

# EC-PCD および EC-CVD ダイヤモンドの通電加熱援用高速摺動研磨

岩井 学\*1, ニノ宮進一\*2, ○佐野忠和\*1, 服部達哉\*1, 鈴木 清\*2

## Dynamic friction polishing method utilizing resistance heating of EC-PCD and EC-CVD diamond

Manabu IWAI, Shinichi NINOMIYA, Tadakazu SANO, Tatsuya HATTORI, Kiyoshi SUZUKI

Key words : electrically conductive diamond, PCD, dynamic friction polishing, resistance heating

### 1. はじめに

著者らは、ダイヤモンド試料をダイヤモンド砥石(砥粒)を使用せずに除去加工する方法として、高速回転( $V_s=2500\sim 4000\text{m/min}$ )するステンレス鋼製円盤工具にダイヤモンド試料を押し付けた時に発生する摩擦熱を利用してダイヤモンドを高効率に加工する方法を開発し、「高速摺動研磨法(図1)<sup>1,2)</sup>」と名付けた。これまでの研究で、四角柱状単結晶ダイヤモンド試料( $0.6\text{mm}\times 0.6\text{mm}$ , (100)面)を  $V_s=4000\text{m/min}$ , 押し付け圧力  $P=130\text{MPa}$  で高速摺動研磨したとき、 $2.6\text{mm/min}(0.96\text{mm}^3/\text{min})$ という極めて高い除去能率を実現し、これが現時点でのチャンピオンデータとなっている。当該方法の特徴は高価なダイヤモンド砥粒を使用しないこと、簡単な装置構成で高効率除去加工ができることにあるが、押し付け圧力が  $100\text{MPa}$  以下では除去能率が急激に低下する問題があった<sup>1)</sup>。このことは、ダイヤモンドを微細で精密な形状に創成する場合や大研磨面積のダイヤモンド試料を平滑化する場合の妨げとなり、本方法を実用化する上で問題となっていた<sup>2)</sup>。そこで、著者らは高い押し付け圧力と摺動速度の問題を解決する手段として、導電性を有するダイヤモンド類に通電しながら摺動研磨を行う“2種の通電摺動研磨法”を提案した。

本報告では、ボロン(ホウ素)をドーピングして導電性を付与したEC-CVDダイヤモンド厚膜および導電性ダイヤモンド粒子を原料として導電性を向上させたEC-PCD(Electrically conductive-PCD)を被加工材として、通電による抵抗加熱を行いながら高速摺動研磨を行う方法を試み、加工条件の大幅な緩和が可能であることを明らかにした。

### 2. ワークと円盤工具間に電圧を印加する通電摺動研磨法

#### 2.1 通電加熱援用法および電子移動促進法

ダイヤモンド素材を容易な条件下で高効率に、高精度に摺動研磨を行うことを目的とし、導電性ダイヤモンド素材の持つ適度な導電性を利用した2種の“通電摺動研磨法”を提案した。通電摺動研磨は、図2(a)に示すようにダイヤモンド試料に電流を流すことにより、ダイヤモンド試料を事前に、あるいは摺動研磨中に通電加熱する“通電加熱援用摺動研磨法”と、図2

(b)のようにダイヤモンド試料のバックボンド電子<sup>3)</sup>を金属円盤側に積極的に移動させる“電子移動促進摺動研磨法”の2種に大別できる。

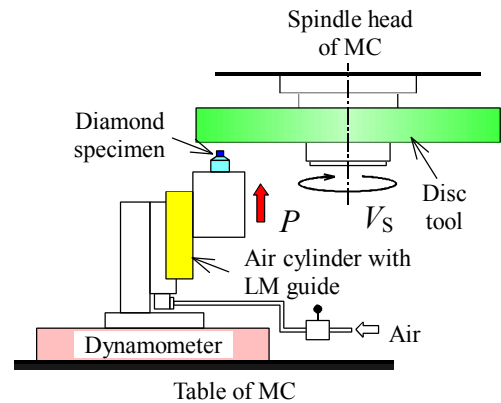
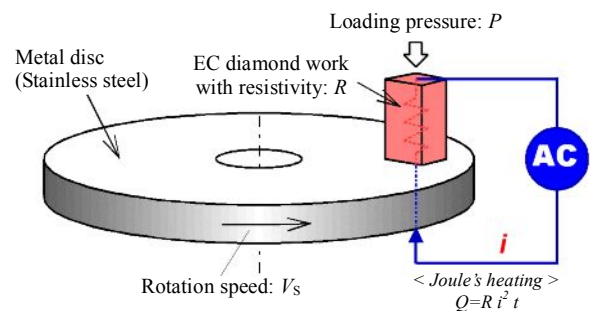
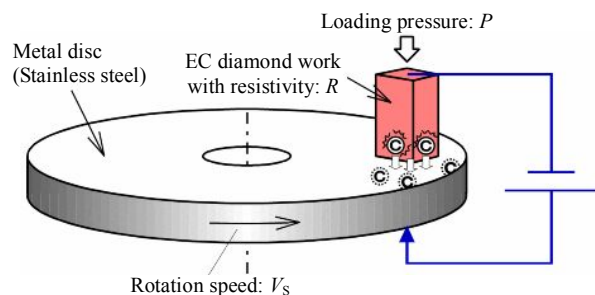


