ワイヤ放電ミーリング加工法による形状加工

後藤啓光* 谷貴幸* 毛利尚武**

Shape Machining by Wire Electrical Discharge Milling Method

Hiromitsu GOTOH, Takayuki TANI and Naotake MOHRI

Abstract

Electrical discharge machining (EDM) is a useful method for machining hard materials such as cemented carbide. However, in the equipment used in sinking electrical discharge machining (SEDM), the electrodes wear and can become exhausted during use. It is necessary to prepare several electrodes in advance of machining. We developed a new SEDM method that uses a feeding wire electrode. It is named wire electrical discharge (WED) milling. By this method, the machining is similar to mechanical milling with a ball end mill, but is free from problems such as tool wear or the built-up edge in mechanical milling. In this paper, the machining of various shapes was carried out on cemented carbide using the WED milling method. In addition, a transistor control capacitor electrical discharge circuit was used when machining cemented carbide, with the purpose of improving the machining speed.

Key words :EDM, wire electrical discharge milling, shape machining, reciprocating rotation

1. 緒 論

放電加工法は加工対象の硬さに依存することなく加工が可能であるため、超硬合金などの切削加工などでは困難である高硬度材料に対する加工手法に主に用いられている。一般に除去加工を主体とする形状付与加工では、加工速度、表面粗さ、加工精度、環境負荷、加工コスト、加工材質・形状に対する柔軟性などが評価対象となり、そのいくつかはしばしばトレードオフの関係にあり、特に放電加工においては電極の消耗が最大の課題となっている。

しかしながら、放電加工では加工の進展に伴う電極の消耗を避けることが困難であり、特に精度が求められる場合にはあらかじめ複数の電極を作製する必要がある。この電極の作製工程はいわば中間的な工程であるが、これを避けることは困難である。また、ひとつの型でも複数の部品で構成

される場合には電極の種類も多岐に渡り、それらを管理する必要が生じるため、放電加工を利用する場合の課題となっている¹⁾。そのため、電極低消耗加工を目的とし、電流波形適応制御、電極極性選択、加工液の選択と管理、銅タングステンやCVD ダイヤモンドなどの低消耗電極材料の採用など幾多の工夫がなされてきた²⁻⁶⁾。

また、軸方向の電極消耗を補償制御し、底面直径の小さな円筒電極を回転走査してその運動包絡体として所望の形状を得る放電創成加工法も提案されているが、円筒電極の縁の消耗の影響を排除することができない⁷⁻⁸⁾。

一方、ワイヤ放電加工法では黄銅などで製作されたワイヤ状の電極を走行させながら、加工を行なう。そのため、ワイヤ放電加工においては工具が連続的に交換されている状態での加工となり、実質的に消耗を無視することが出来る。これにより、総型電極を用いた形彫放電加工のような複雑な電極管理は不要となる。しかしながら、ワイヤ

* 筑波技術大学産業技術学部

(茨城県つくば市天久保 4-3-15)

** 東京大学名誉教授 (東京都文京区本郷 7-3-1)

放電加工で加工可能な形状は線織面に限られてしまう。

そこで、このような走行ワイヤを電極と使用した場合の無消耗特性を生かした放電加工法として、増沢によって WEDG (Wire Electrical Discharge Grinding) 法が開発された⁹⁾。この加工手法は走行ワイヤをガイドに拘束させながら加工を行なうため、ワイヤ振動の影響がなく、無消耗加工が実現する加工手法である。そのため、微細軸の精密成形加工法として既に定着している。さらに、WEDG 法を応用し、Fig. 1 に示すように、ワイヤの電極をガイドの外縁の外側に配置し、ガイド走査により深い切り込みが可能になることも示されている¹⁰⁾。しかしながら、構造上、細線であるワイヤ電極を使用する場合にはワイヤ直径よりもさらに薄いガイドで支える必要があり、適用の範囲が限定されてしまうという問題点がある。

