」といわれるもので、その直径は、わずか1.5mmである。先端が消化器などの内壁にあたると自動的に反対方向に曲がる仕組みを持ち、体内の部位を傷つけずに狭小で複雑な部分にも入り込むことができる。従来の内視鏡では観察が不可能だった肝臓、すい臓への挿入もごく近い将来に実現するという。

ほかにも、この秋には内視鏡などで見ただけでは判別が付きにくい潰瘍を“触診”する「マイクロ触覚センサ」なる試作品が発表される予定であり、夢であったSF映画の世界はいよいよ秒読み体制で現実味を帯びてきているのである。

■発電施設用高機能メンテナンスマシン

現在、原子力・火力発電所の配管点検作業は発電プラントを休止し配管を分解することで行っている。この点検作業による発電所の運転停止期間は90～120日にもわたり、100万kW級の火力発電所で一日あたり1億5000万円もの損失に上るという試算もある。

この点検作業を、マイクロマシン技術を使ってより容易に実施しようというプロジェクトが「発電施設用高機能メンテナンスマシン」である。

これは原子炉の配管など、人間が立ち入りにくい発電施設内細部にマイクロマシンを導入させ、メンテナンス作業を行なわせようというものである。狭所な上にさまざまな方向に凹凸（いわば障害物）がある点検ルートで、障害物を乗り越え、回避してスムーズに移動できるメンテナンスマシンが要求される。この開発には、メカトロニクスに強みを持つ企業が参加し、各社ごとにさまざまな試作品が完成しており、マイクロマシンプロジェクトの中でもっとも実用化に近い分野と目される。

例として、マシン自体が障害物に応じて形状を変えていく、8本足の蛸のような形状をした「ホロニックメカニズム」の研究がある。その特徴は、同一サイズの関節（次頁図のロール軸・ピッチ軸）を72個結合した超多自由度メカニズム（オクトパイダ）を構築していることである。これにより、対象（障害物等の）に応じて基本形態を変化させる制御と、センサ情報により単純な行動を同時並列的に行う制御を適切に組み合わせ、狭所な空間における複雑な行動の実現と効率の良い制御を実現しようというものである。

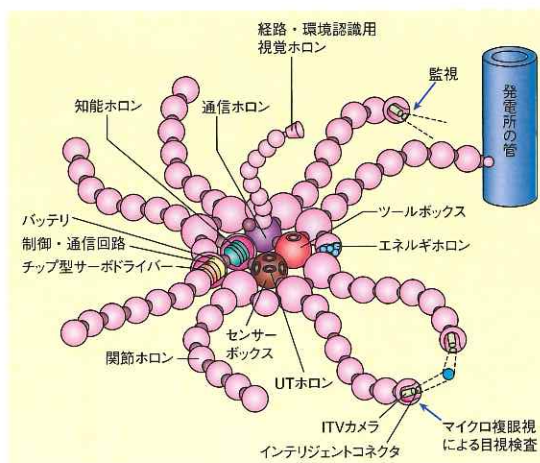
また、「細管群外部検査システム」という、狭所な箇所では小さなマシンが個々に自走し、検査箇所にとどり着いたら連結して作業を行う分散型マイクロマシンのシステムも研究されている。これは、発電施設の蒸気発生管のように林立する細管群の外部損傷の有無を検査するマシンである。1つのマイクロマシン（単体マシン）は小型化された駆動デバイス、走行デバイス、探傷デバイスなどの機能部品やコネクタを搭載しており、細管間の狭い隙間を通過できる。そして検査領域に入ると、大きな作業領域をカバーするため複数の単体マシンが連結して細管回りを検査する機能を発揮するというものだ。単体マシンのコネクタ部は直径2.5mm、厚さ2mm以下であり、そこに電磁石と永久磁石を用いることで電氣的制御によって自動着脱が可能であるという。

