

# 基調論文 | マイクロマシン研究の現状と今後\*

## Status and Future of Micromachine R&D

原 邦彦

Kunihiko HARA

The state of leading micromachine research in Japan and overseas, as well as micromachine R&D at DENSO are summarized in this paper. And the application and prospects for micromachine technology, and the direction of future micromachine R&D are discussed here.

### 1. はじめに

掌に載る小さな電子計算機で大規模な計算ができる時代となった。その昔、リレー式の計算機あるいは真空管式計算機の時代では、それが大きな部屋を占領する程の体格でありながら、わずかな四則演算しかできなかったという時代があった。

1948年にトランジスタが発明され、その後、IC、LSIによる機能の集積化技術が生まれた。LSI技術の特徴は、トランジスタを一つ作るのも、100万個のトランジスタを集積したチップを作るのも、単位プロセスの数としてはほとんど変わらないところにある。すなわち、LSIとは単に機能当りのチップ面積を小さくしただけという意味ではなく、いかに機能を集積しても、それを作る単位プロセスの数は増えないという特殊なテクノロジーであった。さらに集積化技術が進歩してULSIの技術が出来上がると、機能当りのコストが極めて安いエレクトロニクスが出来上がることになり、これが電話、パーソナル携帯情報端末、医療機器、あるいは自動車など、ありとあらゆる分野に浸透していった。トランジスタは20世紀最大と言ってもよい発明であるが、合せてULSIが生まれてきたことによって、はじめてエレクトロニクスがあらゆる世界に広がり得た。マイクロエレクトロニクスのビッグバンがULSIによってもたらされたと言える。

今、エレクトロニクスという言葉をもカニクスに置き換えてみよう。一体、機構あるいは構造体をどこまで小さくできるであろうか。また、LSI技術のアナロジーで言えばLSIM(Large Scale Integrated Mechanism; 著者の造語)なるものが生まれ得るであろうか。マイクロエレクトロニクスに比べて、マイクロマシンが今一つ大きな飛躍を遂げられずにいる理由の一つに、大きな機構を小さく作るという従来の固定観念の呪縛から離れられなくなっていることがある。

この呪縛を解くキーワードは、小さなユニットを集

積して巨視系の機構を作るLSIMの概念であり、これがマイクロマシンの将来を読むキーワードになるのではないかと考えられる。本稿では、国内外のマイクロマシン研究の最前線を総括した上で、今後のマイクロマシン研究開発の方向を議論する。

### 2. 国内外のマイクロマシン研究の現状

#### 2.1 日本におけるマイクロマシン研究の現状

日本におけるマイクロマシン研究の特徴は、「小さな機械(マイクロマシン)」というコンセプトを描き、それを実現するために、制約を設けることなく広範囲の技術分野にわたり、要素技術の確立に取り組んでいることである。

研究を牽引しているものの一つに、通産省工業技術院の産業科学技術研究開発プロジェクト(通称、産技プロ)の「マイクロマシン技術の研究開発」がある。1991年から10年計画で実施されている。国立研究所として機械技術研究所、電子技術総合研究所、計量研究所が参加し、基礎的なところを支えている。加えて20数社の企業が参加して、具体的に要素技術の研究に取り組んでいる。

また、アカデミアとしては、東京大学や名古屋大学など多くの大学でマイクロマシンの研究が行われている。東北大学では特に、ベンチャービジネスラボがあり、マイクロマシンに関する企業との共同研究を積極的に推進している。また、立命館大学はマルチチップサービスというマイクロマシニングのファウンダリサービスを行っている。大学としては珍しく、SOR光(シンクロトロン放射)の装置を持っていて、非常にアスペクト比の高いマイクロ構造体を作る技術を持っている。

学会関係では、電気学会センサマイクロマシン準部門があり、機械学会でも最近ではマイクロマシンという特別セッションを設けている。

\* 2000年4月6日原稿受理

ただ残念なことに、実用化されているマイクロマシンはそれほど多くない。その中でもシリコン単結晶基板に3次元的な機械構造体をエッチング加工して作成された圧力センサや加速度センサ等のマイクロセンサやインクジェットプリンタヘッドは、数少ないものの中でも代表的なものである。また、医療分野で用いられるカテーテルの高機能化や、分析分野へのマイクロマシンの応用の検討が始まっている。

