

## 講座 マイクロマシン技術関連 専門用語 [第1回]

当センターが昨年発行しました「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-S 0 0 1(01)-1998)」から主要用語を抜粋して、本号より、4回にわたって掲載いたします。従って、参考資料など詳細については、テクニカル・レポートをご覧ください。

### マイクロマシン [Micromachine]

【定義】 構成部品の寸法が数ミリメートル以下の機能要素、およびそれらから構成される微小なシステム。

【解説】 マイクロマシンテクノロジーを駆使して製作される機能要素（センサなど）から、これらを統合化して完成された機械システムまでが含まれる。ナノマシンと呼ばれる分子機械もこれに含まれる。その応用として、産業分野では配管内や狭所での検査や修理、エネルギー消費が少なく環境への負荷の小さいマイクロファクトリへの適用、医療分野では従来のメスを使った体の外側からの手術をマイクロマシンを使った内側からの治療に置き換えること等が期待されている。また、マイクロマシン実現のための研究開発は大きく分けて、半導体プロセスを用いた微小電気機械システム (MEMS) からのアプローチと、現在の機械技術の微小化というふたつのアプローチがある。【参考資料】 (1)(2)(3)(4)(6)

### マイクロマシン技術 [Micromachine technology]

【定義】 マイクロマシンに関連した技術の総称。

【解説】 マイクロマシンに関連した技術は非常に多岐にわたり、要素技術分野で分類した場合、「設計技術」、「材料技術」、「加工技術」、「機能要素技術」、「システム制御技術」、「エネルギー供給技術」、「接合組立技術」、「電子回路技術」、および「評価技術」、さらにそれらの基盤となるマイクロ環境での熱力学やトライボロジー等の「マイクロ理工学」等から構成されている。また、マイクロマシン技術には二つの側面があり、一つはマイクロマシンを実現させるために必要な技術、もう一つはマイクロマシンの開発を通して得られた技術を他の産業分野に応用するのに必要な技術である。

【参考資料】 (1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)

### MST [MST]

【定義】 Micro System Technologies の略で、マイクロシステムに関する技術の総称。

【解説】 主として欧州で使われている用語で、いくつもの異なる意味で使われる場合があるが、主にシリコン微細加工技術を用いたマイクロな電気、光学、機械システムとその構成要素に関する技術を意味する。【参考資料】 (43)

### MEMS [MEMS]

【定義】 micro electro mechanical systemsの略で、マイクロな電気機械システムに関する技術の総称。

【解説】 主として米国で使われている用語で、いくつもの異なる意味で使われる場合があるが、一般には、シリコンプロセス技術を用いたマイクロな構造体、センサ、およびアクチュエータに関する技術

を意味する。【参考資料】 (2)

### 圧電効果 [Piezoelectric effect]

【定義】 機械的応力を受けて歪みを生ずると誘電分極により電界を発生する効果。

【解説】 圧電効果は1880年に水晶等の結晶において発見され、その後、LiNbO<sub>3</sub>、PZT、PVDF、PT、PLZT等、種々の材料開発が行われている。これらの材料には逆向きの効果も観察される。また、これら材料を用いて各種センサやアクチュエータが製作されている。センサとしてはひずみセンサ、圧力センサ等に適用されている。アクチュエータとしては、積層型圧電素子を組み合わせたインチュウム、走査トンネル顕微鏡 (STM) のプローブ操作用のアクチュエータ等がある。電磁式のセンサやアクチュエータに比べエネルギー変換効率が高く小型化も容易なためマイクロマシン関連分野でも多く用いられている。【参考資料】 (3)(6)(39)

### 光歪効果 [Photostrictive effect]

【定義】 光の照射により機械的ひずみを発生する効果。

【解説】 光歪効果は、非対称性を有する圧電性の強誘電体に光（紫外線）を照射すると、光起電力効果による電界が発生し、これが圧電効果を介して機械的歪みを生じるものと考えられている。光歪効果を示す材料としては、主にPLZT素子が知られている。

【参考資料】 (4)(8)

### スケール効果 [Scale effect]

【定義】 物体の代表寸法が変わると、これに作用する各種影響や物体そのものの特性が変わること。

【解説】 物体の体積は寸法の3乗に比例し、表面積はその2乗に比例する。すなわち、寸法が小さくなると表面力の影響が体積力のそれよりも大きくなる。例えば、微小物体の運動では、慣性力よりも静電力や粘性力が支配的になる。物体の寸法が小さくなると、材料の性質もその微小構造や表面の影響を強く受けるようになり、バルクのそれと異なることがある。マイクロな世界の摩擦特性もマクロな世界とは異なる。マイクロマシンの設計においては、これらの影響を十分に考慮する必要がある。

