硬ぜい材料の微細工具による切削加工*

江 頭 快**

Cutting of Hard and Brittle Materials with a Microtool

Kai EGASHIRA

Many reports on the cutting of hard and brittle materials such as single crystalline silicon and glass have been published so far, however, obtainable shapes have been limited because only turning tools or indenters have been used for cutting tools. From this point of view, in this study, an end mill-like microtool was adopted in order to machine by cutting three-dimensional microshapes with a high aspect ratio on these materials. The tool with a D-shaped cross section and a diameter of 20 μm was fabricated using microelectrodischarge machining. With this tool, cutting of single crystalline silicon and glass was carried out at an axial depth of cut of 0.2 μm . As a result, a slot of 25 μm depth was successfully machined on silicon. Scanning electron microscope observation of the machined surface showed that the ductile-mode cutting was realized. A slot of 60 μm depth was machined on glass, however, cutting was performed in the brittle mode. This indicates that, under the machining conditions for these experiments, the critical depth of cut of ductile-brittle transition in the cutting of silicon is larger than that in the cutting of glass.

Key words: cutting, hard and brittle materials, single crystalline silicon, glass, microtool, microelectrodischarge machining, slot milling, ductile mode, critical depth of cut

1. 緒 言

単結晶シリコンやガラスは、様々な産業において広く用いられている重要な材料である。これらの加工には、一般に、ラッピング、ポリシング、フォトリソグラフィ、エッチング等の加工技術が用いられ、微細で高精度な加工が行える。しかし、これらの手法は、主にアスペクト比の小さい平面的な形状の加工に用いられるものであり、マイクロセンサやマイクロアクチュエータなどに応用するための三次元微細形状の創成には限界がある。三次元形状創成には従来の機械的な加工法が有力であるが、加工力が大きいため、硬ぜい材料であるシリコンやガラスに用いるとぜい性破壊が生じて加工精度が悪く、材料全体の破損にもつながりやすい。また、高アスペクト比な形状を加工するには、ドリルやエンドミルのように、工具自体のアスペクト比（工具幅・工具径に対する工具長さの比）も大きいことが求められるが、そのような工具は寸法が微小になると折損しやすくなる。これらの観点から、硬ぜい材料に対して高アスペクト比な三次元微細形状の加工を行うために、加工力の小さい超音波加工が用いられ、内径 5 μm までの微細穴の加工を行っている¹⁾。しかし、スラリーの取扱いや、工具摩耗などに難点がある。また、シリコンに対しては、加工力がほとんど無視できるので微細工具の使用が可能な放電加工を用いた研究が行われているが²⁾³⁾、高抵抗のシリコンでは放電が生じず加工が進まない、放電痕により加工面が粗いといった、放電加工特有の問題がある。

一方、硬ぜい材料の切削において、その切込み深さを小さく

すると延性モードでの切削になることが知られており、単結晶シリコンやガラスに対する延性切削の研究が広く行われている。そのときの切込み深さは、延性/ぜい性遷移臨界切込み深さ d_c とよばれる⁴⁾。延性切削が実現すると、これらの硬ぜい材料でも金属材料の場合と同じように自由度の高い切削加工が行えることが期待できる。さらに、クラックが存在せず、加工ひずみ層もきわめて小さいので、高品質の加工面になる。しかし、従来の研究で用いられている工具はバイトや硬さ試験用圧子などであり、創成される形状が限定される。そのため、その有用性を認めながらも硬ぜい材料を延性切削により種々の形状に加工しようという試みは少ない。しかしながら、延性切削では切込み深さが微小になるので工具にかかる加工力も小さくなり、微細なドリルやエンドミルを用いることができ、高アスペクト比な三次元微細形状の加工が可能になると考えられる。そこで、本研究では、放電加工で製作されたエンドミル形の微細工具を用いて、シリコンやガラスに対してそのような形状の加工を試みることにした。また、延性モードの切削においては臨界切込み深さ d_c が重要な値となるが、エンドミル形の微細工具を用いた場合の d_c 値に関する研究は今までに報告例がない。本研究ではそれに対しても考察も行った。

2. 切削工具の選択

硬ぜい材料の延性切削にはアールバイトが多く使われる^{4)~12)}。また、平バイトを使った例もある¹³⁾。バイト以外では、硬さ試験用圧子¹¹⁾¹⁴⁾¹⁵⁾、円すい形工具¹⁶⁾¹⁷⁾を用いた例が報告されている。これらの工具は、いずれも切削点である工具先端が精密に仕上げられており、切込み量を微小にすることにより延性切削の実現が可能である。しかし、工具全体の寸法が大きく、微細で深い溝や穴などの創成は困難である。高アスペクト比な微細三次

