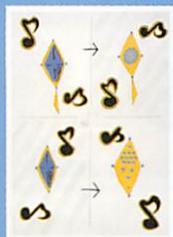


# マイクロマシン

## MICROMACHINE

- 巻頭言／2
- 研究室紹介／3
- MMCの事業活動紹介／5
- 賛助会員の活動紹介／15
- トピックス／17
- 講座「マイクロマシン技術関連専門用語」(第2回)／19
- ご案内／20

MICROMACHINE CENTER



財団法人 マイクロマシンセンター

No. 28

# 巻頭言



通商産業省 工業技術院  
機械技術研究所長 大山 尚武

世紀末を控え日本のモノづくりは、産業革命以来の“技術変革期”にぶつかっています。従来の生活産業充足型から評価基準が人間に優しく、環境を重視した省エネ、省資源、廃棄物ゼロの時代になった、ということです。世界の人口増大、その人口に合わせた食物の生産、それを支える新しい機械化はこれまでの技術の延長でなく、全く新しい発想を必要としております。多量なエネルギーを使うことは許されませんし、ましてや資源の活用も限られています。そこで我々は重点分野と方向を定めました。それは従来の基盤技術に、現在の先端技術と見られるエネルギー・環境分野、生産技術分野、ロボット・医療福祉分野の3重点分野を加え、また研究の方向性としてコンカレント化、マイクロ化、自律化を3方向として「人間・環境調和型高度機械技術の創造」(図1, 参照)を具現化させている最中です。

コンカレント化については、設計現場と生産現場が融合し同時並行的に展開する従来のコンカレント化からグローバルコンカレント化を図らなければなりません。これは生産技術の体系が最適化・融合、環境調和型になり、従来の使い捨て社会構造と全く違ったものになることです。つまり、インバースやエコファクトリーというコンセプトがキーテクノロジーになります。設計・生産し解体・再生まで含めて最適化していくという技術体系に変えることです。言い換えれば、これまでの社会は、設計・生産してモノを消費し終わっていましたが、消費後に解体・再生する技術体系を造らなければ地球環境が成り立たなくなってきたためです。この生産技術としてマイクロ化が大変重要になります。極微細化・超精密化・機能集積化の技術がそれです。さらにロボット・医療福祉分野では自動化、高機能化、人間・機械調和型の自律化が求められます。とくに日本の社会は急速に高齢化が進み、高齢者と機械の調和が必要不可欠です。ヒューマンフレンドリーな関係をつくり出す、つまり人間共存・協調型ロボットによる高度福祉支援システムが求められます。これら3方向に研究を集中しつつ「人間・環境調和型高度機械技術の創造」を構築しているところです。

図1にみえるように、マイクロ化は今後の中心的な研究課題であり、日・米・欧が伯仲状態で大接戦を演じています。その日本のマイクロマシン研究の先

頭に立っているのが、マイクロマシンセンターであり多くの研究成果が生みだされてきております。マイクロマシンセンターと幣所との間では、マイクロマシン用材料や設計・製作さらにはマイクロファクトリーについての共同研究を始めとして幅広い交流が続いています。こうした中で、生まれた研究成果のひとつに、平成8年8月8日に世界に先駆けて完成したマイクロ旋盤があります。これは、工場とかそれを構成する工作機械、コンベア、組立ラインといったものが小さくなりえる極限の一例を示したものです。このマイクロ化はエネルギーなら1.5Wですから従来の工作機械の1,000分の1、重さでは100gなので同10,000分の1、寸法も3cmなので同50分の1位になります。注目すべき事は、マイクロ旋盤が新しい原理で動いているらしいという事です。マイクロ旋盤は揺れながらも、汎用の工作機械と同等の表面粗さ、真円度では1 $\mu$ mオーダーの加工精度がでるのです。機械加工の本格的な新しいマイクロファクトリーができる可能性があるわけです。この技術を応用すれば地球温暖化、省エネ、省資源に対しても大きな貢献ができると思います。日本がマイクロファクトリーの母工場になる日も近いのではないかと夢見ています。

マイクロマシンセンターを中心とした産学官の皆様との連携の中で、日本発の新しいマイクロ化技術を生み出し、「人間・環境調和型高度機械技術」を実現すべく微力を尽くしてまいりたいと思います。何卒よろしくお願い申し上げます。



図1

## 微小脳システムによる環境情報処理と知的行動発現機構の解明をめざして

筑波大学生物科学系神崎研究室 助教授 神崎 亮平

### 1. はじめに

昆虫は変化に富んだ環境に適応して進化してきました。その結果、現在知られているだけでも180万種以上にも分化し、はばたき飛行、6脚歩行、遊泳などのさまざまな運動パターンを獲得しました。昆虫の行動は、環境下の情報が感覚器で受容され、脳による情報処理・統合を介して、運動系を指令・制御することによって生じます。結果として障害物を回避したり、それを乗り越えるアリの歩行や、アクロバティックなハエの飛翔などが実現することになるわけです。驚くべきことに、このような行動はわずか体長が1ミリか1センチ程度しかない昆虫のさらにその内部に納められた $10^{4-6}$ 個のニューロンから成

### 2. 研究目標

環境情報は時々刻々と変化しています。昆虫はこれを適切に捉え、処理し、環境に適応した行動を発現します。たとえば、匂い源から放たれた匂い分子は空中に分布し、その状態を絶え間なく複雑に変化させています。このような環境下でも昆虫は数キロにもわたりその匂い分子を追跡し、交尾のパートナーを探し当てることができます。昆虫の匂い源探索行動を原始的な知的行動のモデルと考え、昆虫がいかに環境情報を受容・処理・統合し、適応的行動を発現するかを理解し、昆虫の微小脳の設計原理を明らかにすること、そして、そこに潜む知の構成を解き明かすことがわれわれの研究目標です。

### 3. 現状

このような目的を達成するために、匂い源探索の行動戦略、感覚系における匂い情報処理機構、さらに感覚系から運動系への情報変換のプロセスを研究し、昆虫の微小な脳による環境適応行動の発現原理の解明を行っています。また、これらの分析結果を、東京大学大学院工学系研究科の下山勲教授のグループと共同で、小型移動ロボットとして統合し、実現するとともに、小型で軽量なテレメトリ(遠隔送信機)を製作し、自由に歩行や飛翔を行う昆虫から生体情報を記録して、行動や神経機能分析の結果の評価・検証を行っています。次に具体的な研究項目を紹介しましょう。

#### (1) 行動分析

風洞装置や高速度撮影装置を用いた3次元行動解析システムを構築し、昆虫の匂い源探索のアルゴリズムを探求しています。脳を構成する神経細胞数の少ない昆虫では基本的にはプログラム化された固定的な行動パターンしか発現できません。しかし、環境との相互作用を通して、固定化された行動パターンを柔軟に変容させることがわかってきました。

#### (2) 単一の脳ニューロンレベル、回路網レベルの分析 (図1)

単一の脳ニューロン活動の記録とその3次元形態を共焦点レーザー走査型顕微鏡で分析することにより、昆虫の匂い源定位行動を指令する脳内神経回路網の

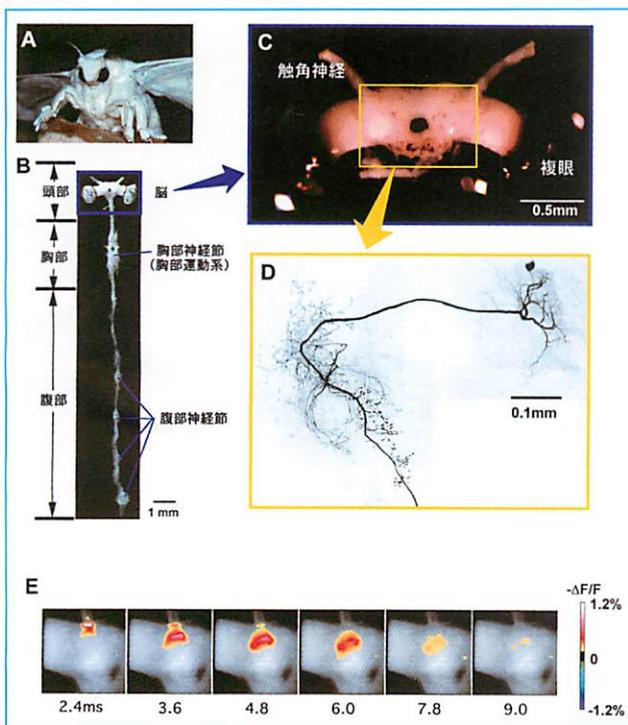


図1 昆虫の微小脳とその分析的研究。A カイコガ (*Bombyx mori*) B カイコガの脳と胸部および腹部神経節。C 微小脳。D フリップ・フロップ応答を示す脳ニューロン。E 触角神経の電気刺激により生じた神経活動の嗅覚系1次中枢(嗅葉)への伝搬イメージ。

る脳(微小脳)と運動系の活動によって発現します(図1A-D)。昆虫は自然選択のなかでその小さなサイズに適した脳構造や機能また知能を獲得したと考えられます。

解明を目指しています(図1D)。おもしろいことに、この神経回路では、電子回路で記憶素子として用いられる「フリップ・フロップ」と同様な動作特性を持つ応答が形成されます。この信号によって昆虫は右に左にへと匂い源を探索することがわかってきました。

### (3) ニューロンシステムレベルでの分析(図1)

匂い情報を処理する昆虫の脳内の1次中枢(嗅葉)において、世界ではじめて高S/Nで脳神経の時空間活動パターンのイメージングに成功しました(図1E)。現在、匂い情報の脳内でのコーディングを単一ニューロンの反応活動パターンのみならず、複数細胞の相互作用で生じる時空間パターン変化として分析しています。ミツバチやバットの嗅葉において匂いが複数細胞の相互作用で生じる振動現象のタイミングとしてコードされていることが最近、電気生理学的に示唆されましたが、われわれはこの振動現象をイメージングすることにも成功しました。匂いの識別機構に関して、昆虫と脊椎動物で共通の神経機構が存在する可能性があります。

### (4) ロボットによる分析結果の検証(図2)

(1)~(2)の分析結果を統合して小型移動ロボットとして実現し、その行動を再現して、評価・検証するという研究手法を考案しました(図2C)。ロボットの匂いセンサとして昆虫(カイコガ)の本物の触角を用いました(図2A,B)。昆虫は触角で匂いを受容します。このロボットが、カイコガと同様な匂い源への定位行動を発現すれば、分析結果の正しさを間接的に支持できます。また、結果が現実と違った場合、違いを解消する要素が考えられるならば、逆にカイコガの脳にもまだ発見されていないが、それに相当する回路のあることを推測できるでしょう。さら

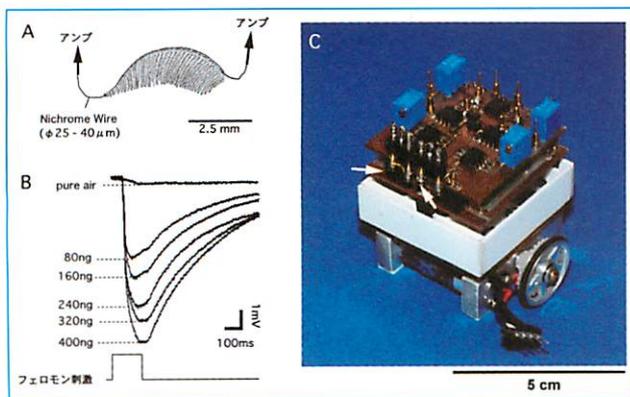


図2 昆虫の微小脳の統合的研究。A、B カイコガの触角の先端と基部の間で生じる匂い(フェロモン)に対する濃度依存的な電位応答。C 触角(矢印)を匂いセンサとした小型移動ロボット。

に、ロボットの行動発現プログラムを変えてその行動を評価すれば、個々の神経が果たす役割を調べることも可能となるでしょう。分析結果の問題点を明確化できれば、より詳細な脳機能と行動発現のメカニズムを研究できると考えています。

