

1. はじめに

マイクロマシンセンターでは、できるかぎり多くの方々に「マイクロマシン技術」について関心をもっていただくために、本誌に入門的な技術解説を連載することになりました。とはいっても、この技術は誕生して間もないために、それに関わっている研究者や技術者の間でも、共通の概念が確立されているとは言えない状況にあります。本講座に対するご意見等にも、配慮しながら解説を進めたいと考えています。

(1) マイクロマシン技術とは

「マイクロマシン」のイメージについて共通認識が確立されているわけではありませんが、藤正巖教授(東大)が示した図1¹⁾のような機能部品(た

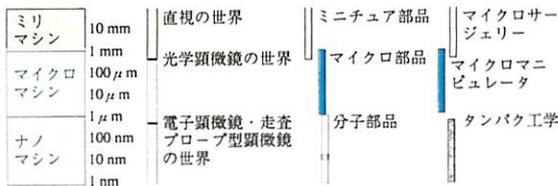


図1 マイクロマシンの大きさ

例えば、アクチュエータ、メカニズム、センサなど)の寸法による区分が最大公約数的には受け入れられています。すなわち、外形寸法がおおよそ1mmから1µm程度のきわめて微小な機能部品を組み立てたものがマイクロマシンと呼ばれています。しかしながら、ミリマシンやナノマシンとマイクロマシンとの技術的境界が寸法だけでは決まらない部分もあり、また応用システムを考える場合には相互の連係も重要なことから、マイクロマシンセンターでは、これらを含めたものを広義のマイクロマシンとして捉えています。

このようなマイクロマシンを現実にするのに必要な技術を「マイクロマシン技術」と呼んでいます。この技術は共通概念が確立されていませんが、マイクロマシンセンターでは、研究開発を進めるにあたって、表1に示すような多数の要素技

表1 マイクロマシン技術の体系

項目	構成要素技術
基盤技術	加工技術 アセンブリ技術 材料技術 設計技術 計測評価技術 マイクロ理工学
機能要素技術	微小機能要素技術 エネルギー供給技術 電子回路技術
システム化技術	制御技術 複合化技術

術で構成された技術体系をマイクロマシン技術としました。なお、この概念に近いものに、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) やMST (Micro System Technologies) などがあります。

(2) 技術としての特徴

1mmに満たないような寸法の世界では、小さ

なものに働く粘性や表面力などの影響が著しく大きくなり、他方、慣性力の作用が相対的に小さく

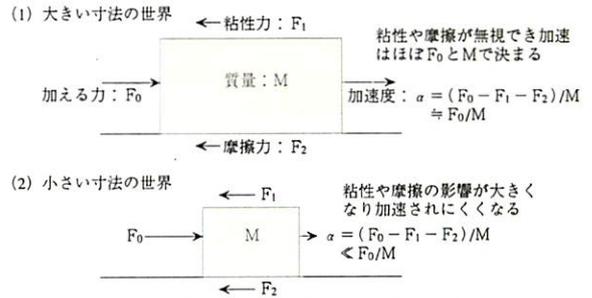


図2 マイクロマシンの世界の特徴

なります(図2)。そのために、メカニズムやアクチュエータのような機能要素の寸法を単純にマイクロ化すると、その作動効率が低下して十分な働きが得られません。したがって、マイクロマシンはマイクロ環境の特性に適した種々の機能要素を必要とします。マイクロマシンの加工やアセンブリ、材料、エネルギー供給、システム構成なども同様に、寸法のマイクロ化に適した新たな手法を必要とします。言いかえると、マイクロマシン技術は、マイクロ環境にマシンを適合させるための技術の集合体であると言えるでしょう。

このマイクロマシン技術は、機器のマイクロ化を実現させるための、いわば極限化技術の一つとみることができます。極限化技術の多くは、通常その応用範囲がかなり限定されますが、マイクロマシン技術の場合はむしろ多様な産業分野での利用が期待されていることから、産業における新たな基盤を形成する技術として位置づけられています。そして既に、この技術の一部は情報通信や自動車の分野で、マイクロセンサなどの形で利用されはじめています。

研究開発の多様性もこの技術の特徴の一つになっています。この技術はICプロセスで1mmに満たないマイクロモータやマイクロリンク機構などを製作したことに端を発して、多くの研究者や技術者に注目されるようになったと言われてきましたが、現在では、機械、電子、医療などの多様な技術・工学分野で研究開発が展開されており、一つの学際的技術分野が形成されつつあります。

今回はプロローグとして、マイクロマシン技術の概念とその特徴を紹介しました。次回からは、この技術の背景や技術内容の個別的な解説を順次行います。

(参考文献) 1) 吉川弘之ほか編; マイクロマシン技術による製品小型化・知能化事典、(株)産業調査会 (1992)、pp544

「マイクロマシン技術」(第2回)

1. マイクロマシン技術の構成

前回、マイクロマシン技術はマシンをマイクロ環境に適合させる技術の集合体であり、一つの技術体系になっていると述べました。そしてこの技術体系は、基盤技術、機能要素技術（デバイス化技術）、及びシステム化技術で構成されるとしました。さらに、この技術は極めて応用範囲が広いことから、将来、産業基盤技術の一つになると述べました。

この技術体系の中で、基盤技術はマイクロマシンを製作するための基礎的な要素技術や理工学からなり、加工技術、アセンブリ技術、材料技術、設計技術、計測評価技術、及びマイクロ理工学が含まれます。デバイス化技術は、マイクロマシンシステムが必要とする各種機能デバイスの作動原理や構造の具体化に関する技術であり、駆動デバイス技術、エネルギーデバイス技術、センサデバイス技術、及び電子デバイス技術で構成されます。

さらに、システム化技術はマイクロマシンシステムの構築や運用に関わる技術の集合で、複合化技術（インターフェイス技術及びインテグレーション技術）、通信・制御技術などで構成されています。

しかしながら、このような技術分類は在来技術のアナロジーでおこなったもので、それぞれの要素技術間の仕分けは、現在のところ必ずしもはっきりしている訳ではありません。たとえば、加工技術（基盤技術）の一つにシリコンプロセスがありますが、この加工法は原料ガスから薄膜状の材料を作る工程や犠牲層エッチングなどを組み合わせて簡単なアセンブリまで行うというように、加工、材料、及びアセンブリが一体化した技術になっています。このような数種類の要素技術の一体化や再構成は今後の研究開発によって一層強まるでしょうし、またそれによって、マイクロマシン技術としての特徴をもった技術体系が創造されていくことになるでしょう。

2. 基盤技術

2.1 加工技術

表1は、マイクロマシンの加工に適した種々の微細加工法を示しています。表中の主要な手法について、その要点を順次説明します。

(1) シリコンプロセス

1987年から88年にかけて、シリコンプロセスで製作した寸法 $100\mu\text{m}$ 程度のリンク機構や静電型モータが次々と発表され、これが発端になってマ

加工法	概要とおもな特徴
シリコンプロセス	・光リソグラフィとエッチング/デポジションを組み合わせた加工法。 ・サブアセンブリとバッチ処理による量産が可能。
LIGAプロセス	・軟X線リソグラフィ、電気メッキ、モールドを組み合わせた加工法。 ・高アスペクト比の部品製作、モールドによる量産が可能。
ビーム加工	・レーザー、電子、イオンなどのビームによる直接またはアシスト加工。 ・マスクレスで加工。3次元形状に加工が可能。
放電加工	・ワイヤ放電研削と型彫放電加工を組み合わせた加工法。 ・金属材料を自由な3次元形状に加工が可能。
光造形	・レーザービームにより光硬化樹脂を局部的に固化させる成形法。 ・任意の3次元形状の製作が可能。
射出成形	・熱硬化樹脂、粉体混入樹脂などを型に注入、固化させる成形法。 ・3次元形状の製作、量産が可能。
機械加工	・カッターにより機械的に除去する加工法。 ・任意の3次元形状の製作が可能。
その他	・電解加工法、イオン注入、STM加工法など。

表-1 微細加工法の種類

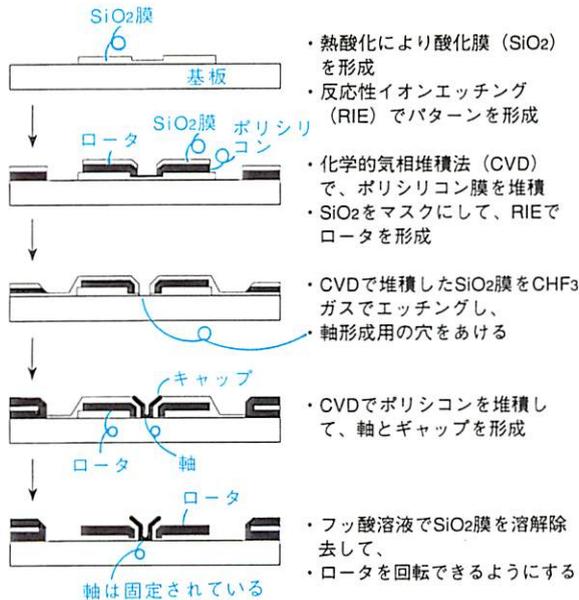


図-1 シリコンプロセスによる機構製作手順の例

マイクロマシンブームが起きたと言われています。シリコンプロセスはICプロセスとも呼ばれ、単結晶シリコンの基板の上に電子回路を集積する方法として開発された技術です。この技術はその後、圧力センサや加速度センサの機構部分をマイクロ化する技術として用いられ、さらに上述のマイクロモータの製作へと展開されてきました。

マイクロマシンの製作に使われるシリコンプロセスの基本的な手順はつぎのようになっています。

- ① はじめに、シリコンウエハの表面を酸化させ、極めて薄い酸化膜 (SiO₂) を作る。
- ② この酸化膜の上に感光性樹脂 (フォトリソ) を薄く塗布する (このレジストにはポジ型とネガ型がある)。
- ③ 作りたい図形を描いたマスクを通してレジストを露光する。
- ④ 現像処理し、露光した部分のレジストをウエハ上から除去する (ポジ型レジストの場合)。
- ⑤ 露出した部分のSiO₂薄膜をエッチングし、シリコンの地肌を出す。
- ⑥ CVD (化学的気相堆積法) などにより、表面にシリコンや金属などの薄膜を作る。

ここまでの処理を繰り返して、多層の構造 (部品の集合体) を作り、最後にSiO₂薄膜の部分 (犠牲層) をエッチングで取り除くと、アセンブリされた機構ができあがります。

図1はロータと軸受からなる機構を作る手順の具体例を示しています (この図ではレジスト処理工程の説明は省略されています)。この方法で製作される部品は平面図形を投影した形になるために、アセンブリされた機構は完全な3次元構造ではなく、「2.5次元構造」と呼ばれています。

シリコンプロセスによるマイクロマシンの製作は、当初は厚さが2 μm程度以下の極めて薄い部品で構成された機構しか作ることができませんでした。また、材料もシリコン系材料に限られていました。しかしその後、波長の短い光 (紫外線) を使って厚いレジストを高精度に加工したり、メッキ工程を組み合わせるなどの改良が行われた結果、最近では厚い部品で構成された機構が多様な材料で製作できるようになってきました。

図2は、最近、シリコンプロセスで製作された静電モータの写真です。ロータ、軸受、及び固定電極はニッケル製です。また、この写真では見えませんが、ロータと接触する基板に多数の突起を形成させて、接触部に働く表面力などの摩擦抵抗を減らす工夫が施されています。

