

# ダイヤモンド工具による単結晶シリコンの超精密切削加工の状態監視

## —微小チャンファ付Rバイトの場合—

鹿児島大学 ○永山 聡女, 近藤 英二, 鹿児島県工業技術センター 岩本 竜一

### 要 旨

ダイヤモンド工具による脆性材料の超精密切削加工において、工具切込みをある臨界量以下にすれば、脆性破壊損傷のない平滑な加工面を創生できる延性モード切削が可能である。しかしながら、脆性モード切削から延性モード切削への遷移に影響する因子は多いため、安定した延性モード切削加工は困難である。本研究では、適応制御による延性モード切削の安定化に有効な切削加工プロセスの監視パラメータについて検討した。

### 1. 緒言

ガラスやセラミックスなどの脆性材料は、工具切込みを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生できることが確かめられている<sup>(1)(2)</sup>。この加工法は脆性材料の延性モード切削と呼ばれており、脆性材料の超精密加工における高能率化、高精度化を進めるための新しい加工技術の一つとして注目されている。しかしながら、延性モード切削を実現するための条件、つまり脆性モード切削から延性モード切削への遷移に影響する因子は多く<sup>(3)(4)</sup>、また各因子の影響の程度は明確にされていない。

本研究は適応制御による延性モード切削の安定化に有効な切削加工プロセスの監視パラメータを得ることを目的とし、微小チャンファ付Rバイトで単結晶シリコンを超精密切削加工したときの切削抵抗、AE信号、振動加速度と脆性モード切削、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

実験には、図1に示す超精密正面旋盤を使用した。表1に実験条件を示す。被削材には、直径76.2mm、厚さ6mmの単結晶シリコンを用いた。切削工具には、単結晶シリコンの超精密切削加工用として市販されている刃先半径2mmで刃先に幅約 $2\mu\text{m}$ 、角度 $45^\circ$ の微小チャンファ付R刃単結晶ダイヤモンドバイト（アライドマテリアル製）を用いた。被削材の単結晶シリコンは、表1の切削条件で外側から中心部に向けて工具を送り切削した。切削加工中の切削抵抗、AEのエンベロープ信号、振動加速度の測定にはそれぞれ切削動力計、AEセンサ、加速度センサを用いた。仕上げ面粗さは、走査型白色干渉計(ZYGO)で測定した。

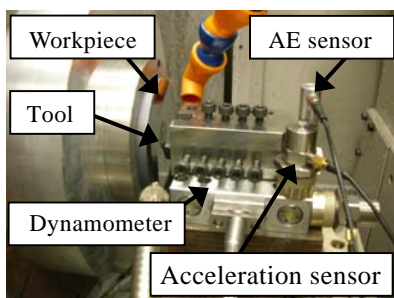


Fig.1 Ultra-precision lathe

### 3. 仕上げ面粗さ

工具送り量が $f=1.75\mu\text{m}/\text{rev}$ の場合、仕上げ面は全体的に梨地面になり、粗さ(PV値)は約 $7\mu\text{m}$ であった。工具送り量が $f=1\mu\text{m}/\text{rev}$ の場合、仕上げ面は比較的鏡面に近い光沢面になり、粗さは約 $0.07\mu\text{m}$ であった。図2にZYGOで観察した工具送り量1.75、 $1\mu\text{m}/\text{rev}$ における加工面を示す。図2(a)で示した工具送り量 $1.75\mu\text{m}/\text{rev}$ の場合、仕上げ面のほとんどに脆性ピットなどの脆性損傷痕が見られた。図2(b)で示した工具送り量 $1\mu\text{m}/\text{rev}$ の場合、仕上げ面には脆性ピットなどの脆性損傷痕は見られず、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。

### 4. 切削抵抗

図3は切削抵抗の静的成分で、中心からの距離 $r$ に対して示してある。工具送り量 $1.75\mu\text{m}/\text{rev}$ の脆性モード切削での切削抵抗は、工具送り量 $1\mu\text{m}/\text{rev}$ の延性モード切削の場合と比べ、 $r$ が20mm以上での背分力を除き、大きな差は見られない。図4に中心からの距離 $r$ に対する背分力の動的成分のRMS値を示す。工具送り量 $1\mu\text{m}/\text{rev}$ の延性モード切削でのRMS値は、工具送り量 $1.75\mu\text{m}/\text{rev}$ での脆性モード切削の場合よりも小さく、約1/4以下である。図5は中心からの距離 $r$ が20mmでの背分力をスペクトル解析した結果である。工具送り量 $1.75\mu\text{m}/\text{rev}$ のスペクトルは、約70Hzのところろに大きなピークが見られる。これは、主軸回転数1000rpmで被削材が1回転する間に結晶方位が4回変化するためだと考えられる。また、工具送り量 $1\mu\text{m}/\text{rev}$ でのスペクトルは、約55Hzのところろに大きなピークは見られるが、工具送り量 $1.75\mu\text{m}/\text{rev}$ の場合よりもかなり小さい。

