

硬脆性材料の超精密加工技術に関する研究

岩本竜一*, 近藤英二**, 大久保徳之***, 市来浩一****, 皮籠石紀雄**

Study on Ultra-Precision Cutting for Hard and Brittle Materials

Ryuichi IWAMOTO, Eiji KONDO, Noriyuki OKUBO, Koichi ICHIKI and Norio KAWAGOISHI

It is well known that brittle materials such as glasses, silicon and so on, can be machined ductile mode cutting like soft metals when the depth of cut is less than critical depth. Face turning using R shaped tool were carried out two types of cutting method to distinguish brittle mode from ductile mode by AE-signal and cutting forces. Perfectly mirrored surface with roughness of several tens nanometers can be obtained when maximum undeformed chip thickness was thin in extreme low feed cutting. RMS value of AE-signal was larger and cutting force ratio was lower when PV of machined surface was larger.

Keyword : ultra-precision cutting, monitoring, brittle mode, ductile mode, cutting forces, AE-signal

1. 緒 言

ガラスやセラミックスなどの脆性材料は、工具切込みがある臨界量以下に保って加工すると塑性変形を主体とする材料除去機構が得られるようになり、その結果ピットなどの脆性破壊損傷のない平滑な加工面を創製できることが確かめられている^{1)~3)}。この加工法は脆性材料の延性モード切削と呼ばれ、硬脆性材料の超精密加工における高能率化、高精度化を進める新しい加工技術の一つとして注目されている。しかし、延性モード切削を実現するための条件、すなわち脆性モード切削から延性モード切削への遷移挙動を支配する要因は多いが^{4)~6)}、各要因の影響の程度は明確にされていない。一方、延性モード切削と脆性モード切削とを、インプロセスで判別できれば、適応制御などにより切削状態を常に延性モード切削にすることができ、脆性材料の超精密切削加工は容易になる。

本研究では、実用的な切削条件において脆性・延性モード切削をインプロセスで判別することを目的とし、単結晶シリコンを超精密切削加工した時の切削抵抗、AE信号と脆性モード切削、延性モード切削との関係について調べた。

2. 実験装置および実験方法

実験は、Fig. 1に示す超精密旋盤（豊田工機(株)AHN60-3 D）を使用し、単結晶ダイヤモンドのRバイト（(株)東京ダイヤモンド工具製作所）で単結晶シリコンウエハを正面旋削した。Fig. 2に示す被削材は両面平行のステンレス基板に接着し、真空チャックで吸着し主軸に取付け、あらかじめ他の工具で前加工を行い、表面粗さ R_a を数ナノメートルの

粗さに揃えた。なお、図中の記号 ϕ に関しては、オリエンテーションフラットからの回転方位角を表し、以後切削方向は記号 ϕ で表す。切削抵抗およびAE信号の計測には切削動力計（日本キスラー(株)9256A）、AEセンサ（エヌエフ回路設計ブロック(株)AE900S-WB）を用いた。

脆性材料の切削を行うにあたり考慮しなければならない要因は最大切取り厚さ h_{max} であり、脆性材料の臨界切取り厚さは0.1 mm前後であるとされている⁵⁾。そこで実験は以下に示す2つの切削方式で行なった。

- ① 微小送り切削：切込みを数ミクロン程度と大きくし、工具送りを微小にする。
- ② 微小切込み切削：工具送りを大きくし、切込みを微小にする。

Fig. 3に微小送り切削および微小切込み切削の概略図を示す。Fig. 3に示すように最大切取り厚さ h_{max} は工具刃先半径 R 、切込み d 、送り f によって決まる。

微小送り切削（ $\sqrt{2Rd-d^2} > f$ ）の場合、工具切れ刃先端から非切削ショルダー部へ向けて切取り厚さは増加する。このときの最大切取り厚さ h_{max} は（1）の式によって表すことができる。

$$h_{max} = R - \sqrt{R^2 + f^2 - 2f\sqrt{2Rd-d^2}} \quad (1)$$

微小切込み切削（ $\sqrt{2Rd-d^2} \leq f$ ）の場合、最大切取り厚さ h_{max} は単純に以下の式によって表すことができる。

$$h_{max} = d \quad (2)$$

Table. 1に実験条件の詳細を示す。なお、工具切れ刃の観察にはマイクロスコープを用い、加工後の被削材の表面観察および表面粗さ測定には走査型白色干渉計（Zygo New View 5032（以下ZYGO））を用いた。