2.2 産業科学技術研究開発プロジェクト<sup>1)</sup>

産業科学技術研究開発プロジェクト(産技プロ)におけるマイクロマシン技術の研究開発は、本年を最終年度として10年間合計予算額250億円で、通産省工業技術院の元に、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)からの出資に基づき、財団法人マイクロマシンセンター(理事長:石丸典生 当社会長)により、運営されている。その中に民間企業・団体26社が入って実際の研究開発を行っており、当社もこのメンバーとして活動してきた。

産技プロにおけるマイクロマシン技術の研究開発の中では、発電施設用高機能メンテナンス技術開発、マイクロファクトリ技術開発、医療応用マイクロマシン技術開発の三つのサブプロジェクトが行われている。

以下にそれぞれの概略について述べる。

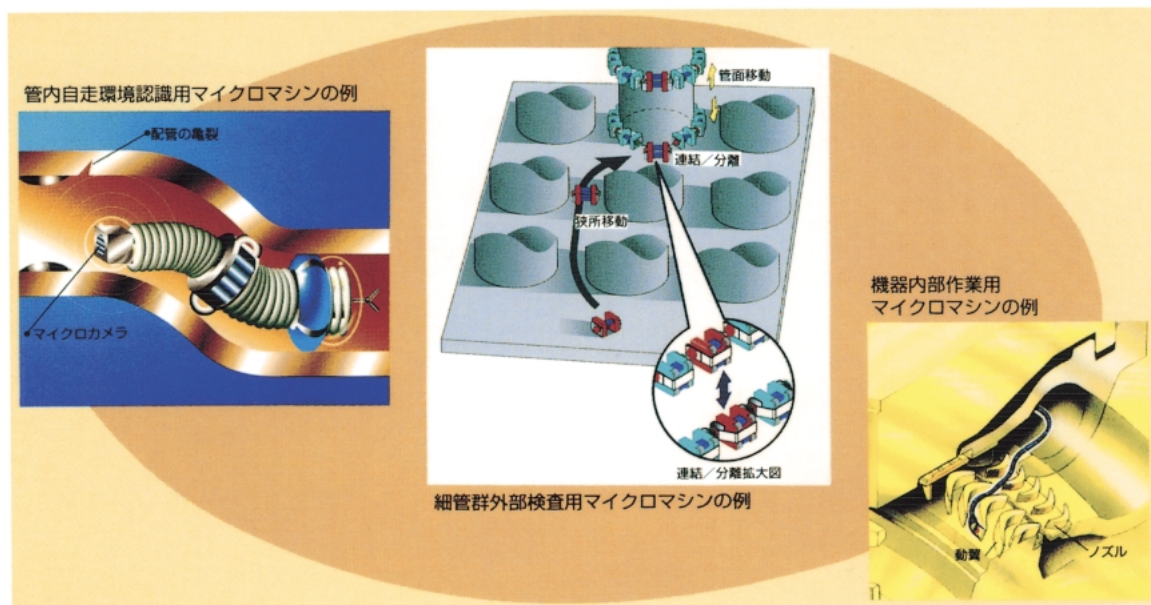
(1) 発電施設用高機能メンテナンス技術開発

この技術開発の目的は、発電施設などの配管内などの狭いところにおいて、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研究である。この中にはさらに管内自走環境認識用マイクロマシン、細管群外部検査用マイクロマシン、機器内部作業用マイクロマシンといった三つの具体的なシステムを実現するためのサブプロジェクトが実施されている。Fig.1はプロジェクトの全体を分かりやすく図示したものである。

