

エッチングで形をつくるーバルクマイクロマシニング

名古屋大学工学研究科教授 佐藤一雄

本号から4回にわたって、微細加工を目的とした最近の加工プロセス技術を概観する。全体の構成は、今回を含めて、以下のとおりである。

- (1) エッチングで形をつくるーバルクマイクロマシニング
- (2) 薄膜で複雑な構造をつくるー表面マイクロマシニング
- (3) 機械加工の微細化をきわめるー精密機械加工技術
- (4) 形を転写して量産するー型取り加工技術

マイクロマシンは、インクジェットプリンタヘッドやビデオプロジェクト素子など、我々の身近な道具としてすでに使われはじめた。これらを実現したのがマイクロマシニング(微細加工)技術である。とりわけ、上記の(1)(2)(4)の技術は、多数の微小機構要素を正確な配置に並べて作る、あるいは、均質な製品を大量に作る、といった一括製造プロセスの特徴をいかして、産業化に大きな成功を納めている。今回のテーマの「バルクマイクロマシニング」とは、次回の「表面マイクロマシニング」と対比される技術であり、被加工材料基板(バルク)にエッチングで構造体を作るプロセス技術である。

1. エッチング方法の分類

エッチング加工とは、加工対象となる基板表面にエッチングマスクを施し、マスクの一定領域にホトリソグラフィで微細な開口パターンを形成し、そのパターンにしたがって基板材料を選択的に除去するプロセスである。具体的にどんな薬剤で基板を除去するのかを表1に示した。

表1 エッチング方式と薬剤の分類

ウェットエッチング(湿式)	酸 : (例) フッ酸、硝酸 アルカリ : (例) KOH, アンモニア類
ドライエッチング(乾式)	ガス : (例) XeF ₂ , BrF ₃ ラジカル : (例) F イオン : (例) Ga, Ar, Cl, フッ化炭素 アトム : (例) Ar

ウェットエッチングの薬剤やドライエッチングのなかでも反応性の高いガス、ラジカル、イオンは、基板材料と化学反応して材料を除去する。一方、反応性の低いイオンやアトムビームはそれらの粒子を加速して基板表面にぶつけることで材料を物理的に除去する。このように、一口にエッチングといっても、材料除去のメカニズムがさまざまなので、エッチング特性もまた以下に述べるように多様である。

2. エッチングの特性を利用する

エッチング特性には等方性、異方性の別があり、加工した断面形状は大きく異なる。一般にマスク開口からエッチングを進めると、加工は表面の法線方向に進行すると同時に、マスクの下部にも及ぶ。これをサイドエッチングあるいはアンダーカットと呼ぶ。エッチング薬剤(エッチャント)の供給と反応生成物の排出が円滑で、しかも被加工材が均質で方向性がなければ、サイドエッチングの量はエッチングの深さとほぼ等しくなる。このような系を等方性エッチングと呼ぶ。その加工断面を模式的に図1に示す。等方性エッチングでは深く加

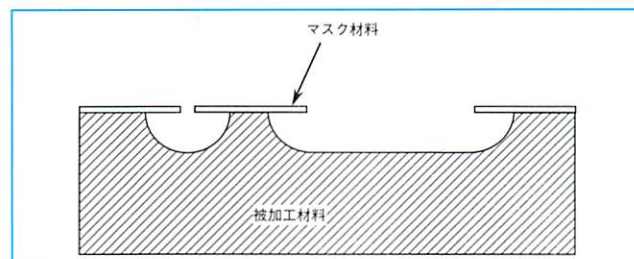


図1 等方性エッチングの加工断面

工するとマスクパターンの情報が失われてしまうので、マイクロマシンのような構造体加工への適用には限界があるが、逆に、限られた目的では使い途がある。例えば、等方性エッチングではすべての方向に等しい速度でエッチングが進むので、点状の開口をもつマスクからエッチングを施せば微細な凹球面が加工できる(図1の左を参照)。この特性を利用して、単結晶シリコンに超音波顕微鏡凹面レンズを形成した例がある。これとは逆に、円盤状のエッチングマスクの周囲からエッチングしてアンダーカットが円の中心に達したところでエッチングを止めれば鋭い針先ができる。この特性を利用して電子を放出するカソードなどを作った例がある。

等方性エッチングと対照的に、サイドエッチングを極力抑えて、マスクパターンにしたがって表面から深く加工するエッチング特性を異方性エッチングと呼ぶ。その

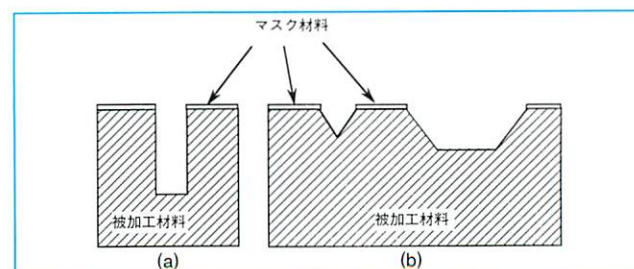


図2 異方性エッチングの加工断面

加工断面を模式的に図2に示す。マスクのパターン情報に従って深く加工できるので一般にマイクロマシンデバイスの加工に好適である。これを実現するには、被加工材とエッチャントの組み合わせ、その他の加工条件に特別な工夫が必要である。ドライプロセス(乾式)、ウエットプロセス(乾式)でそれぞれ特徴ある異方性エッチング技術が、ここ数年の間に大きく進歩した。

