

炭素拡散反応を用いた形彫り放電加工による 多結晶ダイヤモンドの3次元形状創製

笠井慎平* 袖平智樹** 閻 紀旺*

Fabrication of Polycrystalline Diamond Three-dimensional Structures by Sinking EDM Using Carbon Diffusion Reaction

Shimpei KASAI, Tomoki SODETAI, Jiwang YAN

Abstract

In our previous report, the electrical discharge machining (EDM) of polycrystalline diamond (PCD) using a carbon diffusion reaction with transition metal electrodes was proposed. The material removal rate and surface roughness were improved using a rotary cupronickel electrode for finish machining. In this work, we performed sinking EDM of PCD with a piezo-electrically vibrated cupronickel electrode for microstructure generation. Results showed that the material removal rate was improved by 2.3 times compared with a copper electrode even in rough machining. By observation of the machined surface and removed debris, it was found that molten cupronickel induced the carbon diffusion reaction and the promoted graphitization of diamond grains. Precise three-dimensional structures of PCD were successfully fabricated by vibration-assisted sinking EDM using the cupronickel electrode. **Key words** : EDM, polycrystalline diamond, carbon diffusion reaction, electrode vibration

1. 緒論

近年、微細かつ複雑な形状を有する金属部品の需要が高まっている。このような微細部品はプレス加工によって大量生産されるため、微細形状を持つ金型やパンチングツールの製作が必要である。金型やパンチングツールの材料には現在超硬合金が用いられているが、より硬度の高い多結晶ダイヤモンド (Polycrystalline-diamond: PCD) に代えることで、高寿命化・低コスト化が期待されている。PCDは金属バインダーの存在により導電性を持ち放電加工ができるため、機械加工では困難な微細形状の創製が可能である¹⁾²⁾。

しかし、通常のPCDの放電加工ではFig.1に示

すように、バインダーのCoのみに放電が起きるためダイヤモンド粒子が加工されずに脱落し、加工品質が低下する³⁾。この問題を解決するため、著者らは遷移金属とダイヤモンド間に起こる炭素拡散反応を用いた放電加工を提案した⁴⁾。この加工法ではFig.2に示すように、放電によって加熱されたダイヤモンド粒子が遷移金属に接触すると炭素拡散反応が起こり、ダイヤモンド粒子が徐々に除去され平滑化される。これまでに遷移金属であるNiによる炭素拡散反応の効果とCuによる導電性向上の効果

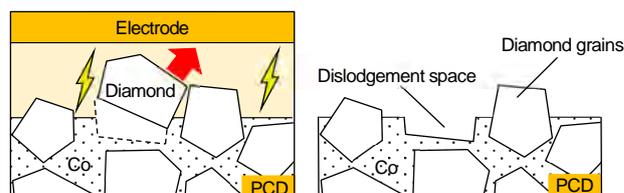


Fig.1 Diamond grain dislodgement in conventional EDM of PCD

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

**……セイコーインスツル株式会社
(〒261-8507 千葉県美浜区中瀬 1-8)

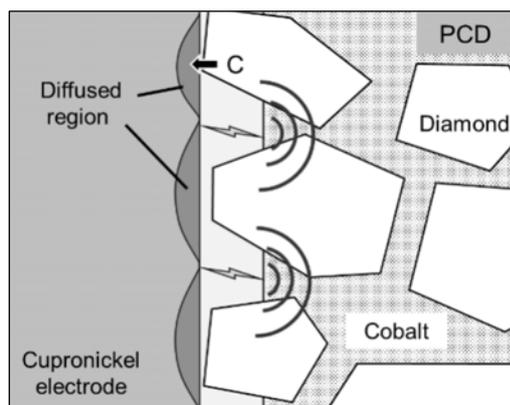


Fig.2 Schematic model for EDM of PCD using the cupronickel electrode in finish machining

を同時に得るため Ni-Cu 合金である白銅製の回転式電極を用い、電極表面とダイヤモンド粒子が接触する仕上げ加工において材料除去量と表面粗さの改善に成功している⁴⁾。

本研究では、振動援用形彫り放電加工において、特に荒加工の条件下でも炭素拡散反応効果の有無を検証し、加工メカニズムの解明を試みた。また、炭素拡散反応の効果を生かした振動援用形彫り放電加工により、回転式電極では加工できない微細な 3 次元形状を持つ PCD 金型および PCD パンチングツールの創製を試みた。

