

## 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

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  
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. 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, when carrying out the ultra-precision cutting of a single crystal silicon.

### 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ることが知られている<sup>1),2)</sup>. 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=2,5mm)を取り付け, 厚さ 1mm の単結晶シリコンを正面切削した. 単結晶シリコンの形状を図 1 に示す. 図中の記号  $\theta$  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  $\phi$  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, 表中の送り速度は, 理論粗さが  $0.056 \mu\text{m}$  で同じになるように設定した.

### 3. 実験結果

#### 3.1 加工面粗さ

工具ノーズ半径  $2 \text{ mm}$ , 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  $\phi$  が  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  の場合(以下方位角  $0^\circ$  他と略す)と  $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$  の場合(以下方位角  $45^\circ$  他と略す)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. 方位角  $\phi$  が  $0^\circ$  他の場合, 加工面は掘り起こされたような凹部を特徴とする不規則な凹凸形状が見られ脆性モード加工がなされたと推定される. このような不規則な凹凸形状が見られる面を脆性面と定義する. 一方, 方位角  $\phi$  が  $45^\circ$  他の場合, 送り速度に対応する明確なクッターマークが見られ, 延性モード加工がなされたと推定される. このような面を延性面と定義する.

図 5 に工具ノーズ半径  $2 \text{ mm}$  で, 工具切込み量  $d$  を変化したときの表面粗さ(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. 延性面では表面粗さ  $85 \text{ nm}$  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, 延性面とはならず脆性面と延性面が混在した様な面になり粗さも大きくなった. また, 切削速度の違い(外側  $188 \text{ m/min}$ ) 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違い内側は粗さが大きくなる傾向が見られる.

次に, 工具ノーズ半径  $5 \text{ mm}$ , 送り速度  $f = 47.5 \mu\text{m}$  で同様の実験を行った結果を示す. 加工面はいずれも鏡面とはならず梨地面になった. 図 6 に工具切込み量  $d$  を変化した場合の表面粗さおよび切削速度による加工面への影響を示す. 工具切込み量を変化させた場合,  $d = 0.06 \mu\text{m}$  のとき粗さはやや小さくなったが理論粗さよりはるかに大きい値となり, 工具切込み量による変化は小さかった. また方位角  $\phi$  による違いも見られなかった. 切削速度の違いについては, 速い外側がやや小さくなったがあまり差は見られなかった. 方位角  $\phi$  による違いも見られなかった.

#### 3.2 切削抵抗およびAE信号

図 7 (a) に工具ノーズ半径  $2 \text{ mm}$ , 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  $\phi$  が  $0^\circ$  他の方に高い値となり, 方位角  $\phi$  が  $45^\circ$  他の方に低い値となった. 逆に, 背分力は方位角  $\phi$  が  $0^\circ$  他の方に低い値となり, 方位角  $\phi$  が  $45^\circ$  他の方に高い値となった. この変動は図 4 に示し

た加工面性状の変動と非常に良く一致している．このことから，加工面が延性面の場合，つまり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) に工具ノーズ半径 5 mm，工具切込み  $d = 0.1 \mu\text{m}$ ，送り量  $f = 47.5 \mu\text{m/rev}$  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ノーズ半径 2 mm の場合の方位角  $0^\circ$  他の場合と同等の比較的大きな値を示し，方位角 の変化による周期性は見られない．背分力は，工具ノーズ半径 2 mm の場合よりさらに大きな値を示し，あまり周期性は見られなかった．