異方性ドライエッチングの代表的なものが反応性イオンエッチング(RIE)である。真空容器内に例えばCF₄、SF₆などのフッ素系のガスを導入し、電極間に高周波電圧を印加してプラズマを発生させ、シリコン基板に垂直な方向のエッチングを優先的に進行させる。マイクロマシンの研究用途では、近年、誘導結合型装置による高密度プラズマ(ICP)の使用によって、例えばアスペクト比15:1でエッチング深さ300~500μmに達するような加工が5μm/minというエッチング速度で可能になっている。図3(a)はこの方法で加工されたインクジェットプリンタノズルの段付き孔の断面写真であり、細い孔の径は28μmである。

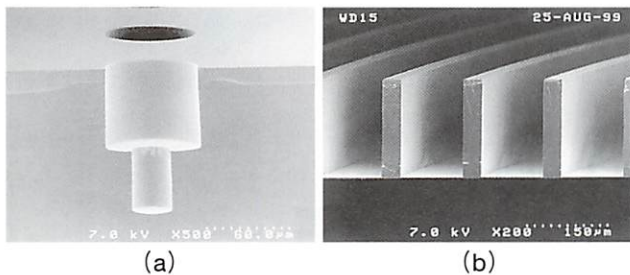


図3 インクジェットプリンタヘッドの加工例
(a) 乾式エッチングによるノズル孔の加工、
(b) 湿式エッチングによるインクリザーバの加工
(いずれもセイコーエプソン(株)のご提供による)

一方、ウエットエッチングで異方性を得るものに、被加工材料自身の異方性を利用した結晶異方性エッチングがある。加工に要する設備が安価なので、ドライエッチングよりもはるかに多くの実用デバイスの生産に使われている。シリコン単結晶はダイヤモンド結晶構造をもち、結晶方位によってエッチング速度が100倍も異なり、強い異方性を示すので、そのエッチング形状は結晶構造を反映して特殊な3次元形状を呈する。すなわち図2(a)(b)に示すような多面体構造が簡単に得られる。エッチャントとして、KOH水溶液、4メチル水酸化アンモニウム(TMAH)水溶液、などが知られている。図3(b)は、KOH水溶液でエッチングしたプリンタ用インクリザーバの断面写真である。それぞれの隔壁はポンピング動作をする厚さ2.2μmのダイヤフラムを底面に残して均一にエッチングが施されている。さらに、シリコン基板の表と裏からエッチングを加えると、一層複

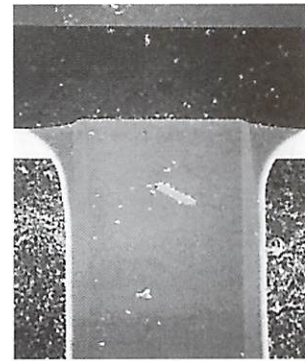


図4 結晶異方性エッチングによる曲面加工の例

雑な3次元構造が作られる。図4は加速度センサに使われるシリコン梁の付け根の曲面加工の例であり、従来、多面体しかできないと考えられてきた結晶異方性エッチングで滑らかな立体曲面が実現している。このように複雑な3次元構造を加工するには、1回だけのエッチングでなく、複数のマスクパターンを使った複数回のエッチングプロセスが必要である。基板の結晶方位とマスク形状の関係、エッチング液の組成と温度が出来上がりの加工形状を決める。このようなプロセス設計を可能にするエッチングシミュレーションシステムとシリコンのエッチング特性データベースが近年開発され、実用化している。

結晶異方性エッチングはシリコン単結晶の他、水晶、GaAsなどの結晶材料にも実行可能である。

3. ウエット・ドライエッチングの比較

乾式と湿式のエッチングの優劣をいくつかの項目について比較して表2に示した。どちらを適用するかは、必要とする加工特性によって選択すべきであり、さらに工業的には設備投資の回収を考慮しなければならない。マイクロマシンの開発においては、エッチング方式の選定がデバイス設計と直接的に関わっており、どんな加工技術を持っているかによって、製造できるデバイスのタイプも決まってしまう。言い換えれば、設計と加工が一体になった開発体制がマイクロマシンデバイス開発には要求される。

表2 異方性エッチングにおける湿式と乾式の比較
(+：優れる、-：劣る)

	湿式エッチング	乾式エッチング
加工の微細性	+	++
清浄性、電子回路との一体化が容易	-	++
任意の2次元パターンでエッチングが可能	---	+++
加工深さの制御性	++	+
加工深さの均一性	++	-
特殊形状の加工ができる	++	+
加工に要する設備費用	+++	--

薄膜で複雑な構造をつくる—表面マイクロマシニング

名古屋大学工学研究科 マイクロシステム工学専攻 教授 佐藤一雄

前号ではシリコン基板にエッチングで微細な3次元形状を形成する「バルクマイクロマシニング」を解説した。本号の「表面マイクロマシニング」は、これとは対照的に、シリコン基板の表面に薄膜を積層して、複雑な3次元構造を創り出す技術である。

