

多結晶ダイヤモンド円盤工具を用いた 単結晶 SiC の放電研削複合加工

黒澤智子* 閻 紀旺*

Electrical Discharge Machining and Grinding of SiC Single Crystal Using a Disc-type Hybrid Tool of Polycrystalline Diamond

Tomoko KUROSAWA and Jiwang YAN

Abstract

Silicon carbide (SiC) single crystal was machined using a disc-type hybrid tool of polycrystalline diamond (PCD). The tool can be used to perform electrical discharge machining (EDM) as a roughing process and grinding as a finishing process. The width of the discharge gap and the thickness of the resolidified layer caused by EDM were measured, the results of which were then used to optimize the subsequent grinding conditions. As a result, ductile mode grinding was realized by removing the EDM-induced resolidified layer completely. In addition, a low surface roughness was obtained after grinding by utilizing the electrical discharges in EDM to dress the PCD tool surface. Finally, high surface integrity and productivity were successfully sustained by optimizing the EDM-grinding cycles.

Key words: EDM, grinding, polycrystalline diamond, SiC single crystal

1. 緒 論

単結晶 SiC は優れた電気的特性, 高硬度, 耐熱性, 耐摩耗性, 化学的安定性といった特徴から, 近年パワー半導体や MEMS, 切削工具など広い分野で注目されている¹⁾²⁾. しかし, SiC は典型的な硬脆材料であり, 機械加工性が悪く, 高精度かつ高能率の加工が極めて困難とされている. 従来の切削や研削では, 工具摩耗や破損そして加工面の脆性破壊などの問題がある³⁾. 類似の問題は超硬合金の加工においても存在する. そこで, 超硬合金に対して多結晶ダイヤモンド(Polycrystalline Diamond : PCD)を用いた放電・研削逐次加工が提案されている⁴⁾. PCD は高い融点や昇華点をもち導電率や熱伝導率も高いため放電加工(Electrical discharge machining : EDM)の工具

電極として適している. また, ダイヤモンド粒子から構成されているため研削砥石としても使用できる.

そこで, 著者らは, 単結晶 SiC が導電性を持つため放電加工が可能であることに着目し, PCD をハイブリッド工具として用いた放電と研削の複合加工技術を適用し, 工具摩耗の抑制および表面品質の向上を目指してきた⁵⁾. 放電加工では工具と工作物が非接触であり, 工作物の硬さによる工具摩耗や破損の問題を解決できるため, まず放電による荒加工を行う. そして, 放電加工において形成された再凝固層という軟化層を除去するため, 同一の PCD 工具を用いて仕上げ加工として研削加工を行うことで, 表面品質の向上を図る.

また, 放電ドレッシングを行った PCD ブレードを

* 慶應義塾大学理工学部 機械工学科 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1)

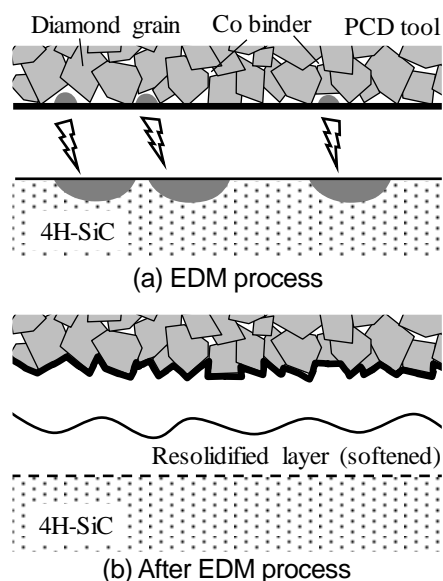


Fig. 1 Schematic of PCD surface topography change due to the dressing effect of EDM

用いた単結晶 SiC の高精度ダイシングが報告されている⁹⁾。本研究では、荒加工である放電時に同時に PCD 工具のドレッシング効果が得られると考えられる。Fig. 1 に放電時の工具、工作物の状態を示す。放電加工により PCD 工具表面からバインダであるコバルト(Co)が選択的に除去され (Fig. 1(a))、ダイヤモンド粒子が突出し、工具表面のドレッシング効果が得られる (Fig. 1(b))。その結果、後工程である研削において砥石として良好な状態を維持して研削が行えると考えられる。ここで、研削後の目つぶれた工具は、荒加工の放電によってドレッシングも同時に行えるため、ドレッシングを別工程として設ける必要がなく連続した加工が可能となる。