さらに「管内自走環境認識システム」の開発も進められている。この大きさは直径9.5mm、長さ50mmで、カメラを搭載し、配管内の映像を無線で送るものである。

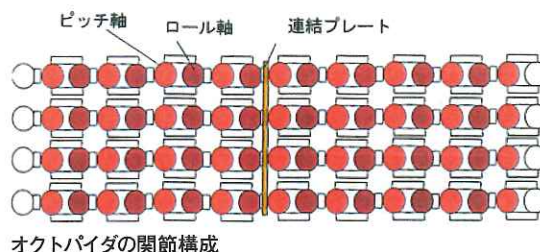
こうした発電施設用高機能メンテナンスマシンの実用化に向けては、駆動エネルギー供給法の確立、信頼性・耐環境性の



適用場所に応じた多彩なホロニックメカニズムの形態



ホロニックメカニズムの構想図



オクトバイダの関節構成

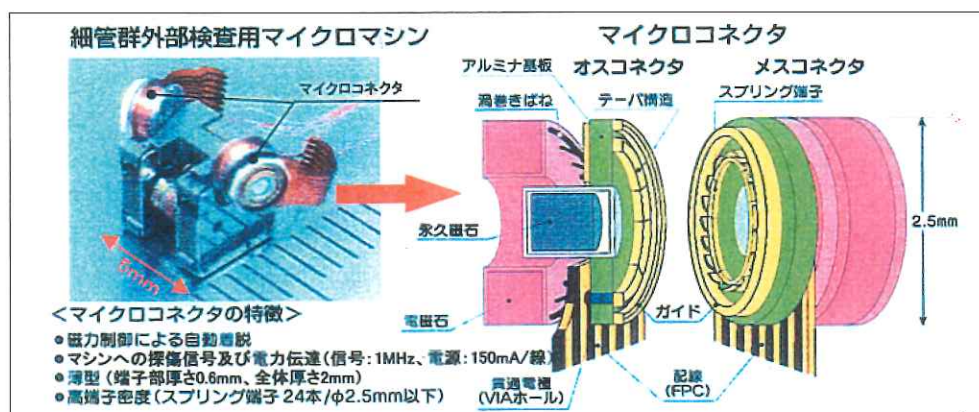
飛躍的に向上させる技術にもつながると期待されている。

■マイクロファクトリー

時計部品のような小さなものの生産に、なぜ大きな工場が必要なのかという疑問がある。最終製品がマイクロマシンなら、製造工程も超小型化したい。そんな考え方に裏打ちされ、その構想を現実化したのが「マイクロファクトリー」である。

現在、開発・試作されているマイクロファクトリーは、両手で囲えるほどのスペースに部品製造のための加工機械、組立機械、搬送機械、検査機械など全てをラインナップすることができる。そのひとつに直径1mmのレンズと撮像素子、レンズ枠を接合する「微小光学系組立機」がある。大きさは縦50cm、横35cmでデスクトップ工場と言われるのもうなずける。

また、長焦点深度顕微鏡、パラレルリンク型マイクロマニピュレータ、パラレルリン



細管群外部検査用マイクロマシンとマイクロコネクタ



管内自走環境認識システム

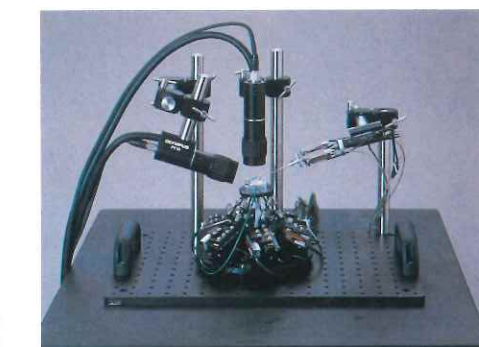
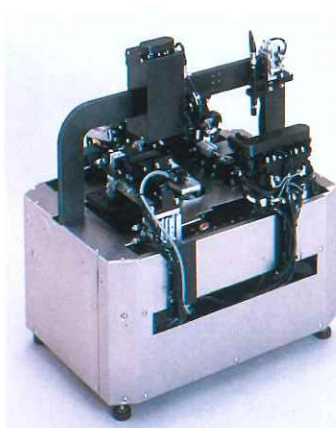
向上、機能向上のための様々な搭載デバイスや量産化技術の開発といった研究課題が残されているが、この分野のマイクロマシンが実用化すれば、作業員の安全確保とともに、点検作業に伴うコストや時間の大幅削減が実現する。