1. 多結晶シリコン薄膜で構造体を作る

1980年代後半、米国のUCバークレー校やMITで開発された、シリコン基板上で動くことができる微細な機構部品やマイクロ静電モータはマイクロマシニングに強い衝撃を与えた。これを可能にしたのが表面マイクロマシニング技術である。図1はMITで開発されたマイクロ静電モータのSEM写真である。直

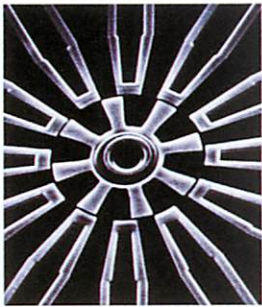


図1 多結晶シリコン薄膜でできた静電マイクロモータ (Case Western Reserve Univ., M. Mehregany教授のご提供)

径が0.1mmに満たない星形のロータの周囲に放射状に伸びたステータが配置され、ロータの中心にはロータをはずれないように保持する軸が基板に固定されている。これら3つの部材は何れも厚さが $1\mu\text{m}$ (0.001mm) ほどの多結晶シリコン薄膜で構成されている。ロータとステータの間に電圧を加えると、静電引力が両者の間に働く。ロータの先端とステータの先端が円周方向にずれた部分でロータに円周方向成分の力が加わってロータが回転する。

マイクロ静電モータの製作工程を図2で説明する。構造材料である多結晶シリコン薄膜および間隙を作るためのシリコン酸化膜をそれぞれ光リソグラフィとエッチングでパターンニングしながら交互に積み重ねていく。ステータと軸は基板に固定されるが、ロータは基板から分離して回転させるため、その表面全体を積層したシリコン酸化膜で包み込む。最後の工程で、シリコン酸化膜だけを選択的に溶かすエッチング液(フッ酸の溶液)に構造全体を浸すと、ロータは基板から完全に分離して回転可能になる。ここで、シリコン酸化膜のように、最後に溶けるこ

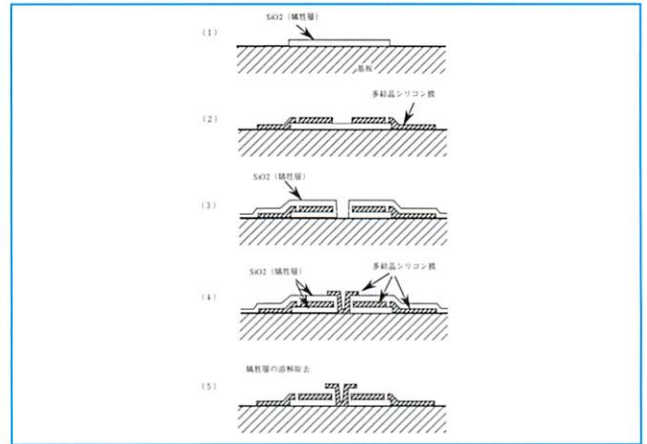


図2 静電マイクロモータの加工断面図

とによって構造を分離させる役目をする薄膜を「犠牲層」と呼ぶ。

残念ながら、回転型の静電モータはこれまでに応用の日の目を見ていない。それは、低トルク・高速回転のロータからの機械的出力の取り出しの問題、軸受の摩滅の問題などが解決していないからである。しかし、表面マイクロマシニング技術は別の形態で新製品を世の中に送りだした。その一例として、アナログデバイス社は図3のような自動車用加速度センサを実用化した。H型の質量部分は、4カ所の足の先端で基板に固定されている以外は、基板面から約 $1\mu\text{m}$ 浮上している。基板面内で図の左右方向に加速度が加わると、H型の4本の足がたわんでHの中央の横棒が左右に変位する。この変位を楕円形にかみ合った電極間隙の変化として検出し、さらにこの変位をキャンセルするように楕円電極間に静電力を働かせてサーボ制御する。サーボ回路、アンプなどの電子回路とともに機械的な構造を1チップ上に集積化したシステムの実現は、マイクロマシニングの一つ

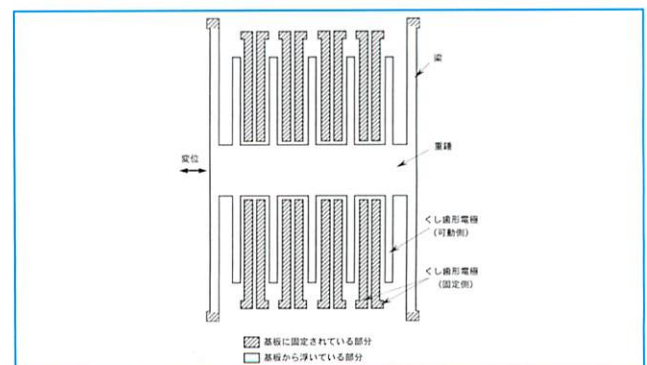


図3 多結晶シリコンでできた加速度センサの構造

のあり方を衆目に示したことで、また、米国の産官学の協力の成功例として高く評価されている。

2. 金属の表面マイクロマシニング

表面マイクロマシニングは前章で例示した多結晶シリコンだけでなく、金属材料を構造体とするデバイスにも適用される。構造材料と犠牲層の組み合わせを旨く選択してやれば、前章と同じ考え方で、薄膜の3次元構造が形成できる。

