

EC-PCD の形彫り放電加工特性

鈴木 清*¹, ニノ宮進一*¹, 岩井 学*², 田中幸徳*³, 〇高木 圭*¹

EDM properties of EC-PCD

Kiyoshi SUZUKI, Shinichi NINOMIYA, Manabu IWAI, Yukinori TANAKA, Kei TAKAGI

Key words: EC-PCD, PCD, EDM properties, grain size of diamond

1. はじめに

多結晶ダイヤモンド焼結体(PCD)は、優れた機械的特性¹⁾を有するため切削工具など幅広い用途²⁾に用いられている。その反面、高硬度であるが故にその加工性の低さが問題視されている。PCD 自身の加工に付随する種々の課題に対応するためには、優れた工具特性と被加工性を兼ね備えた新しいPCD(図1)の開発が必須であると思われる。そこで、著者らは、既存のPCDに使用されている通常ダイヤモンド粒子に代えて、ボロンをドーピングして導電性を付与したダイヤモンド粒子¹⁾を原料とした新しいPCD(Electrically conductive - PCD, EC-PCD)の開発と特性を活用した用途に関する研究^{3, 4)}を目指した。

試作したEC-PCDの基本的な被加工性のうちから、本研究では、形彫り放電加工特性を調べた。また、EC-PCDの微細放電成形の可能性についても検討した。

2. 実験条件

2.1 実験方法

放電加工実験はリニアモータ式形彫り放電加工機で行った。所定寸法(幅5mm)にワイヤカット切断したPCDワークを主軸下部に下向きに取り付け、銅電極(厚さ0.5mm)はテーブル上に上向きに設置した。したがって、放電加工面積は $A=2.5(5 \times 0.5)\text{mm}^2$ となる。実験の模式図および実験状況の外観を図2に、実験条件を表1に示す。電極の極性は「+」、ワーク(PCD)の極性は「-」とした。放電条件は、設定電流 I_p を1.9(0.76A/mm²)、3(1.2A/mm²)、9A(3.6A/mm²)の3水準とし、パルス条件 t_e/t_o を、5/5 μs および20/20 μs の2水準とした。

放電加工時にはロックラインノズルより加工油を噴流させた。設定加工深さは200 μm であるが、一部、加工時間が60分を超えると予測された場合は、実験を中断し、そのときのデータを参考として点線枠で示した。

2.2 供試 PCD ワーク

供試ワークには、原料ダイヤモンドの平均粒径が $\phi 10\mu\text{m}$ と $\phi 25\mu\text{m}$ の既存PCD(S-PCD)と新PCD(EC-PCD)を使用した。前者は非導電性ダイヤモンド粒子が原料として用いられてお

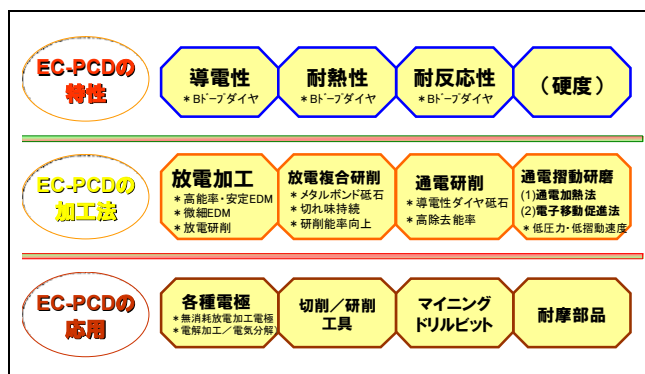
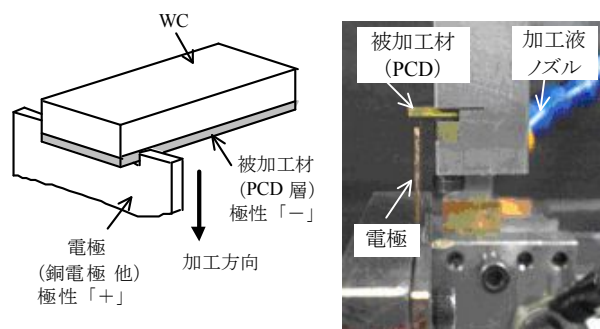


