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*

閻 紀旺** 庄司克雄*** 鈴木浩文† 厨川常元***

Ductile Regime Turning of Single Crystal Silicon with a Straight-Nosed Diamond Tool

Jiawang YAN, Katsuo SYOJI, Hirofumi SUZUKI and Tsunemoto KURIYAGAWA

Single crystal silicon is machined with a straight-nosed diamond tool and the fundamental machining characteristics are investigated. By obtaining the critical depth of cut based on a simple geometrical model, the effect of crystalline anisotropy on brittle-ductile transition is studied. A homogeneous smooth surface is obtained by controlling the undeformed chip thickness below the minimum critical depth of cut. The cutting chip morphology and machined surface texture with the variation of undeformed chip thickness are observed. An intermediate cutting mode is found to exist between the ductile mode and the brittle mode. Ductile regime turning with generating continuous ribbon chips is realized at a large tool feed rate. By adopting a diamond tool with chamfered rake face, the machined surface roughness is improved.

Key words: diamond turning, single crystal silicon, straight-nosed tool, brittle-ductile transition, chip formation, critical depth of cut, crystalline anisotropy

1. 緒 言

単結晶ダイヤモンドバイトを用いた硬ぜい材料の超精密切削（以下、硬ぜい材料のダイヤモンド切削と呼ぶ）に関しては、これまで多くの研究が行われている。そして切取り厚さを十分小さくすれば加工状態がぜい性モードから延性モードへ遷移することが明らかになり、そのときの切取り厚さは臨界切取り厚さ d_c と呼ばれている¹⁾。しかし、 d_c がどのような結晶学特性や切削因子に依存するのか、本質的な問題はまだ完全に解明されていない。そこで本研究では、これらの問題を明らかにする前提として、まず臨界切取り厚さ d_c をより正確に測定することを試みた。

通常、基礎的な金属の切削実験では平剣バイト（以下、単に平バイトと呼ぶ）が用いられ、2次元切削が行われる。しかしぜい性材料のダイヤモンド切削では、先丸もしくは先端にアールのついたダイヤモンドバイト（以後アールバイトと呼ぶ）が用いられることが多い^{2)~7)}。これは、アールバイトを用いると刃先近傍では切取り厚さを非常に小さくすることができるためであろう。しかし一方、刃元側では切取り厚さが大きくなり、刃先付近では延性モード切削が行われても、刃元側ではぜい性モード切削になることも起こり得る。そのため、切削を急停止し、中断した切削面の状態から d_c を推定する方法が行われている^{1) 3)}。

これに対して、平バイトによる切削では切れ刃全体にわたって切取り厚さが同じになり、切削状態も一樣になる。したがって、仕上面の状態から容易にぜい性モードから延性モードへの遷移を識別することができ、 d_c をより正確に測定することができる。しかし2次元切削では、工作物1回転あたりの送りが切取り厚さになる。したがって硬ぜい材料で延性モード切削を行うには、工作物の回転数を非常に高くするか、送りを微小にする必要がある。しかし切削速度が高いとバイトの摩耗が大きい。また筆者らの実験装置では、刃物台に極めて微小な送りを安定して与えることが困難であった。そこで本研究では、平バイトに微小な切込み角を与えてSiの正面を傾斜切削し、その切削面の状態から延性・ぜい

性遷移点を同定することによって臨界切取り厚さ d_c を求め、基本的な加工特性について検討した。

2. 平バイトによる傾斜切削の切削モデル

アールバイトによる正面削りの切削モデルを図1(a)のように考える。図から明らかなように、切取り厚さ h は切れ刃に沿って変化する。したがって、いま刃元側すなわち工作物の前加工面の表面付近でぜい性モード切削が行われているとすれば、臨界切取り厚さ d_c に対応する切削点が存在する。この切削点が刃先側に近く、ぜい性破壊によるクラック層が仕上面にまで及べば、仕上面は破碎によって形成された面になる。また送り f が十分小さく、 d_c に対応する切削点が刃元側に近づきクラック層が仕上面に達しなければ、仕上面は塑性変形によって形成された面になる。

