

# 単粒研削による単結晶シリコンの材料除去機構 Material Removal Mechanism in Grinding of Single Crystal Silicon with Single Point Cutting Edge

梶 俊幸・宇都宮大学大学院

Toshiyuki Kaji, Graduate school of engineering, Utsunomiya University

市田 良夫・宇都宮大学工学部

Yoshio Ichida, Utsunomiya University

森本 喜隆・宇都宮大学工学部

Yoshitaka Morimoto, Utsunomiya University

佐藤 隆之介・宇都宮大学工学部

Ryunosuke Sato, Utsunomiya University

上野 秀雄・宇都宮大学工学部

Hideo Ueno, Utsunomiya University

Key Words: Single Point Cutting Edge, Single Crystal Silicon, Ductile Mode Cutting, Brittle Mode Cutting, Crack, Chipping

## 1. 緒言

単結晶シリコン、セラミックス、ガラスなどに代表される硬脆材料の需要が高まる中、これら硬脆材料の高精度・高効率加工が望まれている。砥粒切込み深さを十分小さくすれば硬脆材料においても金属材料と同様、せん断作用により切りくずが生成される、いわゆる延性モードによる研削が可能であることが知られている。しかし、脆性材料の過渡的除去過程における延性／脆性遷移除去機構は複雑で、解析すべき多くの問題点が残されているのが現状である。

本研究では、脆性材料の延性モード研削のメカニズムを明らかにすることを目的として、円錐型ダイヤモンド切れ刃を用いた単結晶シリコンの円弧切削実験を行い、研削溝の生成過程における材料除去作用の延性／脆性遷移挙動について検討した。研削溝のマルチプローブ SEM による 3 次元観察及び研削抵抗 2 分力の測定結果から延性から脆性への遷移点を捉える手法を明らかにしたので報告する。

## 2. 単粒研削実験装置と実験方法

本実験に用いた単粒研削実験装置の概要を図 1 に示す。横軸平面研削盤テーブル上に圧電型研削動力計(キスラー社/9257B 型)を介して工作物を取り付け、アルミニウム円盤外周部に固定した単粒ダイヤモンド工具により円弧研削溝を加工する。このとき、工作物を十分に大きな速度で砥石軸方向に送ることにより、工作物上に独立した数本の研削溝が形成される。

形成される研削溝のモデルを図 2 に示す。円弧切削実験のように砥粒切込み深さが変化する過渡的除去機構では図 2 の A-A' 断面図のようにある切込み深さまでは延性モード研削となり、さらに深い切込みでは脆性モード研削となる。このとき、延性モード研削から脆性モード研削に遷移する切込み深さを臨界切込み深さ  $d_c$  とする。

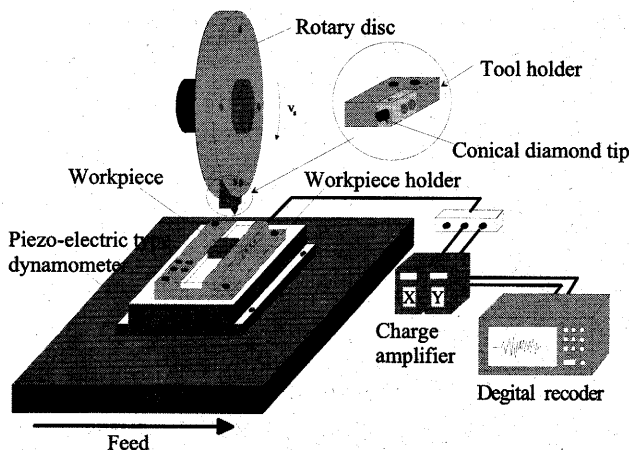


Fig.1 Schematic illustration of the experimental setup

表 1 に実験条件の詳細を示す。工具となる模型砥粒として頂角  $120^\circ$  の円錐型ダイヤモンドスクライバを用いた。周速度は  $50\text{m/min}$  とし最大切込み深さを  $5\mu\text{m}$  とした。工作物には単結晶シリコンの(100)面を使用し、研削方向は[011]とした。