### (5) テレメトリ(遠隔送信機)による生体情報の分析(図3)

小型で軽量(電池込みで0.4 g)なテレメトリ(FM2チャンネル)を製作し、これにより、自由飛翔・歩行昆虫の行動中の生体情報(神経活動、筋活動)の記録を行っています(図3)。すでに、飛翔筋活動の計測には成功しました。現在テレメータを改良し、神経活動の記録を試みています。これにより、自由行動中の昆虫の脳神経活動を記録し、(1)(2)の分析結果の検証を考えています。

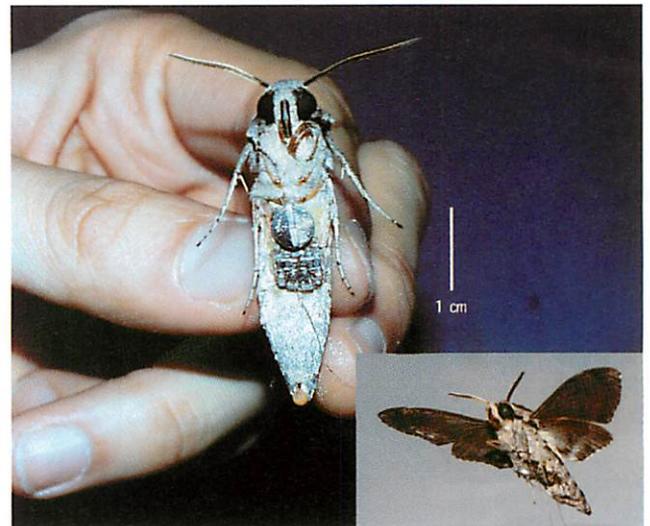


図3 テレメータを装着したエビガラスズメ(Agrius convolvuli)。

## 4. おわりに

以上ご紹介したように、わたしたちの研究室では昆虫の行動分析や、単一ニューロン、回路網、さらにシステムレベルでの電気生理学的、光生理学的分析さらにロボットによる分析結果の統合やテレメトリ技術により、総合的に微小脳による環境適応行動の発現原理の解明を目指しています。

3億年の環境変化に適応し、現在の繁栄に至った昆虫の微小脳独自の脳設計デザインとともに、脊椎動物の脳システムにおける情報処理との共通の原理が見出されることを期待しています。さらにこのような研究成果が、次世代マイクロマシンの創造に寄与できることを信じています。

## 平成10年度財団法人マイクロマシンセンター事業報告の概要

### I マイクロマシンに関する調査及び研究

#### 1. 工業技術院産業科学技術研究開発プロジェクト「マイクロマシン技術の研究開発」(新エネルギー・産業技術総合開発機構からの受託研究)

第1期計画における基本的構成要素に関する技術の研究開発成果等を踏まえ、発電プラント等の複雑な機器及び生体内の狭小部において、移動し、自律的に高度な作業、または、小型工業製品等の部品の生産作業を行う、微小機能要素から構成される機械システムであるマイクロマシンシステムを実現するための技術を確立することを目標とし、平成10度は以下の研究開発を行いました。

##### (1) 発電施設用高機能メンテナンス技術開発

###### ① システム化技術の研究開発(管内自走環境認識用試作システム)

湾曲部を含む金属配管内において、無索にて水平、垂直方向に前進、後退、停止ができ、異物など周囲環境の認識が可能な機能をもつマイクロマシン試作システムの作製を通じてシステム化技術の研究開発を行いました。本体となる移動デバイスやマイクロ波によるエネルギー供給・通信デバイスの開発等による管内自走環境認識用試作システム、異物等を撮影して画像信号を低消費電力で伝送するマイクロ視覚、及び光によりエネルギー供給と通信を行う光エネルギー伝送のシステム化等の研究開発を行いました。

###### ② システム化技術の研究開発(細管群外部検査用試作システム)

多数の単体マシンが検査対象の形態に応じて連結や分離をすることが可能な機能をもつマイクロマシン試作システムの作製を通じてシステム化技術の研究開発を行いました。本体駆動源となる駆動デバイスの開発等による細管群外部検査用試作システム、駆動デバイスの動力を走行機能に変換する減速・走行デバイス、及び単体マシンを複数個連結するためのマイクロコネクタのシステム化等の研究開発を行いました。

###### ③ システム化技術の研究開発(機器内部作業用試作システム)

多様な構造の機器内部に進入し、内部の微小傷の計測や補修作業が可能な機能をもつマイクロマシン試作システムの作製を通じてシステム化技術の研究開発を行いました。本体となる多自由度湾曲管状機構や補修用マニピュレータの開発等による機器内部作業用試作システム、小型ジャイロによって構成される姿勢検出デバイス、及び光スキャナを応用したモニタリングデバイスのシステム化等の研究開発を行いました。

###### ④ 機能デバイスの高度化技術の研究開発

将来のマイクロマシンシステムを実現するために必要な構成要素であり、マイクロマシン技術としての先進性がある機能デバイスについて、マイクロ化、高性能化、複合機能化等の高度化技術の研究開発を行いました。駆動や作業に用いる変位と発生力が共に大きなアクチュエータである人工筋肉、結合面が互いに異なるデバイスを連結し、信号とエネルギーの受け渡しが可能なマイクロジョイント、マイクロ駆動部の摩擦を低減する磁気ベアリング等低摩擦サスペンションデバイス、マイクロマシンが外部からエネルギー供給を受けられない場合に非常用の安定電圧電源としてのリチャージャブルなマイクロバッテリー、及びレーザー光の光電変換で発電した電力で駆動され、作業用ツールの精密位置決めをする光駆動自由関節デバイス等の研究開発を行いました。

###### ⑤ 共通基盤技術の研究開発

マイクロマシンシステムを実現するために必要となる制御、計測、設計、評価技術等基盤となる共通的な技術の研究開発を行いました。多数のマシンが作業に適したパターンを形成して、同時に検査等を行うことができるような分散マイクロマシン群のパターン形成技術、狭隘で複雑な環境内を移動するための超多自由度のホロニックメカニズムの実現を目指す階層型群制御技術、マイクロマシンの微細形状や動的挙動及びアクチュエータ等の微小な力やトルクの測定、また管内の異物等を検知するマイクロ光分析を行うマイクロマシンの計測技術等の研究開発を行いました。

###### ⑥ 総合調査研究

将来の発電施設の保全作業に必要なメンテナンス用マイクロマシンの基本設計を行うメンテナンス用マイクロマシンの調査研究、及びメンテナンス分野での活用が期待されるマイクロマシンシステムについての先導的な調査研究を行うマイクロマシン技術総合調査研究を行いました。

##### (2) マイクロファクトリ技術開発

###### ① マイクロ加工・組立用試作システムの研究開発

限られた狭所空間の中に、加工、組立、搬送、検査などの多数の工程に係わる機器類を統合化して組み込み、実際に、小型部品の製品モデルを作製出来る機能をもつマイクロ加工・組立用試作システムの作製を通じてシステム化技術の研究開発を行いました。マイクロ加工技術、マイクロ組立技術、マイクロ流体操作技術、マイクロ光駆動技術、マイクロ電気駆動技術、マイクロ搬送技術、マイクロ検査技術の研究開発を行いました。

###### ② 総合調査研究

マイクロファクトリ化により各種デバイスが集積化、高密度化した場合の電磁波干渉等の問題点等の調査研究を行うマイクロファクトリ化影響調査研究、及び生産分野で活用が期待されるマイクロマシンシステムについての先導的な調査研究を行うマイクロマシン技術総合調査研究を行いました。また、マイクロファクトリの経済性分析の研究、及びマイクロファクトリにおけるプラットフォームの微小振動制御に関する研究を工業技術院機械技術研究所と、さらにビーム加工用微小電子銃の高性能化に関する研究を工業技術院電子技術総合研究所との共同研究で行いました。

##### (3) マイクロマシン技術の研究開発

###### ① マイクロマシンシステムの研究

医療分野のマイクロマシンシステムとして、体腔内診断治療システムである「脳血管診断・治療マイクロカテーテル」の主要構成要素となる機能デバイスであるマイクロレーザカテーテル及びマイクロ触覚センサカテーテルのマイクロ化と機能複合化の研究開発を行いました。また、災害救助用マイクロマシンシステムの研究として、能動湾曲機能を持つマイクロカテーテルに装備する観察用小型高性能光学系、マイクロ投薬機構等の要素技術の研究を行いました。さらに、医薬品候補物質のスクリーニング等を行うための医療用微量液体分析・反応マイクロマシンシステムの要素技術の研究として、微量液体の採取・混合・分析機構、及び多数の反応を同時並行で行うマイクロマルチリアクタの基本構造について、詳細な検討を行いました。

###### ② 総合調査研究

将来医療応用分野におけるマイクロマシンシステムの活用

についての先導的な調査研究を行うマイクロマシン技術総合調査研究を行いました。また、工業技術院機械技術研究所とマイクロマシンの設計・製作基盤技術に関する共同研究を行いました。

## 2. マイクロマシン用材料に関する研究（工業技術院機械技術研究所との共同研究）

マイクロマシン用材料に関して工業技術院機械技術研究所との共同研究で①微小機能要素の作業環境に関する研究、②マイクロマシン用材料に関する研究、③マイクロマシン用材料のフィージビリティスタディを行いました。

## 3. マイクロマシンの基礎技術に関する調査研究（日本小型自動車振興会からの補助事業）

多様なマイクロマシンシステムの構築に必要なマイクロ理工学及び設計技術に関する9テーマについて、技術シーズを探索し、産学共同研究を行いました。

## 4. マイクロマシン技術による新産業創出に関する調査研究（日本機械工業連合会からの受託研究）

21世紀におけるマイクロマシンの実用化が産業活動及び社会活動に与える影響を明らかにするために、マイクロマシン技術が産業化されるシナリオを想定し、その経済効果について調査研究を行いました。

## 5. 21世紀の生活環境におけるマイクロマシンの応用可能性に関する調査研究（機械システム振興協会からの受託研究）

マイクロマシン技術のアプリケーションに関する調査研究として、21世紀（四半世紀後）の日常生活における生活環境の視点からのマイクロマシン技術の応用可能性に関して調査研究を行いました。

## 6. マイクロマシン技術国内外研究開発動向調査

マイクロマシン関連の研究に取り組んでいる内外の大学・研究機関・民間企業を抽出して、研究者、研究課題、研究内容、研究成果及び研究組織等について調査を行い、研究開発動向を分析・整理しました。

## II マイクロマシンに関する情報の収集及び提供事業

①マイクロマシンに関する情報並びに資料として定期刊行物、図書、その他の資料を収集・整備しました。②このうち、主要資料について「マイクロマシンインデックス」を定期的に発行し、関係者に提供しました。③また、インターネットを利用し、英文広報誌及びマイクロマシン技術関連イベント情報を発信しました。

## III マイクロマシンに関する内外関係機関との交流及び協力事業

### 1. マイクロマシン技術に関する研究助成

マイクロマシンに関する基礎的研究課題について研究助成を行い、マイクロマシン技術の一層の進展と、産学交流の一層の促進を図るため、平成10年度(第6回)の研究助成課題の募集を行い、新規7課題、継続5課題、合計12課題の研究助成を行いました。

### 2. 第4回マイクロサミットへの参加

平成10年4月に豪州メルボルンで開催された第4回マイクロマシンサミットに参加しました。会議では、各国・地域のマイクロマシンに関する活動状況の紹介に加え、マイクロ技術の応用を主体とした観点がなされました。

