

マイクロ超音波加工法の開発

Development of Micro Ultrasonic Machining

藤野正俊*・増沢隆久*・江頭 快
Masatoshi FUJINO, Takahisa MASUZAWA and Kai EGASHIRA

1. はじめに

従来困難とされてきた超音波加工による微細形状加工は、微細工具の製作および工具取り付けなどによる精度低下が問題となる。特に工具を取り付けるさいに超音波振動が工具に加わるため機械的な保持では工具を固定することが困難であり、通常ロウ付けやハンダ付けが利用される。しかし、微細工具ではこの取り付けでほんの僅かでも工具が傾くと工具損傷にいたるため、 $\phi 0.1$ mm 程度が限度とされてきた。そこで、超音波加工機に本研究室で開発したワイヤ放電研削法 (WEDG) を装備することにより、工具の取り付けによる精度低下および微細工具の製作に関しては解決するものと予想される。これは同一機上で微細工具の製作が自動化され、それを加工機から取りはずすことなくそのまま連続してマイクロ超音波加工が行えるため、精度低下の要因がなくなり微細工具の工具取り付けの困難さという問題を解決できることになる。

2. 加工機の構成

本装置の構成を図1に示す。

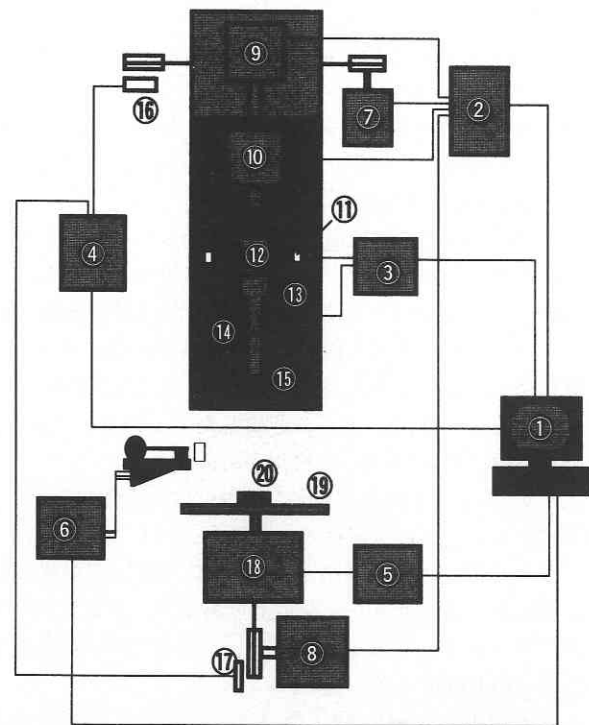
加工装置はX, Y, Z方向の三軸に加え、回転のC軸があり、合わせて4軸を持つ。ステージの構成は工具がX, Z方向に動き、工作物がY方向に動く。

X, Y, Z軸はステッピングモーターとボールねじを用いて制御されており、1パルスが $0.05 \mu\text{m}$ の送りに対応している。また、ボールネジのバックラッシュ等の影響を除くため、 $0.1 \mu\text{m}$ のリニアスケールによりフィードバック制御している。Z軸はオープンループである。また、C軸はDCサーボモータを使用し、0-3000 rpmの範囲で回転数が設定できる。また、 0.09 度単位で回転角度の割り出しが可能である。

超音波加工に用いる発振器の出力周波数は40 kHzを使

*東京大学生産技術研究所 第2部

用した。これは通常、超音波加工で使われる20 kHz前後の周波数に比べてかなり高い。高い周波数を用いることの利点は、コーンやホーンは長さが伝達する超音波の波長に比例するので、それらの長さを短くとことができ、結果的に装置全体のサイズを小さくできる事である。高精度なマイクロ加工においては、加工装置の温度や振動等による変形誤差を小さくするために、加工装置のサイズを小さく



①パーソナルコンピュータ ②モータコントローラボード ③超音波発振器
④XY軸測定位置表示カウンタ ⑤重量コンパレータ ⑥WEDG用電源
⑦X軸モータ ⑧Y軸モータ ⑨Z軸モータ ⑩C軸モータ ⑪スリップリング
⑫超音波振動子 ⑬コーン ⑭ホーン ⑮工具 ⑯X軸ガラススケール
⑰Y軸ガラススケール ⑱電子天秤 ⑲ステージ ⑳工作物 □ WEDG用ワイヤ