2. 実験方法および装置

実験装置として、微細放電加工機 MG-ED72 (パナソニック (株) 製) を用いた。各実験条件は Table 1 のように設定した。電圧と静電容量を調整することで、荒加工と仕上げ加工を行った。また、放電加工機と電極間に圧電素子を固定し、電極に振動を加えることによって加工層の排出や炭素拡散反応の促進を図った⁵⁾。電極には銅および白銅 (Cu : Ni = 7 : 3) 板材 (20×3×t0.5) を用いた。試料には超硬合金上に形成された PCD 角材 (30×4.5×t1) を用い、ダイヤモンド粒子の径が 1 μm, 5 μm, 10 μm のものを用意した (以降、それぞれを 1 μmPCD, 5 μmPCD, 10 μmPCD と呼ぶ)。放電加工後の表面や加工層の観察と分析は走査型電子顕微鏡 (Scanning electron microscope: SEM) と顕微レーザーラマン分光光度計で行い、加工量や表面粗さの測定にはレーザー顕微鏡を用いた。

Table 1 Experimental conditions

Machining steps	Rough	Finish
Voltage [V]	110	70
Condenser capacity [pF]	3300	220
Feed speed [μm/s]	1	0.3
Polarity	Electrode(-), Workpiece(+)	
Dielectric fluid	EDM oil	
Vibration	Amplitude: 3 μm Frequency: 500 Hz	

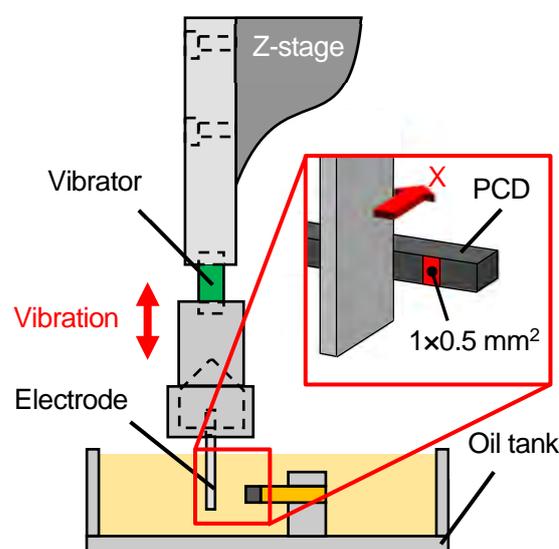


Fig.3 Experimental setup

3. 荒加工時の加工特性検討

3.1 加工除去量の比較

実験装置の概略図を Fig.3 に示す。電極として銅および白銅板材を用い、放電加工部は 0.5 mm×1 mm とした。1 μmPCD, 5 μmPCD, 10 μmPCD それぞれに荒加工の条件で 30 分放電加工を行った。レーザー顕微鏡により放電加工後 PCD の加工量を測定し、加工時間で除することで単位時間当たりの加工除去量を算出した。Fig.4 に示すように、いずれの PCD においても白銅電極を用いることにより銅電極に比べ加工除去量が向上していることがわかる。また、1 μmPCD では 1.58 倍、5 μmPCD では 1.82 倍、10 μmPCD では 2.32 倍の加工除去量となっており、PCD のダイヤモンド粒子の径が大きくなるほど白銅電極の効果が顕著になっている。