【参考資料】 (2)

### バイオミメティクス [Biomimetics]

【定義】 生物の運動や機構を模倣して機能を作ること。

【解説】 マイクロマシンの寸法に適した微小機構を考へるとき、厳しい自然淘汰の中で生き続けてきた生物の機構や構造は良い手本となる。その一例と

して昆虫の外骨格・弾性ジョイント系を手本にした微小三次元構造が報告されている。外骨格とは硬い表皮が弾性体で結合されたもので、可動部分はすべて弾性体の変形を利用して動いている。弾性変形を利用すると摺動による摩擦が生じないため、微小世界において有利になると考えられる。また、外骨格構造は機構学でいう閉リンク機構に相当し、一部のアクチュエータの動きを複数のリンクに伝達できる特徴がある。【参考資料】(6)(13)

## 光集積回路 【Integrated optics】

【定義】 発光素子、受光素子、変調器、光導波路等の光学素子を集積化した光回路。

【解説】 光集積回路は、ICプロセス、特に、SOI (silicon on insulator) と呼ばれる絶縁体を含む多層薄膜積層技術によって作製されたものである。既存のシステムは、光信号を電気信号に変換して処理をし、さらに光信号に変換する。しかし、このデバイスは、光集積回路で直接処理を行うため、大幅な小型化、軽量化、低電力化、高速化が可能となる。【参考資料】(2)(7)

## マイクロダイナミクス 【Microdynamics】

【定義】 マイクロマシンが使われるような微小な世界における動力学。

【解説】 微小物体の運動には、従来の経験則や方程式が適用できない場合があるため、従来の動力学でその運動を説明することは難しい。マイクロダイナミクスは微小な機構の運動特性を明らかにしようというものである。

【参考資料】(1)(6)

## マイクロ伝熱工学 【Micro-heat transfer engineering】

【定義】 マイクロマシンが使われるような微小な世界における伝熱工学。

【解説】 マイクロメカニカルシステムにおける熱移動の機構は基本的にはマクロなシステムにおけるそれと変わることはないが、システムの代表寸法が小さいため、従来の経験式や理論式の適用範囲から外れることがある。そのため熱移動に関して従来の経験式を適用する場合、熱の移動を支配する無次元パラメータの大きさに注意する必要がある。マイクロメカニカルシステムの熱の移動については、大きく二つに区分できる。一つはマイクロメカニカル要素内での熱の移動であり、他の一つは要素を取り巻く流体内、またはその流体の移動によって生じる熱移動である。前者は熱伝導によって熱の移動が生じるのに対し、後者では熱伝導の他に流体の運動に伴う熱の移動も考慮しなければならない。いずれの場合も、要素の内部で発生した熱を外部に放出しない限り、システムの温度が上昇してしまい、高精度のシステムは維持できない。従って、除熱システムの設計は特に要素からの発熱負荷が大きい場合、非常に重要な問題となる。【参考資料】(4)

## マイクロトライボロジー 【Micro-tribology】

【定義】 マイクロマシンが使われるような微小な世界におけるトライボロジー。

【解説】 トライボロジーとは、マクロな世界での摩擦や摩耗を扱う学問分野である。一方、マイクロマシンのように構成する部品の寸法が極端に小さくなると、重力や慣性力にかわって、表面力や粘性力が支配的になってくる。クーロンの摩擦法則によれば摩擦力は垂直荷重に比例するが、マイクロマシンの環境では表面間力のため、通常スケールでは考えられないような大きな摩擦力が現れると言われている。また、通常サイズでは問題にならない極微量の摩耗が、マイクロマシンにとって致命的なダメージとなる。マイクロトライボロジーの研究では、摩擦面や固体表面で起きる現象のオングストロームからナノメートルの分解能での観察や、原子レベルの相互作用の解析を通して、摩擦力の低減や原子的に見ても摩耗の生じない条件の発見が試みられている。これらのアプローチは、マイクロマシンのみならず通常スケールのトライボロジー問題の解決にも役立つものと期待されている。【参考資料】(1)