図1 装置の構成

研 究 速 報

することは重要である。また、この超音波発振器は、超音波振動子の共振周波数変化に対応する、振動子インピーダンス変化を検出する周波数自動追尾方式であるため、インピーダンスの変化に対して、ある閾値の範囲においては周波数をそれに追従させることができる。

超音波振動子のタイプは piezo素子を組み込んだランジュバン型振動子で、それにコーンが接続されている。本加工装置のコーンはステップ型コーンであるが、その振動振幅拡大比は小さく、ほとんど振幅を拡大しない。

通常超音波加工では、コーンまでの振動振幅では加工に十分でないので、コーンに接続されるホーンにおいてさらに振幅拡大を行う。しかし、実際に加工を行ったところ、マイクロ超音波加工ではコーンの振動振幅で十分に加工が行えるので、ホーンでの振幅拡大の必要がなかった。したがって、ホーンは超音波の半波長の長さの単純な円筒径であり振幅拡大比は1である。

超音波加工用工具は、WEDGで製作するため、工具素材（本研究では $\phi 0.6\text{ mm}$ を使用）をホーン先端の穴に差し込み、はんだ付けによって固定する。また、超硬合金などのはんだが付きにくい工具材料の場合は、接着剤により固定した。

図2 (a) に工具振動振幅の測定結果を示す。測定方法は図2 (b) に示すように、垂直方向に工具を送り、工具と金属板の接触位置を電気的に検出するという方式である。工具を加振しているときとしていないときの接触点のZ軸位置の差から工具振動振幅を求めた。

加工荷重の検出方法は通常油圧機構やレバーを介した天秤機構などで行われるが、これらの方式は高精度な荷重検出が難しいのでマイクロ超音波加工では使用が困難である。したがって、本加工機では電子天秤 EB-3200 H-A（島津製作所）を用い、これをY軸ステージ（工作物側）上に搭載して荷重検出を行うことにした。この電子天秤は、最小10 mgf（約0.1 mN）の検出が可能である。

電子天秤による測定荷重値は、RS 232 C回路を通して重量コンパレータに送られる。重量コンパレータは、ユーザによって設定された加工荷重レンジと測定値を比較して、測定値が設定荷重レンジ以上であるか、レンジ内であるか、レンジ以下であるかを判断し、それぞれの理論値をパソコンのI/Oボードへ送る。

工具製作用のWEDG加工用ユニットは加工電極である走行ワイヤが直径100 μm の黄銅で、加工条件は、コンデンサ容量が0～200000 pF、加工電圧は80から120 Vで工具寸法および仕上げ面あらさにより決定する。

本加工装置は、加工荷重検出が、Y軸ステージ上に置かれた電子天秤を用いて行う方式であるため、一般の超音波

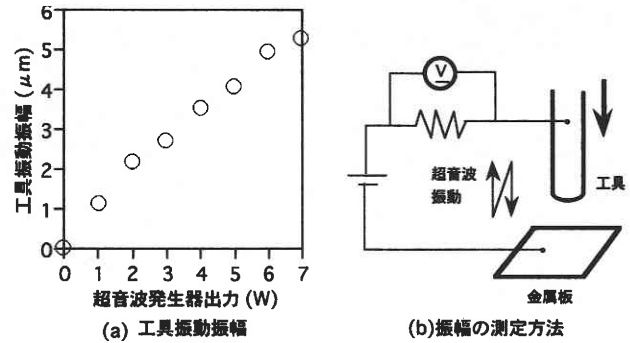


図2 工具振動幅と測定法

加工機のように砥粒循環装置が備わっていない。

マイクロ超音波加工においては、加工荷重も非常に微小になる。したがって電子天秤を用いて加工荷重の検出を行うが、これは天秤に置かれたステージ上で砥粒循環を行うとその水流による荷重変化が加工に直接影響を与えるため、本加工法では砥粒循環をすることなくスラリーを加工部に溜める方法をとって加工を行うことにした。