研削後、3 次元形状測定が可能なマルチプローブタイプの走査型電子顕微鏡により研削溝を観察し、研削溝の形態および研削抵抗の変化より延性／脆性の遷移を考察した。

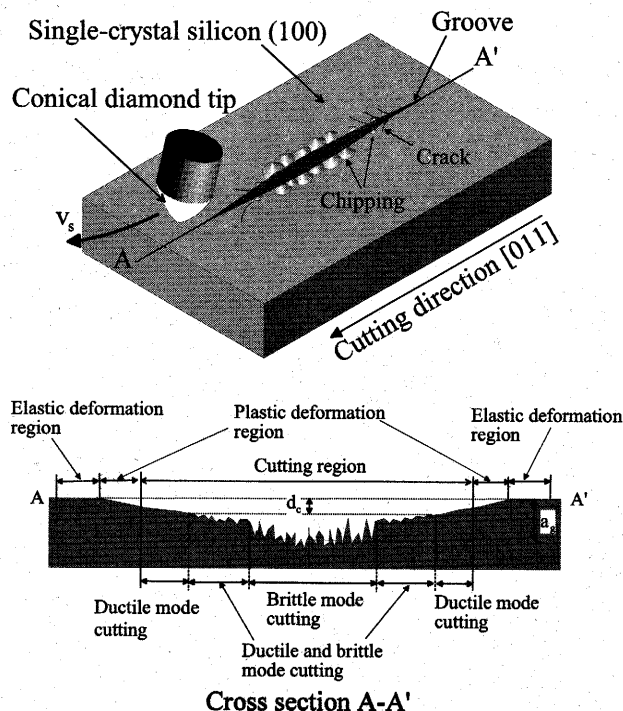


Fig.2 Grinding model with single point cutting edge

Table 1 Grinding conditions

|                        |                                                                                                                                                 |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Grinding method        | Circular grinding                                                                                                                               |
| Grinding tool          | Conical diamond tip<br>Tip radius $R = 10\mu\text{m}$<br>Conical angle $120^\circ$                                                              |
| Wheel diameter         | $\phi 206\text{ mm}$                                                                                                                            |
| Peripheral wheel speed | $v_s = 50\text{ m/min}$                                                                                                                         |
| Maximum depth of cut   | $a_g = 5\mu\text{m}$                                                                                                                            |
| Workpiece              | Single-crystal silicon<br>Crystallographic orientation: (100)<br>Grinding direction: [011]<br>Dimensions: $10' \times 1' \times 15^h\text{ mm}$ |
| Coolant                | Dry                                                                                                                                             |

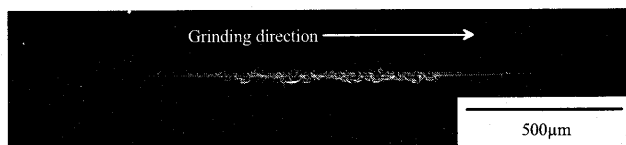


Fig.3 SEM image of a groove ground with single point cutting edge

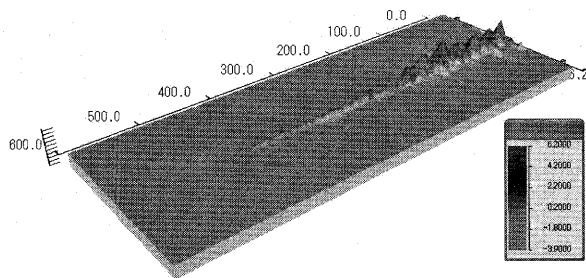


Fig. 4 Reversed 3D image of the grinding groove

### 3. 実験結果と考察

図3は円弧切削により形成された研削溝のSEM像である。形成された溝長さは約1.55mmで溝幅は約15.9μmである。工具先端軌跡により計算される接触長さは1.99mmであるので両端に片側約200μmの弾性変形領域が存在すると思われる。

図4は研削溝先端部の3次元像を反転させたものである。このような3次元像から溝の形状を測定した。図5は最大切込み点までの研削溝のSEM像と縦断面プロファイル、溝両端の盛り上がり率及び研削抵抗の関係を示している。抵抗が発生した点を接触開始点と定義して、図中の横スケールは全て統一した。抵抗が増加するにも関わらず溝が形成されていない領域があることから、これが弾性変形領域であるとわかる。その後溝が形成される付近で2分力比に変化が見られる。この変化を把握するために2分力比の微係数を求めた結果を図6に示す。接触開始点から大きく変動しながら低下してきた微係数が約220μmの付近で安定した値となっており、ここが弾性変形と塑性変形の遷移点と考えられる。また接触開始点から約340μm付近で図5に示した盛り上がり率が減少し始めていることから、塑性変形領域から切削領域へと遷移したと考えられる。