## マイクロ理工学 【Micro-science and engineering】

【定義】 マイクロマシンが使われるような微小な世界における理工学。

【解説】 機械システムをマイクロ化していくと、種々の物理パラメータが変化する。その変化は、1) マクロな世界での変化の外挿で予測できる場合と、2) マイクロな世界での特殊性が顕在化してきて、外挿が不可能になる場合との二通りがある。後者の場合、微小な世界での現象を説明するために、新しい理論式あるいは実験式を確立しなければならない。さらに、このような工学問題を取扱うための分析法と統合法を新たに開発する必要がある。材料科学、流体力学、熱力学、トライボロジー、制御工学、運動力学は、マイクロメカトロニクスを支える基礎であるマイクロ理工学として体系化できるであろう。【参考資料】(1)(2)

## マイクロ流体力学 【Micro-fluid engineering】

【定義】 マイクロマシンが使われるような微小な世界における流体力学。

【解説】 微小な世界における流体力学は長さや速度のスケールが通常の世界に比べて小さいことによって特徴づけられる。このとき流体を動かす力は、スケール効果により、体積力より表面力、すなわち慣性力より粘性力が支配的になると考えられる。慣性力と粘性力の比はレイノルズ数によって評価でき、これが等しければスケールが異なる流れも相似とみなすことができる。マイクロマシンの世界では通常の世界に比べて一般的にレイノルズ数が非常に小さくなる。従って、プロペラ、スクリュー、あるいはタービンなどをこの分野の推進機構として用いる場合に相似則が適用できず、特別な配慮が必要である。【参考資料】(1)(2)(3)(4)(5)(6)

## 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ー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】

## 講座 マイクロマシン技術関連 専門用語 [第3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して掲載する第3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。

### メカノケミカルアクチュエータ 【Mechanochemical actuator】

【定義】 化学エネルギーを直接機械的仕事に変換するアクチュエータ。

【解説】 メカノケミカルアクチュエータは、化学エネルギーを駆動源としているため、アクチュエータとしての効率が寸法に依存しないことが特徴である。収縮-膨張の力は、外部より与えられる刺激に対して、分子、高分子コンフォメーション、高分子間相互作用、高分子架橋のそれぞれのレベルで内部エネルギーが変化することにより得られる。開発例としては、ロボットハンド、義肢等への応用の他、分子レベルでの機械的動作を行うクランプ等への応用がある。 【参考資料】 (2)(8)

### ワブルモータ 【Wobble motor】

【定義】 ロータが公転するとともにスリップなしに自転する可変ギャップ型静電モータ。

【解説】 ワブルモータは、ハーモニック静電モータとも呼ばれ、ロータと、静電力発生用の電極を持つステータと、ロータまたはステータ表面に形成される絶縁膜から構成される。ロータは公転方向と反対方向に自転し、自転速度は公転速度の $((\text{ステータ周長}-\text{ロータ周長})/\text{ロータ周長})$ 倍となる。その特徴は、1)ロータ周長をステータ周長に近づけることにより低速・高トルクが容易に達成できる、2)摺動部がなく摩擦・摩耗の影響がない、3)種々の材料が使用可能、4)アスペクト比を容易に大きくできる、等である。一方、ロータが公転により振動するという問題がある。試作例には、可とう継ぎ手によりロータを支持したワブルモータ、ICプロセスにより製作されロータが支軸に対し転がり運動するワブルモータがある。 【参考資料】 (4)(6)

### 超音波モータ 【Ultrasonic motor】

【定義】 弾性振動としての超音波振動を利用したモータ。

【解説】 超音波モータは、ロータにステータを押し付け超音波振動を機械的出力に変換する構造であり、1)構造が簡単で小型軽量化が容易、2)低速域で大きなトルクが取り出せるためダイレクトドライブが可能、3)単位重量当たりの出力が大きい、4)応答性がよい、5)制御性がよい、6)電源off時に自己保持力によりロータ位置を維持できる、7)磁気ノイズが出ない、等の特徴がある。一方、ステータとロータ間に摩擦・摩耗が生じる問題がある。また、定在波形と進行波形の駆動方式があり、前者はエネルギー変換効率が高く、後者は正逆回転が可能でより制御性に優れている。一般に、ダイレクトドライブで

低速高トルク特性が要求される用途に用いられる。 【参考資料】 (4)(6)(8)(14)(15)

