

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：23201

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760101

研究課題名（和文） 導電性PCD電極による超硬合金金型の精密放電加工

研究課題名（英文） Precise EDM of cemented carbide die with electrically conductive PCD electrode

研究代表者

岩井 学（Iwai Manabu）

富山県立大学・工学部知能デザイン工学科・講師

研究者番号：3036387

研究成果の概要（和文）：電子機器部品の製造に欠かせない超硬合金製金型の精密放電加工の実現を目的に、導電性を有するダイヤモンド粒子を原料とした新しいダイヤモンド焼結体（PCD）を放電加工用電極に適用した。導電性PCDは放電加工による被加工性に優れ、部品や電極への精密成形に優位であることが分かった。導電性PCDを電極に適用し金型鋼および超硬合金の放電加工特性を調べた結果、電極消耗をきわめて少なくできることが分かり、精密放電加工の実現の見通しを得た。

研究成果の概要（英文）：Electrically conductive PCD (EC-PCD), which was made up of the electrically conductive diamond particles, was applied to an electrode material for precise EDM of cemented carbide die. The machinability of EC-PCD by EDM was investigated in comparison with standard PCD. It was found that EC-PCD was machined at better surface finish compared that of standard PCD because the diamond particles in EC-PCD were flattened by electro discharge. In EDM of cemented carbide die, the EC-PCD electrode shows the extremely low wear compared with the existing Cu-W electrode. Furthermore, the increase of material removal rate and improvement of surface property compared with the standard electrode can be realized.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、生産工学・加工学

キーワード：放電加工、精密加工、超硬合金、金型、電極、ダイヤモンド焼結体、電極消耗

1. 研究開始当初の背景

(1) 超硬合金金型の製造の問題点

電子機器部品は難加工材化とともに、要求精度が益々厳しくなっているため、その金型

材料も従来のダイス鋼や高速度鋼に増して超硬合金が多用されている。超硬合金への型加工は放電加工のみによって可能であるが、最適電極材と言われている銅タングステン

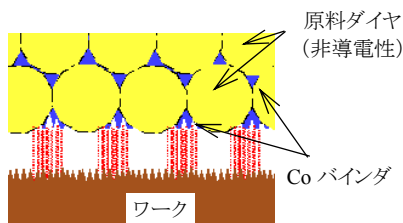
を使用した場合でも、その消耗率が 5~15%と大きく、超合金型の高精度加工の問題点となっていた。

(2) 導電性ダイヤモンド素材の電極材への適用

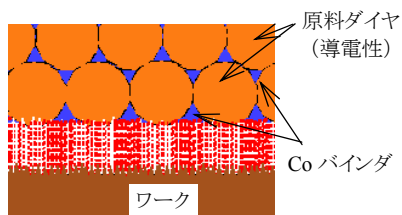
申請者らは、適度な導電性と高熱拡散率（従来の電極材の 2~3 倍）の特徴を持つ導電性 CVD ダイヤモンドを放電加工用電極に適用し、極性を電極「+」とすることで微細加工条件（短パルス領域）でも無消耗あるいは極低消耗加工が実現できることを明らかにした。続いて、より安価で汎用性のある電極材料として切削工具や耐摩工具に多用されているダイヤモンド焼結体（PCD）に着目し、超合金金型の製造において電極無消耗加工を試みた結果、導電性 CVD ダイヤモンドと同様の低消耗率（1%程度）を達成できることを見出した。さらに、PCDの主原料であるダイヤモンド粒子と電極特性との関係を調べた結果、原料ダイヤモンドの粒径が大きいほうが PCD の熱伝導率が高くなる点で望ましいが、放電状態が不安定になる問題があることもわかった。

(3) 新 PCD（導電性 PCD）電極材の開発

低電極消耗率、放電状態の安定化、加工速度の高速化、表面粗さの向上を実現するため、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を原料とした新しい PCD 素材を提案した。



(a) 既存PCD電極の場合



(b) 導電性PCD電極の場合

図1 導電性PCDによる放電加工時の放電発生状況の模式図

非導電性ダイヤモンド粒子からなる既存PCDを用いた放電加工では、放電はコバルトバインダ部分に選択的に発生するため、弱放電では放電が不安定となり、非導電性ダイ

ヤモンド粒子の凹凸が被加工材の表面性状の悪化を招く（図1(a)）。一方、導電性PCDでは、導電性ダイヤモンド粒子でも放電が発生するため、放電状態の安定化および加工面性状の向上が得られるものと考えられる（図1(b)）。

