両極性パルスによる焼結ダイヤモンドの放電加工*

南 久** 渡邊幸司** 増井清徳***

Electrical Discharge Machining for Sintered Polycrystalline Diamond
using Bipolar Pulse Generator

Hisashi MINAMI, Koji WATANABE and Kiyonori MASUI

Abstract

Sintered polycrystalline diamond (PCD) is widely employed for cutting tools because of its excellent hardness and high wear resistance. However, it is extremely difficult to shape PCD tools by conventional machining methods. We describe the truing of a PCD tool by electrical discharge machining (EDM). Although EDMing of PCD is possible under PCD positive polarity, the removal rate is relatively low. In this paper, we discuss the possibility of applying a bipolar pulse for the EDMing of PCD. It is confirmed that the removal rate of PCD using a bipolar pulse is higher than that using a normal pulse (electrode positive or negative polarity). Moreover, the electrode wear ratio is also improved.

Key words: EDM, polycrystalline diamond (PCD), bipolar pulse

1. 緒 言

焼結ダイヤモンド(sintered Polycrystalline Diamond : PCD)は、極めて高い硬度と優れた耐摩耗性を有することから、切削工具や様々な耐摩耗性部品に利用されている。しかし、その優れた機械的特性によって、PCD を高精度に加工することは難しい。

PCD は焼結助剤としてコバルトやニッケルなどの金属を含有し、通電性を持つことから放電加工が可能¹⁾²⁾であるが、ダイヤモンド粒子自体に導電性がないため、加工精度や加工能率の面で課題がある。これに対して、導電性がある特殊なダイヤモンドで PCD を製作し、これを工具に適用

しようとする試み³⁾や、一般の PCD に対しては、超音波振動を付与した放電加工⁴⁾、ダイヤモンドの熱化学的反応を利用した放電加工⁵⁾⁶⁾など、加工速度の向上を目的とした試みがなされている。

著者らは、絶縁性セラミックスの放電加工⁷⁾で行われているように、放電加工中に加工油から生成される熱分解カーボンを導電性皮膜として PCD 上に形成させながら加工することで、非導電体であるダイヤモンド粒子自体を直接加工することができ、比較的高精度な放電加工が行えることを報告した⁸⁾。しかしながら、PCD を陽極とした正極性加工では、加工面に形成される熱分解カーボンが保護皮膜として作用し⁹⁾、PCD の加工能率を低下させる原因にもなる。このため、PCD 上に形成する熱分解カーボンを必要最小限にして加工することが、PCD の加工能率を向上させるために重要である。

一方、PCD を陰極とした逆極性加工では、非導

* 第 206 回電気加工研究会にて発表

** 地方独立行政法人 大阪産業技術研究所(和泉市あゆみ野 2-7-1)

*** E.D.M.ラボ (富田林市中野町 1-221-1)

電体のダイヤモンド粒子を直接加工することはできないため、比較的大きなダイヤモンド粒子で構成される PCD では、除去加工は進行しない。これは、逆極性パルスによる放電加工では、熱分解カーボン陰極である PCD 上に形成しないため、コバルトなどの金属部が除去されると PCD の表面に通電性がなくなり放電が発生しなくなるためである。このため、正極性パルスによる放電加工で、PCD 上に形成された熱分解カーボンは、電極極性を反転することで除去される。そこで、電極極性を定期的に反転させる両極性パルス^{10)~13)}を用いるとともに、それぞれの極性パルスを最適化することで、PCD 上への熱分解カーボンの形成を必要最小限に抑制しながら、PCD の放電加工を効率的に行えると考えられる。

本研究では、PCD の放電加工速度の向上を目的として、電極極性を定期的に反転させる両極性パルスによる PCD の放電加工について検討した。

2. 実験方法

Fig.1 に本実験で用いた両極性パルス回路の概略図を示す。形彫り放電加工機の電源回路にトランジスタによるスイッチング (Ps) によって電極極性を反転させる装置 (HSPC : High Speed Polarity Changer) を付加した。Ps の接点が A 側では逆極性 (工具電極 : +) , B 側では正極性 (工具電極 : -) に接続される。また、スイッチングトランジスタ TsA, TsB によって、正・逆極性パルスの放電持続時間、休止時間、ピーク電流値をそれぞれ個別に設定することができる。Ps は電源回路のスイッチングトランジスタ TsA, TsB の発振器と同期し、それぞれの極性のパルス数を 1~255 の範囲で任意に設定することができる。**Fig.2** に正極性パルス ($t_e = 5 \mu s$) が 20 パルス、逆極性パルス ($t_e = 30 \mu s$) が 2 パルス毎にそれぞれの極性パルスを切り替えて加工した場合の電圧電流波形を示す。また、**Table 1** に実験条件を示す。