*機械技術部, **鹿児島大学, ***鹿児島大学大学院（現（株）第一精工）, ****機械技術部（現 企画情報部）

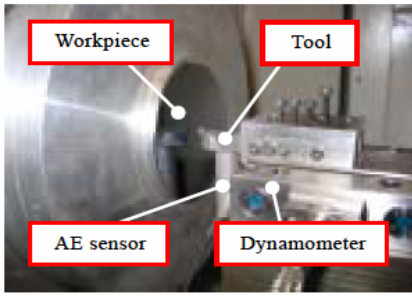


Fig. 1 Ultra-precision lathe

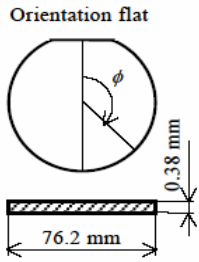


Fig. 2 Workpiece

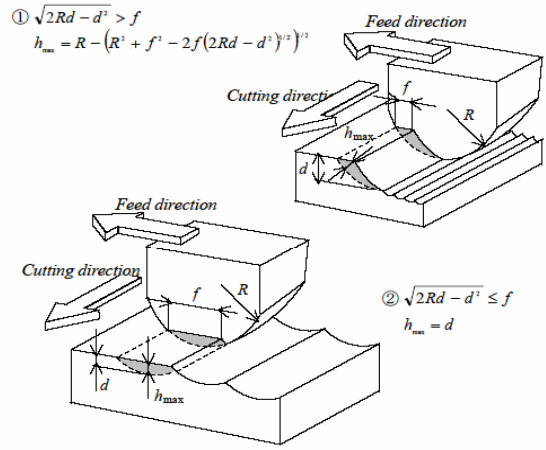


Fig. 3 Schematic diagram of two types of cutting method

3. 微小送り切削実験の結果

3. 1 仕上げ面粗さ

これまでの研究によれば延性・脆性モード切削と加工面粗さとは密接な関係があることが指摘されている⁷⁾。延性モード切削の条件に及ぼす工具摩耗の影響を調べるため、切削実験では新品の工具と、ある程度の距離を切削して摩耗した工具の2つを使った。Fig. 4に、これら2つの切削工具の刃先写真を示す。新品の工具には摩耗がなく、切れ刃は鋭利な状態であった。摩耗した工具 (R=2mm) は、切れ刃が後退し逃げ面も大きく摩耗しているのがわかる。

Fig. 5に、これら2つの切削工具を使って切削した仕上げ面の写真をそれぞれ示す。実験は一枚のウエハ中で送りを段階的に変化させた。代表で切込みをd=2mmで切削した場合を示す。被削材中央部の梨地面になっている部分は切残り部である。新品の工具および摩耗した工具のいずれの場合においても、切削範囲内 (半径23mmから38mm) においては格子模様が明瞭に写っており、仕上げ面は鏡面になっているのがわかる。また、新品と摩耗を生じた工具による差はあまり見られない。

そこで、被削材はどのような切削がなされたのかをより詳細に調べるためにZYGOで加工面の形状および粗さを測定した。Fig. 6に摩耗した工具を用いて切削した場合の加工面の三次元形状および断面曲線を示す。工具切込みが d=2 mm, 送りがf=1.5mm/revで切削した場合、仕上げ面には工具送り量をピッチとする明確なカッターマークが見られた。一方、送りがf=6mm/revで切削した場合、送り量が小さいf=1.5mm/revの場合と同様に、工具送り量をピッチとするカッターマークは見られるが、数ヶ所にき裂やピットなどの脆性損傷痕が見られた。

R刃工具で切削を行なった場合、理論粗さR_vは工具送りfと工具刃先半径Rから、式 (3) によって求められる。

$$R_v = f^2 / 8R \tag{3}$$

表面粗さPV (Peak to Valley) は送りがf=1.5, 3mm/revの場合、平均値はいずれの場合も約42nmで、f=3mm/revでの理論値0.56nmよりも大きくなった。しかし、f=4.5mm/rev以上では Fig. 6に示したように、仕上げ面にき裂やピット

Table. 1 Experimental conditions

Type of cut		low feed	small depth
Workpiece	Material	Silicon wafer (100)	
	Diameter mm	76.2	
Tool	Material	Single crystal diamond	
	Nose radius mm	2	
	Rake angle θ deg.	-15	0
	Clearance angle deg.	20	5
Depth of cut d μm		2 ~ 17	0.06 ~ 0.1
Feed rate f μm/rev		1.5 ~ 7.5	30
Cutting speed V m/min		145 ~ 240	4 ~ 240
Cutting fluid		Non	