さらに、これらの研究開発の過程で生まれた新技術がある。例えば、微細な溝を深く掘る加工技術である。これはマイクロマシンを作るには不可欠な要素技術の一つで、溝の側壁に特殊保護膜を施すことによって、幅1 μ m、深さ57 μ mの溝の形成に成功している。この技術は、半導体チップの集積度を

ク型ステージの構成で、微小な部品を拡大し確認しながら作業に当たることができる「微小部品遠隔操作システム」がある。これはハンダ付けや検査工程など微小部品の組み立てを補助するために開発された。こちらも直径52cmと、机上に置けるサイズである。

他にも、組み立て機械のアームの小型化でより細かい作業を可能にするとともに、小型でも出力がおちない超音波モータを使い高出力を得ることを可能とした時計部品用マイクロファクトリーの試作品も開発されている。

こうして、敷地いらずの工場が実現すれば、例えば、自動車や船に搭載し納品地への移動中に生産したり、また店頭を設置し消費者ニーズに応じて目の前で製品を作ることも可能になるだろう。さらにインターネットと接続し、多様なプログラムを自由にダウンロードすることで完全なオンデマンドシステムを構築することも視野に入ってくる。もちろんエネルギー消費も極端に抑えられ、環境負荷も大幅に低減するのである。



微小部品遠隔操作システム
(ベース部直径180mm、高さ100mm)

微小光学系組立機

このようにマイクロファクトリーはいわば「個」を重視し得る、多品種少量向けの工場であり、生産・物流の姿を大きく変える可能性も秘めていると言える。

ナノテクノロジー

次世代のキー技術 ナノテクノロジー

IT・バイオ・ナノテク。2000年1月に時のクリントン政権がアメリカの21世紀科学技術国家戦略に挙げた3本柱である。このうちIT、バイオではすでに世界をリードするアメリカであったが、ナノテクに関しては日本などにやや遅れをとっていた。これを危惧したクリントン政権が、ナノテクを敢えてIT・バイオと同等のプロジェクトと位置付け、国家戦略として打ち出したというわけだ。

そもそも、ナノテクという新技術への道を開いたのは、1981年にIBMのチューリッヒ研究所で開発されたSTM(走査型トンネル顕微鏡)だといわれる。これによって原子や分子のレベルでの観察が可能になり、また、その研究過程で顕微鏡の探針が原子を弾き飛ばしたり付着させたりしたことから、原子単位の操作が可能になった。そして1989年にIBMのアルマデン研究所がキセノン原子をIBMという形に並べた写真を公開し、原子や分子が一個ずつ操作可能であることを示した。この事実により、新しい機能を発現する物質や材料の実現に期待がふくらみ、“アトムテクノロジー”の世界が広く知れ渡った。

その後各方面で研究は急速に進み、例えば、DNA情報に基づいてアミノ酸がたんぱく質へと変わるように、有機物の分子が自己組織化する際の情報を制御することで、新しい機能を持つ超分子を作る技術がある。その応用として、イオンをとらえる機能や他の分子を取り込むなどの機能をもつ“超分子”がすでに作られている。

クリントン前大統領は先の戦略のなかで、ナノテクにより国会図書館の全データを角砂糖の大きさに収納する技術、鋼鉄よりはるかに軽量でしかも10倍の強度を持つ新素材の開発、コンピュータの効率と速度を100万倍向上させる素子の開発、数個のがん細胞にも反応する超高感度生体センサー、2倍の効

率を持つ太陽電池などが実現できるとしており、これらの課題を2020年には達成させたいとも述べた。また、微細加工やナノ計測など各分野に横断的にかかわる技術を研究するためナショナルセンターを設立し、各界の研究者がその成果を利用できる体制も整えた。