これまでに棒状の PCD 工具の端面を用いた放電研削複合加工の効果を確認した⁵⁾。しかし、より大面積の加工や微細溝などの形状加工を行うには、円盤状 PCD 工具のほうが有利であると考えられる。そこで本研究では、円盤状 PCD 工具を用いて単結晶 SiC の放電研削複合加工を行った。放電加工による再凝固層の組成や深さを測定し、それに基づいて研削条件を設定した。そして仕上げ加工である研削において、研削条件が表面品質に与える影響を調査した。また、放電によるドレッシング効果の観点から放電と研削の相互的な影響を調査し、加工サイクルの最適化を試みた。

Table 1 Properties of 4H-SiC

Surface plane	(0001)
Doping type	N-type
Electrical resistivity [Ω/cm]	0.015 ~ 0.028
Mohs hardness	~9.2
Thermal conductivity [$\text{W}/\text{cm}\cdot\text{K}$]	3.7
Melting point [$^{\circ}\text{C}$]	2730
Sublimation temperature [$^{\circ}\text{C}$]	2830
Dielectric constant	9.76
Band gap [eV]	3.23

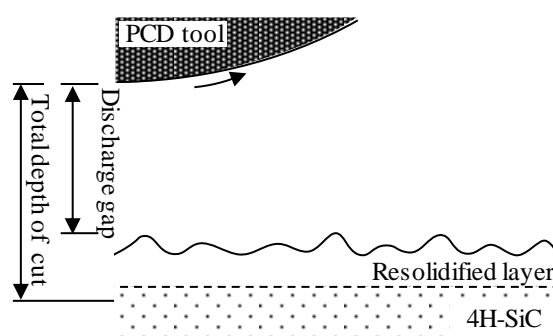


Fig. 2 Position of tool and workpiece after EDM

2 実験装置および方法

2.1 加工機および被削材

本研究では、微細放電加工機 MGED72 (Panasonic (株) 製) を使用した。放電加工と同時に工具を回転させることができるため、放電加工後に同一の工具による研削加工を行うことができる。工作物には、窒素を混入させた N タイプの単結晶 4H-SiC ウエハを用い、(0001)面に対して加工を行った。Table 1 に単結晶 4H-SiC の材料特性を示す。工具には、直径 20 mm、厚さ 0.3 mm の円盤状の PCD を使用した。0.5 ~ 1、3 ~ 5 μm のダイヤモンド粒子の混粒で構成され、バインダである Co の含有率は約 10% である。

2.2 放電ギャップ幅および再凝固層厚さの測定

仕上げ過程において研削を行う目的のひとつに、放電で生じた再凝固層の除去が挙げられる。そこで工具移動量の値は、Fig. 2 に示す放電過程終了時の工具と工作物の位置関係のように放電ギャップ幅と再凝固層の厚さを考慮して設定しなければならない。放電ギャップ幅を測定するため、Fig. 3 に示すように、4H-SiC に対して棒状の PCD 電極を用い

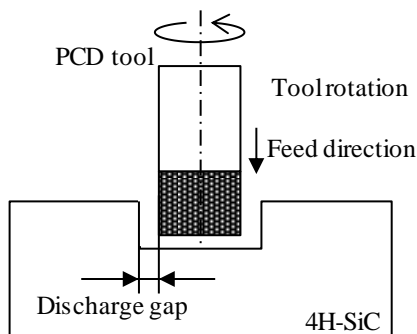


Fig. 3 Schematic of experiment for measuring width of discharge gap

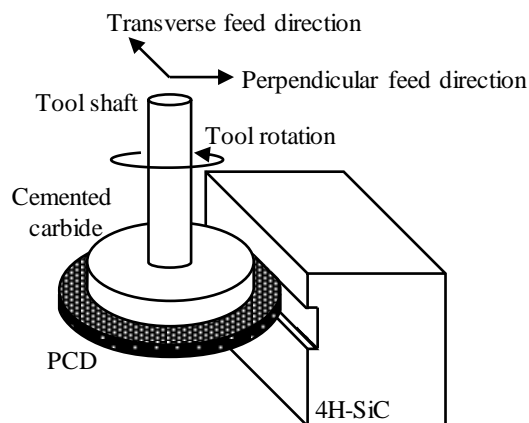


Fig. 4 Schematic of the hybrid machining process using a disc-type PCD tool

Table 2 Machining conditions

	Tool rotation rate [rpm]	3000
	Dielectric fluid	Casty EDM oil
Roughing process (EDM)	Input voltage [V]	90
	Capacitance [pF]	3300
	Polarity	Tool : + Workpiece : -
	Machining depth [μm]	50
	Feed rate [$\mu\text{m/s}$]	5
Finishing process (Grinding)	Depth of cut per step [μm]	1
	Perpendicular feed rate [$\mu\text{m/s}$]	0.1
	Total depth of cut [μm]	4 ~ 13
	Transverse feed rate [$\mu\text{m/s}$]	0.3 ~ 25

