

超音波加工のマイクロマシニングへの応用

Application of Ultrasonic Machining to Micromachining

江 頭 快*・増 沢 隆 久*

Kai EGASHIRA and Takahisa MASUZAWA

超音波加工は、硬脆材料に対して機械的な加工が行え、かつ材料の導電性を選ばない有用な加工法であるが、今までマイクロマシニングへは応用されていなかった。本報では、その応用を妨げている問題点を考察し、それを解決することにより考案された新しい超音波加工法について述べるとともに、その加工法の加工特性や実験結果を紹介する。

1. は じ め に

現在の工業界のトレンドの一つは、マイクロマシンに代表されるように、製品の小型化・微細化である。マイクロマシンを構成する部品も小型で微細な構造をもつものであり、それらを製作するのがマイクロマシニングである。マイクロマシンに限らず、プリンタノズル、紡糸ノズル、流体計測部品、マイクロレンズや絞りなどの光学部品等々、種々の材料への微細穴、キャビティの加工が必要となっている。

それらの材料の中には、ガラスや電子部品材料、セラミックスといった重要なものが含まれるが、これらを微細な三次元的な形状に加工するのは困難である。これらの材料は硬くて脆いために大きな加工力の加わる機械的な加工法では材料の破損を生じやすく、また導電性が低いために放電加工のような電氣的な加工法を用いることができない。シリコンプロセスを用いれば加工が可能だが、高アスペクト比が得られない、特別な装置や環境が必要である、といった問題点がある。

一方、超音波加工は、機械加工でありながら硬脆材料に対して三次元形状の加工が可能な数少ない加工法の一つであり、材料の導電性も問わない。しかし、微細な工具の加工機への適切な取り付けが困難であるために、マイクロマシニングへの応用には限界があった。例えば、現在でも実際の加工現場では直径 100 μm 以下の微細穴の加工は困難なものとして扱われている。

本報では、この超音波加工のマイクロマシニングへの

応用を妨げている要因を分析し、それを解決するマイクロ超音波加工を提案し、その手法に基づく実験結果を紹介する。

2. 超音波加工の原理とマイクロマシニングへの応用を妨げる要因

図 1 に超音波加工の原理図を示す。超音波加工とは、超音波振動を付加された工具と、遊離砥粒とを用いる加工法である。工具はホーンによって保持され、コーンとホーンとを介して超音波振動子で発生した振動が伝達される。また、加工に十分な加工振幅を持つ振動を与えるために、コーンやホーンは振動振幅を拡大する役目を持つ。

加工のプロセスを述べると、まず工作物上に砥粒と水との混合物であるスラリーをまいておき、次に適当な荷重を与えて工具を工作物表面に押し付ける。すると、工具がスラリー中の砥粒を工作物に直接打ち込む形になり、そこにはマイクロクラックが発生する。このマイクロクラックが工作物の除去につながることになる。砥粒の大きさが微小なために、一度で除去される量はわずかであるが、超音波振動によりこのサイクルが一秒間に何万回も繰り返されるので、結果的に十分な加工量が得られる。また、砥粒による加工点においては大きな圧力がかかるが、工作物全体にかかる荷重は大きくないため、硬脆材料でも破損することなく加工が行える。