一方、日本のナノテクへの取り組みは80年代初頭に始まった。特に、材料分野の成果はアメリカを一步リードしてきたといえる。半

導体レーザー技術の延長で、nm単位の膜厚の結晶を積み上げる研究が進み、携帯電話用の超薄膜トランジスタの生産、量子箱を用いたレーザーの試作など、この分野で主導的な役割を果たしてきた。

そんな中で(社)経済団体連合会(経団連)は、ナノテク研究の推進がIT分野を始めとしてわが国の産業競争力の強化に不可欠であるとし、ナノテク関連の国内市場が2010年には27兆円規模になると予測、2000年6月に「ナノテクノロジー専門部会」を設置している。

さらに政府も第2期科学技術基本計画でナノテクを情報通信などと並ぶ4つの重点分野の一つとしている。2001年度予算では研究開発投資518億円を計上し、総合科学技術会議(議長:小泉純一郎首相)で白川秀樹筑波大名誉教授をプロジェクトリーダーに戦略を作成中である。文部科学省も2002年度には「ナノテク仮想研究所」を作り、大学や研究機関をネットで結んで共同で研究を進める方針を固めている。

こうした中で、日本のナノテク技術は、IT、医療、化学、環境・エネルギー、機械など幅広い分野で、実用化に向けた研究開発が加速している。現在はまだ基礎研究や構想の域を出ていないものが多いが、そのなかでも特に注目されている技術を取り上げてみる。

■カーボンナノチューブ

カーボンナノチューブは、現在のナノテクで、もっとも現実的に進められ、成果を上げている研究のひとつで、1991年にNECの飯島澄夫主任研究員が見出した、直径5~20nm(髪の毛の1万分の1程度)のチューブ状炭素多面体である。金属と半導体の性質を併せ持ち、分子構造は六角形の網目を丸めたような形で、この網目の方向を変えたり、あるいは一部を五角形や七角形にすると「量子効果」がおこり、電子の伝わり方が変わってくる。

このことから、電子デバイスとしての利用が計画され(すでに米IBM社はロジック回路の基本素子を作ることに成功している)、この研究が進めば、集積回路の素子は現在の大きさの100分の1ほどになり、小型、高速、省電力の画期的なコンピュータの開発が可能になるという。しかし実用化にはまだ課題

がある。直径のばらつきや電氣的性質に差があるナノチューブを、いかに同質のものだけできちんと配列するかということである。現在この方法を確立するために、基盤の上に金属素粒子を触媒として置き、その場で成長させるといった方法が試みられ、実験としては成功している段階である。

また、電圧を加えるだけで電子を放出する電子源としての性質を持っているため、超薄型、省エネタイプのディスプレイ、フィールド・エミッション・ディスプレイに应用され、すでに国内外で試作品も発表されている。韓国の三星電気は2003年から2004年には売り出すと発表している。

ナノチューブを使った新素材の開発も実用化に近いものの一つである。プラスチックに混ぜて導電性プラスチックを作ったり、驚異的な軽さと強度を兼ね備えた新素材の開発も可能となる。カーボンナノチューブは、これまで主にアーク放電法により製造されていたが、電力効率が悪い、炭素収量が低いといった問題があり、その量産化が課題であった。産業技術総合研究所がこのほど大量合成に成功したと発表しているので、実用化へのメドが立ちつつあるといったところであるようだ。

ほかに、電池メーカー、自動車メーカーはカーボンナノチューブの水素吸蔵性を活かして燃料電池をつくり、燃料電池自動車の開発を目指してきたが、現在、予想ほどの成果が得られていないと言う。しかし、ごく最近ではカーボンナノチューブの先端が円錐状に閉じた形状をなすカーボンナノホーンと呼ばれるものが発見され、その応用で活路を見出せるのではと期待されている。ちなみにこの燃料電池の実用化は5年から10年先を目指しているようだ。