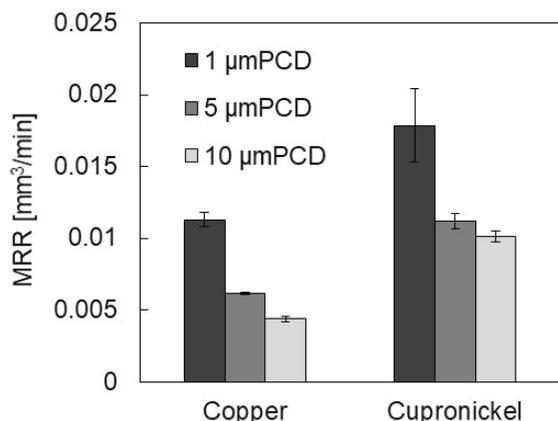


Fig.4 Result of material removal rate for two kinds of electrodes

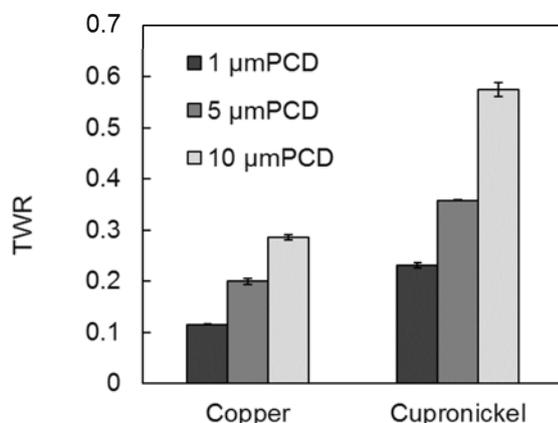


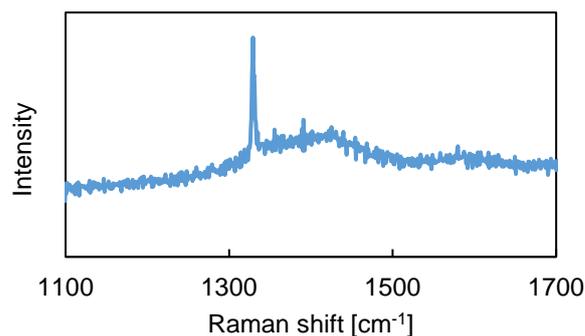
Fig.5 Tool wear rates for two kinds of electrodes

3.2 電極消耗の比較

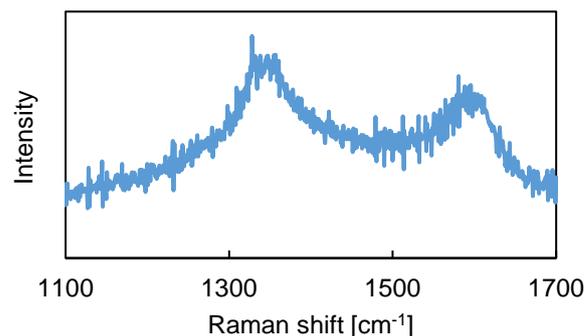
レーザ顕微鏡により放電加工後の電極消耗量を測定し、単位加工量あたりの電極消耗率を算出した結果を Fig.5 に示す。いずれの PCD 試料においても白銅電極は銅電極の2倍ほどの電極消耗があることがわかる。一般的に放電加工の電極材料は熱伝導率 λ (W/mK) と融点 T_m (K) の積 λT_m ($\times 10^3$) が高いほど適しているとされるが、この λT_m が銅 ($\lambda=401, T_m=1358$) で 54 に対し白銅 ($\lambda=29, T_m=1493$) は 4.4 となるため、白銅の電極消耗が大きくなったと考えられる。

3.3 加工面のラマン分析

放電加工後の PCD 表面をラマン分析した結果を Fig.6 に示す。Fig.6(a)は銅電極を用いた場合のラマンスペクトルであり、単結晶ダイヤモンドを表す 1332 cm^{-1} のピークが突出しているのが確認できる。一方、Fig.6(b)は白銅電極を用いた場合のラマンスペクトルであり、 1580 cm^{-1} と 1357 cm^{-1} にそれぞれピ



(a) By copper electrode



(b) By cupronickel electrode

Fig.6 Raman spectra of PCD machined by two kinds of electrodes

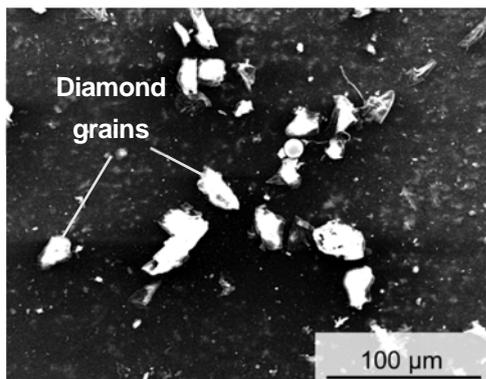
ークが確認できる。 1580 cm^{-1} はグラファイトの結晶構造を示す G バンドであり、 1357 cm^{-1} はアモルファスグラファイトを示す D バンドである²⁾⁶⁾。以上の結果より、銅電極を用いた場合は放電加工後の PCD 表面に単結晶ダイヤモンドの部分が露出しているが、白銅電極を用いた場合はダイヤモンド粒子がグラファイトに覆われていることがわかる。