米国テキサスインスツルメンツ社のデジタル光処理（DLP）デバイスは、表面マイクロマシニングのもう一つの成功例である。図4はDLPデバイスの応用例のビデオプロジェクターの原理図である。DLP

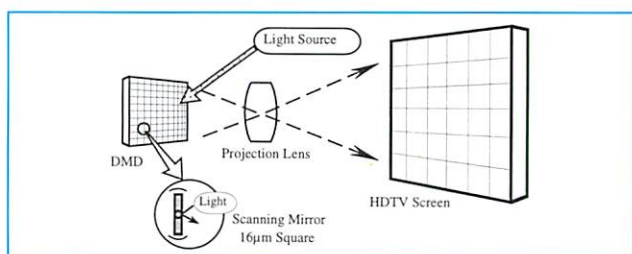


図4 デジタルマイクロミラー型プロジェクターの原理

デバイスの表面には100万個に及ぶ微小な反射ミラーが敷き詰められており、それぞれが±10度の首振り運動をするためのバネ構造で支えられている。ミラーとバネの材質はアルミニウム薄膜であり、このときの犠牲層は高分子材料である。ミラーは静電力で駆動されて首を振る。個々のミラーの運動はシリコン基板上に形成されたトランジスタで個別に制御される。光源からの光がデバイス面で反射して壁面に投影される。この応用はすでに液晶デバイスと並んでビデオプロジェクターの一方式としての地位を確立している。

3. 表面マイクロマシニングの長所と短所

以上に述べた、薄膜材料を構造体とする表面マイクロマシニング所をバルクマイクロマシニング技術と比較するとその長所は以下の2点に要約される。

- (1) 電子回路と一緒に機械構造体を作り込み、電子・機械集積システムを実現できる
- (2) シリコン基板の厚さを貫通してエッチングして作るバルク型の構造体よりも小さい構造体が加工できる

一方の短所は、以下の諸点である。

- (1) バルクマイクロマシニングに比べて構造材となる薄膜の物理的性質が制御しづらい
- (2) 犠牲層エッチング後の乾燥工程で薄膜構造が基板に固着してしまうことがある

- (3) 薄膜構造の剛性が低い

4. 技術のトレンド

4.1 バルクマイクロマシニングとの融合が始まる

前章で述べた表面マイクロマシニングの短所は、最近の研究の進展で徐々に克服されつつある。特に、薄膜構造で膜厚方向の剛性が低いという問題に関して、最近、以下のような解決策が考案されている。すなわち、ドライエッチングによってシリコン基板に狭くて深い溝を加工した基板の表面に、表面マイクロマシニングを実施する事で、図5に示すようなT型断面をもつ薄膜構造を基板から分離して加工した例が、ミシガン大学から発表された。T字型断面を

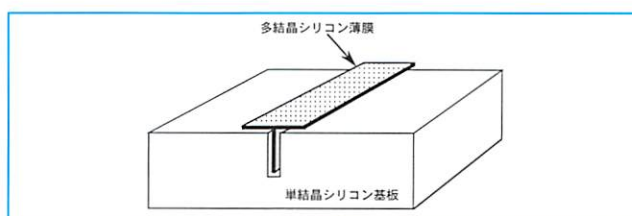


図5 T字型断面を持つ高剛性薄膜構造

持つ膜を加速度センサ用の固定電極板として応用している。このような加工は、前号で解説したドライエッチングで高いアスペクト比の溝加工が可能になったこと、および、均一な厚さの膜を深い溝の内面に成膜することが出来るようになったことで、初めて実現する。バルク加工と薄膜加工の複合・融合が、さらに高度な3次元加工を可能にすることは間違いない。

4.2 実装技術との複合化に期待

もう一つの注目すべき点は、デバイスの加工工程の中で、その後のデバイスの実装に必要なカプセル封止も行ってしまおうということである。多結晶シリコンの表面マイクロマシニングで可動部材をシリコン基板上につくった場合、雰囲気中の塵が可動部材と基板の隙間に入ることは許されない。シリコン基板からデバイスチップを切り出し、塵の入らないようにパッケージングするのは至難の業である。現実にパッケージングのコストの方がデバイス加工よりも高くつくことが多い。デバイスの犠牲層エッチングをする前に、さらにカプセル材料となる多結晶シリコンの膜でデバイスの表面を覆い、そのあとでカプセル材料の微細な孔から犠牲層エッチングを施し、可動部材を基板から分離する技術も開発されている。これにより、パッケージング工程そのものがシリコンデバイスの加工プロセスに内包されると同時に、犠牲層エッチング中やその後のパッケージング工程で塵が入り込む危険性も著しく低減する。

機械加工の微細化をきわめる……精密機械加工技術

名古屋大学 工学研究科 教授 佐藤 一雄

前号まで2回にわたって、フォトリソグラフィを基本としてエッチングや薄膜形成で微細構造を作る技術を解説した。本号では、機械の加工技術として古くから知られてきた切削・研削・研磨加工、ならびに、比較的新しい放電加工、ビーム加工など、ひろく「精密機械加工技術」と分類・定義される技術でどのような微細加工が行われているかを紹介する。図1には、切削・研削・研磨・放電加工・ビーム加工の形態を示した。