### 3. 欧州セミナーの開催

平成10年6月にフランス、ノルウェー、スウェーデンにおいて、現地研究機関と共同でセミナーを開催しました。

### 4. 第4回国際マイクロマシンシンポジウムの開催

平成10年10月に東京の科学技術サイエンスホールで第4回国際マイクロマシンシンポジウムを日本産業技術振興協会との

共催で実施しました。

## 5. 国際シンポジウムへの参加、ミッション派遣

(1) 平成10年4月に豪州・ニュージーランドの大学・研究機関に調査団を派遣し、調査を行いました。

(2) 平成10年10月に中国北京市で開催されたIARP Int'l Workshop on Micro Robotics and Systemに参加しました。

(3) 平成10年11月に米国のアナハイムで開催された $\mu$  FLUIDS98に参加しました。

(4) 平成10年11月に米国に調査ミッションを派遣し、21世紀の生活環境におけるマイクロマシンの応用可能性に関する調査を行いました。

(5) 平成10年12月にドイツのポツダムで開催されたMST98に参加しました。

(6) 平成11年1月に米国・フロリダのオーランドで開催されたMEMS99に参加するとともに米国の大学に訪米調査団を派遣しました。

## IV マイクロマシンに関する標準化の推進（一部日本機械工業連合会からの受託研究）

①マイクロマシン技術関連専門用語全220語について、和英文による「MMCテクニカルレポートマイクロマシン技術専門用語」を発行しました。

②計測評価法については、形状・寸法、力・トルク、流体特性、材料特性に関して、個別詳細調査を行い、標準化のための技術課題の詳細な調査、分析、検討を行いました。

③メルボルンで開催された第4回マイクロマシンサミットにおける合意に基づき、12か国/地域による「マイクロマシン国際標準化フォーラム」を、11月5日に発足させ、「MMCテクニカルレポートマイクロマシン技術専門用語」をたたき台とし、MMCのインターネットホームページとメーリングリストにより、国際的な意見交換を行いました。

## V マイクロマシンに関する普及啓発事業

### 1. 広報誌の発行

和文・英文広報誌を各4冊を発行しました。

### 2. マイクロマシン絵画コンテストの実施

賛助会員企業の協力を得て、第5回のマイクロマシン絵画コンテストを実施しました。兵庫県高砂市、神戸市、岐阜県岐阜市、埼玉県大宮市の小中学校合わせて21校から1,464点の応募があり、入選作品25点について表彰しました。

### 3. 平成9年度マイクロマシンの基礎技術の研究報告会の開催

平成9年機械工業振興補助事業として実施したマイクロマシンの基礎技術の研究の成果発表会を平成10年7月及び平成11年1月の2回、東京で開催しました。

### 4. 国内マイクロマシンセミナーの開催

マイクロマシン技術の研究開発に関心を持つ方々を対象としたマイクロマシンセミナーを平成10年9月に岡山県岡山市、平成11年2月に石川県金沢市で開催しました。

### 5. 第9回マイクロマシン展の開催

平成10年10月に東京の科学技術館で第9回マイクロマシン展を開催しました。

### 6. 事業紹介・普及啓発用ビデオの制作

センターの事業紹介ビデオの更新、第4回国際マイクロマシンシンポジウム及び第9回マイクロマシン展の記録ビデオを作成しました。

## 第5回マイクロマシン技術研究助成の概要

財団法人マイクロマシンセンターは、通商産業省工業技術院の産業科学技術研究開発プロジェクト「マイクロマシン技術の研究開発」を新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）より受託し、その研究開発を進めるとともに、マイクロマシン技術に関する各種の調査研究や普及啓発を図るための各種の自主事業を行っております。この研究助成制度はマイクロマシンセンターの自主事業の一環として、平成5年度より募集を開始したもので、日頃マイク

ロマシンに関する基礎的な研究に取り組んでおられる大学の先生方の研究に対し助成を行うとともに、マイクロマシン技術の一層の進展を図るとともに、産学交流をさらに促進しようとするものです。

このたび、第5回（平成9年度）研究助成で、研究期間が1年間の3テーマと平成8年度より継続していました4テーマが終了しましたので、主な研究成果の要旨を次頁以降にまとめました。

### マイクロマシン技術に関する研究助成課題

研究課題	研究代表者	所属機関 名称・職名	研究期間
	共同研究者 氏名		

#### （平成9年度研究助成）

マイクロマシンにおける付着・摩擦低減用テフロン系膜の研究	松本 佳宣	慶應義塾大学 理工学部 物理情報工学科	講師	1年
光応答性高分子ゲルを用いたメソスコピックメモリの開発	鈴木 淳史	横浜国立大学大学院 工学研究科 人工環境システム学専攻	助教授	1年
機械的ナノマシニングによる長さの基準スケールの作成	三宅正二郎	日本工業大学 システム工学科	教授	1年

#### （平成8年度研究助成）

レーザー光放射圧制御ダイヤモンド微粒子を利用したマイクロ加工に関する基礎的研究	三好 隆志	大阪大学大学院 工学研究科 機械システム工学専攻	教授	2年
	高谷 裕浩	同上	講師	
音響キャビテーションを利用したマイクロジェットポンプの開発	亀田 正治	東京農工大学 工学部	助教授	2年
磁気研磨法によるマイクロマシン用精密部品の高精度鏡面加工	進村 武男	宇都宮大学大学院 工学研究科 エネルギー環境科学専攻	教授	2年
マイクロ三軸触覚センサの開発に関する研究	大岡 昌博	静岡理工科大学 理工学部	助教授	2年
	三矢 保永	名古屋大学 工学部	教授	

### 第7回（平成11年度）「マイクロマシン技術に関する研究助成課題の募集要項」

- 研究助成の対象  
マイクロマシンの基盤研究、機能要素技術、システム化技術に関する基礎的研究。
- 研究期間  
テーマA：平成12年4月～平成13年3月31日  
テーマB：平成12年4月～平成14年3月31日
- 課題募集期間と課題決定及び助成金交付時期  
募集期間：平成11年7月12日～10月31日  
決定時期：平成12年3月上旬  
助成金の交付：平成12年3月下旬
- 応募方法  
応募用紙の請求は、下記財団法人マイクロマシンセンターへ送付先を明記のうえ、FAXにて請求して下さい。  
(FAX：03-5294-7137)
- 応募資格  
マイクロマシン連合会に加盟する学協会等に所属する大学教員（教授、助教授、講師及び助手）
- その他  
(1) 助成金総額：1,500万円程度  
(1件につき、テーマAは200万円、テーマBは300万円を限度とする。)  
(2) 本事業は、産学交流の促進を目的の一つとしているため、助成の決定後、マイクロマシンセンターの賛助会員企業等との共同研究をお願いすることがあります。  
(3) 問合せ先：財団法人マイクロマシンセンター 研究部（担当：程野）

# マイクロマシンにおける付着・摩擦低減用テフロン系膜の研究

慶應義塾大学 理工学部 物理情報工学科 講師 松本 佳宣

## 1. はじめに

マイクロマシンにおいては部品の水素結合、ファンデルワールス力が無視できなくなり、製作途中や使用中に水の表面張力により部品同士が引き寄せられそのまま付着するという問題が発生する。この問題はstictionと呼ばれ、マイクロマシンの製作歩留まりとその信頼性を阻む大きな問題である。本研究は表面エネルギーの最も小さい材料であるテフロン系膜をマイクロマシンに堆積させて付着や摩擦を低減させる研究を行った。

## 2. プラズマ重合法

本研究ではテフロン系膜の製膜にドライプロセスで製膜が可能で膜質が優れているプラズマ重合法を採用した。プラズマ重合装置の概要を図1に示すが、この装置は真空チャンバー内に陽極と網状の陰極と基板加熱可能なウェハステージを有しており、テフロン系膜の材料源ガスおよび添加ガスはそれぞれリング状のパイプと陽極に空いた穴から供給される。高周波電源により陽極と網状の陰極の間でプラズマ放電を発生させると、活性化した材料ガスは網状の陰極からウェハステージへと拡散していき、ウェハ表面へ到達して重合反応を起こしテフロン系膜が形成させる。この装置では、陰極とウェハステージが同電位であるため、ウェハ表面がプラズマ衝撃によるダメージを受けることなく良質の膜が製膜可能である。

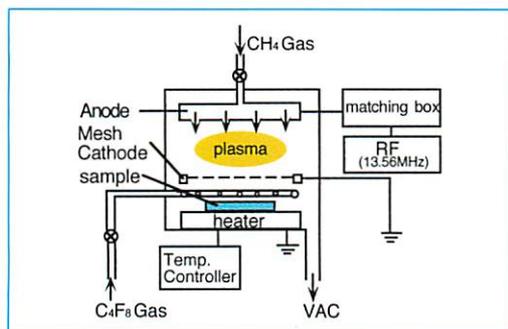


図1. プラズマ重合装置の構造

テフロン系膜は $\text{CHF}_3$ ガス、 $\text{C}_4\text{F}_{10}$ ガスやフッ素化ナトリウム( $\text{C}_5\text{F}_{12}$ ,  $\text{C}_6\text{F}_{14}$ ,  $\text{C}_7\text{F}_{16}$ )等のプラズマ処理により形成されるが、CとFの比(F/C比)が小さい方が堆積速度が向上する事が知られており、本研究では、最も小さいF/C比を持ち高い堆積速度を実現できる $\text{C}_4\text{F}_8$ ガスを材料ガスとして用いた。

また、テフロン系膜の耐熱性の向上させるため、基板加熱を行いつつ添加ガスとしてメタン $\text{CH}_4$ を加えた。 $\text{CH}_4$ は材料ガスのF/C比を減少させる効果があり堆積速度の向上が図れる。テフロン系膜の堆積速度と $\text{CH}_4/\text{C}_4\text{F}_8$ 比と基板温度の関係を図2に示すが、基板温度が $50^\circ\text{C}$ 、 $200^\circ\text{C}$ の両方において $\text{CH}_4$ の添加により堆積速度が向上し、特に $200^\circ\text{C}$ の場合では10倍近く堆積速度が向上する事が確認された。

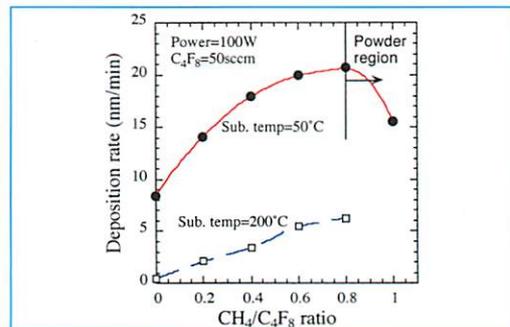


図2. テフロン系膜の堆積速度と $\text{CH}_4/\text{C}_4\text{F}_8$ 比と基板温度の関係

基板温度 $200^\circ\text{C}$ 、 $\text{CH}_4/\text{C}_4\text{F}_8$ 比=0.2の条件で製膜した膜は、空气中 $350^\circ\text{C}$ 20分の熱処理に対しても十分な耐熱性を持ち、熱処理後の水の接触角に関しても熱処理温度 $350^\circ\text{C}$ までは図3に示すように $110^\circ$ の接触角を持つ良好な撥水性を有している。これよりMastrangeloらによって報告されている付着の理論からこの膜が付着防止に有効であることがわかる。実際にこの膜をマイクロマシニング技術により製作された加速度センサに堆積して付着の評価を行ったところ、 $2000\text{G}$ に相当する静電引力により構造体を基板に100回接触させたにもかかわらず付着は生じておらず、本方法がマイクロマシンの付着防止に有効であることが確認できた。



図3. 製作したテフロン系膜上での水の接触角

## 3. おわりに

本研究では、マイクロマシンの付着、摩擦低減を目的としたテフロン系膜をプラズマ重合法を用いて製膜してその評価を行った。特に基板加熱と $\text{CH}_4$ ガスの添加により実用的な耐熱性と堆積速度を実現した。今回は摩擦低減の効果に関しては評価を行わなかったが、テフロン系膜が摩擦低減にも有効であることは米国Sandia National Laboratoryの研究グループから既に報告されており、マイクロマシンの信頼性向上と長寿命化に有効であることが確認されている。本報告がマイクロマシンの実用化の一助となれば幸いである。