### バイオセンサ 【Biosensor】

【定義】 生体物質を素子に用いたセンサ、生体関連物質を測定対象とするセンサ、および生体をモデルとしたセンサの総称。

【解説】 バイオセンサの一般的な構成は、測定対象物を識別するための生体分子識別材料（酵素や抗体などの生体触媒が用いられることが多い）と、その反応に伴う物理量や化学量を検出するデバイスからなる。このデバイスには半導体センサや種々の電極（ISFETやマイクロ酸素電極、蛍光検出オプティカルセンサ等）を用いることができ、シリコン微細加工技術によって製作される。血液分析システム、グルコースセンサ、マイクロロボット等に使用される。 【参考資料】 (2)(4)(19)

### 圧力センサ 【Pressure sensor】

【定義】 流体の圧力を測定するためのセンサ。

【解説】 一般的に、圧力センサはシリコン微細加工技術、特に異方性エッチングを用いて受圧ダイヤフラムを加工し、さらにひずみゲージを基板上に集積化した構成である。現在最も商品化が進んだマイクロマシンと言われ、自動車のエンジンの制御に使われている。今後も大きな市場が期待され、さらに小型化、高精度化、信頼性向上、集積化等の研究開発が進められている。ひずみゲージ式以外に、静電容量型や振動型のセンサも開発されている。

【参考資料】 (2)(3)

### 加速度センサ 【Accelerometer】

【定義】 加速度を測定するセンサ。

【解説】 シリコン微細加工技術によって軟らかいバネとマスを作製し、加速度が加わるマスの慣性力によるバネの変位を検出したり、その変位を相殺する力を測定して、加速度を検出するセンサである。これらシリコンで作られたセンサのうち、加速度センサは次世代の商品として期待されており、多くの研究、開発が行われている。半導体ひずみゲージ方式、静電容量検出方式、電磁サーボ方式、静電サーボ方式等の組み合わせで多くの事例がある。さらに共振周波数の変化を検出する振動検出方式センサや圧電効果を利用した圧電効果型加速度センサもある。自動車、ロボット、宇宙産業等の幅広い応用を目指して、開発が進められている。 【参考資料】 (2)

## 集積化化学分析システム

### 【Integrated chemical analyzing system】

【定義】 化学センサと流体制御素子を集積化した超小型化学分析システム。

【解説】 集積化化学分析システムとして、血液ガスモニタリングマイクロシステムや集積化クロマトグラフィシステムなどが製作されている。血液ガスモニタリングマイクロシステムは、間欠的に採取された血液のpHの分析をするものであり、マイクロバルブやpH ion sensitive field-effect-transistor (pHISFET)などをシリコン基板上に集積化した例がある。また、集積化クロマトグラフィシステムは、試料成分の吸着作用の差を利用した成分分離・分析システムである。試料導入バルブやセンサ、カラム（管）などをシリコン基板上に集積化したものが製作され、市販されている。【参考資料】 (4)

## マイクロジャイロ 【Micro-gyroscope】

【定義】 角速度を検出する微小なセンサ。

【解説】 マイクロジャイロはマイクロロボットの姿勢センサとして期待されている。機械式のジャイロでは、コリオリ力を利用し、回転式と振動式がある。また、サニャック効果を利用した物として、リングレーザジャイロやオプティカルファイバジャイロがある。これらの方式のうち、マイクロ化に向くと考えられる振動式（音叉型や音片型）がマイクロ用として研究されている。【参考資料】 (19)(20)

## ISFET

### 【Ion sensitive field effect transistor (ISFET)】

【定義】 Ion Sensitive Field Effect Transistorの略語。イオン選択性電極と電界効果型トランジスタ（FET）を一体化した半導体センサ。

【解説】 イオン選択性電極部では、血液の水素イオン濃度（pH）や炭酸ガス分圧等の変動によって膜電圧が変化する。増幅用のアンプとして電界効果型トランジスタ（FET：多数キャリアによる電流通路（チャネル）のコンダクタンスをキャリアの流れに直角な電界によって制御するトランジスタ）が使用される。シリコンの微細加工技術により、シリコン基板上に検出部と増幅器が一体化されて製作される。またバルブ等のメカニカル部品も同時に製作された例もある。【参考資料】 (1)(4)(11)

## マイクロフレネルレンズ 【Micro-Fresnel lens】

【定義】 小レンズ形状を輪帯状に配列したマイクロレンズ。

【解説】 低収差で高効率、高NA（開口数）性能を持つマイクロレンズとしてマイクロフレネルレンズが研究開発されている。マイクロフレネルレンズは、一個のレンズで高NAを達成することができる。