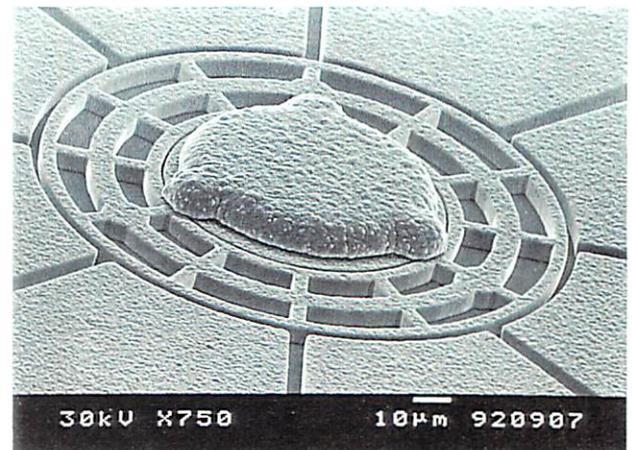


図-2 シリコンプロセスによる静電型モータの製作例 (東大生研 藤田博之教授提供)

1. LIGA プロセス

前回述べましたようにシリコンプロセスは、微細加工が可能なこと、簡単なアセンブリが行えること、半導体回路との複合化が可能なこと等の利点を持ち、まさにマイクロマシン加工技術の主役ともいえます。ところが図1に示しますように、これにも欠点がないわけではありません。それは軽薄、非力、ひも付きということです。よく目にするシリコンプロセスでできたモータは直径が髪の毛ほどですが、厚さはそのまた100分の1程度です。これでは比較的大きな力を得ることや、そこから力を取り出すことは容易ではありません。またひも付きというのは、そのようなモータの回転している部分は小さくても、その電源や制御回路は何百倍、何千倍も大きく、かつ一人立ちできていないということです。

そこで、先ず軽薄、非力を解決する手段として有力と考えられるものとしてLIGAプロセス、微細放電加工、光造形法、機械加工法などがあげられます。今回は前二者について紹介したいと思います。

LIGA (Lithographie Galvanoformung Abformung) プロセスはドイツのカールスルーエ原子力研究所 (KfK) で開発された技術です。もともとは、微

細な構造体を製作しようと思った訳でなく、放射線同位元素の分離用ノズル製作のために開発されました。この方法はシンクロトン放射光 (SR 光) のような大げさな設備を必要とするので難しい、高級な先端技術と見られがちですが、原理は前回のシリコンプロセスと同様に単純で、基本的には印刷技術と同じです。

軽薄でない分厚い構造体を作るためには先ず、感光性樹脂 (PMMA がよく用いられる) をとにかく数百ミクロン程度以上に分厚く塗り、それをやたら明るい光で焼くのです。やたら明るい光としては、輝度と指向性を求められるので、電子を高速に近い速度で円運動をさせるときに出る放射光 (X線) を用います。それを現像すると微小であるが、厚いレジストの構造体が出来ます。横方向のサイズと高さの比を、アスペクト比といいますが、これによりハイアスペクト比の大きい微小構造体出来るわけです。

次にこの構造体のレプリカを作ります。粘土や石膏ではなく、電気メッキ (電鍍 Galvanoformung) でニッケル等の反転レプリカを作ります。必要とあれば、これを型として樹脂の射出成形等の加工 (Abformung) を行います。図2にこの方法で得られた蟻用のひげそり (?) を示します。

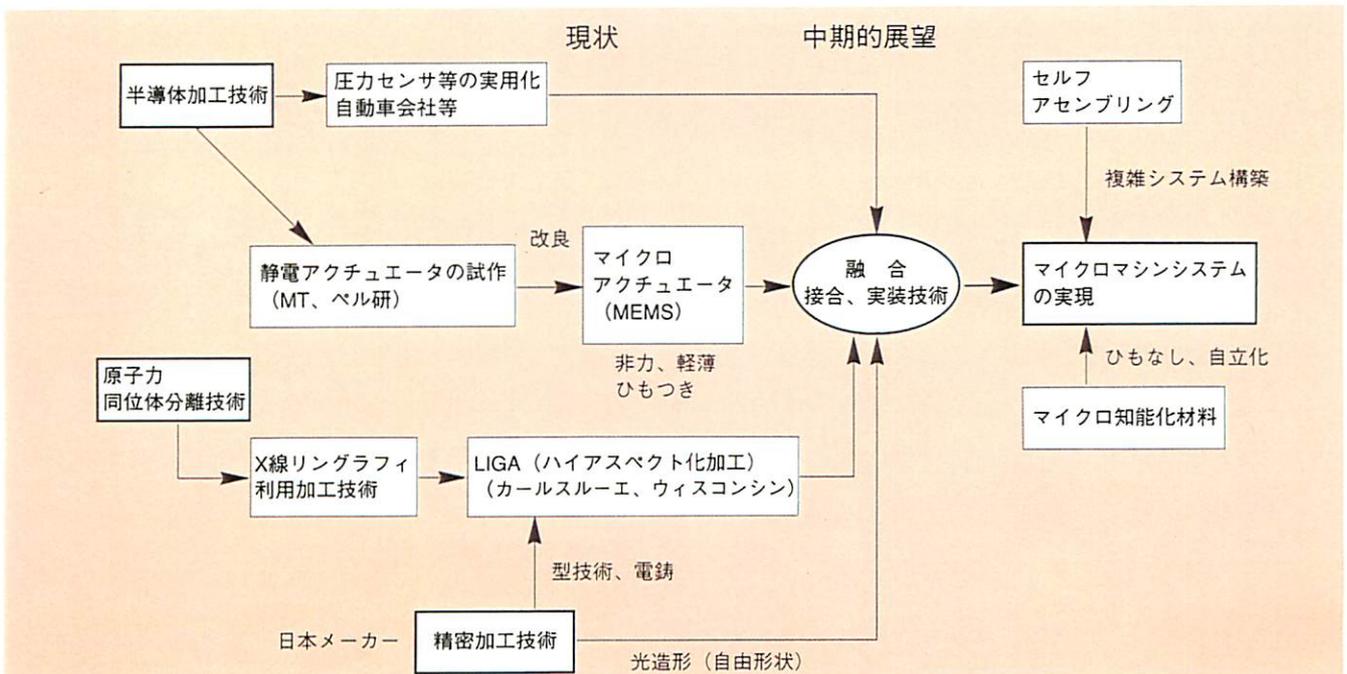


図1 各加工技術の現状と将来

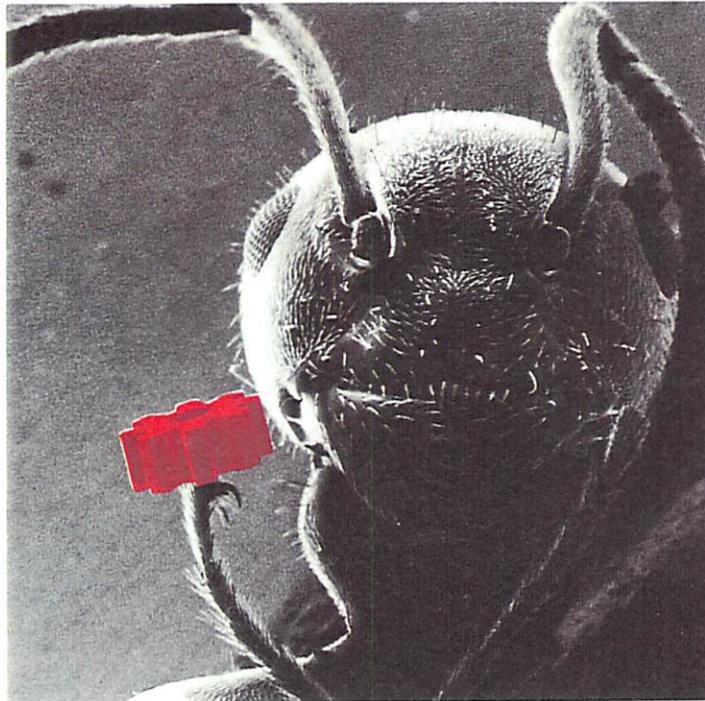


図2 蟻用のひげそり (KfK 提供)

LIGA 法には、上記のハイアスペクト比構造体が製造できる点とともに、シリコン以外の材料も加工できる利点があります。欠点としては電気メッキや成形技術はともかくとして、SR 光は大げさで高価だということです。また完全に自由な3次元形状は得られないということです。利点を生かして光学素子、フィルター、プリンタ用ノズル、加速度センサ等が実用化されつつあります。

2. 微細放電加工法

・放電加工の原理と加工対象

放電加工とは工作物（ワーク）と電極工具（ツール）の間に、放電火花を飛ばすことによりワークのツールに向き合った部分を溶融、飛散させる加工法です。通常ワークとツールは純水やケロシン等の絶縁性の液体中に浸し、その絶縁破壊による放電火花がワークを溶融させるとともに液体を急激に気化し、瞬時に溶融部分を飛散させるといわれています。平たくいえば微小な雷が材料を削るのです。

この加工法は基本的に導電性のものしか加工できないことが欠点ですが、Si のような半導体でも導電率によっては加工可能です。長所としては、非接触加工でありワークとツールの間に大き

な力が加わることがないため、ワークやツールとして細かいものや、薄いものでも利用可能であることがあげられます。

・マイクロ放電加工

通常の放電加工と比べ、マイクロ加工においては1回の放電での加工除去量を小さくしなければなりません。そのため1回の放電エネルギーを抑えなければなりません。ところが絶縁破壊を起こすにはある程度の電圧程度が必要なため、パルスの小さい（1ns~1 μ s）放電電流を用います。現在の半導体によるパルス技術ではこの条件の実現が難しいためコンデンサの充放電を利用します。このような回路においては充電回路中のコンデンサ容量以外に浮遊容量が存在します。放電エネルギーを微小化するには、浮遊容量を低減することが重要となります。マイクロ放電加工機においては浮遊容量低減のため金属部品の使用を少なくし、セラミックスを多用しています。

マイクロ放電加工は東大生産研の増沢教授らによって開発されました。ゆっくりとガイドに反って走行する金属ワイヤを電極として、ワークに回転とz軸方向の送りをかけながら加工することにより形状を創製します。走行ワイヤを用いるため

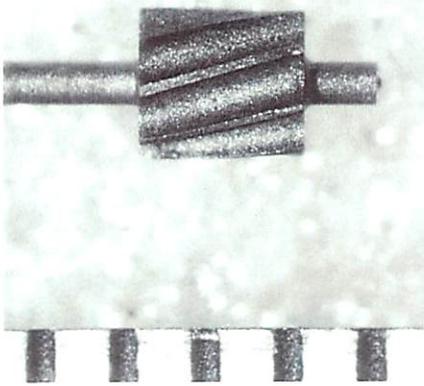


図3 マイクロタービン加工例（松下技研提供）

に電極消耗の影響を受けにくく、NC 制御により複雑形状の加工ができます。

上記の WEDG 加工により製作した微細軸をツールとして用い微細穴が加工できます。松下技研の開発した微細穴放電加工機では直径 5 ~ 300 μm で、直径の 3 ~ 5 倍の深さの穴を真円度 0.5 μm 、表面粗さ 0.1 μm の精度で加工できます。微細穴の応用例としてはインクジェットプリンタ用ノズル、流量制御用オリフィス、X 線測定用ピンホール加工などが知られています。