* 原稿受付 平成 12 年 5 月 12 日

** 正 会 員 近畿大学生物理工学部 (和歌山県那賀郡打田町西三谷 930)

Table 1 Machining conditions for WEDG of microtools of 20 μ m diameter

Process	Tool rotation	Voltage V	Capacitance pF	Diameter μ m
Rough machining	Rotated	100	3300	50
First finish machining	Rotated	60	0	20
Second finish machining	Not rotated	60	0	0

Fig. 1 Dimensions of microtool

(a) General view

(b) Tool tip

Fig. 2 SEM image of microtool fabricated using WEDG

元形状を切削で得るためには、工具自体のアスペクト比も大きくなければならず、微細工具が必要とされる。そこで、本研究では微細工具を放電加工で製作して使用することにした。工具形状は、成形が容易なD形断面をもつエンドミル形状を選択した。

また、微細工具の場合は工具材料の選択も重要である。従来用いられてきたバイト、圧子、円すい形工具はいずれも単結晶ダイヤモンドまたはダイヤモンド焼結体から作られている。単結晶ダイヤモンドは高精度な研磨技術により丸み半径の小さい切れ刃が得られること、ダイヤモンド焼結体は放電加工により成形できることに利点がある。しかし、単結晶体は微細工具への成形が現在の技術では困難で、焼結体は微細工具への成形は可能だが、じん性が低いためにわずかな切削力でも折損してしまうという問題点があり、微細工具の材料としては適さない。本研究で使用する微細工具の材料には、微細工具への成形が可能で、切削を行える硬さがあり、切削力に耐えるじん性を持つ超硬合金を選択した。

3. 実験装置と実験方法

3.1 微細工具の製作とそれによる切削加工

本研究の実験には、微細放電加工機 MG-ED72 (松下電器産業) を用いた。この加工機では、ワイヤ放電研削 (WEDG)¹⁸⁾ と、

Fig. 3 Microtool fabrication using WEDG and cutting with the fabricated tool **Fig. 4** Process of slot milling

型彫放電加工が行える。XYZの3軸をもち、各軸の送りの最小単位は0.1 μ m、送り速度は0.1~12000 μ m/sの範囲で設定可能である。加工電極はマンドレルに保持されV字軸受に固定され、DCモータにより回転駆動される。マンドレルの回転振れは0.5 μ m以下である¹⁹⁾。

まずはじめに、WEDGで微細工具の製作を行う。製作は加工槽に満たされた油で行った。放電回路はRC回路である。工具材料として、直径300 μ mの超合金線を使用した。これをマンドレルに取付け、微細工具に加工する。工具材料を回転させて荒加工と仕上げ加工を行い目標径に加工し、さらに工具を回転させずに仕上げ加工を行うことによりD形断面にする。表1に、直径20 μ mの工具を製作する場合のWEDG加工条件を示す。このとき、各工程での垂直方向加工長さとワイヤ電極径から、図1に示されるように工具寸法が決定される。図2は、製作された工具の電子顕微鏡写真である。工具材料の先端に微細なD形断面工具が形成されていることがわかる。工具のアスペクト比は約3である。

微細工具が製作されたら、それを加工機上から取り外さずにそのまま用いて、加工槽中にあるステージ上に固定された工作物に対して切削加工を行う (図3)。オンマシンで工具の製作を行うことになるので、工具取付けの手間が不要であり、またその際の工具の芯振れや傾きが生じず、高精度な加工が実現できる。ステージに動力計等は取付けられておらず、切削力の測定はできない。また、ステージは加工槽中にあるために、切削も油中で行うことになる。

D形断面工具は、すくい角、逃げ角ともに0°の、直刃一枚刃スクエアエンドミルとみなすことができる。したがって、エンドミルを用いた加工として一般的な溝加工を試みることにした。さらに、それほど能率的ではないが、穴加工も試みた。溝加工の手法は図4に示す通りである。工具を上方より工作物表面に近付け、接触が確認されたのち、軸方向切込み深さだけ送り、

Table 2 Characteristics of silicon wafer

Type	N-type
Resistivity	0.005 ~ 0.025 $\Omega \cdot \text{cm}$
Crystal plane	(100)

Table 3 Machining conditions for slot milling of silicon

Axial depth of cut	0.2 μm
Horizontal feed rate	10 $\mu\text{m/s}$
Horizontal feed length	150 μm
Cutting direction	Parallel to orientation flat
Tool diameter	20 μm
Slot depth	25 μm