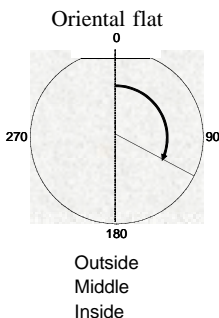


Fig.1 Workpiece

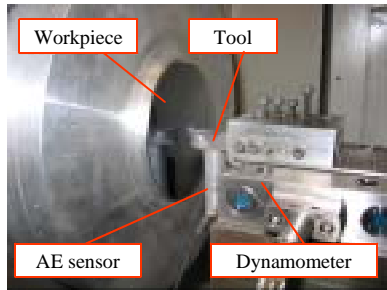


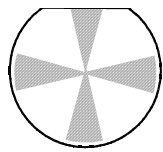
Fig.2 Ultra-precision lathe

Table.1 Cutting conditions

|                               |                     |                        |            |
|-------------------------------|---------------------|------------------------|------------|
| Workpiece                     | Material            | Silicon wafer( 100 )   |            |
|                               | Diameter mm         | 76.2                   |            |
| Tool                          | Material            | Single crystal diamond |            |
|                               | Nose radius mm      | 2, 5                   |            |
|                               | Rake angle deg      | 0                      |            |
|                               | Clearance angle deg | 5                      |            |
| Depth of cut $d \mu\text{m}$  |                     | 0.06, 0.08, 0.1        |            |
| Feed rate $f \mu\text{m/rev}$ |                     | 30( R2 )               | 47.5( R5 ) |
| Spindle speed rpm             |                     | 1000                   |            |
| Cutting fluid                 |                     | Non                    |            |



(a) Sample photo



■ Brittle face  
□ Ductile face

(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; 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

4. まとめ

- (1) 表面粗さ(PV 値)で 85 nm を得ることが出来き，延性モードによる切削が可能になった．
- (2) 切削速度が 0 ~ 188 m/min の範囲では，速度が速い方が延性モード切削になりやすい．
- (3) 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．

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．

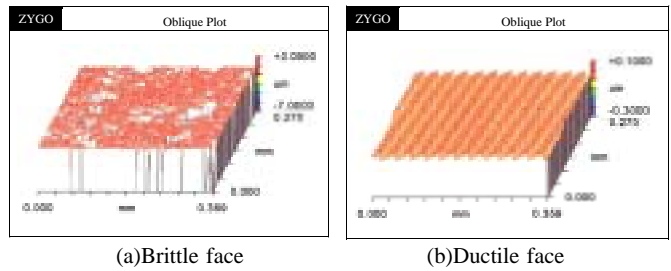


Fig.4 ZYGO image of interferometry

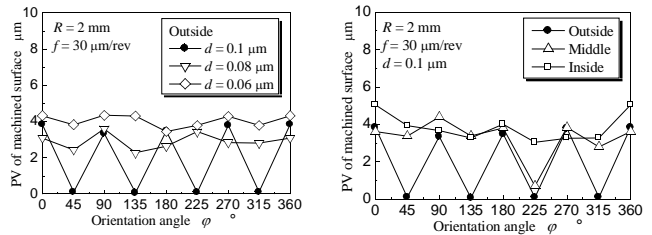


Fig.5 PV-value of machined surface (R=2mm)

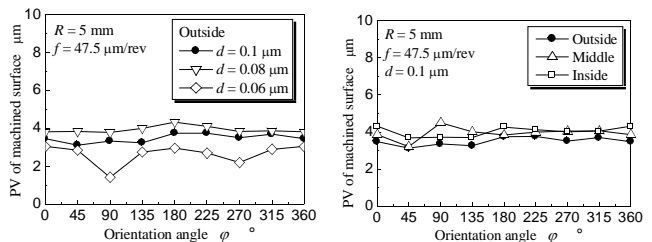


Fig.6 PV-value of machined surface (R=5mm)

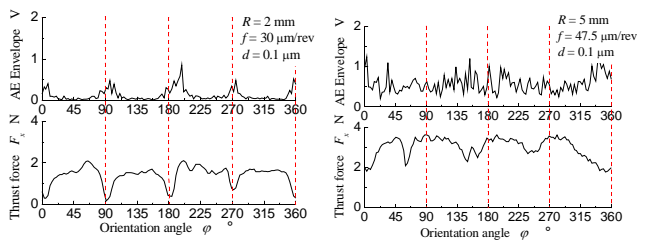


Fig.7 Relationship between AE Envelope amplitude, Thrust force and Oriental Angle