電子ビーム描画によって作製されたレンズパターンを持つ原盤でガラス基板上にレンズを複製する手法で作られる。【参考資料】 (21)

## マイクロバッテリー 【Micro-battery】

【定義】 化学的エネルギーを電気エネルギーに変換する超小型装置。

【解説】 エネルギー供給が重要となるマイクロマシン分野では、マイクロバッテリー、マイクロ発電機、マイクロ波エネルギー供給、振動エネルギー伝搬、光エネルギー変換装置等の研究開発が行われている。マイクロバッテリーは体積当たりのエネルギー密度の向上、小型化を目指し、薄膜プロセス、加工技術、特にパッケージング技術の開発、電解質材料の研究開発等が進められている。マイクロマシンの体積が小さいことから、バッテリーは充電可能な二次電池が望ましく、金属/水素二次電池やリチウム系二次電池の研究開発が行われている。

【参考資料】 (11)

## マイクロテレオペレーション

### 【Micro-teleoperation】

【定義】 微小なロボットを遠隔操作（テレオペレーション）する技術。

【解説】 人間が微小なロボットに指令を下して微細作業を実施させるシステムが、マイクロテレオペレーションシステムである。実際にその場に居ないのに、あたかもその場に居るように遠隔から操作するこの技術は、精密な操作が必要な遺伝子操作、細胞操作、マイクロサージェリー（microscopic surgery, microsurgery）だけでなく、従来の機械では実行不可能な微細領域における検査や補修等の微細作業にも、有効な技術である。テレオペレーションシステムの操作性はアーム制御方式に大きく依存する。そのため、マイクロテレオペレーションシステムに特有なアーム制御方式の開発が望まれている。特に、人間の世界とは力学的挙動が異なる微細領域の世界の物体を操作する際には、人間の世界と同等の感覚を持って遠隔操作するための制御技術が必要になる。

【参考資料】 (4)

## シリコンプロセス 【Silicon process】

【定義】 シリコンを材料として使用する超精密加工技術の総称。

【解説】 表面微細加工とバルク微細加工に大別されるが、それらの工程はほぼ共通であり、薄膜積層工程、パターン作成工程、微細組立、アニール、および被覆といった流れになる。加工技術として蒸着、拡散、化学腐食、リソグラフィ等の多くの技術を複合させて用いる。大きなウエハ上にバッチ処理で大量に部品を作ることができるのが特徴である。

【参考資料】 (5)(6)

## バルク微細加工 【Bulk micromachining】

【定義】 基板そのものの一部を除去加工する技術。  
【解説】 バルク微細加工の一例として、化学的溶液の腐食作用によって基板の不要な部分を除去する加工方法がある。材料を残したい部分には $\text{SiO}_2$ や $\text{Si}_3\text{N}_4$ のマスクを施しておくことと表面からの腐食が進まない。また、ホウ素を注入した層を設けておくと、その部分で腐食を停止させることができる。最近では、シリコンフェージョンボンディングにより、より複雑な構造もできるようになってきている。

【参考資料】 (3)(6)

## 表面微細加工 【Surface micromachining】

【定義】 基板表面で種々の物質を種々の微細形状に形成する加工技術。  
【解説】 一例として、化学蒸着 (CVD) を応用して種々の薄膜を基板上に形成し、マスクにより選択的な除去を行うことで、可動部分などの構造を作るための加工方法がある。ここで、一度堆積させたのち溶かし去る層を犠牲層という。代表的な犠牲層材料はphosphosilicate glass (PSG)である。この加工を応用して梁、ベアリング、リンクなどが作られる。【参考資料】 (3)(6)

## LIGAプロセス 【LIGA process】

【定義】 Lithographie Galvanoformung und Abformungの略で、リソグラフィ、電鍍、モールドイングを意味するドイツ語の頭文字をとって名付けられた。

【解説】 この技術はドイツのカールスルーエ原子核研究所で開発された。X線を使った深いリソグラフィと電鍍で高アスペクト比の微細構造をつくる方法だが、場合によっては、電気メッキでつくった金属構造体を型として、さらにプラスチックモールドイングが行われる。特徴として、線幅 $1\sim 10\mu\text{m}$ 、高さ数 $100\mu\text{m}$ 程度の高アスペクト比の微細構造体が、一括して大量に生産でき、また、プラスチック、金属、セラミックスといった多様な材料を選択できることやシリコン半導体素子などと組み合わせることが可能といったことが挙げられる。