微細穴加工を重畳する事でスリット加工やくり貫き加工もできます。微細電極をフライス盤のエンドミルのように使って、3次元形状も加工できます。図3に示すようなマイクロエアータービンのローターは LIGA 法によっては作成が困難な形状です。またこの方法によりポンチとダイを製作し、マイクロ打ち抜き加工も試みられています。

・LIGA との比較

放電加工法は、導電性のあるものを、ある程度微細に加工でき、アスペクト比 5、表面粗さ 0.1 μm 程度です。加工能率はシリコンプロセスに比べると一括加工ができないために概して悪いが、本来金型加工に用いられるため、塑性加工や射出成形を用いれば経済性は向上するものと思われます。LIGA のようなハイアスペクト比構造体やハニカム構造の製作には不向ですが、OA 機器に用いられるような微小部品の一品物の金型製作等には適しているようです。また前述のように本来 2.5 次元加工である LIGA と比べると、より加工の自由度が高いといえます。

加工技術 (その3)

前回までに、Siプロセス、LIGAプロセス、及び微細放電加工法について解説しました。今回はそれ以外の加工法を紹介します。

1. 光造形法

光を当てると固化する性質を持った液体の樹脂(光硬化ポリマ)を原料とし、これにレーザービームや集束光を当てて構造体を作る方法を光造形法と呼んでいます。この加工法では、図1(1)に示すように光硬化ポリマの薄い層を形成させ、これに光ビームを当て、固化させる面を走査して薄い層構造を造ります。この操作を繰り返して固化した層を積み上げ、図1(2)に示すような任意形状の3次元構造を形成させます。図2はこの光造形法による製作例を示しています。

光造形法で製作できる最小寸法や精度には、光ビームの直径や固化層の厚さなどが影響しますが、最近では $100\mu\text{m}$ 以下の大きさの構造や、可動部を持った構造なども作られるようになってきました。また、液状のポリマにセラミックスや金

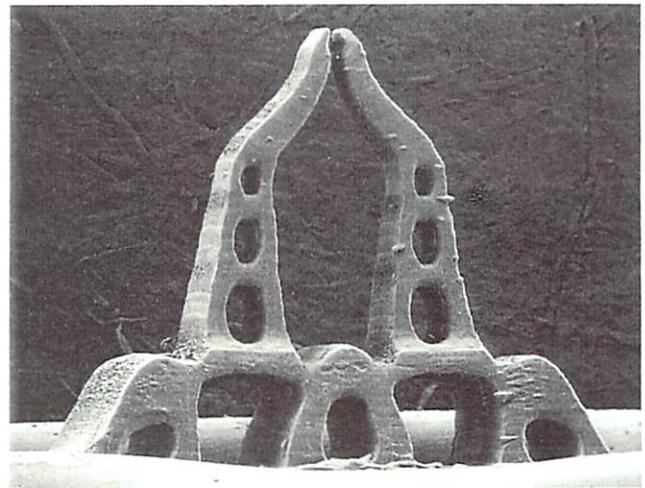


図2 可視光硬化性樹脂とアルゴンイオンレーザを用いる高分解能光造形法で作られたグリッパ。垂直方向の加工分解能を約 $10\mu\text{m}$ にまで高め、複雑な形状を忠実に加工することができた。基板内に圧電アクチュエータが組み込まれており、アーム先端を開閉させることができる。写真中の 20mm が実際の $500\mu\text{m}$ に相当。

属の粉末を入れることによって、材質の多様化を図る研究も行われています。光造形法は基本的に単品生産なので、この方法で造った樹脂の構造体から金型をおこし、この金型で量産する方法も研究されています。

2. ビーム加工法

光、電子、イオンなどの細いエネルギービームを材料表面に照射し、局所的に加工する方法をビーム加工法と呼んでいます。したがって、広義には放電加工法や光造形法もこの加工法に含まれることになります。またこれらはビームの種類による分類のほかに、その加工原理から、エネルギービームにより固体表面やその近傍で化学的反応を促進させる方法とビームのエネルギーにより表面を機械的あるいは熱的に除去する方法とに分けることもできます。

光ビームを用いる微細加工法には、上述の光造形のほかに、反応ガス(SiH_4)雰囲気中にSiウエハを置き、その表面にレーザービームを照射して局所的にシリコンの結晶を成長させ、微小構造体を作る研究などが行われています。

電子ビームによる加工法では、微細加工法で極めて小さな電子銃を製作し(図3)、この電子銃で発生させた電子ビームで3次元の微細構造体を

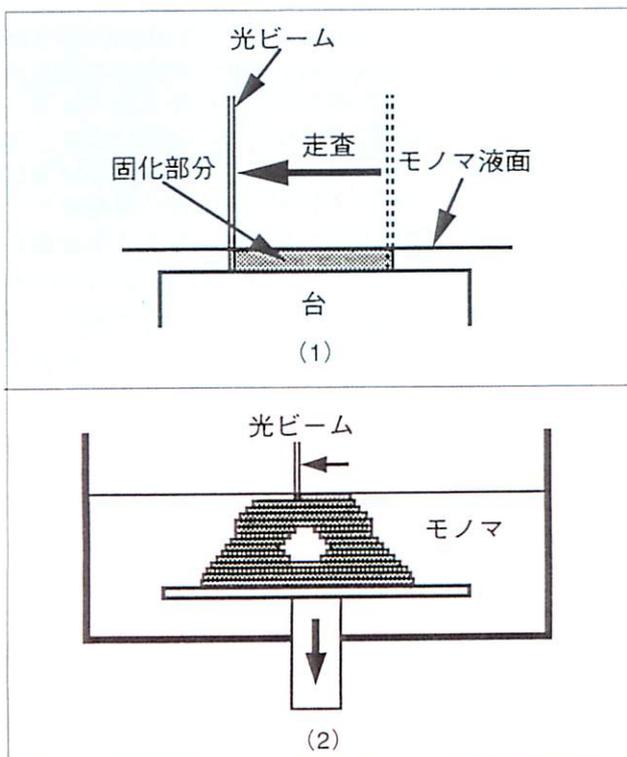


図1 光造形法のプロセス

加工する研究などが進められています。

イオンビームによる加工では、FIB（集束イオンビーム）が多く利用されています。図4はダイヤモンド圧子の表面に、FIBで微細な文字を刻み、これをポンチとして金属板に転写加工した例です。この方法により量産が可能になります。

種々の原子のイオンビームを照射し、材料の局所的な改質を行う研究も進められています。さらにFAB (Fast Atom Beam) やクラスタービームなどを利用したビーム加工法も研究されています。



図4 FIBによる微細加工：ダイヤモンド圧子と転写した文字（機技研、山中一司氏提供）

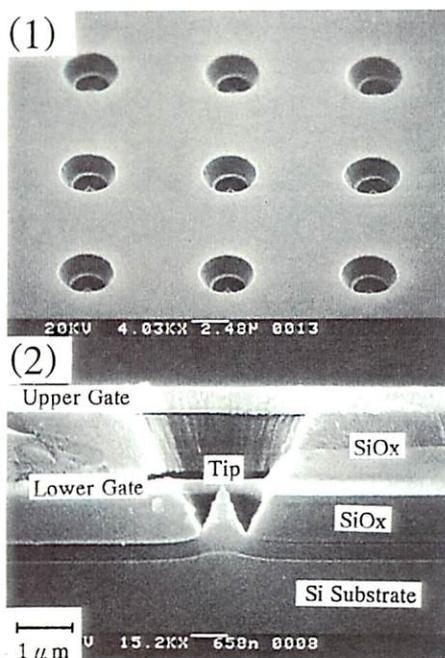


図3 電子ビーム加工ツールの開発：マイクロ電子銃のアレイと断面（電総研、伊藤順司氏提供）

3. その他

旋削や研削のような機械加工には加工抵抗が伴い、被加工物が小さくなるとその影響が相対的に大きくなり、形状精度を低下させるなどの欠点を持っています。その反面、どんな材料でも加工でき、また3次元形状加工ができるなどの長所もあることから、種々の機械的加工法が微細加工法として研究されています。図5は研削加工によるマイクロ歯車の製作例を示しています。

通商産業省の産業科学技術開発制度「マイクロマシン技術」においても、円筒積層プロセス、マイクロインジェクションモールド、シェルポ

ディプロセスなど、多種類の微細加工法の研究開発が進められています。

4. 微細加工法の今後

マイクロマシン技術として研究されているいくつかの微細加工法を紹介しました。このほかにも多数の有望な加工法があり、また今後生まれる可能性があることをつけ加えて置きます。これらも含めて、どのような加工法にも長所と短所があります。とりわけマイクロ機構部品の場合には、3次元的な形状に加えて、機械的強度や耐久性などが要求されるので、その製作には種々の加工法の長所を組み合わせる加工が必要になります。したがって今後も、それぞれの微細加工法の高度化、新加工法の発掘と育成、及びその複合化は、マイクロマシン技術として重要な課題であり続けるでしょう。

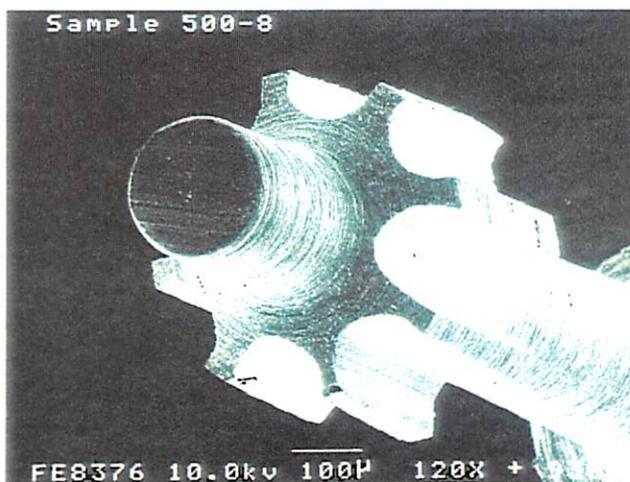


図5 研削による微細加工：マイクロ歯車（機技研、岡野啓作氏提供）

第3回の図1で示しましたようにATTベル研、カリフォルニア大学などのシリコン半導体プロセスによる静電モータや、歯車などの電気機械素子の試作がマイクロマシン技術の発端といわれています。これら表面マイクロマシニングにより製作された素子は、プロセスの制約から非常に薄い二次元に近い形状のものしか得られません。したがって、いかに構造を三次元化し、そこから大きな出力を取り出すかが、マイクロ加工技術の中心課題です。またアクチュエータ、センサ、半導体制御回路の組合せが可能となるのがマイクロマシンの利点です。接合技術は、上記の微小構造の三次元化や、アクチュエータ、センサ、制御回路の一体化の問題を扱うマイクロマシン技術の最重要課題の一つといっても過言ではありません。

マイクロマシンを製作する場合の接合技術としては、ウェハレベルの素子群を一括して接合してしまうものと、ひとつひとつの部品を逐次的に接合するものがあります。前者については、陽極接合、シリコン直接接合、表面活性化接合が知られており、またそれらの組み合わせや、他の接合法も提案されています。後者については、電子線やレーザーを利用した接合や微細な溶着、圧着などの通常の大きさの加工に利用される接合法の高度化、微細化が挙げられます。