工作物には工具形状や工具軌跡が転写されるので、微細な形状を加工したい場合には、それに見合った寸法をもつマイクロ工具が必要である。例えば、微細穴の加工

*東京大学生産技術研究所 第2部

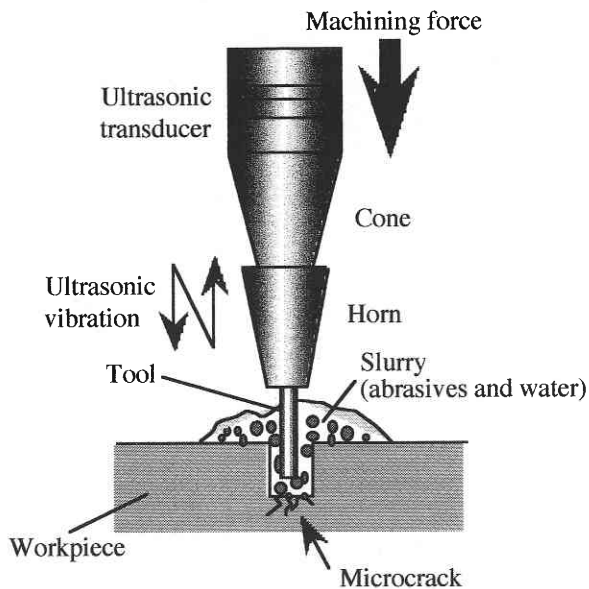


図1 超音波加工の原理図

を行う場合には、その穴の内径より小さい直径をもつ細い円筒工具を用いなければならない。マイクロ工具そのものの製作は放電加工などによって可能であるが、その加工機への適切な取り付けが難しい。例えば精密なチャックなどを用いて工具を保持することができれば良いが、この方法では加工中に超音波振動によって保持がゆるむおそれがある。また、超音波振動は振動伝送体の共振を利用して工具に伝えられるわけだが、チャックの共振周波数を振動子が発生する振動数にうまくマッチングさせるのは困難である。したがって、超音波加工においては、通常工具ははんだ付けやろう付けによってホーンに取り付けられる。しかし、はんだ付けのような方法では、微細な寸法を持つマイクロ工具を偏心や傾きがないように精度良く加工機に取り付けるのは難しい。これが超音波加工のマイクロマシニングへの応用を妨げている大きな要因である。

3. 加工機上マイクロ工具製作によるマイクロ超音波加工法 [1] [2]

3.1 加工機の構成と加工プロセス

上述のように、超音波加工においては、マイクロ工具の加工機への適切な取り付けが困難なために、マイクロマシニングへの応用がなされていない。そこで、次に述べるようなマイクロ超音波加工法を考案し、微細穴の加工を行うことにした。

マイクロ工具の加工機への取り付けが困難ならば、加工機上でマイクロ工具を製作してしまおうというのがこのマイクロ超音波加工法のコンセプトである。図2に、この手法に基づく加工装置の概略図を示す。ベースは従

来の超音波加工機であるが、工具が回転できる構造である点と、WEDG [3] [4] (ワイヤ放電研削) 用の加工ユニットが取り付けられている点とが特徴である。WEDGは放電加工の一種であり、走行するワイヤを加工電極として用い、細軸の加工に威力を発揮する。これを用いれば、直径4 μm の細軸の加工も可能である。また、マイクロ工具を用いた場合では加工荷重も微小になるので、荷重検出のために電子天秤がステージ下におかれている。その最小目盛は0.01 gfである。

図3に、加工のプロセスを示す。まず、ホーンにマイクロ工具のもととなる工具材料を取り付ける。工具材料は、直径0.5 mm程度の扱いやすい大きさで構わない。そして図3 (a) のように、工具回転機構により工具材料を超音波振動子・コーン・ホーンと一体となって回転させ、WEDGによりマイクロ工具に製作する。このマイクロ工具は、工具材料取り付けの段階における、工具材料の多少の偏心や傾きには関係なく、加工機の送り軸を中心とする円筒形に加工される。したがって、加工機上で、マイクロ工具がホーンに取り付けられたまま製作されることになる。そして、図3 (b) のように、その工具をそのまま用いて超音波加工を行えば、微細穴が加工される。