3. 実 験 結 果

図3に加工荷重と加工速度、工具磨耗率の関係を示す。加工条件は、各図のパラメータ値を除き、表1に示す。また加工速度は加工時間あたりの加工深さで、工具磨耗率は加工深さに対する工具の消耗長さを表わす。図から加工荷重が大きくなると加工速度、工具磨耗率が上昇することがわかる。しかし、加工荷重が3 mNをこえたあたりで飽和する傾向にある。図4は工具振動と加工速度、工具磨耗率の関係を示したもので、加工速度は工具振動が1 μm を越えたあたりから緩やかな上昇になる。また、工具磨耗率は工具振動が2 μm を越えると減少する傾向を示した。図5はスラリーの砥粒濃度と加工速度、工具磨耗率の変化を示したもので砥粒濃度が20%あたりから急に加工速度が上昇しその後は濃度が高くなっても加工速度に大きな変化は見られない。工具磨耗率は測定値のばらつきが大きい、濃度が高くなるにつれ上昇していくことがわかる。

図6は工具を回転させた場合の加工速度と工具磨耗率を示したもので、工具を回転させると加工速度は上昇するが50 rpm以上にしても加工速度の変化はほとんどない、また、工具磨耗率は回転させない場合とほとんど変化はみられなかった。これは、工具に回転を与えると工具磨耗率を増やさずに加工速度をあげることができる。

図7は加工穴径と加工速度、工具摩擦の関係で加工穴径が大きくなると、工具摩擦が小さくなることがわかる。加工速度は、単位時間当たりの送り量は小さいが、体積換算すると穴径が大きい方が加工速度が上昇している。

工作物	シリコン
加工穴径	20-40 μm
工具材料	超硬合金
工具回転数	200 rpm
加工荷重	1-2 mN
振動振幅	0.8 μm
砥粒材質	WC
砥粒径	0.58 μm
砥粒濃度	15 wt%

表1 加工条件

図8は穴加工の加工進行状況を示したもので、直径40 μmの穴加工をした場合のものである。図9はこれを50 μm毎の加工速度と工具磨耗率にしたもので、加工速度は送り量が100 μmを越えたあたりから低下していくことがわかる。また、工具磨耗率は送り量が150 μmを越えたあたりから急激に上昇している。

以下の結果をまとめると、図10のようになる。

図11は、厚さ200 μmのシリコンに貫通穴加工した例を示す。入り口側はチッピングも少なく加工されているが、出口側に割れを生じている。入り口側の径は43 μmで出口側の径は27 μmである。この結果から、加工した穴は、出口側の直径の大きさが入り口側の約50%となっているテーパ穴であることがわかる。この貫通穴のような深穴の加工においては、工具が半径方向にもかなり摩擦し、先端が細くなり工具にもテーパが生じるからである。

テーパを防ぐには

(a) 工具に生じるテーパを小さくするために、摩耗しにくい工具材料を用いて工具を製作する

(b) 貫通後しばらく工具を送り続ける

穴の出口側での割れを防ぐには

(c) 振動振幅、加工荷重を小さくして加工速度を落とし、工具送り速度を小さくする

(d) より微粒の砥粒を使用する

以上の対策を講じることで加工精度の向上をはかることができる。

次に、穴の入り口側のエッジのチッピングの状態について調べた。図12は、粒径0.58 μmのWC砥粒と粒径5 μmのTiC砥粒を用い、工具を回転させて加工を行った場合と回転させずに加工を行った場合との、加工穴のチッピングの違いを示している。工作物は石英ガラスである。

