

EC-PCD の放電複合研削

鈴木 清*1, 岩井 学*2, ニノ宮進一*1, 田中幸徳*3, 小松正法*2, ○高橋直樹*1

Complex grinding assisted with electrical discharge machining for EC-PCD

Kiyoshi SUZUKI, Manabu IWAI, Shinichi NINOMIYA, Yukinori TANAKA, Masanori KOMATSU, Naoki TAKAHASHI

Key words : EC-PCD, PCD tool, grinding, electrical discharge machining, metal bonded diamond wheel

1. はじめに

微細なダイヤモンド粒子(≧90vol%)をコバルトを触媒として高温高圧下で焼結したダイヤモンド焼結体(PCD)は、PeBNと異なり、原料ダイヤモンド粒子同士がインターグロースしていることから、高硬度でありながら耐チップング性にも優れており、難加工材用の切削工具や耐摩工具に多用されている。しかし、PCDの加工は特に難しいと言われている。PCDを放電加工する場合、多量に混入されているダイヤモンド原料は非導電性であるため、加工能率が悪く、被加工面性状が粗く、電極消耗が大きいことが問題となっている。加工精度や加工面性状を問題とする場合は、ダイヤモンド砥石による研削が採用されるが、ダイヤモンド砥石中のダイヤモンド砥粒が容易に摩滅し、切れ味の急激な低下を招く。この対策として、ドレッシングを頻繁に行うことで刃先の鈍化したダイヤモンド砥粒を次々と新しい砥粒に目代わりさせるか、自生発刃の容易なボンド剤から構成される砥石を適用せざるを得ない。しかし、頻繁な目代わり作業は、加工能率の低下や加工コストの増大を招き、これらを解決する方策の登場が待たれている。

簡易に低コストで PCD の高能率、高品位加工を実現するには、新しい発想に基づく加工技術(研削加工、放電加工など)の開発や、優れた工具特性と被加工性を兼ね備えた新しい PCD の開発が必須と思われる。

本研究では、工具特性と被加工性を兼ね備えることを目的に試作した導電性ダイヤモンド砥粒を原料とする PCD (EC-PCD, Electrically Conductive PCD) の材料特性を活用して“高能率”、“低研削抵抗”、および“低砥石損耗”を実現するための効果的研削法についての検討を行った。具体的には、ワーク除去作用時に放電加工と研削加工の2つの作用を複合させる放電複合研削法を EC-PCD 材に適用し、その研削特性を調べた。

2. EC-PCD の特性

既存 PCD の材料特性を低下させることなく被加工性を向上させるため、耐熱性および導電性に優れた高濃度ボンドープダイヤモンド粒子を原料とする EC-PCD (Electrically

Conductive PCD)を試作した。現在、原料ダイヤモンド粒子径 $d=2,5,10,25\mu\text{m}$ の EC-PCD が開発されている。図1は、粒径 $10\mu\text{m}$ の EC-PCD と既存の通常 PCD (Standard PCD, S-PCD) の酸化雰囲気炉内で耐熱試験を行った結果である。正確な分析をしていないので断定はできないが、耐熱試験後の PCD 表面の変化は EC-PCD の方が、S-PCD よりも少なく、耐熱性に優れていると推察できる。

図示はしないが、4種のダイヤモンド粒度を持つ EC-PCD を4端子法を用いて測定した結果、EC-PCD の比抵抗は原料ダイヤモンド粒径に依らず一定であることに加え、その値も S-PCD よりも一桁程度低くなった。ただし、ダイヤモンドの種類、ダイヤモンド含有量や触媒金属の種類、製造方法、PCD 層の厚さ、超硬合金層の厚さ、外径寸法等が異なるため、参考値に留めたい。

3. 放電複合研削の特徴

放電複合研削法(図2)は、研削時に導電性ボンド剤と被加工材間にパルス電圧を印加することにより、砥粒による機械的除去作用と放電による電氣的除去作用の相乗効果を期待するものである。被加工材を PCD に特定した場合、PCD 体積中の 90%以上を占めるダイヤモンドは非導電性であるため、