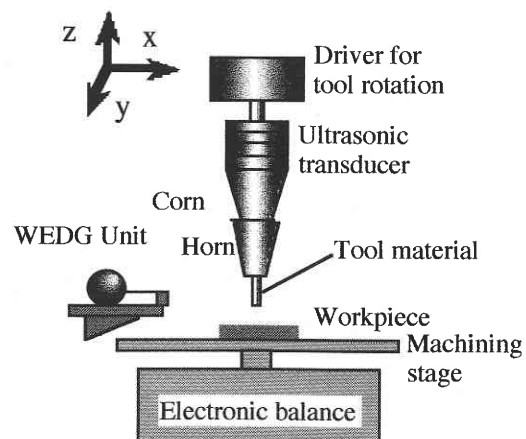


図2 加工機上マイクロ工具製作によるマイクロ超音波加工法の加工装置概略図

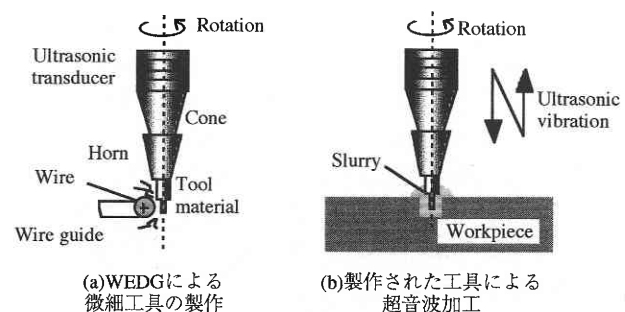


図3 加工プロセス

WEDG と超音波加工とで同じ工具送り機構を用いることになるので、マイクロ工具は加工送り軸に対して偏心や傾きがなく取り付けられていることになる。また、工具回転機構があるので、工具を回転させて超音波加工を行うことが可能である。これにより、加工された穴の真円度の向上や、加工排出の促進が期待できる。

3.2 加工特性

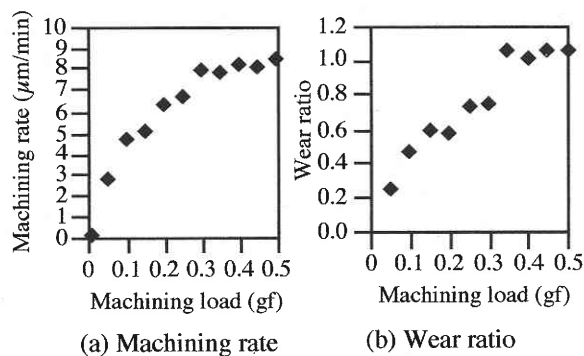
この手法を用いて実際に加工を行い、その加工特性を調べた。超音波振動の周波数は 40 kHz であり、砥粒は平均粒径約 $0.6 \mu\text{m}$ の WC (タングステンカーバイド) を用いた。

図 4 に、工具の振動振幅と加工速度・工具磨耗率との関係を示す。加工速度は、加工穴の深さを加工時間で割った値であり、工具磨耗率は加工深さに対する工具磨耗長さの比である。振動振幅が大きくなるにつれ、加工速度・工具磨耗率ともに増加していき、その増加の割合は徐々に小さくなっていくことがわかる。

図 5 に、加工荷重と加工速度・工具磨耗率との関係を示す。加工荷重を変化させたときも、工具振動振幅を変化させたときと同じような傾向を示した。

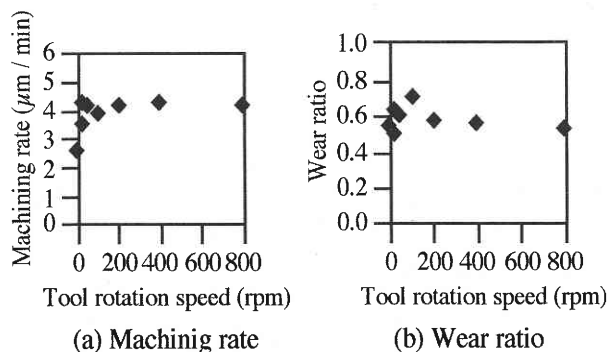
上述のように、本加工装置では工具を回転させて超音波加工を行うことができる。その影響を図 6 に示す。工具を回転させないときの数値も、0 rpm の場合として表示してある。たとえ 100 rpm 程度の低回転数でも、無回転時に比べて加工速度を 1.5 倍程度上げられることがわかる。しかしそれ以上回転数を上げても、特に効果は見られなかった。工具磨耗率には、回転の有無・回転数の影響ははっきり表れなかった。

次に、加工穴の内径と工具磨耗率との関係を図 7 に示す。内径の大きさは工具径にクリアランスを加えたものなので、工具径が小さくなると工具磨耗率が上昇するといえる。これは工具体積に対する工具表面積の割合が増