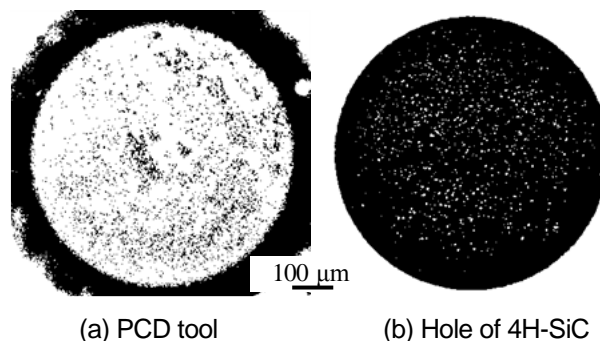


Fig. 5 Microscope images of tool and hole

て穴あけ加工実験を行い、工具電極と加工穴の半径の差を比較した。PCD 電極は心振れの影響をなくするため放電加工により外形を整えてから実験を行った。また、再凝固層の厚さは集束イオンビーム (Focused ion beam : FIB) により切断した放電加工面を走査型電子顕微鏡 (Scanning electric microscope : SEM) を用いて観察することによって測定した。

2.3 研削加工実験

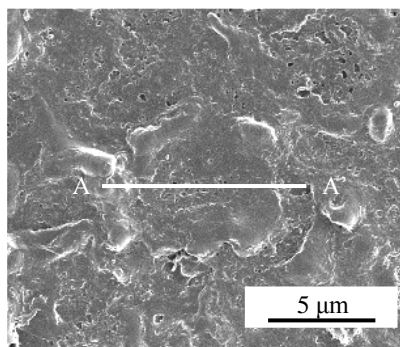
Table 2 の条件下で、Fig. 4 に示すように PCD 工具外周面による溝加工を行った。具体的には、50 μm の切込みで 4H-SiC に対して放電加工を行い、その

後同一の工具を用い研削を行った。研削過程における工具移動量や送り速度を変化させ、その加工特性を評価した。また、放電加工前後や研削距離による工具外周面の状態変化を観察した。放電加工面や工具外周面に対して、レーザー顕微鏡による表面粗さの測定、SEM による観察、レーザーラマン分光光度計による結晶構造の評価などを行った。

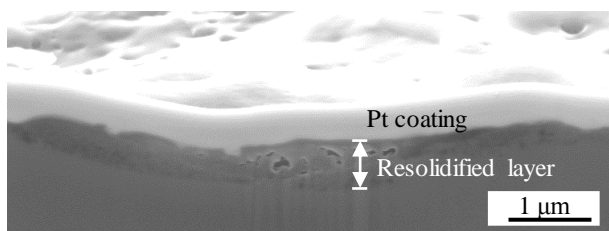
3. 実験結果

3.1 放電ギャップ幅および再凝固層厚さの測定

Fig. 3 のように加工を行い、デジタルマイクロスコープにより観察した加工後の PCD 電極と 4H-SiC の表面画像を Fig. 5 に示す。PCD 電極底面 (Fig. 5(a)) の半径は 337.9 μm 、4H-SiC の加工穴 (Fig. 5(b)) の半径は 346.9 μm となり、その差は 9 μm となった。穴あけ加工時は加工穴入口付近ではなく、電極底面において放電が発生しているため、今回の計測結果は厳密には実際の放電ギャップに比べやや大きい値となっている可能性があると考えられる。



(a) SiC surface after EDM



(b) Cross section of the SiC sample

Fig. 6 SEM images of resolidified layer of SiC

FIB による放電加工面の切断箇所 (Fig. 6(a)の AA') およびその断面の SEM 画像 (Fig. 6(b)) を示す. 加工面 (Fig. 6(a)) の中で, 放電痕と判別できる箇所を切断した. 断面サンプル (Fig. 6(b)) の表面に存在する層は FIB 照射時の保護膜としてコーティングされた白金層である. 白金層の下に存在する再凝固層は放電痕の中央部分が厚く, 外側に向かって薄くなり, その厚さは一様ではなかった. 再凝固層の厚さは観察範囲内において最大で 0.8 μm 程度であった.