管内自走環境認識用マイクロマシンというのは、細い配管の中を自分自身で移動し、配管の亀裂や異物を観察し、管内の画像情報を中から送り出してくるものである。

当社は三洋電機、東芝と共同でこの研究開発を担当している。これまでに当社は、圧電駆動機構、マイクロ波によるエネルギーと情報の伝送技術、異種材料直接接合技術、半導体同士の3次元接続技術(今様に言えばスーパーコネクタ技術)などを開発してきた。

細管群外部検査用マイクロマシンは、配管の外をたくさんのマイクロマシンが集団を組んで移動して、外



管内自走環境認識マイクロマシン: デンソー、三洋電機、東芝  
 細管群外部検査マイクロマシン: 三菱電機、住友電工、松下技研  
 機器内部作業マイクロマシン: オリンパス、オムロン、村田製作所

Fig. 1 R&D for highly functional maintenance technology used in power generating facilities

部にある亀裂を検査しようというマシンである。三菱電機他 3 社が研究開発を担当している。

機器内部作業用マイクロマシンは、仮に亀裂が見つかったときに、その部分まで移動して、例えばレーザー溶接などによって、亀裂部分を溶接作業が可能なマシンである。オリンパス他 3 社が研究開発を担当している。

## (2) マイクロファクトリ技術開発

マイクロファクトリというのは、日本で考え出された新しい概念である。その目的は、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、製造工程で使用する各種のマイクロ機械装置の小型化を目指すことである。

IC, LSI は、数ミリ角程度の小さなチップを作るために 1000m<sup>2</sup>, 2000m<sup>2</sup> という巨大なクリーンルームを作り、その中で大変なエネルギーを使って製造されている。エネルギーの使い方を根本から問い直し、数ミリ角のデバイスを作るのであれば、せいぜいデスクトップ(机の上に載る)程度のファクトリで、そういうものができないだろうかという発想から出てきたプロジェクトである。私見ではあるが、ワンチップベースの LSI プロセスなるものが仮にできれば、LSI の開発スピードとコストは画期的に下がると予想される。

現在、直径 1mm のシリコンボールを用い、球表面に半導体回路を描く技術が実用化されつつある<sup>2)</sup>。デスクトップサイズのファクトリの中で、小さな歯車を加工し、出来上がった歯車を組み立てて時計のようなギア機構を作り上げるといったことを、セイコーインスツルメンツをはじめ、日立製作所、ファナック、三菱電機、安川電機、富士電機総合研究所、アイシンコスモス、計 7 社が共同で取り組んでいる。

## (3) 医療応用マイクロマシン技術開発

体腔内において診断や治療をするマイクロマシンシステムの実現に必要な要素技術の開発を目指したプロジェクトである。例えば脳の動脈瘤が見つかったときに、カテーテルの先端に触覚センサやレーザーで患部を焼失させる機能を持たせることができれば、カテーテルを患部まで差し込んで行くだけで治療することができる。これにはオリンパス、テルモが取り組んでいる。

### 2.3 海外におけるマイクロマシン研究の現状

海外では、北米を中心とした地域、日本を中心としたアジア・オセアニアの地域、ドイツを中心とした欧州が 3 大拠点をつくっている。

#### 2.3.1 北米におけるマイクロマシン研究の現状

北米では、半導体加工技術をコア技術に据えて、マイクロマシンの情報通信分野とライフサイエンス分野への応用技術に注力している。

大学でのアクティビティが高く、UCLA、U.C. Berkeley、MIT、ミシガン大学、ケースウェスタンリザーブ大学、ジョージア工科大学、ウィスコンシン大学、ルイジアナ工科大学などが精力的に仕事をしている。資金も非常に潤沢である。NSF(米国科学財団)、DARPA(国防先端研究プロジェクト庁)、NASA(米国航空宇宙局)、NIH(国立健康研究所)などが資金援助をしている。もちろん、民間からも研究資金が入り、精力的に研究が行われている。

米国において数年前にテキサス・インスツルメンツ社が、DMD(Digital Micromirror Device)を発表し、一部実用化に入っている<sup>3)</sup>。これは単結晶シリコンの CMOS 回路チップをベースにして、その上に静電アクチュエータとミラーが何十万個も、縦横に並んでいる。一つのミラーのサイズが 17μm × 17μm、静電アクチュエータで傾斜させ得る傾斜角は ±10 度、応答速度は 10μs である。内蔵の CMOS とコントローラにて、個々のセグメントに相当するミラーを独立に動かすことができる。