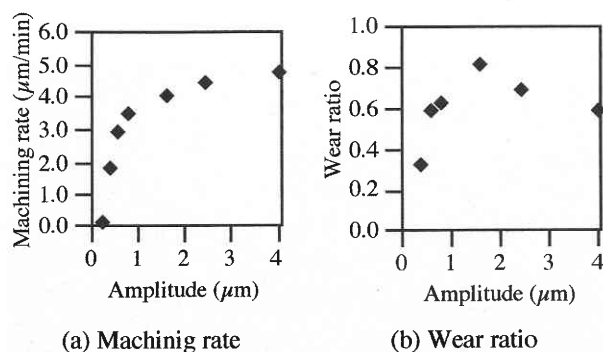
工作物：シリコン 加工穴径：約 $27 \mu\text{m}$
 砥粒：WC, $0.58 \mu\text{m}$ 工具材料：超硬合金
 工具振幅： $0.8 \mu\text{m}$ 工具回転数：100rpm

図 5 加工荷重と加工速度・工具磨耗率との関係



工作物：シリコン 砥粒：WC, $0.58 \mu\text{m}$
 加工荷重：0.10-0.20gf 工具材料：超硬合金
 工具径：26-31 μm 工具振幅： $0.8 \mu\text{m}$

図 6 工具回転数と加工速度・工具磨耗率の関係

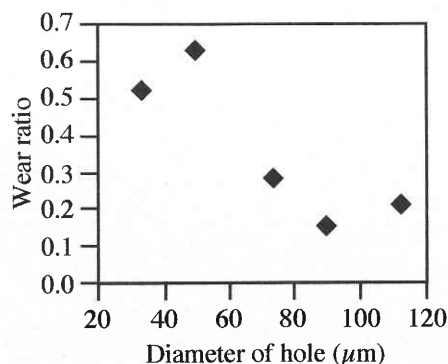


(a) Machinig rate

(b) Wear ratio

工作物：シリコン 砥粒：WC, $0.58 \mu\text{m}$
 加工荷重：0.10-0.20gf 工具材質：超硬合金
 工具径：25-30 μm 工具回転数：100rpm

図 4 工具の振動振幅と加工速度・工具磨耗率との関係



工作物：シリコン 加工荷重：180~350gf / mm^2
 工具材質：超硬合金 工具振幅： $0.8 \mu\text{m}$
 工具回転数：200rpm

図 7 加工穴の内径と工具磨耗率との関係

加するためであると思われるが、マイクロ超音波加工においてはこの点に留意しなければならない。

3.3 加工例

次に、本マイクロ超音波加工法によりシリコンに加工した微細穴などの例を示す。

図8は、直径 $20\mu\text{m}$ の微細穴の写真である。この加工例は、それが加工された時点では、超音波加工による微細穴として報告されているものの中で最小内径のものであった。図9は、三角穴の加工例である。これは、WEDGにより三角形の断面をもつマイクロ工具を製作し、それを回転させずに超音波加工を行うことにより加工された。また、工具軌跡をNC制御することにより、より複雑な形状の加工も可能である。図10のマイクロエアタービンのチャンバーは、その加工例である。

3.4 より微細な加工を行うには

上述のように、加工機上でマイクロ工具を WEDG により製作するという手法で、内径 $20\mu\text{m}$ までの微細穴の加工を行うことができた。しかし、まだ問題点が存在する。それは工具回転精度である。本手法では工具材料からマイクロ工具を WEDG によって製作するために工具回転機