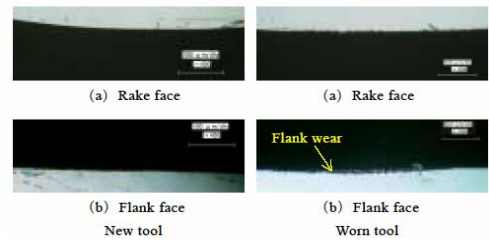


Fig. 4 Photograph of cutting tools

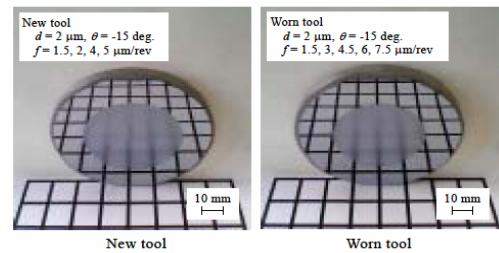


Fig. 5 Photograph of workpiece

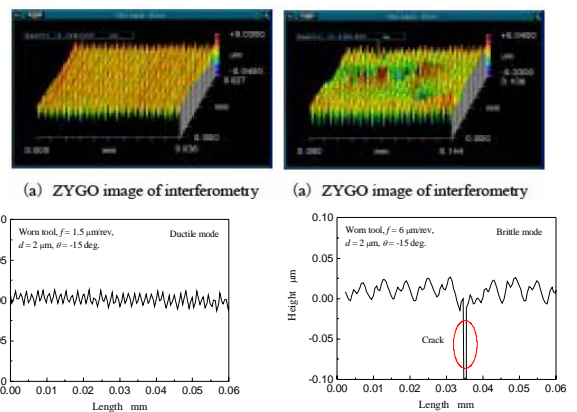


Fig. 6 Surface texture after machined

などの脆性損傷が発生したため、表面粗さのPV値は大きくなり、数ミクロンの大きさになった。このように仕上げ面にき裂やピットなどの脆性損傷が発生した場合、切削は脆性モードであると判断した。逆に、仕上げ面に脆性損傷が見られない場合、切削は延性モードであると判断した。また、表面粗さ R_a は脆性損傷が見られない延性モード切削で約5nm、脆性損傷が見られた脆性モード切削でも約6nmと差はあまり見られなかった。新品の切削工具で切削した場合においても同様の傾向が見られた。

3. 2 臨界切り取り厚さ

前節において、延性・脆性モード切削を加工面粗さから判別することを検討し、可能であるとの結論を得た。そこで、ここでは切削条件と延性・脆性モード切削との関係について調べた。Fig. 7は新品の工具と摩耗した工具で切削した場合の、各条件における加工面の延性・脆性モード切削の判別結果である。図中○印は延性モード切削面、×印が脆性モード切削面である。また、図中の破線は最大切り取り厚さ h_{max} を表している。

新品の工具で切削した場合、工具切込みが $d=2\text{mm}$ で送りが $f=1.5, 2\text{mm/rev}$ の場合のみ延性モード切削面になり、その他の条件では加工面はすべて脆性モード切削面になった。また、延性モード切削面になった場合の最大切り取り厚さ h_{max} は 0.1mm 以下であった。

一方、摩耗した工具で切削した場合、工具切込みが $d=2\text{mm}$ で送りが $f=1.5, 3\text{mm/rev}$ の場合と送りが $f=1.5\text{mm/rev}$ で切込みが $d=2, 5, 8\text{mm}$ で切削した場合には加工面は延性モード切削面になり、その他の条件では脆性モード切削面になった。また加工面が延性モード切削面になった場合の最大切り取り厚さ h_{max} は 0.14mm 以下であった。以上のことから延性モード切削と脆性モード切削は工具切込みや工具送りではなく最大切り取り厚さによって決まっており、従来の研究による結果とも一致する^{5), 7)}。

今回の切削実験の結果によれば、切れ刃が鋭利な新品の工具よりも摩耗した工具の方が最大切り取り厚さは大きくなった。これはFig. 8に示すように、新品の工具は切れ刃が鋭利であるが、摩耗した工具は切れ刃に丸味が生じており、工具すくい角が実際に設定したすくい角($\theta = -15^\circ$)よりもさらに負の方向に大きくなったと考えられる。これまでの研究によれば、工具すくい角は -45° 近傍がもっとも延性モード切削になりやすいということが指摘されており⁵⁾、今回の実験では新品の工具よりも摩耗した工具の方が臨界切り取り厚さが厚くなったと考えられる。

閻らの研究⁵⁾によれば、平バイトを用いた二次元切削において延性モード切削が可能な臨界切り取り厚さ h_{cr} は、工具すくい角 γ ($-80^\circ \sim 0^\circ$)の関数として式(4)のよう