図1 高速摺動研磨法の模式図



(a) 通電加熱援用法



(b) バックボンド電子移動促進法

図2 通電を利用した2種の高速摺動研磨法の概念図

\*1 富山県立大学: 〒939-0398 富山県射水市黒河5180 Toyama Prefectural University

\*2 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

## 2.2 通電加熱援用法の特徴

本研究で試料とする導電性ダイヤモンド類は適度な導電性(適度な電気抵抗)を有しているため、試料に通電することによりダイヤモンド試料が加熱される。この特徴を利用すれば、前出図2(a)に示すように、高速摺動研磨時にステンレス鋼製円盤工具と導電性ダイヤモンド試料の間に接触部を介して電流を流し、通電加熱によりダイヤモンド試料の温度を上昇させた状態で摺動研磨できることになる。この「通電加熱援用高速摺動研磨法」では、通電加熱によりダイヤモンド試料の温度を初期より高くできることに加え、ダイヤモンドからの炭素原子の熱拡散を促進し易くなる<sup>4, 5)</sup>ことから、摺動速度や押付け圧力が低い研磨条件においても摺動部が高温になりやすくなり、結果として加工能率を向上できるものと期待できる。

## 3. 実験装置および条件

### 3.1 通電加熱援用研磨装置

通電加熱援用高速摺動研磨の実験装置と通電加熱の方法を図3に、装置の詳細を表1に示す。実験は縦型 MC 上で行った。円盤工具は直径 240mm の SUS304 ステンレス鋼製円盤である。実験前に円盤表面は  $Rz \approx 0.9\mu\text{m}$  に切削仕上げした。データを示さないが、研磨実験を繰り返しても円盤表面はほとんど損耗されず、初期の均一な表面性状を持続していた。通電加熱には交流電源を用いた。

### 3.2 供試ダイヤモンド試料

ダイヤモンド試料を通電により加熱するためには、ダイヤモンドが適度な電気抵抗を有するダイヤモンド試料を選定する必要がある。実験では3種のダイヤモンド素材を供試材として通電高速摺動研磨を行った。1つめの素材は、導電性 CVD ダイヤモンド厚膜 (EC-CVD ダイヤモンド厚膜, CVDITE-CDE<sup>6)</sup>, 0.5mm) で、結晶成長面を研磨面とするよう、3mm×0.5mm に切り出した。2つめは、導電性ダイヤモンド粒子(粒子径  $d \approx 10\mu\text{m}$ )を原料とするダイヤモンド焼結体(導電性ダイヤモンド焼結体, EC-PCD(010))である。3つめは既存の通常ダイヤモンド粒子(非導電性)からなる PCD(S-PCD(010))である。両 PCD 試料はワイヤ放電加工により 3mm×1mm を研磨面とする直方体に切り出した。研磨実験では、ダイヤモンド試料を絶縁板で絶縁したリニアガイド付きエアシリンダにホルダを介して固定した。

## 4. 通電による導電性ダイヤモンド類の温度上昇

通電加熱による導電性ダイヤモンド試料の温度上昇を調べるため、円盤工具を静止させた状態で通電加熱を行った。図4に赤外線サーモグラフィによる EC-CVD ダイヤモンド表面の温度分布と EC-CVD ダイヤモンドと円盤工具との接触部近傍における最高温度の時間推移を示す。このときのスライダックの設定は 30V である。EC-CVD ダイヤモンドは通電と同時に瞬時に過熱され、2 秒後には円盤工具との接触部近傍で約 600°C に達していた。その後、通電加熱を 60 秒間継続したが、ダイヤモンド試料の最高温度は約 600°C で一定に推移した。また、データは示さないが、EC-PCD および S-PCD は同電圧条件では 300~400°C の温度上昇だった。