これに対して、平バイトによる旋削の場合の切削モデルを図1(b)に示す。この場合はアールバイトのときと異なり、切れ刃全体にわたって切取り厚さ h が同じで、切削状態が一樣になる。いま、送りを f 、切込み角を κ とすると、切取り厚さ h は切込み量 a と無関係に次式で与えられる。

$$h = f \cdot \sin \kappa \quad (1)$$

したがって切込み角 κ を小さく設定すれば、微小送りをせずに h を d_c 以下にすることができ、延性モード切削を容易に実現することができる。そのときの送りを臨界送り f_c とすれば、 f_c と d_c の間には、次式の関係が成り立つ。

$$d_c = f_c \cdot \sin \kappa \quad (2)$$

このように平バイトの場合は、切取り厚さと仕上面状態が一対一に対応するから、臨界切取り厚さ d_c を一意的に決めることができる。すなわち h が d_c より大きい場合には切削領域にクラックが発生するから、仕上面が梨地状になる（ぜい性モード切削と呼ぶ）。一方、切取り厚さ h が d_c より小さい場合は、切れ刃全長にわたってクラックのない切削状態になり、仕上面は良好な鏡面となる（延性モード切削と呼ぶ）。

* 原稿受付 平成10年3月27日

** 学生会員 東北大学大学院（仙台市青葉区荒巻青葉01）

*** 正会員 東北大学大学院工学研究科

† 正会員 東北大学（現、防衛大学校；横須賀市走水1-10-20）

^{††} ここでは、切れ刃に垂直な“Undeformed chip thickness”の意味で、「切取り厚さ」と呼ぶ。

Fig.1 Comparison of ductile regime cutting mechanism

3. 実験装置および方法

3.1 実験装置

実験には、超精密正面旋盤（豊田工機（株）製 AHP 20-25N）を用いた。その概略を図 2 に示す。主軸は油静圧軸受で支持されており、最大回転数は 8000rpm である。X テーブルは油圧による駆動で、送りは 0~1000mm/min まで無段階変速可能である。Z テーブルは DC サーボによる駆動で、1 μ m/step である。また防振のため、油圧装置などの周辺装置を除き旋盤本体を 4 個のエアマウント上に設置した。バイトの切込み角 κ は Z テーブル上に搭載した精密刃物台により 0.01° の精度で設定できるようにした。切込み角設定後は調整機構を締結し、バイトの支持剛性の低下を防いだ。

3.2 切削条件

切削条件を表 1 に示す。工作物として直径 76mm、厚さ 6mm の単結晶 Si ウエハ（100）面を用いて正面切削を行った。ラッピングウエハを使用する際には、あらかじめ切削により鏡面仕上げした後、実験を行った。

実験に供したダイヤモンド平バイトの形状を図 3 に示す。主切れ刃の長さは 1.2mm で、すくい角、逃げ角はそれぞれ -20° 、 26° に設定した。また走査型電子顕微鏡（SEM）で観察した主切れ刃の写真と SEM の 3 次元形状解析装置（電子光学研究所（株）RD-300 型）で測定した断面プロファイルの一例を図 4 に示す。図から明らかに、切れ刃エッジの丸み半径は約 40nm であった。なお切りくず収集の際には、乾式で切削したが、それ以外は切削液として白灯油を噴霧状にして用いた。また、すべての実験において、主軸の回転数は 3000rpm、切込み量 a は 1 μ m にした。

3.3 測定および評価方法

切込み角 κ は、アルミニウムのダミー材を正面削りで切削し、加工面に転写された切れ刃形状を触針式形状測定機（Form Talysurf）で測定して求めた。切りくずの観察は SEM により、加工表面の観察はノマルスキ微分干渉顕微鏡を用いて行った。また、工作物の表面粗さは Form Talysurf により測定した。

Fig.2 Schematic illustration of the experimental apparatus

Table 1 Cutting conditions

Cutting tool	Single crystal diamond tool
Main cutting edge	1.2 mm
Rake angle	-20°
Relief angle	26°
Workpiece	Single crystal silicon (100)
Spindle rotation	3000 rpm
Depth of cut	1 μ m
Feed rate	0~42 μ m/rev
Cutting edge angle	$0.05 \sim 2^\circ$
Coolant	Kerosene mist

Fig.3 Shape of the straight-nosed diamond tool

Fig.4 SEM image and sectional profile of cutting tool edge

Fig.5 Nomarski micrograph of surface machined at varied feed rates

Fig.6 Variation of d_c with crystalline orientation

(a) Variation of surface feature with h

(b) Variation of surface roughness

Fig.7 Variations of surface feature and surface roughness on Si (100)