3.4 加工層の観察

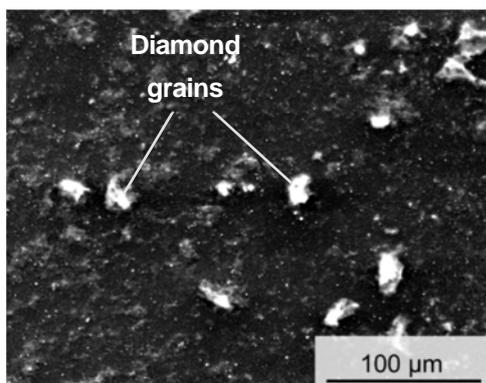
$10\text{ }\mu\text{mPCD}$ の放電加工実験後、加工槽内に分散している加工層を濾紙によって採取し、SEM によって観察した。Fig.7 (a)は銅電極を用いた場合の加工層であり、ダイヤモンド粒子とみられる $10\text{ }\mu\text{m}$ ほどの加工層が複数見られた。一方、Fig.7 (b)は白銅電極を用いた場合の加工層であり、ダイヤモンド粒子とみられるものを確認できるが、銅電極を用いた場合に見られたものに比べてサイズが小さく、 $10\text{ }\mu\text{m}$ に満たないものが多数存在している。

4. 仕上げ加工時の加工特性検討

次に、仕上げ加工時に炭素拡散反応の効果について検証を行った。電極には銅および白銅板材を用い、



(a) By copper electrode



(b) By cupronickel electrode

Fig.7 SEM photographs of debris generated by two kinds of electrodes

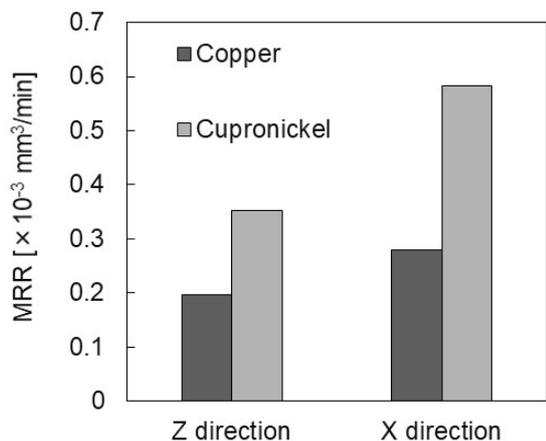


Fig.8 Result of material removal rate for two kinds of electrodes with two feed direction

形彫り放電加工を 10 μmPCD に対し仕上げ加工の条件でそれぞれ 5 時間行った。また、電極を Z 方向と X 方向に送り、電極振動方向による炭素拡散反応の効果の違いを検証した。レーザ顕微鏡によって放電加工後の除去量を測定し、材料除去量を算出した結果を Fig.8 に示す。白銅電極を用いることによって

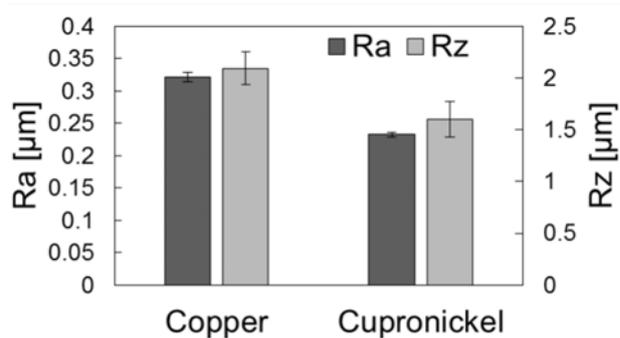
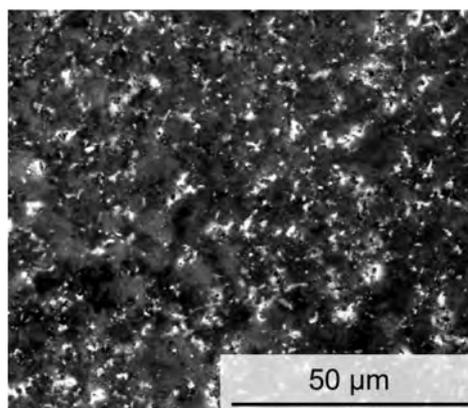
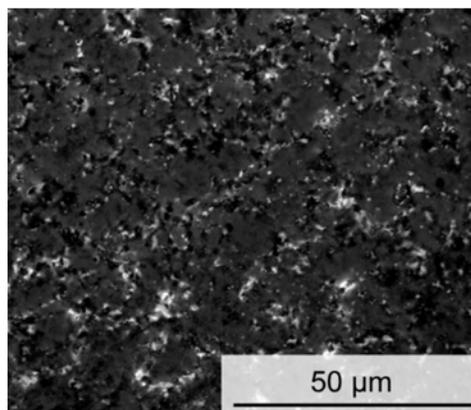