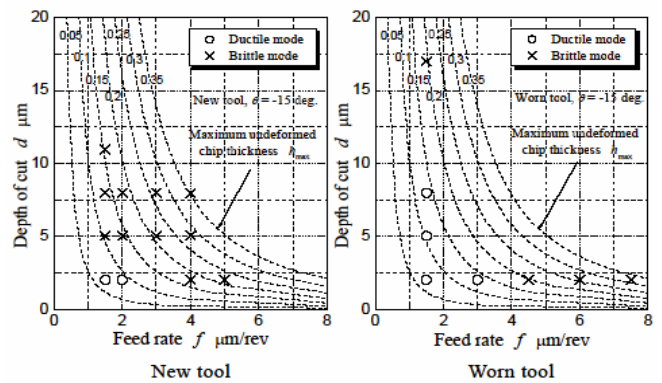


Fig. 7 Distinction of ductile mode and brittle mode

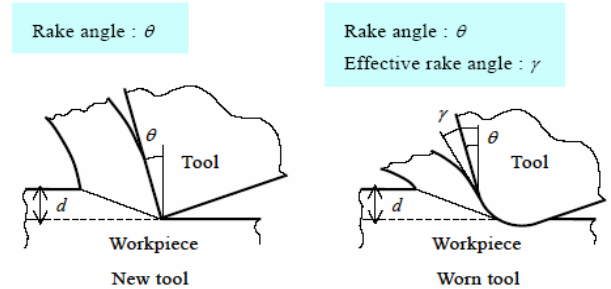


Fig. 8 Effect of cutting edge radius

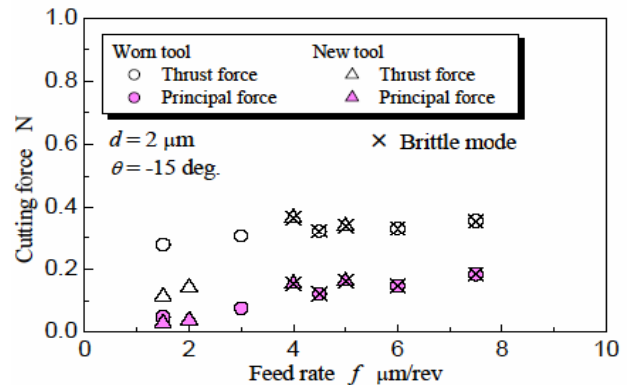


Fig. 9 Comparison of cutting force using new tool and worn tool

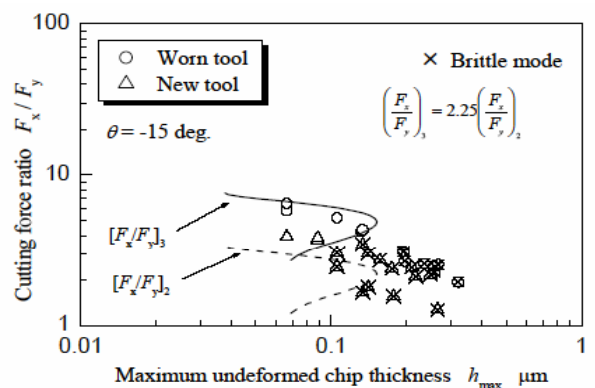


Fig. 10 Relations between maximum undeformed chip thickness h_{max} and cutting force ratio F_x/F_y

に表すことができる。

$$h_{cr} = 5.0 \times 10^{-2} \sin[4\gamma - 92] + 3.4 \times 10^{-4} [\gamma] + 0.1 \quad (4)$$

一方、二次元切削における背分力と主分力との比 (F_x / F_y)₂と工具すくい角 γ との間には近似的に式(5)に示す

線形関係がある。

$$\left(\frac{F_x}{F_y}\right)_2 = -2.5 \times 10^{-2} [\gamma] + 1.1 \quad (5)$$

従って、式(4)と(5)より延性モード切削が可能な臨界切り厚さ h_{cr} と二次元切削での分力比 $(F_x / F_y)_2$ との間には以下の関係が成り立つ。

$$h_{cr} \leq 5.0 \times 10^{-2} \sin \left[-160 \left(\frac{F_x}{F_y} \right)_2 + 84.6 \right] - 1.4 \times 10^{-2} \left(\frac{F_x}{F_y} \right)_2 + 0.1 \quad (6)$$

Fig. 9に今回の切削実験における切削抵抗を示す。○印は摩耗した工具で△印は新品の工具である。同一の切削条件($f=1.5\text{mm/rev}$, $d=2\text{mm}$)においても、切削抵抗には差が見られ摩耗した工具の方が大きくなった。

そこで、今回の切削実験で得られた最大切り厚さ h_{max} と、切削分力比 $(F_x / F_y)_3$ の関係をFig. 10に示す。Fig. 10には、式(6)で示した平バイトによる二次元切削での臨界条件が破線の曲線で示してある。R刃工具による三次元切削で得られた臨界値と定量的な一致は見られなかったが定性的には一致している。そこで、二次元切削における切削分力比 $(F_x / F_y)_2$ に以下の補正を行ない、Fig. 10に実線で示した。

$$\left(\frac{F_x}{F_y}\right)_3 = 2.25 \left(\frac{F_x}{F_y}\right)_2 \quad (7)$$