Fig. 1 Wire guide¹⁰⁾

そこで、著者らはワイヤ電極の無消耗特性を活かした形彫放電加工法として、ワイヤ放電ミーリング加工法: WED-milling (Wire Electrical Discharge milling)¹¹⁾ を考案した。この加工手法では、ワイヤガイドを回転 (Z 軸において正逆両方向に往復円運動) させ、ガイドの回転制御と共に走査加工を行なうことにより、ボールエンドミルによる切削加工と同様な形状加工が可能であり、さらに電極の消耗を考慮することなく、形状加工を行うことができる手法である。本研究では、考案したワイヤ放電ミーリング加工法による各種形状加工を試みた。

2. 実験方法

本研究では、市販の放電加工機では使用されな

い特殊な形態の電極を使用する必要がある。そのため、ワイヤ放電ミーリング加工を用いた簡単な形状加工が実現できる実験用の放電加工機を自作し、各種実験に使用した。

2.1 ワイヤガイド

ワイヤ電極を走行させ、電極の先端形状を維持するためのワイヤガイドを試作した。試作したワイヤガイドの主な構造を Fig. 2 に示す。2 段の円柱形状であり、下段の円柱先端は半球形状をしている。半球にはその頂点を通る V 溝が加工されており、電極ワイヤはこの溝に沿って走行する。この走行ワイヤは上段の円柱内部の穴を通して下方へ向かって走行し、球面ガイドを通過後に再び上方に導かれ、円柱内部の穴を通り、巻き取られる仕組みになっている。ワイヤガイドは、上段の部分をコレットチャックにより把持し、主軸に固定する。また、下段のガイド先端の球面の直径が設定上の工具直径となる。

本研究では、下段のガイド直径を工具直径として定義して使用するが、実際には、球面上から張り出した状態で溝を走行するワイヤ電極の張り出し量加わり、設定より大きくなる。例えば、5 mm の直径のガイドに、V 溝の深さを 0.2 mm に設定して作製し、0.3 mm のワイヤ電極を走行させたときの工具直径を実測した場合、5.17 mm であった。なお、ワイヤガイドは加工中の 2 次放電の影響を防ぐために、絶縁性の ZrO_2 セラミックスを使用して作製した。

Fig. 2 Detailed illustration of the wire guide

Fig.3 Experimental setup for Wire electrical discharge milling

2.2 ワイヤ放電ミールリング加工装置

実験用に作製したワイヤ放電ミリング加工装置の概要を Fig. 3 に示す. Fig. 2 に示したワイヤガイド全体を中空の主軸に固定した状態で内部にワイヤを走行させ, 工具電極として使用する. ワイヤ電極は市販のワイヤ放電加工に使用されている電極を使用し, 非接触式のトルク制御装置を用いてワイヤにプリテンションを加えた状態でインダクションモータにより一定速度で巻き上げる.

主軸に固定したワイヤガイドは非接触動力伝達機構を介し、モータによって回動駆動させる。ワイヤのねじれの影響が生じないように、制限した回転角度(θ)で他の軸の制御とは独立して往復回転を与え続けた。なお、X 軸、Z 軸と回動軸(θ)は共に PC により制御している。放電加工電源はトランジスタ制御方式とし、内部抵抗によって放電電流を任意に設定する。また、放電波形制御方式としてアイソパルス方式を適用した。

2.3 加工環境

総型電極を用いた形彫放電加工では、電極の低消耗化および極間の比抵抗を維持するため、放電加工油中で加工を行うのが一般的である。本研究で適用するワイヤ放電ミーリング加工法では、電極の消耗を考慮する必要がなく、かつ極間の清浄化が容易に行えることから、ワイヤ放電加工で使用されているイオン交換水中での加工を実施した。比抵抗 $1 [\text{M}\Omega \cdot \text{cm}]$ 以上のイオン交換水中に浸漬させた状態で、さらにポンプによりイオン交換樹脂を介して循環させたイオン交換水を吹きかけながら加工を実施した。なお、加工中は吹きかける加工液の比抵抗をモニタリングし、比抵抗を $1 [\text{M}\Omega \cdot \text{cm}]$ 以上に維持した状態で加工を実施した。供試材には一般に広く使用されている超硬合金を使用した。使用した超硬合金は富士ダイス社製の超硬合金：D10（細粒～中粒の粒子）である。主な物性値を Table 1 に示す。