【参考資料】 (1)(2)(3)(8)

## イオンビーム加工 【Ion beam machining】

【定義】 加速されたイオンビームによるスパッタリング作用によって加工する技術。

【解説】 イオン源で発生したイオンを加速しながら反応室に導き、このイオンビームのスパッタリング作用によって除去および付加加工を行う。イオン

の入射方向に沿った加工が可能になるため、試料とイオンの入射角を調整することによって、任意性の高い三次元形状ができる。また、ビーム径をサブ $\mu\text{m}$ オーダーまで絞ると、極微細な加工が行えるようになる。イオン源としてはArが一般的であるが、加工対象の原子量に依存してスパッタ率 (除去原子数/衝撃イオン数) が変わってしまうため、Kr等も用いられる。【参考資料】 (4)(7)(8)

## マイクロ機械加工 【Micromachining(1)】

【定義】 従来の機械加工技術を応用した微細部品の加工技術。

【解説】 マイクロ機械加工には、マイクロ切削研削加工、マイクロ塑性加工、マイクロ鍛造、マイクロ放電加工等がある。工具や工作機械を高精度・微細化することによって鏡面加工などの超精密加工や回折格子のような微細形状をつくることができる。この場合、工具としては微細かつ鋭利な形状を製作し易い単結晶ダイヤモンドが多用される。

【参考資料】 (6)

## マイクロ放電加工 【Micro-electro-discharge machining】

【定義】 微小工具電極と加工対象の間の放電を利用した微細加工技術。

【解説】 従来の放電加工と原理は同様であるが、微小エネルギー放電技術と微小工具電極の作成が異なる。すなわち電極と加工対象との間の浮遊容量を小さくする必要があり、工具もワイヤ放電研削加工 (WEDG) 等の方法で微細にする必要がある。WEDG法では直径 $2.5\mu\text{m}$ の電極も成形可能であり、微細穴の加工が可能となる。【参考資料】 (4)

## 拡散接合 【Diffusion bonding】

【定義】 材料同士を融点以下の温度に加熱、加圧密着させ、互いの原子の相互拡散により固相のまま接合する方法。

【解説】 固相で接合できるので熔融接合に比べて精度の高い接合を行うことができる。主に金属同士やセラミックスと金属の接合に用いられる。異種材料の接合においては、接合後の冷却時に互いの熱膨張係数が異なるために、熱応力が発生する。これに起因するクラックの発生を回避するための、熱応力緩和方法が主な研究課題である。緩和方法としては、両方の材料のほぼ中間の熱膨張係数を有する材料や変形しやすい材料を間にサンドイッチする方法などがとられている。熱膨張係数が厚さ方向に徐々に変化する材料 (傾斜機能材料) を中間にはさむ方法も盛んに研究されている。【参考資料】 (1)

## 講座 マイクロマシン技術関連 専門用語 [第4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して掲載する第4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。

### シリコンフュージョンボンディング [Silicon fusion bonding]

【定義】 親水化されたシリコンや酸化シリコン等の基板を、まず水素結合で貼り合わせた後、加熱処理をしてSi-O-Si結合により接合する技術。

【解説】 少なくともどちらかが酸化されているシリコンウエハ同士を貼り合わせることにより、ウエハ内部に不純物拡散層や絶縁物層を形成するとき用いられる。また不純物の種類や濃度の異なるウエハを接合することにより、高温長時間を要する深い不純物拡散や、エピタキシャル成長の代替技術として用いられる。本技術の最大の欠点はプロセス温度が高いことであり、より低温で行わなければならないプロセスはこの後に行わなければならない。プラズマ酸化処理等を施した後に、接合することによりプロセス温度を低下させる試み、シリコン以外の材料の接合に本技術を応用する試みなどが盛んに研究されている。酸化ウエハの貼り合わせにより、絶縁層をシリコンでサンドイッチした構造、SOI (Silicon on Insulator) 構造を得ることができる。SOIは集積化された素子を酸化物などの誘電体により分離し、高性能化する技術に利用され、フォトダイオードアレイの製造等に利用される。また穴あけ、溝切り加工を施したウエハを接合すれば内部に微細加工が施された構造を得ることができ、圧力センサや、内部に冷却構造を持ったレーザダイオード用の熱交換器の製作等に利用されている。