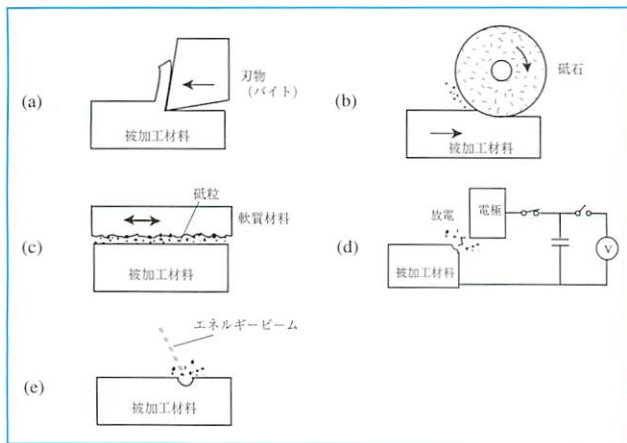


図1 各種機械加工の模式図

(a) 切削、(b) 研削、(c) 研磨、(d) 放電加工、
(e) ビーム加工

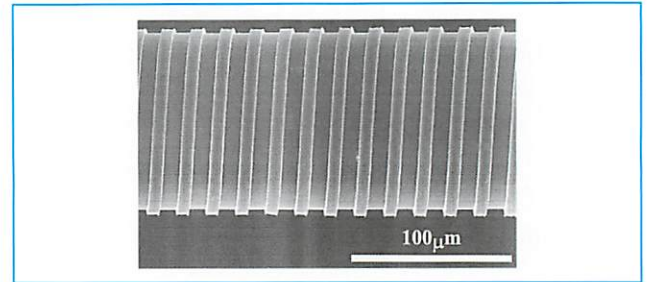
1. 切削・研削・研磨加工

切削は研削、研磨と並んで、古くから機械加工の中心技術であり、金属素材から高度な3次元形状を生み出すのに使われてきた。切削で微細加工が行われるためには以下のことが必要である。

- (1) 工具の切れ刃が鋭いこと、つまり、切れ味がよいこと
- (2) 工具と素材の相対運動が精密に行われること

(1)の目的では、工具として、硬度が高くまた金属との摩擦係数が小さいダイヤモンドが使用される。また、(2)の目的では、工具または素材に揺らぎのない精密な回転・並進運動を与える機構、また、工具を正確に送り出す機構が必要である。図2は、東大の樋口らが、独自に開発した微細加工機で、直径約0.1mmの軸を加工しさらにその表面にねじを切った例である。

研削は、細かい砥粒を固めた砥石を高速回転させて被加工物を除去する。多数の切れ刃のそれぞれが材料

図2 切削による微細なねじの加工例
(山形、樋口のご好意による)

を僅かずつ除去するので、一般に切削よりも加工変質層が少なく、平滑な仕上げ面が得られる。しかし、砥粒が砥石から脱落することを前提とした加工法なので、微細な形状を加工する目的には不向きである。砥石は激しく摩耗するのだから、微細な砥石を作ることも意味がない。従って、微細な形状の加工には研削はほとんど使われない。

一方、研磨は、一般に形状創成よりもむしろ、固体の表面を平滑にする目的、また、加工変質層の少ない高品位の表面を得る目的、広い面の平坦度を得る目的、等で使われる。比較的広い面の平坦度を得る応用例としては、LSIの基板となるシリコン単結晶基板表面の加工、磁気ディスク記録ヘッドの最終仕上げ加工などに広く使われている。特に、シリコン単結晶基板表面の加工への応用では、表面にマイクロオーダーの薄い単結晶層を残すSOI (Silicon-On-Insulator) 基板の加工や、LSIを製作した結果凹凸化した表面を平坦化してさらにその上に3次元配線をするための下地を作るCMP (Chemical Mechanical Polishing) プロセスにおいて必須の技術となっている。シリコン基板上に展開されるマイクロマシンでも、Silicon-On-Insulator基板の利用、基板同士を貼合わせる際の表面の平滑化、などの目的で、研磨技術に負うところが大きい。

2. 放電加工

放電加工の原理は、電極と被加工物との間に制御された放電パルスを生じさせ、その熱エネルギーで被加工物を溶融飛散させて除去するものである。従来の主たる用途は、硬くて加工が難しい材料の加工、たとえば金属塑性加工用の型材料としての超硬合金の加工などであった。その加工原理から、加工効率は低いが、逆に微細加工ができることが注目され、マイクロマシンの加工への適用が研究されている。電極が微細になれば、

新たな技術課題として、電極の振動、電極の摩耗が、加工精度の低下をもたらすという問題が生じる。電極となる細いワイヤーを繰り出ししながら、そのワイヤーの振動を防ぐ加工システムが東大の増沢らによって開発され実用化している。図3は微細放電加工機で加工された微小部品加工例である。放電加工では、機械加工における旋盤、フライス盤、ボール盤による加工に相当する形状創成をおこなうことができるので、自由度の高い3次元加工が可能である。一方、放電加工の短所は、表面が放電痕によって覆われて粗面化することである。平滑さが必要な場合には、放電加工した表面をさらに研磨して仕上げる必要がある。その他に、適用を制限する要因として、本質的に加工能率が低いこと、加工環境が清浄でないこと、などが挙げられる。