# 光応答性高分子ゲルを用いたメゾスコピックメモリの開発

横浜国立大学大学院 工学研究科 人工環境システム学専攻 助教授 鈴木 淳史

## 1. はじめに

マイクロマシン用材料の優れた機能の設計と開発は、材料中のナノメートルサイズにおけるユニークな構造とそれに伴うユニークな現象をどのように活用するかにかかっている。近年の高分子物理・化学の進歩により、生体のもつ優れた機能を模倣しようとする試みが提案されてきた。その実現のためには、様々な種類の柔軟構造を持つナノコンポジットの開発が望まれる。本研究では、複雑構造をもつ希薄な多自由度系であるソフトマテリアルとしての高分子ゲルに注目し、そのメゾスコピックレベルの構造を、可視光によって制御する技術の基礎を研究した。ゲルに見られる体積相転移を利用して、マイクロドメイン構造を光により制御し、メゾスコピックメモリの設計指針を与えることを目的にした。

## 2. 研究成果

### 2.1 ゲルの相転移とメゾスコピックメモリの原理

複雑希薄固体であるゲルの物性研究から、次の3つの基本的な現象を見出し（図1）、その基礎を構築した。

- (1) 相転移の温度によるヒステリシスを利用した可視光による収縮相転移
- (2) ゲルの応力誘起相転移
- (3) 原子間力顕微鏡（AFM）による水中でのゲルの表面構造の直接観察

これらの現象を基礎として、高分子ゲル網目のメゾスコピックサイズのドメインを利用して、可視光によりメモリ機能を発現させることが原理的に可能となった。外部環境変化によるドメイン形態のヒステリシス現象を利用して、局所的な熱発生により収縮相転移という書込みを行ない、光を遮断しても収縮状態を保持し、外部環境変化により膨潤相転移という消去を行なう機能の原理が確立された。

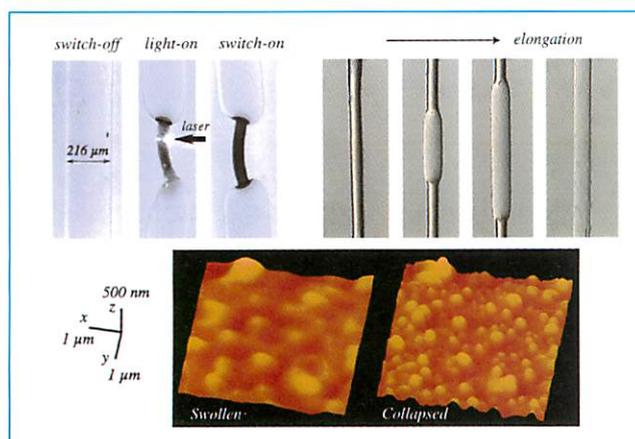


図1

### 2.2 人工的に導入したドメイン構造の相転移

- (1) 代表的な熱応答性ゲルの1つN-イソプロピルアクリルアミド（NIPA）ゲルをフィルム状に合成し、AFMにより表面の不均一性を観察し、ラフネス解析を行った。
- (2) NIPAゲルをサブマイクロオーダーの直径をもつビーズ状に合成し、ゲルビーズの刺激応答性を調べた。ゲルビーズを熱的に安定なアクリルアミド（AAm）ゲル中に包括固定し、得られたハイブリッドゲルの光応答性を調べた。このゲルは、ゲルビーズが母相のAAmの網目に物理的にゆるく拘束されており、温度変化に応答して透明度が変化する。これは、ゲル全体の密度を変化させることなく、温度変化に応答するゲルビーズの局所的な形状変化により、光透過率を制御するものである。温度をステップ状に変化させたときの応答速度を測定した。
- (3) ゲルビーズの凝集状態を観測するために、均一構造を持つNIPAゲルにNIPAゲルビーズを包括固定し、収縮相の破断面をAFM観察した（図2）。
- (4) 可視光によりドメインを収縮（書込み）させ、光を遮断しても収縮状態を保持し、外部環境変化により膨潤相転移（消去）を行なう機能の発現について最適条件を検討した。ゲルの表面構造の階層性、局所的な収縮相の力学的安定性について考察した。

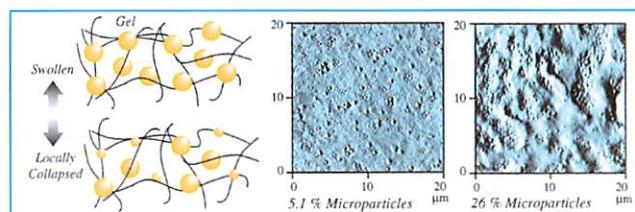


図2

## 3. まとめ

本研究により、高分子ゲルのマイクロドメイン構造を光により制御するための基本原理が確立された。また、本研究を推し進めて得られる成果は、ゲルという柔軟・複雑構造をもつ希薄固体が示す多様な性質の理解と、それを生み出す一般原理の確立に、重要な役割を果たすものと考えられる。ゲルのユニークな性質は、ゲルを構成している高分子鎖のメゾスコピック構造と、さらに高分子鎖を構成している分子間の相互作用との組み合わせによって、システムティックに変化する。このメゾスコピック領域に、ソフトマテリアルからなる新しいマイクロマシンの研究領域があるものと考えられ、将来におけるこの分野の発展が大いに期待される。

# 機械的ナノマシニングによる長さの基準スケールの作成

日本工業大学 システム工学科 教授 三宅正二郎

## 1. はじめに

原子間力顕微鏡 (AFM) を用い、超硬質膜チップを工具として、層状結晶材料などを nm オーダで加工するナノマシニングを実現する研究です。具体的には層状結晶材料など原子の結合力の差を利用して加工単位を層間距離に制御し、層状結晶の1層を深さの加工単位とした原子オーダの除去加工を実現します。さらにその結果を活用し、一定加工深さの高精度な格子溝などを形成し、これらの加工形状と表面原子像と合わせ、nm オーダの3次元的な長さの基準スケールを形成します。

## 2. 原子間力顕微鏡を用いた機械加工

結晶材料の異方性を利用し、周期的に弱い結合を有する結晶材料を被加工物とすれば、その周期で高精度の加工が実現できます。例えばマイカ(白雲母: Muscovite mica)などは層状構造を示し、基底面における相互作用の少ないへき開面が存在します。さらに、これらのへき界面は原子像の観察が可能です。

加工は光てこ式のAFMを用いて行いました。加工に用いる立方晶窒化ホウ素(cBN)膜チップ、ダイヤモンドライクカーボン(DLC)膜チップは先端径50nm以下で垂直剛性約50N/mのSi製チップをベースとして成膜を行いました。カンチレバーの変形から上下2つのフォトセンサで原子間力を求め、これを制御して一定荷重で摩擦させ、加工します。一定形状を加工するため、チップの走査経路をコンピュータでコントロールしました。

試験片に用いたマイカの結晶構造とチップによる加工モデルを図1に示します。マイカはK、Si、O、Al、OHな

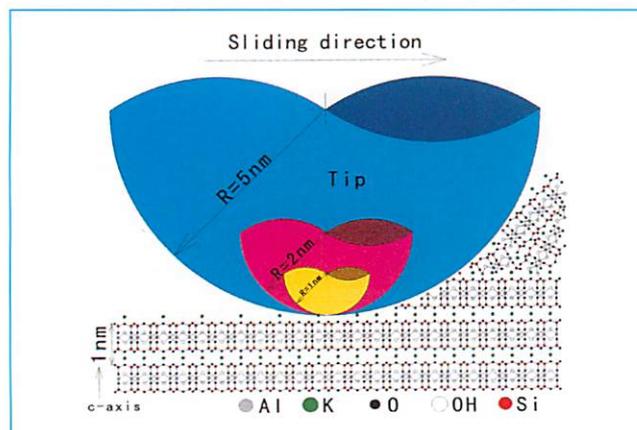


図1 AFMによるマイカの加工モデル

どの各種元素が積み重なった形状になっており、表面にはSiO<sub>4</sub>が観察されます。へき開面はSiO<sub>4</sub>に挟まれたK層になり、表面から約0.8nm下および1nm下の面になります。加工における破壊は結合力の弱いファン・デル・ワールス力から成るSiO<sub>4</sub>とKとの間で生じ、マイカのへき開面単位で加工され易くなります。

微細加工の基本的形状であるラインアンドスペースを取り上げ1nm深さの溝を形成するのに、線間隔をどの程度まで狭くできるか検討しました。図2(a)はSiチップを用

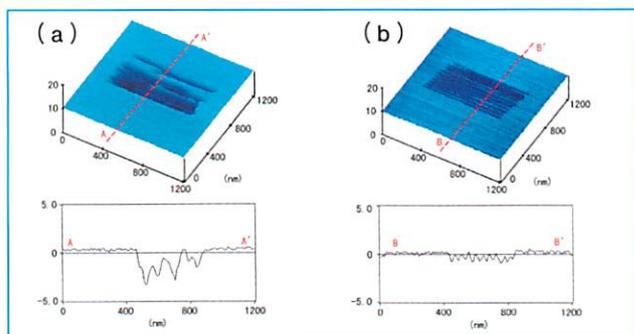


図2 ラインアンドスケールの加工結果  
(a) Siチップによる加工例  
(b) c-BNチップによる加工例

いて線間隔50nmで加工した形状です。隣接する加工溝同士が重なり合い、分離した溝が形成できず、最大深さも約3nmに達しています。図2(b)はcBN膜チップを用いて形成した溝です。Siチップよりも微細に加工でき、隣接する加工溝が分離され、ほぼ1nmの深さとなっています。DLC膜など他の硬質膜でも加工溝同士が重なりました。

cBN膜チップを用いて形成した80nmピッチの格子溝を図3に示します。このようにcBNチップを用いればnmオーダの微細加工が可能です。これらのナノマシニングにより表面原子像の格子間隔と合わせ、nmオーダの3次元的な長さの基準スケールの形成が可能になりました。

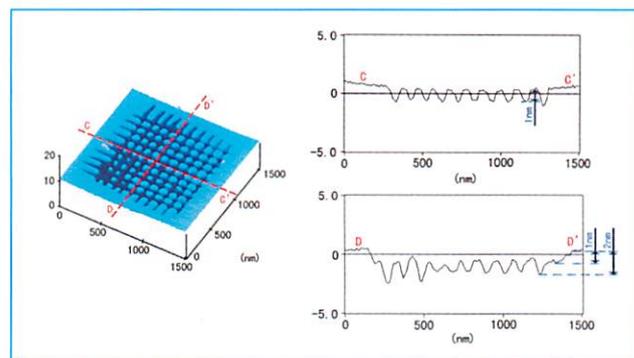


図3 c-BNチップによる格子溝の加工例

## 3. おわりに

これらの超硬質膜チップを用いたナノマシニングは長さの基準スケールの形成のみではなく、超高精度が必要なマイクロマシン作成に広く適用できます。現在は超高密度記録用テラビットAFMメモリー、ナノマシンの形成などナノテクノロジーの研究に展開しています。

# レーザー光放射圧制御ダイヤモンド微粒子を利用したマイクロ加工に関する基礎的研究

大阪大学大学院 工学研究科 教授 三好 隆志

## 1. はじめに

レーザー光が物体に及ぼす微小な光放射圧で微粒子を自由に捕捉・制御することができるレーザートラッピング技術を利用することによって、新しいマイクロ加工技術の確立を目指すものである。図1に示すように、微粒子(例えばダイヤモンド微粒子)に集光レーザー光が入射した場合、微粒子表面における反射および屈折によってフォトンの運動量変化が起こり光放射圧の合力が微粒子の重心でトラッピング力として働く。その垂直方向成分は下向きの押し付け力、水平方向成分は回転力、焦点位置の上下変動は縦振動そして横に走査させることで切削力の発生などが考えられる。本研究はこのような光放射圧を持つ多種多様な性質を利用し制御することでマイクロ加工を実現しようとするものである。