図1 導電性ダイヤモンドを原料とするEC-PCDの特性と用途



(a)実験模式図 (b)実験状況

図2 PCDの形彫り放電加工実験

表1 実験条件

使用機械	・リニアモータ駆動形彫り放電加工機 (ソディック, AP1L)
電極	・銅(Cu): 19×19×t0.5mm, 極性「+」 ・回転銅電極(シャープエッジ成形用) : $\phi 30 \times t0.5\text{mm}$
被加工材	・EC-PCD(原料ダイヤモンド粒径 $\phi 10, 25\mu\text{m}$): 5×8×t0.7mm, 極性「-」 ・S-PCD(原料ダイヤモンド粒径 $\phi 10, 25\mu\text{m}$): 5×8×t0.4mm, 極性「-」
加工液	油(噴流あり)(ソディック)
放電条件	$u_i=90\text{V}$, $SV=60\text{V}$, $I_p=1.9 \sim 9\text{A}$, $t_e/t_o= 5/5\mu\text{s}$, 20/20 μs , ジャンプなし, 放電加工面積 $A=5 \times 0.5\text{mm}^2$, 設定加工深さ $h_0=200\mu\text{m}$

*1 日本工業大学: 〒345-8501 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1
Nippon Institute of Technology

*2 富山県立大学: 〒939-0398 富山県射水市黒河 5180
Toyama Prefectural University

*3 株式会社サン精密化工研究所: 〒346-0034 久喜市所久喜707-4
San Seimitsu Lab. Ltd.

り、後者は導電性ダイヤモンド粒子(比抵抗 $\rho = 1.6 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ (実測値))が用いられている。なお、S-PCDとEC-PCDは、製造メーカーが異なるため、厳密に比較は困難である。

2.3 放電加工実験結果の評価基準

形彫り放電加工実験の評価は、両 PCD について、設定加工深さ(200 μm)における加工速度(=実加工深さ/加工時間)、電極消耗率(=(電極消耗長さ/実加工深さ) $\times 100\%$)、加工面の表面粗さ、および SEM による加工面性状から行った。

3. 実験結果および考察

3.1 銅電極による放電加工特性

3.1.1 細粒ダイヤモンド原料 PCD の場合

S-PCD(010)、EC-PCD(010)のそれぞれのワークについて、銅電極による放電加工特性を比較した。結果を図3に示す。

(1)加工速度

2種のPCDをそれぞれ設定彫り込み深さ $h_0 = 200\mu\text{m}$ として加工したときの加工速度を図3(a)に示す。いずれのPCDワークに対しても設定電流値が大きいほど、パルスオンタイムが長いほど加工速度($\mu\text{m}/\text{min}$)は大きくなるが、EC-PCDの加工のし易さに比してS-PCDの加工のし難さが顕著に比較できた。特に設定電流値が $I_p = 1.9\text{A}$ のように小さいときはパルスオンタイムが $t_e = 5\mu\text{s}$ にでも、 $t_e = 20\mu\text{s}$ にでも、S-PCDワークの場合は加工の進行が極度に遅く、実験を中断せざるを得なかった。したがってグラフ中の当該S-PCDの値(電極消耗量、粗さを含む)は実験中止時の値(含む推定値)である。

設定電流を $I_p = 3\text{A}$ に増大させると、S-PCDに対するEC-PCDワークの加工速度比は $t_e = 5\mu\text{s}$ で6.8倍、 $t_e = 20\mu\text{s}$ で7.4倍と極めて大きくなった。 $I_p = 9\text{A}$ の場合の両者の速度比は $t_e/t_o = 5/5\mu\text{s}$ のとき3.2倍、 $t_e/t_o = 20/20\mu\text{s}$ のとき6.3倍となった。

(2)電極消耗率

設定電流密度が大きい $I_p = 9\text{A}$ ($3.6\text{A}/\text{mm}^2$) の場合はEC-PCDワークに対する電極消耗が極端に大きくなるが、 I_p を 3A に設定すると、両PCDワークに対する電極消耗は同等となった。 $I_p = 1.9\text{A}$ ではS-PCDよりも顕著に少なくなることが推定された。