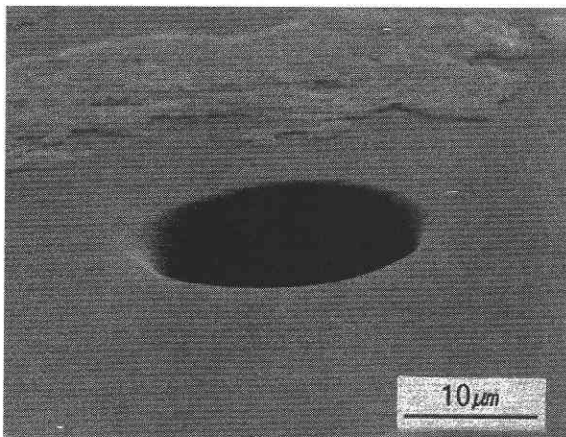


図8 シリコンに加工された直径 $20\mu\text{m}$ の微細穴

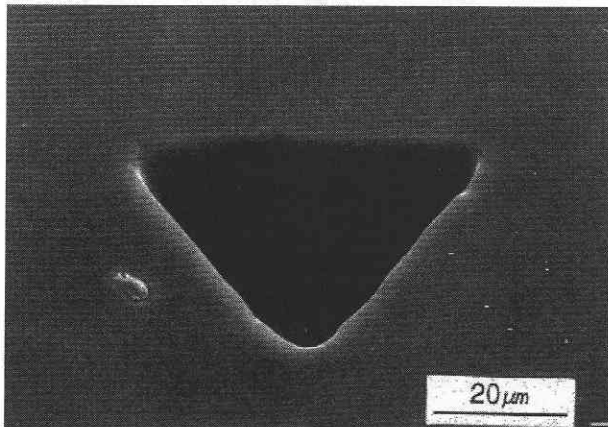


図9 シリコンに加工された三角穴

構があるわけだが、この構造では工具を回転させるためにそれに付随して超音波振動子・コーン・ホーンまでも全て同時に回転させなければならない。工具寸法は直径数十 μm というオーダーであるのに対して、回転部分は全体で直径数 cm 、長さ数十 cm に及ぶ大きさとなる。これでは工具部分において高精度な回転を得ることが難しく、製作されるマイクロ工具の径に限界がある。この理由により、内径 $20\mu\text{m}$ 以下の微細穴の加工は困難で、またその真円度も直径で約 $5\mu\text{m}$ と悪かった。したがって、より微細な穴をあけるようなマイクロマシニングに応用するには、この点を解決する手法を考えなければならない。それを次に紹介する。

4. 高精度工具回転機構と工作物側振動とによるマイクロ超音波加工法 [5]

4.1 加工機の構成と加工プロセス

上述のように、より微細な加工を行うためには、工具の回転精度を向上させる必要がある。また、それを妨げているものとして、ホーン・コーン・超音波振動子が工具に付随して回転するために高精度な工具回転が得られないことが考えられた。それならば、工具と工具保持部分と回転動力系だけで構成された工具回転系を用いれば、回転精度の向上が期待できるといえる。次に紹介するのは、このコンセプトに基づいた装置による新たなマイクロ超音波加工法である。

図11に、その装置構成の概略図を示す。工具回転形を構成するV形軸受とマンドレルは、マイクロ工具製作に用いる市販の超微細放電加工機に使用されているものと同じである。V形軸受は、精密にポリシングしたSiCセラミックスをV字上に配置したもので、マンドレルはセラミックキャピラリと一体で工具材料を保持し、DCモータによって回転駆動される。回転振れは $0.5\mu\text{m}$ 以下であり、マンドレルを一度加工機からはずして再びとりつけても、回転の精度を保つことができる。[6]