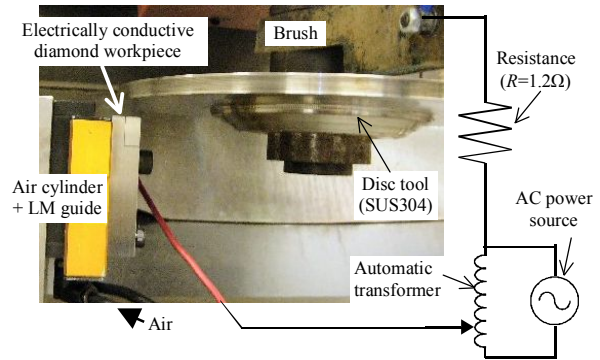
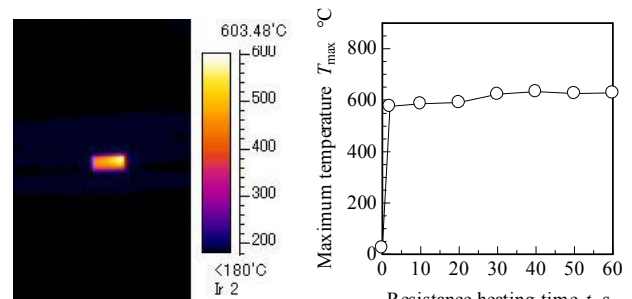


図3 通電加熱援用高速摺動研磨装置および通電加熱方法

表1 実験装置および条件

Machine	Vertical machining center (V-414, Mazak)
Disc tool	Stainless steel disc (SUS304, $\phi 240\text{mm}$ , $Rz \approx 0.9\mu\text{m}$ )
Diamond workpiece	(1) Polycrystalline diamond (PCD) (3mm×1mm, Diamond particle: $d \approx 10\mu\text{m}$ ) · Electrically conductive PCD: EC-PCD(010) · Standard PCD: S-PCD(010) (2) Electrically conductive CVD diamond thick film, (CVDITE-CDE, 3mm×0.5mm, $\rho = 0.4 \sim 1 \times 10^{-3}\Omega\cdot\text{m}$ , Element Six)
Polishing conditions	Sliding speed: $V_s = 200 \sim 2500\text{m/min}$ Pressure: $P = 2 \sim 17.7\text{MPa}$ , Oscillation: $V_w = 100\text{mm/min}$ Polishing time: 30, 60s
Current condition	Alternating current Effective voltage: $u_e = 30\text{V}$



(a) 温度分布 ( $t=2\text{s}$ )

(b) 最高点温度の推移

図4 赤外線サーモグラフィによる EC-CVD ダイヤモンド厚膜試料の温度測定結果 (円盤工具: 静止, 印加電圧=30V)

図5は、各種の導電性ダイヤモンド類を通電加熱したときの実効電圧と実効電流およびダイヤモンド表面の最高温度の関係である。EC-CVD ダイヤモンドと両 PCD に交流電圧を印加したとき、実効電圧に対する実効電流の関係はほぼ同等だった。一方、温度上昇について、EC-CVD ダイヤモンドに比べ、EC-PCD および S-PCD の温度上昇は約半分の値に留まった。本研究では、実効電圧が 30V になるようスライダックを設定し、研磨実験を行った。