(a) General view

(b) Edge

Fig. 5 Slot milled on silicon

そこから水平方向に一定の送り速度で工具を送り、溝切りを行う。軸方向切込み深さは微小なので、所望の溝深さが得られるまで工具を往復させこの工程を繰り返す。工具の回転数は3000rpmなので、直径20 μm の工具を用いた場合、工具周速度である切削速度は約0.2m/minとなる。また、最初の工具と工作物との接触は、電氣的に検出した。高抵抗の材料の場合は、表面に厚さ50nm程度 of 金薄膜をスパッタリングにより作成し、導電性を付与した。

3.2 臨界切込み深さ d_c

エンドミル形の工具による溝切り加工では、軸方向切込み深さが実際の切込み深さになると考えられる。硬ぜい材料を延性モードで加工するには、その切込み深さを延性/ぜい性遷移の臨界切込み深さ d_c 以下に設定しなければならない。 d_c 値は、切削速度、工具すくい角、工具逃げ角、結晶方位などにより異なり、今までに数多くの研究者により測定されてきているが、 d_c 値を実験的に求める場合の d_c 値の定義、計測方法や評価方法はいま

Fig. 6 Bottom surface of slot (Horizontal feed rate: 20.0 $\mu\text{m/s}$)

Fig. 7 Chips formed in slot milling of silicon

だ確立しておらず、測定された値にはかなりばらつきがある²⁰⁾。さらに、いずれもバイトや圧子などによる実験の測定結果であり、エンドミル形で、しかも直径が20 μm という微細な工具を用いて測定されたものは今までに報告例がない。そのため、本実験では任意に軸方向切込み深さを選り、0.2 μm と設定することにした。

4. 実験結果

4.1 単結晶シリコンの切削

本実験で用いた単結晶シリコンの特性は表2に示す通りである。抵抗率が0.005~0.025 $\Omega \cdot \text{cm}$ の範囲にあり、工具との電氣的接触が検知できるので、表面に金薄膜を付与する必要はなかった。

表3の加工条件で溝加工を行った。加工時間は30minであった。加工された溝の全体を図5(a)、入口のエッジ部の拡大図を図5(b)に示す。エッジ部分はシャープに切削されており、チップングもほとんどなく加工されていることがわかる。図6は、水平方向工具送り速度を20.0 $\mu\text{m/s}$ に設定して溝加工を行ったときの、溝の底面を示す。加工面には送りマークが残っているが、ぜい性的な破壊は見られず、延性モードでシリコンが切削されたことを示している。軸方向切れ込み深さが0.2 μm なので、本実験の加工条件ではシリコンの d_c 値は少なくとも0.2 μm であるといえる。

表3と同じ加工条件で切削を行ったときの切りくずを図7に示す。ただし、切りくずの採集のため、加工はドライで行った。工具がエンドミル形なので、バイトによる旋削の場合と異なり、

Fig. 8 Hole drilled into silicon

Table 4 Machining conditions for slot milling of glass

Axial depth of cut	0.2μm
Horizontal feed rate	15μm/s
Horizontal feed length	150μm
Tool diameter	20μm
Slot depth	60μm

延性モードの切削でも連続形の切りくずは生成しない。切りくずは細かくちぎれて、はっきりとした形状をとどめていない状態になっていることがわかる。

なお、本実験の加工条件では、溝の深さが30μmあたりを超えると、工具の折損が起きやすくなった。溝が深くなり切削抵抗が増大するためと考えられる。アスペクト比をより大きくするには、工具材料のじん性をさらに向上させる必要がある。

図8は、穴加工を行ったときの加工例である。直径40μmの工具を用い、垂直方向の送り速度は0.1μm/sに設定した。入口部分には大きいチップングが見られるが、穴の側面や底面に観察される切削痕は加工が延性モードで行われたことを示している。

4.2 ガラスの切削

次に、ガラスの切削を試みた。使用した材料は石英ガラスである。これは不導体なので、表面に金薄膜をスパッタリングで生成した。

表4に示される加工条件で溝加工を行った。加工された溝を図9(a)に示す。加工時間は40minであった。溝の形状は実現されたが、エッジ部にはチップングが目立つ。図9(b)は溝の底面の写真であるが、シリコンの場合に図6で見られたような送りマークはなく、ぜい性的な破壊による材料除去が行われたことがわかる。軸方向切込み深さは0.2μmで、図5、6のシリコンの溝加工の例と同じであるが、延性モードでの切削にはならなかった。これにより、本実験の条件下ではガラスの d_c 値は0.2μmより小さいと考えられる。一方、溝の深さは60μmまでに達しており、それでも工具の折損は生じなかった。シリコンの切削では深さ30μmあたりで工具の折損が生じやすくなったが、ガラスはシリコンに比較して切削抵抗が小さいと考えられる。