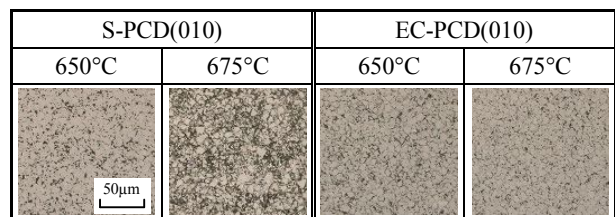


図1 S-PCD および EC-PCD の耐熱試験後の表面性状

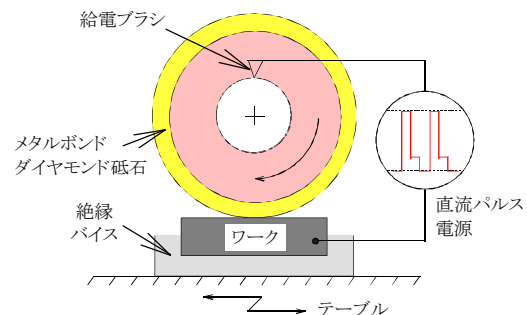


図2 放電複合研削模式図

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

ダイヤモンド部分の放電による除去は期待できない(図3(a)). 放電条件を強くすればコバルトバインダと共にダイヤモンドが除去できるが、この場合の被加工面性状はかなり粗いものとなることが分かっている^{1~3)}.

過去の研究でメタルボンド砥石中に混入した導電性ダイヤモンド砥粒が油中および水中に拘わらず、放電により容易に除去されていること⁴⁾から、EC-PCD ワーク中のダイヤモンド部分が放電除去できることは容易に推察できる。また、放電複合研削を適用した場合は、図3(b)のようにコバルトは勿論、ダイヤモンド自体を放電除去できると考えた。放電除去された導電性ダイヤモンドの表層部には炭化層とともに微細な凹凸が形成されるため、砥石に埋め込まれている砥粒に作用する研削負荷は小さくなり、結果として PCD 表面の粗さの向上に寄与できると思われる。また、放電によって砥石表面の結合剤も除去されるため、いわゆる微細なインプロセスドレッシング作用による研削抵抗の低減と安定化を達成できるものと期待できる。

4. 実験装置および条件

(1) 供試 PCD

PCDワークには、主として平均ダイヤモンド粒子径が $10\mu\text{m}$ の S-PCD(010)および EC-PCD(010)を使用した。PCD ワークはワイヤ放電加工により幅 5mm, 長さ 8mm に切り出した。放電複合研削実験に使用した装置および条件を表1に示す。

(2) 放電複合研削装置および砥石

研削実験は空気静圧軸受スピンドルを搭載したNC平面研削盤にメタルボンドダイヤモンド砥石(SD600, D 粒径 $\approx 30\mu\text{m}$, 直径 150mm, 幅 10mm)を装着して行った。図4に砥石およびワークへの給電状況を示す。この砥石のフランジ部に給電ブラシを介して多目的放電加工電源(SUE-87)から所定パルス電流を印加した。所定形状の PCD ワークを金属ブロックに固定し、この金属ブロックにリード線を接続して給電を行った。研削機械本体との短絡を避けるため、金属ブロックの周囲にはセラミックス板を配してバイスに固定した。各研削実験前には、縦軸型ロータリドレッサでツルーイング・ドレッシングを機上でを行い、砥粒突出し高さを $5\sim 10\mu\text{m}$ に揃えた。この突出し高さが放電間隙に相当する。

(3) 放電複合研削条件

放電複合研削条件は砥石周速度 $V_s=40\text{m/s}$, 送り速度 $V_w=0.1\text{m/min}$, 切込み $a=1\mu\text{m}$, 研削幅 $b=2\text{mm}$, 研削長さ $l=5\text{mm}$ とした。放電条件は無負荷電圧 $u_t=60\text{V}$, ピーク電流 $i_p=6\text{A}$ とし、放電パルスは放電持続時間を $t_e=4\sim 100\mu\text{s}$ と変化させ、放電休止時間は $t_0=50\mu\text{s}$ 一定とした。

研削液に純水やストレートオイルなどが使用可能であるが、ここでは常用の水溶性シンセティックタイプ加工液(2%希釈)を使用した。なお、水溶性研削液は若干の導電性($\rho=12\Omega\cdot\text{m}$)を有しているため、砥粒突き出し高さが小さい場合には電解電流が流れ、放電複合研削は不可能であった。ドレッシング