3. 実験結果および考察

Fig.3 は、PCD をそれぞれの極性 (単極性) で加工した場合の放電持続時間と加工速度の関係を示す。また、代表的な加工面 (SEM 像) を **Fig.4**

Fig.1 Circuit diagram of Bipolar pulse generator

Fig.2 Bipolar pulse wave form (20:2 pulses)

Table 1 Experimental conditions

EDM machine	Sodick AP1L
Tool electrode	CuW alloy : $\phi 3 \text{ mm}$
Discharge current	i_e : 2 A
Discharge duration	t_e : 1 ~ 120 μs
Open circuit voltage	u_e : 120 V
Duty factor	τ : 10 %
EDMed time	90 min.
Workpiece (PCD)	Diamond grain size : 25 μm Binder metal : Cobalt (content : 18wt%)
Porarity	PCD : (+), (-), (+)(-)
Dielectric fluid	EDM oil

に示す。PCD を (-) とした逆極性加工では、放電持続時間によらず加工速度はほぼ一定値を示す。また、得られた加工面には、部分的に深い加工痕が観察されるが、導電性のないダイヤモンド

Fig.3 Electrode polarity and Removal rate

粒子は加工されずに残っている。一方、PCD を (+) とした正極性加工では、比較的平滑な加工面が形成されており、ダイヤモンド粒子は直接放電加工されていると考えられる。この時、SEM 像で加工面全体が白っぽく観察されるのは、熱分解カーボン以外に比較的原子量が大な元素が加工面に存在するためであると推察される。また、この極性では、放電持続時間 (t_e) が長いほど加工速度は低下し、特に $t_e = 30 \mu\text{s}$ 以上では、加工速度は負の値を示す。

Fig.5 は、 $t_e = 30 \mu\text{s}$ の正極性加工で得られた加工面の断面曲線を示す。放電加工面は、前加工面（研磨面）に比べて全体的に盛り上がり、除去加工された形跡は認められない。この加工面（付着物）を EDX で分析した結果、

Fig.6 に示すように加工面からは、PCD の構成素材を示す C, Co 以外に Cu, W が検出された。Cu, W は、工具電極材料（CuW 合金）であることから、放電加工時に電極材料が加工面へ転写されたと考えられる。また、C に関しては、PCD を構成するダイヤモンドを検出したものの他に加工油から生成された熱分解カーボンが付着物に含まれていることを示すと考えられる。しかし、両者を区別することができないため、ここでは、Cu, W に注目し、EDX による定量

(a) PCD : (-)

(b) PCD : (+)

Fig.4 EDMed surface of PCD ($t_e = 5 \mu\text{s}$)

Fig.5 Shape of cross section ($t_e = 30 \mu\text{s}$, PCD : (+))

Fig.6 EDX spectrum of EDMed surface (PCD: (+))

分析結果から、放電持続時間と Cu, W の含有率の関係について調べた。

Fig.7 に、加工面から検出される Cu と W の含有率の和と放電持続時間との関係を示す。PCD を (-) とした逆極性加工では、電極材料(Cu + W)の含有率は低い値を示すのに対して、PCD を (+) とした正極性加工では、電極材料の含有率は比較的高く、放電持続時間が長いほど増加する。従来より、放電持続時間を長く設定して加工した場合、加工油から生成される熱分解カーボンが陽極面に付着し、保護皮膜として作用する⁹⁾ことが知られている。PCD の場合、加工面には、熱分解カーボン以外にも相手電極材料が転写され、その付着量は放電持続時間が長いほど増加する。このことから、PCD を (+) とする正極性加工において、放電持続時間が長いほど加工速度が低下するのは、熱分解カーボンに加えて、工具電極材料が加工面へ転写される量が増加したことによると考えられる。

このような熱分解カーボンや電極材料の加工面への付着は、非導電体であるダイヤモンド表面に通電性を与え、放電加工を可能にする一方で、

加工速度を低下させる原因にもなる。このため、PCD の加工速度を向上させるためには、加工面に付着するこれらの量を必要最小限にして加工する必要がある。そこで、ダイヤモンド粒子を直接加工することができる正極性 (PCD : (+)) パルスと加工面に形成された熱分解カーボンや電極材料を除去することができる逆極性 (PCD : (-)) パルスを適当なタイミングで反転させる両極性パルスによる放電加工について検討した。本研究では、加工面に形成される熱分解カーボンや工具