3 原色光をミラーにあて、反射光をスクリーン上にて結像させる。DMD の優れたところは、ミラーによる反射光を用いて結像させるため、非常に高輝度の鮮やかな、しかも大画面の、フルカラーの動画が投影できることである。マイクロマシンの優れた機能がフル発揮できているというデバイスである。DMD にはもう一つ、「機能が単に集積されているということではない」意味がある。ミラーの数が一つでも、あるいは 100 万個でも、プロセスは同じということである。LSI を作る時の特徴は、機能を小さくすることだけではなく、どんなに機能を複雑にしても作るプロセスは変わらないということを前述したが、DMD というマイクロマシンはそれに近づいている。IC, LSI のアナロジーから考えた LSIM(前述)の姿に近いものの一つと言える。

#### 2.3.2 欧州の取り組み

欧州では産業機器の分野、バイオサイエンスと環境モニタ分野への応用開発を行いつつも、半導体加工技術と LIGA(ドイツ語の Lithographie Galvanoformung Abformung: リソグラフィ・電気メッキ・プラスチック成型)プロセス技術の高度化に注力している。

イギリス, フランス, ドイツ, スイス, オランダ, イタリア, スウェーデンの各国において, 著名な大学もしくは研究機関が精力的に研究をしている。

基金については, ESPRIT( 情報技術研究開発プログラム), IMT( 産業材料技術プログラム), EUROPRACTICE( 中小企業支援プログラム)といった大型プログラムを運用し, 相当なお金がつぎ込まれている。

ドイツのボッシュ社は, 表面マイクロマシニング型ジャイロ(角速度センサまたはヨーレートセンサ)を発表している<sup>4)</sup>。これは, 単結晶シリコンと多結晶シリコンを組み合わせ、例えば, シリコンの表面の垂直軸の周りに回転振動する可動子を設けたセンサである。

現在, センサの上にはシリコンのキャピティをキャップとして使い, 分解能が毎秒1度以下で測定できる高精度のワンチップマイクロジャイロも実用化が検討

されている。

### 2.3.3 アジア, オセアニアの取り組み

日本を除くアジア, オセアニアにおいては, 今日, 米国, 欧州をキャッチアップすべく, 国家的な取り組みが始まった段階である。韓国, 台湾あるいは中国, オーストラリアにおいてそれぞれ国立研究所, 大学が研究を進めている。

韓国ではHAMプログラム, 台湾ではPhase , 中国は1998年からスタート, オーストラリアは1999年からスタートということで一気にR&D活動が活発化してきている。

### 3. 当社におけるマイクロマシンの研究開発

Fig.2は, 当社でこれまで行われてきたマイクロマシンならびにマイクロマシニング研究を, マイクロ機構技術, 無索エネルギー供給・通信技術, マイクロ加工・実装技術,