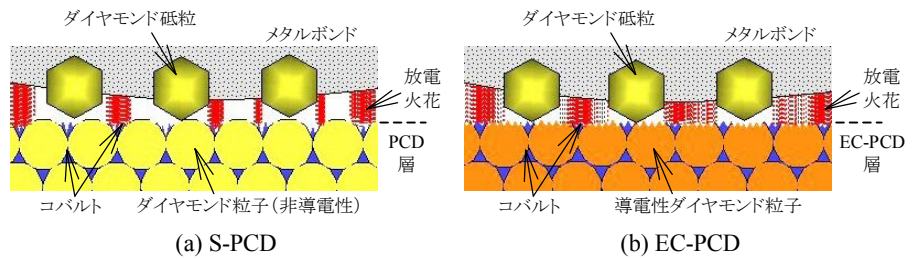


図3 S-PCD および EC-PCD の除去メカニズムの比較

表1 実験装置および条件

加工機械	<ul style="list-style-type: none"> NC平面研削盤 (NSP-50, 不二越) 主軸: 空気静圧主軸 (東芝機械) 放電電源 (SUE-87, ソディック)
供試 PCD	<ul style="list-style-type: none"> ダイヤモンド平均粒径: $10\mu\text{m}$ ダイヤモンド含有率: $\approx 90\%$ 通常 PCD (S-PCD): $5\text{mm}\times 8\text{mm}$ 導電性ダイヤモンド粒子 PCD (EC-PCD): $5\text{mm}\times 8\text{mm}$
ホイール	メタルボンドダイヤモンド砥石 SD600Q100M ($\phi 150\text{mm}\times t 10\text{mm}$, ノリタケ SA)
研削条件	$V_s=40\text{m/s}$, $V_w=0.1\text{m/min}$, $a=1\mu\text{m}$, $b=2\text{mm}$ 平面ブラシ研削
放電条件	極性: 砥石[+], $u_t=60\text{V}$, $i_p=6\text{A}$, $t_e=4, 2(010)0\mu\text{s}$ $t_0=10, 50\mu\text{s}$
研削液	シンセティックタイプ (Syntilo 9954, 2%, BP)



図4 放電複合研削セットアップ

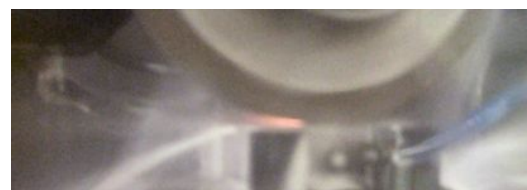


図5 放電複合研削による放電火花の発生状況

に適した条件を選定し、砥粒突き出し高さを $5\sim 10\mu\text{m}$ に揃えたところ、水溶性研削液中でも放電火花が発生し、放電複合研削が可能であった(図5)。

5. 放電複合研削実験結果

5.1 研削抵抗

①通常研削(50 パス), ②放電複合研削($t_e=100\mu\text{s}$, 100 パス), ③放電複合研削($t_e=20\mu\text{s}$, 100 パス), および④放電複合研削($t_e=4\mu\text{s}$, 100 パス)の順に、S-PCD(010)および EC-PCD(010)を幅 2mm, 長さ 5mm, 切込み $1\mu\text{m}$ で研削したときの法線方向研削抵抗の変化を図6(a)に示す。

(1) 通常研削における研削抵抗

通常研削において、S-PCD および EC-PCD を 50 パスまで研削したとき、両 PCD とも研削抵抗が急増し、安定した研削を持続することは困難であった。ただし、研削抵抗の増加率は S-PCD 研削時に、EC-PCD 時よりも若干高くなっていた。

(2) 放電複合研削における研削抵抗

通常研削を 50 パス行った後、放電を重畳させた複合研削を 100 パスずつ行った。放電持続時間は、 $t_e=100, 20, 4\mu\text{s}$ 、放電休止時間は $t_o=50\mu\text{s}$ である。

放電持続時間が長い($t_e=100\mu\text{s}$ 、デューティファクタ、以下 D-F $\tau=67\%$)条件で放電を重畳した結果、両 PCD ともに研削抵抗が大幅に低減し、安定化した。このとき、EC-PCD の研削抵抗は S-PCD の 1/3 程度に低くなった。次に、中パルス($t_e=20\mu\text{s}$ 、 $\tau=29\%$)条件に切り替えて研削を継続したところ、S-PCD では研削抵抗が漸増するが、EC-PCD に対する抵抗は微増で推移した。1パルス当たりの放電エネルギーの微細化に伴う被加工面粗さの向上を期待して、 $t_e=4\mu\text{s}$ も試みたが、 $t_e=4\mu\text{s}$ では両 PCD に対する研削抵抗は急増した。これは放電休止時間を変化させていないため、D-F が $\tau=7.4\%$ と小さくなったため、すなわち、研削作用による材料除去の割合が放電作用による材料除去の割合よりも大きくなったためである。