補正した臨界条件は、実験により得られた臨界条件とほぼ一致した。よって、今回の切削実験によって得られた最大切り厚さ h_{max} を、式(7)を用いることにより得られるR刃工具による三次元切削の臨界切り厚さ h_{cr} で除すことによって基準化した値を最大切り厚さ h_{max}/h_{cr} とすれば、基準化した最大切り厚さが $h_{max}/h_{cr} \leq 1$ の場合、延性モード切削がなされ、逆に $h_{max}/h_{cr} > 1$ の場合、脆性モード切削がなされることになる。

Fig. 11に基準化した h_{max}/h_{cr} と切削分力比 $(F_x / F_y)_3$ の関係を示す。今回の切削実験においては、切削分力比が $(F_x / F_y) < 3.6$ の場合、脆性モード切削となり $(F_x / F_y) \geq 3.6$ の場合、延性モード切削となった。

3. 3 AE信号の測定結果

AE (Acoustic Emission) は固体が変形もしくは破壊するとき、弾性エネルギーが解放されることによって発生する弾性波のことをいう⁸⁾。今回のような脆性材料の切削を行う場合、切削によって生じるき裂やピットの発生を検出するにはAEが有効であると考えた。

摩耗した工具で切削し、延性モード切削がなされた場合と脆性モード切削がなされた場合のAE信号の波形をFig. 12に示す。脆性モード切削がなされた場合、切削方向によっては突発的なAE信号が検出され、振幅が大きくなっているのがわかる。そこで、Fig. 13に各条件におけるAE信号を3.2節で基準化した最大切り厚さ h_{max} / h_{cr} についてまとめ

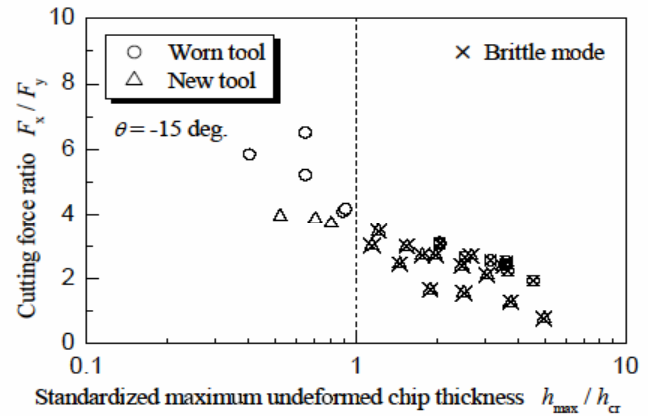


Fig. 11 Relations between standardized maximum undeformed chip thickness h_{max}/h_{cr} and cutting force ratio F_x/F_y

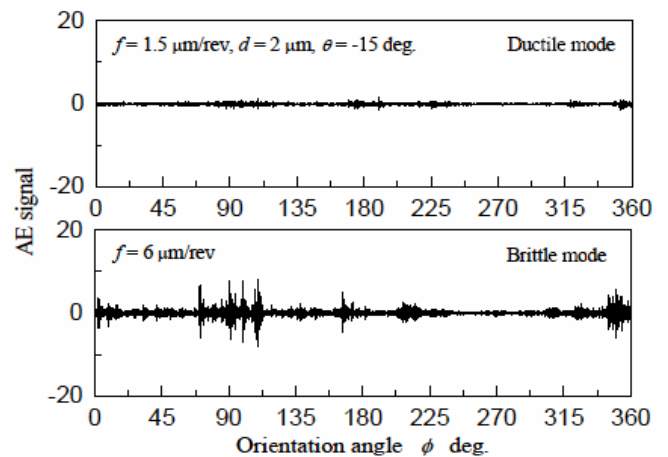


Fig. 12 AE signal

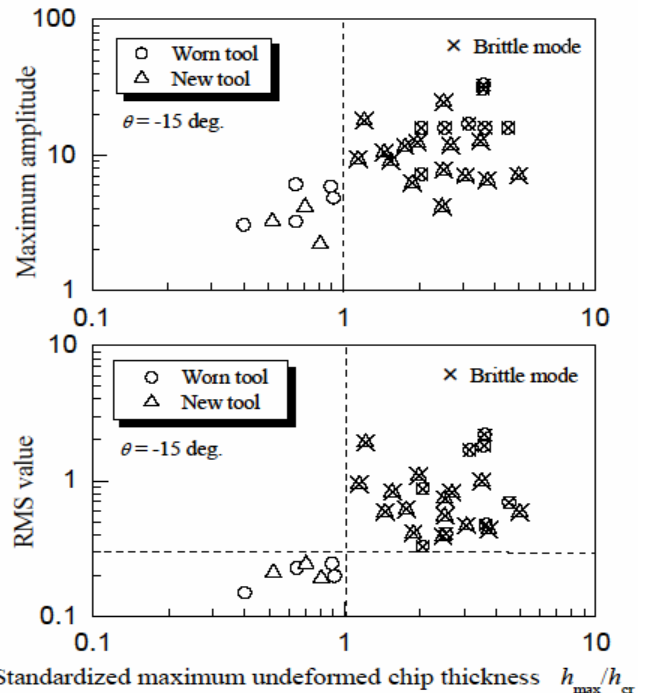


Fig. 13 Relations between standardized maximum undeformed chip thickness h_{max}/h_{cr} maximum amplitude and RMS value of AE signals