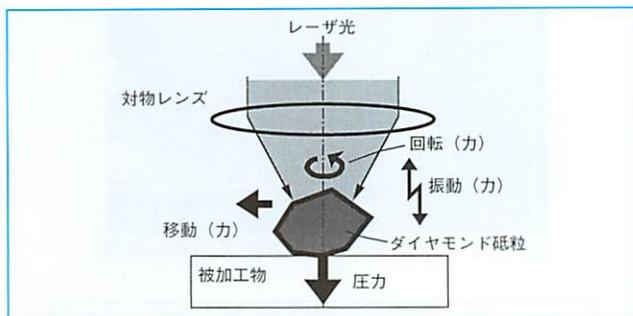


図1 光放射圧マイクロ加工の考え方

## 2. 実験装置

図2は、設計試作した実験装置の概略図である。ダイヤモンド砥粒を捕捉するレーザートラッピング光学系と、CCDカメラによりダイヤモンド砥粒の挙動を観察する顕微鏡光学系から構成されている。まず、Arレーザー光を、対物レンズ(NA0.55)で集光し、ダイヤモンド砥粒に照射する。この時のレーザー出力は0.3W、レ

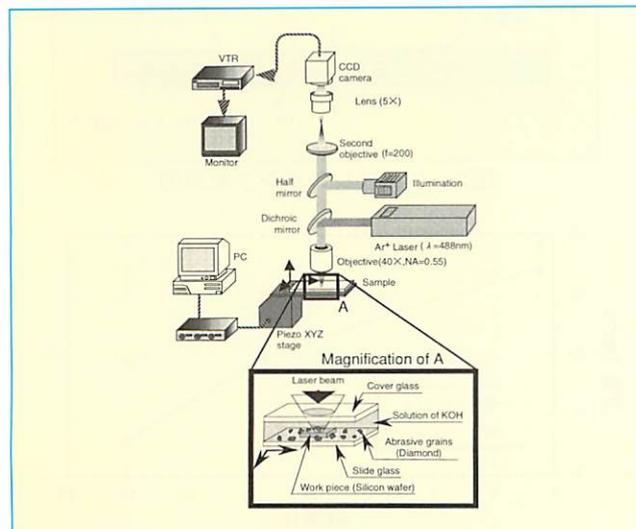


図2 光放射圧マイクロ加工の実験装置

ーザスポット径は約 $4\mu\text{m}$ である。計算機シミュレーションに基づく、このときの押し付け力は $0.1\text{nN}$ オーダー程度と推測される。pH11程度に調整したKOH水溶液中にダイヤモンド砥粒(粒径数 $\mu\text{m}$ )を分散し、この加工液をシリコンウエハ切片上に満たした状態で図のようなガラス容器中で加工実験を行った。なお、試料を載せたステージはコンピュータによって数nm単位で任意の軌跡を描くように移動制御することができる。

## 3. 実験結果

図3は実験の1例である。約 $150\text{rpm}$ で回転しているダイヤモンド砥粒(サイズ:約長径 $6\mu\text{m}$ ×短径 $3\mu\text{m}$ )を50回走査したシリコンウエハ試料表面のAFM観察像である。図中央に見える「」形状の輝度の低い暗い部分が加工痕と考えられる。この凹部の断面プロファイル(A-B断面)を見ると、深さ $3\sim 4\text{nm}$ で幅 $4\sim 5\mu\text{m}$ 程度の溝が観察され、使用したダイヤモンド砥粒サイズに相当している。光放射圧マイクロ加工のメカニズムを推測すると、光照射によって原子相互の結合力が低下し、回転砥粒による僅かな衝撃力(光放射圧)でも比較的容易に除去可能となり、またKOH溶液でさらに化学的にも除去作用が促進されるためではないかと考えられる。

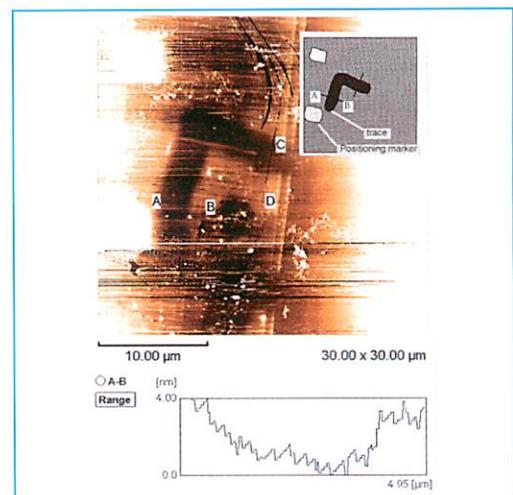


図3 AFMによる加工痕と断面プロファイル

## 4. おわりに

$0.1\text{nN}$ 程度の光放射圧で、平均径 $4\mu\text{m}$ のダイヤモンド砥粒を安定して保持することができ、さらに一部の砥粒は約 $150\text{rpm}$ で回転し、回転中の砥粒を自由に移動制御できる。KOH溶液中で光放射圧によるダイヤモンド砥粒への押し付け力と回転力によって、深さ数ナノメートルオーダーの加工痕が観察されマイクロ加工の可能性が示唆された。

# 音響キャビテーションを利用したマイクロジェットポンプの開発

東京農工大学 工学部 機械システム工学科 助教授 亀田 正治

## 1. はじめに

圧力変動にともなう気泡の膨張・収縮運動を利用した小型ポンプの開発を進めた。超音波音場では、特定の条件下で気泡が大振幅の膨張・収縮運動をする。この現象を音響キャビテーションという。この運動をポンプ作用として積極的に利用し、小型でありながら大流量が得られるポンプシステムにすることを目標とした。

## 2. 中空弾性マイクロカプセル

液体中では気泡を安定して存在させることは難しい。そのため、気泡の機能を果たす、弾性壁を有する微小な中空カプセルの開発を行った。壁材には、ポリスチレンビニル系ポリマー(PS-nBA)と合成ゴム(スチレンブタジレンゴム, SBR)を合わせたものを用いた。また、カプセルの調製には、液中乾燥法を用いた。

作成したカプセルの電子顕微鏡写真を図1に示す。おおむね直径0.2 mm程度の球形カプセルが得られた。ただし、壁に微細な孔があいているカプセル顔奥見られた。小孔から封入した空気が漏れるため、小孔のあるものは不良品である。現状では、密閉カプセルの収率が低く、調製方法の改良が必要である。また、減圧環境下におけるカプセルの動きを調べ、壁に孔のないカプセルが膨張することを確認した。

## 3. バルブレスポンプ

次に、図2に示すポンプを設計した。高周波の気泡膨張・収縮運動に追従する可動式の弁を製作することはきわめて困難であるため、バルブなしのシステムとすることとした。

設計したバルブレスポンプは、1対のノズル/ディフューザを持っていることが特徴である。同一条件のもとでは、ノズルとディフューザとの間に通過できる流体の量(流量)に違いがある。図3に、いくつかの条件における流量の違いを計算した結果を示す。条件によらず、ディフューザ側からの流量がノズル側のそれより上回ることがわかる。したがって、このバルブレス機構によって一方向への流動を作ることができる。

## 4. おわりに

本ポンプの重要な構成要素である、中空弾性カプ

セルの試作およびバルブレスポンプの設計、性能評価を行い、一定の成果を得た。現在、これらをすべて組み合わせたポンプシステムを試作中であり、近々性能試験を開始する予定である。

なお、マイクロカプセルについては東京農工大学・尾見信三教授より、バルブレスポンプについては東京工業大学・中別府修助手より絶大なるアドバイスをいただいた。記して謝意を表します。

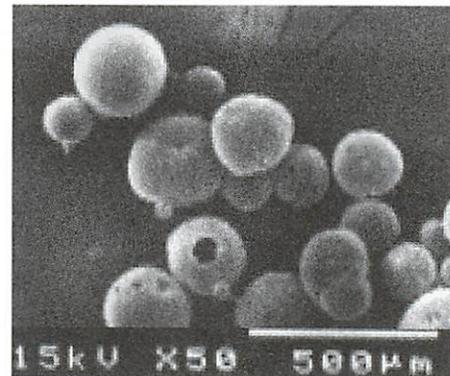


図1 マイクロカプセルの電子顕微鏡写真

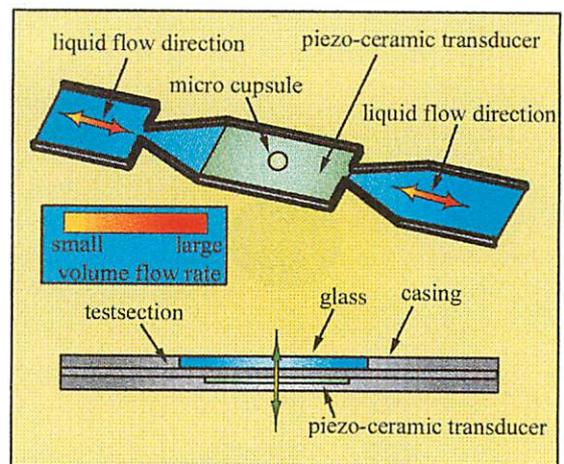


図2 バルブレスポンプ概略図

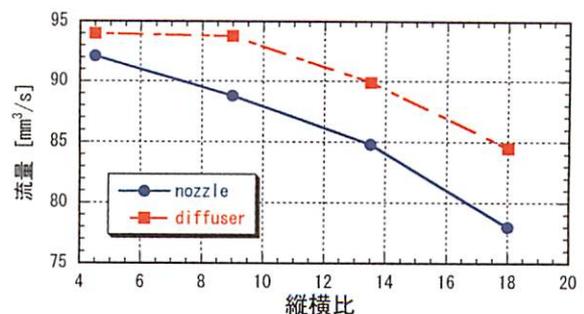


図3 ノズル/ディフューザの流量特性

# 磁気研磨法によるマイクロマシン用精密部分の高精度鏡面加工

宇都宮大学大学院 工学研究科 エネルギー環境科学専攻 教授 進村 武男

## 1. はじめに

マイクロマシン用微細部品のみならず、最近のコンピュータ・医療機器・各種精密機械は小形・軽量・高性能化に向かって著しく変化しており、これらの機械・機器要素としての微細複雑形状部品に対する新しい高精度精密仕上げ技術の開発が切望されている。本研究は、この社会的ニーズに、筆者らが開発した「磁気研磨法」が適用できるか否かについて検討したものである。

## 2. 加工原理と問題点の指摘

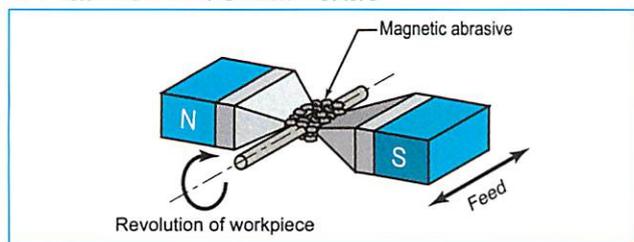


図1 磁気研磨法の加工原理

図1に加工原理を示す。N-S磁極間の加工ゾーンに磁性砥粒を充填すると、磁性砥粒は磁力線に沿って整列し、磁力（加工力）を発生する。この中に工作物を挿入して回転運動を与えると工作物表面が精密に研磨される。

小型複雑化した工作物に対しては、加工装置の小形化と磁性砥粒の細粒化により磁気研磨法を実現できると考えられる。しかし、砥粒の細粒化は加工力を減少させて加工能率の低下を引き起こす。一方、高磁力を得るには粒径を大きくする必要があるが、工作物径が大径砥粒間に入り込み、工作物表面と砥粒の接触点が減少して、加工能率が低下する。このため、小型複雑化した工作物に対して、従来の磁気研磨法のスケールを単純に小さくするだけでは対応しきれないことも予想される。そこで、実験により加工可能な限界径について検討した。

