

極細線固定砥粒ダイヤモンドワイヤによる単結晶 SiC の精密切断

鈴木 孝彰^{*1,*2}, 大槻 俊紀^{*2}, 閻 紀旺^{*3}

Precision slicing of single-crystal SiC using extremely fine fixed-abrasive diamond wire

Takaaki SUZUKI^{*1,*2}, Toshinori OTSUKI^{*2} and Jiwang YAN^{*3}^{*1} Graduate School of Science and Technology Society, Keio University
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522, Japan^{*2} READ Co., Ltd.

144-7 Tateuchi, Ushibukuro, Ohkuma, Watari-cho, Miyagi 989-2302, Japan

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Keio University
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522, Japan

Received: 5 August 2017; Revised: 5 October 2017; Accepted: 1 December 2017

Abstract

Single-crystal SiC is an important material for high-power semiconductors, optoelectronic applications because of its good material properties. Compared with silicon, SiC is harder and more difficult to slice, although high precision slicing process is required for a thinner slicing width. A SiC ingot is conventionally sliced using a fixed-abrasive diamond wire, where the core wire diameter is wide approximately 160 μm and diamond grain size is 20 μm . In this study, precision slicing tests were performed for single-crystal SiC by using an extremely fine diamond wire which was a half width of the conventional one. The used diamond wire had two types of core wire diameter, 60 μm and 80 μm , and the grain size was 5-10 μm and 6-12 μm , respectively. The diamond wire was driven in a single direction at a high speed of 1750 m/min. The slicing width, chipping width, workpiece surface roughness, slicing force and diamond protrusion after slicing were investigated experimentally, and a diamond blade which was usually used for slicing SiC was adopted for comparison. During slicing, the Ni plating that covered the diamond grains on the wire was partially removed which maintained the sharp protrusion of the diamond grain. The results showed that by using the proposed extremely fine diamond wire, the chipping width was significantly lowered and the normal slicing force was stable and low. Furthermore, the present study provides high-precision continuous slicing without interval dressing of the diamond wire.

Keywords : SiC, Fixed-abrasive diamond wire, Precision slicing, Chipping, Surface roughness, Slicing force

1. 緒 言

単結晶 SiC (以下, 単に SiC と記す) はバンドギャップ幅の広い半導体材料であり, 高硬度かつ耐熱性, 耐食性に優れ, 物理化学特性に優れた材料である (舟木, 2016). 近年エネルギー消費において電力の有効利用が高まる中で, 主に半導体 Si が使用されているが, ハイブリッド自動車の普及により数多く用いられている SiC は, パワー半導体として Si の 1/100 以下の低電力損失で発熱量が減り, 高温下で損失電流が低く高温動作可能な半導体として期待されており, 電力変換器などの小型化や軽量化に向けて注目されている (加藤, 2014). SiC は共有結合で構成され, 結晶異方性を持つ脆性材料でダイヤモンドに次ぐ高硬度であるがゆえ加工が困難であり, 切断部分の材料損失が多く, 高効率かつ高精度の切断加工技術開発が要望されている. 従来から SiC の精密切断にはメタルボンドブレードによる切断が主流であり, 材料損失を少なくするためには刃厚を薄くする必要がある. 薄くなることもないブレードの曲げ剛性が低く, SiC に対して座屈変形の影響により蛇行し, 大きなチッピングが発生し, チッピング領域も含めた切断幅の材料損失の多いことが課題となっている (Cvetković et al., 2011). 近年,

No.17-00345 [DOI:10.1299/transjsme.17-00345], J-STAGE Advance Publication date : 11 December, 2017

^{*1} 正員, 慶應義塾大学 大学院理工学研究科 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1)^{*2} (株)リード (〒989-2302 宮城県亶理町逢隈牛袋館内 144-7)^{*3} 正員, 慶應義塾大学 理工学部機械工学科

E-mail of corresponding author: yan@mech.keio.ac.jp

短波長の高出力レーザーを利用した切断加工が行われており、厚みの薄い材料では切断幅を狭くすることが可能となっているが、切断可能な結晶方位が限定され、厚みのある材料では熱影響による加工痕層の発生などで切断幅以外の材料ロスが発生し、デバイスパターンに損傷を与える懸念がある (Roth et al., 2015)。

また、固定砥粒ダイヤモンドワイヤによる SiC インゴット切断は実用化されており、ワイヤの張力を高め、たわみを抑制しながら加工することにより加工精度を維持する切断が主流となっている。そのため、芯線径は 160 μm 程度で平均砥粒径が 20 μm 以上と大きく、材料損失と表面粗さやチップング幅、ソーマークなどの改良が求められている (Huang et al., 2015, Hardin et al., 2004, Meinel et al., 2012)。一方で、これまで以上に細いワイヤおよびさらに微小なダイヤモンド砥粒を使用した固定砥粒ダイヤモンドワイヤでの SiC 切断の研究報告はほとんどない。

そこで、本研究では芯線径を 100 μm 以下で平均砥粒径を 10 μm 以下の細粒を固着させた極細線固定砥粒ダイヤモンドワイヤを新規開発し、ダイシングワイヤ装置 (鈴木他, 2016) で SiC ウェハの精密切断加工を実施した。ワイヤ線速 1750 m/min で一方向に走行させ、ワイヤ線径、ワーク送り速度、砥粒径を種々変化させて切断を実施し、切断幅、チップング幅、切断後の表面粗さ、切断後のワイヤ摩耗、切断抵抗を実験的に調査した。また、SiC ウェハの切断に従来から使用されている同等の粒径を用いた Ni 電鍍ブレードでの切断加工を切断速度 1750 m/min と同じ加工時間で実施し、固定砥粒ダイヤモンドワイヤの切断方法と比較評価を行い、固定砥粒ダイヤモンドワイヤ切断加工後の高精度加工面を得るために明らかになった結果を報告する。

2. 実験方法

2-1 実験装置

ダイヤモンドワイヤによる切断実験では高線速対応可能なダイシングワイヤ装置を用いて切断加工を行った。図 1 に SiC ウェハ切断時の加工部模式図を示す。本装置はワークが上昇するアップカット方式で、今回は高速線速での切断現象を捉えやすくするために 1 ラインでの加工を適用した。また、Ni 電鍍ブレードを用いた切断実験では高精度スライサ (東芝機械 (株) 製 USM-150L) を使用した。

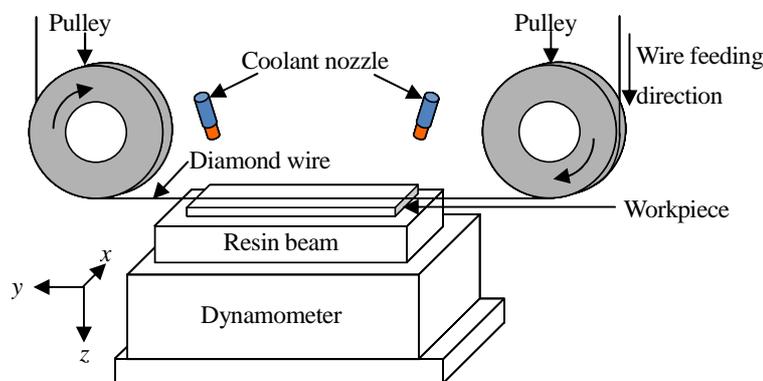


Fig. 1 Schematic of experimental setup for diamond wire saw slicing.

2-2 加工条件

表 1 にダイヤモンドワイヤ切断実験の主な加工条件を示す。ワイヤ線速は 1750 m/min で固定し、5 回切断を実施した。なお、ダイヤモンドワイヤは供給側から使用済み側のスプールに 1 方向に走行させて切断を行い、それを 1 回と定義し、切断後に使用済みから供給側に巻戻し、同じワイヤを再利用して行った。クーラントは冷却効果が高く、取り扱いやすさ、供給の安定度、環境的側面の点から市水を使用した。Ni 電着ダイヤモンドワイヤには芯線径が従来のインゴット切断に使用される芯線径の半分以下の極細線である 60 μm , 80 μm を用い、さらに砥粒径に関しても従来のインゴット切断に用いられた砥粒径の半分以下である 6-12 μm を固着させた仕様で切断幅の影響を調査した。ワーク送り速度の調査においては芯線径 80 μm , 砥粒径 6-12 μm のワイヤ仕様で異なる 2

条件のワーク送り速度で切断を実施した。また、砥粒径の影響を調査するためさらに細粒の 5-10 μm を用いて 6-12 μm の 2 仕様と比較し加工試験を実施した。

表 2 に Ni 電鍍ブレードの切断実験の主な加工条件を示す。ブレードのサイズは直径 109.20 mm, 厚み 65 μm を用い、砥粒径はダイヤモンドワイヤ切断に用いられる砥粒径と同等の SD1200, SD1500 の 2 仕様とし、切れ刃部となるブレードを押さえるフランジからの突出し量は 2.5 mm と設定した。切断前に初期ドレッシングを行い、その後連続して 5 回切断を実施した。クーラントは市水を使用した。なおワーク送り速度はダイヤモンドワイヤ切断実験での切断時間と同じ時間で加工できるように合わせた。被削材は 4H-SiC ウェハを一定の形状 (幅 20 mm \times 厚み 0.35 mm \times 長さ 30 mm) に 1 次オリフラ面 (1010) から [1010] 軸方向を長手に短冊状に切断し、切断試験用に供した。図 2 にその模式図を示す。ダイヤモンドワイヤおよび電鍍ブレードによる切断方向は [1010] 軸方向である。また、被削材は Si 面を上面に C 面を下面にセットし、ベース材には加工抵抗の影響の少ない材料としてダイヤモンドワイヤ切断ではレジンビームを、電鍍ブレード切断実験時では機械高さ制約があるため、レジンビームと同硬度の薄いカーボンベースを使用した。

Table 1 Experimental condition for fixed abrasive diamond wire

Wire specification	Core wire diameter [μm]	$\phi 60, \phi 80$
	Grain size [μm]	5-10, 6-12
Wire speed [m/min]		1750
Wire tension [N]		7.84 (Core wire diameter : $\phi 60 \mu\text{m}$) 11.76 (Core wire diameter : $\phi 80 \mu\text{m}$)
Feed rate [mm/min]		2.40, 16.36
Slicing time [sec]		75 (Feed rate : 2.40 mm/min) 11 (Feed rate : 16.36 mm/min)
Cutting depth [mm]		3