Fig.9 Result of surface roughness of PCD with two electrodes



(a) By copper electrode



(b) By cupronickel electrode

Fig.10 SEM photograph of PCD side surfaces machined by two kinds of electrodes

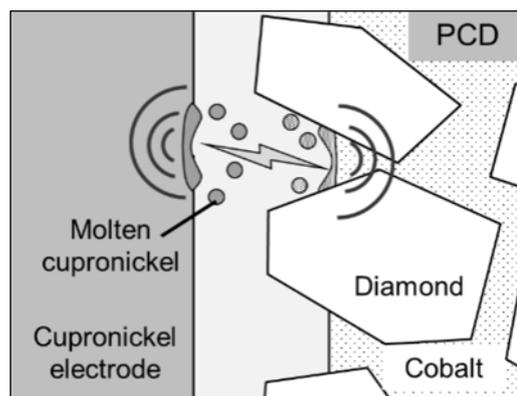
仕上げ加工時の材料除去量が向上しているのが確認できる。また、白銅電極を用いることで Z 方向の電極送りでは 1.8 倍、X 方向では 2.1 倍と、振動方向が放電ギャップに対し平行の場合炭素拡散反応の効果がより大きくなっているのがわかる。次に、レーザ顕微鏡で加工後の PCD 側面の表面粗さを測定した結果を Fig.9 に示す。白銅電極を用いること

により銅電極に比べ算術表面粗さ Ra が 34%, 最大高さ Rz は 24%の減少が見られた. また, Fig.10 に示した PCD 側面の SEM 画像からわかるように, 白銅電極を用いた場合にはダイヤモンド粒子の突起部 (図中の白い部分) が減っており, 大きな脱落痕も見当たらないことがわかる.

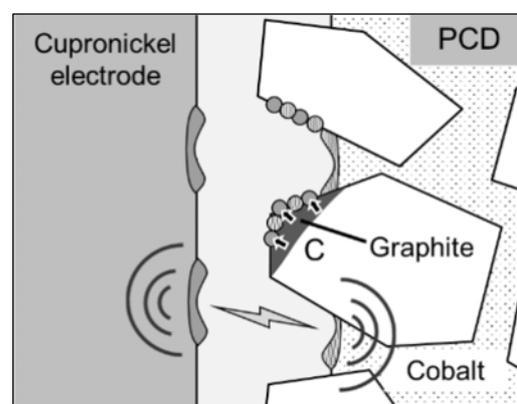
5. 加工メカニズムの考察

白銅電極を用いた形彫り放電加工における PCD の加工メカニズムを考える. 基本加工特性の検討により荒加工および仕上げ加工どちらの条件においても炭素拡散の効果が確認された. 白銅と PCD の放電ギャップは, 予備実験により荒加工時に 12 μm , 仕上げ加工時で 2 μm と確認されている. ダイヤモンド粒子は絶縁体のため, この値は電極と PCD 内の導電体部分 (Co) との距離を表している. 荒加工時は放電ギャップがダイヤモンド粒子の突き出し高さより大きいためダイヤモンド粒子と白銅が接触せず, 炭素拡散反応が起きるかどうか不明であった. しかし今回, 荒加工時においても加工除去量が向上した結果が得られた. これは Fig.11 に示す加工メカニズムが考えられる. すなわち, 白銅電極と PCD 間に放電が起きると, 電極消耗が発生するため溶融した白銅がダイヤモンド粒子上への付着が発生する. その後も放電は継続的に発生するため, 放電熱により熱せられたダイヤモンド粒子は白銅中の Ni の触媒作用によりグラファイト化が行われる. その結果, ダイヤモンド粒子は表層のグラファイト化が進行し, 除去しやすくなる. また, 導電性の向上により導電性がないダイヤモンド粒子部分でも放電ができるようになり, 加工がさらに促進されると考えられる. 3.4 で述べた加工屑が小さくなっていった現象も, ダイヤモンド粒子のグラファイト化が加工へ寄与した結果であると考えられる.