5.2 砥石摩耗量

両 PCD を放電複合研削したときの砥石半径摩耗量を放電持続時間との関係で図6(b)に示す。パルス幅が長い $t_e=100$ および $20\mu\text{s}$ の場合は S-PCD 研削時の砥石摩耗量が EC-PCD 研削時と比べて 30~40%少なかったが、 $t_e=4\mu\text{s}$ では両 PCD 研削時の砥石摩耗量に差はなかった。放電持続時間が長いときに EC-PCD 研削時の砥石摩耗が大きくなったのは、砥石と EC-PCD ワーク間に大きな放電エネルギーが流れ易いためと考えられる。

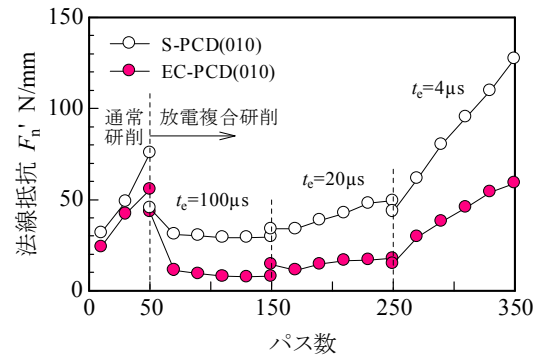
5.3 ワーク除去深さ

図6(c)に各放電持続時間で $a=1\mu\text{m}$ で 100 パスずつ研削したときのワーク除去深さを示す。被加工 PCD 材種に関わらず、放電持続時間が長いほど除去深さは深くなった。このことは、放電持続時間が長いほど放電除去の寄与率が大きいことを実証している。

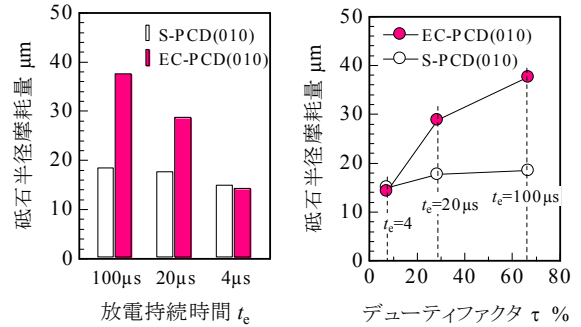
5.4 ワーク表面性状

(1) SEM による表面性状観察結果

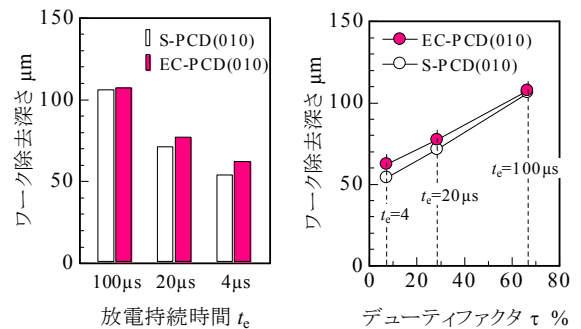
PCD の研削加工では、研削抵抗の低減と安定化に加え、良好な表面性状(表面粗さやチッピング、内部クラックなど)を得ることも重要課題である。図7に $t_o=50\mu\text{s}$ の条件で、長パルス、中パルス、短パルス($t_e=100, 20, 4\mu\text{s}$)の順でそれぞれ 20 パスずつ放電複合研削したときの研削面を SEM 観察した結果を示す。前出図6(a)の研削抵抗線図から、S-PCD 研削時にも長パルス条件($t_e=100\mu\text{s}$)を採用することで、研削抵抗の低減と安定化を実現できているが、ワークの被加工面の大部分は放電によるクレータで形成されていることが分かった。比較的研削抵抗の上昇が少ない $t_e=20\mu\text{s}$ においても、S-PCD ワークの研削面も放電によるクレータが支配的であった。これに対し、EC-PCD の場合は、 $t_e=4\sim 100\mu\text{s}$ の範囲で、放電によるクレータの凹凸差が少なく、その凸部が砥石中のダイヤモンド



(a) 放電複合研削による研削抵抗への影響



(b) 砥石半径摩耗量の関係 (100 パス)



(c) PCDワークの除去深さの関係 (100 パス)