2. 研究の目的

本研究では、超合金金型の高効率・高精度でかつ、電極無消耗な放電加工を実現することを目的に、①導電性ダイヤモンド粒子を原料とする導電性PCDの開発と、②導電性PCDの材料特性の把握を行うとともに、③放電加工用電極としたときの超合金金型に対する放電加工特性を調べ、④微細形状の高精度加工を試みた。

3. 研究の方法

(1) 導電性PCD素材の試作

超合金加工用に以下の導電性PCD電極を試作した。

①粒径の異なる導電性ダイヤモンド粒子（2、10、25 μ m）を原料とするPCDの試作。

②極微粒ダイヤモンド粒子（<1 μ m）による導電性PCDの作成。

(2) 導電性PCDの材料特性の調査

電極消耗率の大小は、電極材の導電率および熱伝導率によって決定するため、導電性PCD素材の電気的特性および熱的特性を調査した。また、導電性PCD素材をワイヤ放電加工および形彫り放電加工で加工する際の被加工特性を調査した。

①電気的特性の調査（抵抗、抵抗率、導電率）

②熱的特性の調査（熱伝導率）

③被加工性の調査（ワイヤ放電加工、形彫り放電加工）

④加工能率、表面性状（粗さ、平坦度）、微細成形性（切刃エッジ）

(3) 超合金金型に対する放電加工特性の調査

各種PCD電極による超合金金型の放電加工特性を調査した。

①電極無消耗条件の検討

②高効率・高精度・高品位条件の検討

(4) 微細および精密形状加工の検討

PCD電極に逆放電により微細形状加工を行い、この電極を用いて超合金金型に微細で複雑な形状の彫り込みを試みた。

4. 研究成果

(1) 導電性PCDの試作および材料特性の調査

PCDを放電加工用電極に適用することを念頭に、試作した導電性PCDの物性を把握するため比抵抗および耐熱特性を調べた。主な物性を表1に示す。PCDはコバルトを触媒として超合金基材上で高温・高圧条件によって

ダイヤモンド粒子がインターグロースする。導電性PCDでは、ダイヤモンド粒子にボロンドープした導電性ダイヤモンド粒子を採用した。試作したEC-PCDは、原料ダイヤモンド粒径がφ2、5、10、25μmである。

表1 供試PCDの主な物性比較

原料	粒子	既存PCD	導電性PCD
		高温高压合成ダイヤ	Bドープ高温高压合成ダイヤ
ダイヤ	比抵抗	—	$10^{-4} \Omega \cdot m$
	熱伝導率	—	500~600W/m·K
	平均粒径	φ2,10,25μm	φ2,10,25μm
	触媒金属	コバルト	コバルト
	ダイヤ含有量	≒90vol.%	≒90vol.%

粒径10μmと25μmのダイヤモンド粒子を原料とする既存PCDおよび導電性PCDの比抵抗を4探針測定法で測定した。製造メーカーが違うので厳密な比較はできないが、両PCDともに原料ダイヤモンド粒径に依らず比抵抗は $10^{-4} \Omega \cdot m$ のオーダーでほぼ同等だった。

酸化雰囲気炉内で、粒径10μmの既存PCDと導電性PCDを耐熱試験した結果を図2に示す。耐熱試験は30分間行ったが、既存PCDの表面性状が675°Cで大きく変化した。一方、導電性PCDでは変化が少ない。今後も正確な分析が必要だが、導電性PCDの方が、既存PCDよりも耐熱性に優れていると推察でき、放電加工用電極では優位な特徴と成り得る。

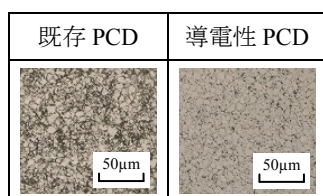


図2 耐熱試験後の表面性状 (675°C)

(2) 導電性PCDの被加工特性

S-PCDとEC-PCDのファーストカット時のワイヤ放電加工特性を比較した(図3)。設定した切断条件では、EC-PCDの場合、原料ダイヤモンド粒径に関わらず、全ての試料を切断できた。一方、S-PCDの原料ダイヤモンド粒径φ25μmでは、実験途中で何度もワイヤ切れを生じ、切断が不可能であった。

