

ダイヤモンド工具による単結晶シリコンの超精密加工状態監視 - 工具すくい角の影響 -

鹿児島県工業技術センター 岩本竜一, 鹿児島大学工学部 近藤英二
鹿児島県工業技術センター 市来浩一, 鹿児島大学工学部 皮籠石紀雄, 鹿児島大学大学院 大久保徳之

Ultra-precision Cutting Process Monitoring of Single Crystal Silicon by Diamond Tool
- Influence of Rake Angle -

Kagoshima Prefecture Institute of Industrial Technology IWAMOTO Ryuichi, Kagoshima University KONDO Eiji
Kagoshima Prefecture Institute of Industrial Technology ICHIKI Koichi
Kagoshima University KAWAGOISHI Norio, OKUBO Noriyuki

Abstract It is known in ultra-precision cutting of brittle materials by a single crystal diamond tool that ductile mode cutting will be attained in general, when the amount of depth of cut is smaller than a certain critical value and cutting tool has negative rake angle. However, it is very difficult to keep ductile mode cutting, this amount of critical depth of cut are very small. In this research, the cutting force and AE-signals were investigated for the purpose of clarifying the effective parameter for distinguishing brittle and ductile mode cutting in an in-process.

1. はじめに

ダイヤモンド工具による脆性材料の超精密加工において, 工具切込み量のある臨界量以下で加工すると延性モード加工が可能となり, また, 工具すくい角を負にした方が延性モードで加工しやすいと知られている¹⁾²⁾. 一般に, この臨界切込み量は非常に小さいために, 常に延性モードとなる切削条件を設定することは困難である. しかし, インプロセスで加工状態をモニタリングすることにより, 常に延性モードとなるよう制御できれば, 安定した加工を行うことが可能となる. そこで, 本研究では, 脆性および延性モード加工をインプロセスで判別するための有効なパラメータを明らかにすることを目的とし, 単結晶シリコンを工具すくい角を変えて超精密加工したときの切削抵抗, AE信号と脆性・延性モードとの関係を調べた.

2. 実験装置および方法

実験は, 超精密旋盤(豊田工機(株) AHN60-3D)に単結晶天然ダイヤモンドのスローアウェイ R パイト(R=2mm)を取り付け, 厚さ1mmの単結晶シリコンを正面切削した. 工具すくい角の変更は, R パイト形状を変えずに工具ホルダの形状を変更することで実現したため, すくい角と同時に逃げ角も変更されている. 単結晶シリコンの形状を図1に示す. 図中の記号は, オリフラからの角度を表し, 以下では切削方向を方位角で表す. 切削加工時の切削抵抗および AE 信号は, それぞれ切削動力計(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)を用いて計測した. 加工後は走査型白色干渉計(Zygo New View 5032(以下 ZYGO))で加工面を観察し加工面粗さを測定した. 実験装置を図2に, 切削条件を表1に示す. なお, 理論粗さは0.056 μm となる.

3. 実験結果

3.1 加工面粗さ

工具すくい角 0° , 工具ノーズ半径2mm, 工具切込み量 $d=0.1\mu\text{m}$, 送り速度 $f=30\mu\text{m/rev}$ で切削を行って得られた加

工面の概観および概略図を図3に示す. 加工面性状は切削方向によって著しく異なり, 方位角が $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ の場合(以下方位角 0° と略す)と $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ の場合(以下方位角 45° と略す)とに大別される. 前者は梨地面になり後者は虹面あるいは鏡面に近い光沢面になった. 図4にZYGOで加工面を観察した結果を示す. 前報³⁾で述べたように図4(a)のような場合を脆性面と, 図4(b)のような場合を延性面と定義する.

図5に工具すくい角 0° で, 工具切込み量 d を変化させたときの表面粗さ(PV値), および切削速度の違いによる加工面の表面粗さへの影響を示す. 工具切込み量 d が $0.1\mu\text{m}$ の場合は1/4回転周期で脆性面と延性面が交互に現れ, 表面粗さも同様の变化を示している. 脆性面の表面粗さは約 $4\mu\text{m}$ 程度で, 延性面では表面粗さ85nm程度が得られた. しかし, 工具切込み量 d が $0.06, 0.08\mu\text{m}$ の場合, 脆性面となり表面粗さも大きくなった. また, 切削速度の速い外側(188m/min)は, 1/4回転周期で脆性面と延性面が交互に現れるが, これに比べ切削速度の遅い内側は方位角に関わらず全て脆性面であり, 切削速度が早いほうが延性モード加工となりやすいと言える.