【参考資料】 (4)

### 陽極接合 [Anodic bonding]

【定義】 可動イオンを含むガラスとシリコンウエハや金属等を密着接合する方法。重ね合わせた基板を加熱して、ガラス側を軟化させる。また、同時にシリコン側を陽極として両者の間に高電圧を付加することにより、電気的二重層を発生させ、静電引力により基板どおしを接合する。

【解説】 接合は固相で行われるので、高精度の接合が達成される。シリコンフュージョンボンディングほどではないが、接合強度は表面の平坦度に大きく影響される。シリコンウエハとパイレックスガラス等を接合し、容量型圧力センサやマイクロポンプ等の内部キャビティーを持つ構造が作られている。シリコン同士やシリコンと金属を接合するためには、表面にガラス薄膜を形成したり、シリコン表面を酸化したりする方法が試みられている。薄膜を用いる方法では接合温度を高くすると薄膜の絶縁破壊電圧が低下し、十分な電圧が印加できないという問題があった。低融点ガラスをスパッタ膜付けし、プロセス温度を常温に下げる試みもなされている。常温にプロセス温度を下げると、熱応力に起因するひずみや変形などの諸問題が解決し、精度の向上や、材料

の選択性が広がる等の多くの利点がある。

【参考資料】 (1)(2)(3)(4)

### 非接触ハンドリング [Non-contact handling]

【定義】 非接触で物体の捕捉や移動を行うこと。

【解説】 たとえば細胞操作では、細胞をガラス製のマイクロピペットで吸引し機械的に取り扱うのが一般的であるが、接触により試料を傷めたり、物理的、化学的な条件を変えてしまうという問題がある。これに代わる非接触の操作法の一つとしてレーザ捕捉(レーザトラッピング)がある。これは光が物体に及ぼす力(放射圧)を利用して試料を非接触・非破壊的に操作する方法である。電磁理論によると1mWのレーザ光で発生する力は7pNといわれている。

【参考資料】 (59)

### マイクロマニピュレータ [Micro-manipulator]

【定義】 遺伝子、細胞、微小部品、微小工具などの微細な対象物を操作することを目的とした機構。

【解説】 駆動方式としては、純機械式タイプ、空気圧駆動タイプ、油圧(水圧)駆動タイプ、電磁力駆動タイプ、電動モータ駆動タイプ、圧電駆動タイプがある。細胞操作用マイクロマニピュレータは、一般に微動用と粗動用とで別々の駆動方式を用い、これらを組み合わせた構成となっている。制御方式としては、顕微鏡やカメラなどから得られる視覚情報を用いて、マニュアル操作で、その微小位置の制御を行っているのが主流である。将来、微小対象物を組み立てる微細力作業や、マイクロテレオペレーションシステムを実現する際には、力制御機構を有するマイクロマニピュレータの開発が望まれる。

【参考資料】 (1)(2)(4)(5)(6)

### 生物化学エネルギー [Biochemical energy]

【定義】 生物の体内の物質に保有されていて化学反応に伴って放出されるエネルギー。

【解説】 生物は機械的仕事、物質輸送、物質の合成などをするのに化学エネルギーを使う。アデノシン三リン酸(ATP)は、化学エネルギーの変換において重要な役割をはたす。ATPは短期間のエネルギー貯蔵分子である。長期のエネルギー貯蔵には炭水化物、タンパク質、脂肪が利用される。これらの化学エネルギー源を、生体内で利用するマイクロマシンのエネルギー源として利用できると、マイクロマシンの性能を飛躍的に高められる。

【参考資料】 (61)

## アスペクト比 **[Aspect ratio]**

【定義】 立体形状の垂直（高さ）：水平（幅）の寸法比で、構造物の相対的な厚みを示す指標。

【解説】 シリコンプロセスでつくられる形状のアスペクト比はせいぜい10：1といわれ、厚みのある立体形状はつくりにくい。異方性エッチングやLIGAプロセスを用いるとアスペクト比が100：1以上の深穴や溝等をつくることができる。

【参考資料】 (1)(3)(6)(7)

## 走査プローブ顕微鏡 (SPM)

**[Scanning probe microscope (SPM)]**

【定義】 原子レベルの大きさの先端を持つプローブを試料に近接させた状態で、試料の表面との間で発生する物理量を計測しながらプローブをラスタ走査することで画像情報を得る顕微鏡。