4. 結晶方位に伴う被切削性の異方性

延性・ぜい性遷移点の同定は、仕上面をノマルスキ顕微鏡で観察することによって行った。図5は、切込み角 κ を 0.8° に固定し、半径25mmの近傍で送り f を $0 \sim 20 \mu\text{m}/\text{rev}$ の間で連続的に変えて切削を行い、その仕上面をオリエンテーションフラットからの方位角 $\phi = 45^\circ$ の位置でノマルスキ顕微鏡により観察した例である。送りの小さい領域(a)では、ぜい性破壊による孔食状の穴(以下、ピットと呼ぶ)が全く見られない。これに対して送りの大きい領域(c)では、仕上面全体がぜい性破壊による梨地状を呈した。そして領域(b)はこれらの境界領域で、部分的にピットが見られた。そこで本研究では、ぜい性破壊が始まる領域(b)と領域(a)の境界を延性・ぜい性遷移点とし、そのときの送りを臨界送り f_c とした。図5の例では、 $f_c = 5 \mu\text{m}/\text{rev}$ であり、式(2)から臨界切り厚 $d_c = 70 \text{nm}$ が得られる。

さてSiのような単結晶材料では、結晶方位による切削特性の異方性のために、切削面に羽根車状の模様が現れることがある。これは結晶面による引張り強さの違い⁴⁾、あるいはすべりやすさの違い⁵⁾によって説明されている。本研究では、より実用的な観点から臨界切り厚 d_c の異方性として評価した。

図6は、Siの(100)面ウエハを以上のような方法で切削し、オリエンテーションフラットを基準にした方位角 $\phi = 0 \sim 180^\circ$ の範囲で臨界切り厚 d_c を求めたものである。 $\phi = 45^\circ, 135^\circ$ の方位(それぞれ結晶方位 $\langle 010 \rangle, \langle 100 \rangle$ に相当)で d_c が最も小さく、延性モード切削が行われ難いことが分かる。したがって、切削面全体にわたって一様な鏡面を得るには、切り厚 h をその面の臨界切り厚の最小値(最小臨界切り厚 d_{cmin})以下に設定する必要がある。

図7(a)は、切込み角 κ と送り f を変数にして以下の3種類の切り厚 h で切削したSiの(100)面ウエハ(3in)の仕上面の写真である。切削条件は、① $f = 10 \mu\text{m}/\text{rev}$, $\kappa = 0.8^\circ$, $h = 140 \text{nm}$; ② $f = 20 \mu\text{m}/\text{rev}$, $\kappa = 0.8^\circ$, $h = 280 \text{nm}$; ③ $f = 10 \mu\text{m}/\text{rev}$, $\kappa = 0.2^\circ$, $h = 35 \text{nm}$ であった。①は、 h が d_{cmin} と臨界切り厚の最大値 d_{cmax} の間にあるため、延性モードの切削面とぜい性モードの切削面からなり、羽根車状の模様が現れた。②は $h > d_{cmax}$ の条件で、全域がぜい性モード切削となった。さらに③は $h < d_{cmin}$ の場合で、全体が延性モード切削となっている。図7(b)は、バイトの送り方向の表面粗さ R_y の測定結果である。主軸回転数は3000rpmであったが、①, ②, ③各領域内では半径方向の表面粗さの有意差は見られず、この条件の範囲では切削速度の影響はほとんどないと考えられる。

5. 切り厚の変化に伴う切削形態の遷移

5.1 切りくずと加工表面の形態

次に、結晶方位を $\phi = 45^\circ$ ($\langle 010 \rangle$)に固定し、切り厚 h に伴う切りくずと加工表面の形態の変化を調べた。その代表的な例をそれぞれ図8, 図9に示す。いずれも(a), (b), (c)は、それぞれ図5の(a)領域, (b)領域, (c)領域に相当する。図8(a)は流れ型に近い連続的なポン状の切りくずで、延性モード切削が行われたことを裏付けている。(b)は線状の切りくずでせん断型に近いと考えられる。これに対して(c)は不規則な粒状で、むしろ型切りくずに相当すると考えられる。これらの切りくずに対応して加工表面(図9参照)は、図5で述べたように、(a)クラックがなく、滑らかな表面、(b)細かいびびり状のマークからなり、細かなピットが散在する面、(c)クレータとクラックからなる梨地面となっている。