図の(a)と(c)、また(b)と(d)を比較することにより、小さい粒径の砥粒で加工を行えばチッピングの発生を抑えられることがわかる。小さい砥粒を用いると、加工

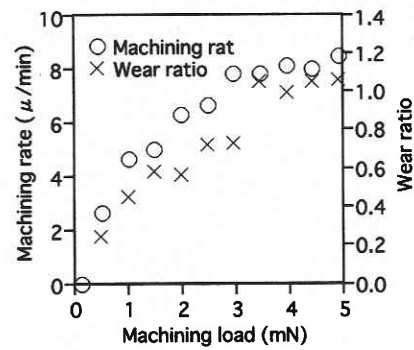


図3 加工荷重と加工速度、工具磨耗

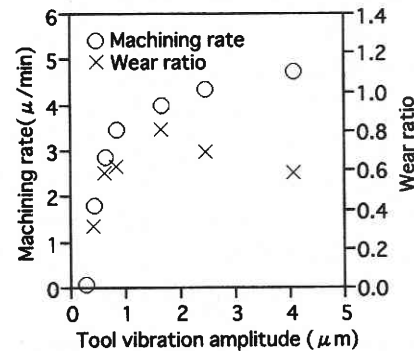


図4 工具振幅と加工速度、工具磨耗

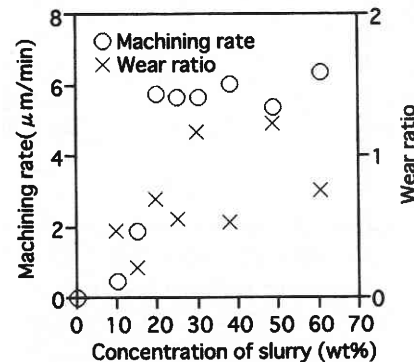


図5 砥粒濃度と加工速度、工具磨耗

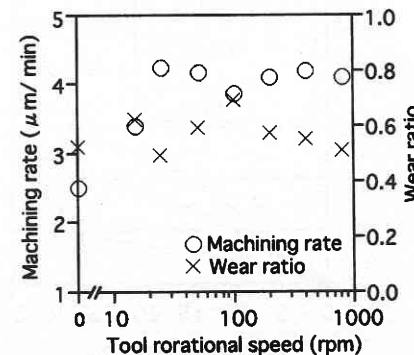


図6 工具回転と加工速度、工具磨耗

研 究 速 報

単位が小さくなるので、チッピングも少なくなる。

また、図の (a) と (b)、また (c) と (d) を比較してもわかるように、工具を回転させることによってチッピングの発生を少なくすることができる。工具の回転により砥粒が垂直方向だけでなく水平方向へも力を受けるので、研磨作用が働いてエッジをなめらかにするものと考えられる。従って、加工穴のエッジのチッピングを抑制するには、粒径の小さい砥粒を用い、工具を回転させればよいことがわかる。

図 13 は、シリコンに加工した内径 20 μm の微細穴である。汎用の超音波加工機による加工例では、今までに報告されている中で最小径の微細穴である。

図 14 は、石英ガラスに加工した内径 32 μm の微細穴を示す。深さは 120 μm であり、加工穴の直径に対する深さの比であるアスペクト比は 4 を達成できた。図 15 は、アルミナセラムックスに加工した内径 30 μm の微細穴の加工例である。これらの代表的な硬脆材料への加工例から、従来困難であった硬脆材料への直径数十 μm の穴加工の実用化が可能であることがわかった。また、WEDG による異形工具を製作し、工具を回転させずに加工すれば異形穴

加工も可能なことがわかった。また、図 16 に示すように、工具に水平方向 (X, Y 平面) の送りを加えて加工を行うことにより、溝などの加工が可能である。

加工方法は、溝の一端からもう一端まで工具が X, Y 平面内を移動する間、工具 (Z 軸) の送り設定量が常に X, Y 平面で同じになるよう X, Y, Z 軸を制御する。つまり、加工荷重が設定荷重レンジより大きければ X, Y 平面の移動を停止し、工具を Z 方向に引き上げ、小さければ Z 方向に設定量まで送り込む。送り込み量が設定値に達したら Z 軸はその位置を保ち、X, Y 平面を移動しながら加工を続ける。これをくり返すことによって加工が進行するわけである。Z 方向の一回の送り量は 0.05 μm 単位で最大 1 μm まで設定できる。これは工具の振動振幅より小さい値であるため、工具には横方向の力が加わらず加工ができる。