Table 2 Experimental condition for diamond blade

Blade specification	Diameter [mm]	$\phi 109.20$
	Thickness [μm]	65
	Grain size	SD1200, SD1500
	Concentration	120
Initial dressing	Dress type	WA
	Grain size	#2000
	Dressing length [mm]	70
	Dressing number [times]	10
	Cutting speed [m/min]	1750
	Feed rate [mm/min]	60
	Cutting depth [mm]	1
Cutting speed [m/min]		1750
Feed rate [mm/min]		26.40, 180
Cutting time [sec]		75 (Feed rate : 26.40 mm/min) 11 (Feed rate : 180 mm/min)
Cutting depth [mm]		0.4
Cutting length [mm]		33
Cutting direction		Down cut

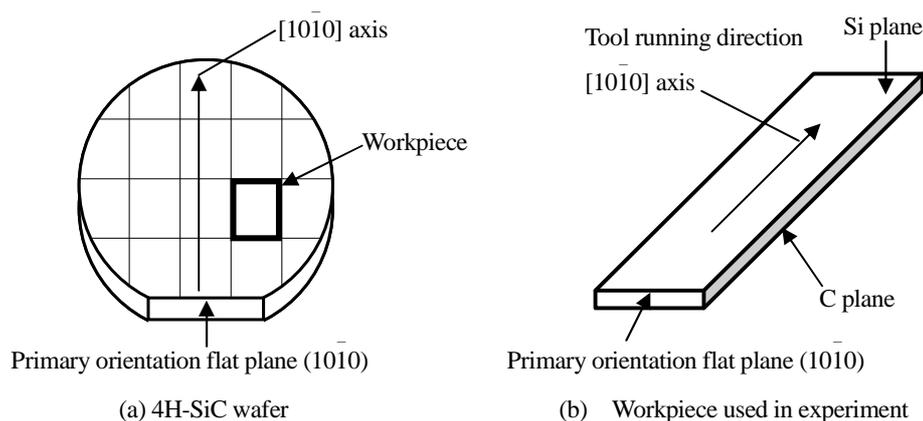


Fig. 2 Schematic of workpiece shape and crystal orientation.

2・3 測定方法

切断幅の測定は測定顕微鏡 MM-800 (ニコン製) を用いて, ダイヤモンドワイヤ切断加工ではワイヤ走行方向からワークに接触する位置を, 電鋳ブレード切断加工ではワーク送り方向から被削材に接触する位置を順に入口側, 中央部, 出口側とし切断後のベース材にて測定を行った. チッピング幅は切断入口側から出口側まで 3 mm ごと測定し, 平均値を求めた. 図 3 にその模式図を示す. 切断後のワークの平均表面粗さ, 使用後のダイヤモンドワイヤおよび電鋳ブレードの砥粒の突出し高さは, レーザ顕微鏡 VK-9710 (キーエンス製) により測定した. 表面粗さは被削材の中央部の測定点を中心に粗さ曲線の基準長さ 0.8 mm で 10 点測定し, 粗さの平均値を求めた. ダイヤモンドワイヤおよびブレードの表面観察は走査電子顕微鏡 VK-7800 (キーエンス製) で 500 から 5000 倍で観察した. 切断抵抗はベース材下部に設置した TYPE9256C (キスラー製) の 3 分力計により垂直方向, 接線方向, 軸方向を測定しアンプを介して記録した.

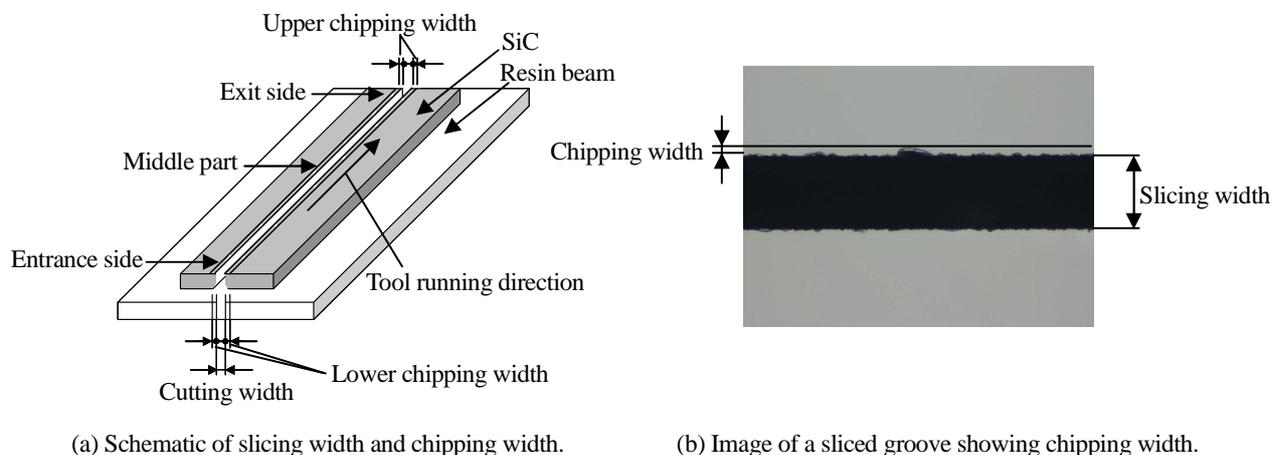


Fig. 3 Definition of slicing width and chipping width.

3. 結 果

3・1 切断幅

図 4 に砥粒径 6-12 μm で異なる芯線径のダイヤモンドワイヤ切断加工における各位置での切断幅の結果を示す. 切断幅は 60 μm の場合で 86 μm 以下で, 芯線径の 20 μm の差が切断幅の結果に現れており, 切断回数の増加にともない各位置とも緩やかに減少傾向を示している. これは砥粒上の Ni めっきが削られた摩耗に起因し (Lee et al., 2016), 5 回切断後の切断幅のばらつきは 7 μm 以下に抑えられている. また, 芯線径によらず中央部で切断幅が 3 μm 以上小さくなっている. 被削材の入口側および出口側は高速走行のため振動の影響を受けやすく, 切断幅が広がり, 中央部はその振動が抑制されたため切断幅が小さくなったと考えられる (Nassauer et al., 2014). 図 5 に

粒度 SD1200 で異なるワーク送り速度の場合の電鋳ブレード切断加工の各位置での切断幅の結果を示す。切断位置により入口側が小さく、出口側が大きくなっている。ワーク送り速度が遅い場合は、切断回数の増加にともない緩やかに増加傾向を示し、ワーク送り速度が速い場合は、加工初期から切断幅は大きくなっている。これは、SiC 切断では砥粒の目つぶれが生じ、切断能力が不足した状態で切断を行うため、切断抵抗が大きくなり、切断ブレードの振動が生じることやクーラントが被削材へ排出される時に SiC の残渣が巻き込まれやすくなり、切断幅が増加したと考えられる。

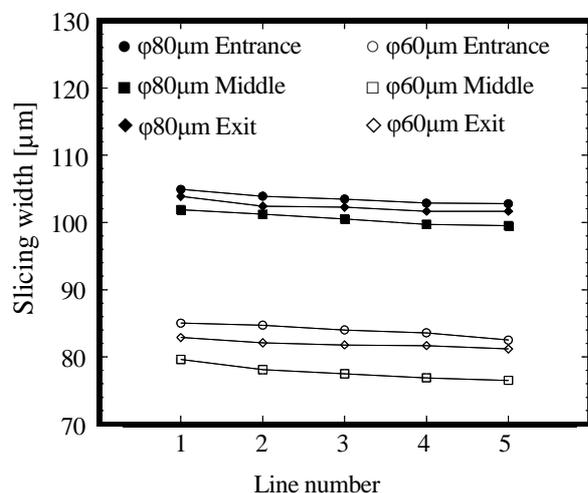


Fig. 4 Slicing width of sliced SiC by diamond wire at different core wire diameter (grain size 6-12 μ m).

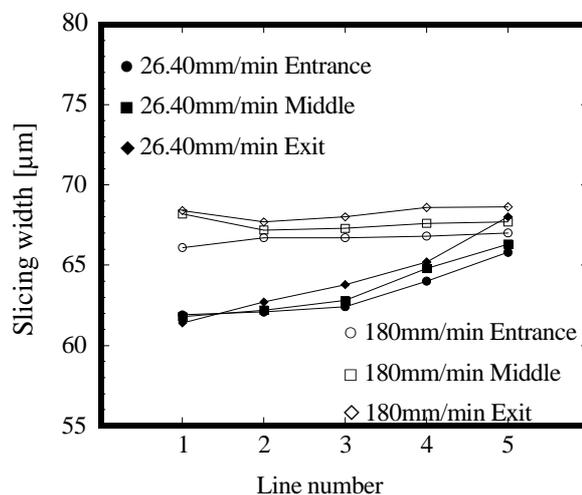


Fig. 5 Slicing width of sliced SiC by diamond blade at different feed rate (grain size SD1200).

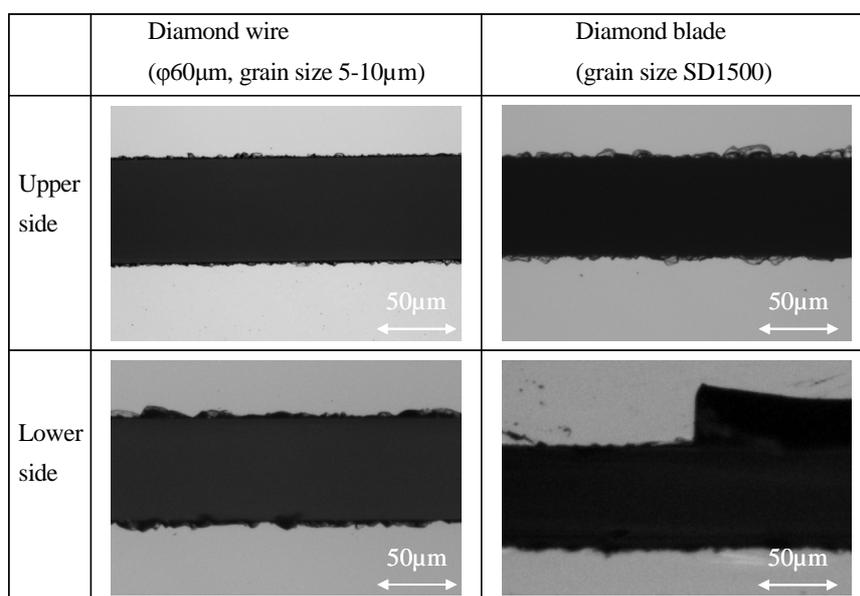


Fig. 6 Images of upper and lower chipping at each slicing method.