供試PCDの厚さを考慮せずに直線方向の切断速度を両PCDで比較した。切断できたダイヤモンド粒径φ2と10μmのPCDの場合、ダイヤモンド粒径が小さい方が若干切断速度が速くなっている。また、S-PCDの方がEC-PCDよりも僅かに速いか、同等な速度であった。

供試PCDのPCD層の厚みと切断速度から切断能率を算出し、供試試料間で比較した。その結果、ダイヤモンド粒径がφ2μmのとき12%、φ10μmのとき19%、EC-PCDの方がS-PCDよりも能率が高くなった。

切断面の表面粗さは、EC-PCDの方がS-PCDよりも低減した。最大高さRzで比較すると、D=φ2μmで26%、D=φ10μmで19%表面粗さが小さくなった。切断面のSEM観察結果からも、EC-PCDは、S-PCDと比べて切断面の凹凸が少ない滑らかな表面状態を呈することが分かった。

上記の結果から、EC-PCDは、原料ダイヤモンド粒径によらず、既存のPCD(S-PCD)よりもワイヤ放電加工時の加工速度及び加工面性状に優れることが分かった。

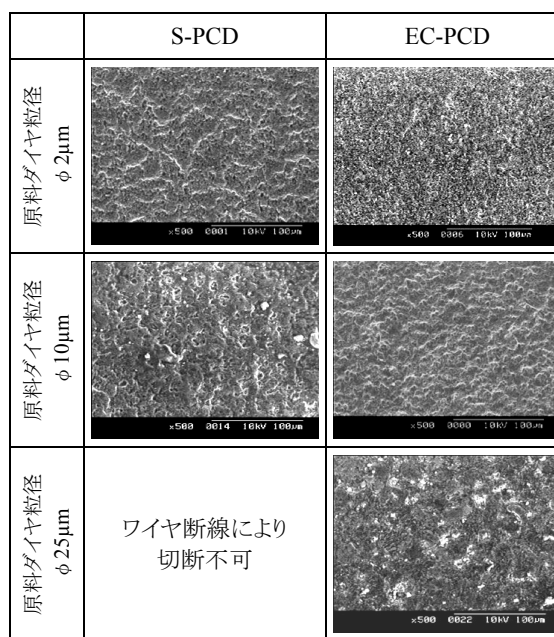


図3 原料ダイヤ粒径の異なるPCDのWEDM特性

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4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2~3μm程度のシャープエッジとすることができた。また、細かい銅電極(φ0.3mm)を使用して、EC-PCD(025)に対して穴あけ加工を行った結果、エッジ部にはチッピングは無く、良好な加工面が得られた(図5)。上記結果から放電加工によって、EC-PCDに精密な形状付与や微細穴あけが可能であることがわかった。

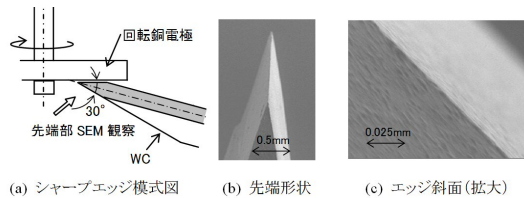


図4 導電性PCDへのシャープエッジ成形

(先端頂角 30°)

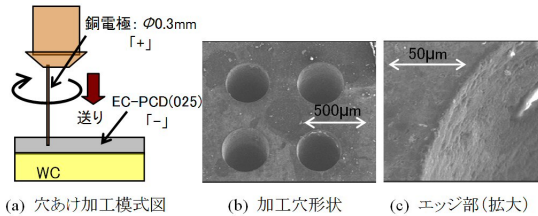


図5 粗粒(25 μm)の導電性PCDへの
微細穴あけ加工例

(3) 超合金金型に対する放電加工特性の調査

導電性 PCD を放電加工用電極として用い、超合金の形彫り放電加工実験を行った。銅タングステン (CuW) 電極および既存の通常PCD 電極との加工特性を比較することで、提案する導電性PCD 電極の優位性を検討した。

超合金ワーク DA50 (G5 相当、厚さ 0.5mm) に各種電極を用いて放電加工テストを行った。放電加工面積は $A=2.5 (5 \times 0.5) \text{ mm}^2$ である。