図1 陽極接合で製作したマイクロポンプ
(機械技術研究所、カナダサイモンフレーザ大学)

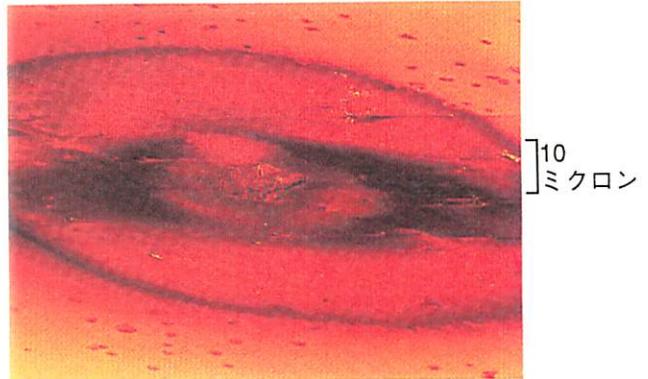


図2 電氣的導通をとるためにパイレックスにけられた微小穴エキシマレーザー加工、楕円は熱影響相
(機械技術研究所)

1. 一括接合技術

各種一括接合の得失について述べます。

はじめに陽極接合をご説明します。パイレックスガラスとシリコン等を400℃以上に加熱し、高電圧をかけることにより、界面でのイオン移動と静電圧着により接合を達成します。この方法により内部にキャビティを持った構造、例えば容量型圧力センサ、マイクロポンプ等が試作されています(図1)。ここでは低融点ガラスを用いることによりプロセス温度を下げる研究や、ガラス膜を中間バインダとして利用する方法によりガラス、シリコン以外の組み合わせにも適用範囲を広げる研究がなされています。またパイレックスに微細穴をあけ、シリコンと電氣的導通をとる技術も地味ながら極めて重要な研究です(図2)。

次にシリコン直接接合についてご説明します。この技術は日本において開発された技術であり、ウェハ内部に不純物拡散層や絶縁物層を形成するときにも用いられる有力な接合法です。接合原理は以下のものであるといわれています(図3参照)。

まずウェハを洗浄し、乾燥後表面に水酸基を形成した後に室温で張り合わせます。ウェハ同士は水素結合によって結合します。それを1000℃以上に加熱すると脱水が行われ、さらに高温とすると、酸素が除去され、シリコン同士の強固な接合が達成されます。表面に穴あけや溝切り加工を施したウェハを接合すれば、内部

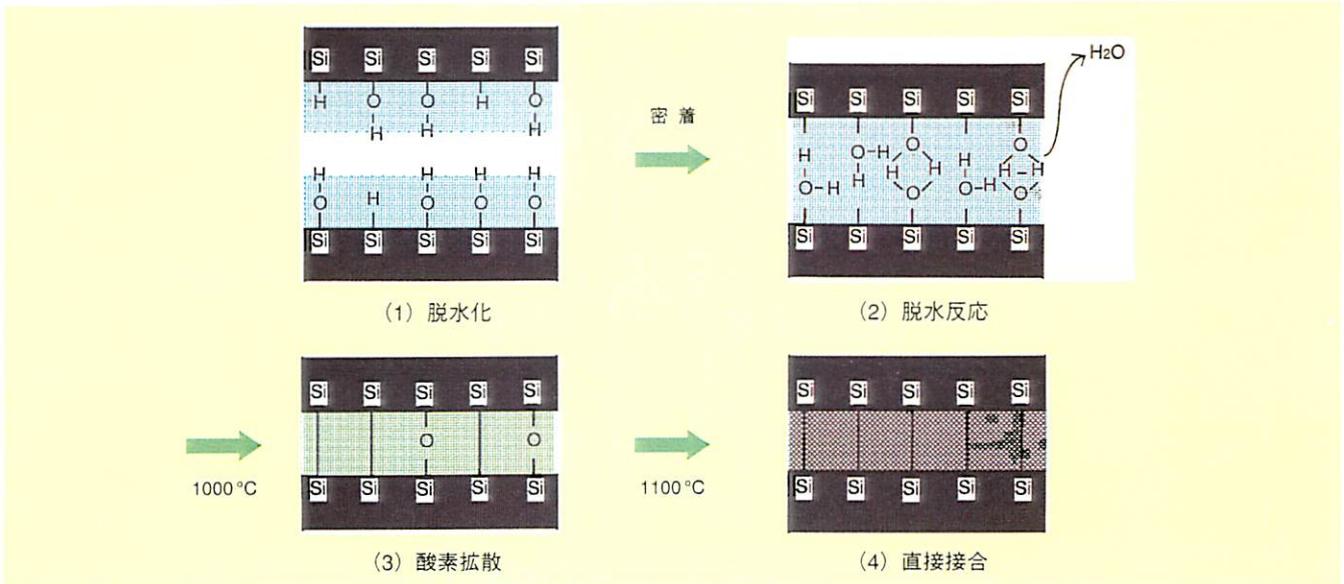


図3 Si直接接合の原理

に微細加工が施された構造を得ることができません。これにより圧力センサや、内部に冷却溝をもったレーザダイオード用の熱交換機等が製作されています。

シリコン直接接合の最大の欠点は、プロセス温度が1000℃以上と高温であることです。より低温で行うプロセスはこの後に行わなければなりません。これに対しプラズマ処理を施したシリコンウェハを450℃で接合したという報告もあります。これは直接接合というよりは表面活性化接合に近いもので、この接合技術は東大先端研や機械技術研究所のグループが先鞭を付け、日本が世界を大きく引き離れた分野と言えます。金属と圧電素子

を接合し、アクチュエータを製作する研究も現在進行中です(図4)。

2. 逐次接合技術

逐次接合プロセスとしては、リード線を素子に配線する作業、カンチレバーにチップをマウントする作業が微細な作業として考えられます。上述のように、これら作業は、レーザ融着やろう付け、ハンダ付けなどの在来の加工法で行われるのが現状です。作業性を良くするための治具とマニピュレータの開発、光学顕微鏡や、電子顕微鏡とのシステム化などの試みがなされています。これらの技術は、マイクロ組立てやマイクロアセンブリと呼ばれていますが、現状では汎用的な技術といいにくく、今後システムティックな開発(例えばマイクロファクトリ技術)が必要と思われます。

3. まとめ

以上一括接合、逐次接合について概説してきました。今後アクチュエータ、センサの制御回路への統合化、マイクロマシンのシステム化が行われる中でプロセスの低温化、高密度実装、マイクロアセンブリ、セルフアセンブリなどのキーワードのもとにマイクロ接合技術は展開されてゆくであります。

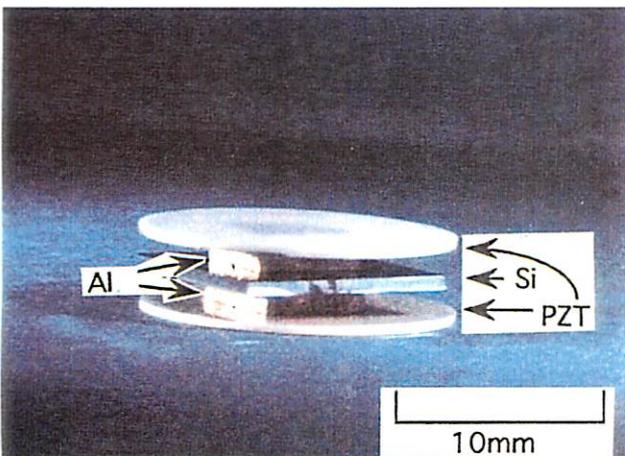


図4 PZTとアルミを接合し、アクチュエータを作成(日本電装)異種材料直接接合事例

1. 今後のマイクロマシン製作技術の鍵

マイクロアセンブリ技術とは、未だ定義の定まっていない用語です。1991年に、東京大学先端科学研究センターの須賀先生が精密工学会に、この名前を冠した研究会を発足させたのが最初ではないかと思われます。この言葉は専門分野の違いにより、各人の受け取り方がずいぶん変わるのではないのでしょうか。事実この研究会も良くいえば学際的で混沌とした、悪くいえば参加者同士がお互いに何を考えているのかわかりにくい研究会であったような気がします。このような状況で、あれこれマイクロアセンブリについて云々するのは適当ではないと思われるかもしれませんが、今後の研究開発の方向を議論する材料になることを願い、あえて解説させていただきます。

さてこれまで、半導体加工技術として知られるフォトリソグラフィ、SR光を使用するLIGA技術、ビーム加工、通常の機械加工法等をご説明して参りました。これら加工技術は、そのほとんどが、いわば部品を作る技術と言っても良いでしょう。もちろんフォトリソグラフィは部品加工のみならず、ある程度の組立もできます。しかしアクチュエータ単体、あるいはセンサ単体の製作以上には、なかなかいっていないのが現状では無いのでしょうか。今後すべてのマイクロマシンがこのようなモノリシックなワンチップになるとは考えられません。そこでそれらマイクロ部品を自律的に移動し、判断し、作業を行うマイクロマシンまでに完成させる技術、これがマイクロアセンブリ技術であるところでは定義します。

アクチュエータやセンサ、構造体等のマイクロ部品の研究開発は現在盛んに進められています。今後これら部品をモジュール化、システム化する場合の重要技術がマイクロアセンブリであると考えられます。

2. 一括アセンブリと逐次アッセンブリ

アセンブリにもまとめて一括で処理してしまうものと、1個1個順番に作業を行うものとが

あります。前者は部品を複合化するという意味で、一括接合と極めて近いものです。すなわちウエハレベルでできた部品群（アクチュエータ、センサ、構造体、通信制御回路等）を一体化してしまおうというものです。この技術の研究要素は、如何に低温、低圧力で位置決め精度良く一体化を行うかにあります。一方逐次アセンブリは現状のマシニングセンタなり、ロボットアームを如何に小型化し、微細な作業を行わせるかに、研究の主目的があります。エンドエフェクタおよびそれを動かす原理により、様々なマニピュレーション、ハンドリングが可能となっています。

微小物体を捕捉する方法としては、機械的に直接に行うグリッパ、2本の針を箸のように使うマニピュレータ等（図1）が開発されています。機械的接触でハンドリングすると微小物体では、粘着性が高く、引き剥がすのに苦勞する問題があります。そこで電磁場や超音波による