Fig.7 Cu+W ratio on EDMed surface

Fig.8 Shape of cross section

電極材料の転写量が加工面全体で均一化され、極性を切り替えるごとにそれらが大きく変動しないように比較的短いタイミングで極性を反転するようにした。

Fig.8 は、PCD を (+), または (-) とする単極性パルスで加工した場合、および電極極性を定期的に反転させる両極性パルスで加工した場合の加工面の断面曲線を示す。なお、極性を反転させるタイミング(連続して与えるパルス数)は、25, 150, 250 パルス毎として行ったが、これらに大きな違いは認められなかった¹⁴⁾ ため、ここでは 150 パルス毎に極性を反転させた結果を示す。

PCD を (-) とした単極性加工では、加工面はところどころ深く加工されているものの、ダイヤモンド粒子であると考えられる部分は、加工されずに残っており、全体的に除去加工は進行していない。一方、PCD を (+) とした単極性加工では、全体的に加工は進んでいるものの、除去量は比較的小さい。これに対して、両極性パルスで加工した場合、単極性加工に比べて、深く加工されている。このことから、極性を反転させる両極性パルスが PCD の加工速度を向上させるのに有効であるといえる。また、両極性パルスによる加工においても、全体的に除去加工が進んでいることから、ダイヤモンド粒子が直接放電加工されていると考えられる。なお、加工面粗さについては、PCD を (+) とした単極性加工では 4.8 μmRz , PCD を (-) とした単極性加工では 14.5 μmRz であるのに対して、両極性加工では 10.0 μmRz と両者の中間的な値を示し、両極性パルスによる効果は認められなかった。このことから、加工面粗さが優先される仕上げ加工においては、PCD を (+) とする単極性加工が有効であるといえる。

Fig.9 は、Fig.8 の加工面を EDX で分析した結果を示す。PCD を (+) とする単極性加工で得られた加工面において、電極材料(Cu, W)の含有率が比較的高い値

を示すのに対して、両極性パルスによる加工面では、これらの含有率は減少している。これは、正極性 (PCD : (+)) パルスによる加工時に加工面に転写された電極材料が逆極性 (PCD : (-)) パルスを付与することで適度に除去されたためと考えられる。また、熱分解カーボンの形成・除去についてもそれぞれの極性パルスで同様の効果があったと推察されることから、それぞれの極性パルスを定期的に切り替えて与えることによって、PCD の加工面に形成される熱分解カーボンや工具電極材料の転写を適度に制御することができ、このことによって、PCD の加工速度を改善することができたといえる。

次にそれぞれの極性パルスをどのような比率で反転させれば効果的であるかについて調べた。

Fig.10 は、両極性パルスにおいて正・逆極性パルスの比率を変えて PCD を加工した場合の加工速

Fig. 9 Element ratio on EDMed surface

Fig. 10 Removal rate and Electrode wear ratio

度、電極消耗率を示す。図の横軸は、正・逆極性パルスの比率（パルス比）で、極性を反転するまでに与える正極性（PCD：(+)）パルス数と逆極性（PCD：(-)）パルス数の和に対する逆極性パルス数の割合とした。パルス比が 0%とは、正極性パルスだけの単極性加工、100%とは、逆極性パルスだけの単極性加工を示す。PCD を両極性パルスで加工した場合、いずれのパルス比においても、それぞれ単極性で加工した場合に比べて、加工速度、電極消耗率ともに向上している。また、パルス比が 30～70%の範囲で比較的良好な結果が得られている。

次に両極性におけるそれぞれの極性パルスについて、放電持続時間の最適値を調査した。まず、PCD を (+) とする正極性パルスについては、Fig.3 に示す単極性加工での結果から、比較的高い加工速度が得られる放電持続時間 $te = 1 \mu s$ を選択した。また、PCD を (-) とする逆極性パルスについては、単極性では PCD を加工することができないことから、正極性パルスを $te = 1 \mu s$ に固定した両極性パルスを用いて、逆極性パルスの放電持続時間の影響について調べた。この時、連続して与える正・逆極性パルスのパルス数 (n) については、それぞれの極性で放電時間の合計 ($te \times n$) が等しくなるように次式から決定した。

$$te(+)\times n(+)=te(-)\times n(-) \quad \cdots (1)$$

Fig.11 は、PCD を両極性パルスで加工した場合の逆極性パルスの放電持続時間と加工速度、電極消耗率の関係を示す。放電持続時間が長いほど、加工速度は向上し、電極消耗率は改善する傾向を示す。一般に工具電極を (+) とする逆極性加工では、放電持続時間が長くなると工具電極面に形成される熱分解カーボンの量が増加し、電極消耗率が改善されることが知られている。両極性パルスによる PCD の放電加工においても、逆極性パルスの放電持続時間を長くした場合には同様の効果で電極消耗率が改善されたと考えられる。