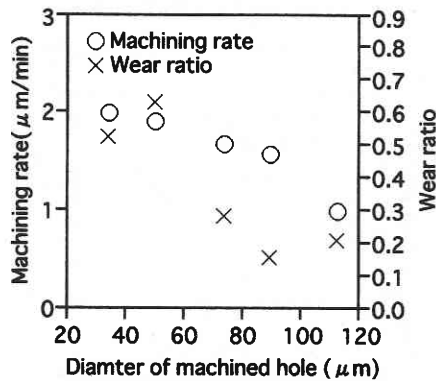


図 7 加工穴径と加工速度, 工具摩耗

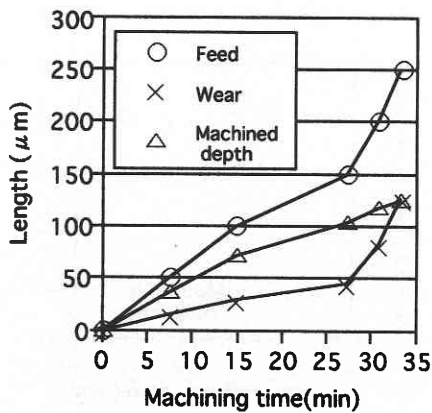


図 8 穴加工の進行状態

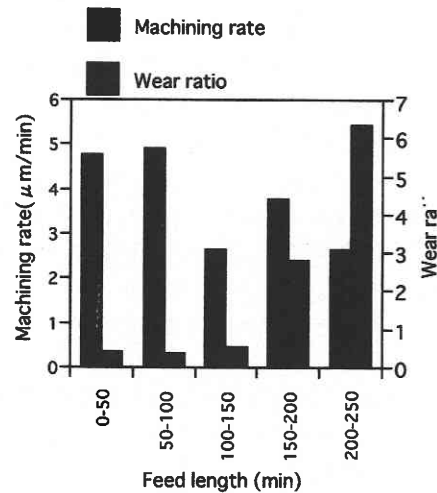


図 9 工具送り量 50 μm 毎の加工速度, 工具摩耗

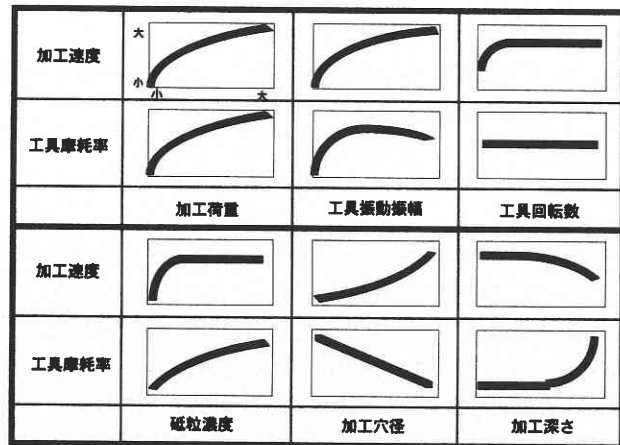


図 10 各加工パラメータの値が変化したときの加工速度, 工具摩耗の変化の傾向の一覧

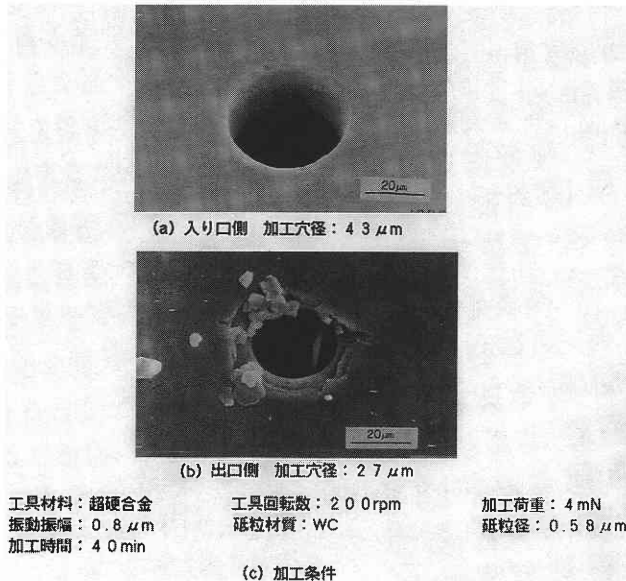


図 11 厚さ 200 μm のシリコンへの貫通の穴加工

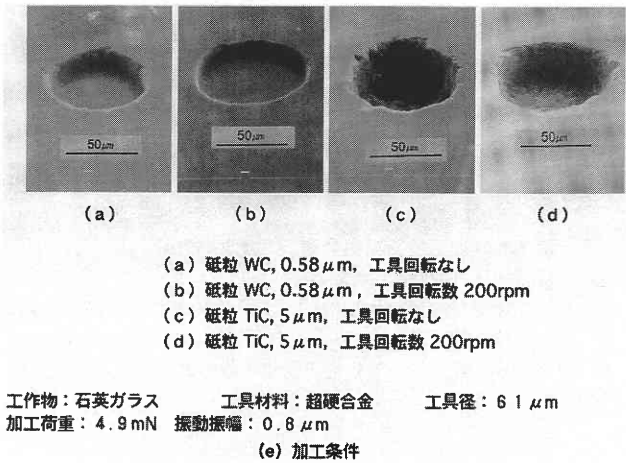
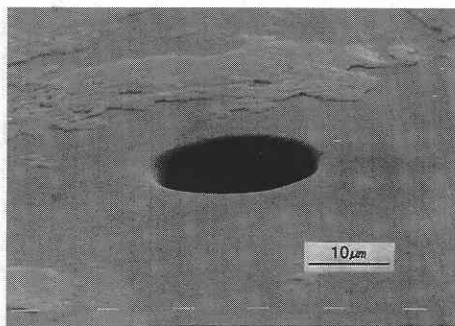