## 3. 加工実験と結果

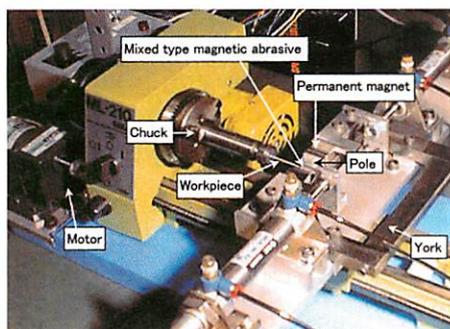


図2 加工装置の外観写真

図2に、実験装置の外観写真を示す。小型卓上旋盤の往復台に磁極、ヨーク、永久磁石からなる磁場発生装置

を設置し、往復台の送り方向と送り速度をモータによって自動的に制御できるようにした。直径1.5 mm、長さ75 mmのSUS304丸棒を工作物として用い、工作物回転数、磁極の送り速度、磁性砥粒に混合する鉄粉径を変化させて加工実験し、磁気研磨法の実現性と加工特性への影響を調べた。

図3に工作物回転数の影響を示す。工作物回転数の増大は、単位時間あたりの加工距離を増加させるため、加

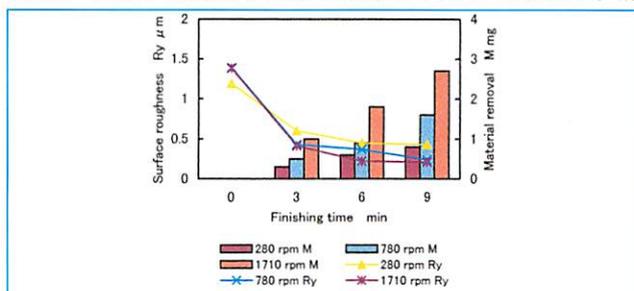


図3 表面粗さと研磨量の時間的変化〔回転数の影響〕

工量も増加する。

図4に鉄粉径および送り速度の影響を示す。加工量は、磁極の送り速度に大きくは影響されていない。回転数が磁極の軸方向送り速度に比べて極端に大きいため、加工軌跡の交差効果が発現できないためと考えられる。また、

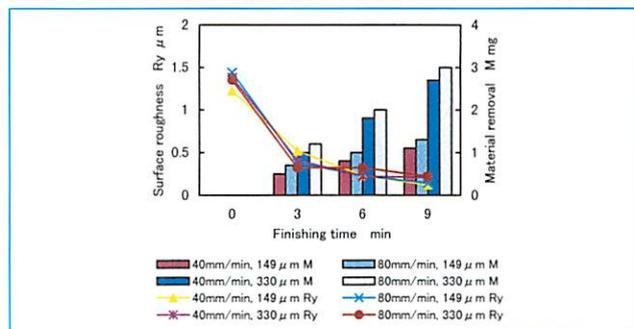


図4 表面粗さと研磨量の時間的変化〔鉄粉径と送り速度の影響〕

鉄粉径の増大に伴い加工量が増加している。粗粒鉄粉が加工力を増大して砥粒の切り込みを大きくさせたためと考えられる。

また、十分な加工時間後の表面粗さは全ての加工条件においてほぼ一定の値に収束する傾向をもっている。用いた磁性砥粒の粒径に依存すると考えられる。いずれにしても研磨の可能性を明らかにした。

## 4. まとめ

直径1.5 mm以上の工作物研磨は、従来の磁気研磨法のスケールを単純に小形化することによって実現できることを明らかにした。

# マイクロ三軸触覚センサの開発に関する研究

静岡理科大学 理工学部 機械工学科 助教授 大岡 昌博

マイクロマシンが血管や消化器官内での検査・治療や、プラントなどの配管内での点検・保守などを行う場合には、血管および配管の壁との接触が避けられない。また、壁面に形成された腫瘍やクラックなどの患部や欠陥部を発見し、適切な処置を行うことも求められる。

上述のような接触を伴う作業を遂行する場合、触覚は有効である。さらに、血管・配管の内壁に付着した物体の除去が要求され、そのためにせん断力の計測が必要となる。したがって、マイクロマシン搭載用触覚センサには、三軸力計測の能力が求められる。

そこで本研究では、マイクロスコープ形マイクロロボット搭載用三軸触覚センサを開発することを目的としている。マイクロ化が有利なように、センサの構造として可能な限り単純なものを採用し、アルゴリズムを工夫することによって三軸力の計測を可能とした。

本触覚センサの原理図を図1に示す。図1に示す

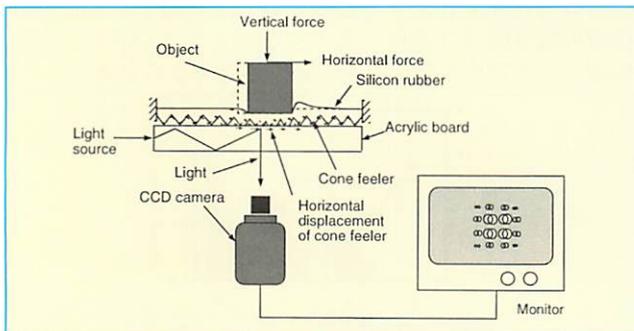


図1 三軸力検出法

ように、本触覚センサは、ゴムシート、アクリル板、CCDカメラ、光源装置などから構成されている。光源装置からアクリル板端面に導かれた光は、アクリル板内を全反射された状態で閉じ込められる。このアクリル板表面にゴムなどの物体が密着すると、その密着部分で散乱反射が生じ接触部分の様子が裏面から観察できる。ゴム表面には、円すい状の突起(円すい状触子)がアレイに配列されているため、ゴムに作用する垂直力の分布が光の強度分布として計測できる。また、作用力のせん断成分が大きいほど円すい状触子の水平方向移動量が大きくなる。以上のように、本触覚センサでは、垂直力と水平力は、それぞれ光の強度と円すい触子の移動量から同定する。上述の原理に基づいて試作したセンサの構造を図2に示す。

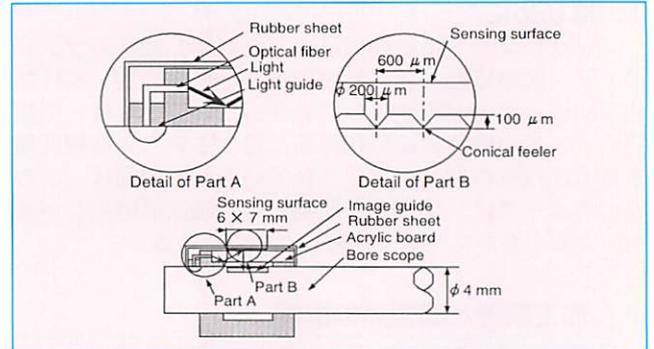


図2 本触覚センサの構造

本触覚センサは、高感度であるために、較正試験を実施する際に、電子天秤と自作のロードセルを組合せた二軸の力センサを新しく開発した。この装置を用いて、垂直力の感度特性を測定したところ、輝度値と垂直力の間に関係が成立していることがわかった。

次に、水平方向の感度を図3に示す。図3からわかるように、低荷重領域と高荷重領域では感度係数が異なっている。また、垂直力の大きさによって、

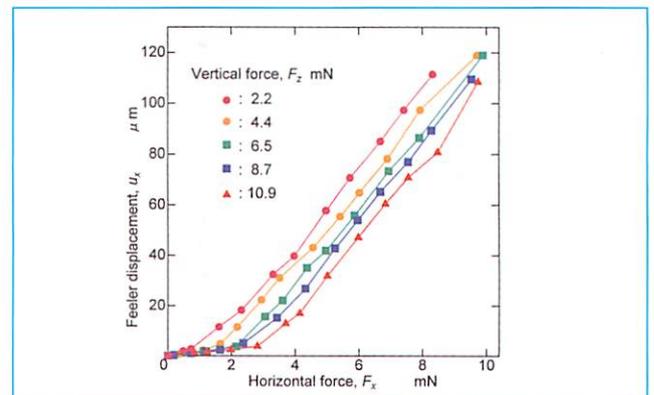


図3 水平力の感度特性

屈曲点が水平方向に移動することもわかる。しかし、別途行った実験から、水平力の大きさは垂直方向の感度特性に影響を与えないために、屈曲を生じさせる水平力と、垂直力の関係を求めておけば、触子の移動量から水平力を一意に求めることができる。

マイクロスコープ形マイクロマシンに搭載することを目的とした三軸触覚センサの原理を提案し、試作機によってその原理の妥当性を確認した。今後、本センサとマスタ・マニピュレータ・システムを組合せて、通常サイズの触覚センサでは計測不可能な微小物体の表面状態の識別実験へと発展させる予定である。

## 三菱電機株式会社



先端技術総合研究所 所長 山中 皓郎

### 1. マイクロマシン技術への取り組み

知恵や技術の発展は、ヒトが思い描く小さな夢から始まります。これまで積み重ねてきた技術や知識に、新しい機能やコンセプトをプラスしインテグレートすることで、その夢をもっと大きくふくらませていきます。三菱電機の先端技術総合研究所は、21世紀の暮らしがもっと便利に、快適になるように、当社の全事業分野を通して社会に貢献し、一步も二歩も先の大きな未来を創造します。未来への夢をカタチにしていくためのテクノロジーの一つが、マイクロマシン技術です。

### 2. マイクロマシン技術の開発

産技プロジェクトの中で当社は、細管群外部検査システムの研究開発に取り組んでいます。これは、本体が5mm立方、コネクタを加えても幅が10mm以下の単体マシンを複数個作り、対象とする管のまわりを取り巻いて上下動しながら、管の傷を検査するものです。

単体マシンを構成する要素の一つが、図1に示す駆動デバイスです。これは、ラジアルギャップ型の電磁モータで、直径1.6mm、長さ2mmで、回転数は1分間に40,000回です。固定子の寸法は、外径1.6mm、内径0.8mm、長さ0.7mmで、内部には6つのスロットがあります。1つのスロットには、高アスペクト比多層化技術により製作した50ターンの微細コイルが内蔵されており、コイルの絶縁材料としては、熱伝導性に優れたSiO<sub>2</sub>を用いました。また、回転子には、外径0.74mm、内径0.55mm、長さ1.0mmの永久磁石(NdFeB)と、ステンレス鋼の回転軸を用いました。

この駆動デバイスを組み込んだ単体マシンを、

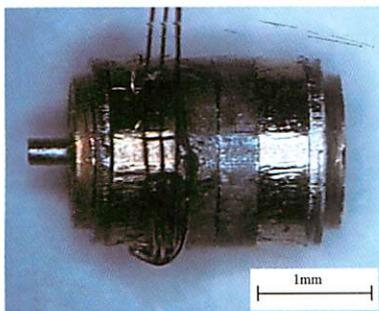


図1 駆動デバイスの外観

図2に示します。2個の駆動デバイスが、左右一対の減速・走行デバイスにそれぞれつながっています。減速・走行デバイスには、永久磁石製の駆動輪が1個、従動輪が2個ついており、水平走行とともに壁面の昇降を行います。これらの走行メカニズム部分は、1辺が5mmの立方体です。この上に、左右一対のマイクロコネクタを搭載した探傷デバイスが載っています。この単体マシンを平面上で走行させたところ、直線走行並びに左右の車輪の回転数を変化させる事による曲線走行が可能なる事を確認しました。さらに、単体マシンの自重の2倍以上の物体（一円硬貨）を押して走行できる事も分かりました。これは、永久磁石車輪と平面との間の磁石吸引力により、強いトラクション力が得られるためです。