3.2 工具移動量が加工特性に与える影響

送り速度を 10 μm/s に固定し研削を行った際の, 工具移動量と加工面の表面最大高さ粗さ Rz の関係を Fig. 7 に示す. 工具移動量 4, 5 μm における表面粗さは放電加工面と同程度であった. この結果から, 工具移動量 5 μm までは工具と放電加工面が接触せず, 研削加工が行われていないと考えられる. また, 工具移動量 6 μm から送り量増加に伴い表面粗さが減少し, 9 μm 程度から一定の値となった. 加工した 4H-SiC 表面の SEM 観察結果を Fig. 8 に示す. 工具移動量 4 μm の場合 (Fig. 8(a)) は放電痕が加工面全体に見られたが, 表面粗さが減少し始めた 6 μm (Fig. 8(b)) から徐々に研削痕が現われ始めた. 8 μm (Fig. 8(c)) においても僅かながら放電痕の残存が確認されたが, 10 μm (Fig. 8(d)) では全体的に研削痕が見

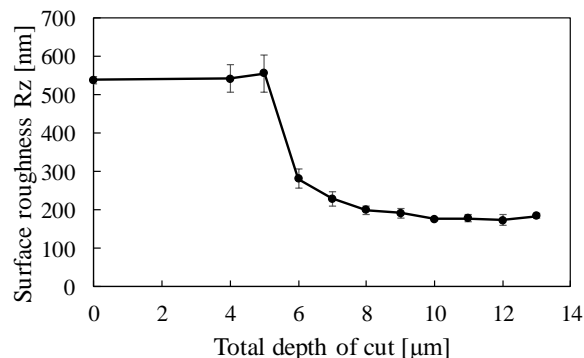
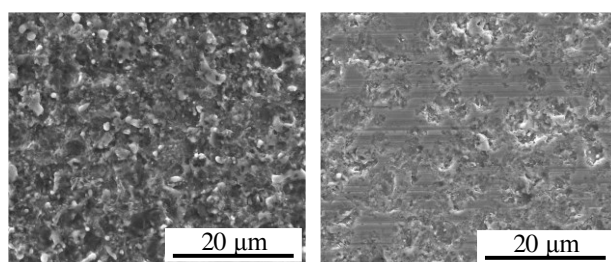
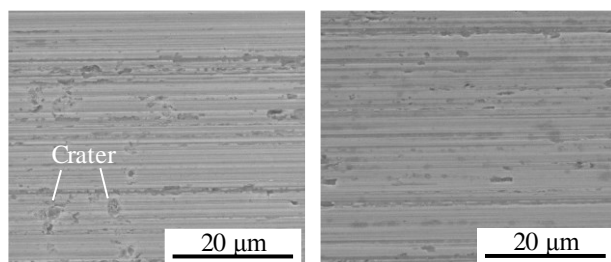


Fig. 7 Surface roughness at different depths of cut



(a) 4 μm

(b) 6 μm



(c) 8 μm

(d) 10 μm

Fig. 8 SEM images of machined surface at different depths of cut

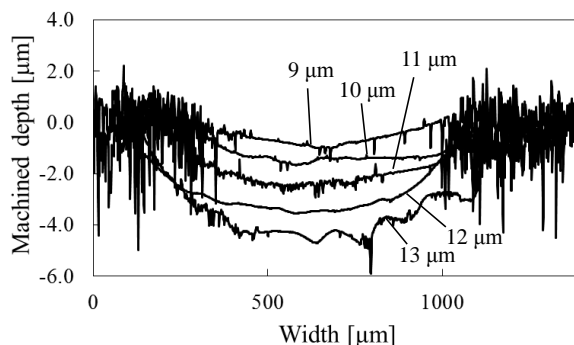


Fig. 9 Cross section profiles of machined surface

られ, 放電痕の残存は確認されなくなった. また, 本実験においては, 放電加工機のマンドレルを使用しているため, 負荷能力が低く, 研削時の上滑りが懸念された. そこで実加工深さを計測するため, 工具移動量 9 ~ 13 μm における加工面の断面プロファイルを測定した. その結果を Fig. 9 に示す. 断面プロフ