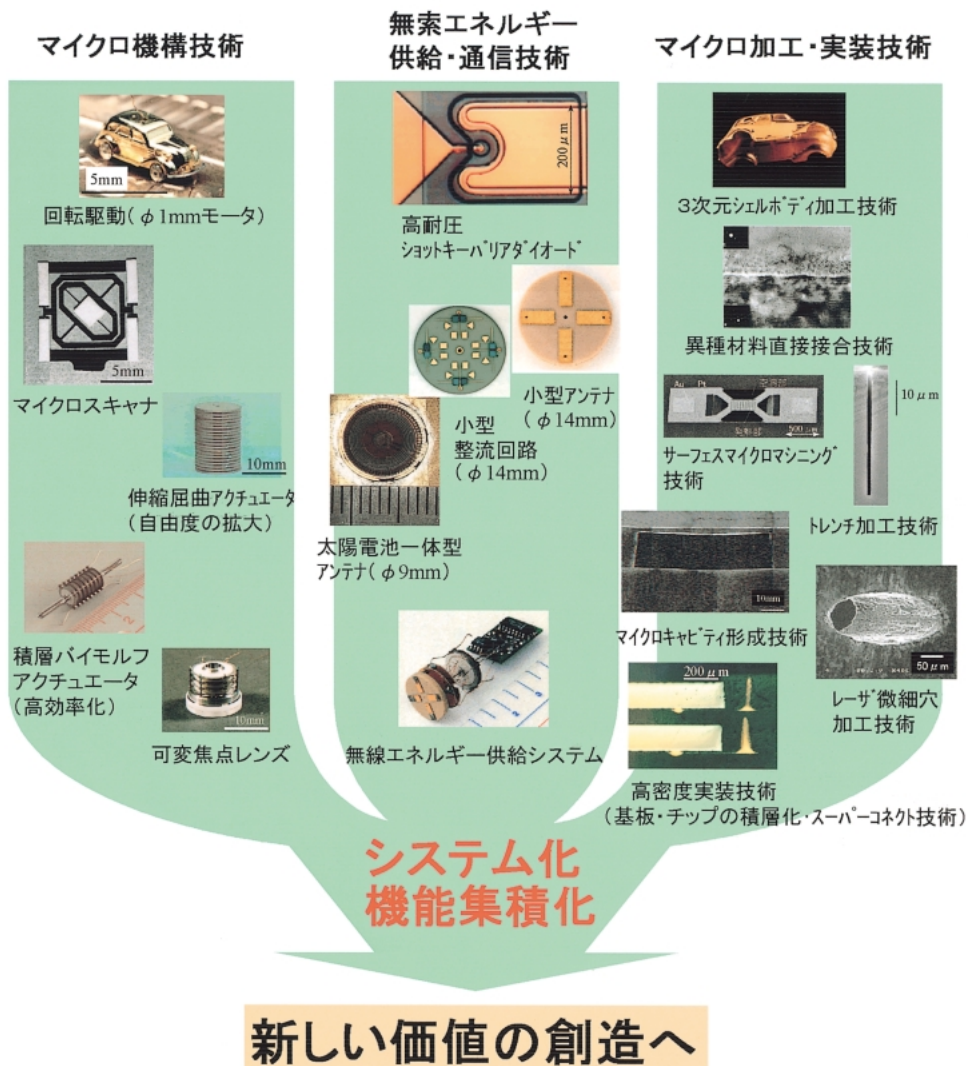


Fig. 2 Micromachine research at DENSO

工・実装技術それぞれ系統図で示したものである。それぞれの技術については、要素技術として新規性や拡張性を備えたものが出来上がっている。圧電バイモルフを駆動機構としたスキャナや可変焦点レンズなど、複数のメーカーや研究機関との共同開発研究に発展している。

異種材料直接接合技術や極めて高いアスペクト比のトレンチ加工技術などは、次々期型のエアフローセンサあるいは加速度センサへの適用検討が進められている。また、レーザ極細穴加工技術は直噴インジェクタ用ノズル等の最適化研究やソレノイドバルブ筐体の磁気遮蔽技術に用いられている。これまでに蓄積された要素技術が、今後次の世代の新しい製品技術として数多く応用され、新しい価値を創造して行くことになる。

#### 4. マイクロマシン技術の 応用展望

これまで述べてきたマイクロマシン技術は、マイクロトライブロギー、マイクロ流体力学といったマイクロ理工学、あるいは材料技術、あるいは加工技術、評価技術、設計技術といった諸々の基盤技術によって支えられている。

それらの広範囲な技術開発を通して、医療分野や福祉・衛生分野、住宅環境分野、あるいは自動車・輸送分野、船舶・海洋分野、宇宙・航空分野、計測・分析分野、産業・プラント分野、あるいは家電・情報機器といった非常に多分野に応用が図られるのではないと思われる。Fig.3は(財)マイクロマシンセンターがまとめたマイクロマシンのテクノツリー<sup>1)</sup>である。