図10は、穴加工を行ったときの加工例で、穴の深さは30μmである。溝加工の場合と同じように入り口にはチップングが目立つ。

5. 臨界切込み深さ d_c の考察

軸方向切込み深さ0.2μmでD形断面微細工具による溝加工を行ったところ、単結晶シリコンでは延性モードによる切削にな

(a) General view

(b) Bottom surface

Fig. 9 Slot milled on glass

Fig. 10 Holes drilled into quartz glass (Depth: 30μm)

ったが、ガラスではぜい性モードで加工された。この結果、本実験の条件下では、シリコンの d_c 値は0.2μm以上であり、ガラスの d_c 値は0.2μmより小さいと考えられ、シリコンの d_c 値はガラスの d_c 値より大きいという結論になる。シリコンとガラスの d_c 値を同条件下で比較した研究のうち、杉田ら¹⁴⁾はアールバイトを用いて切削速度と d_c 値の関係を調べ、500m/min以上の切削速度ではシリコンの d_c 値よりガラスの d_c 値が大きいが、200m/minの切削速度ではガラスの d_c 値よりシリコンの d_c 値が大きくなるという結果を示している。しかし、于ら¹⁵⁾は、圧子を用いて0.3m/min以下の切削速度で実験を行い、293Kの常温の場合はシリコンの d_c 値よりガラスの d_c 値が大きいという結果を得ている。本実験の切削速度は0.2m/minであり、切削速度に関しては于らの実験条件に近いが、得られた結果は逆になっている。この違いは、工具がエンドミル形であること、油中での加工であること、ガラスの種類が異なることなどが考えられるが、詳しくは今後の解明が必要である。

6. 結 言

単結晶シリコンやガラスなどの硬ぜい材料に、切削で高アスペクト比な三次元微細形状を創成することを試みた。一般に硬ぜい材料の延性切削に用いられるバイトや硬さ試験用圧子などではそのような形状の加工は難しいので、超硬合金を工具材料に選び、放電加工で直径20 μm のエンドミル形のD形断面微細工具を製作し、それを用いて溝と穴の加工を行った。溝の加工では軸方向切込み深さを0.2 μm に設定して加工を行い、得られた結果は以下の通りである。

- (1) 単結晶シリコンに深さ25 μm の溝の加工を行った。入り口のエッジはシャープに加工されチッピングがほとんどなく、また底面には送りマークが残し、ぜい性的な破壊が見られないことから、延性モードで切削が行われたと考えられる。
- (2) ガラスの場合は、切削力が小さく、深さ60 μm の溝の加工が行えた。しかし、チッピングが目立ち、また底面の観察から切削はぜい性モードであることがわかった。
- (3) 単結晶シリコンとガラスの臨界切込み深さ d_c を比較し、シリコンの d_c 値はガラスの d_c 値より大きいという結果が得られた。