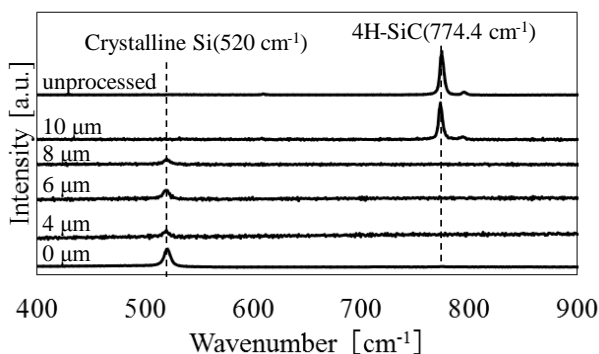


Fig. 10 Raman spectra of machined surface at different depths of cut

ファイルから加工深さは約 $1 \mu\text{m}$ ずつ深くなっているため、本実験における上滑りは発生していないと考えられる。

Fig. 10 にラマン分光光度計による加工面の結晶構造の解析結果を示す。8 μm までは結晶 Si のピーク (520 cm^{-1}) が現れ、放電により形成された再凝固層に結晶 Si が存在することを示している⁹⁾。一方、10 μm では結晶 Si のピークが確認されず、未加工面と同様の 4H-SiC のピーク (774.4 cm^{-1}) のみが得られたことから、工具移動量 10 μm 以上では放電痕、再凝固層が除去されたことが確認された。ここで、前項で測定した放電ギャップ幅が 9 μm 弱であったにもかかわらず、工具移動量 6 μm の時点で研削痕が見られた原因として、表面最大高さ粗さ R_z が PCD 工具で $2 \mu\text{m}R_z$ 、4H-SiC の放電加工面で $0.5 \mu\text{m}R_z$ であったことが挙げられる。また、工具回転時の心振れの影響も僅かながらあったと考えられる。

3.3 送り速度が加工特性に与える影響

工具移動量を 10 μm に固定し研削を行った際の、送り速度と加工面の算術平均粗さ R_a の結果を Fig. 11 に示す。送り速度 25 $\mu\text{m/s}$ から 5 $\mu\text{m/s}$ までは同程度の値であるが、より遅い条件では表面粗さの値が減少し、0.3 $\mu\text{m/s}$ において 20 $\text{nm}R_a$ という結果になった。各送り速度で加工した際の加工面の SEM 観察結果を Fig. 12 に示す。送り速度 25 $\mu\text{m/s}$ (Fig. 12(a)) ではクラックが多くみられたが、10 $\mu\text{m/s}$ (Fig. 12(b))、2.5 $\mu\text{m/s}$ (Fig. 12(c)) と送り速度の減少に伴いその数は減少した。0.3 $\mu\text{m/s}$ における加工面では大部分においてクラックがなく滑らかな加工面が観察され