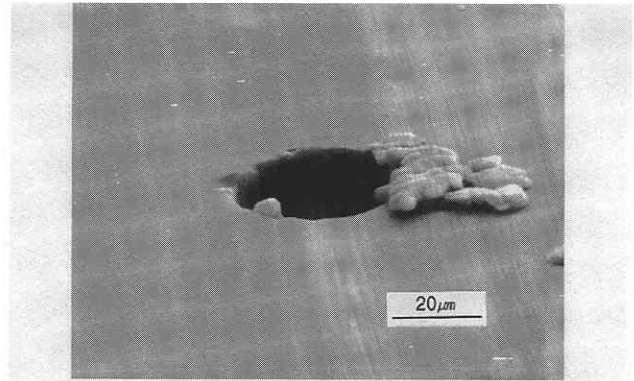


図 12 加工穴のチップング



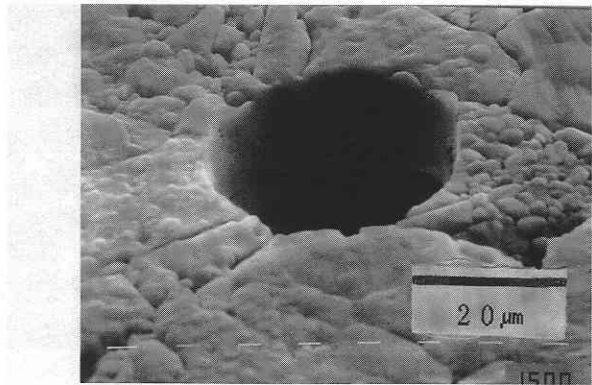
深さ: 50 μm 工具材料: 超硬合金 工具回転数: 200rpm
 加工荷重: 0.49 mN 振動振幅: 0.8 μm
 砥粒材質: WC 砥粒径: 0.58 μm 加工時間: 12 min

図 13 シリコンに加工した内径 20 μm の微細穴



深さ: 120 μm 工具材料: 超硬合金 工具回転数: 200rpm
 加工荷重: 0.49 mN 振動振幅: 0.8 μm
 砥粒材質: WC 砥粒径: 0.58 μm 加工時間: 30 min

図 14 石英ガラスに加工した内径 32 μm の微細穴



深さ: 110 μm 工具材料: 超硬合金 工具回転数: 100rpm
 加工荷重: 1.5 mN 砥粒材質: ダイヤモンド
 砥粒径: 0.2 μm 加工時間: 30 min