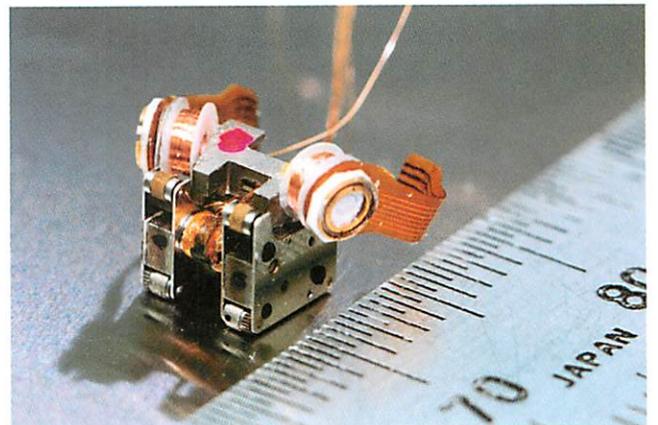


図2 走行用マイクロ単体マシン  
(住友電気工業(株)、松下技研(株)と共同で開発)

### 3. 今後の取り組み

当社では、システム化技術と要素技術をバランス良く開発しながら、冒頭に述べた夢を実現するべく、努力を続けています。上記の産技プロジェクトを推進すると共に、そこで開発した技術をマイクロマシンシステムの実用化に結びつけ、それを通して高度情報化社会に貢献するべく、研究開発を進めて行きます。

# 三菱電線工業株式会社



取締役・総合研究所長 鈴木 光一

## 1. マイクロマシン技術への取り組み

光ファイバ技術を応用し、信号やエネルギーの伝送に光を利用したマイクロアクチュエータやマイクロセンサの技術開発を行っています。光を利用することにより、電磁干渉の影響を受けず、高密度信号、エネルギー伝送が可能で、さらに小型化が容易になります。これらの技術は21世紀をにらんだものであり、マイクロサージェリー等高度で人に優しい医療技術や、危険性がなく重労働を伴わない各種産業用メンテナンスシステム等への応用が期待されており、これらを実現する基礎技術として積極的に取り組んでいます。

## 2. マイクロマシン技術の開発

マイクロマシンが細管内部や機械・装置の狭所空間で作業を行う場合、実際に種々の作業を行うマニピュレータやその動きを制御するためのセンサと共に、視覚的に周囲の状況を把握するような「目」の役割を担うデバイスが不可欠となります。この視覚機能も上述の空間においては、従来のスチルカメラやビデオカメラの適用には限界があります。さらにデスクトップ型の工場であるマイクロファクトリにける微小部品の加工工程、組立工程の全般にわたって視覚機能により検査をする場合、平面的な観察では不十分であり、奥行き感覚のある立体観察が不可欠です。具体的にはマイクロファクトリの加工ユニットにおいてはマイクロ電解加工デバイスの加工状態のモニタリング、加工穴の検査が、組立ユニットにおいては組立ステージ上の基板の設置状態の検査、

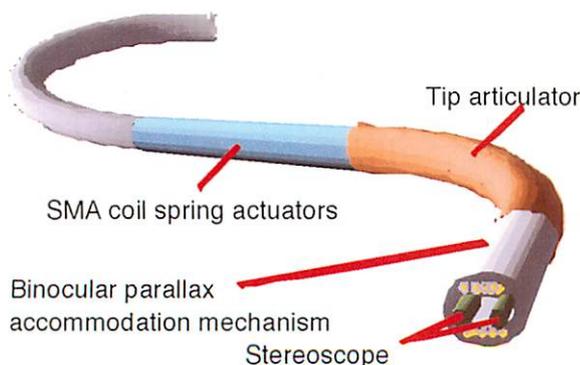


図1 環境認識デバイス

あるいは歯車挿入状態の検査が要求されています。そこで非常に小さな部品や狭い領域を人間があたかも小さくなって、その場で観察しているような人工現実感を実現すべくファイバスコブ型環境認識デバイスの開発を進めています(図1参照)。本デバイスを実現するため、可とう性があり細径化に適し、観察・作業対象物に合わせたセンシングが可能な視差可変機構を有するファイバスコブを用いたマイクロ立体視技術と、屈曲部を通過したり視野を自由に選択するための先端首振り構造の開発を進めています。試作したデバイスの首振り動作を図2に示します。外径3mmのデバイス中に形状記憶合金マイクロアクチュエータを応用した首振り機構を内蔵することにより、先端首振り角約60°の動作を実現しました。

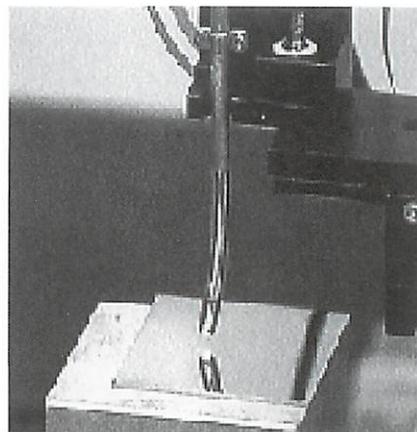


図2 首振り動作

## 3. 今後の取り組み

マイクロファクトリに環境認識デバイスを実際に搭載し、要求される検査機能に対する機構検証を行い、マイクロ検査技術を完成させる予定です。さらにこれまでに得られた産技プロジェクト成果を基にマイクロマシン技術の実用化を目指し、産業用、医療用を問わず広い範囲に応用すべく研究開発を進めて行きます。

## 第5回マイクロマシンサミット開催される

第5回マイクロマシンサミットが英国スコットランドのGlasgow Marriott Hotelで1999年4月28日～30日に開催されました。今回は、昨年までの世界13の国と地域（日本、アメリカ、イギリス、地中海地域、オーストラリア、ベネルクス、カナダ、スイス、ドイツ、フランス、北欧、中国、台湾）に韓国（今回

は特別参加、次回から正式加入）が加わり、代表48名、オブザーバ35名の合計83名が参加しました。日本からの参加者は、下記の通りで、東京大学大学院工学系研究科長の中島尚正教授を首席代表とする4名の代表団と、賛助会員企業とMMCから11名がオブザーバとして参加しました。

	氏 名	所 属
代表団 (4名)	中島尚正 石丸典生 下山敏郎 平野隆之	東京大学 大学院工学系研究科長 株式会社 デンソー 取締役会長 オリンパス光学工業株式会社 代表取締役会長 財団法人マイクロマシンセンター 専務理事
オブザーバ (11名)	堀 孝信 山下 牧 太田 亮 作原寿彦 倉橋 崇 前野正記 沢田 潔 奥 秀明 苗村康次 鶴田和弘 岩田裕司	(株)アイシン・コスモス研究所 取締役社長 オムロン(株) 中央研究所 取締役所長 オリンパス光学工業(株) ARC第1研究室長 セイコーインスツルメンツ(株) 基盤技術部長 (株)デンソー 研究企画部 次席部員 (株)デンソー 秘書部 課長 ファナック(株) 基礎技術研究所 名誉所長 ファナック(株) 基礎技術研究所 奥研究室長 三菱電機(株) 先端技術総合研究所 機械システム部長 (財)マイクロマシンセンター 研究部 課長 (財)マイクロマシンセンター 調査部 課長



サミット会場風景

会議は、ホスト国である英国：Smiths IndustriesのBeardmore教授を総合的な議長として、7つのセッションにおいて、それぞれサブの議長を設け、議事が



日本代表団

進行され、カントリーレビュー、新展開とホットトピックス、バイオニクス、環境、製造技術と標準、自律分散システム、少量生産のコストの解決法、大規

模生産産業へのインパクト、将来展望といったマイクロマシン技術の応用・展開を主体とした観点で活発な議論が交わされました。日本代表団の発表ではMMCの平野専務理事、東京大学大学院工学系研究科長の中島尚正教授、(株)デンソーの石丸典生会長、オリンパス光学工業(株)の下山敏郎会長（発表順）が、日本のマイクロマシン技術の現状と動向、将来の展望についてそれぞれ発表され、好評を博しました。特に下山会長は、医療応用に関してビデオを用いたインパクトのあるプレゼンテーションを行なわれました。なお次回のサミットは2000年4月10～12日に日本の広島で開催されることが首席代表ミーティングで承認され、当センターが中心となって準備を進めて行くことになりました。またサミットの前後には、英国調査ミッションが生まれ、オックスフォードのRutherford Appleton研究所、Exitech社、グラスゴーのStrathclyde大学、ニューポートのSTS社、ブリストルのBritish Aerospace社、ロンドン西郊外のCRL社、ロンドンのインペリアル大学を訪問し、研究者との親交を深めることができました。Rutherford Appleton研究所ではCentral Microstructure facilityを訪問し、電子ビーム、エキシマレーザー、SR等を用いたリソグラフィ技術とプラズマエッチング技術など、主にシリコン基板上に3次元のマイクロ構造体を加工する技術の研究について説明を受けました。続いて訪問したExitech社では、スタッフ40名という小規模企業でありながら、先進的なレーザー微細加工技術の開発を行なっており、3次元的に複雑な構造も加工できるなど、アグレッシブな研究開発を行なっていました。グラスゴーにあるStrathclyde大学訪問では2つの

光学系研究室と超伝導デバイス研究室の3箇所を見学しました。光学系の研究室ではマイクロストラクチャーを持つセンサーやレーザーを用いた3Dイメージシステム（歯の内部の虫歯検出）、さらに光ファイバーを用いた微小蛍光分析プローブ等について説明を受けました。また超伝導デバイスの研究室では、超伝導量子干渉素子（SQUID）を用いて、生体磁気（脳磁、筋磁）の検出が行われていました。次に住友精密工業(株)の傘下であるSTS（Surface Technology Systems）社では、世界シェア80%以上を持っているICP（誘導結合型プラズマ）エッチング装置、およびASE（Advanced Silicon Etch：高アスペクト比のシリコンエッチング）等について説明を受けました。British Aerospace社は、赤外線センサの性能評価用の赤外線イメージディスプレイ、PZTやシリコンを用いたマイクロジャイロ、高周波電磁フィルタ、流体コントロールデバイス等航空機への応用を目的としたマイクロデバイスの開発についての説明を受けました。CRL（Central Research Laboratories）社では、プルトニウムの分別や抽出のアプリケーションを目指したマイクロケミカルリアクターを中心に説明を受けました。最後にインペリアル大学では、電気電子工学部を訪問し、そこで研究されている櫛歯状の静電アクチュエータ・共振器、自己組立技術による3次元マイクロ光学デバイス、4本の光ファイバを用いたマクスペクトロメータ、シリコンマイクロマシンング技術による赤外線センサ、高周波インダクタ・スイッチ等について担当者から個別に説明を受けました。



CRL研究者と訪問団



インペリアルカレッジにて

## 講座 マイクロマシン技術関連 専門用語 [第2回]

MMCテクニカル・レポート「マイクロマシン技術専門用語 (MMC TR-S001(01)-1998)」から主要用語を抜粋する第2回です。参考資料など詳細については、MMCテクニカル・レポートをご覧ください。

### アクチュエータ 【Actuator】

【定義】 電気的エネルギー、化学的エネルギー等の種々のエネルギーを力学的運動エネルギーに変換して、機械的仕事を行う機械要素。

【解説】 マイクロマシンが機械的仕事を行うためには、その基本要素としてマイクロ化されたアクチュエータが不可欠である。主な例として、シリコンプロセスで作製した静電アクチュエータ、PZTのような機能性材料を利用した圧電アクチュエータ、ゴム製空気圧アクチュエータ等があるが、その他にも様々なエネルギー変換原理を応用した多くのマイクロアクチュエータが研究開発されている。しかし、これらのアクチュエータは、小型化するほどエネルギーの変換効率が低下するため、マイクロマシン用の新規アクチュエータとして、生物の運動メカニズム、例えばタンパク分子の変形、細菌の鞭毛運動、筋収縮等を解析し、これらを利用することも研究されている。【参考資料】 (1)(2)(3)(6)