(3)加工面表面粗さ

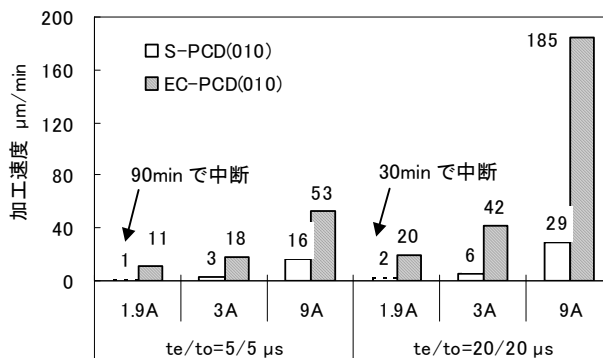
両PCDの放電加工後の表面粗さを評価パラメータ R_{zjis} で比較した。S-PCDでは $I_p = 1.9\text{A}$ での実験中断時の値を除くと $3.6 \sim 8\mu\text{m}$ 程度となった。EC-PCDでは、本実験の電流及びパルス条件下では $2.9 \sim 4.9\mu\text{m}$ の範囲で安定していた。

3.1.2 粗粒ダイヤモンド原料 PCD の場合

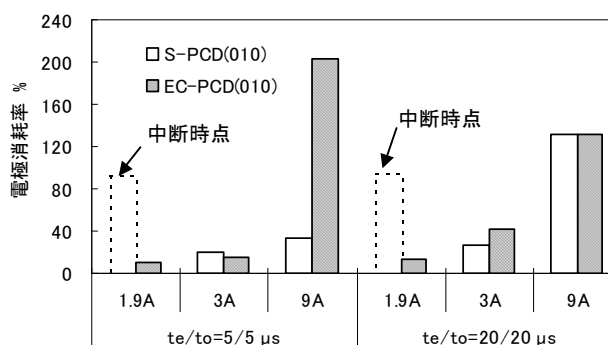
次に、原料ダイヤモンド粒径が $\phi 25\mu\text{m}$ のS-PCD(025)について、S-PCD(010)と同様の条件で放電加工特性を比較した。パルス条件は $t_e/t_o = 20/20\mu\text{s}$ のみとした。実験結果を図4に示す。

(1)加工速度

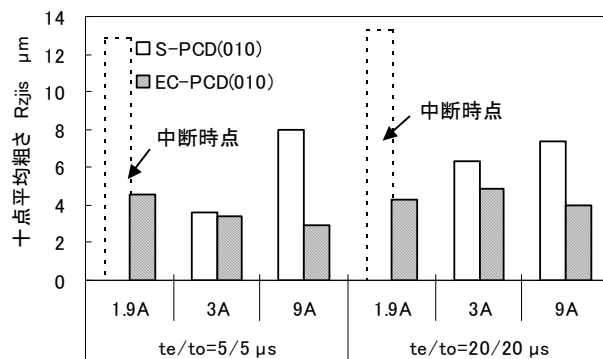
S-PCD(025)では、S-PCD(010)と同様に、 I_p が小さくなるにつれて加工時間が著しく増加し、 1.9A の時は全く加工が進行しなかったため、加工不能として加工時間30分で実験を中断



(a) 加工速度



(b) 電極消耗率



(c) 加工面表面粗さ

図3 $\phi 10\mu\text{m}$ ダイヤ原料 PCD に対する放電加工特性 (S-PCD(010)、EC-PCD(010)、銅電極、 $u_t = 90\text{V}$ 、 $SV = 60\text{V}$ 、 $t_e/t_o = 5/5\mu\text{s}$ 、 $20/20\mu\text{s}$ 、放電加工面積 $A = 5 \times 0.5\text{mm}^2$ 、 $h_0 = 200\mu\text{m}$)

した。同じく 3A では、加工深さ $100\mu\text{m}$ (約 210min)で中断した。EC-PCDでは、いずれの場合も問題なく設定加工深さ $h_0 = 200\mu\text{m}$ まで加工できた。図4(a)の加工速度で両PCDの結果を比較すると、EC-PCDの方が、加工ができたS-PCDの場合に比べて40倍以上の加工速度となり、大きな優位性を示していることがわかった。

ここで、図3(a)のS-PCD(010)の加工速度の結果と比較してみると、例えばS-PCDで $I_p = 3\text{A}$ では、約 $5.7\mu\text{m}/\text{min}$ (S-PCD(010))が $0.3\mu\text{m}/\text{min}$ (S-PCD(025))となっており、S-PCD(010)に比べてS-PCD(025)は約 $1/20$ と非常に小さく