Table 1 Experimental conditions

Workpiece	Material	Silicon wafer (100)
	Diameter mm	76.2
Tool	Material	Single crystal diamond
	Nose radius mm	2
	Rake angle deg.	0
	Clearance angle deg.	4
	Chamfer $\mu\text{m}$	2
Depth of cut $d$ $\mu\text{m}$	1.5	
Feed rate $f$ $\mu\text{m}/\text{rev}$	1, 1.75	
Spindle speed rpm	1000	
Cutting fluid	Non	

## 5. AE 信号

図 6 に中心からの距離  $r$  に対する AE のエンベロープ信号の RMS 値を示す. 工具送り量  $1.75 \mu\text{m}/\text{rev}$  の脆性モード切削での RMS 値は, 工具送り量  $1 \mu\text{m}/\text{rev}$  の延性モード切削の場合に比べて大きく, 中心からの距離  $r$  の増加に伴い大きくなっている. 図 7 に中心からの距離  $r$  が  $20\text{mm}$  での AE のエンベロープ信号をスペクトル解析した結果を示す. 工具送り量  $1.75 \mu\text{m}/\text{rev}$  のスペクトルは, 図 5 に示した背分力のスペクトルと同様に, 約  $70\text{Hz}$  のところに大きなピークが見られる. また, 工具送り量  $1 \mu\text{m}/\text{rev}$  でのスペクトルは, 大きさは小さくなっているものの, やはり約  $70\text{Hz}$  のところに大きなピークが見られる.

## 6. 振動加速度

図 8 に中心からの距離  $r$  に対する背分力方向の振動加速度の RMS 値を示す. RMS 値は, 工具送り量  $1.75 \mu\text{m}/\text{rev}$  の場合, 工具送り量  $1 \mu\text{m}/\text{rev}$  の場合に比べて大きな値と

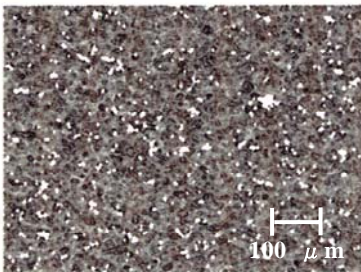
なった. 図 9 に中心からの距離  $r$  が  $20\text{mm}$  での背分力方向の振動加速度をスペクトル解析した結果を示す. 工具送り量  $1.75 \mu\text{m}/\text{rev}$  でのスペクトルは, 切削工具系の固有振動数である約  $3\sim 5\text{kHz}$  でピークが見られ, また約  $20\text{kHz}$  では, 両方の工具送り量でピークが見られる.

## 7. 結言

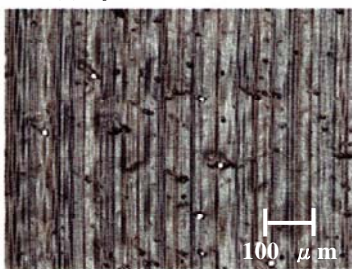
- (1) 本研究の実験条件下では, 加工面の観察結果により, 工具送り量が  $1.75 \mu\text{m}/\text{rev}$  では脆性モード切削,  $1 \mu\text{m}/\text{rev}$  の場合は延性モード切削がされたと推定された.
- (2) 工具送り量  $1 \mu\text{m}/\text{rev}$  での切削抵抗の動的成分, AE のエンベロープ信号, および振動加速度の RMS 値は, 工具送り量が  $1.75 \mu\text{m}/\text{rev}$  の場合よりも小さく, 約  $1/4$  以下であった.
- (3) 工具送り量が  $1.75 \mu\text{m}/\text{rev}$  の場合, 切削抵抗の動的成分のスペクトルは約  $70\text{Hz}$  で, 振動加速度のスペクトルは約  $3\sim 5\text{kHz}$  でピークが見られた. また AE のエンベロープ信号のスペクトルは工具送り量  $1, 1.75 \mu\text{m}/\text{rev}$  の両方で約  $70\text{Hz}$  でピークが見られた.

## 参考文献

- 1) 杉田 忠彰, 他 2 名: 精密工学会誌, **52**, 12 (1986), 2138.
- 2) 宮下 政和: 精密工学会誌, **56**, 5 (1990), 782.
- 3) 柴田 隆行, 他 2 名: 精密工学会誌, **65**, 10 (1999), 1512.
- 4) 閻 紀旺, 他 2 名: 精密工学会誌, **66**, 7 (2000), 1130.