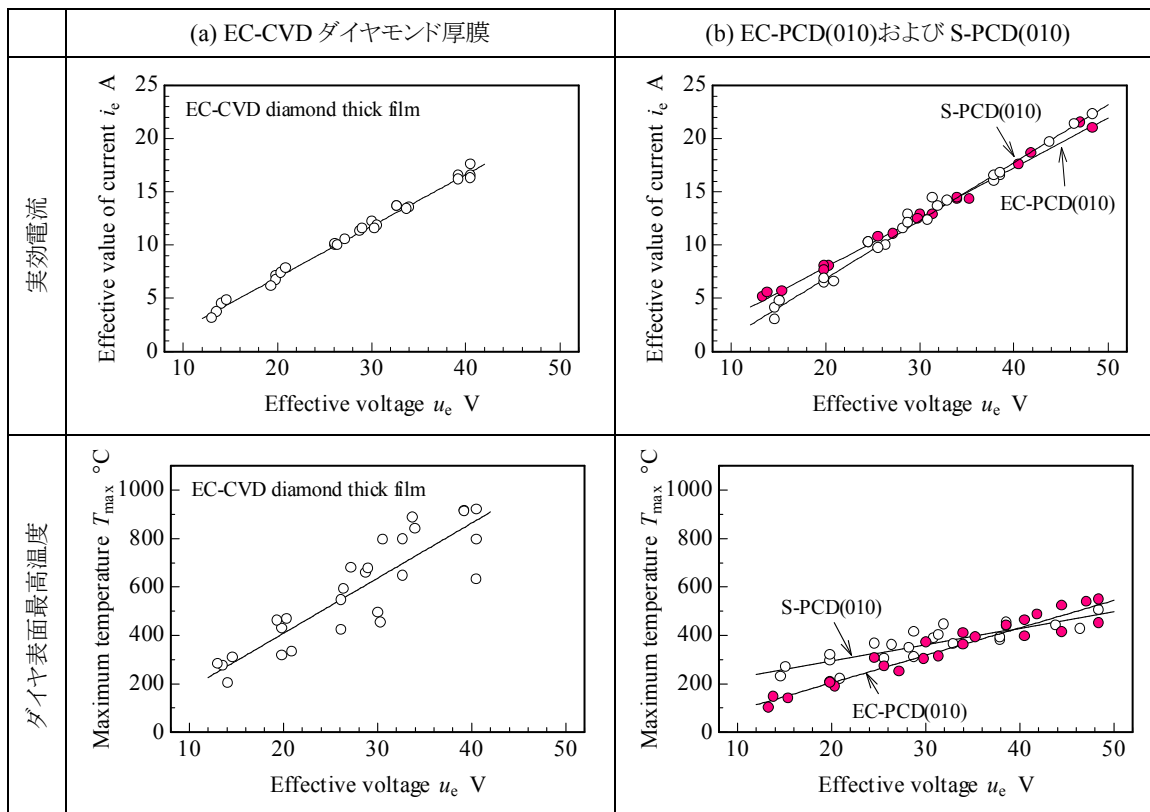


図5 EC-CVD ダイヤモンド厚膜, EC-PCD(010), S-PCD(010)の通電加熱特性 (円盤工具: 静止状態)

## 5. 通電加熱援用高速摺動研磨法による研磨特性

### 5.1 EC-CVDダイヤモンド厚膜の研磨特性

高速摺動研磨能率に及ぼす通電加熱の影響を調べた。摺動研磨条件は摺動速度  $V_s=200\sim 2500\text{m/min}$ 、研磨時間  $t=30\text{s}$  である。研磨面の平滑化のため、導電性ダイヤモンド試料を円盤工具の半径方向に往復揺動 ( $V_w=100\text{mm/min}$ ,  $B=8\text{mm}$ ) させた。

(1) 研磨状況: 通電加熱の有無による研磨状況の差異を図6に示す。研磨条件は  $V_s=2500\text{m/min}$ ,  $P=17.7\text{MPa}$  である。通電加熱を援用しない高速摺動研磨法では、導電性ダイヤモンド試料と円盤工具との接触部から赤い火花が少量飛散した。一方、通電加熱援用高速摺動研磨法では、導電性ダイヤモンド試料が通電加熱によって赤色化するとともに、摺動部から時々、青白い火花が発生していることから、摺動部がかなり高温になっていると推測される。

(2) 押し付け圧力と研磨能率: 研磨能率の比較を図7に示す。研磨時間は30秒であるが、グラフでは1分間当たりの研磨高さ ( $\mu\text{m/min}$ ) に換算している。

摺動速度が  $V_s=2500\text{m/min}$  のとき、通電加熱援用高速摺動研磨時 (●) の研磨能率は押し付け圧が  $P=5\sim 17.7\text{MPa}$  の範囲で約  $800\mu\text{m/min}$  となった。また、 $P=2\text{MPa}$  でも研磨能率は低下するものの  $233\mu\text{m/min}$  の能率で研磨できている、それに対し、通電加熱を行わない場合 (○) は、 $P=17.7\text{MPa}$  で  $102\mu\text{m/min}$ ,  $P=13.3\text{MPa}$  では僅か  $9\mu\text{m/min}$  に低減した。また、研磨速度を  $V_s=1000\text{m/min}$  (▲), 押し付け圧力を  $P=2$  および  $5\text{MPa}$  と低くした場合でも、通電加熱によりダイヤモンドの除去が可能であることが分かった。