3・2 チッピング幅

チッピング外観の観察例として、加工時間 75 sec の同時間で加工したダイヤモンドワイヤの砥粒径 5-10 μm の加工後および電鋳ブレード粒度 SD1500 での加工後の SiC 表面を図 6 に示す。ダイヤモンドワイヤでは微小なチッピングが上面下面ともに発生している。一方、電鋳ブレードは上面で明瞭なチッピングが発生し、下面はチッピングとチッピングが繋がって生じたと考えられる欠け状態が発生している。本実験での電鋳ブレードでの切断後のチッピング幅は欠け状態を含めて測定を行った。

図7にダイヤモンドワイヤで異なる砥粒径でのチップング幅を示す。細粒 5-10 μm の場合において切断回数増加によるチップング幅の急増は見られず、砥粒粒度分布に応じて 5-10 μm が 6-12 μm より約 1 μm 小さくなった。また、下面チップング幅が上面チップング幅と比較し相対的に大きい。本実験ではワーク送りが下方から上方に向かうため、ワイヤがたわみながら下面方向へ加工が進む。被削材の両端から加工が開始され、加工終了付近で両端はすでに加工負荷の低いベース材を切断し、そのときに、切込深さが大きく変化し、ワイヤがたわんだ際に生じた被削材との長い接触長さから元の接触長さにワイヤの伸びを戻そうとする力が被削材下面側で作用し、ワイヤ走行方向にも力が負荷される。一方で、ワイヤ走行方向には一定張力にするための制御が働くため、極めて短時間でワイヤに対して力の増減が生じ、その変動が切断幅方向にも影響を与えたと考えられる (Teomete, 2011)。

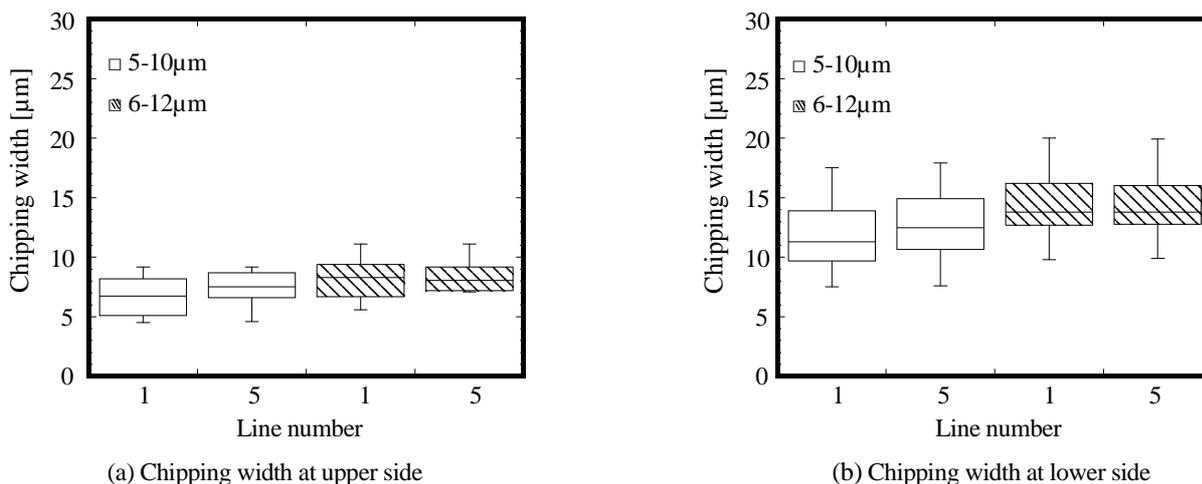


Fig. 7 Change of chipping width with grain size and number of sliced lines by a diamond wire (core wire diameter $\phi 60\mu\text{m}$, feed rate 2.40mm/min).

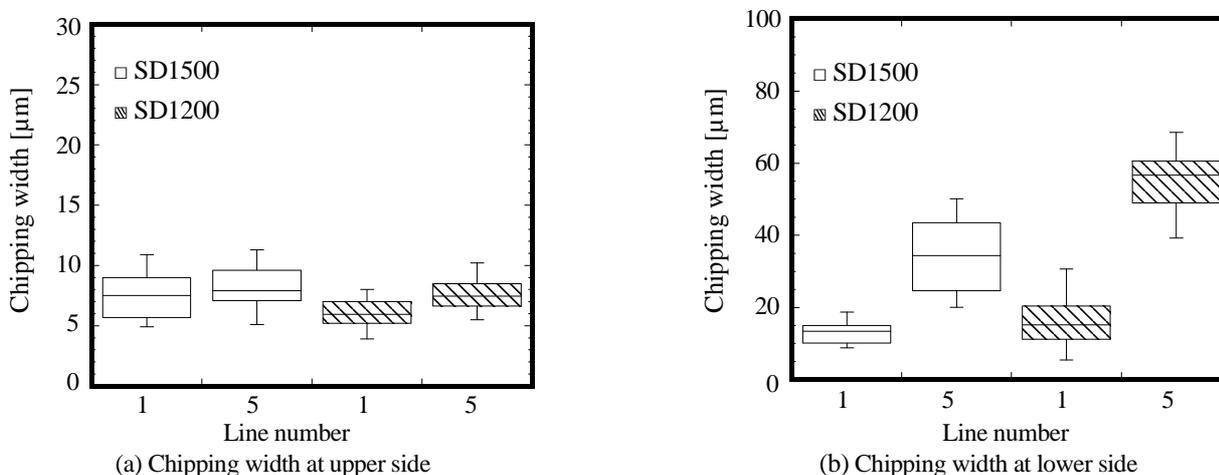
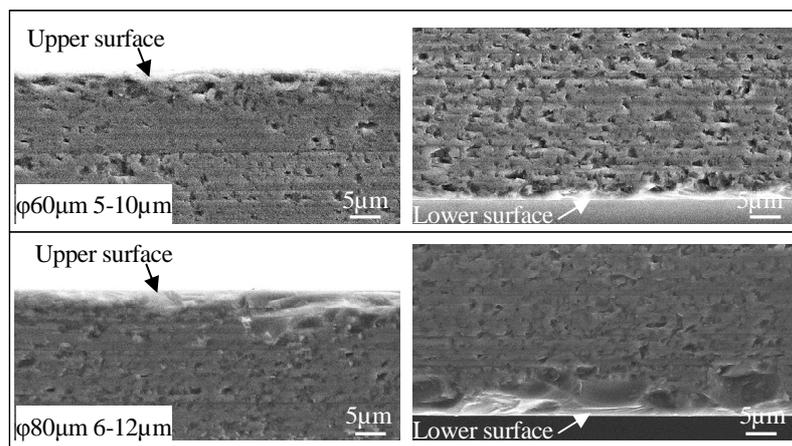


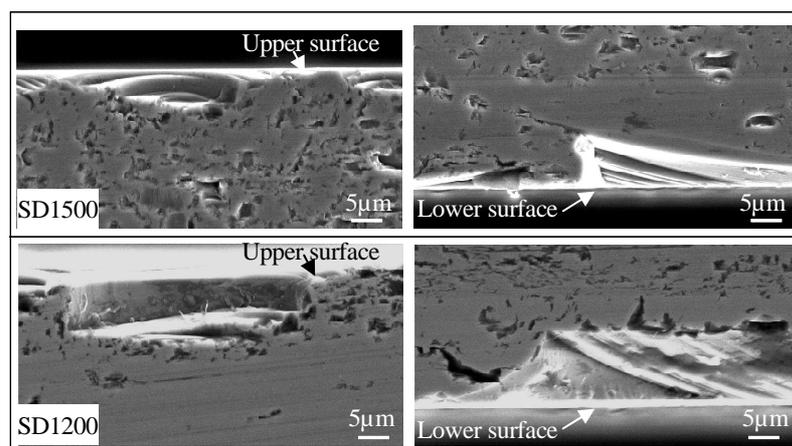
Fig. 8 Change of chipping width with grain size and number of sliced lines by a diamond blade (feed rate 26.40mm/min).

図8に電鋳ブレードで異なる砥粒径でのチップング幅を示す。上面チップング幅は切断回数増加による大きな違いは見られなかったが、下面チップング幅は砥粒径が大きく、切断回数が増加すると大きくなることが分かった。同じ加工時間でのダイヤモンドワイヤの切断結果と比較した場合、下面チップング幅は3倍以上に至った。ブレード切断では加工前の初期ドレス後から5回切断まではドレッシングは実施していないため、加工初期では切れ刃の先端が鋭利であるが、切断回数の増加とともに砥粒先端が被削材と接触して摩滅し被削材との接触面積が増加していく。高硬度な SiC に対して実質的な切込み量を維持することができず、断続的に過大な切込量が与えられ、加工抵抗が大きくなり、脆性破壊モードに至り、チップング幅が大きくなったと考えられる (Patten et al., 2005, Goel et al., 2013)。

図9に各切断加工の5回後のSiC表面のSEM写真を示す。ブレード切断では上面，下面チップング幅がダイヤモンドワイヤ切断より著しく大きく，特に下面側で連続的にチップングが発生してつながり，大きなクラックに至っている (Gogotsi, 2013, Morrell and Gant, 2001)。11 sec 切断加工時の各々の加工で使用される切断長さはブレード切断では円周長が 342.9 mm のため約 3.772 m で，ダイヤモンドワイヤ切断では線速 1750 m/min のため使用されるワイヤ長は約 320.8 m になり，ブレード切断の 85 倍以上に達する。ダイヤモンドワイヤ切断加工は切断長さが長く，砥粒 1 個あたりの切込深さが小さくなるため，脆性破壊が抑制され，チップング幅が少なくなると考えられる (Tanaka and Shimada, 2013)。



(a) Wire slicing



(b) Blade slicing

Fig. 9 SEM micrographs of workpiece cross section at 5 line slices.

3・3 表面性状

図10にダイヤモンドワイヤの異なる芯線径および砥粒径と異なるワーク送り速度での表面粗さを示す。同じ砥粒径の場合でも芯線径が細くなると表面粗さ R_a が $0.16 \mu\text{m}$ から $0.13 \mu\text{m}$ に低減した。これは細線では被削材長さの断面積あたりに存在する砥粒切れ刃密度が増加したためと考えられる (諏訪部他, 2016)。また，ワーク送り速度が速くなるとわずかに表面粗さは上昇した。これは切断抵抗が増加し，局所的にワイヤ走行で発生するソーマークや微小くぼみ深さの影響によるものと考えられる (Gao et al., 2016)。

図11に電鑄ブレードで異なる砥粒径とワーク送り速度での表面粗さを示す。ワーク送り速度が速くなると表面粗さ R_a が砥粒径によらず2倍程度大きくなった。一方，ダイヤモンドワイヤ切断加工と比較して表面粗さが1/3以下と顕著な差が見られた。これは，ブレード切断では同一面積内で加工に作用する砥粒数が圧倒的に多く，さらにブレードが回転して同じ砥粒によって選択的に加工されるため，砥粒の粒度分布に起因する高さばらつきよ

りも砥粒先端の摩滅度合いの影響が大きいいため、被削材表面をこする状態になり表面粗さが向上したと考えられる (Qiusheng et al., 2014).