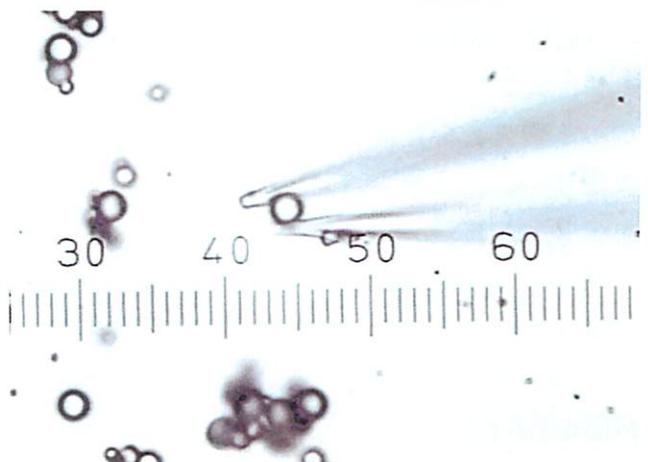
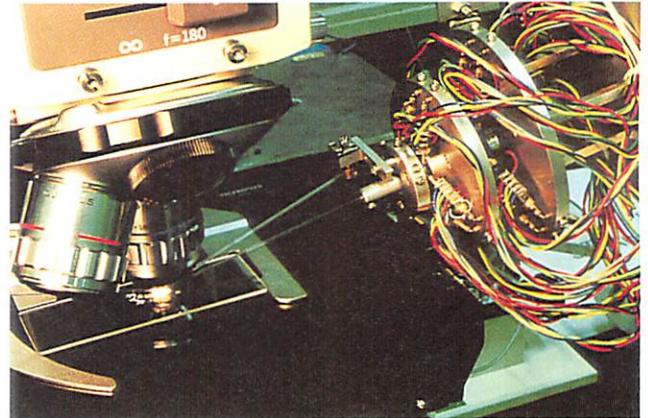


図1

(工技院・機械技術研究所 新井氏提供)

場によって捕捉する方法も提案されています。レーザの光圧を利用して、ハンドリングする手法も期待されています。捕捉できる対象物質に制限があります。

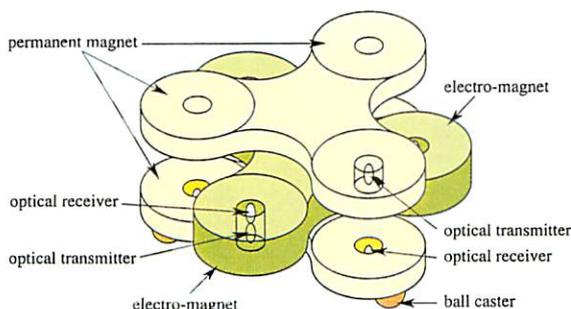
実際の切る、削る、つける等の加工に関してはまだ研究は、これからと言って良いでしょう。この方面の研究は、現在東京大学の畑村、佐藤両先生により、研究開発が精力的に進められています。これはいわばマシニングセンタを電子顕微鏡の中に閉じこめてしまおうというものです。アトムハンドリングも、この言い方をすれば、走査型トンネル顕微鏡に加工機能をもたせたものです。ただし加工は、鋭く尖った針の先と被加工物の間に強い電界をかけることにより行います。FIB（集束イオンビーム加工）も、これらの作業ができるという点では類似ですが、作業ツールとしては液体金属ガリウムをイオン源としたイオン銃を用いています。それぞれに得意分野がありますが、原子単位で加工を行えば、精度は向上する代わりに、加工能率は低くなります。今後の課題は、加工精度、能率の両立と、ある作業に対して如何に最適のツール及

び最適の加工モニタリング手段を選ぶかにあります。

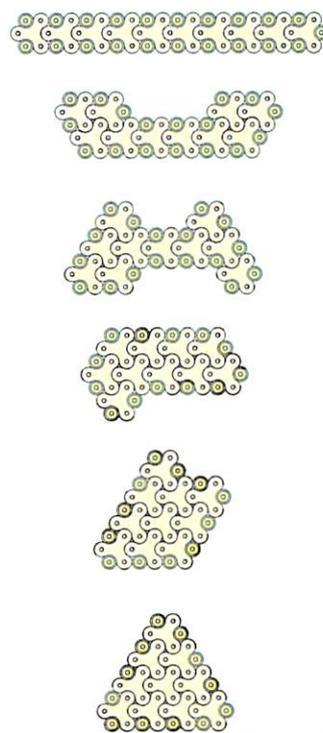
3. 自然界のアセンブリ技術

上記のアセンブリ手法は、いわば外界から力づくで組立、加工を行ってしまうものでした。ところが天然に存在する構造物は自然が作り出したものです。このような自然の秩序構造を作る傾向（自己組織化）を利用した組立をセルフアセンブリと言います。この手法によりますと、部品がいかに小さくとも組立作業が可能なのです。このような例としてはロンドン大学のロウ材の表面張力を利用した微小箱の製作や平面の折り曲げ加工があげられます。またカルフォルニア大学バークレイ校では、台形に製作したGaAsのLEDを、シリコン基板中に台形をくり貫いた穴の中に配置する技術を開発しています。大きさは現在マイクロではありませんが、磁気双極子の配列を利用した機械システムの構築も現在研究開発が進められています（図2）。今後電場や磁場を利用した秩序構造の製作等の研究開発が盛んになるものと思われれます。

自律機械細胞による
機械の構成
—自己組織と自己修復—



試作した機械細胞のプロトタイプ
(フラクタム)



自己組織アルゴリズムによる形状生成

(工技院・機械技術研究所 村田氏提供)

1. マイクロ理工学とは何か

本入門講座でこれまでに説明してきた通り、マイクロマシンを構成する部品や機構を加工したりアッセンブルしたりするための様々な技術が研究開発され、これらの技術によってかなり微細な部品や機構を加工し組み立てることができるようになってきました。ところで、このような加工・組立技術を使って、従来からある一般的な構造をもつ機械を単に相似的に縮小したものを製作したとしても、実際には正常に作動しないことが危惧されます。なぜかといいますと、微小なマイクロマシンが作動する状態や環境は、通常の大サイズの機械が作動するそれとは大きく異なっているためです。例えば、機械の寸法を微小化していくと、重量や慣性力といった体積力は寸法の3乗に比例して小さくなるのに対して、粘性力や吸着力といった面積力は寸法の2乗に比例して小さくなるため、面積力の方が相対的に大きくなります。従って、通常の大サイズの機械では無視してもよかった面積力による影響が、マイクロマシンでは顕著に現れるようになってきます。このことは、軽く湿った紙片が指先やピンセットの先から離れにくく、振り払わなければ落ちにくいという現象で手近に体験することができますが、これと同じことがマイクロマシンの作動環境では起こっていることになります。このように、通常の大サイズではほとんど問題にならなかったのに、微小化をしていったときに顕著に現れてくる物理現象、すなわちマイクロマシンの作動環境における特殊性を基礎的、学問的に解明しようとするのが「マイクロ理工学」であるということができます。

この「マイクロ理工学」は、未だ一般には耳なれないものとも思われますが、主に以下の3つの理由で、極めて重要なものであるということが出来ます。

1) マイクロマシンは、マイクロ環境とも呼ぶべき通常的环境とは異なる特殊な環境の中で作動するため、この環境における特異な物理現象をマイクロ理工学によって基礎的、学問的に解明し、この環境に適応させるための様々

な技術を開発することが、微小な世界の中で正常に作動する信頼性の高いマイクロマシンを実現する上で欠かすことができないということができます。言い換えれば、マイクロ理工学は、マイクロマシンという従来にない新たな概念の機械を最適に設計し製作するための学問的な基礎、基盤を与えるものということができるでしょう。

- 2) マイクロ理工学によって解明したマイクロ環境の特殊性を、上記1)項のマイクロ環境への適応という姿勢とは逆に、むしろ積極的に利用することによって、従来にはない全く新しい原理に基づく構造の機械や機構が開発できる可能性が秘められています。このことは、微小化という視点に立つことによって、従来の機械技術に新たな展開を促すことを意味し、機械技術の研究者にとっては大変魅力的な視点であるといえるでしょう。
- 3) 従来の機械工学は、主としてマクロな現象を扱ってきましたが、マイクロ理工学というミクロな現象を対象とする分野が進展することによって、機械工学はマクロからミクロな世界までをも包含した、より精緻で広範な内容と体系が与えられることになるでしょう。

2. マイクロ理工学の内容

マイクロ理工学は、微小化に伴って顕著に現れてくる全ての物理現象が対象となりますが、現在特に指摘されている内容を従来の技術分野に即して整理すれば、以下のようなものと思われます。

1) マイクロ機械力学

たとえマイクロマシンといえども地球上で作動する以上、従来の古典力学によるニュートンの運動方程式が成り立つはずですが、ただし、通常の大サイズの機械に対して、慣性力の項は無視できるほど小さく、摩擦力や粘性力などの項が卓越してくることなどが大きく異なる点です。また、設計寸法に対する製作誤差や表面あらかの相対的な比率が通常の大サイズの機械に比べて極端に悪く、これがマイクロマシンの運動特性に大きく影響することが考

えられます。これらのマイクロマシンの運動の特殊性を解明するのがマイクロ機械力学です。以後の分野に関しては、ごく簡単に紹介することにします。

2) トライボロジー

微小化に伴って重力よりも表面間力の影響が大きくなる領域での微小な接触面、微小な荷重下におけるトライボロジー（摩擦・摩耗）現象の解明。

3) マイクロ材料力学

マイクロマシンの構成部材となる微小寸法材料、すなわち薄板や薄膜の機械的特性の解明、従来の連続体としての取り扱いが困難な領域での材料力学。

4) マイクロ流体力学

微小な流路（管内やすきま）における流体の流れ挙動の解明、流路表面から受ける影響や流体の分子運動が支配的になる、従来の連続体としての取り扱いが困難な領域での流体力学。

5) マイクロ伝熱工学

微小構造体における熱伝導や微小すきまにおける熱放射現象等の解明。

まだ他にも取り上げるべき分野があるとは思いますが、いずれにせよマイクロ理工学においては、その内容をそれぞれ独立した分野に分けてアプローチするだけでは不十分であり、相互に連成させた解析が非常に重要になるものと思われます。

次に現在最もその重要性が指摘され、解明が望まれているマイクロマシンのトライボロジーに関して、より詳しく紹介してみたいと思います。

3. マイクロマシンのトライボロジー

3.1 マイクロマシンの表面間に作用する力

みなさんが中学生や高校生だった頃、グラウンドの片隅にグラウンドをならすローラーがあったと思います。ローラーを引くときのことを考えてください。最初に動かそうとするときはかなりの力が必要ですが、動かし始めるとそれほど力は必要としません。マイクロマシンはとても軽いので、慣

性が小さく動かし始めるときには特に力を必要としません。しかし、その代わりに固体表面間に働く引力の影響が顕著になってきます。

その引力として代表的なものを挙げると、静電気力、表面に凝縮した液体の表面張力、ファンデルワールス力、原子どうしの結合力などがあります。これらの力は部品の寸法がミリメートルよりも大きいときはほとんど無視できますが、マイクロマシンのサイズでは部品の重さよりもこの力の方がはるかに大きくなります（図1）。

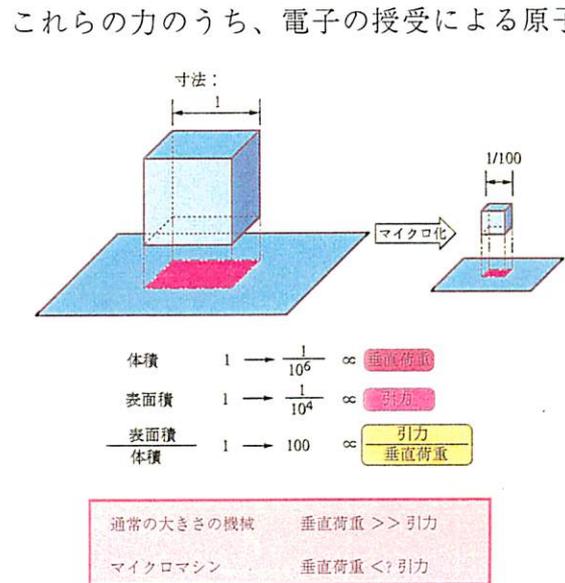


図1 表面間に作用する引力と垂直荷重の比較

うしの結合は、超高真空中のフレッシュサーフェスどうしといった特殊な条件以外では起こりません。静電気力はこれらの力の中では力の働く距離が極端に長くその力も大きいのですが、それが生じる条件は限られており、取り除くことも比較的容易です。