参 考 文 献

- 1) K. Egashira and T. Masuzawa: Microultrasonic Machining by the Application of Workpiece Vibration, Ann. CIRP, **48**, 1 (1999) 131.
- 2) 河田耕一, 正木 健, 佐藤健夫, 増沢隆久: 微細放電加工の研究 (第3報) - マイクロ機構の加工 -, 電気加工学会誌, **28**, 59 (1994) 1.
- 3) 宇野義幸, 岡田 晃, 中西洋人, 岡本康寛: 単結晶シリコンの放電加工に関する基礎的研究, 精密工学会誌, **63**, 10 (1997) 1459.
- 4) P. N. Blake and R. O. Scattergood: Ductile-Regime Machining of Germanium and Silicon, J. Am. Ceram. Soc., **73**, 4 (1990) 949.
- 5) T. Nakasui, S. Kodera, S. Hara, H. Matsunaga, N. Ikawa and S. Shimada: Diamond Turning of Brittle Materials for Optical Components, Ann. CIRP, **39**, 1 (1990) 89.
- 6) 山田 収, 西口 隆, 樹田正美, 内田浩二: ガラスの臨界切込み深さに及ぼす工具すくい角の影響, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 751.
- 7) W. S. Blackley and R. O. Scattergood: Ductile-Regime Machining Model for Diamond Turning of Brittle Materials, Prec. Eng., **13**, 2 (1991) 95.
- 8) 呉東雄, 森田 昇, 吉田嘉太郎: 単結晶シリコンの切削加工に関する研究 (第1報, 脆性-延性遷移に伴う加工表面形状の変化), 日本機械学会論文集 (C編), **59**, 557 (1993) 283.
- 9) T. P. Leung, W. B. Lee and X. M. Lu: Diamond Turning of Silicon Substrates in Ductile-Regime, J. Mater. Processing Technol., **73** (1998) 42.
- 10) 市田良夫, ベン フレシ ナビル, ユセフィ レザ: 単結晶シリコンの延性モード鏡面切削 (第1報) - 切削モードの遷移挙動に及ぼす切削速度の影響 -, 精密工学会誌, **64**, 4 (1998) 608.
- 11) 柴田順二, 黛 政男, 清水 毅: ガラスの延性形切りくず生成と切れ刃形状の効果, 日本機械学会論文集 (C編), **64**, 627 (1998) 4465.
- 12) 柴田隆行, 藤井 茂, 小野 敦, 牧野英司: 単結晶シリコンの超精密切削面の微視的構造, 精密工学会誌, **65**, 7 (1999) 992.
- 13) 閻紀旺, 庄司克雄, 鈴木浩文, 厨川常元: ダイヤモンド平バイトを用いた単結晶Siの延性モード切削, 精密工学会誌, **64**, 9 (1998) 1345.
- 14) 杉田忠彰, 上田完次, 遠藤勝義: 硬ぜい材料のマイクロ切削における塑性変形型材料除去の可能性, 精密工学会誌, **52**, 12 (1986) 144.
- 15) 于化東, 森田 昇, 吉田嘉太郎: 硬脆材料の高品位加工に関する研究 (第1報, 低温における変形破壊挙動), 日本機械学会論文集 (C編), **64**, 623 (1998) 2762.
- 16) 和田紀彦, 高畑憲一, 正木 健: 微細V溝描画加工法の開発 - シリコン材料への加工 -, 1999年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, (1999) 35.
- 17) 吉野雅彦, 青木隆幸, 杉島泰介, 白樫高洋: 高静水圧環境下における硬ぜい材料の引っかけ加工試験, 精密工学会誌, **65**, 10 (1999) 1481.
- 18) T. Masuzawa, M. Fujino and K. Kobayashi: Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining, Ann. CIRP, **34**, 1 (1985) 431.
- 19) 佐藤健夫, 水谷 武, 河田耕一: 微細穴放電加工機, National Tech. Rep., **31**, 5 (1985) 725.
- 20) 谷 泰弘: 延性モード加工, 生産研究, **43**, 11 (1991) 472.

編 集 後 記

2001年の年が明けた今、精密工学会は、1933年に精機協会が誕生して以来、1947年に精機学会を経て67年目を迎えようとしております。その間、日本の製造業の基幹産業も「重厚長大」型産業から「軽薄短小」型産業へと大きく変遷してきました。精機協会、精機学会そして精密工学会は、様々な活動を通じて製造業(モノづくり)の発展のために貢献してきたことと確信できますが、21世紀を迎えた機会に、これまで学会が果たしてきた活動を振り返り、認識を新たにしてこれからの学会の指針を様々な視点から見直ししてはどうかということを趣旨としまして今回の特集号を企画いたしました。また、編集委員会では、Webならびに10月に名古屋工業大学で開催された2000年度秋季大会会場にてアンケートを行い、学会に関する会員の意見を広く収集し、本号にまとめ掲載いたしました。

本号では、はじめに、これまでの精密工学会の活動データを基に「精密工学会が果たしてきた役割」について振り返り、次に「高

等教育そして高専教育における精密工学会の役割と位置づけ」について議論しております。そして、「企業内技術者教育における精密工学会の役割・位置づけ」についても学会としてどのように取り組むべきか検討いたしました。その検討を生かす意味で、「産業界から精密工学会に望むこと」や「モノづくりについて-学問と産業のあり方-」について意見を示しております。また、今後ますます重要な活動形態と考えられる「産官学連携」について、その役割や成功例を提示しております。さらに、学会活動の中でインターネットを「情報発信」のツールとして積極的に利用する取り組みや、「国際活動」の取り組みについて紹介し、最後に今後の学会活動の方向や方針、そしてあるべき姿・体制を「精密工学会21世紀ビジョン」としてまとめております。

今年は、精密工学会とかかわりの深いモノづくり産業(製造業)にとって、飛躍の年となりますことを祈念しております。

(青山英樹)