図6に工具すくい角 15° で同様の実験を行った結果を示す. 加工面はいずれも曇り面あるいは虹面となり完全な鏡面は得られなかったが, 脆性面は認められず, 全て図4(b)のような特徴を有する延性面となった. 表面粗さは $2\sim 4\mu\text{m}$ 程度が得られ, すくい角 0° の場合に比べやや小さくなり, かつ, 方位角 45° の方が方位角 0° より小さくなる傾向が見られる. また, 工具切込み量が小さい方が表面粗さはやや小さくなるが切削速度の影響はほとんど認められない. 工具すくい角を負にすることにより, 表面粗さに及ぼす方位角の影響は小さくなったが, 工具すくい角 0° の時の表面粗さ85nm程度という高品位な仕上げ面は得られなかった.

3.2 切削抵抗およびAE信号

図7(a)に工具すくい角 0° , 工具切込み $d=0.1\mu\text{m}$, 送り速度 $f=30\mu\text{m/rev}$ で切削を行ったときのAE信号のエンベロープと背分力を示す. AE信号は方位角 0° の時に高い

値となり、方位角 45° の時に低い値となった。逆に、背分力は方位角 0° の時に低い値となり、方位角 45° の時に高い値となった。このことから、延性モード切削がなされる場合、AE 信号は小さな振幅になり、逆に背分力は大きな値になると推定される。また、この AE 信号と背分力の変化は、1/4 回転周期という短時間で交互に現れる脆性面と延性面の変化に時間遅れなく追従しており、インプロセスで加工状態をモニタリングするパラメータとして有効と考えられる。

図 7 (b) に工具すくい角 15°、工具切込み $d = 0.1 \mu\text{m}$ 、送り量 $f = 30 \mu\text{m/rev}$ で切削を行ったときの AE 信号のエンベロープと背分力を示す。AE 信号のエンベロープは工具すくい角 0° の場合に比べ絶対値が小さくなっているが、依然として 1/4 回転周期での変動が見られる。背分力も工具すくい角 0° の場合ほど明瞭ではないが 1/4 回転周期での変動が認めら

れる。このことから、AE 信号と背分力の変化は、図 4 のような明瞭な脆性面と延性面の変化を監視出来るだけでなく、延性加工モード中における表面粗さの微小な変化を監視できる可能性がある。

4. まとめ

- (1) 加工面が延性面になった場合、AE 信号の振幅は小さく、逆に背分力方向の切削抵抗は大きい値を示した。脆性面の場合は、逆の傾向を示した。
- (2) AE 信号と背分力は、延性加工面が得られる中で方位角により異なる表面粗さの違いを監視できる可能性がある。以上のことより加工面性状が切削抵抗と AE 信号により監視できる可能性があることがわかった。

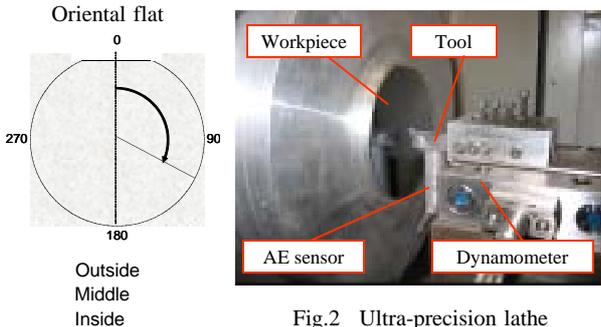
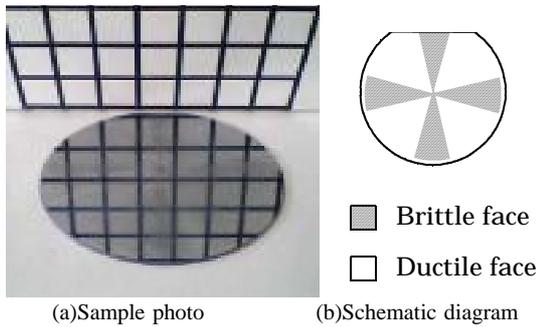