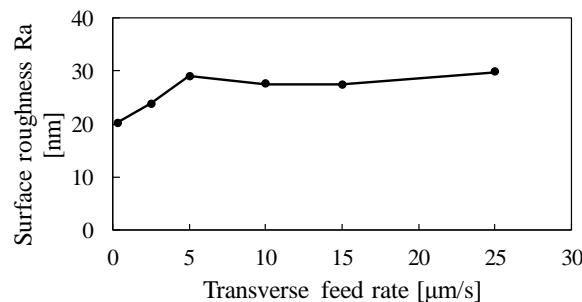


Fig. 11 Surface roughness at different transverse feed rates

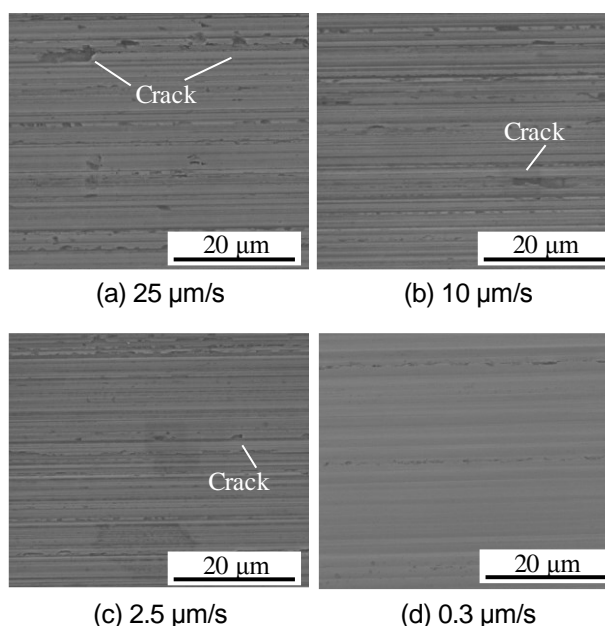


Fig. 12 SEM images of machined surface at different transverse feed rates

たことから、延性モード加工が支配的になったことが確認された。前項の結果と合わせ、本実験で荒加工時に発生した再凝固層を完全に除去した上で仕上げ加工において延性モードによる高品質加工の可能性が示された。

3.4 放電によるドレッシング効果と工具表面の観察

放電によるドレッシング効果を調査するため、研削加工を行い摩耗した工具を用いて、Table 2 の荒加工条件で 2 mm の溝を放電加工し、加工前後の工具表面を観察した。レーザー顕微鏡を用いて工具表面の表面粗さを測定した結果を Fig. 13 に示す。放電加工前と比較して放電加工後の工具表面は、算術平均粗さ R_a は約 1.6 倍に、最大高さ粗さ R_z は約 1.75 倍となった。工具表面の SEM 観察結果を Fig. 14 に示

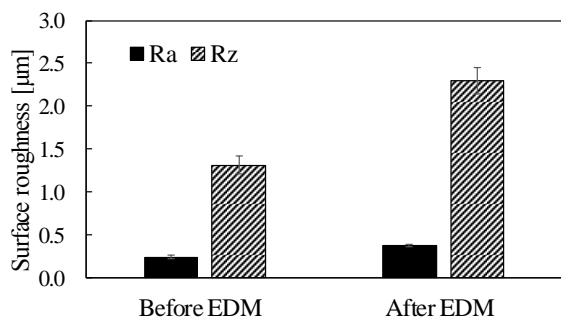
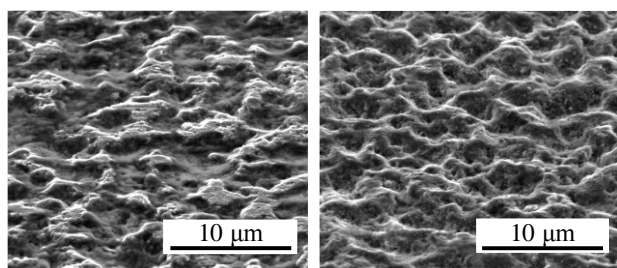


Fig. 13 Surface roughness of PCD tool



(a) Before EDM (b) After EDM

Fig. 14 SEM images of PCD tool surface

す。研削後の工具表面 (Fig. 14(a)) はダイヤモンド砥粒が摩耗し平坦な部分が多く観察されたが、放電 (ドレッシング) 後 (Fig. 14(b)) は砥粒が突出し、チップポケットの形成が確認された。

3.5 研削距離と加工面粗さの関係

放電によりドレッシングされた PCD 工具を用いて研削加工を行い、研削距離と加工面の表面粗さの関係について調査した。そのため、Table 2 の条件下で放電加工を行った工具を用いて、放電加工面に対して、研削により長さ 0.5 mm の溝を 6 本加工した。切り込み方向の工具移動量は 10 μm、送り速度は 10 μm/s とした。Fig. 15 に研削距離と加工面の算術平均粗さ Ra の関係を示す。研削初期の段階では表面粗さが大きいですが、研削距離が 1.0 mm の時に表面粗さ 21.8 nmRa と最小を示し、その後加工が進むにつれその値は上昇した。このような結果は、ダイヤモンド砥粒の突出量に起因すると考えられる。Fig. 16 に研削距離と工具外周面の算術平均粗さ Ra との関係を示す。工具外周面の粗さは、溝を加工する直前の段階で測定したものである。Fig. 16 から研削が進むにつれ工具の表面粗さが小さくなり、砥粒が摩耗したことが分かる。ダイヤモンド砥石に対して砥粒の切れ刃高さを揃えることで、加工面の表面粗さが