1998年ごろ、日本IBM社が、ウェアラブル・パーソナルコンピュータ(身につけるパソコン)の試作品を発表した<sup>4)</sup>。昔はデスクトップ、それが今はノートパソコンになり、もう少し経て

ばウェアラブル(身に纏うよう)になる。今後、情報通信の世界にマイクロマシン技術が使われていく。非常に広範囲の応用が可能だということで、ここに前述したビッグバンの先駆けが見え始めている。

#### 5. マイクロマシン研究のこれから

マイクロマシン研究のこれからを展望する際、三つの重要な視点がある。

一つは、これまで9年にわたり産技プロジェクトの中で培ってきた技術の集積があるが、残念ながら一部のセンサを除いてはまだ原理が確認されたという段階である。3章で具体的に触れたように、これを着実に実用化するために全力を投入しなければならない。



Fig. 3 Micromachine technology tree

二つ目は、国際協力を思い切って推進する必要がある。現在、LSIの世界ではIP(Intellectual Property)という概念がつとにやかましくなっている。汎用ICというものが、今はさらに、それに組み込むいろいろなソフトや、あるいはミドルウェア、あるいは設計のノウハウも全部入れて、一つの機能として記述される。それをIntellectual Propertyと言っている。マイクロマシンも移動機構、エネルギーの伝送のメカニズムなど、いろいろな要素技術が出来上がってきている。これらを、一つのIPという格好までブラッシュアップし、ヨーロッパのマイクロマシンIP、米国のマイクロマシンIP、日本のマイクロマシンIPを共有して、スピーディーに新しい産業を興すためのIPの相互利用を行う時代がくると予想される。

三つ目は、マイクロマシンでなければできないものを作っていかなければいけない。従来は、“マイクロマシンでもできる”という研究開発が多かった。しかし、マイクロマシンでなければできないものを作っていかなければ、真の価値は見出せない。それができて初めて、新しいビッグバンが期待できる。

マイクロマシンでなければできないものとは一体何か。それはシンボリックな表現をすると“生き物のように滑らかに動く機械”ではないか。生物や生体は非常に滑らかに動き、柔らかい豆腐を何気なくつかむことができる。機械で豆腐をつかむことは大変難しい。なぜ、生物や生体はそういうことができるのに、機械はうまくいかないのか。生体の中は“指”という大きなマクロ系でありながら、動作機構を突き詰めていくと、実は小さな要素でできたマイクロフィードバック機構があって、それが無数に連成して、それで滑らかに動いている。究極の姿として、Fig.4で示した「心臓」は、最もわかりやすい例と言える。

大胆な表現をすると、マイクロマシンによって、マイクロフィードバック機構を作り、これを用いてマクロ系を作り上げる。換言すれば、マイクロ機構IPを集積化することによってマクロ系を作り、生物や生体と同じように滑らかに動く機械が出来上がってくる。結果として、実用できて、しかもマイクロマシンでなければできないという世界が見えてくる。マクロ系をミクロに作るという発想から、ミクロ系を用いてマクロ系を作るという発想に大胆に転換することが必要である。センサやアクチエータも将来はこの方向で進化する。