た。AE信号の最大振幅についてみてみると、Fig. 13に示すとおり延性モード切削の方が脆性モード切削よりも比較的小さい値になっている。しかしながら、条件によっては必ずしもそうではなく、一概に最大振幅によって延性モード切削・脆性モード切削を判別するのは難しいといえる。そこで、AE信号のRMS (Root Mean Square) 値に着目する(以下 AE_{RMS} とする)。 AE_{RMS} はある一定の値を境に延性モード切削がなされた場合は小さい値になり、脆性モード切削がなされた場合は大きい値になった。このように、 AE_{RMS} は延性モード切削と脆性モード切削を判別するパラメータになり得ると考えられる。

4. 微小切り込み切削実験の結果

4. 1 延性・脆性モード切削

微小切り込み切削では、工具すくい角を $\theta=0^\circ$ 、工具送り量を $f=30\mu\text{m}/\text{rev}$ で一定とし、切り込み d をそれぞれ0.06, 0.08, 0.1mmと変化させ切削を行った。なお切削は、被削材半径約2mmから38mmの範囲で行った。

切り込みが $d=0.06\text{mm}$ の場合、仕上げ面は全体的に梨地面になった。切り込みが $d=0.08\text{mm}$ の場合、外側は比較的鏡面に近い光沢面になったが中心部は梨地面になった。切り込みが $d=0.1\text{mm}$ の場合、Fig. 14に示すように外側が比較的鏡面に近い光沢面になった。また、仕上げ面は一回転中に梨地面と鏡面とが1/4回転周期に現れた。

次にZYGOで加工面の測定を行った。切り込み d が0.06, 0.08mmの場合、どの切削方向においても仕上げ面には工具送り量をピッチとするカッターマークが見られるが、所々にき裂(脆性ピット)などの脆性損傷痕が見られた。切り込みが $d=0.1\text{mm}$ の場合、 $\phi=0^\circ$ の位置では、工具送り量をピッチとするカッターマークが若干は見られるが、仕上げ面はそのほとんどがき裂などの脆性損傷痕であった。しかし、 $\phi=45^\circ$ の位置では、のこ刃状の送りマークが形成された。これは切れ刃稜が被削材に正確に転写されたものではなく、工具切れ刃に微小チップングを生じ、切れ刃転写性が低下したことが原因であると考えられる。しかしながら、加工面には先述したき裂などの脆性損傷は見られず、工具送り量に対応するカッターマークが見られることから、延性モード切削がなされたと推定できる。

次に粗さについてみてみると、切り込み d が0.06, 0.08mmの場合、表面粗さPVはどの切削方向においても大きくなり数ミクロンであった。切り込みが $d=0.1\text{mm}$ の場合、上記の2つの切り込みとは異なり、Fig. 15に示すように表面粗さPVにばらつきが見られた。特に切削方向が $\phi=45, 135, 225, 315^\circ$ 近傍では小さい値になり、最小で79nmの粗さであった。表面粗さ R_a はPV値と同様の变化を示した。

今回の微小切り込み切削においては切り込みが大きい方が延

性モード切削になり、切り込みが小さいと脆性モード切削になるという結果を得た。この結果は他のシリコンを切削した研究結果^{9), 7)}と異なる。これは3.2節のFig. 8に示すように工具摩耗の影響によるものだと考えられる。実験は切り込みが $d=0.06\text{mm}$ からはじめ、順々に切り込みを大きくしていった。また、他の工具で前加工を行ったときに生じた表面の破壊層を落とすために数回切削を行ったあと信号測定などを行う本実験を行った。実験にはすべて同じ工具を使用したため、Fig. 8に示すように摩耗によって徐々に切れ刃に丸味が付き、有効すくい角 γ がネガティブになり被削材に圧縮の応力がかかることによって延性モードによる加工が助長されたと考えられる⁹⁾。このために、切り込みが小さい場合には脆性モードになり、逆に大きい場合は延性モードになったと考えられる。