仕上げ加工時は放電ギャップがダイヤモンド粒子突き出し量より小さく, Co に放電が発生しにくい. しかし, 荒加工後 PCD 表面はダイヤモンド粒子上にグラファイトが生成されており, Co と導通しているため, 仕上げ加工時では主にダイヤモンド粒子に対して放電が発生する. さらに, 電極送りにより電極表面とダイヤモンド粒子が容易に接触するため, Fig.2 のように炭素拡散反応が発生し, 材料除去



(a) Discharge occurrence



(b) Diamond graphitization and carbon diffusion
Fig.11 Schematic model for EDM of PCD using a cupronickel electrode in rough machining

量と表面粗さが向上したと考えられる. また, 振動方向が放電ギャップと平行の場合に炭素拡散反応の効果が顕著であった理由として, 白銅がダイヤモンド粒子に擦れることによって生じる熱の発生および電極表面の飽和層の除去が炭素拡散反応の促進をしたためと考えられる.

6. PCD の 3 次元形状の創製

6.1 歯車形状金型の加工

形彫り放電加工における炭素拡散反応の効果を応用し, 白銅電極を用いて歯先直径 1.5 mm の微小歯車成型用 PCD 貫通金型の創製を試みた. この加工を行うにはまず専用の精密加工用ジグを製作し, ガイドによって XY 方向の振動を抑制し, 正確な位置決めを行った. また, 電極の取り替えによる加工誤差を防ぐため, Fig.12 のような荒加工部と仕上げ加工部が一体となった 2 段式歯車型の白銅電極をワ

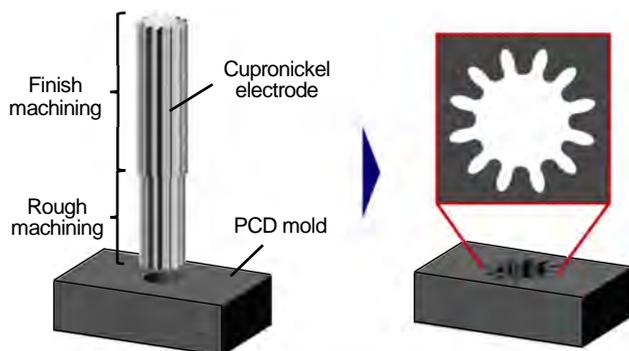


Fig.12 A two-step cupronickel electrode and a PCD mold having a gear shape

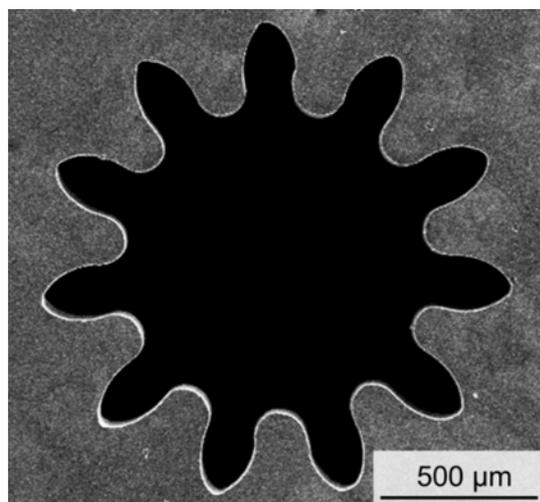


Fig.13 Gear shape generated on PCD

イヤ放電加工および電解研磨により製作した。この一体型の電極を用いて PCD の荒加工および仕上げ加工を行った。その結果、Fig.13 のように歯車形状を加工することができた。側面の表面粗さが $1.6 \mu\text{mRz}$ 、歯先部分の形状誤差は $2 \mu\text{m}$ 以下となり、精密部品をプレス加工する金型として求められている精度を達成することができた。

6.2 パンチングツールの加工

続いて、白銅電極を用いた振動援用形彫り放電加工により微細形状を持つ PCD パンチングツールの製作例として PCD に対し十字柱の加工を試みた。電極には厚さ 0.5 mm の白銅板材を用い、中央にエンドミルによって Fig.14 のような幅 0.2 mm の十字型の穴を空けた仕上げ加工用電極を用意した。また、荒加工用に幅 0.4 mm の十字穴を空けた白銅板材も用意し、直径 2.0 mm の PCD サンプルに十字型の転写を試みた。その結果、Fig.15 に示すように高さ 1 mm ほどの十字型柱の転写に成功した。また、側面