以上の実験を切込み角 κ と送り f をそれぞれ $0.1 \sim 2.0^\circ$, $2.5 \sim 42 \mu\text{m}$ の範囲で変え、そのときの表面状態から切削モードを(a), (b), (c)に分類した。図10は、オリエンテーションフラットからの方

図8 (a) $f = 10 \mu\text{m/rev}$, $\kappa = 0.2^\circ$, $h = 35 \text{ nm}$ (b) $f = 20 \mu\text{m/rev}$, $\kappa = 0.3^\circ$, $h = 105 \text{ nm}$ (c) $f = 40 \mu\text{m/rev}$, $\kappa = 1.0^\circ$, $h = 698 \text{ nm}$

Fig.8 Scanning electron micrographs of chips

(a) $f = 10 \mu\text{m/rev}$, $\kappa = 0.2^\circ$, $h = 35 \text{ nm}$ (b) $f = 20 \mu\text{m/rev}$, $\kappa = 0.3^\circ$, $h = 105 \text{ nm}$ (c) $f = 40 \mu\text{m/rev}$, $\kappa = 1.0^\circ$, $h = 698 \text{ nm}$

Fig.9 Nomarski micrographs of machined surfaces ($\phi = 45^\circ$)

Fig.10 Variation of surface texture with f and κ

位角 $\phi = 45^\circ$ の方向で観察した結果である。図で破線は、式(1)から計算した切り厚 h の等値線を示す。この結果から、切削モードは切り厚 h に一義的に依存し、 $d_c \approx 70 \text{ nm}$ であり、 150 nm 以上では梨地状の切削面になることが明らかである。

5.2 仕上面粗さへの影響

次に、送り f を $10 \mu\text{m/rev}$ と一定にして切込み角 κ を $0.05 \sim 2.0^\circ$ まで変え、切り厚と仕上面粗さの関係について調べた。表面粗さは d_c が最も小さい $\phi = 45^\circ$ の方向で測定した。その結果を図 11 に示す。図で破線は、工具形状が完全に転写されると仮定して幾何学的考察によって求めた仕上面粗さ R_y で、次式で与えられる。

$$R_y = \frac{f}{\cot \kappa' + \cot \kappa} \quad (3)$$

ここで κ' は副切込み角で、図 11 では、 $\kappa' = 45^\circ - \kappa$ 、 $f = 10 \mu\text{m/rev}$ である。

また 図 12 に、(a)延性モード域、(b)境界域、(c)ぜい性モード域のそれぞれについて、代表的な断面曲線の測定結果を示す。延性

Fig.11 Variation of surface roughness with cutting edge angle

モード切削域では、幾何学的な表面粗さの理論値にほぼ一致し、切り厚が小さいほど表面粗さは小さくなった。しかし切り厚が極端に小さくなると ($\kappa = 0.05^\circ$)、逆に粗さの劣化が見られた。これは、切り厚が過剰に小さくなったために切れ刃エッジの丸みにより実効すくい角が負の方向でかなり大きくなったためと考えられる。いま、正常な延性モード切削が行われる切り厚の最小値を $h_{\min}$ とすれば、良好な鏡面を得るには、

$$h_{\min} \leq h \leq d_c \quad (4)$$

でなければならない。

5.3 特殊バイトによる仕上面粗さの改善

$h_{\min}$ は、その定義から、エッジの丸み半径とほぼ同程度の値になると考えられる。したがって粗さを小さくするにはできるだけエッジのシャープなバイトが望ましい。いま最小の仕上面粗さを達成するために $h_{\min}$ の切り厚で切削すると、式(1)から次式が得られる。

Fig.12 Surface profiles at various cutting edge angles

Fig.13 Diamond tool with chamfered rake face

Fig.14 Nomarski micrograph and profile of surface machined with the chamfered diamond tool

$$\sin \kappa = \frac{h_{\min}}{f} \quad (5)$$

式(5)を式(3)に代入し、 κ を消去すれば次式が得られる。

$$R_y = \frac{f}{\cot \kappa' + \sqrt{\left(\frac{f}{h_{\min}}\right)^2 - 1}} \approx h_{\min} \quad (6)$$