■多岐にわたる可能性

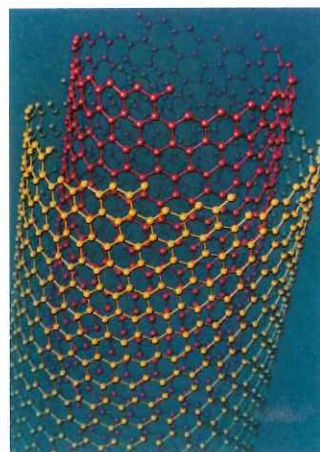
ITの分野ではナノテクを駆使してナノコンピュータと呼ばれる極小のコンピュータを開発する構想がある。ナノコンピュータには二つの方向性があり、一つは量子コンピュータ、もう一つは分子コンピュータである。

これらのナノコンピュータが実現すると、スーパーコンピュータで数百年かかるという計算も数十分で終えてしまう。その計算能力は既存のパスワードをすぐに解読してしまうため、情報化社会を根底から変えることになると考えられている。

現在、量子コンピュータは、1999年にNEC基礎研究所の中村泰信主任が1量子ビットの固体素子(超伝導量子ビット素子)の開発に成功している。一方の分子コンピュータはDNAをプロセッサとして活用するもので、コンピュータに必要な「論理ゲート」がすでに開発されている。

だが、そんな極小サイズのコンピュータを可能にするメモリ・デバイスができたとしても、次なる課題が待ち受けている。ナノスケールのデバイスとの情報の通り道である配線など付随する部品もナノスケールにしなければならないことである。これ

カーボンナノチューブの分子模型



らの技術開発を進めることもナノコンピュータ実用化に必須と言える。

ナノテクは医療分野にも応用が進められている。たとえば、コレステロール値や脈拍数などのセンサとなる超分子を合成すれば、極小の健康診断チップの製作が可能となる。

50nmから100nmの分子カプセルを作れば、適切な量の薬を必要な部位にだけ送ることも可能である。その大きさから、正常細胞には浸透せず、細胞間の空間の広いガン細胞だけに働くため抗癌剤に利用できる。今年の5月に国立がんセンターが臨床試験を申請しており、6、7年後の市販を目指している。

このような、分子の自己組織化に関する情報を利用する方法は画期的であるが、一種の自然現象であるのでばらつきが課題となる。この問題を解決し、均質な物質を作る方法が確立してはじめて実用化が可能になるといえる。

また、金属分野に目を向けてみると、高エネルギー密度のレーザーを用いて、粒径20～50nmの高融点金属超微粒子を作製する研究も進んでいる。将来的にはこの超微粒子の種類を増やし、これらを合成することにより微細配線回路および素子の開発を目指すという。この研究は、まだ緒についたばかりでもあり、今後の推移を見守り、いずれ“テクノスコープ”でも詳しく取り上げたい。

■ナノテクノロジーの今後

現在、各研究機関では5年から10年先の実用化を念頭において基礎研究が進められている。だが、実験結果によっては1年後には全く方向が変わってしまう可能性もあるという。

また、カーボンナノチューブの例でも分かるように一つの発見が多くの分野に横断的に関わるのがナノテクノロジーの特徴でもある。当然その開発は、一業種、一企業でなし得るものではない。今後、産・官・学一体となった国家的取り組みが不可欠である。

バイオやITといった分野で日本はアメリカに遅れをとってきたが、今後はナノテクノロジーがこれらの分野にも大きな役割を果たすと予測されている。各分野の研究者をいかに有機的に結んで横断的な研究インフラを整備するかが技術大国日本復権の鍵を握っているといえるのではないだろうか。

■取材協力・資料・写真提供
新エネルギー・産業技術開発機構 (NEDO)、
(財) マイクロマシンセンター、オリンパス光学工業 (株)、
住友電気工業 (株)、セイコーインスツルメンツ (株)、(株) デンソー、
日本電気 (株)、三菱電機 (株)