なっている。

一方、EC-PCDでは、図3(a)のS-PCD-010の加工速度とほぼ同様の加工速度(42.3 $\mu\text{m}/\text{min}$ \Rightarrow 44.4 $\mu\text{m}/\text{min}$)を示している。したがって、S-PCDでは原料ダイヤモンド粒径によって被加工性が大きく異なるが、EC-PCDではその影響が無い。

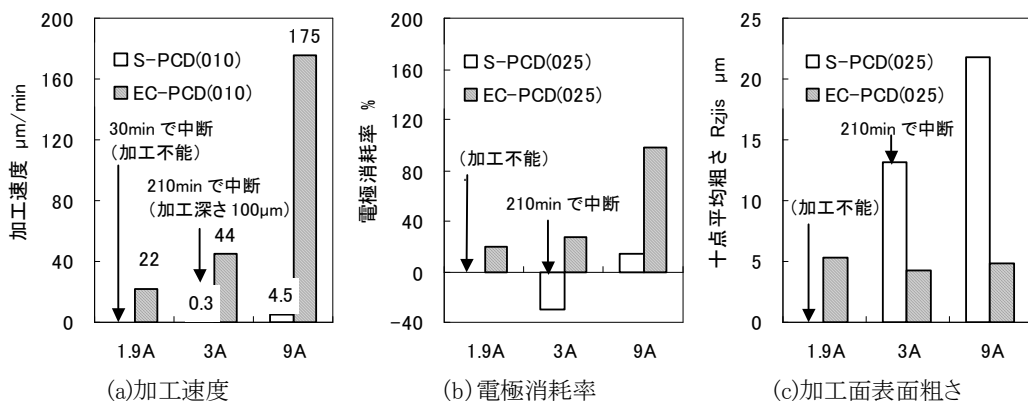


図4 $\phi 25\mu\text{m}$ ダイヤ原料 PCD に対する放電加工特性 (S-PCD(025), EC-PCD(025), 銅電極, $u_i=90\text{V}$, $SV=60\text{V}$, $t_e/t_o=20/20\mu\text{s}$, 放電加工面積 $A=5\times 0.5\text{mm}^2$, $h_0=200\mu\text{m}$)

(2)電極消耗率

EC-PCD (025) の電極消耗率は、EC-PCD (010) の 1/2 程度であった。S-PCD の 3A では電極表面にグラフィティックカーボンが付着して電極が太ったため、負の値を示した。

(3)加工面表面粗さ

S-PCD (025) では、 $Rz_{jis} = 13.2\sim 21.8\mu\text{m}$ と非常に大きな値を示したのに対し、EC-PCD (025) では 1/3~1/4 の $Rz_{jis} = 4.25\sim 5.33\mu\text{m}$ の粗さが得られた。この値は、原料ダイヤモンド粒径 $\phi 10\mu\text{m}$ の EC-PCD (010) の場合 (前出図3(c))と大差が無い。

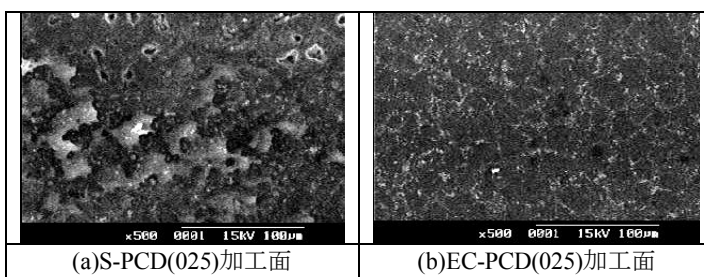


図5 加工面 SEM 写真 ($I_p=3\text{A}$)

(4)被加工面生成機構の推定

図5の加工面の SEM 写真および図6の加工の模式図から、S-PCD ではコバルト部に選択的に放電が発生⁵⁾して材料除去が行われるため粗さが大きくなるのに対し、EC-PCD では、導電性を有するダイヤモンド部分にも放電が発生して除去が行われるため、良好な加工能率および加工面性状が得られているものと考えられる。

3. 2 特殊電極を用いた場合

PCDワークの放電加工に銅電極を使用すると、電極消耗率は 10%以上と大きくなった。その対策として、特殊電極材料を用いて無消耗(極低消耗)電極加工を試みた。供試 PCD は原料ダイヤモンド粒径 $\phi 10\mu\text{m}$ の S-PCD (010) と EC-PCD (010) である。放電条件は $I_p=3\text{A}$, $t_e/t_o=5/5\mu\text{s}$, $20/20\mu\text{s}$, 放電面積は $3\text{mm}\times 2\text{mm}=6\text{mm}^2$ である。実験結果を図7に示す。