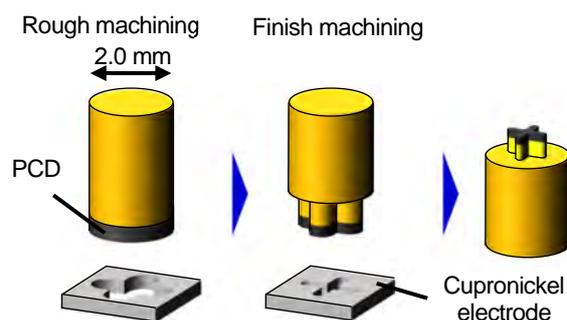


Fig.14 A two-step cupronickel electrode and a PCD punching tool having a cross shape

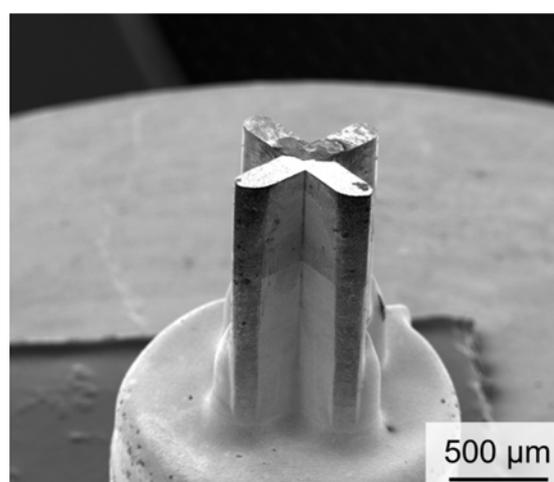


Fig.15 Fabricated cross-shape PCD pillar

の表面粗さは $1.72 \mu\text{mRz}$ である。このように、複雑形状の板電極を製作することで、回転電極では加工できない立体構造を形彫り放電加工により PCD に転写することが可能であることを示した。

7. 結論

ダイヤモンドと遷移金属との炭素拡散反応を振動援用形彫り放電加工に応用し、加工特性を調べた結果、以上の結論を得た。

- (1) 白銅とダイヤモンド粒子が接触しない荒加工条件でも炭素拡散反応の効果が確認でき、 $10 \mu\text{mPCD}$ で最大 2.32 倍の材料除去量の向上を得た。
- (2) 形彫り放電加工の仕上げ加工時においても、白銅電極を用いることにより材料除去量、表面粗さの向上が確認できた。
- (3) 白銅電極を用いた振動援用形彫り放電加工により、3次元微細形状を持つ PCD 金型を創製

し、優れた加工精度を得た。

- (4) 白銅板電極を用いることにより、PCDに十字型の立体構造を加工することに成功した。

参考文献

- 1) T. Masaki, T. Kuriyagawa, J. Yan and N. Yoshihara: Study on shaping spherical Poly Crystalline Diamond tool by Micro-electro-Discharge Machining and micro-grinding with the tool, *Int. J. Surface Science and Engineering*, Vol. 1, No. 4 (2007) pp.344-359.
- 2) Z. Zhang, H. Peng and J. Yan: Micro-cutting characteristics of EDM fabricated high-precision polycrystalline diamond tools, *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, Vol. 65, (2013) pp.99-106.
- 3) 佐野定男, 岩井学, 植松哲太郎, 鈴木清: 各種多結晶ダイヤモンド焼結体(PCD)電極の放電加工特性, *砥粒加工学会誌*, Vol. 52, No. 5 (2008) pp.283-288.
- 4) J. Yan, K. Watanabe and T. Aoyama: Micro-electrical discharge machining of polycrystalline diamond using rotary cupronickel electrode, *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 63, No. 1 (2014) pp. 209-212.
- 5) V.S.R. Murthi and P.K. Philip: A comparative analysis of machining characteristics in ultrasonic assisted EDM by the response surface methodology, *Int. J. Prod Res.*, Vol. 25, No. 2 (1987) pp.259-272.
- 6) D.S. Knight and W.B. White: Characterization of diamond films by Raman spectroscopy, *J. Mater. Res.*, Vol. 4, No. 2 (1989) pp. 385-393.

(2018年9月30日受付)