図6 放電複合研削による研削性能 ($V_s=40\text{m/min}$, $V_w=0.1\text{m/min}$, $a=1\mu\text{m}$, $u_r=60\text{V}$, $i_p=6\text{A}$, $t_o=50\mu\text{s}$)

砥粒によって研削除去されているように見受けられる。特に研削抵抗の低減と安定化が見られた $t_e=20\mu\text{s}$ 時の EC-PCD の表面性状はかなり平滑になっている。

(2) 表面粗さ

安定な研削抵抗が得られた $t_e=20\mu\text{s}$ を例にすると EC-PCD の表面粗さは $Rz=1.3\mu\text{m}$ で、S-PCD の約 1/3 に向上しているが、この差異は放電除去が支配的であるか否かによって説明できる。

5.5 放電条件の最適化の検討

これまでの実験結果から、短い放電持続時間 t_e で、D-F を大きくとれば、能率良く、良好な研削面性状を安定して実現できると考えた。実験では、従来の $t_e/t_o=4/50\mu\text{s}$ ($\tau=8\%$)に加えて、 $t_e/t_o=4/10\mu\text{s}$ ($\tau=29\%$)の条件で 100 パスまで研削した。結果を図8~10に示す。

図8はパス数に対する研削抵抗の推移を示している。 $t_e/t_0=4/50\mu\text{s}$ では、増加率に差はあるものの、S-PCDもEC-PCDも、研削パス数とともに抵抗は増大した。これに対し、D-Fを大きくとった $t_e/t_0=4/10\mu\text{s}(\tau=29\%)$ の場合は、EC-PCDが $F_n'=20\text{N/mm}$ で安定推移した。S-PCDも $F_n'\approx 40\text{N/mm}$ で安定して推移したが、これは放電による除去が支配的であったためであることが後述の研削面SEM写真から分かった。

図9に砥石摩耗量を示す。同D-Fの $t_e/t_0=20/50\mu\text{s}$ では研削抵抗が安定しても砥石摩耗が大きかったが、 $t_e/t_0=4/10\mu\text{s}$ の条件ではEC-PCD研削時の砥石摩耗量が大幅に減少した。このときのEC-PCDの研削比は $G=0.07$ だった。

図10に研削面のSEM写真を粗さの値(R_z)とともに示すように、適切な放電複合研削条件を採用することにより、EC-PCDは良好な表面性状と表面粗さ($R_z=1.3\mu\text{m}$)が得られた。

6. まとめおよび今後の課題

PCDの材料特性を低下させることなく電気的特性に優れた新しいPCD(EC-PCD)を開発し、“放電複合研削法”を適用した。その結果、研削抵抗の低減と安定化、砥石摩耗量の低減、および表面性状の向上を達成できることを見出した。今後の研究課題を以下に示す。

- (1) 最適放電条件の把握: 無負荷電圧, 設定電流, パルス持続時間, 放電休止時間, D-Fなど
- (2) 最適研削条件の把握: 砥石種類, 砥石粒度, 研削速度, 送り速度, 切込み, 加工液, 研削方法(カップ砥石等)など
- (3) 被加工材(EC-PCD)の種類の影響: 原料ダイヤモンド粒度($d=2,5,10,25\mu\text{m}$)
- (4) 被加工面性状と生成機構の解明
- (5) EC-PCDの放電複合研削用砥石の検討: 導電性有気孔ピロリファイドボンドダイヤモンド砥石など
- (6) 通電研削の検討: 抵抗加熱法およびバックボンド電子移動推進法^{5,6)}
- (7) 通電摺動研磨: 抵抗加熱およびバックボンド電子移動推進法

本研究にご協力いただいた日産自動車(株), OSG(株), (株)リタケSA, (社)砥粒加工学会「導電性ダイヤモンドの精密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」, 西崎匡氏(富山県立大学)に厚く御礼申し上げます。

7. 参考文献

- 1) 鈴木, 二ノ宮, 岩井, 植松, 他: 導電性ダイヤモンド切刃砥石による放電研削の試み, 精密春季講論 (2005) 1347.
- 2) 田中, 二ノ宮, 岩井, 植松, 鈴木, 他: 導電性ダイヤモンド切刃砥石による放電複合研削法の研究, 砥粒加工学会誌, Vol.51, No.8 (2007) 471.
- 3) 田中, 二ノ宮, 岩井, 植松, 鈴木, 他: 導電性ダイヤモンド切刃砥石による放電複合研削の研究—第3報, 精密春季講論 (2006) 491.
- 4) 大橋, 田中, 岩井, 二ノ宮, 植松, 鈴木, 他: 放電ツルーイングによるポロンドープダイヤモンド砥粒砥石の刃先成形, 砥粒講論 (2008) 49.
- 5) 本田素郎, 山口勝己, 足立和俊, 島田尚一, 堀義治, 福西利夫: 通電切削による難削材の超精密切削加工, 精密春季講論 (2007) 549.
- 6) 小笠原慎: 導電性ダイヤモンド切刃砥石による通電研削加工, 日本工業大学工学部システム工学科・卒業研究論文 (2009).