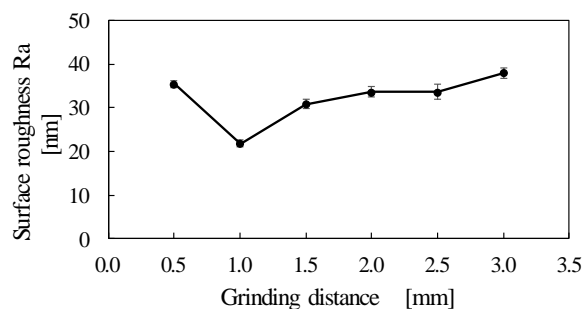


Fig. 15 Relation between grinding distance and machined surface roughness

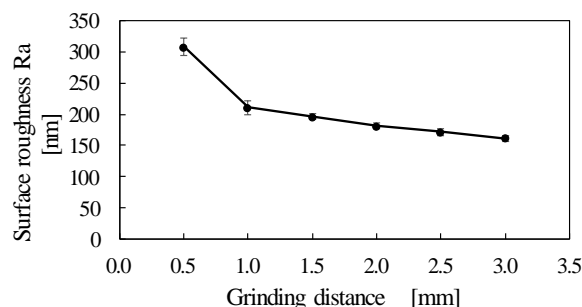


Fig. 16 Relation between grinding distance and tool surface roughness

改善されたことが報告されている⁸⁹⁾。このことから、本実験においては研削距離 0.5 mm では突出したダイヤモンド砥粒により加工面にクラックが発生し、その後砥粒が摩耗し適度に砥粒先端が平坦化したことで加工面の表面粗さが改善されるが、さらに摩耗が進むことで表面粗さが悪化したと考えられる。

この結果から、放電研削複合加工において、荒加工である放電によりドレッシングされた工具を用いて仕上げ加工である研削を行う際に、最適条件で放電と研削のサイクルを繰り返すことで延性モードによる持続的な加工が実現可能であることを示している。

4. 結論

硬脆材料である単結晶 4H-SiC に対して PCD 円盤工具を用いた放電と研削の複合加工を行い、その加工特性を調べることで、以下の結果を得た。

- (1) 放電ギャップ幅、再凝固層の厚さを把握することで、放電により生じた再凝固層が研削により除去され、表面粗さ 20 nmRa の平滑な面が得られた。
- (2) 研削により摩耗したダイヤモンド砥粒が、放電

によりドレッシングされる。また、荒加工と同時に工具のドレッシングが可能である。

- (3) 研削距離を調整することで、より良好な加工表面を得られた。放電と研削のサイクルを最適化することで持続的な延性モード加工が可能である。

参考文献

- 1) 山川聡 : SiC パワーデバイスの実用化展開, 応用物理, Vol.86, No.11 (2016) pp.941-946.
- 2) A. Lim, T. Karacolak, J. Jiang, C. Huang, F. Zhao: Electrostatically-Actuated 4H-SiC In-plane and Out-of-Plane High Frequency MEMS Resonator, IEEE Microwave and wireless components letters, Vol.26, No.1 (2016) pp.28-30.
- 3) 市田良夫, 貴志浩三, 蓮田裕一, アクバリ・ジャワド : ファインセラミックスの鏡面研削に関する研究 (第 1 報) - 仕上面の生成機構に関する基礎的考察 -, 精密工学会誌, Vol.57, No.8 (1991) pp.1406-1412.
- 4) 佐野定男, ハンイリ, 岩井学, ニノ宮進一, 植松哲太郎, 鈴木清 : PCD 工具を利用した放電・研削逐次加工法の開発, 砥粒加工学会誌, Vol.52, No.9 (2008) pp.537-542.
- 5) J. Yan and T. Tan: Sintered diamond as a hybrid EDM and grinding tool for the micromachining of single-crystal SiC, CIRP Ann. – Manuf. Technol., Vol.64, No.1 (2015) pp.221-224.
- 6) 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.
- 7) T. Tan and J. Yan: Atomic-scale characterization of subsurface damage and structural changes of single-crystal silicon carbide subjected to electrical discharge machining, Acta Materialia, Vol.123, (2017) pp.362-372.
- 8) 田村利夫, 山倉英雄, 柘田正美 : 切れ刃先端を研磨仕上げしたメタルボンドダイヤモンド砥石の高精度ツルッキング, 精密工学会誌, Vol.59, No.12 (1993) pp.1979-1984.
- 9) 伊東好樹, 合屋尚子, 原田武志, 仙波卓弥 : 焼結ダイヤモンド製マイクロ研削工具に対する砥粒平坦化ツルッキングとドレッシング技術, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.76, No.771 (2010) pp.3134-3142.

(2018年10月1日受付)