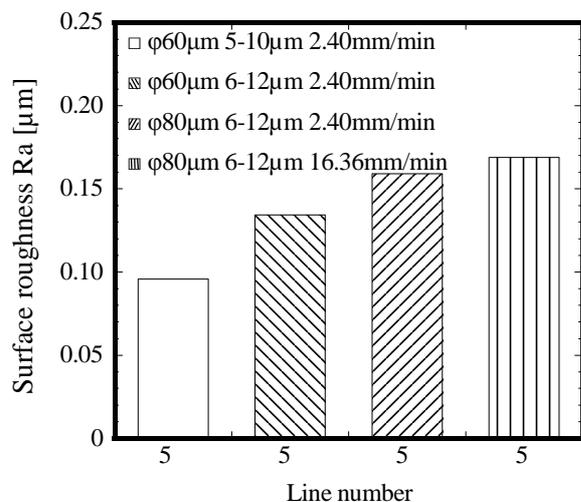


Fig. 10 Result of surface roughness with various diamond wire conditions at 5 line slices.

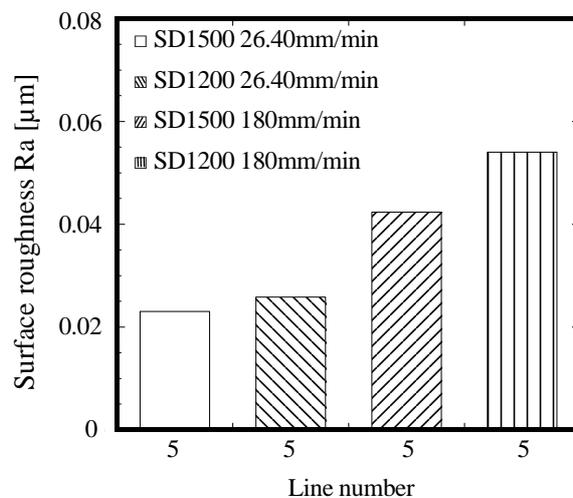
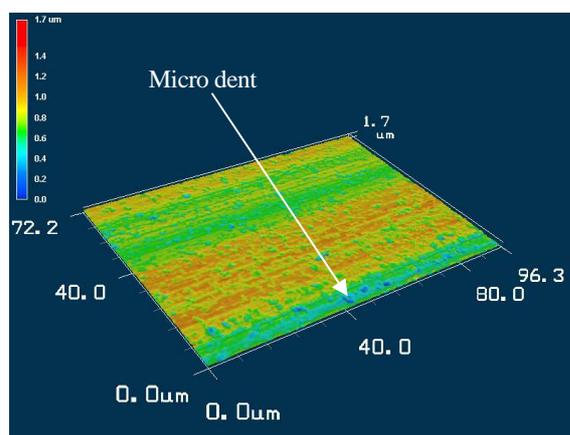
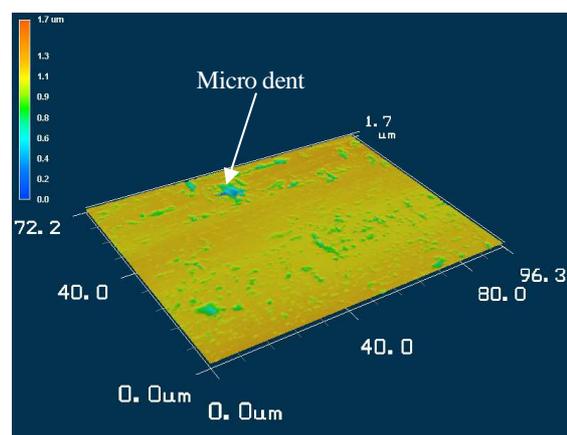


Fig. 11 Result of surface roughness with various diamond blade conditions at 5 line slices.

図 12 に各切断加工を 5 回実施後の被削材のレーザ顕微鏡による測定結果の一例を示す。図中の青い点は SiC 加工面の微小くぼみを示している。微小くぼみは各切断加工方法で特定の位置によらず存在した。また、表面の色の変化は切断面の高さ方向の変化であるうねりを表している。ダイヤモンドワイヤ切断加工ではワイヤ走行方向にソーマークが観察され、うねりが見られる。一方、ブレード切断加工ではうねりが少なく、平滑な面が得られていることが確認された。これは、ダイヤモンドワイヤ切断加工では被削材に工具を押し付けて加工する際に、ワイヤにたわみが生じるためであり、砥粒径とワーク送り速度などの加工条件を選択することでたわみが抑制され平滑な面が得られると考えられる (Ishikawa et al., 2014, Yan et al., 2009)。



(a) Diamond wire slicing ($\phi 60\mu\text{m}$ 5-10 μm)



(b) Diamond blade slicing (SD1500)

Fig. 12 Laser microscope images of SiC surface sliced at 5 line slices by a diamond wire and a diamond blade.

3・4 砥粒突出し高さ

図 13 に 5 回切断後のダイヤモンドワイヤ上の砥粒の突出し高さ測定結果を示す。突出し高さは砥粒径が小さい場合やワーク送り速度が速くなる場合に相対的に小さくなることが確認された。図 14 に 5 回切断後の電鍍ブレードの砥粒の突出し高さ測定結果を示す。突出し高さは最小値が 1 μm 以下であり、砥粒の摩耗が大きく、被削材が砥粒を保持するボンド面に接触する状況であることが分かった。

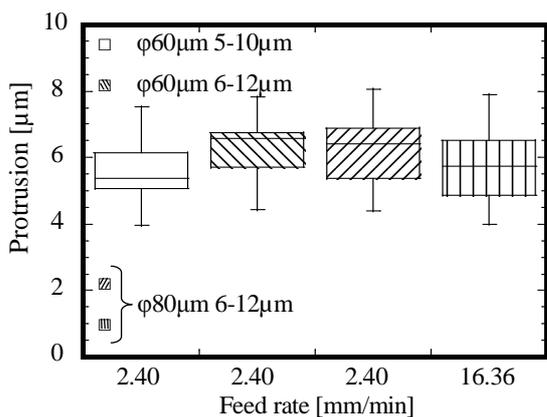


Fig. 13 Protrusion of abrasive grain on the diamond wire sliced at 5 line slices.

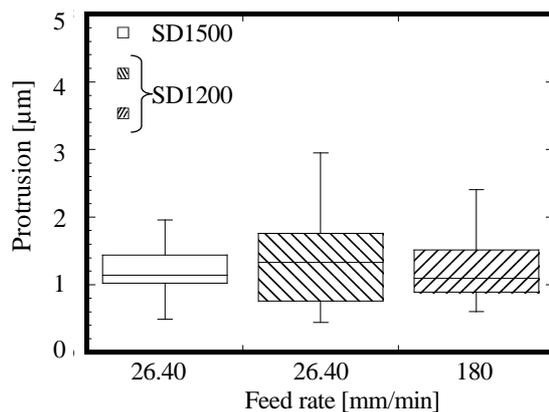
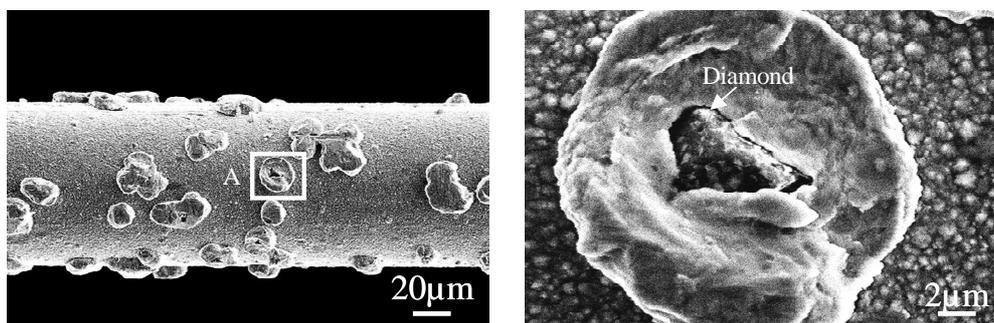


Fig. 14 Protrusion of abrasive grain on the diamond blade sliced at 5 line slices.

3・5 ワイヤおよび砥石の表面形態

図 15 に加工後のワイヤ表面 SEM 観察結果の一例を示す。脱粒は見られず、切断時に砥粒が鋭く露出したダイヤモンド粒子（以下、有効作用砥粒と記す）が一部に観察された。ワーク送り速度が速くなると砥粒上の Ni めっきは突出し高さの高い順に削られ、平らになっている。しかし、大部分はダイヤモンド粒子の露出がなく Ni めっきで覆われている非作用のダイヤモンド粒子が占めていた。図 16 に有効作用砥粒数の全体砥粒数に対する比率を示す。本実験では突出し高さおよび有効作用砥粒数の結果から、加工に寄与した砥粒数が全体の 10%程度であるため、工具寿命が長くなることが期待できる。また、有効作用砥粒数が少ないため、砥粒間隔が大きくなり、表面粗さやうねりなどの加工面精度に影響を及ぼしたと考えられる (Möller et al., 2004)。



(a) φ80μm 6-12μm 16.36mm/min (b) Close-up of A
Fig. 15 SEM micrographs of diamond grains on the used wire.

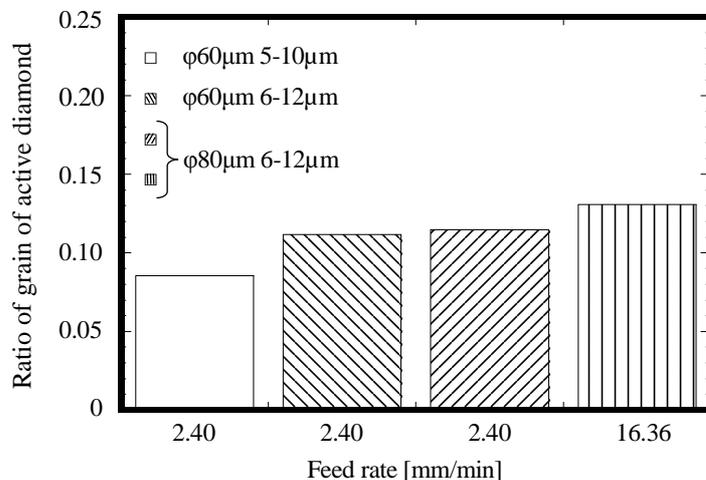


Fig. 16 Ratio for state of active diamond grains at various feed rate and wire specification.