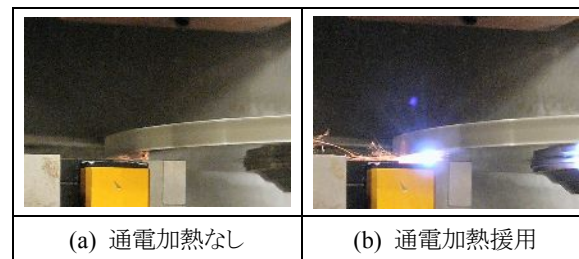


図6 導電性 CVD ダイヤモンド厚膜の通電加熱援用高速摺動研磨の状況

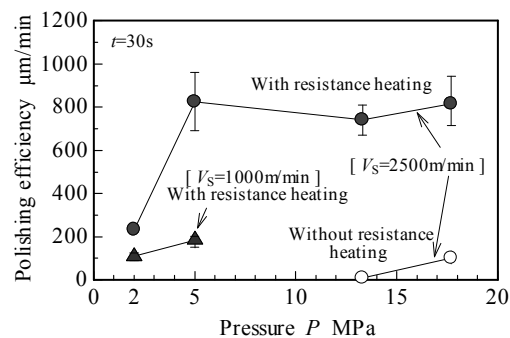


図7 導電性 CVD ダイヤモンド厚膜に対する通電加熱援用高速摺動研磨特性

(3) 摺動速度と研磨能率: 押し付け圧力を  $P=2\text{MPa}$  と低くした条件下で摺動速度の影響を調べた(図8)。摺動速度と研磨能率は比例関係 ( $Q=0.1 \cdot V_s$ ) にあるが、摺動速度を  $V_s=200\text{m/min}$  と遅くしても  $26\mu\text{m/min}$  の能率で研磨が可能であった。

(4) 研磨面粗さ: 通電加熱援用研磨後のダイヤモンド表面の SEM 観察結果を図9に示す。通電加熱援用高速摺動研磨では、 $V_s=2500\text{m/min}$ ,  $P=13.3\text{MPa}$  のときの表面粗さが  $Rz \approx 7\mu\text{m}$  だったが、研磨条件を  $V_s=1000\text{m/min}$ ,  $P=1\text{MPa}$  に低下すると  $Rz \approx 4\mu\text{m}$  に向上した。また、通電を行わなかったダイヤモンド表面には円盤工具材の溶着が見られたのに対し、通電加熱を行ったときには溶着は見られなかった。

## 5. 2 EC-PCDおよびS-PCDの研磨特性

EC-PCD および S-PCD の研磨特性を調べた。摺動速度は  $V_s=2500\text{m/min}$ , 押付け圧力は比較的低い  $P=7\text{MPa}$  に設定した。通電加熱の有無による研磨能率の比較を図10に示す。ここでは、ダイヤモンド粒径が同等の PCD を選定したが、ダイヤモンド硬度や砥粒率に差異があるため、被加工量を厳密に比較するものではない。

通電加熱を付与しない通常研磨では、低押付け圧力条件であるため、EC-PCD および S-PCD ともに研磨量は  $10\mu\text{m/min}$  程度と少なかった。一方、通電加熱を行いながら高速摺動研磨したとき、研磨能率は EC-PCD が約  $100\mu\text{m/min}$ , S-PCD が約  $150\mu\text{m/min}$  に増加した。EC-PCD の研磨能率が S-PCD より低いのは、耐熱性の高さに関係していると思われる。

図示していないが、研磨後の両 PCD 表面には、ステンレス円盤工具の溶着物が付着していた。しかし、PCD 自体の表面性状には顕著な違いは見られなかった。

## 6. おわりに

導電性ダイヤモンド試料を通電加熱しながら高速摺動研磨する方法を提案し、研磨特性を調べた。その結果、導電性 CVD ダイヤモンド厚膜に対しては、低摺動速度 ( $V_s \leq 200\text{m/min}$ ) および低押し付け圧力下 ( $P \leq 2\text{MPa}$ ) でも  $26\mu\text{m/min}$  という能率で研磨できることを明らかにした。通電加熱による研磨能率の向上は、通常 PCD および導電性ダイヤモンド PCD でも同様であった。