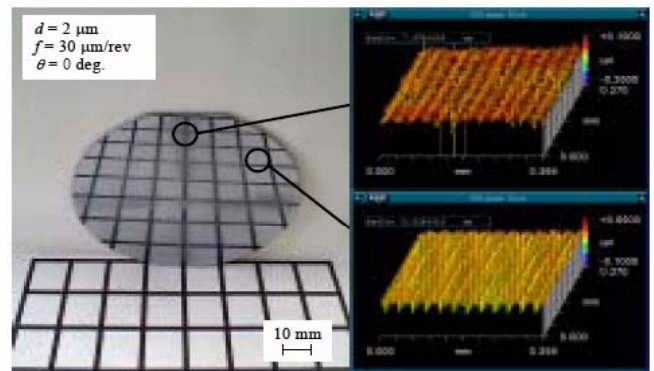


Fig. 14 Sample photograph and surface texture

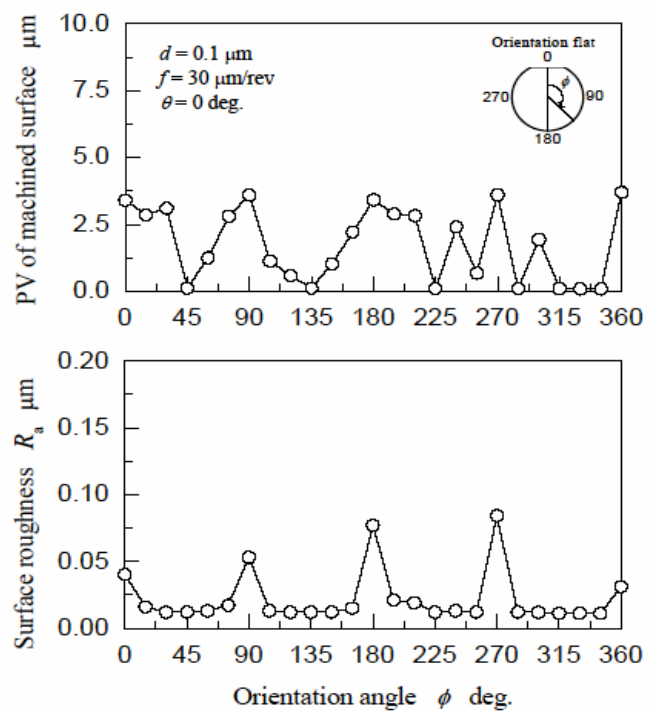


Fig. 15 Surface roughness

微小切り込み切削においては、加工面が全面鏡面を得るに至らなかったが、切り込みが $d=0.1\text{mm}$ の場合、1/4回転周期で延性・脆性の切削モードが変化する興味深い加工面を得

た。他の切込みでは延性モード切削にならなかったので以後、切込みが $d=0.1\text{mm}$ の場合について考察を行う。

ここで、微小送り切削で定義した手法が微小切込み切削にも適用できるかを試みた。Fig. 16に被削材一回転中における切削抵抗と切削分力比を示す。主分力 (F_x) はほとんど変動はなかった。背分力 (F_y) は切削方向によって値が変化し、 $\phi=0, 90, 180, 270^\circ$ 近傍では小さい値になり、その他の方向では大きい値になった。また、切削分力比も変動が大きくなったが、背分力の変化に準じて切削方向が $\phi=0, 90, 180, 270^\circ$ のとき小さい値になった。一方、微小送り切削では、切削分力比がある一定の値を下回った場合には脆性モード切削がなされ、加工面にはき裂やピットなどの脆性損傷が生じた。次に、微小切込み切削においても切削分力比によって延性モード切削と脆性モード切削とを判別できるかを検証する。

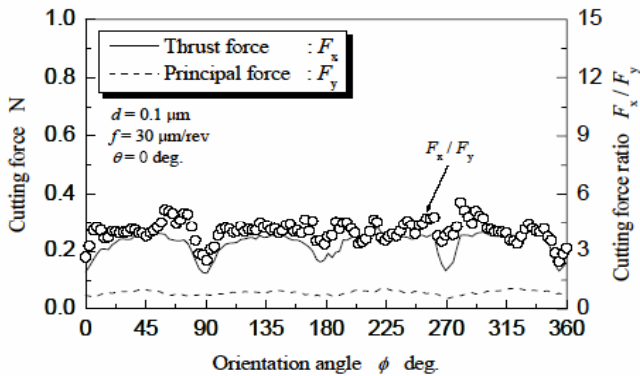


Fig. 16 Relations between orientation angle ϕ and cutting force or cutting force ratio F_x/F_y