図 15 アルミナセラミックに加工した内径 30 μm の微細穴

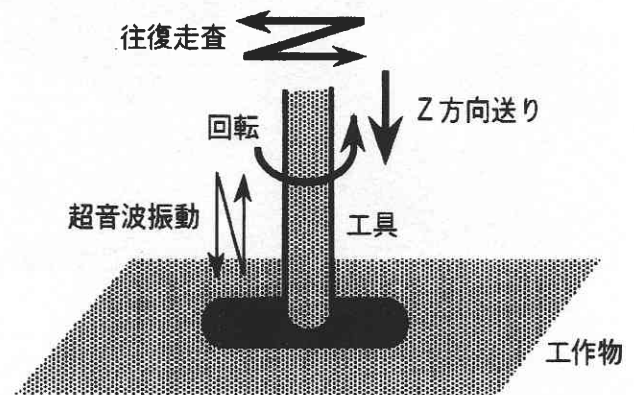


図 16 溝の加工法

研 究 速 報

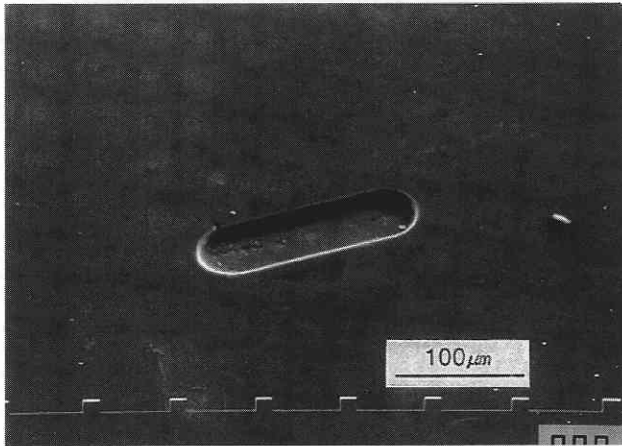


図 17 シリコンに加工した幅 $50\mu\text{m}$ 、長さ $250\mu\text{m}$ 、深さ $30\mu\text{m}$ の溝

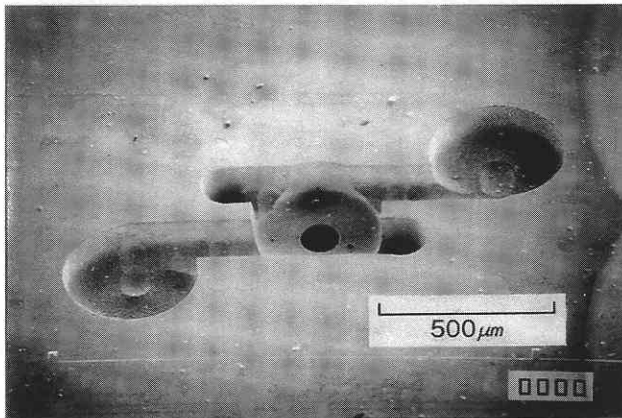


図 18 シリコンに加工したマイクロタービンのチャンバー

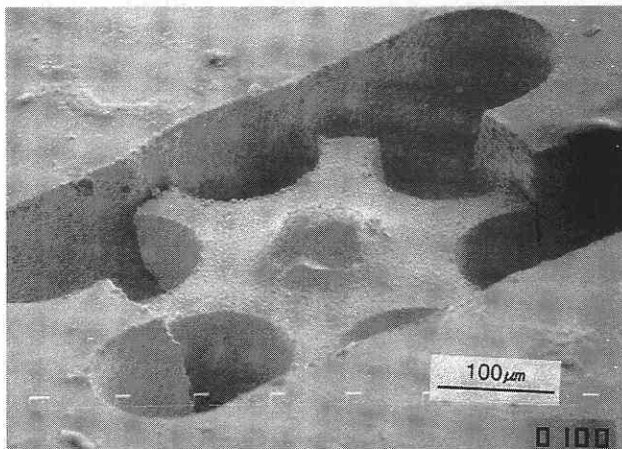


図 19 チャンバーにロータを取めたところ

図 17 にシリコンに加工した幅 $50\mu\text{m}$ 、長さ $250\mu\text{m}$ 、深さ $30\mu\text{m}$ の溝の例を示す。また、穴加工と溝加工を組み合わせ、より複雑な形状の加工も可能である。

図 18 に、シリコンに加工したマイクロタービンのチャンバーを示す。中心の穴の直径は $80\mu\text{m}$ であり、ここにタービンのロータが収まる。また、脇に二つの穴があいているが、これはエアーの入り口と出口である。その間のエアーの通り道は、幅 $100\mu\text{m}$ 、深さ $200\mu\text{m}$ の溝である。

図 19 は、図 18 と同タイプのチャンバーにロータを取めたところを示す。実際に窒息ガスを通したところ、ロータが回転するのが確認された。

4. ま と め

超音波加工のマイクロ加工を実現するため同一機上で工具製作から加工まで行える加工機を開発し、従来より一桁オーダーの少ないマイクロ加工が可能であることを示した。また、マイクロ三次元形状加工が可能であることも確認することができた。しかし、本装置の微細限界は $20\mu\text{m}$ までで、これは装置の C 軸の芯振れ精度が $2.5\mu\text{m}$ と大きかったためである。現在これをさらに小さくした装置により、直径 $5\mu\text{m}$ の加工が可能となった。

(1999 年 6 月 28 日受理)

参 考 文 献

- 1) マイクロ加工技術編集会編、マイクロ加工技術、日刊工業新聞社、(1977)。
- 2) 楡井耕次、超音波加工機によるセラミックスの加工、機械と工具、32, 5, (1988) 49-56。
- 3) 増沢、藤野、ワイヤ放電研削による細軸の加工とその応用、生産研究、37, 11 (1985) 29-34。