Fig.1 Workpiece

Fig.2 Ultra-precision lathe

Table.1 Cutting conditions

Workpiece	Material	Silicon wafer(100)
	Diameter mm	76.2
Tool	Material	Single crystal diamond
	Nose radius mm	2
	Rake angle deg	0.15
	Clearance angle deg	5.20
Depth of cut d μm		0.06, 0.08, 0.1
Feed rate f $\mu\text{m/rev}$		30(R_2)
Spindle speed rpm		1000
Cutting fluid		Non



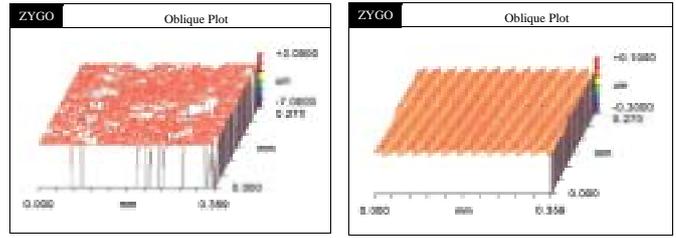
(a)Sample photo

(b)Schematic diagram

Fig.3 Machined surface

参考文献

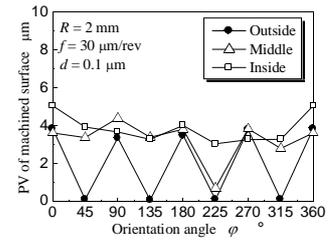
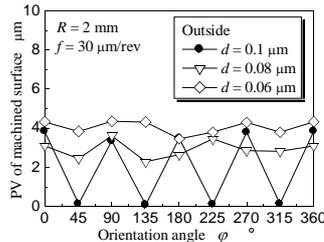
- 1)中村格芳, 後藤崇之, 李木経孝; 単結晶シリコンの超精密切削加工におけるクラック発生に及ぼす結晶方位の影響, 精密工学会誌, 69, 12, (2003), 1754
- 2)間紀旺, 庄司克雄, 田牧純一ら; 単結晶フッ化カルシウムの超精密切削加工, 精密工学会誌, 70, 1, (2004), pp.106-111
- 3)岩本竜一, 近藤英二, 市来浩一ら; ダイヤモンド工具による単結晶シリコンの超精密加工状態監視, 2004 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.503-504



(a)Brittle face

(b)Ductile face

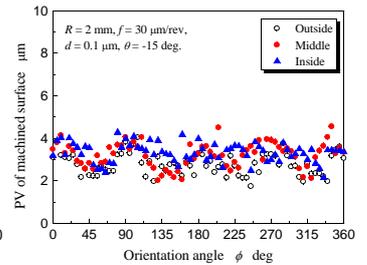
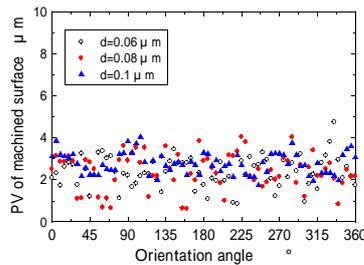
Fig.4 ZYGO image of interferometry



(a)Effect on depth of cut

(b)Effect on cutting speed

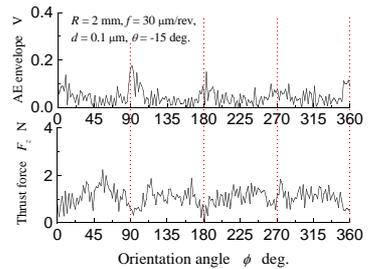
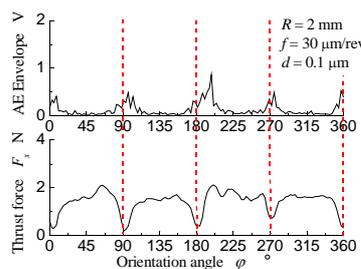
Fig.5 PV-value of machined surface (Rake angle=0deg)



(a)Effect on depth of cut

(b)Effect on cutting speed

Fig.6 PV-value of machined surface (Rake angle=-15deg)



(a) Rake angle=0deg

(b) Rake angle=-15deg

Fig.7 Relationship between AE Envelope amplitude, Thrust force and Oriental Angle