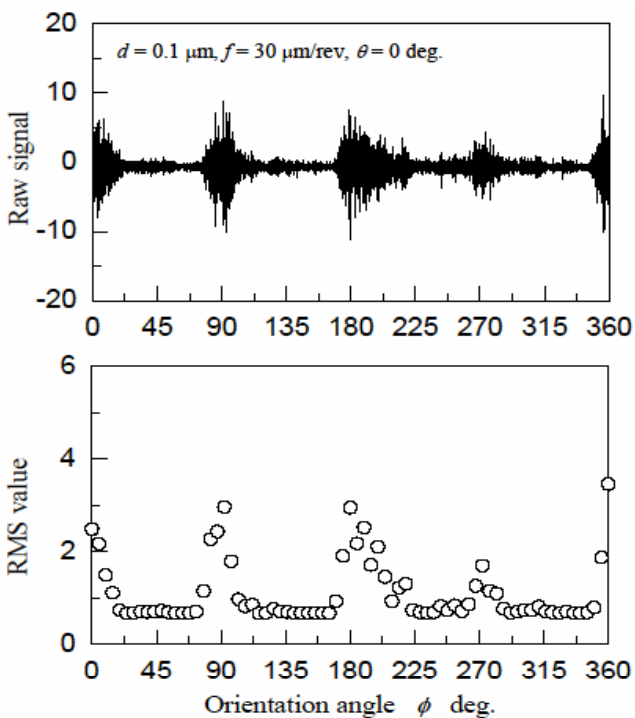


Fig. 17 Relations between orientation angle ϕ and Raw signal or RMS value of AE signal

切削方向が $\phi=0, 90, 180, 270^\circ$ 近傍においては、切削分力比は値が小さくなりこの方向は脆性モード切削がなされたことになる。Fig. 15に示す仕上げ面粗さと比較した場合、定量的にはやや異なるが、定性的にはほぼ一致した結果であるといえる。このことから、微小送り切削で得られた切削分力比による延性・脆性モード切削の判別法は定量的にはやや異なるが定性的には微小切込み切削においても有効であった。以上より、切削抵抗を測定し切削分力比を監視することによって延性モード切削と脆性モード切削を判別する可能性を得た。

4. 2 AE信号の測定結果

Fig. 17にAE信号の波形とRMS値を示す。AE信号は被削材が一回転する間に大きな変動が見られた。特に、切削方向が $\phi=0, 90, 180, 270^\circ$ 近傍では突発的にAE信号の振幅が大きくなった。しかし、その他の方向では振幅は非常に小さい値になっている。Fig. 15の表面粗さと比較すると、表面粗さ PV および表面粗さ R_a に関しては定性的にはほぼ一致しているといえる。また、Fig. 16の切削分力比との関係を見ると AE_{RMS} が大きくなった場合、切削分力比は小さくなり、また反対に AE_{RMS} が小さくなった場合、切削分力比は大きくなった。このように、AE信号と表面粗さには密接な関係が見られ延性モード切削と脆性モード切削を判別できるパラメータになりうると考えられる。

5. 結 言

単結晶ダイヤモンド工具を用いて、微小送り切削と微小切込み切削という2通りの切削方式によって、単結晶シリコンの超精密切削加工を行った結果、以下の結論が得られた。

- (1)微小送り切削を行った場合、工具送り f および切込み d が小さい場合、被削材全面にわたりカッターマークが転写され延性モード切削がなされ、平均して表面粗さ PV が約 42nm 、 R_a が約 5nm の完全な鏡面が得られた。
- (2)微小切込み切削を行った場合、工具切込みが $d=0.1\text{mm}$ 、送りが $f=30\text{mm/rev}$ のとき、切削方向によって切削モードが約 $1/4$ 回転周期で変化し、切削方向が $\phi=0, 90, 180, 270^\circ$ のとき脆性モード切削がなされその他の切削方向では延性モード切削がなされた。
- (3)微小送り切削を行った場合、脆性モード切削がなされたときの切削分力比(背分力/主分力)は小さい値になり、逆に延性モード切削の場合大きい値になった。
- (4)微小切込み切削を行った場合、脆性モード切削の場合AE信号のRMS値は大きくなり、切削分力比(背分力/主分力)は小さい値になった。延性モード切削の場合、逆の傾向を示した。

参 考 文 献

- 1) 杉田 忠彰, 他2名: 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) 2138
- 2) 宮下 政和: ぜい性材料の延性モード研削加工技術 — ナノ研削技術への道 —, 精密工学会誌, **56**, 5 (1990)
- 3) M. Sharif Uddin, et al., Effect of cryctallographic orientation on wear of diamond tools for nano-scale ductile cutting of silicon, *Wear* 257 (2004) pp.751-759.
- 4) 柴田 隆行, 他2名: 単結晶シリコンの超精密切削における延性/ぜい性遷移機構, 精密工学会誌, **65**, 10 (1999)
- 5) 閻 紀旺, 他2名: 大きな負のすくい角工具による延性・ぜい性遷移, 精密工学会誌, **66**, 7 (2000)
- 6) 市田 良夫, 他2名: 単結晶シリコンの延性モード鏡面切削 (第一報) — 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)
- 7) 呉 東権, 他2名: 単結晶シリコンの切削加工に関する研究 (第一報, 脆性-延性遷移に伴う加工表面性状の変化), 日本機械学会論文集, C編, **59**, 557 (1993), pp. 283-288.
- 8) 森脇 俊道: AEによる切削状態認識の現状と将来, 日本機械学会論文集, **89**, 807 (1985)