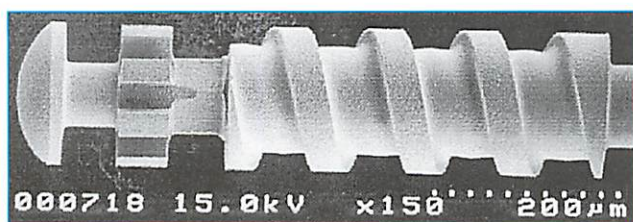


図3 放電加工による微細加工例
(松下電器産業株のご好意による)

3. ビーム加工

レーザー光、電子、イオンなど、エネルギーをもった径の細いビームを被加工材に照射する事によって、材料を部分的に熔融飛散、蒸発・分解させることができる。ビームを走査する、あるいは被加工物を動かすなどして、照射位置を変えれば、自由な形状の加工ができる。

レーザー光としては、炭酸ガス、YAGなどのように熱エネルギーで材料を熔融飛散、蒸発させるものと、エキシマレーザーのように短波長の光源で材料の分子の結合を直接的に破壊して分解、蒸発させてしまうものがある。一般にレーザービーム加工は、金属、プラスチック、セラミック素材など各種材料の穴あけ加工に適用されている。

電子ビーム、イオンビームは、いずれも電荷を持った粒子だから、電場によって加速され、それによって高いエネルギーをもって被加工材料に衝突する。電子ビームは主に熱的な作用によって、また、イオンビームは主に物理的な衝撃によって材料を除去する。電子ビーム加工では、材料を熔融、蒸発させるので、熱的なレーザー加工と同様に、熔融した飛沫が被加工物の表面に再付着することもある。イオンビーム加工は、被加工材料に熱的なダメージを与えないから、電子顕微鏡による断面観察資料の作成にも適用されるほどである。

一方、電子やイオンのように電荷を持った粒子は、絶

縁体の表面に照射されると表面を帯電させてしまい、あとからやってくるイオンの速度を減速し加工効率を落としてしまう。これを避けるため、加速したイオンビームに電子ビームをあてて電荷を持たないアトムビームとして加工することも行われる。アルゴンのアトムビームで微細加工を行う装置が開発されている。

以上に述べた加工技術の加工原理、長所・短所を比較して、表1にまとめた。

表1 各種精密機械加工技術の加工原理とその長所・短所

	加工の原理	長所	短所
切削加工	切り刃による被加工物の物理的な分離。	3次元の形状創成が可能。	切削痕が残る。小直径の穴加工は難しい。
研削加工	細かい砥粒を固めた砥石による被加工物の物理的な分離。	加工表面は比較的平滑。	砥石の微細化は難しい。小直径の穴加工はできない。
研磨加工	浮遊する砥粒による被加工物の物理的な分離。	表面の平滑化に最も適する。	主に平面の加工。被加工物の形状制御が難しい。
放電加工	放電による被加工物の熔融飛散。	硬い材料も加工できる。	表面が粗面化する。加工能率が低い。
ビーム加工	ビーム照射による被加工物の熔融飛散、蒸発・分解蒸発。	硬い材料も加工できる。	飛散した溶融物が再付着する。

4. 機械加工の応用分野を考える

機械加工は、NC化を図ることによって、複雑な3次元曲面を形成することが出来る。この点で、加工の自由度はリソグラフィ応用加工に比べて遙かに優れる。しかし、その適用はあくまでも少量生産に限られるので、そのインパクトは限られた応用分野、例えば、内視鏡やカテーテルなどの高機能化、実験機器の製作などに役立つものと考えられる。これとは対照的に、リソグラフィ応用加工では、製作する多数の微小な機械要素をシリコンチップ上に正確な位置に配列させることができること、また、製作できる機械要素の数が、1個のシリコンチップ上でも百万個にも及ぶことなど、生産性と工業的な波及効果の観点からは格段に優れている。情報通信分野、民生品分野ではこのような加工の特性が十分に生かされる。このように、機械加工とリソグラフィ応用加工の特徴の違いは、それぞれの応用分野の違いとなって現れる。他方、機械加工とリソグラフィ応用加工の複合にも注目すべきだろう。シリコン基板表面の研磨加工技術、リソグラフィ応用加工による放電加工電極の一括大量形成などは、その好例である。

微細な形状を転写する……型取り加工技術

名古屋大学 工学研究科 教授 佐藤 一雄

連載の最終回となる今回は、これまで解説してきた方法で加工した微細形状を、他の材料に転写する技術について述べる。この技術は、(1) 微細部品の量産加工を可能にする、(2) シリコンだけでなく様々な材料に対して微細加工を適用することを可能にする、という二つの大きな効果があり、マイクロマシン技術を幅広く産業に応用展開していく上で重要な技術である。