(1)加工速度の比較

特殊電極による加工速度は、銅電極の 1/2~1/4 に小さくなった。EC-PCD の加工速度は、S-PCD と比較して、3~4倍速かった。

(2)電極消耗率の比較

いずれのパルス条件であっても、両 PCD に対する特殊電極の消耗率は、0~5%以下であった。若干ではあるが、グラフィティックカーボンの生成により電極が太ることもあった。

(3)加工面表面粗さおよび加工面表面性状の比較

加工面の表面粗さ(Rz_{jis})は、S-PCD では 10.8~11.8 μm と非常に大きな値を示したのに対し、EC-PCD では 3.0~4.1 μm の

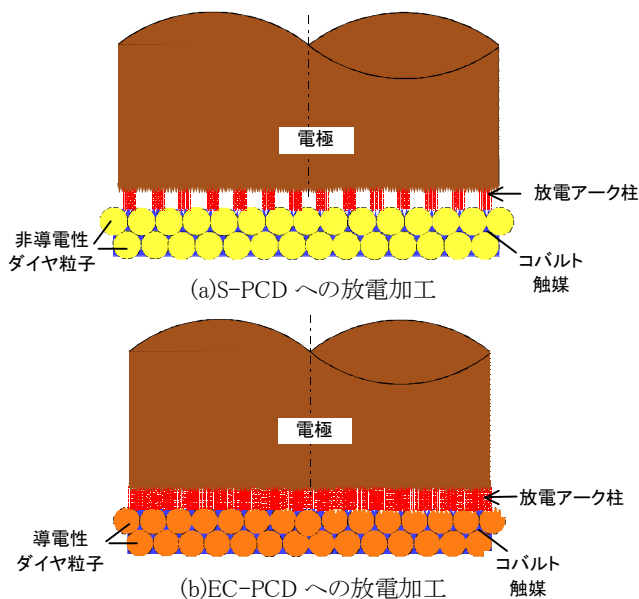


図6 2種の PCD への放電アーク柱の発生状況の模式図

範囲であった。これらの値は銅電極の場合とほぼ同程度であった。

3. 3 回転電極による微細放電成形

上記実験より、EC-PCD は、被加工能率、電極消耗率、被

加工面粗さの全てにおいて S-PCDよりも優れていた。次の実験では回転電極により EC-PCD(010)の端面へのシャープエッジ形状(頂角 30°)の創成を試みた。成形結果の SEM 写真を図8に示すように、頂角部両側の平面部は平坦化されているとともに、頂角部の稜線部を約 $2\sim 3\mu\text{m}$ 程度のシャープエッジとすることができた。

このことから EC-PCD をワークとして微細加工条件で放電加工を行えば、精密な形状付与や微細穴あけ加工が可能となるものと思われる。

4. おわりに

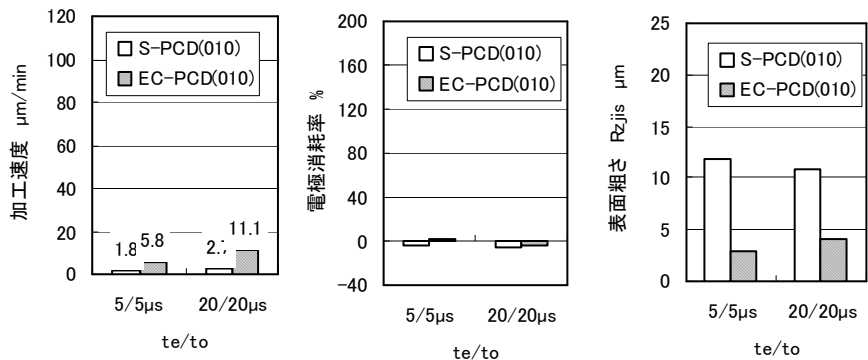
EC-PCD の形彫り放電加工基礎実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) EC-PCDはS-PCDと比較して、銅電極を用いた場合に加工速度が3~8倍と大幅に向上する。
- (2) 銅電極で設定電流 I_p が大きい場合に、EC-PCDを加工した際の電極消耗率は大きくなるが、 I_p が小さくなるにつれて、電極消耗率は小さくなる傾向を示す。
- (3) EC-PCD の放電加工後の加工面粗さは、常に一定の値を示し、今回選択した条件の範囲内では、 Rz_{jis} で $3\sim 5\mu\text{m}$ であった。
- (4) EC-PCD の微細放電成形が可能であり、EC-PCD(010)の先端エッジ部を $2\sim 3\mu\text{m}$ 以内のシャープエッジに成形できた。
- (5) EC-PCDの放電加工において、EC-PCDは原料ダイヤモンド粒子径の影響を受けない。
- (6) 特殊電極を用いてEC-PCDを放電加工すると、電極を極低消費にした高能率・高精度な放電加工が実現できる。