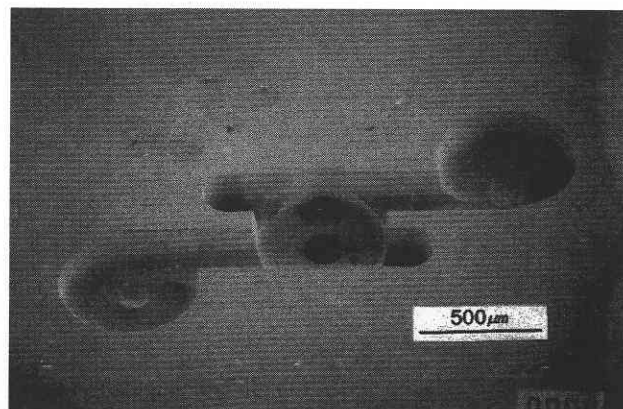


図10 シリコンに加工されたマイクロタービンのチャンバー

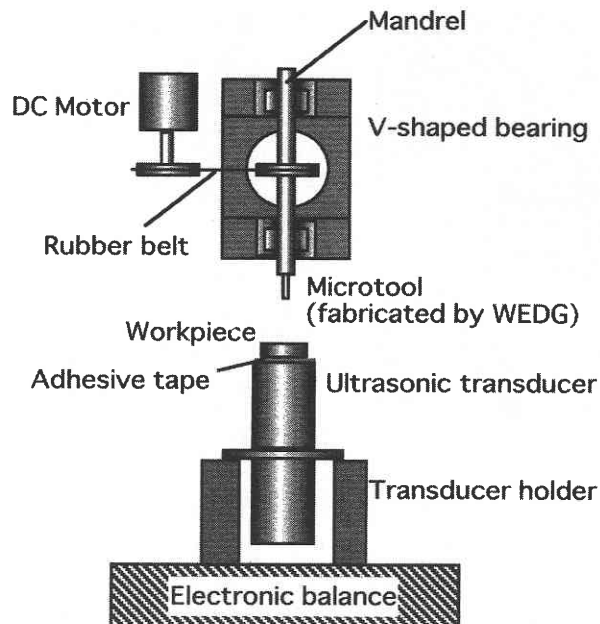


図 11 高精度工具回転機構と工作物側振動とによるマイクロ超音波加工法の加工装置概略図

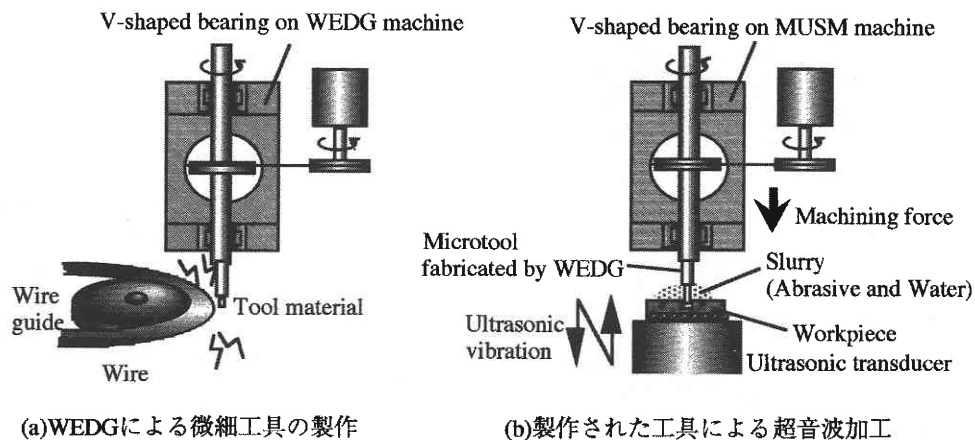


図 12 加工プロセス

また、この工具回転機構を用いる場合、今までの超音波加工法とは異なり工具側に超音波振動を付加することができないので、工作物側を振動させる。また、マイクロ超音波加工においては、要求される工具振動振幅がとても微小であり、コーンやホーンを用いて振幅を拡大する必要がないことがわかったので、図のように工作物を超音波振動子の一端に直接固定させる方式にした。固定のためには両面接着テープを用いた。

超音波振動子は共振周波数 40 kHz のものを用い、電子天秤は最小目盛 1 mgf のものを使用した。

次に加工プロセスを図 12 に示す。まず工具材料を超微細放電加工機上でマイクロ工具に加工する。図 13 には、加工された工具の例を示す。これは直径 300 μm のタング