1. エッチング形状を転写する

シリコン単結晶基板をエッチングし、その表面形状を型どりすることで、基板とは異なった材質の3次元構造体を製作することができる。その一例として、シリコン酸化膜、窒化膜等の薄膜で、非平面的な構造体を作ることができる。図1は厚さが $1.2\mu\text{m}$ のシリコン酸化膜で作ったAFMのプロープである。

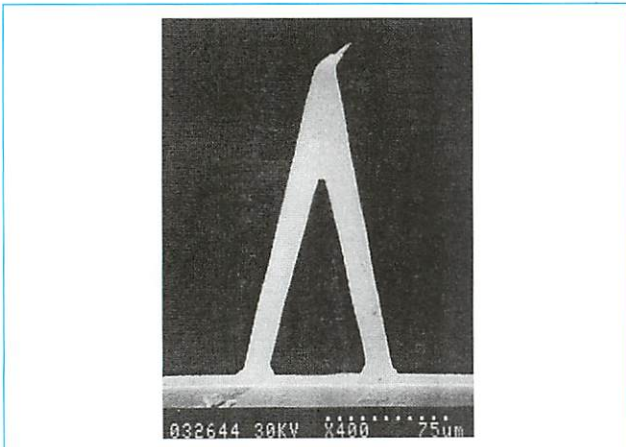


図1 シリコン酸化膜で作った先端の屈曲したAFMのプロープ（厚さ $1.2\mu\text{m}$ ）

先端の屈曲した構造を得るために、あらかじめシリコン基板表面に屈曲断面に相当する段差を形成し、その全表面を酸化したのち、プロープの輪郭を残して、周囲の酸化膜、シリコン基板をエッチング除去する。

また、エッチングで深穴を加工したシリコン単結晶基板表面の形を多結晶シリコン酸化膜に転写することも行われる。本連載の第2回で、薄膜で高剛性構造を作る技術として、T字型断面を持つ薄膜構造の製作例を紹介した。このほかに、ハニカム状の薄膜構造などが製作されている。加工プロセスの断面図を図2に示した。シリコン単結晶基板に反応性イオンエッチング（RIE：連載第1回を参照）で深さ/

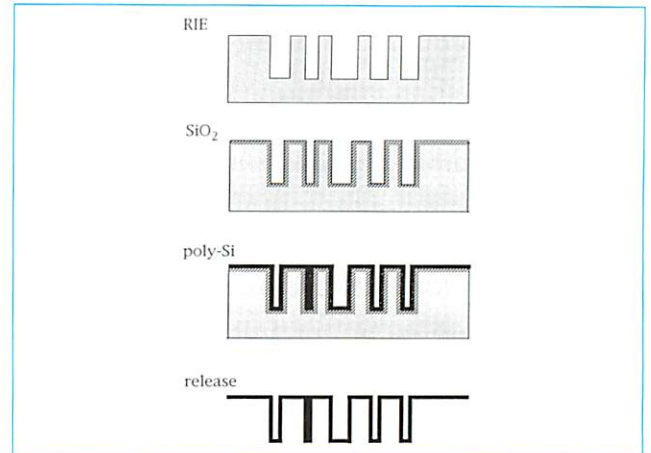


図2 多結晶シリコン薄膜によるハニカム構造の加工プロセス断面図

開口の比（アスペクト比）の大きい加工を行った後、犠牲層としてのシリコン酸化膜、構造材料としての多結晶シリコン薄膜を順次、穴の内面を含む基板表面全面に積層し、最後に犠牲層を選択的にエッチング除去することで、薄膜の構造体が分離される。厚さが $1\sim 2\mu\text{m}$ の薄膜で、厚さが100ミクロンに及ぶハニカム構造が形成される。

最近、マイクロマシンの応用分野として期待されているバイオケミカル分野では、使い捨て型の微小流体機器が必要とされる。このような目的で、シリコン基板にエッチングで形成した微細な流路の形状をスチロール樹脂などに転写して大量に複製することが行われる。微細形状を転写する技術、すなわち、レプリカをとるという技術自体は新しいものではなく、例えば $0.1\mu\text{m}$ のピッチ間隔で機械刻線した回折格子の微細な凹凸を樹脂に転写するという技術がすでに分光機器の分野で確立されている。

2. レジストを現像した形状を転写する

厚いフォトリソ層に微細なパターンを露光・現像して微細な空洞を形成し、その内部に金属をめっきで析出させて、微細金属部品を作る技術がある。

2.1 LIGAプロセス

1986年にドイツのカーlsruエ原子核研究所で開発されたプロセスである。

- (1) リソグラフィによる空洞の形成（ドイツ語で Lithografie）
- (2) 電気めっきを使った金属による空洞の型どり

(同じく Galvanoformung)

(3) 射出成形を使った樹脂による金属型の形状転写
(同じく Abformung)