① 加工速度：CuW、原料ダイヤモンド粒径 $\phi 10、25\mu\text{m}$ の S-PCD、EC-PCD のそれぞれの電極を用いて、DA50 を放電加工したときの加工速度を比較した (図6)。CuW 電極では、極性を「+」とした時の加工速度が著しく低下し、特に放電持続時間が短くなるにつれて加工の進行が悪くなるため、パルス条件 $2/2\mu\text{s}$ の条件では実験を行っていない。一方、CuW 電極の極性を「-」とした時、放電持続時間が長い $20/20\mu\text{s}$ の加工速度に比べて、 $2/2\mu\text{s}$ 、 $5/5\mu\text{s}$ の加工速度が約3倍に高くなっている。

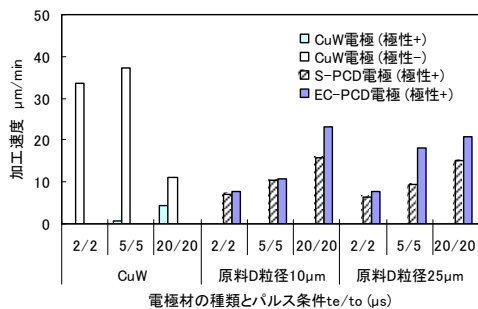


図6 加工速度の比較 (DA50)

PCD 電極の場合、S-PCD および EC-PCD の両者とも、放電持続時間が長くなるにつれて、加工速度が増加する。しかしながら、CuW 電極と比べて、 $2/2\mu\text{s}$ 、 $5/5\mu\text{s}$ の時の加工速度は $1/3$ 以下になった。いずれのパルス条件の場合でも、S-PCD 電極と比較して EC-PCD 電極での加工速度が大きくなり、放電持続時間が長くなるにつれてその差異は顕著となる。なお、電極材の原料 D 粒径の影響は加工速度にはそれほど影響しないことがわかった。

②電極消耗率：CuW 電極で極性を「+」とした場合の電極消耗は大きく、 $100\sim 200\%$ 以上であり放電加工が困難であることがわかる。CuW 電極極性を「-」とした場合は、 $20\sim 30\%$ 程度と抑制できた。したがって、CuW 電極の場合、電極消耗を抑えつつ、加工速度を高くするには、電極極性を「-」とし、放電持続時間を短くする方がよいことがわかる。

一方、PCD 電極の場合、両者とも放電持続時間に影響せず、いずれの条件でも電極消耗率は極めて小さくなった。ほとんどの条件で若干負の値となっているが、電極表面にグラフィティックカーボンが付着していることに起因していると思われる。

③被加工面表面粗さおよび加工面性状の比較：CuW 電極「+」では、 $R_z=13\sim 22\mu\text{m}$ と大きくなり、CuW 電極「-」では、いずれのパルス条件でも $R_z=7.5\mu\text{m}$ 程度になった。S-PCD 電極と EC-PCD 電極で比較すると、全てのパルス条件で EC-PCD 電極での加工面表面粗さが小さくなり、原料 D 粒径 $25\mu\text{m}$ で、パルス条件 $5/5\mu\text{s}$ 、 $20/20\mu\text{s}$ の時には、約 $1/3$ の値になっている。CuW 電極「-」と比べても、半減以下となっており、EC-PCD 電極を用いることによって、超合金の放電加工面粗さを大幅に向上できることがわかった。

原料 D 粒径 $25\mu\text{m}$ の S-PCD および EC-PCD 電極において、 $t_e/t_o=20/20\mu\text{s}$ の条件で加工した時の電極の状態と、加工面の状態を比較した結果を図7に示す。両者とも電極消耗量は見られず、僅かに増加する。加工後の電極面の表面プロファイルと比べると、EC-PCD 電極よりも S-PCD 電極の凹凸高さが大きく、粗い面となっている。ワーク加工面の表面プロファイルと比べても同様の結果を示しており、電極表面の凹凸がワーク表面に転写されていると考えられる。EC-PCD は、触媒であるコバルト部分のみでなく、ダイヤモンド自身でも放電が発生することから、電極表面において均一で安定した放電加工が実現できていると考えられ、これが S-PCD 電極に対する優位差として現れていると思われる。



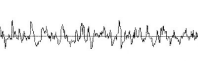
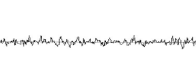
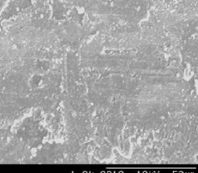
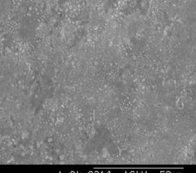