切削領域をさらに詳しく見ると、図5のSEM像において約380μm付近でクラックやチッピングが発生していることからここが延性／脆性遷移点とみなされる。断面プロファイルからこの時の臨界切込み深さ $d_c$ は約0.5μmであり、これ以降溝深さの増加割合が増す傾向が見られる。その後脆性破壊の割合が増大しながら溝形成が進行し、約580μm付近からはほぼ脆性破壊のみによる切削モードとなる。このとき抵抗、2分力比に大きな変動が見られ、縦断面プロファイルにおいても同様な傾向が見られる。

### 4. 結言

脆性材料の延性モード研削のメカニズムを明らかにすることを目的として、円弧切削実験による研削溝の生成過程における材

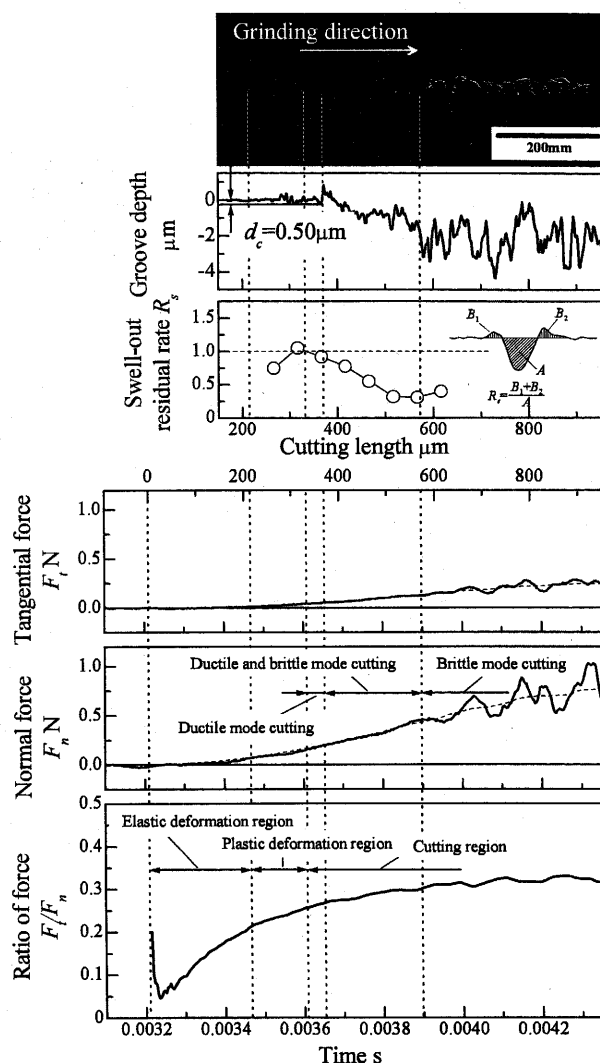


Fig.5 Relationship among groove shapes and cutting forces

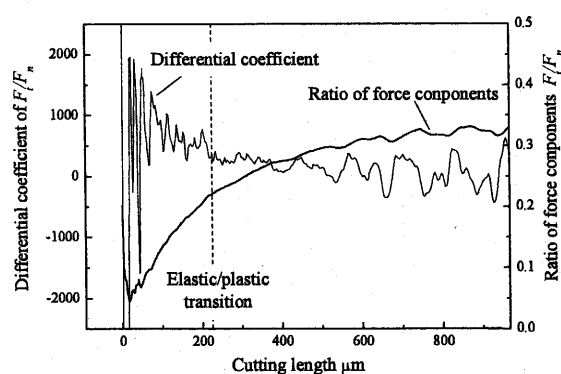


Fig.6 Relationship between differential coefficient and ratio of force

料除去作用の延性／脆性遷移挙動について検討した。その結果、研削溝の3D観察と研削抵抗2分力の測定結果に基づき、延性から脆性の遷移点を捉える手法を見出すとともに、そのときの臨界切込み深さが約0.5μmとなることを明らかにした。