マイクロマシンで特に問題になるのは、表面に凝縮した液体（大気中では通常は水）の表面張力やファンデルワールス力に起因する引力であると考えられます。

3.2 引力と摩擦力

クーロンの摩擦法則によると、摩擦力は垂直荷重に比例し、そのときの比例定数（摩擦係数）は垂直荷重によらず一定です。ところが、マイクロマシンのように自重や外から加えられる荷

重による垂直荷重が極端に小さいと、表面間に働く引力が支配的になり、クーロンの摩擦法則が見かけ上は成り立たなくなります。

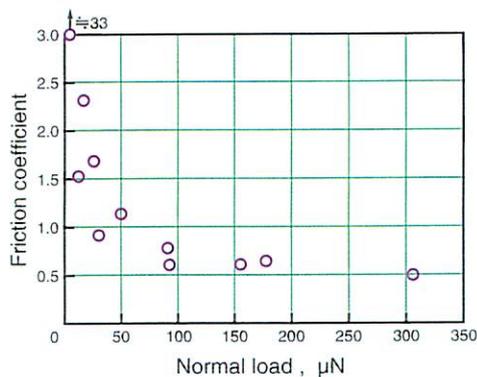


図2 表面間引力を考慮しない垂直荷重と摩擦力の関係

図2に示すのは、水の表面張力とファンデルワールス力に起因すると思われる引力が表面間に作用しているときの垂直荷重と摩擦係数の関係です。低荷重になるほど摩擦係数が上昇していることがわかります。この場合の摩擦係数は、単純に摩擦力を外から加えられている垂直荷重で除算して求めたものです。

この接触面の表面間に働いている引力は、表面を引き離すのに必要な力を測定することによって求めることができます。そこで、その測定された引力（引き離し力）が摩擦力に対して垂直荷重と同様に作用していると仮定して、引き離し力を垂直荷重に加算し、その和を用いて摩擦力を除算すると、その場合の「摩擦係数」は

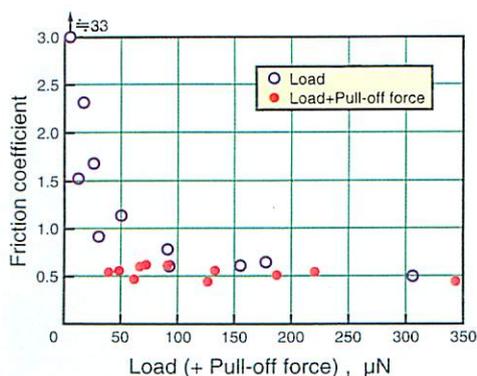


図3 表面間引力を考慮した垂直荷重と摩擦力の関係

図3に示すようになります。この方法で算出した摩擦係数は、引き離し力を考慮しない摩擦係数に比べると、ほぼすべての荷重範囲で一定になっています。このようにマイクロマシンの摩擦面には、そのサイズに比較してかなり大きな摩擦力が働くことがわかります。

そこで、マイクロマシンに作用する摩擦力を低減させるために、この表面間の引力を減少させることが考えられます。そのための方法の一つとして、接触面積を小さくすることがあげられます。このことは、通常の機械部品の潤滑では、流体潤滑になるように接触面積を大きくするのは全く対照的です。また、表面エネルギーを小さくするようなコーティングを施すことなども考えられます。

このような試みは、除々に行われるようになってきました（図4）。しかしながら、マイクロマシンの実用化を考えたときに、もう一つ浮上してくるのが摩耗の問題です。マイクロマシンは、その部品一つ一つの大きさが小さいので、極微量の摩耗がマイクロマシンの機能に致命的なダメージを与える可能性があるからです。原子レベルからnmレベルの極微量の摩耗を調べる研究もAFM（原子間力顕微鏡）等を用いて精力的に行われています。原子1個の摩耗がどのようにして生じるかを調べることもマイクロ理工学における重要な問題です。このようにマイクロマシンの実用化が近づくにつれて、マイクロマシンのトライボロジーに関する研究はますます重要になってきています。

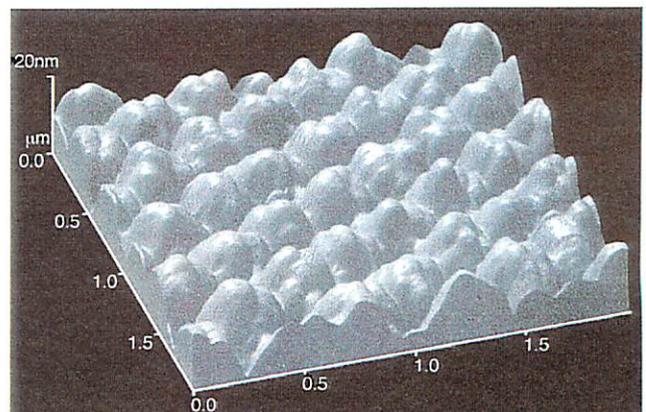


図4 表面間引力を小さくするためにFIBにより周期的な凹凸をつけたシリコン表面

前回までは、マイクロマシンを製作するための加工組立技術やそれを支えている理工学を中心に解説してきました。今回は、このような技術で製作される機能デバイスとして、マイクロアクチュエータを取り上げます。

1. マイクロアクチュエータ

掃除機やビデオをはじめとして、私たちの身近にある機械では、電磁力を利用したアクチュエータ（電磁モータ）がたくさん使われています。これは、電磁モータがエネルギー変換効率、制御性、汎用性などで非常に優れているためです。

マイクロマシンの場合もアクチュエータが必要ですが、その寸法を小さくすると、電磁モータの優位性が必ずしも成り立たなくなるといわれています。そのために、色々な物理的あるいは化学的作用を利用したマイクロアクチュエータが研究されています。表1は、その一部について特徴や方式を示しています。

表1 マイクロアクチュエータの主な種類

原理	特徴、利用方式など
静電力	マイクロ化で表面力利用が有利になる。 高い寸法精度が必要である。 フィルム型、ワブル型、回転型、直動型
圧電効果	大きな力が得られる。応答特性が良好である。 変位が小さい。ヒステリシスが比較的大きい。 積層型、バイモルフ型、超音波モータ
形状記憶効果	マイクロ化で応答特性が改善される。 大きな力が得られる。 コイル型、薄膜型、構造/アクチュエーター一体型
電磁力	比較的大きい寸法では、高効率と汎用性が期待される。 回転型、直動型
気液相変化	マイクロ化で応答特性は良くなる。 ダイヤモンド型
熱膨張	マイクロ化で応答特性は良くなる。大きな力が得られる。 バイモルフ型

静電力の利用についてはいくつかの方法がありますが、その一つは図1に示すように、円筒の内面に相互に絶縁された電極を並べ、絶縁層を介してロータを入れておきます。そして、正の電荷を与える電極をA1からA2に切り替えると、その近傍にあるロータの局部に負の電荷が集まり、両者の間に静電引力が生じ、ロータは矢印の方向に回転します。図2はこの方法を使

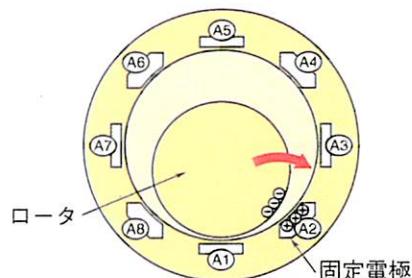


図1 静電力の利用法の例

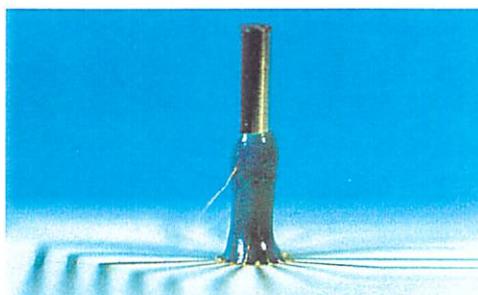


図2 静電型ワブルモータ (松下技研(株)提供)

った回転型静電モータの製作例を示しています。直径約1mmのロータは、固定電極を並べた円筒の内面を転がりながら、非常に小さな半径の円運動を行います。

この場合、電極とロータの間の静電引力の大きさは両者の電荷の積に比例し、その表面間の距離の2乗に反比例するので、両者を接近させた構造にすると大きな出力が得られることになります。静電力を利用したマイクロアクチュエータは種類が多く、このほかにもフィルム状絶縁体の表面近傍に微小間隔で電極を配列させ、その上に載せたフィルム状の可動子を動かす方式、ばねで支えた可動片と固定電極を同じ櫛歯状にして組み合わせ、可動片を往復運動させる方式などが報告されています。

セラミックの中には、例えばPZT（組成： $Pb(ZrTi)O_3$ ）のように、電圧を加えるとわずかに伸びる性質（圧電効果）を持っているものがあります。この圧電現象は応答特性に優れ、また発生力も大きいことから、超音波モータや精密位置決め用アクチュエータとして既に利用されています。図3に示す例では、細管内でマイクロマシン（写真ではカバーを外してある）を移動させるために、3本の足をPZTで加振します。

ある種の材料は、高い温度で形状を記憶させ

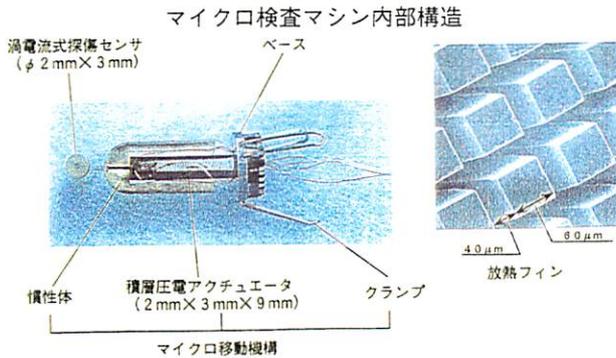


図3 管内移動マイクロマシン用アクチュエータ (日本電装(株)提供)

ておくと、低い温度で変形させても、結晶構造が変わる温度まで加熱することにより元の形状を回復する性質（形状記憶効果）を持っています。さらに、この温度以上の場合に比べて、低い温度でのヤング率（弾性的な剛さ）が小さくかつ降伏応力（塑性的な変形が起き始める応力）が低いという性質も持っています。この2つの性質を備えていると、その材料はアクチュエータとして利用できます。

図4は、代表的な形状記憶合金（SMA）であるTiNi合金を極めて細い線に加工し、これを外径が100 μmに満たないマイクロコイルアクチュエータにしたものです。このアクチュエータを2個以上使って色々なマイクロ機構を動かすことができます。また、SiプロセスでSMA薄膜のマイクロアクチュエータを製作した結果なども報告されています。

気相と液相の間の相変化を利用するマイクロアクチュエータとしては、マイクロダイヤフラムに液体を密封し、加熱し、気化させて、ダイヤフラムから力や変位を取り出す方式のものが製作されています。図5はその一例であり、Siプロセスで製作したマイクロダイヤフラムにフロ