の一連のプロセスの頭文字をとってLIGAプロセスと呼ばれる。 (1) (2) までのプロセスの加工断面図を図3に示した。このプロセスでは露光システムに、

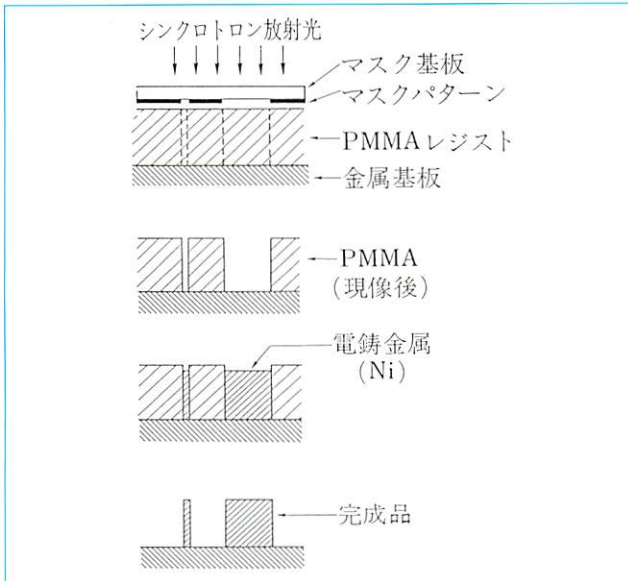


図3 LIGAプロセスによる微細金属部分の加工断面図

通常の紫外線ではなくシンクロトロン放射光 (SOR) を使うことに特徴がある。これによって、厚さがミリメートルに達するPMMA系のフォトリソに2次元のマスクパターンを深く正確に露光することができる。これを現像すると深さと開口の比が100を越える空洞が形成できる。この空洞の内部に電気めっきして形状を転写することにより、図4に示すような金属構造体が加工できる。この段階の構造物をそのまま実用に供することもできるが、これを金型としてプラスチックの射出成形を行う (図5)、さらにそれに電気めっきして形状を転写する、あるいはセラ

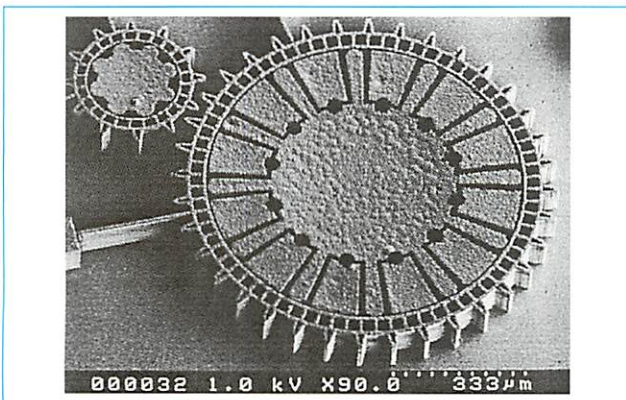


図4 LIGAプロセスによるニッケル製マイクロモータの加工例 (立命館大学杉山進教授のご好意による)

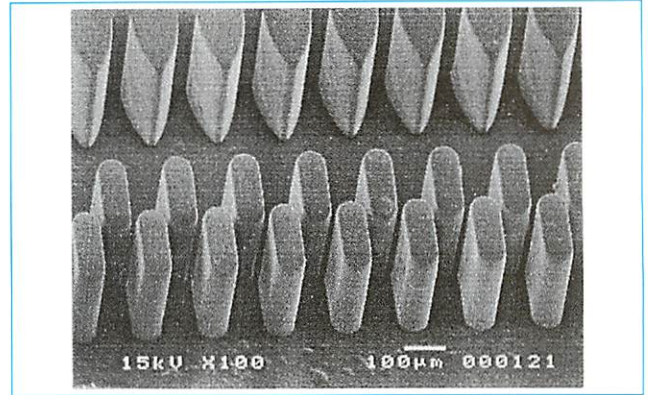


図5 LIGAプロセスによる樹脂成形加工例 (ブラザー工業株による)

ミックスの成形 (ゾル・ゲル法による) に利用するなど、さまざまな材料系に展開することができる。

深さ/開口比 (アスペクト比) に優れた高精度な加工能力から、立体的なグレーティング (回折格子) や光導波路などの光通信分野、微細流路をもつ化学分析システムへの応用などが図られている。

LIGAプロセスの課題として、放射光施設を使わなければ物ができないという制約が挙げられる。勿論、はじめの金型は放射光設備によらなければならないが、ひとたびマスターの型ができてしまえば、それ以後のプロセスは比較的少量に耐えるものと考えられる。日本では、放射光施設を使ったLIGAプロセスを、立命館大につづき姫路工大のグループが立ち上げている。

2.2 高アスペクト比紫外線レジスト

LIGAプロセスほどの加工精度は得られないが、通常の紫外線露光でも、高アスペクト比の露光・現像が可能なレジストが開発されている。例えば、IBMが開発したSU-8というレジストは、厚さ数百 μm におよぶレジスト層を紫外線で感光させることができる。露光・現像後の空洞の形状をめっきによって転写するプロセスはLIGAプロセスと全く同じである。

レジスト樹脂を除去するさいに酸素プラズマでもなかなか分解しないという欠点はあるが、手軽に紫外線露光ができる点が長所である。また、樹脂の透明性が高いことから、転写技術とは無関係に、そのまま光学部品材料として使える可能性がある。

まとめ

微細形状の転写技術によって、薄膜を使った立体構造の加工が可能になり、さらに、金属、樹脂、セラミクスなどで微細形状を作ることができるようになった。このような材料の多様性は、マイクロマシン技術に幅広い応用分野を与えることが期待される。