Table1 Material properties

Specific gravity	15.20 g/cm ³
Hardness	92.0 HRA
Bending strength	2940 MPa
Tensile strength	1620 MPa
Compressive strength	5690 MPa
Young's modulus	640 GPa
Thermal conductivity	97[W/m・K]
ASTM Grinding consumption	1.6×10^{-5} cm ³ /rev
Material classification symbol	VM-20

3. 超硬合金に対する形状加工

超硬合金に対して、ワイヤ放電ミーリング加工法による形状加工を実施した。主な加工条件を Table2 に示す。通常の形彫放電加工で使用する加工条件をもとに加工条件の設定を行った。電極のサーボ制御の基準となるサーボ電圧の値が通常使用されている値では短絡が頻発し、断線する場合が確認された。そのため、無負荷電圧を 200V に設定したところ、加工が安定し、断線も生じなくなった。そこで、サーボ基準電圧を 200V に設定している (Table2)。

Table2 Machining conditions

Electrode material	Zinc-coated wire (diameter 0.3 mm)
Electrode polarity	Negative
Open circuit voltage: U_i	250 V
Discharge duration: t_e	2 μ s
Discharge current: i_e	11.5 A
Duty factor: τ	20 %
Servo reference voltage	200 V
Reciprocating rotation angle	360 °
Reciprocating rotation cycle	1 Hz
Wire feeding speed	50 mm/min

3.1 Z 軸方向に対する貫通穴加工

形彫放電加工では、通常、総型の電極を作製し、Z 軸方向に対する送りを与えながら形状加工を実

施する。そこで、総型電極による放電加工と同様に Z 軸方向へサーボ送りを与えた状態での加工を実施した。実施した加工の概要を Fig. 4 に示す。厚さ 3mm の超硬合金に対して (a) ワイヤ放電ミーリング加工法による貫通穴加工を実施した。また、比較のため、(b) 銅電極を用いて同条件で貫通穴加工を実施した。加工表面の SEM 像を Fig. 5 に示す。銅電極により加工を行った場合には加工表面に熔融再凝固した状態が明確に観察され、マイクロクラックの存在が確認された。しかしながら、ワイヤ放電ミーリング加工法で加工を行った加工面からは明確なマイクロクラックは観察されなかった。

超硬合金表面に形成された再凝固層に対して、電圧を印加した状態でセカンドカットの要領でワイヤ電極を沿うように走査させることにより、熔融再凝固層を電解加工によって除去することができることが田村らによって確認されている¹²⁾。本加工においても走行ワイヤと加工面との間に同様の現象が生じた可能性がある。

Fig. 5 Machining surface in the hole

3.2 底付加工における加工面の観察

ワイヤ放電ミーリング加工法では、加工側面に対して電解作用が生じ、熔融再凝固層が除去されたと考えられる。そこで、側面および底面に対する電解作用の影響を調べるため、ワイヤ放電ミーリング加工法による底付穴加工を行った。加工面の断面 SEM 像を Fig. 6 に示す。イオン交換水中

で加工を行った場合、加工穴底部とそれ以外の部分で表面状態に明確な差が確認された。加工穴底部では溶融再凝固した面が確認されたのに対し、加工穴上部の加工穴側面においては溶融再凝固層が確認されなかった。そこで、比較のため同様の形状加工を放電加工油中で実施した。イオン交換水中での加工面および放電加工油中での加工面の状態を Fig. 7 に示す。電解作用が生じない放電加工油中で加工を行った場合には、加工穴側面、および加工穴底面において、同様の溶融再凝固層が観察される結果となった。