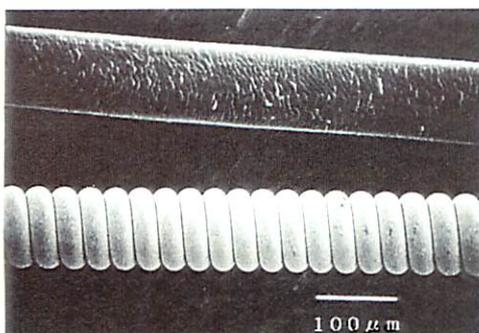


図4 SMAマイクロコイル (三菱電線工業(株)提供)

ンを密封し、レーザ光で加熱する方式を採用しています。これとは別の方法で気液相変化を利用している実用デバイスとして、インクジェットプリンタのヘッドがあります。

現在、情報通信機器などに組み込まれているアクチュエータのほとんどは電磁力を利用したマイクロモータです。電磁力利用のマイクロアクチュエータについては、螺旋状のマイクロコイルを平板上に形成させ、これを積み重ねて高密度化した電磁アクチュエータ用マイクロステータを製作する研究などが行われています。

このほかにも、熱膨張係数が大きく異なる2種類の材料の組み合わせ、光歪効果が現れるPLZT（PZTにLaを加えた材料）、溶媒による高分子ゲルの相転移などを利用したマイクロアクチュエータの研究も行われています。現在のところ、広い用途で利用できるマイクロアクチュエータは見いだされていないので、実用化にあたっては、それぞれのアクチュエータ（あるいはその原理）の特徴を活かした使い分けが必要になるでしょう。また、アクチュエータと機構が一体化された形のマイクロデバイスとして製作されることが多くなると思われます。

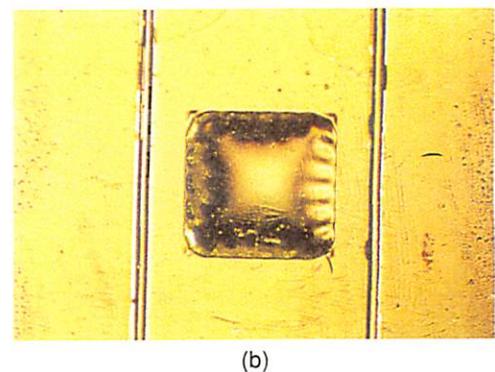
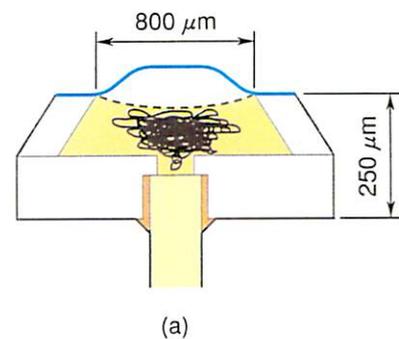


図5 光駆動型マイクロアクチュエータ (44) (東京大学工学部提供)

マイクロマシン技術、特にシリコンプロセスに代表される技術は、センサにとって回路との一体化を始め、センササイズの格段の小型化、バッチ処理効果による大幅なコストダウンを可能とします。現在センサはマイクロマシン技術の展開が最も期待される分野であり、すでにその技術を用いたセンサが一部製品化されています。今回はセンサの開発例として、加速度センサ、角速度センサ、圧力センサ、流量センサを紹介いたします。

1. 加速度センサ

近年自動車への安全性要求が高まり、エアバッグシステムの搭載数が急増しています。このシステムの中で自動車の衝突を感知するのが加速度センサです。写真1に加速度センサの概要と平面写真を示します。単結晶シリコンを異方性エッチングを利用してカンチレバー（片持ち梁）を形成し、梁にたわみで抵抗が変化する歪みゲージを配置しています。紙面矢印方向に加速度が生じると、重りが変位して梁がたわみゲージの抵抗が変化して横にある回路で加速度を検出します。センササイズは8.3mm×3.55mmという小さなサイズです。

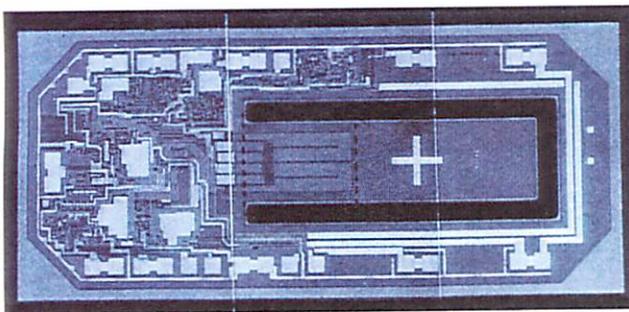


写真1 加速度センサ (日本電装(株) 提供)

2. 角速度センサ

角速度センサは物体に働く回転速度を測定するもので、ビデオカメラの手ぶれ防止、ロボット制御、ナビゲーション、自動車の姿勢制御に重要なセンサです。写真2に角速度センサの開

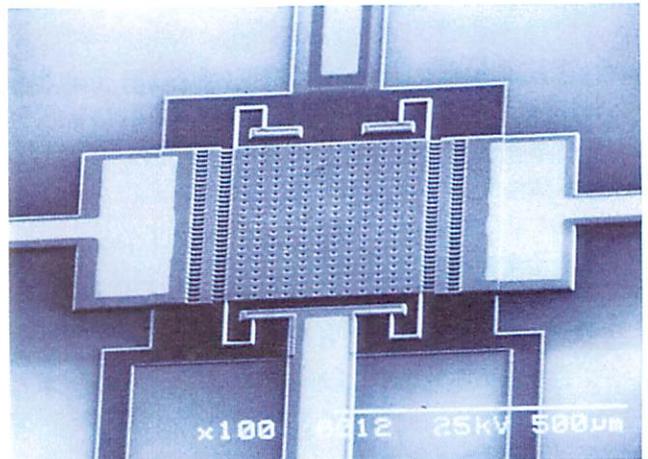


写真2 角速度センサ (横村田製作所 提供)

発例を示します。検出原理は次の通りです。まず重りの左右に設けられた櫛歯型電極で静電気力を発生させ、重りを基板水平方向（写真中の左右）に励振させます。このとき写真中上下方向を軸に角速度が生じると、重りにコリオリの力が発生し重りは基板垂直方向に変化します。この変位を重りと基板間の静電容量変化で検出します。このセンサはシリコン基板の上に犠牲層、多結晶シリコンを堆積させた後に犠牲層の一部をエッチング除去して多結晶シリコンを可動としています。このような表面マイクロマシニングと呼ばれる加工技術は加速度センサで述べた単結晶シリコンの加工に比べ更なる小型化が可能で、写真に示したセンサ構造体のサイズは0.7mm×0.7mmとなっています。

3. 圧力センサ

自動車のマニホールド内の圧力測定に代表される圧力センサは、シリコンでダイアフラムを形成しダイアフラムの変形から圧力を測定するものです。写真3に歪みゲージ式の圧力センサの開発例を示します。この圧力センサの特長は写真中の断面図からわかるように真空室を持っていることです。通常の圧力センサはダイアフラムで隔てられた空間の圧力差すなわち相対圧を測定しますが、このセンサはダイアフラムの片側に真空室を持つことで絶対圧の測定が可能となります。真空室は中央の穴から犠牲層エッチングを行ってダイアフラムを形成した後、真空中で穴を封止することで形成できます。ダイアフラムの直径は0.1mmという超小型です。

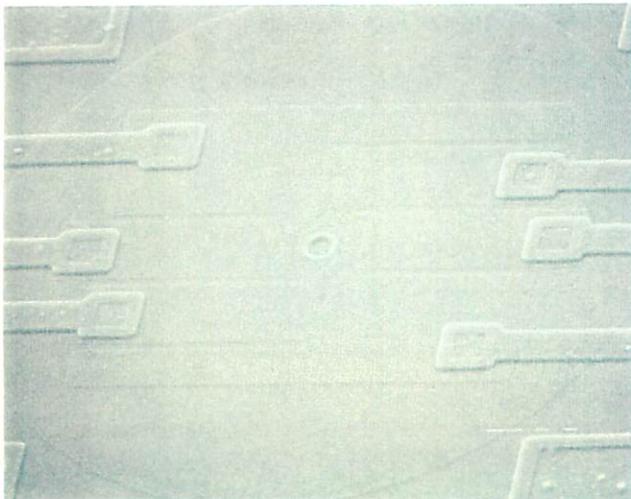


写真3 圧力センサ (㈱豊田中央研究所 提供)

4. 流量センサ

流量センサは流体への影響を小さくするため極力小型のものが好ましく、マイクロマシン技術による小型化は非常にメリットがあります。写真4に熱式の流量センサを示します。ポリシリコンのブリッジ構造体がヒータとなり、流量が変化することで生じるヒータから流体への伝

達熱量の増減を測定します。ヒータから基板への熱伝達量が多いと熱ロスとなって感度がさがるため、ヒータ下部の基板をエッチング除去して熱絶縁性を向上させています。ヒータサイズは0.24mm×0.09mmです。

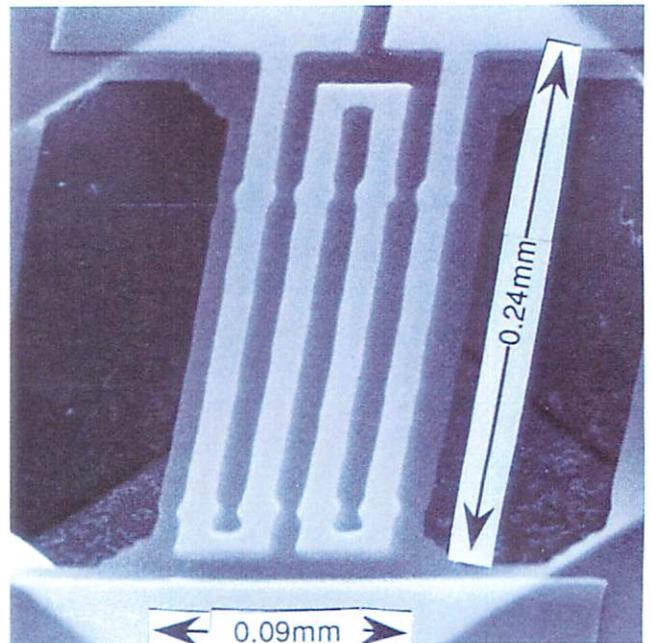


写真4 流量センサ (東京ガス㈱ 提供)

5. マイクロセンサの今後

マイクロマシン技術がセンサに応用され、様々なマイクロセンサが開発されてきています。今後はこれらのセンサの高機能化、アクチュエータとの集積化が進み、たとえば流量センサとマイクロポンプが集積化された流量制御可能なマイクロフローシステムが実現されていくと予想され、ますますマイクロマシン技術が重要となるでしょう。

入門講座「微細作業技術」(第10回)

本入門講座でこれまでに紹介してきた通り、近年のマイクロ加工技術により、微細な歯車、微小なアクチュエータ、微小なセンサなどマイクロマシンを構成する微小部品の試作例が報告されています。しかし、マイクロマシンを実現するためには、これらの微小部品を組み立て上げるシステム化技術が必要です。そこで、東京大学先端科学技術研究センターで研究開発されたマイクロハンドリングシステムⅡと、機械技術研究所で研究開発された二本指マイクロハンドを紹介します。