### 圧電アクチュエータ 【Piezoelectric actuator】

【定義】 圧電材料を利用したアクチュエータ。

【解説】 圧電アクチュエータは、単板形、バイモルフ形および蓄層形に分類され、圧電材料としてはチタン酸ジルコン酸鉛が一般的に用いられる。その特徴は、1) 応答速度が速い、2) 単位寸法当たりの発生力が多い、3) 構造が簡素で小型化が容易、4) 変位レンジが小さく微小変位コントロールが容易、5) エネルギー変換効率が高い、等である。超音波モータ、微小変位ステージ、圧電ファン、圧電ポンプ、圧電スピーカ等に用いられている。開発例として、圧電バイモルフの共振振動を利用して移動を行う移動機構用圧電アクチュエータや、蓄層形圧電素子の変位をてこで拡大する微小位置決め用圧電アクチュエータ等がある。

【参考資料】 (2)(4)(5)(6)(8)(14)(15)

### 形状記憶合金アクチュエータ

【Shape memory alloy actuator】

【定義】 形状記憶合金を利用したアクチュエータ。

【解説】 形状記憶合金アクチュエータは、小型軽量で、発生力が多い。温度変化サイクルにより、連続的な繰り返し動作をさせたり、また、スイッチングによる通電加熱で任意の動作をさせることも可能である。最近では、特に速い動きを必要としない用途において、フィードバック機構および冷却機構を工夫することによって、サーボシステムを構成することが試みられている。例えば、細胞の操作のためのマイクログリッパ、微小流量を制御するマイクロバルブ、医療用の能動内視鏡等の開発が行われている。【参考資料】 (4)(5)

### 光歪アクチュエータ 【Photostrictive actuator】

【定義】 光の照射エネルギーを吸収することにより発生する機械的ひずみを利用したアクチュエータ。

【解説】 PLZT素子に光(紫外線)を照射すると、素子の電極間に高い光起電力が発生する。また、PLZT素子は圧電素子の一種であり、電圧よりひずみが発生する。従って、これら2つの効果により、光の照射が機械的ひずみに変換されると考えられている。光歪アクチュエータは非接触で駆動可能であるという利点があり、スイッチや光音響素子等への応用が考えられている。ただ応答速度が分オーダと極めて遅いのが欠点である。【参考資料】 (4)(8)

### 静電アクチュエータ 【Electrostatic actuator】

【定義】 静電力を利用したアクチュエータ。

【解説】 静電アクチュエータは構造が簡単で、小型化するほど重量当たりの出力向上が期待できるため、マイクロマシン用のアクチュエータとして多くの研究がなされている。ワブルモータ、フィルム型静電アクチュエータ等の試作例がある。

【参考資料】 (4)

### 電磁アクチュエータ 【Electromagnetic actuator】

【定義】 電磁力を利用したアクチュエータ。

【解説】 電磁力を利用したマイクロアクチュエータの主要な要素は、磁石と巻線である。サブミリ以下のサイズのマイクロ電磁デバイスのロータには、スパッタで成膜した薄膜磁石が有効である。デバイスの出力増大のためには、高いエネルギー積と大きな膜厚が薄膜磁石に求められる。一方、マイクロなラジアルギャップ型デバイスでは、円筒形状固定子にコイル巻線を形成することが難しいため、電磁力利用デバイスに関する研究は、平面的な構造、即ちアキシアルギャップ型に関するものが多い。効率の点からはラジアルギャップ型が優っており、円筒形状固定子へのコイル巻線プロセスの開発が必要である。【参考資料】 (1)(8)

### 鞭毛モータ 【Flagellar motor】

【定義】 バクテリアの鞭毛を駆動するモータ。

【解説】 バクテリアの鞭毛回転のためのエネルギー源は、細胞内外における水素イオン濃度の電気化学的ポテンシャル差である。回転部は生物界で唯一の回転運動器官として、世界最小のモータを構成する。その構造は、繊維、フック、基部体からなる化学的モータである。モータの回転は、細胞の外から内への水素イオンの流れによって生じていると考えられるが、イオンの流れを回転に変換する機構は明らかになっていない。

【参考資料】

## 第5回国際マイクロマシンシンポジウム 開催ご案内

<p><b>開催日時</b> 平成11年10月28日(木) 9:30~17:10 (懇親会: 18:00~20:00) 29日(金) 9:30~16:40</p> <p><b>開催場所</b> 科学技術館 サイエンスホール 東京都千代田区北の丸公園2-1</p> <p><b>主催</b> (財)マイクロマシンセンター (財)日本産業技術振興協会</p> <p><b>後援(予定)</b> 通商産業省、工業技術院、 新エネルギー・産業技術総合開発機構</p> <p><b>協賛(予定)</b> マイクロマシン連合、マイクロマシン 研究会、マイクロメカトロニクス研究会</p>	<p><b>参加費</b> 参加申込み 15,000円 (予稿集代・懇親会費用を含みます) 平成11年10月15日までに(財)マイクロマシン センター宛に所定の申込用紙に記入の 上、FAXにてお申込み下さい。先着順に受付 し、定員になり次第締め切らせていただき ます。 (財)マイクロマシンセンター 国際交流部 Tel: 03-5294-7131 Fax: 03-5294-7137</p> <p><b>問い合わせ先</b></p>
---	--

\*\*\*\*\*プログラム\*\*\*\*\*

<b>10月28日</b>	
9:00~	受付開始
<b>セッション1: 「オープニング」</b>	
9:30	開会の辞 平野隆之/(財)マイクロマシンセンター 専務理事
9:30~ 9:35	開会挨拶 石丸典生/(財)マイクロマシンセンター 理事長
9:35~ 9:43	来賓挨拶(予定) /通商産業省
9:43~ 9:51	来賓挨拶(予定) /通商産業省工業技術院長
9:51~ 10:00	来賓挨拶(予定) /新エネルギー・産業技術総合開発機構
10:00~ 10:45	特別講演「マイクロマシンが21世紀にもたらすもの」 石井成望/東京大学名誉教授
<b>セッション2: 「マイクロマシン産業への進」</b>	
市場の展望	
10:45~ 11:05	「21世紀のマイクロマシン市場展望」 児玉文雄/東京大学大学院工学系研究科
アプリケーションの開拓	
11:05~ 11:25	「ウェアラブル情報マイクロマシン」 板生清/東京大学大学院新領域創成科学研究科
11:25~ 11:45	「ペトロロボットとマイクロマシン」 佐藤知正/東京大学大学院工学系研究科
標準化の推進	
11:45~ 12:05	「標準化の動向」 佐藤壽芳/中央大学工学部
12:05~ 13:10	昼食
<b>セッション3: 「海外の動き」</b>	
13:10~ 13:30	「Recent MEMS Activities in USA」(仮題) (依頼中)(米国)
13:30~ 13:50	「Nordic Collaboration in Micromachine Technologies」 Francois GREY/University of Denmark
13:50~ 14:10	「Recent Activities on Micromachine Technologies in Australia」(仮題) Ronald B. Zmood/Royal Melbourne Institute of Technology
14:10~ 14:30	「Recent Activities on Micromachine Technologies in Switzerland」 Nico F. de Rooij/University of Neuchatel
14:30~ 14:50	休憩
<b>セッション4: 「革新研究紹介」</b>	
14:50~ 15:10	「バイオチップに関する最新研究動向」 民谷栄一/北陸先端科学技術大学院大学
15:10~ 15:30	「治療機器としてのマイクロマシン」 鎮西恒雄/東京大学先端科学技術研究センター
15:30~ 15:50	「磁気ディスク装置のナノテクノロジー」 三矢保永/名古屋大学大学院工学系研究科
15:50~ 16:10	「MEMS Transducers for Fluidic Control」 Chi-Ming HO/University of California, Los Angeles
<b>セッション5: 「マイクロマシン考 ―若者への発信―」</b>	
16:10~ 16:30	「青少年の生活・価値観のトレンド」(仮題) 門脇厚司/筑波大学教育学系(依頼中)
16:30~ 16:50	「科学技術館・展示としてのマイクロマシン」 林達郎/(財)日本科学技術振興財団
16:50~ 17:10	「MEMS Education Program at UCLA」(仮題) Chang Jim Kim/ University of California, Los Angeles
18:00~ 20:00	懇親会(於 如水会館)
<b>10月29日</b>	
9:00~	受付開始
<b>セッション6: 「産業科学技術研究開発制度プロジェクト“マイクロマシン技術の研究開発”の進展状況」</b>	
総論	
9:30~ 9:40	「産業科学技術研究開発制度とマイクロマシン技術の研究開発」 岡崎誠/通商産業省工業技術院 研究開発官
9:40~ 9:55	国立研究所におけるマイクロマシン技術の研究展望
9:55~ 10:10	「機械技術研究所におけるマイクロマシン技術の研究開発」 小鍛治繁/通商産業省工業技術院 機械技術研究所
10:10~ 10:25	「電子技術総合研究所におけるマイクロマシン関連技術の研究」 平井成興/通商産業省工業技術院 電子技術総合研究所
10:25~ 10:40	「計量研究所におけるマイクロマシン技術の研究開発」 櫻井慧雄/通商産業省工業技術院 計量研究所
マイクロマシンセンターにおける研究開発	
○総論	
10:40~ 10:55	「マイクロマシンプロジェクトの概要」 安宅龍明/(財)マイクロマシンセンター 研究開発部長
○システム化技術	
10:55~ 11:25	「管内自環境認識試作システムについて」 川原伸章/(財)マイクロマシンセンター W/G主産
11:25~ 11:55	「細管群外部検査試作システムについて」 成宮宏/(財)マイクロマシンセンター W/G主産
11:55~ 13:00	昼食
13:00~ 13:30	「機器内部作業試作システムについて」 太田亮/(財)マイクロマシンセンター W/G主産
13:30~ 14:00	「マイクロファクトリ試作システムについて」 古田一吉/(財)マイクロマシンセンター W/G主産
○要素技術	
14:00~ 14:20	「高密度マイクロ視覚モジュール三次元実装技術」 山田浩/(株)東芝
14:20~ 14:40	「形状自在電池の開発」 村石賢介/三菱マテリアル(株)
14:40~ 14:55	休憩
14:55~ 15:15	「人工筋肉を応用したマイクロアクチュエータの研究」 ロナルド ベルライン/(財)SRI国際ナショナル
15:15~ 15:35	「圧電薄膜アクチュエータを用いた超小型2次元光スキャニングセンサ」 戸谷浩巳/オムロン(株)
15:35~ 15:55	「マイクロジャイロ」 竹村光治/(株)村田製作所
15:55~ 16:15	「ファイバースコープを用いた環境認識デバイス」 遠山修/三菱電線工業(株)
16:15~ 16:35	「マイクロサーボアクチュエータの開発」 中村裕司/(株)安川電機
<b>セッション7: 「クロージング」</b>	
16:35~ 16:40	閉会挨拶 林 暉/(財)日本産業技術振興協会

表紙のことは：マイクロマシン絵画コンテスト入賞作品：上から、マイクロちょうおんぱルー、水中調査マシン、洪水予想感知器、サウンドピアス&サウンドコントローラー

### 編集後記

今年いつもの年より早く梅雨入り(6月3日)になったものの、雨らしい雨も降らず6月も半ばを過ぎました。まるで本号が発行される大暑の頃の天気が続いています。

さて、本号では第5回マイクロマシン技術研究助成成果の概要、英国グラスゴーで開催された第5回マイクロマシンサミットの報告及び先号から掲載を始めたマイクロマシン技術専門用語解説など盛り沢山の内容です。

特にサミットに関しては、京都での第1回サミットの参加国が日本を含め10カ国・地域であったものが13の国と地域に広がりを見せ、世界に確実に定着し成果を挙げております。来年の記念すべきサミットは日本の広島で4月10日から12日に開催されることも合意されました。センターでは、立派な記念大会とすべく万全の体制で準備を進めて参りますのでご期待下さい。

### 発行 財団法人マイクロマシンセンター

発行人 平野 隆之  
 〒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  
 wwwホームページ: <http://www.ijnet.or.jp/MMC/>

無断転載を禁じます。