図 17 に加工後のブレード表面の SEM 観察結果の一例を示す. 図 17(a)の先端外周部は砥粒が著しく摩滅しており, ボンドテールが見られ, ブレード表面に切屑付着が確認された. 図 17(b)の先端側面部は先端外周部と同様に砥粒の摩滅や切屑付着が観察され, 全体的に砥粒の突出し部分がほとんど見られず, 突出し高さ測定結果と一致した. 本実験の 5 回連続切断ではブレード摩耗が著しいため, 砥粒の切込深さが小さくなり, 途中でドレッシング工程を入れて切断能力の回復を図る必要がある.

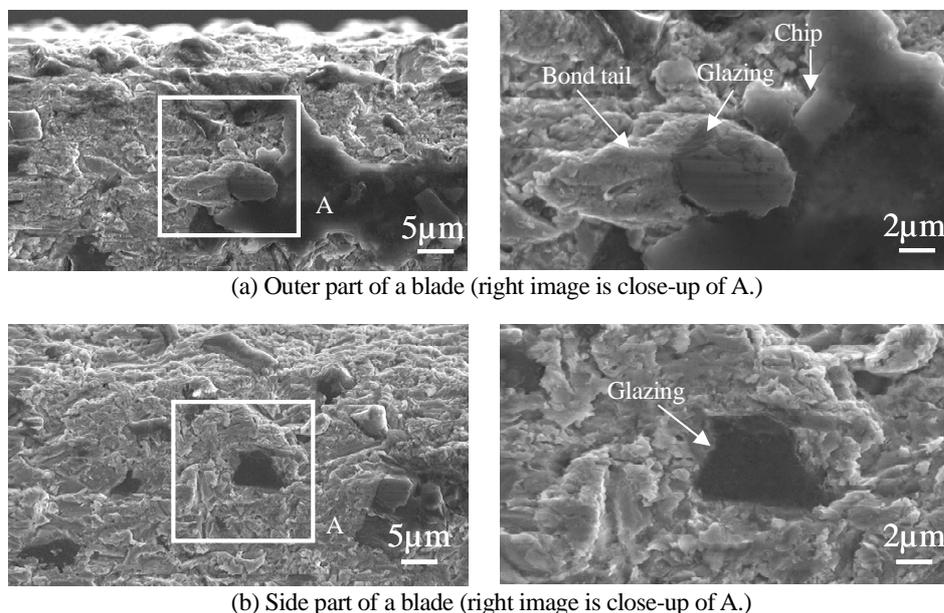


Fig. 17 SEM micrographs of diamond grains on the used blade (SD1200, 180 mm/min).

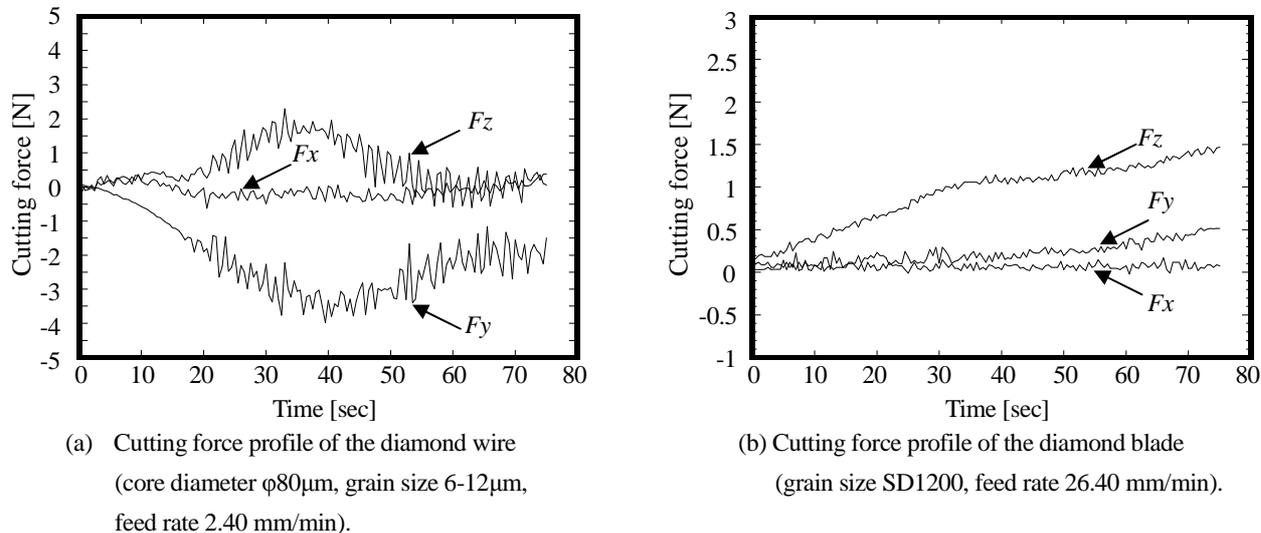


Fig. 18 Relationship between the cutting force and slicing time (75sec) at 1 line slice.

3・6 切断抵抗

軸方向, 接線方向 (ワイヤ走行方向), 垂直方向の力をそれぞれ F_x , F_y , F_z とし, 力の正方向については図 1 に示す. 図 18(a)にダイヤモンドワイヤ切断加工での 1 回目切断時の切断抵抗のプロファイル結果例を示す. 接線方向の力はワイヤ走行方向と反対向きに力がかかり, 40 sec 付近で最大値を示し, 垂直方向の力は被削材を押し付ける方向に力がかかり, 35 sec 付近で最大値を示し, 接線方向の力と同様に低下する. これは切断時間の 35 sec から 40 sec 間はワイヤが被削材の厚みの中央位置付近に到達している時間とほぼ一致しており, たわみ量が最も大きいためと考えられる (Li et al., 2017). 図 18(b)に電鍍ブレード切断加工での 1 回目切断時の切断抵抗のプロファイル結果例を示す. 垂直方向の力は被削材に接触した切断開始直後から急増し, 切断時間とともに増加してい

る。これは、図 17 で観察された砥粒の摩耗が次第に進んでいき、切断性能が低下するためであると推定される。図 19 に異なるワーク送り速度でのダイヤモンドワイヤ切断加工における垂直方向切断抵抗の結果を示す。ワーク送り速度上昇により垂直方向の切断抵抗が増加し、さらに切断回数が増加すると最大切断抵抗は漸減した。切断抵抗の減少は砥粒上の Ni めっきが除去され、有効作用砥粒数が次第に増加するためと考えられる。図 20 に異なる砥粒径でのダイヤモンドワイヤ切断加工における垂直方向切断抵抗の結果を示す。砥粒径 5-10 μm 、6-12 μm ともに切断回数増加により最大切断抵抗は減少した。切断条件が同じ場合、砥粒にかかる力は同じであり、有効作用砥粒数の差でわずかに細粒の方が高くなると考えられる (Liedke and Kuna, 2011)。また、図 19, 図 20 の結果から砥粒径が同じ場合でも芯線径が太くなると切断幅が大きくなり、砥粒間隔が細線と比較して広がる。加工によって有効作用砥粒が被削材に接触することは、ワイヤのねじれの影響などでランダムに起きるため、切断回数ごとに有効砥粒数の増加、減少が生じ、切断抵抗の平均値もその影響を受けて変動が現れたと考えられる。

図 21 に異なる砥粒径および異なるワーク送り速度で電鍍ブレードにおける垂直方向切断抵抗の結果を示す。ワーク送り速度が遅く砥粒径が小さい場合、切断回数が増加すると、最大切断抵抗は漸増した。ワーク送り速度が速くなると切断抵抗は、遅い場合と比較して最大切断抵抗で 1 N 以上上昇し、顕著な差がみられた。これは砥粒観察結果から見られた砥粒の磨耗が促進し、突出し高さの減少のため切断能力が低下した影響である (Agarwal and Rao, 2008)。

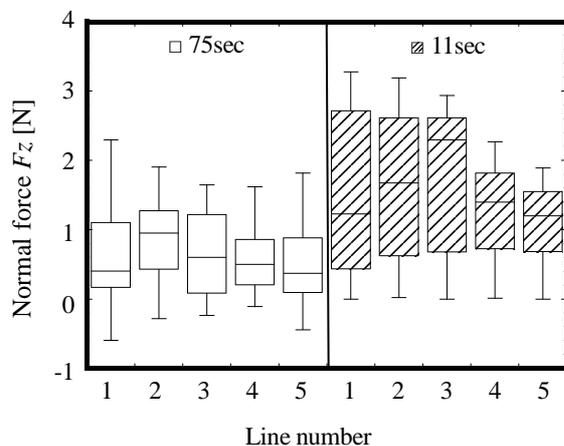


Fig. 19 Changes of the normal force and line number in the different feed rate (core diameter $\phi 80\mu\text{m}$, grain size 6-12 μm).