これらのことからイオン交換水中で加工を行った場合に加工側面の溶融再凝固層が除去された原因は、電解作用に起因していると考えられる。

Fig. 6 Schematic diagram of Bottomed machining

Fig. 7 Observation of Bottomed machining surfaces

3.3 底付き穴加工における加工履歴曲線

直径 2mm のワイヤガイドを使用して、設定加工深さ 9mm の底付き穴加工をワイヤ放電ミーリング加工法により実施し、加工履歴を調べた。また比較のため、先端が半球形状の銅電極を作製し、同様の条件で加工を行った。実験結果を Fig. 8 に示す。なお、縦軸の電極変位は Z 軸の変位を測定

して示しており、総型電極の電極消耗は考慮していない。

総型電極では加工深さが深くなると加工速度が低下し、加工が不安定となったときに見られるサーボバック動作が確認される。しかしながら、ワイヤ放電ミーリング加工法では、加工深さにかかわらず、ほぼ一定の速度で安定して加工が継続している。これは、ワイヤ放電ミーリング加工法では、極間の加工くずや気泡の排出性が極めて良いことが原因として考えられる。

Fig. 8 Relationship between electrode position and machining time

3.4 Z 軸方向に対する形状加工の実施

ワイヤ放電ミーリング加工法を用い、Z 軸方向に 1mm 送ることにより、底付き穴加工を実施し、加工された底付き穴の断面形状について調べた。比較のため、直径 3.6mm の銅棒の先端を半球状に成型し、同様の加工を実施した。Fig. 9(a) に総型電極で加工した底付き穴、Fig. 9(b) にワイヤ放電ミーリング加工法で加工した底付き穴の状態、Fig. 9(c) に底付き穴中央部分の断面形状プロファイルの測定結果を示す。

総型電極を使用した場合には中央部分が送りよりも浅く加工される結果となった。これは電極が消耗したために生じたと考えられる。一方、ワイヤ放電ミーリング加工法を行った場合、設定と同じ深さに半球状の良好な形状加工が実現していることが分かる。

次に、Z 軸方向への底付き穴加工を繰り返し行い、単レンズを縦・横に配列した形状のフライアイレンズ作製用の金型を模擬した形状加工を実施した。実施例を Fig. 10 に示す。Z 軸方向に、設定

Fig. 9 Surface conditions after machining and cross-sectional shape profiles

深さが 1 mm となるように送りを与え、繰り返し加工を行うことで、19 個の単レンズを組み合わせたフライアイレンズ用の型を作製した。

Fig. 10 Simulation machining for fly-eye lens molding die

ひとつの単レンズ部分にかかった加工時間はおおよそ 45 分程度であった。なお、ワイヤガイドには直径 5mm のワイヤガイドを使用した。また、加工後には電解生成物の付着が確認されたため、ガラスビーズによるショットピーニング処理を施している。電極の消耗を考慮する必要がないため、均一な深さの加工が実現した。

4. 走査放電加工

4.1 X 軸方向に対する加工

ワイヤ放電ミーリング加工法では、電極先端の形状を維持することができるため、ボールエンド

ミルを使用したミーリング加工のように XY 平面上での走査加工を行うことが可能である。そこで、Z 軸方向に 0.5mm の深さまで加工を行い、加工進行方向を X 方向に切り替え、X 軸方向に対するサーボ制御を行ないながら、溝形状の加工を実施した。実施した加工の概要を Fig. 11 に示す。なお、ワイヤガイド直径は 3mm を使用した。

Fig. 11 Schematic diagram of trench machine

X 軸方向にサーボ制御を行いながら加工を実施した時に観察される代表的な放電波形を Fig. 12 に示す。また、比較のため、Z 軸方向に切込みを与える時に観察される放電波形を同図に示す。Fig. 12(a) に示すように、X 軸方向に捜査した場合、周期的に放電の発生頻度が低下する現象が確認された。一方、Fig. 12(b) に示すように、Z 軸方向に切り込みを与えるときに観察される放電波形には、このような現象は観察されなかった。このような周期的な放電頻度の低下は、ワイヤ放電ミーリング加工法において、ワイヤガイドの回動動作に起因してサーボ方向とワイヤ電極の位置とが対向しない場合に生じていると考えられる。