なお近似式は κ は微小であるとし、 $\kappa' = 45^\circ$ として求めた。

式(6)から明らかなように、 R_y を $h_{\min}$ 以下にするには κ' を κ と同程度に微小にしなければならない。しかし、実際にはこのような微小な角度で副切れ刃の研磨を行うことは非常に困難である。そこですくい面に面取りを行い、逃げ角を利用して微小な面取り角を作ろうとする試みが行われている⁸⁾。図13はその一例で、すくい角 $\gamma = 0^\circ$ 、直角逃げ角 $\alpha_n = 3^\circ$ 、刃先角 135° のバイトすくい面に $\theta_c = 0.8^\circ$ の面取りを行ったものであり、切れ刃の面取り角 $\theta_r = \tan^{-1}(\tan \alpha \cdot \sin \theta_c) = 0.042^\circ$ になった。これを利用してすくい角を $\gamma = -20^\circ$ に設定すると、切れ刃の実効面取り角、すなわち $\kappa' + \kappa$ は 0.34° になった。いま κ を 0.1° とすれば、 $\kappa' = 0.24^\circ$ である。この特殊バイトを用い、切込み量 $1\mu\text{m}$ 、 $\kappa = 0.1^\circ$ 、 $f = 12\mu\text{m}$ 、 $h = 21\text{nm}$ の条件で切削実験を行った。図14は、このときの仕上面の写真および断面曲線で、仕上面粗さ $15.6\text{nm}R_y$ を達成した。なお、式(3)によるこのときの理論粗さ R_y は 14.8nm である。

延性・ぜい性遷移点はバイトのすくい角に左右される^{1)~3)}。本研究では、すべてすくい角は -20° とした。すくい角の影響については、引き続き研究を行う予定である。

6. 結 言

単結晶 Si の切削実験において、従来のアールバイトでなく平バイトを用いた傾斜切削法を提案した。これによって、切削り厚さを極めて小さくしかも切れ刃全長にわたって一様に行うことができるため、臨界切削り厚さ d_c をより正確に求めることができる。提案に基づいて行った実験から得られた結論をまとめると次のようになる。

- (1) 延性・ぜい性遷移点は、臨界切削り厚さで一意的に評価できる。
- (2) 切削形態は、切削り厚さにより延性モード切削域、境界域、ぜい性モード切削域の3つに分類できる。延性モード切削域では流れ型に近いリボン状の切りくずが確認された。
- (3) 結晶方位により臨界切削り厚さ d_c が著しく異なる。したがって全面均一な延性モードの切削面を得るには切削り厚さを最小臨界切削り厚さ以下に設定しなければならない。
- (4) 延性モード切削域では、仕上面粗さは幾何学的な理論値にほぼ近い値が得られた。
- (5) 正常な延性モード切削が行われるためには、ある値以上の切削り厚さが必要である。その最小切削り厚さは、切れ刃のエッジ丸みの大きさに依存する。
- (6) 副切込み角を小さくすることにより、切込み量 $1\mu\text{m}$ 、送り $12\mu\text{m/rev}$ で $15.6\text{nm}R_y$ の表面粗さを達成した。

参 考 文 献

- 1) P.N. Blake and R. O. Scattergood : Ductile Regime Machining of Germanium and Silicon, J. Amer. Ceram. Soc., **73**, 4 (1990) 949.
- 2) W.S. Blackly and R.O. Scattergood : Ductile-regime Machining Model for Diamond Turning of Brittle Materials, Prec. Eng., **13**, 2 (1991) 95.
- 3) T. Nakasuji, S. Koder, S. Hara, H. Matsunaga, N. Ikawa and S. Shimada : Diamond Turning of Brittle Materials for Optical Components, Ann. CIRP, **39**, 1 (1990) 89.
- 4) W.S. Blackly and R.O. Scattergood : Crystal Orientation Dependence of Machining Damage - A Stress Model, J. Am. Ceram. Soc., **73**, 10 (1990) 3113.
- 5) T. Shibata, S. Fujii, E. Makino and M. Ikeda : Ductile-regime Turning Mechanism of Single-crystal Silicon, Prec. Eng., **18**, 2/3 (1996) 130.
- 6) 市田良夫, ベン フレジ 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, 精密工学会誌, **64**, 4 (1998) 608.
- 7) T.P. Leung, W.B. Lee and X.M. Lu : Diamond Turning of Silicon Substrates in Ductile-regime, J. Mater. Proc. Tech., **73** (1998) 42.
- 8) 浜田 洋: 超精密加工用ダイヤモンドバイト, 精密機械, **51**, 9 (1985) 9.