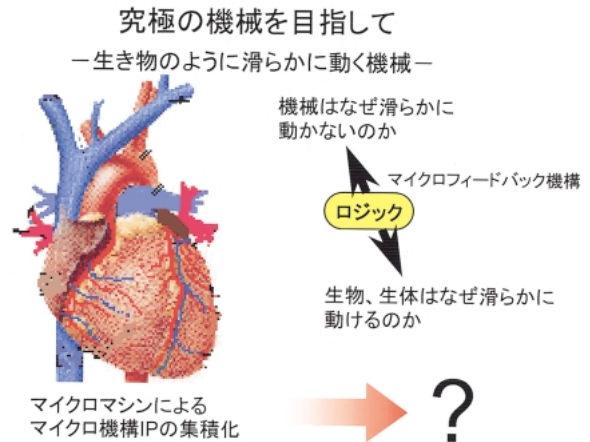


Fig. 4 Beyond mechanical limitations

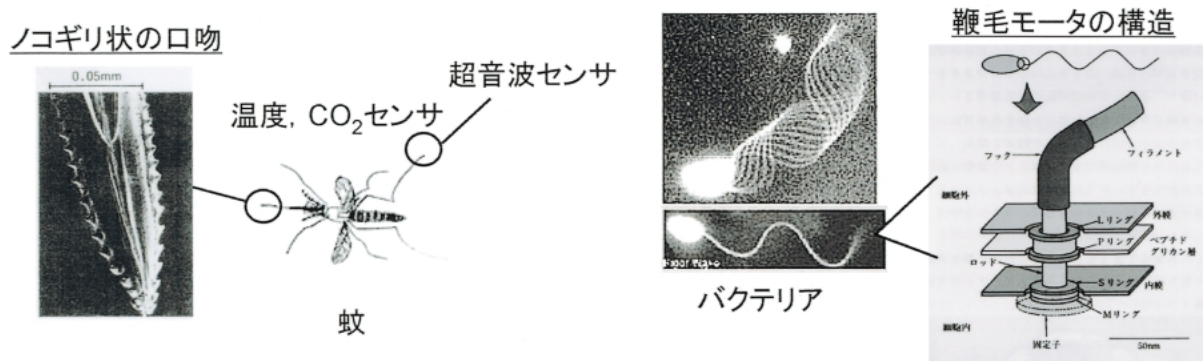
## 6. おわりに

少し具体的なイメージをとらえて、マイクロメカニクスの極限を考えてみたい。例えば、“蚊”を考えてみる。蚊の先端には非常に細いノコギリ状の針がある。蚊の種類にもよるが、私達が蚊に刺されたときに、注射針で刺された程の痛みは感じない。

つまり充分細い針になると人間は痛みを感じない。医療用のマイクロマシン分野では、極端に細い注射針の研究がなされている。また、蚊は炭酸ガスあるいは温度を検知する非常に高精度のセンサを備えているようであるし、超音波センサも備えているらしい。マイクロメートルオーダの足の先端に、一体どういうカラクリで超音波を検出するメカニズムがあるかということについては十分に解明されていない。

また、バクテリアの鞭毛のモータの構造が非常に巧妙なカラクリで回っているということが最近になって分かってきた。プロトンが流れ出るときの静電相互作用と流体力学によって、鞭毛が非常に高速で回転するらしい<sup>6)</sup>。(Fig.5)

これらはほんの一例で、こういった蚊やバクテリアの世界になると、メカニカルな運動が、今日のメカニクスという理論で充分説明できないことがまだまだたくさんある。マイクロメカニクスの研究はこれから大きく進展する。実現したい未来のマクロ系にとって、どのようなマイクロ技術が必要なのかを常に考え、世界のマイクロマシン研究との接点を持ち続けることが必要である。このような分野の地味な研究から生まれるマイクロマシンIPが、今後数多く蓄積されてくることを願う。



マイクロの世界では、まだ理論的には説明できない点が多くある。

Fig. 5 Examples of Micro mechanisms in natural features

<参考文献>

- 1) 財団法人マイクロマシンセンターパンフレット
- 2) Proceeding of Ball Semiconductor Technology Conference, San Francisco, July 11th-12th 1998
- 3) L.J.Hornbeck, " Digital Light Processing for Projection Displays : A Progress Report, " SID EuroDisplay 96, Proceedings of the 16th International Display Research Conference, pp.67-71, 1996
- 4) W.Geiger, et al, " New Designs of Micromachined Vibrating Rate Gyroscopes with Decoupled Oscillation Modes ", Transducers 97, Chicago, USA, June 1997, pp.1129-1132
- 5) 中井真嗣, 「ウェアラブル・コンピュータの実現と応用」, 日本機械学会誌, 1999.10 Vol.102 No.971, pp.19-22
- 6) 藤正巖, 中島尚正, 井街宏, 鎮西恒雄 「マイクロマシン開発ノートブック」, 秀潤社, 1991

<著者>



原 邦彦

(はら くにひこ)

取締役 基礎研究所長  
工学博士