(a) Scanning machining, X-axis direction

(b) Machining, Z-axis direction

Fig. 12 Typical electrical discharge wave forms

Fig. 13 にワイヤ電極の位置とサーボ制御方向との関係を示す。加工進行方向とワイヤ電極とが常に対向するZ軸方向での加工に対してXY平面上での加工ではワイヤ電極の回動動作によって加工位置が変化する。そのため、放電頻度が周期的に低下したものと考えられる。

Fig. 13 Relationship between electrode position and servo control direction

4.2 X軸方向に対する走査放電加工の実施

Z軸方向に0.5mm切り込み、X方向に10mm走査して加工を行った。加工結果をFig. 14に示す。Fig. 14に示すような形状加工がおおよそ40分で実現できた。また、Mitutoyo社製の触針式表面粗さ計：SURFTTEST SV-400を使用し、表面粗さの測定を行ったところ、 $Ra3.53\mu m$, $Rz0.52\mu m$ 程度であった。なお、加工後には電解生成物の付着が確認されたため、ガラスビーズによるショットピーニング処理を施している。以上のように走査加工においては、やや放電頻度が低下する傾向を示したが、均一な深さを保った加工が実現した。

Surface roughness $R_z=3.53\mu m$; $R_a=0.52\mu m$

Fig. 14 Trench machined by WED milling

5. 加工速度の高速化

ワイヤ放電ミリング加工法では、回動動作に伴い、工具ワイヤの位置が変化する。そのため、加工を安定化させるためにサーボ基準電圧を高くして加工を実施してきた。しかしながら、サーボ基準電圧を高くしたことに伴い、放電頻度が低下し、加工速度の低下につながっている。また、X

軸方向に走査放電加工を行った場合においても、加工進行方向とワイヤ電極とが対向しない場合に放電頻度が低下する。

超硬合金に対する放電加工を実施する場合、エネルギー密度の高い条件（ピーク電流が高く、パルス幅の短い条件）で加工を行うことで、加工速度の向上や表面性状の向上が見込まれる。しかしながら、このような電気条件で加工を行なった場合、電極消耗を抑えることが困難となる。そのため、通常の形彫放電加工ではあまり適用されていない。一方、ワイヤ放電ミリング加工法においては電極の消耗を無視することができるため、通常の形彫放電加工ではあまり適用されないエネルギー密度の高い条件を適用した加工が可能であり、加工速度の向上に効果的であると考えられる。

5.1 トランジスタ制御付きコンデンサ放電回路の適用

エネルギー密度の高い加工条件を容易に実現することができる放電回路として、トランジスタ制御付きコンデンサ放電回路が知られており、電極の消耗を考慮する必要のない細穴加工やワイヤ放電加工に適用されている。そこで、放電回路にコンデンサを追加し、超硬合金に対する放電加工を実施した。加工条件をTable3に示す。

①トランジスタ放電回路で中実電極を使用した場合、②トランジスタ制御付コンデンサ放電回路で中実電極を使用した場合、③トランジスタ制御付コンデンサ放電回路でワイヤ放電ミリング加工法を使用した場合の3つの方法で、超硬合金に対する貫通穴加工を実施し、加工速度を比較した。

Table3 Machining conditions

	①	②	③
Diameter, electrode form, material, Polarity	3 mm, Solid, Cu, —	3 mm, Solid, Cu, —	3 mm, Guide, Cu (0.3mm), —
Open circuit voltage: U_i	250 V		
Resistance	140 Ω		
Discharge duration: t_d	5 μs	5 μs (measurement value)	
Pulse interval time t_o	45 μs	—	
Capacitance	—	1 μF	