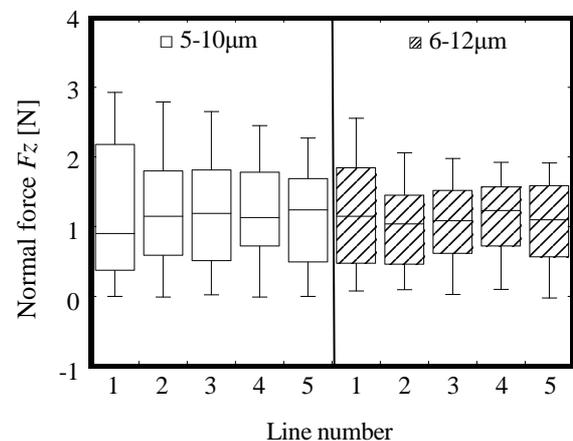
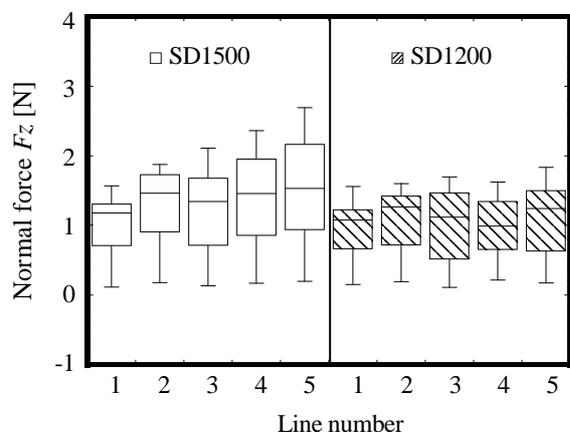
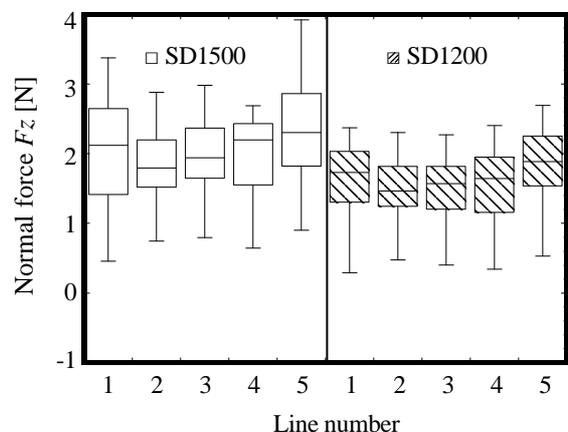


Fig. 20 Changes of the normal force and line number in the different grain size of a diamond wire (core wire diameter $\phi 60\mu\text{m}$, slicing time 75sec).



(a) Feed rate 26.40mm/min (slicing time 75sec).



(b) Feed rate 180mm/min (slicing time 11sec).

Fig. 21 Changes of the normal force and line number at different work feed rate of a diamond blade.

切断時間 11 sec の同じ加工時間でのダイヤモンドワイヤ切断加工では切断回数増加につれて最大垂直切断抵抗は低減する結果に対し、ブレード切断加工では最大垂直切断抵抗は緩やかに上昇した。一般にブレード切断では、被削材を切断する砥粒 1 個あたりの切れ刃が必要とする切込深さが重要である。従来の研削理論における砥粒 1 個あたりの切込深さの関係は、次式で表される (奥山, 2015)。

$$g = 2a \frac{v}{V} \sqrt{\frac{t}{D}} \quad (1)$$

ここで、 a : 砥粒間隔, v : ワーク送り速度, V : 切断砥石速度, t : 切込量, D : 砥石外径を示す。砥粒 1 個あたりの切込深さはワーク送り速度が増加すると大きくなり、砥粒間隔が狭くなると小さくなる。ダイヤモンドワイヤ切断では切断回数増加につれて有効作用砥粒数が増加するため、砥粒間隔が小さくなり、砥粒 1 個あたりの切込深さが小さくなり、切断抵抗が減少したと考えられる。ブレード切断では切断ブレードが被削材に接触している接触長さは切断ブレードの外径、被削材の厚みおよび切込量によって決定される。切断抵抗は接触長さの影響を受けるため、接触長さを小さくするよう考慮する必要があるが、切断ブレードの大きさや被削材の厚みが加工精度の要求に応じて制限されてしまう。一方、ダイヤモンドワイヤ切断加工ではワイヤ走行させながら被削材に押し付ける加工方法であり、被削材の厚みに基本的に制限を受けない。加工張力などの最適切断条件の選定を選択することで、高精度な切断加工が期待できる。

4. 考 察

SiC の微小荷重と変位のナノインデンテーション結果から延性モードの切断加工を行うためには、圧痕 30 mN でクラックが発生しない押し込み深さが 0.15 μm 以下であり、砥粒 1 個あたりの切込深さは約 0.15 μm 以下にする必要があるとされる (Yan et al., 2010, 和泉他, 2016, Goel et al., 2014, Matsumoto et al., 2017)。本実験結果からダイヤモンドワイヤ切断加工における砥粒個数と被削材を切断する際に必要とされる最大切断抵抗から砥粒 1 個あたりにかかる力を算出した。ダイヤモンドワイヤ切断加工においてダイヤモンドワイヤの円周上の半周分が被削材に接触し、長さ方向は図 16 の実験結果から得られた有効作用砥粒比率分が加工に寄与したと仮定すると、被削材長さ 30 mm の中に存在する面積あたりの砥粒数は芯線径 60 μm では約 61 個/ mm^2 で、芯線径 80 μm は約 52 個/ mm^2 となる。その結果を表 3 に示す。砥粒 1 個あたりにかかる力は、30 mN 以上に至り、クラックが発生しない延性モードの臨界値を超え、脆性破壊を生じチッピングが発生したと考えられる。

Table 3 Calculated force at one abrasive grain on the used diamond wire

Core wire diameter [μm]	Grain size [μm]	Slicing time [sec]	Feed rate [mm/min]	Force at one abrasive grain [mN]	
				1 st sliced	5 th sliced
60	5-10	75	2.40	47.9	37.2
	6-12	75	2.40	41.9	31.4
80	6-12	75	2.40	44.4	35.1
		11	16.36	63.3	36.6

図 22 にワイヤ長さ 100mm でのワイヤの強度と伸びの関係を示す。加工張力時のワイヤ走行方向に負荷された時の芯線径 60 μm の伸び量は約 1.5mm であり、芯線径 80 μm の伸び量は約 1.3mm である。芯線径 80 μm の伸び量が小さいため、砥粒間隔が芯線径 60 μm と比較して相対的に狭い状態であり、式(1)のとおり砥粒 1 個あたりの切込み深さが減少する。ワイヤが加工負荷によりたわんで伸びやすい状態では砥粒間隔が広がり、砥粒 1 個あたりの切込み深さが大きくなり、切断時の砥粒に対する力が増加する。同じ加工時間のワイヤ切断で比較した場合、芯線径 60 μm の場合は有効作用砥粒数が多くなるため、砥粒間隔が狭くなり、砥粒 1 個あたりの切込み深さは減少し、砥粒に対する力は減少すると考えられる。

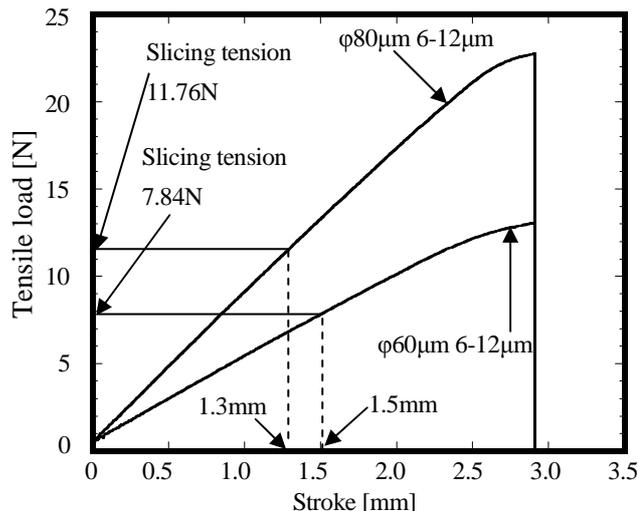


Fig. 22 Relationship between stroke and tensile load of the different core wire diameter.

図 23 はワイヤ切断加工における模式図を示したものである。図 23(a)にワイヤ切断加工における砥粒切込み深さの模式図を示す。

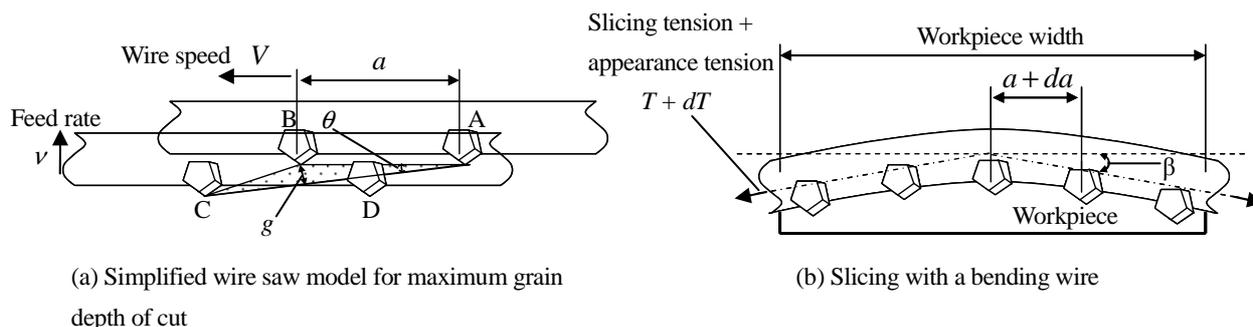


Fig. 23 Schematic of diamond wire slicing with a bending wire.

先行する砥粒と砥粒間隔 a 離れた砥粒が示す軌跡で囲んだ ABC の部分を切屑断面積とする。 g は砥粒 1 個あたりが示す最大切込み深さである。ワイヤ線速 $V = 1750 \text{ m/min}$, ワーク送り速度 $v = 16.36 \times 10^{-3} \text{ m/min}$ だとすると $V \gg v$ であるから,

$$g = a \sin \theta = a \sin(\tan^{-1} \frac{v}{V}) \approx a \frac{v}{V} \tag{2}$$

ここで、 θ は $\angle BAC$ である。ワーク送り速度が速くなるほど切込み深さは大きくなる。また、図 23(b)にワイヤ切断加工時のたわみの模式図を示す。垂直方向の切断抵抗を円錐近似した砥粒切れ刃研削モデル (庄司, 2008) で考えると,

$$F_z = C_p \left(\frac{\pi v S}{2V} \right) \tan \alpha \tag{3}$$

ここで、 C_p : 材料の比研削エネルギー, α : ダイヤモンドの先端部の半頂角, S : 断面積を表す。切断幅を d_w とすると、断面積は式(2)を代入して以下の式で表すことができる。

$$S = d_w g = d_w a \frac{v}{V} \tag{4}$$

式(4)を式(3)に代入して,

$$F_z = Cp \left(\frac{vS}{V} \right) \frac{\pi}{2} \tan \alpha = Cp \left(\frac{d_w a v^2}{V^2} \right) \frac{\pi}{2} \tan \alpha \tag{5}$$

ワイヤの伸びにより da 分砥粒間隔が増加し, 加工時のたわみ角を β とするとワイヤのたわみを考慮した垂直方向の切断抵抗は次式で表される.

$$F_z = Cp \left(\frac{d_w (a + da) v^2}{V^2 \cos \beta} \right) \frac{\pi}{2} \tan \alpha \tag{6}$$

したがって, 砥粒間隔が大きくなり, たわみ角が大きくなると垂直方向の切断抵抗が増加する. 実加工ではワイヤのたわみとともにワイヤ走行方向に加工時のたわみや振動を抑制するための見かけの張力が加わり, ワイヤ上の砥粒間隔が大きくなる. チッピングの少ない加工のためには垂直方向の切断抵抗を低下させることが重要であるから, 細線を使用し, 切断幅を狭くし, 有効作用砥粒数を多くさせ, 細粒にすることが適していると考えられる.