本研究に、ご協力頂いた(株)ソディック、(社)砥粒加工学会「導電性ダイヤモンドの除去加工への応用に関する研究分科会」、「効果的除去加工技術の開発に関する研究分科会」、日本工業大学の矢岡伸展君、田中裕士君に感謝します。

{参考文献}

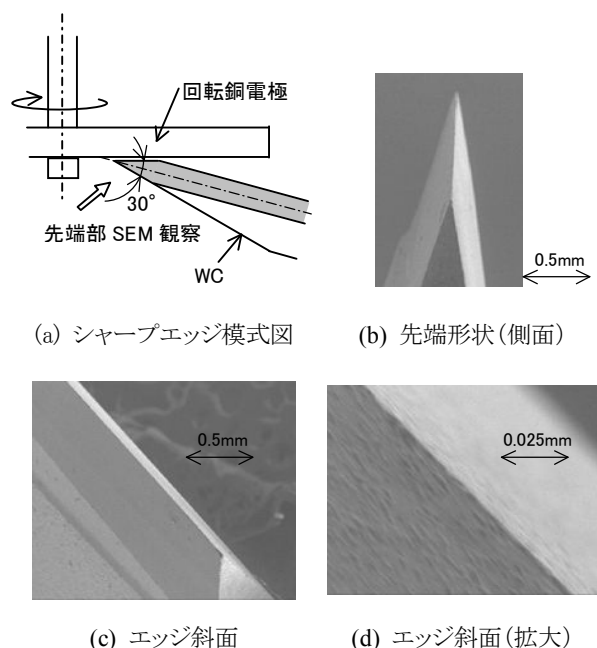
- 1) エレメントシックス㈱: 製品カタログ。
- 2) 関洋子, 鈴木清, 植松哲太郎他: 多結晶超砥粒焼結体(PCP)の研削砥石への適用—第1報, 砥粒加工学会講演論文集 (1996) pp.349-353。
- 3) K.Suzuki, S.Sano, M.Iwai, T.Uematsu, et al.: A New Application of PCD as a Very Low Wear Electrode Material for EDM, Proceedings of 2nd International Industrial Diamond Conference (2007)。
- 4) K.Suzuki, S.Sano, M.Iwai, S.Ninomiya, et al.: Precise Profile Forming by Combining EDM and Grinding with a Same PCD Tool, Proceedings of 2nd International Industrial Diamond Conference (2007)。
- 5) シャルマ・アヌラグ, 岩井学, 植松哲太郎, 鈴木清他: PCD 電極による放電加工面の表面性状, 2005 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2005) pp.1109-1110。



(a)加工速度の比較 (c) 電極消耗率の比較 (d) 加工面表面粗さの比較

図7 特殊電極による形彫り放電加工特性の比較

(S-PCD(010), EC-PCD(010), $u_t=90\text{V}$, $SV=60\text{V}$, $I_p=3\text{A}$, $te/to=5/5\mu\text{s}$, $20/20\mu\text{s}$, 放電加工面積 $A=3\times 2\text{mm}^2$, 設定加工深さ $h_0=200\mu\text{m}$)



(a) シャープエッジ模式図

(b) 先端形状(側面)

(c) エッジ斜面

(d) エッジ斜面(拡大)

図8 EC-PCD(010)のシャープエッジ成形(先端頂角 30°) (EC-PCD:原料ダイヤモンド粒径 $\phi 10\mu\text{m}$, 回転銅電極, $u_t=90\text{V}$, 粗放電条件 \Rightarrow 仕上げ放電条件)