通電加熱を併用することにより摺動速度を  $V_s=200\text{m/min}$  ( $3.4\text{m/s}$ ) 以下に低減できているので、超音波振動工具 ( $V=1 \sim 2\text{m/s}$ ) などの併用も可能と思われる。今後は、直流電源によるバックボンド電子移動促進型摺動研磨まで発展させていく予定である。

ご協力いただいたエレメントシックス株式会社(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」に感謝します。なお、本研究は平成19年度科学技術研究(若手研究 B)を活用して行われたものであることを付記し、感謝の意を表す。

## 7. 参考文献

- 鈴木清, 安永暢男, 三宅正二郎, 植松哲太郎: ダイヤモンドの高速摺動研磨 - 第1報: 各種摺動材質による摩耗特性, 1995年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1995) pp.499-500.
- 岩井学, 鈴木清, 植松哲太郎, 安永暢男: ダイヤモンドの高速摺動研磨法の研究 - 第2報: ダイヤモンド焼結体(PCD)の研磨への適用, 砥粒加工学会誌, Vol.46, No.11 (2002) pp.579-584.
- 島田尚一, 田中宏明, 樋口誠宏, 山口智美, 本田素郎, 小島一志: 鉄系金属の加工におけるダイヤモンド工具の損耗機, 2005年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2005) pp.681-682.
- H.B. ノビコフ, 藤田英一監訳: 「ダイヤモンドの物性」, オーム社 (1993) p.118.

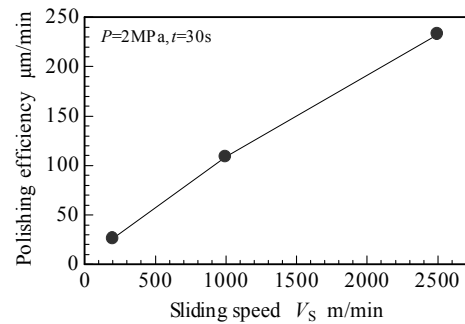
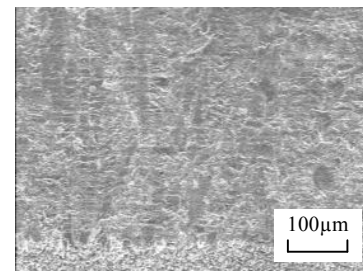
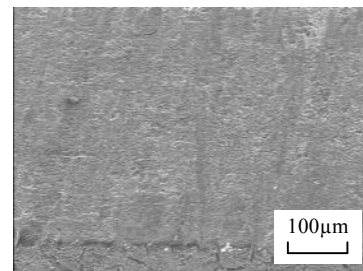


図8 低押付け圧力( $P=2\text{MPa}$ )における摺動速度の影響 (通電加熱援用高速摺動研磨)



$Rz \approx 7\mu\text{m}$

(a)  $V_s=2500\text{m/min}$ ,  $P=13.3\text{MPa}$



$Rz \approx 4\mu\text{m}$

(b)  $V_s=1000\text{m/min}$ ,  $P=1\text{MPa}$

図9 通電加熱援用高速摺動研磨後の導電性 CVD ダイヤモンド厚膜の表面性状

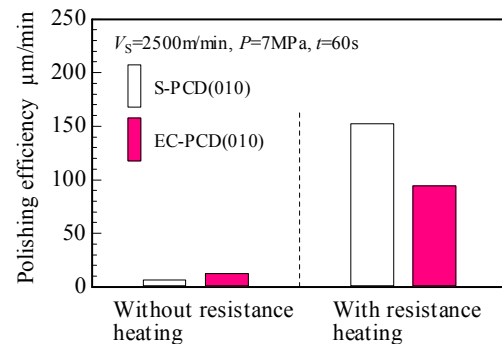


図10 EC-PCD および S-PCD の通電加熱援用高速摺動研磨による研磨特性 ( $V_s=2500\text{m/min}$ ,  $t=1\text{min}$ ,  $u_{\text{set}}=30\text{V}$ )

- K.Suzuki, M.Iwai, T.Uematsu, N.Yasunaga: Material Removal Mechanism in Dynamic Friction Polishing of Diamond, Key Engineering Materials Vols.238-239, Advances in Abrasive Technology V (2003) pp.235-240.
- エレメントシックス株式会社: 製品カタログ