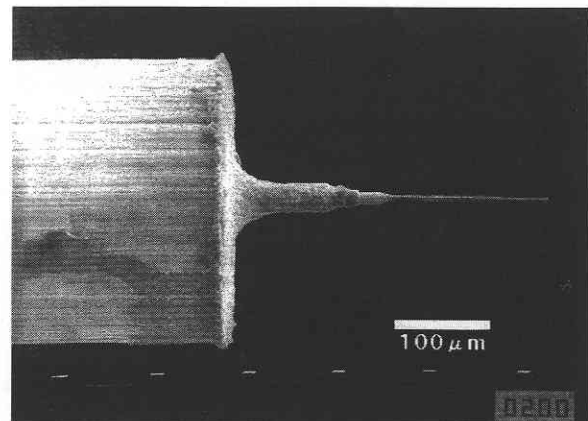


図 13 WEDG 加工により製作された微細工具

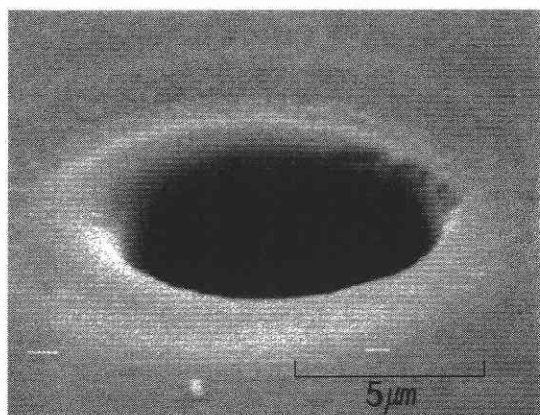


図 14 石英ガラスに加工された微細穴

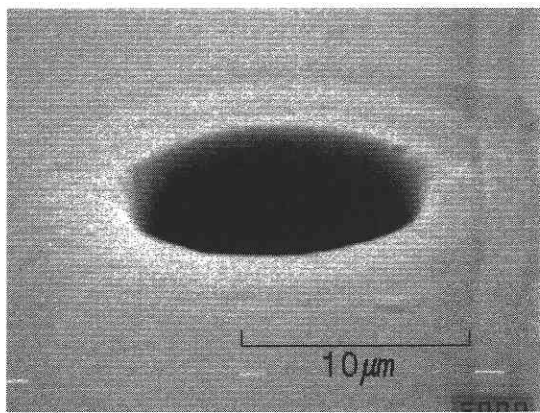


図 15 シリコン上に加工された微細穴

ステン棒を工具材料として用い、直径 $7\mu\text{m}$ 、長さ $120\mu\text{m}$ のマイクロ工具を製作したときの例である。このように加工された工具を、マンドレルで保持したまま、超音波加工機上の V 形軸受に取り付けて超音波加工を行う。これにより、より小さい径を持つマイクロ工具が製作でき、また超音波加工機上での高精度な工具回転も実現できることになった。

4.2 加工例

次に本マイクロ超音波加工による微細穴の加工例を示す。図 14 に、石英ガラス上に加工された直径 $9\mu\text{m}$ 、深さ $20\mu\text{m}$ の微細穴の例を示す。これは、超音波加工で加工された微細穴として報告されている中では最小の直径のものと思われる。部分的にチップングやだれが見られるが、

真円度は良好であることがわかる。

図 15 は、シリコン上に加工された直径 $12\mu\text{m}$ 、深さ $40\mu\text{m}$ の微細穴の例を示す。石英ガラスの加工例と比べて、チップングも僅かで、まただれも少なく加工されている。

5. 結 言

今までマイクロマシニングへ応用されていなかった超音波加工に対して、その応用を妨げている要因を考察し、それを解決したマイクロ超音波加工法を考案した。

まず微細工具を超音波加工機上で製作するマイクロ超音波加工法を提案し、それによる加工の特性や加工例を示した。次に、高精度工具回転機構および工作物側振動によるマイクロ超音波加工法を提案し、それによる加工例を示した。

これらの加工法により、従来超音波加工では困難とされていた内径 $100\mu\text{m}$ 以下の微細穴の加工が可能となり、マイクロマシニングへの応用の可能性を示した。最小内径の微細穴としては、内径 $9\mu\text{m}$ のものの加工が可能であった。

今後、加工条件などを検討するとともに、超微細砥粒の採用などにより、さらに微細な加工も可能になることが期待される。

(1997 年 6 月 16 日受理)

参 考 文 献

- 1) 江頭快, Xi-Qing Sun, 増沢隆久, 藤野正俊: マイクロ超音波加工, 電気加工技術, Vol. 20, No. 65, 1996.
- 2) K. Egashira, T. Masuzawa, M. Fujino, and X.-Q. Sun, Application of USM to Micromachining by On-the-machine Tool Fabrication, International Journal of Electrical Machining, No. 2, January 1997, pp. 31-36.
- 3) 増沢隆久, 藤野正俊: ワイヤ放電研削による細軸加工とその応用, 生産研究 37, 11, 1985.
- 4) T. Masuzawa, M. Fujino, K. Kobayashi and T. Suzuki, Wire electro-discharge grinding for micromachining, annals of the CIRP, 34, 1 (1985), pp. 431-434.
- 5) 江頭快, 増沢隆久, 藤野正俊: マイクロ超音波加工の研究—高精度工具回転機構および工作物側振動によるマイクロ超音波加工法—, 1997 年度精密工学会春季大会学術公演論文集, pp 159-160.
- 6) 佐藤健夫, 水谷武, 河田耕一: 微細穴放電加工機, National Technical Report, Vol. 31, No.5, Oct, 1985.