1. マイクロハンドリングシステムⅡ

微細作業においては目で見ながら作業を行うことが重要であり、作業効率を高めるためには常に作業が見えることが必要であります。作業の度に対象物や作業する点が視野から外れると、その都度対象物を探さなくてはなりません。顕微鏡の視野は非常に狭いために、見失った対象物を探すのは、大きな時間浪費となります。そのため、常に視野の中で作業を行う必要があります、微細作業では顕微鏡の視野がそのまま作業空間になります。これは、従来のロボットマニピュレータの作業空間が可動範囲である点と大きく異なります。すなわち、顕微鏡の視野を作業空間とするマニピュレータ構成と、システム全体の構成が視覚情報を最大限に得るための構成が必要となります。具体的には、下記の構成要素が必要であります。

- (1) 作業する点と注視点が一致している。
- (2) マニピュレータの先端は視野から外れないで動く(作業する点を中心として動く)。
- (3) 複数の顕微鏡の視野をマニピュレータの作業空間に集中させる。
- (4) マニピュレータと作業台からなる作業部全体には、作業空間を中心として監視装置に対する姿勢を変えるための回転自由度と位置を変えるための並進自由度を持つ。

これに基づいて構築したシステムがマイクロハンドシステムⅡであります(図1、図2)。このシステムは、二つのマニピュレータ、二つの顕微鏡と作業台からなります。メインの顕微鏡には電子顕微鏡を、サブには光学式のモニター顕微鏡を使用しています。光学式モニター顕微鏡の視線軸に回転自由度を配置し、システム全体を2軸の並進ステージ上に搭載しています。マニピュレータは主作業を行うメインマニピュレータと、作業台上に対象物を固定するためのサブマニピュレータから構成されています。メインマニピュレータは、回転2自由度と並進3自由度(分解能10nm)を備えています。また、工具の先端と回転中心の位置を合わせるための並進3軸(粗動&微動)も備えています。サブマニピュレータは、1軸の微動と粗動機構を備えています。作業台も並進3軸(粗動&微動)を備えています。このマイクロハンドリングシステムⅡを用いて微細作業に成功しています。(図3、太い指はタンゲステン、細い指はガラス針、対象物は直径20 μ mの半田の球)。

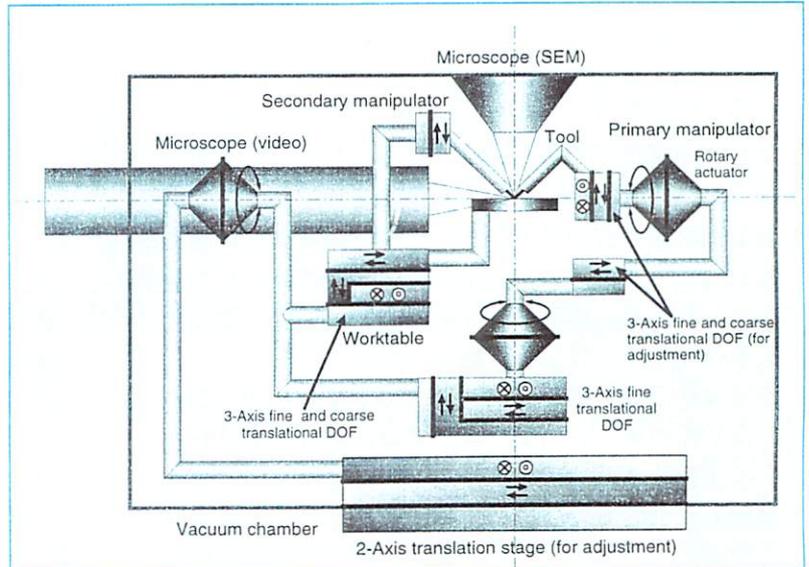


図1 マイクロハンドリングシステムⅡの構成図
(東京大学 先端科学技術研究センター)

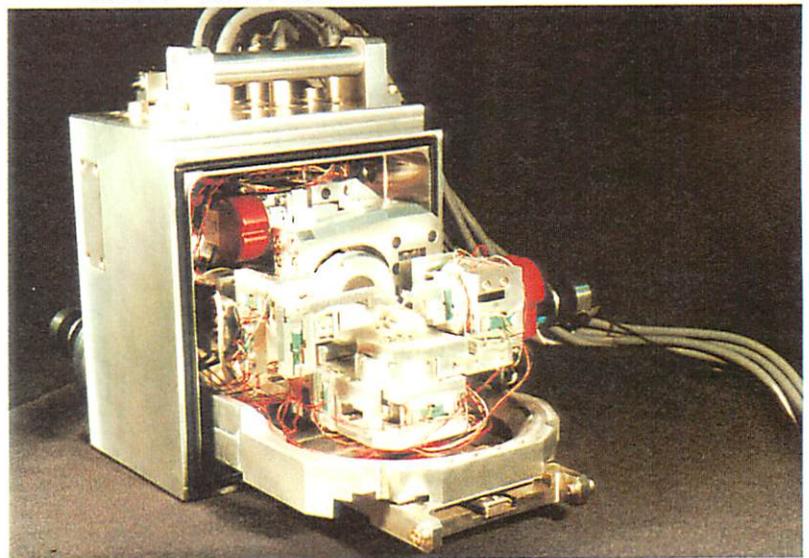


図2 マイクロハンドリングシステムⅡの外観
(東京大学 先端科学技術研究センター)

このシステムは、二つのマニピュレータ、二つの顕微鏡と作業台からなります。メインの顕微鏡には電子顕微鏡を、サブには光学式のモニター顕微鏡を使用しています。光学式モニター顕微鏡の視線軸に回転自由度を配置し、システム全体を2軸の並進ステージ上に搭載しています。マニピュレータは主作業を行うメインマニピュレータと、作業台上に対象物を固定するためのサブマニピュレータから構成されています。メインマニピュレータは、回転2自由度と並進3自由度(分解能10nm)を備えています。また、工具の先端と回転中心の位置を合わせるための並進3軸(粗動&微動)も備えています。サブマニピュレータは、1軸の微動と粗動機構を備えています。作業台も並進3軸(粗動&微動)を備えています。このマイクロハンドリングシステムⅡを用いて微細作業に成功しています。(図3、太い指はタンゲステン、細い指はガラス針、対象物は直径20 μ mの半田の球)。

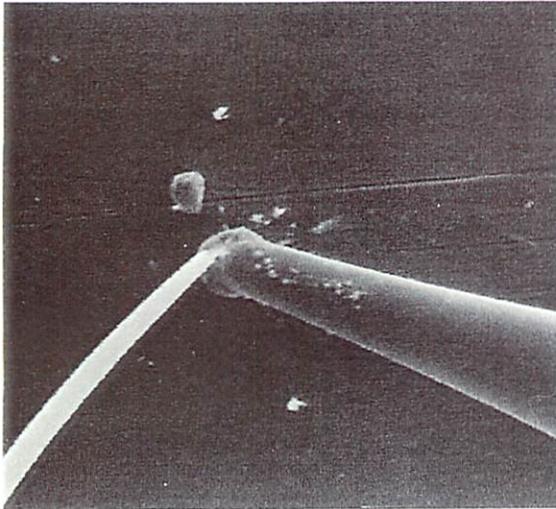


図3 SEMイメージ微細作業
(東京大学 先端科学技術研究センター)

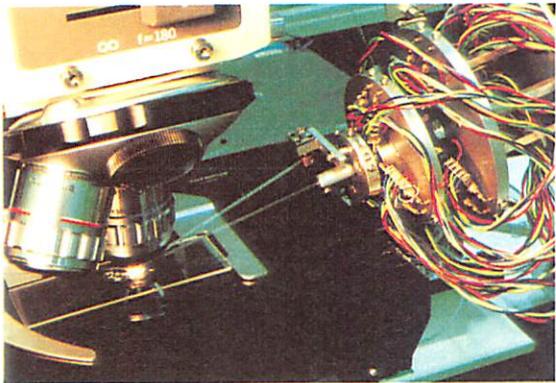


図4 二本指マイクロハンド
(機械技術研究所)

2. 二本指マイクロハンド

微細作業を行う二本指マイクロハンドの機構を考えた場合、種々の問題が考えられます。各指（マイクロハンドモジュール）の手先位置は、アクチュエータの位置情報や回転角情報などに基づいて制御されています。しかしながら、これらの情報がたとえ正確に得られたとしても、機構に存在する誤差により正確な手先位置制御を行うことができません。これは特に微細作業を行うマイクロハンドでは無視出来ない問題となります。この問題は、キャリブレーションを正確に行うことにより回避することができます。しかし、各ハンドモジュールを並列に設置した二本指マイクロハンド機構を採用した場合、経年変化や温度変化等により、やはり二本指としての動作の正確さが保証し難い問題があります。また、この並列機構の場合、作業領域が各ハンドモジュールの作業領域の交差領域に限定され、広い作業領域を得られ難い問題も生じます。これらの問題の解決策として、人間の箸の操作法が参考になります。箸の殆どの操作は、人差し指側で操作する箸が器用に動くことによって行われており、人差し指側の運動は親指側の箸に対する相対的な運動を生成しています。また、親指側の箸は手に固定された状態、すなわち手全体の動きに連動した状態になっています。この考察に基づき、ハンドモジュールを直列に設置した二本指マイクロハンドの機構を採用しました（図4）。3つの円盤状のプレートがそれぞれ6つのリンクを介して固定されています。上部のプレート中央に穴が空いており、中央のプレートから親指側の箸に相当する針が伸びています。上部のプレートには人差し指側の箸に相当する針が伸びています。すなわち、上部のハンドモジュールの指は細かい操作における二本指の相対運動を生成するように動くため、上記の前者の問題を回避することが出来

ます。下部の平行リンク機構の針の作業領域がそのまま二本指の作業領域となるため、後者の問題に関しても回避することができます。この二本指マイクロハンドを用いて、ラテックス粒子（直径 $5\mu\text{m}$ ）のハンドリングに成功しています（図5、両指ともガラス針）。

3. まとめ

以上、現在研究開発されているシステム化技術を紹介しました。今後は、マイクロ環境特有な現象を加味したマニピュレーション技術を考慮に入れたシステム化技術が確立されていくでありましょう。

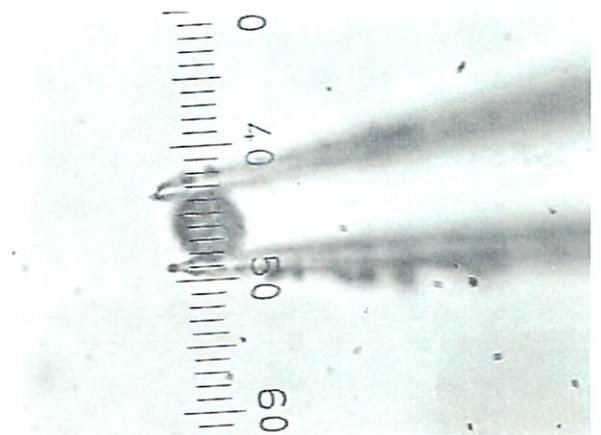


図5 ラテックス粒子（直径 $5\mu\text{m}$ ）の
マイクロマニピュレーション
(機械技術研究所)