Fig.11 Removal rate and Electrode wear ratio

以上のことから、両極性パルスによる PCD の放電加工では、正極性パルスの放電持続時間を短く、逆極性パルスの放電持続時間を長く設定した方が、加工速度、電極消耗率ともに良好な結果が得られることがわかった。

4. 結 言

PCD の放電加工速度の向上を目的として、電極極性を定期的に反転させる両極性パルスによる放電加工について検討した結果、次のことがわかった。

- (1) PCD を陽極とした単極性加工では、加工油から生成される熱分解カーボンに加えて、相手電極材料が加工面に転写され、これが PCD の加工速度を低下させる。
- (2) 両極性パルスを適用し、正極性パルスで加工面に形成された熱分解カーボンや電極材料を逆極性パルスによって適度に除去することで、PCD の加工速度、電極消耗率を改善することができる。
- (3) 正、逆極性パルスの比率を 30～70%とした場合に加工速度、電極消耗率の改善効果が高い。
- (4) 正逆それぞれの極性パルスの放電持続時間は、正極性パルスについては短く、逆極性パルスについては長く設定した方が、加工速度、電極消耗率ともに良好な結果が得られる。

謝 辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金(基盤研

究(c):21560139)の助成のもとで行われました。また、実験においては、(株)ソディックにご協力いただきました。関係各位に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) G.Spur, M.Puttrus and U.W.Wunsch: Wire EDM of PCD, Industrial Diamond Review, Vol. 48, No. 529 (1988) pp.264-266.
- 2) 中奥 洋, 増沢隆久, 藤野正俊: 焼結ダイヤモンドの微細放電加工, 電氣加工学会誌, Vol.39, No.91 (2005) pp.24-28.
- 3) 鈴木 清, ニノ宮進一, 岩井 学: 導電性ダイヤモンドを原料とする PCD (EC-PCD) の放電加工, 電氣加工学会全国大会講演論文集, (2009) pp.57-64.
- 4) 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, 電氣加工学会誌, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2012) pp.111-112.
- 5) 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.
- 6) 岩井 学, 橋本英明, 川崎智将, 鈴木 清: 特定遷移金属電極による PCD の高能率放電加工, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2015) pp.79-80.
- 7) 福澤 康, 谷 貴幸, 岩根英二, 毛利尚武: 放電加工機を用いた絶縁性材料の加工, 電氣加工学会誌, Vol.29, No.60 (1995) pp.11-21.
- 8) 南 久, 渡邊幸司, 増井清徳, 鍋倉伸嘉: 放電加工による焼結ダイヤモンド工具の成形加工, 電氣加工学会誌, Vol.44, No.105 (2010) pp.17-24.
- 9) 鈴木政幸, 毛利尚武, 齋藤長男, 武沢英樹: 放電加工における電極低消耗の研究(第1報)-放電除去現象の観察-, 電氣加工学会誌, Vol.26, No.52 (1992) pp.47-56.
- 10) 増井清徳, 佐藤幸弘, 曾根 匠, 中山 実, 金子雄二: 放電加工における異常アーク面の解析とその改善-両極性パルスによる異常アークの回避-, 電氣加工学会全国大会(1994)講演論文集, pp.15-18.
- 11) 夏 亘, 国枝正典: 極性反転パルスによる放電加工特性の向上, 日本機械学会論文集(C編), Vol.61, No.58 (1995) p.281-286.
- 12) 宇野義幸, 岡田 晃, 伊藤 満, 高木 俊: 高速極性切替放電加工に関する研究, 電氣加工学会誌, Vol.29, No.60 (1995) pp.22-30.
- 13) 河谷浩司, 花岡大生, 福澤 康: 極性反転回路を用いた絶縁性 Si_3N_4 セラミックスの微細放電加工, 2010 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2010) pp.563-564.
- 14) 南 久, 渡邊幸司, 増井清徳: 両極性パルスによる焼結ダイヤモンドの放電加工特性, 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2011) pp.721-722.

(2019年8月23日受付)