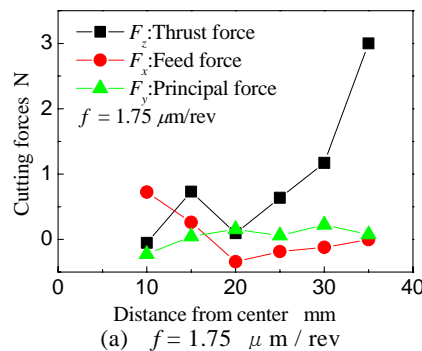


(a)  $f = 1.75 \mu\text{m}/\text{rev}$

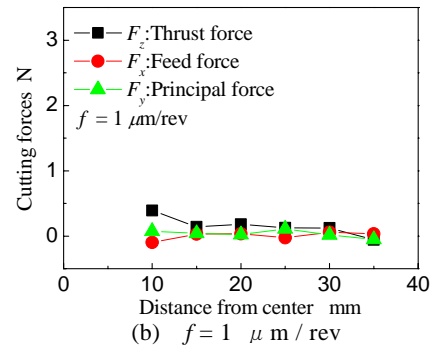


(b)  $f = 1 \mu\text{m}/\text{rev}$

Fig.2 Photograph of surface



(a)  $f = 1.75 \mu\text{m}/\text{rev}$



(b)  $f = 1 \mu\text{m}/\text{rev}$

Fig.3 Cutting forces with distance from center

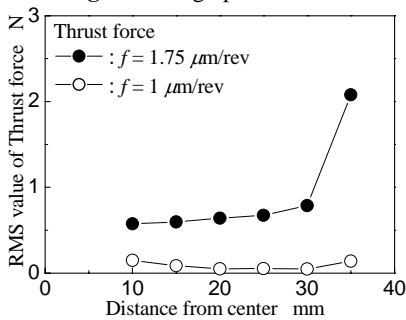


Fig.4 RMS value of Thrust force

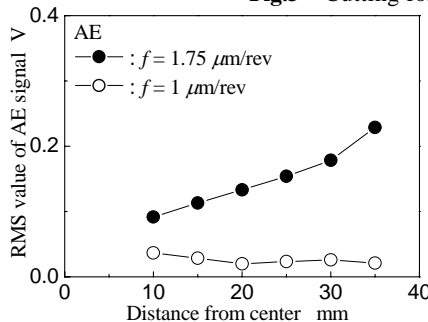


Fig.6 RMS value of AE signal

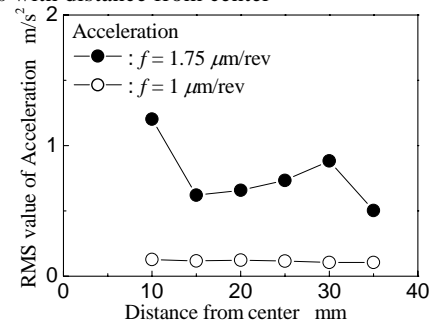


Fig.8 RMS value of Acceleration

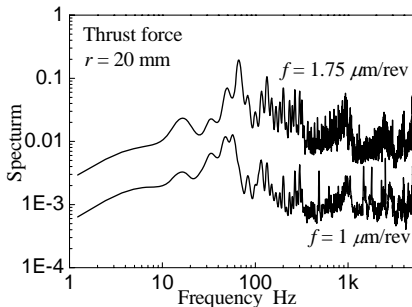


Fig.5 Spectrum of Thrust force

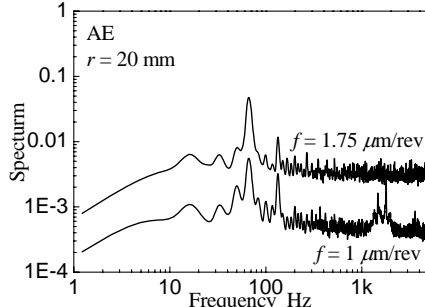


Fig.7 Spectrum of AE signal

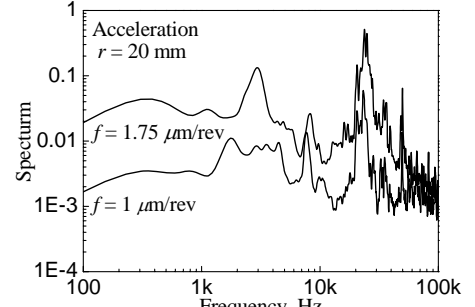


Fig.9 Spectrum of Acceleration