【解説】 プローブ（探触子）の先端を原子の大きさまで尖らせ、物体の表面に近接させると、原子レベルの分解能で物体とプローブとの間に働く種々の物理量を計測することができる。一般に計測した物理量が一定となるよう物体表面に沿ってプローブをラスタ走査し、それに伴うプローブの変位を画像化することで、その物理量に基づく物体の微細な画像を構成することができる。これが、走査トンネル顕微鏡、原子間力顕微鏡、静電力顕微鏡、走査イオン顕微鏡、走査磁場顕微鏡、走査温度顕微鏡、走査摩擦力顕微鏡などの、種々の走査プローブ顕微鏡の共通原理である。【参考資料】

## マイクロサージェリー

**[Microscopic surgery、Micro-surgery]**

【定義】 顕微鏡下で行われる外科手術。

【解説】 今日の手術のうち注目されている技術の一つに、実体顕微鏡の下で行われる手術がある。顕微鏡下の外科手術という意味でマイクロスコピック・サージェリーと呼ぶのが正式であるが、わが国ではマイクロサージェリーと呼ばれている。耳鼻科、眼科、脳外科、血管外科、形成外科などで、このような顕微鏡下の手術が実施されている。現在最も微小なレベルの手術では、直径800 $\mu$ m程度の動脈、静脈や神経を、直径20 $\mu$ m程度の針付きの糸で縫合することも行われている。しかし、医者が持針器、ピンセットやメスを手で持って通常の手術と同じような動作をするので、この程度の太さの血管や神経の縫合が限界だと言われており、マイクロテレオペレーションなどのマイクロマシン技術が今後期待されている。【参考資料】 (4)(5)(6)

## スマートピル **[Smart pill]**

【定義】 生体内で計測や薬剤送達を行うロボット。

【解説】 現在提案されている例として、消化管用スマートピルがある。この提案されたスマートピルは、計測検体を採取するサンプリング装置、シリコ

ンウェハの上に作られたインテリジェントセンサー回路、信号の増幅制御器、治療用薬剤のタンクとその放出メカニズム、マイクロ電源などによって構成されている。【参考資料】 (4)(6)

## 能動カテーテル **[Active catheter]**

【定義】 湾曲動作用のマイクロアクチュエータを搭載し、外部からの操作信号により自由に湾曲して、目標地点に到達することが可能なカテーテル。

【解説】 曲がりくねった管腔臓器内でもカテーテルを外部からの操作で確実に自由に曲げることが可能になれば、血管でつながった体内の必要な場所に、治療などのための器具を容易に挿入することができる。能動カテーテルが実現化するためには、今後様々なマイクロアクチュエータやマイクロ機構の開発が重要である。【参考資料】 (1)(2)(4)

## マイクロファクトリ **[Micro-factory]**

【定義】 小型工業製品のサイズに見合った小型の製造システム。

【解説】 時計、カメラ、カセットレコーダのような小型の機器では、多数のミリ寸法の部品が使用されている。従来、この種の微小部品の加工や小型機器の組立も、メートル寸法の工作機械や組立用ロボットによって行われている。従って、このような製造システムにおける微小部品の加工工程や組立工程では、部品の加工や機器の組立に要する動力に比べて工作機械や組立用ロボット自体の運動に費やされる動力が著しく大きくなっている。また、このような製造システムでは扱っている部品・製品の大きさに比べてきわめて大きな空間、資源を必要とする。取り扱う部品や製品の大きさに見合った各種マイクロマシン技術を利用した微小な部品や製品の製造システム技術をマイクロファクトリ技術と呼び、従来の生産システムに比べ、大幅な省エネルギー・省資源・省スペースが達成できる。

【参考資料】 (19)

## 管内点検マイクロロボット

**[Pipe inspection micro-robot]**

【定義】 配管内に入り込み異常箇所等を点検するロボット。

【解説】 配管内を移動し、損傷箇所の点検を行うマイクロロボットはマイクロマシンの最も有望な応用分野であると考えられている。管内点検マイクロロボットは一つあるいは複数のセンサを搭載し、配管内を移動し、損傷箇所を発見し異常の種類と場所を特定する。移動方法としては、配管内の流体の流れに乗って移動する浮遊型と能動的移動機構によって移動する自走式があり、それぞれについて有索（エネルギー供給用、通信用等のケーブルを有する）と無索の二種類がある。

【参考資料】 (19)