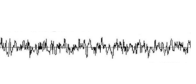
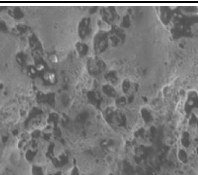
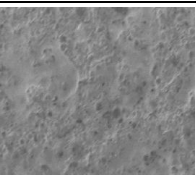
	S-PCD 電極	EC-PCD 電極
加工後の電極側面形状		
電極面の表面プロファイル		
電極面のSEM写真		
ワーク(DA50)加工断面形状		
ワーク加工面の表面プロファイル		
ワーク加工面のSEM写真		

図7 粒径 25 μ m PCD 電極による DA50 の加工後の比較

(4) 微細および精密形状加工の検討

PCD電極に図4のように逆放電により微細形状加工を行い、この電極を用いて超硬合金金型に微細で複雑な形状の彫り込みを試みている。表面粗さの向上のための検討が今後必要である。

(5) 研究成果のまとめ

本研究で提案した導電性PCDを電極素材として活用する方法は、金型鋼の放電加工において電極消耗量がほぼゼロであるとともに、超硬合金に対しても電極消耗量が1%以下と極めて少なく、精密放電加工を行う上で有効な電極材となり得る。また、導電性PCD電極は、超硬合金金型の製造において、放電加工状態の安定化による加工能率の向上およびワーク表面性状の向上が期待できるので、微細で複雑形状の成形加工を実現するため放電条件の検討を今後も進めていきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① M. Iwai, S. Ninomiya, K. Suzuki, Effect of Complex Electrodischarge Grinding

for Electrically Conductive PCD, Advanced Materials Research, 査読有, Vol.325, Advances in Abrasive Technology XIV, 2011, 276-281, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.325.276

- ② M. Iwai, S. Ninomiya, G. Sugino, K. Suzuki, Complex Grinding Assisted with Electrical Discharge Machining for Electrically Conductive PCD, Advanced Materials Research, 査読有, Vol.126-128, Advances in Abrasive Technology XIII, 2010, 591-596, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.126-128.591
- ③ M. Iwai, S. Ninomiya, G. Sugino, K. Suzuki, Investigation on Material Property of Electrically Conductive Polycrystalline Composite Diamond (EC-PCD), Advanced Materials Research, 査読有, Vol.126-128, Advances in Abrasive Technology XIII, 2010, 639-644, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.126-128.639

〔学会発表〕(計7件)

- ① 高田拓哉, 周志容, 岡道拓也, ニノ宮進一, 岩井学, 鈴木清, PCDの放電加工における超音波振動付与の影響, 2012年度精密工学会春季大会学術講演会, 2012年3月14日, 首都大学東京
- ② S. Ninomiya, M. Iwai, T. Takada, Z. Zhou, K. Suzuki, EDM properties of EC-PCD manufactured using electrically conductive diamond particles, 4th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 2011年11月17日, 香港
- ③ 高田拓哉, 周志容, ニノ宮進一, 岩井学, 鈴木清, 導電性PCD(EC-PCD)の形彫り放電加工特性(第2報:各種放電加工条件の影響), 2011年度砥粒加工学会学術講演会, 2011年9月7日, 中部大学
- ④ M. Iwai, S. Ninomiya, K. Suzuki, Effect of Complex Grinding Assisted with EDM for Electrically Conductive PCD, Intertech2011, 2011年5月3日, アメリカ・シカゴ
- ⑤ M. Iwai, S. Ninomiya, K. Suzuki, Material property of newly developed PCD made up of electrically conductive diamond particles, Intertech2011, 2011年5月3日, アメリカ・シカゴ
- ⑥ 岩井学, 増山史剛, 山田久典, ニノ宮進一, 鈴木清, 粗粒ボロンドープダイヤモンド粒子を原料とするPCDへの微細加

工の試み, 2011 年度精密工学会春季大会
学術講演会, 2011 年 3 月 14 日, 東洋大
学

- ⑦ 岩井学, 高田拓哉, 高野和義, 上田宗央,
杉野岳, 二ノ宮進一, 鈴木清, 導電性 PCD
(EC-PCD) の放電複合研削条件, 2010
年度砥粒加工学会学術講演会, 2010 年 8
月 26 日, 岡山大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩井 学 (IWAI MANABU)

富山県立大学・工学部知能デザイン工学
科・講師

研究者番号 : 3036387