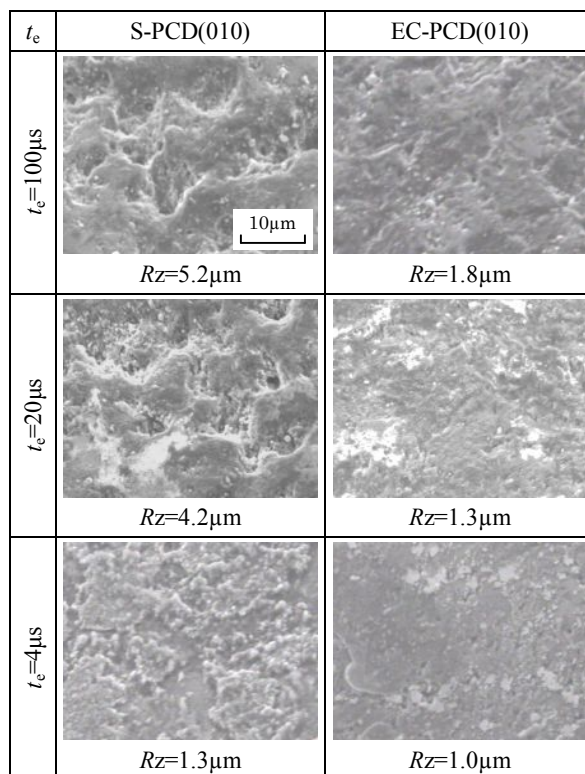


図7 放電複合研削条件とワーク表面性状の関係 ($V_s=40\text{m/min}$, $V_w=0.1\text{m/min}$, $a=1\mu\text{m}$, 20パス, $u_i=60\text{V}$, $i_p=6\text{A}$, $t_0=50\mu\text{s}$)

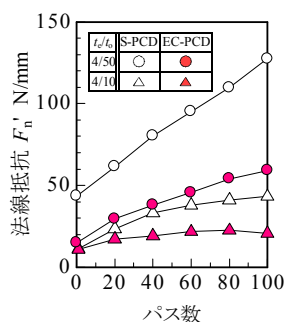


図8 短パルス条件における研削抵抗の安定化の検討

($V_s=40\text{m/min}$, $V_w=0.1\text{m/min}$, $a=1\mu\text{m}$, $u_i=60\text{V}$, $i_p=6\text{A}$)

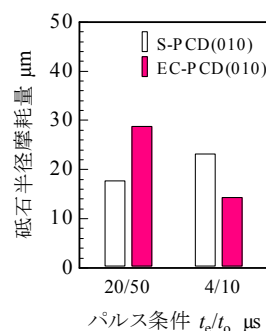


図9 短パルス条件における砥石摩耗抑制の検討

($V_s=40\text{m/min}$, $V_w=0.1\text{m/min}$, $a=1\mu\text{m}$, 100パス, $u_i=60\text{V}$, $i_p=6\text{A}$)

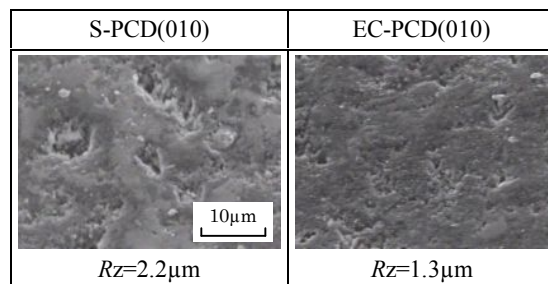


図10 短パルス・中デューティファクタ条件におけるワーク表面性状

($V_s=40\text{m/min}$, $V_w=0.1\text{m/min}$, $a=1\mu\text{m}$, 100パス, $u_i=60\text{V}$, $i_p=6\text{A}$, $t_e/t_0=4/10\mu\text{s}$, $\tau=29\%$)