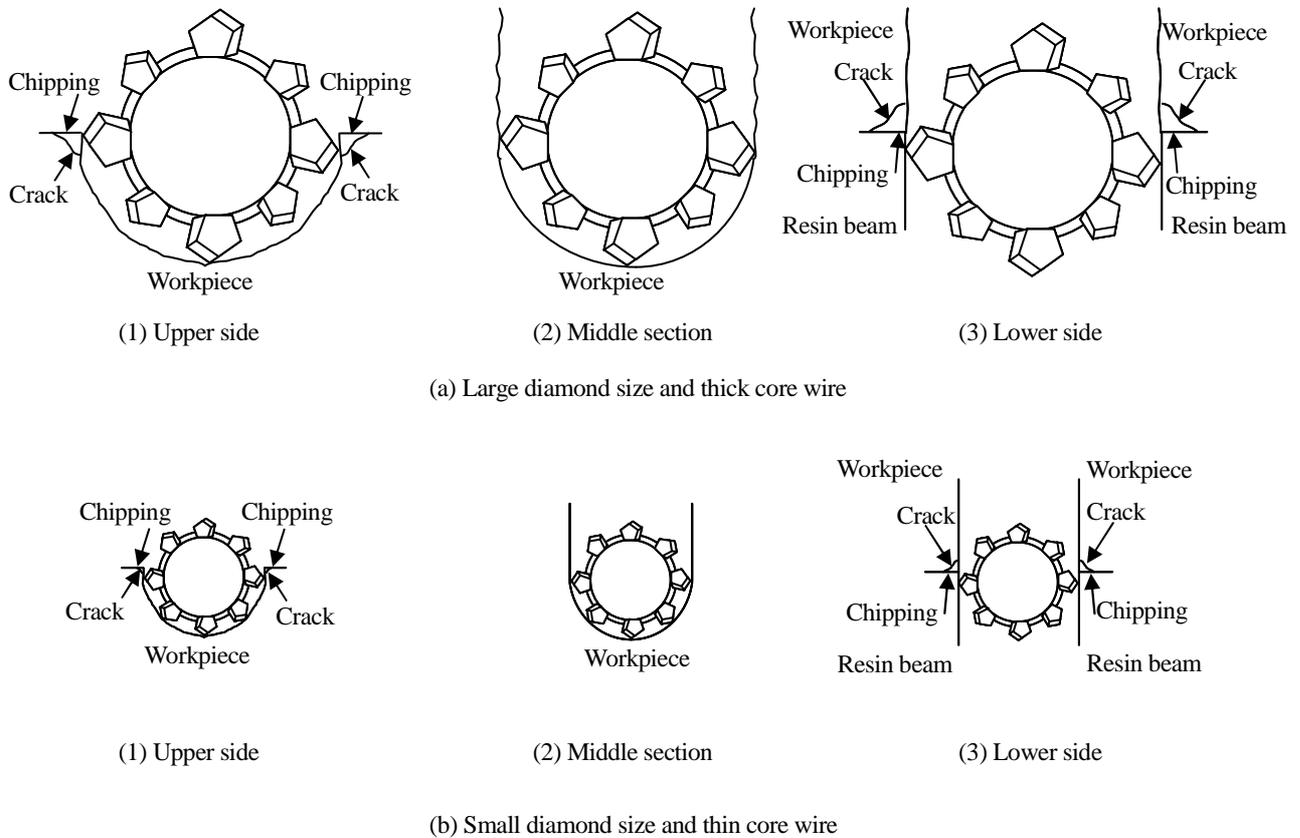


Fig. 24 Schematic of diamond wire slicing modes at different depth.

図 24(a)に従来の芯線径で砥粒径が大きい場合、図 24(b)に芯線径が従来の半分で砥粒径が小さい場合のダイヤモンドワイヤの切断加工モードの模式図を示す。砥粒径が大きくなると砥粒平均径から最大粒子径までの差が大きくなり、砥粒の高さばらつきが増加する(日本工業規格, 2017)。そのため砥粒間隔が大きくなり切断抵抗が増加し、被削材にクラックやチッピングが発生しやすくなる。ダイヤモンドワイヤ切断加工ではめっきで覆われた砥粒が被削材と接触することで砥粒の先端が露出し、加工に寄与する有効作用砥粒となる。加工初期ではまだその割合が少なく、被削材端面にチッピングが発生しやすい。加工後期では有効作用砥粒が増加し、良好な面粗さをもたらす。砥粒 1 個あたりに生じる切断抵抗を減少させる。被削材からワイヤが切り離される部分はワイヤのたわみを保持されながら、材料硬度の異なるベース材のレジンビームに切り込むため垂直方向切断抵抗の変化が大きく、被削材にクラックやチッピングが発生しやすい。砥粒径が小さい場合は、砥粒の高さばらつきが砥粒径の大きい場合と比較して相対的に小さくなるため、砥粒間隔が小さくなり切断抵抗が低減し、被削材へのクラックやチッピングが抑制される。ワイヤの砥粒の保持力は砥粒径ごとにめっき膜厚を調整し、切断能力を維持する必要な突出し高さが求められるため、砥粒径を小さくして保持力を急激に高めることは困難である。そのため被削材へのクラックやチッピングの抑制のためには有効作用砥粒数を多くすることが最適であると考えられる(Kim et al., 2016)。

汎用の電鑄ブレード切断では SiC は非常に加工困難な材料であり、細粒の場合突出し高さが小さく、摩滅した状態の砥粒で無理に加工を行うため、切断抵抗が大きくなり、脆性破壊モードに至りチッピングが大きく発生すると考えられる(Mussi et al., 2007)。表面粗さは摩滅した砥粒でこすりながら加工をしているためダイヤモンドワイヤ切断と比較して向上するが、切断幅を狭くすることが必要とされる加工要求が増加する中、チッピング幅の大きさは後工程に影響する。ダイヤモンドワイヤ切断加工は切断加工途中でドレッシングを行わずに連続加工ができる有効な加工方法であり、細粒で砥粒数を増加させることによりさらに高精度な加工面を得ることが期待される。

5. 結 言

線径および砥粒径を従来の半分以下の極細線固定砥粒ダイヤモンドワイヤを用いて、SiC ウェハの精密切断加工を実施し、電鑄ブレードでの精密切断加工と比較検討を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) ダイヤモンドワイヤ切断加工の切断幅は切断回数増加にともない小さくなり、電鑄ブレード切断加工では切断回数増加にともない大きくなる。
- (2) 下面チッピング幅はダイヤモンドワイヤ切断加工において電鑄ブレード切断加工より著しく改善する。これは、加工時に使用される切断長さの差がダイヤモンドワイヤ切断では約 85 倍であり、砥粒の摩耗量が少なくなり、ブレード切断で生じる砥粒摩滅による脆性破壊が抑制されたためである。
- (3) 提案した極細線ダイヤモンドワイヤを用いることで、砥粒の突出し高さのばらつきが低減し、チッピングの抑制が可能である。
- (4) 表面粗さは加工方法によらず細粒にすることで向上し、電鑄ブレード切断加工の方が良好であった。
- (5) 垂直方向切断抵抗はダイヤモンドワイヤ切断加工では切断回数増加とともに減少し、電鑄ブレード切断加工では切断回数増加とともに上昇した。
- (6) 本研究で提案した極細線ダイヤモンドワイヤ切断加工により、従来のダイヤモンドワイヤ切断加工に対して切断幅を半分に低減した。

文 献

- Agarwal, S. and Rao, P. V., Experimental investigation of surface/subsurface damage formation and material removal mechanisms in SiC grinding, *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, Vol.48 (2008), pp.698–710.
- Cvetković, S., Morsbach, C. and Rissing, L., Ultra-precision dicing and wire sawing of silicon carbide (SiC), *Microelectronic Engineering*, Vol.88 (2011), pp.2500–2504.
- 舟木剛, 新パワー半導体と周辺部品, 粉体および粉末冶金, Vol.63, No.5 (2016), pp.328–332.
- Gao, Y., Ge, P. and Liu, T., Experiment study on electroplated diamond wire saw slicing single-crystal silicon, *Materials*