5.2 加工結果の比較

トランジスタ放電回路とトランジスタ制御付コンデンサ放電回路との加工特性の比較を行った。放電回路が異なるため、単純に比較することは困難であるが、Fig. 15 に示す結果となった。①と比較し、②および③では、加工速度が大幅に向上することが分かる。しかしながら、②に示すように、総型電極を用いた加工では電極消耗率が 60% 程度見られた。一方、③では②の場合ほどの加工速度の向上は見られなかったものの、①と比較し、約 10 倍の加工速度を得ることができた。

このように、トランジスタ制御付きコンデンサ放電回路を適用することで、電極の消耗を考慮することなく、加工速度を向上させることが可能であることが確認された。

Fig. 15 Machining results

6. まとめ

本研究では、ワイヤ電極の無消耗特性を活かした形彫放電加工法として、ワイヤ放電ミーリング加工法を考案し、超硬合金に対する形状加工を試みた。得られた結果を以下に要約する。

- (1) Z 軸方向に対する加工において、加工穴側面は電解作用の影響を受け、溶融再凝固層が除去された。また、 $\phi 2\text{mm}$ のワイヤガイドを使用し、深さ 9 mm まで加工を実施したが、深さが増加しても加工速度の低下や加工状態の悪化は観察されなかった。さらに、フライアイレンズの金型を模擬した形状加工が実現できた。
- (2) X 軸方向に対する加工において、ワイヤ電極の

回転動作によってワイヤ電極の位置とサーボ方向とが変化するため、放電頻度が周期的に低下する現象が確認された。また、深さ 0.5 mm、長さ 10 mm 程度の溝形状の加工が実現できた。

- (3) トランジスタ付きコンデンサ放電回路を適用することで加工速度の向上を図ることができた。

参考文献

- 1) 電気加工技術の過去から未来に向けて—電気加工学会の歩みとともに—, 電気加工学会誌, 51 巻, 126 号 (2017) p.23.
- 2) 齋藤長男, 毛利尚武, 高鷲民生, 古谷正典: 放電加工技術, 一基礎から将来展望まで—, 日刊工業新聞社, (1997) pp.40-50.
- 3) 西村重志, 土屋政光: 低電極消耗放電加工の研究—電極表面の黒化層について—, 電気加工学会誌, 1 巻, 2 号, (1995) pp.71-79.
- 4) 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 4 報) —電極へのカーボン付着現象—, 電気加工学会誌, 29 巻, 60 号, (1995) pp.1-10.
- 5) 増沢隆久: 水を加工液とする放電加工の研究 (第 1 報) —SK4 の加工速度と電極消耗率—, 電気加工学会誌, 14 巻, 27 号, (1979) pp.50-57.
- 6) 佐野定男, 岩井学, 植松哲太郎, 鈴木清: 多結晶ダイヤモンド焼結体の放電加工への応用に関する研究 (第 1 報) —多種ダイヤモンド基複合電極による放電加工—, 電気加工学会誌, 42 巻, 100 号, (2008) pp.65-72.
- 7) 土屋政光, 金子勉, 菅野勝弥: 円筒電極による三次元制御放電加工 (第 2 報) —電極消耗長さ自動計測・補正による平面加工—, 電気加工学会誌, 17 巻, 34 号, (1984) pp.1-9.
- 8) 中島宣洋: 放電創成加工法の微細精密加工への適用, 精密工学会誌, 71 巻, 5 号, (2005) pp.557-561.
- 9) 増沢隆久: マイクロ放電加工, 精密工学会誌, 68 巻, 2 号, (2002) pp.180-184.
- 10) 増沢隆久, 田中勝也, 飯塚修: 走行ワイヤ電極による底付穴の放電加工, 昭和 59 年精機学会関西支部大会論文集, (1984) pp.97-98.
- 11) 後藤啓光: 回転ガイドを用いたワイヤ放電ミーリングの展開, 精密工学会誌, Vol.81, No.11, (2015) pp.1004-1007.
- 12) 田村武夫, 金子倉之介: ワイヤ放電加工におけるオンザマシン表面改質技術の開発, 電気加工学会誌, Vol.46, No.111(2012), pp.14-22.

(2020年1月23日受付)