- Science in Semiconductor Processing, Vol.56 (2016), pp.106–114.
- Goel, S., Luo, X., Comley, P., Reuben, R. L. and Cox, A., Brittle-ductile transition during diamond turning of single crystal silicon carbide, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.65 (2013), pp.15–21.
- Goel, S., Yan, J., Luo, X. and Agrawal, A., Incipient plasticity in 4H-SiC during quasistatic nanoindentation, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol.34 (2014), pp.330–337.
- Gogotsi, G. A., Criteria of ceramics fracture (edge chipping and fracture toughness tests), *Ceramics International*, Vol.39 (2013), pp.3923–3300.
- Hardin, C. W., Qu, J. and Shih, A. J., Fixed abrasive diamond wire saw slicing of single-crystal silicon carbide wafers, *Materials and Manufacturing Process*, Vol.19, No.2 (2004), pp.355–367.
- Huang, H., Zhang, Y. and Xu, X., Experimental investigation on the machining characteristics of single-crystal SiC sawing with the fixed diamond wire, *International of Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol.81 (2015), pp.955–965.
- Ishikawa, Y., Yao, Y. Z., Sugawara, Y., Sato, K., Okamoto, Y., Hayashi, N., Dierre, B., Watanabe, K. and Sekiguchi, T., Comparison of slicing-induced damage in hexagonal SiC by wire sawing with loose abrasive, wire sawing with fixed abrasive, and electric discharge machining, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.53 (2014), pp.071301-01–071301-11.
- 和泉康夫, 藤田隆, 南久, 渡邊純二, 峠睦, SiC 半導体基板用 PCD ダイシングブレードの開発, 砥粒加工学会誌, Vol.60, No.11 (2016), pp.597–602.
- 日本工業規格, 研削といし用研削材の粒度—第2部: 微粉, JIS R 6001-2 (2017), pp.3–5.
- 加藤智久, NEDO プロ「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」での大口径 SiC ウェハ加工技術, 精密工学会誌, Vol.80, No.1 (2014), pp.18–22.
- Kim, D., Kim, H., Lee, S., Lee, T. and Jeong, H., Characterization of diamond wire-cutting performance for lifetime estimation and process optimization, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.30, No.2 (2016), pp.847–852.
- Lee, S., Kim, H., Kim, D. and Park, C., Investigation on diamond wire break-in and its effects on cutting performance in multi-wire sawing, *International of Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol.87 (2016), pp.1–8.
- Li, S., Tang, A., Liu, Y., Wang, J., Cui, D. and Landers, R. G., Analytical force modeling of fixed abrasive diamond wire saw machining with application to SiC monocrystal wafer processing, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.139, No.4 (2017), pp.041003-1–041003-11.
- Liedke, T. and Kuna, M., A macroscopic mechanical model of the wire sawing process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.51 (2011), pp.711–720.
- Matsumoto, M., Huang, H., Harada, H., Kakimoto, K. and Yan, J., On the phase transformation of single-crystal 4H-SiC during nanoindentation, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol.50 (2017), pp.265303 (9pp).
- Meinel, B., Koschwitz, T. and Acker, J., Textual development of SiC and diamond wire sawed sc-silicon wafer, *Energy Procedia*, Vol.27 (2012), pp.330–336.
- Möller, H. J., Basic mechanisms and models of multi-wire sawing, *Advanced Engineering Materials*, Vol.60, No.7 (2004), pp.501–513.
- Morrell, R. and Gant, A. J., Edge chipping of hard materials, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, Vol.19 (2001), pp.293–301.
- Mussi, A., Rabier, J., Thilly, L. and Demenet, J. L., Plasticity and deformation microstructure of 4H-SiC below the brittle-to-ductile transition, *Physica Status Solidi (c)* (2007), pp.1–5.
- Nassauer, B., Hess, A. and Kuna, M., Numerical and experimental investigations of micromechanical process during wire sawing, *International Journal of Solids and Structures*, Vol.51 (2014), pp.2656–2665.
- 奥山繁樹, 若手技術者のための研削工学 (第4回) 研削加工の幾何学, 砥粒加工学会誌, Vol.59, No.5 (2015), pp.278–281.
- Patten, J., Gao, W. and Kudo, Y., Ductile regime nanomachining of single-crystal silicon carbide, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.127, No.8 (2005), pp.522–532.
- Qiusheng, Y., Senkai, C. and Jisheng, P., Surface and subsurface cracks characteristics of single crystal SiC wafer in surface machining, *Proceedings of 4th International Congress in Advances in Applied Physics and Materials Science* (2014).
- Roth, G. L., Adelman, B. and Hellmann, R., Cutting and drilling of SiC semiconductor by fiber laser, *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, Vol.10, No.3 (2015), pp.279–283.
- 庄司克雄, 研削加工学, 養賢堂 (2008), pp.87–93.
- 諏訪部仁, 大久保順平, 松川和平, 石川憲一, マルチワイヤーソーによる SiC の延性モードスライシング加工に関

- する研究, 砥粒加工学会誌, Vol.60, No.2 (2016), pp.91–96.
- 鈴木孝彰, 大槻俊紀, 閻 紀旺, ダイシングワイヤーによる単結晶シリコンの精密切断に関する研究, 砥粒加工学会誌, Vol.60, No.2 (2016), pp.97–103.
- Tanaka, H. and Shimada, S., Damage-free machining of monocrystalline silicon carbide, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol.62 (2013), pp.55–58.
- Teomete, E., Effect of process parameters on surface quality for wire saw cutting of alumina ceramic, *Grazi University Journal of Science*, Vol.24, No.2 (2011), pp.291–297.
- Yan, J., Gai, X. and Harada, H., Subsurface damage of single crystalline silicon carbide in nanoindentation tests, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol.10 (2010), pp.7808–7811.
- Yan, J., Zhang, Z. and Kuriyagawa, T., Mechanism for material removal in diamond turning of reaction-bonded silicon carbide, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.49 (2009), pp.364–374.

References

- Agarwal, S. and Rao, P. V., Experimental investigation of surface/subsurface damage formation and material removal mechanisms in SiC grinding, *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, Vol.48 (2008), pp.698–710.
- Cvetković, S., Morsbach, C. and Rissing, L., Ultra-precision dicing and wire sawing of silicon carbide (SiC), *Microelectronic Engineering*, Vol.88 (2011), pp.2500–2504.
- Funaki, T., Novel power semiconductor device and peripheral components, *Journal of the Japan Society Powder Metallurgy*, Vol.63, No.5 (2016), pp.328–332 (in Japanese).
- Gao, Y., Ge, P. and Liu, T., Experiment study on electroplated diamond wire saw slicing single-crystal silicon, *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol.56 (2016), pp.106–114.
- Goel, S., Luo, X., Comley, P., Reuben, R. L. and Cox, A., Brittle-ductile transition during diamond turning of single crystal silicon carbide, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.65 (2013), pp.15–21.
- Goel, S., Yan, J., Luo, X. and Agrawal, A., Incipient plasticity in 4H-SiC during quasistatic nanoindentation, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol.34 (2014), pp.330–337.
- Gogotsi, G. A., Criteria of ceramics fracture (edge chipping and fracture toughness tests), *Ceramics International*, Vol.39 (2013), pp.3923–3300.
- Hardin, C. W., Qu, J. and Shih, A. J., Fixed abrasive diamond wire saw slicing of single-crystal silicon carbide wafers, *Materials and Manufacturing Process*, Vol.19, No.2 (2004), pp.355–367.
- Huang, H., Zhang, Y. and Xu, X., Experimental investigation on the machining characteristics of single-crystal SiC sawing with the fixed diamond wire, *International of Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol.81 (2015), pp.955–965.
- Ishikawa, Y., Yao, Y. Z., Sugawara, Y., Sato, K., Okamoto, Y., Hayashi, N., Dierre, B., Watanabe, K. and Sekiguchi, T., Comparison of slicing-induced damage in hexagonal SiC by wire sawing with loose abrasive, wire sawing with fixed abrasive, and electric discharge machining, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.53 (2014), pp.071301-01–071301-11.
- Izumi, Y., Fujita, T., Minami, H., Watanabe, J. and Touge, M., Development on PCD dicing blade for SiC semiconductor substrate, *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology*, Vol.60, No.11 (2016), pp.597–602 (in Japanese).
- Japanese Industrial Standards., Bonded abrasives-determination and designation of grain size distribution-part 2: microgrits, *JIS R 6001-2* (2017), pp.3–5 (in Japanese).
- Kato, T., Development of large SiC wafer processing technique in “novel semiconductor power electronics project realizing low carbon emission society” supported by NEDO, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.80, No.1 (2014), pp.18–22 (in Japanese).
- Kim, D., Kim, H., Lee, S., Lee, T. and Jeong, H., Characterization of diamond wire-cutting performance for lifetime estimation and process optimization, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.30, No.2 (2016), pp.847–852.
- Lee, S., Kim, H., Kim, D. and Park, C., Investigation on diamond wire break-in and its effects on cutting performance in multi-wire sawing, *International of Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol.87 (2016), pp.1–8.
- Li, S., Tang, A., Liu, Y., Wang, J., Cui, D. and Landers, R. G., Analytical force modeling of fixed abrasive diamond wire saw machining with application to SiC monocrystal wafer processing, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.139, No.4 (2017), pp.041003-1–041003-11.
- Liedke, T. and Kuna, M., A macroscopic mechanical model of the wire sawing process, *International Journal of Machine*

Tools & Manufacture, Vol.51 (2011), pp.711–720.

- Matsumoto, M., Huang, H., Harada, H., Kakimoto, K. and Yan, J., On the phase transformation of single-crystal 4H-SiC during nanoindentation, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol.50 (2017), pp.265303 (9pp).
- Meinel, B., Koschwitz, T. and Acker, J., Textural development of SiC and diamond wire sawed sc-silicon wafer, *Energy Procedia*, Vol.27 (2012), pp.330–336.
- Möller, H. J., Basic mechanisms and models of multi-wire sawing, *Advanced Engineering Materials*, Vol.60, No.7 (2004), pp.501–513.
- Morrell, R. and Gant, A. J., Edge chipping of hard materials, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, Vol.19 (2001), pp.293–301.
- Mussi, A., Rabier, J., Thilly, L. and Demenet, J. L., Plasticity and deformation microstructure of 4H-SiC below the brittle-to-ductile transition, *Physica Status Solidi (c)* (2007), pp.1–5.
- Nassauer, B., Hess, A. and Kuna, M., Numerical and experimental investigations of micromechanical process during wire sawing, *International Journal of Solids and Structures*, Vol.51 (2014), pp.2656–2665.
- Okuyama, S., Wakategijyutusanotamenokensakukougaku (dai 4kai) kensakukakounokikagaku, *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology*, Vol.59, No.5 (2015), pp.278–281 (in Japanese).
- Patten, J., Gao, W. and Kudo, Y., Ductile regime nanomachining of single-crystal silicon carbide, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.127, No.8 (2005), pp.522–532.
- Qiusheng, Y., Senkai, C. and Jisheng, P., Surface and subsurface cracks characteristics of single crystal SiC wafer in surface machining, *Proceedings of 4th International Congress in Advances in Applied Physics and Materials Science* (2014).
- Roth, G. L., Adelman, B. and Hellmann, R., Cutting and drilling of SiC semiconductor by fiber laser, *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, Vol.10, No.3 (2015), pp.279–283.
- Shoji, K., *Kensakukougaku*, Youkendo (2008), pp.87–93 (in Japanese).
- Suwabe, H., Okubo, J., Matsukawa, K. and Ishikawa, K., Ductile mode slicing of SiC using multi-wire saw, *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology*, Vol.60, No.2 (2016), pp.91–96 (in Japanese).
- Suzuki, T., Otsuki, T. and Yan, J., Precision slicing of single-crystal silicon using a dicing wire saw, *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology*, Vol.60, No.2 (2016), pp.97–103 (in Japanese).
- Tanaka, H. and Shimada, S., Damage-free machining of monocrystalline silicon carbide, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol.62 (2013), pp.55–58.
- Teomete, E., Effect of process parameters on surface quality for wire saw cutting of alumina ceramic, *Grazi University Journal of Science*, Vol.24, No.2 (2011), pp.291–297.
- Yan, J., Gai, X. and Harada, H., Subsurface damage of single crystalline silicon carbide in nanoindentation tests, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol.10 (2010), pp.7808–7811.
- Yan, J., Zhang, Z. and Kuriyagawa, T., Mechanism for material removal in diamond turning of reaction-bonded silicon carbide, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.49 (2009), pp.364–374.