放電による微細工具製作の高速化 *

-ツイン WEDG 加工システムの応用-

許東亞 ** 増沢隆久*** 藤野正俊***

Rapid Fabrication of Microtools by EDM
-Application of Twin-WEDG Machining System-

Dong-Yea SHEU, Takahisa MASUZAWA, Masatoshi FUJINO

Abstract

Machining microholes with high aspect ratios has become important in various industrial fields. Using the jump-flushing system ⁽¹⁾, it has become possible to machine deep microholes with a high aspect ratio of about 15 in stainless steel by EDM. It was previously necessary to fabricate a long microtool in order to machine deep microholes. WEDG is an excellent process for machining microtools with high precision, however, it takes a long time because it requires two processes, rough and finish machining. In this study, a new system is proposed for machining microtools quickly, by applying two WEDG units, one for rough machining and the other for finish machining. This twin-WEDG system can fabricate microtools by performing both processes at the same time. As a result, the twin-WEDG system is more efficient than the conventional WEDG system for fabricating microtools.

Key words: WEDG, Jump-Flushing System, Microtool

1. 研究背景と目的

通常の微細放電による深穴加工では、穴径の5倍⁽²⁾以上の深さをもつ穴を加工することは容易ではないが、ジャンプ機構を利用し、水を加工液として横方向の放電加工によって厚さ 2mm の SKD 材の板に $\phi 100 \mu\text{m}$ の貫通穴（アスペクト比約 20 倍以上）を加工することは可能となっている⁽³⁾。その一方、深穴加工ではまず長い電極を成形しなければならない。通常は、先端部分の消耗を考慮して、電極長さは被加工物の厚さの 2 倍以上必要とされる。

WEDG⁽⁴⁾（ワイヤ放電研削）はマイクロ工具の製作において非常に優れた方法であるが、細

長い工具を成形するには長い時間を要するため、量産効率が低いことが指摘されている。従来の単一 WEDG の微細電極生産方法としては、容量の大きなコンデンサで荒加工し、次にコンデンサの容量を小さくして仕上げ加工をする。この 2 つのプロセスを順次に行うため、細長い電極を成形するには多くの時間を必要とする。そこで、本研究では、より早く微細電極を成形するために、ツイン WEDG ユニットを用いた電極の成形手法を提案する。以下、この加工方式による加工系をツイン WEDG 加工システム⁽⁵⁾と呼ぶ。ツイン WEDG 加工システムを用いて実際に電極成形加工を行い、その加工特性、荒加工径と仕上げ加工径の関係、加工速度と各加工パラメータの特徴を明らかにし、実用化への可能性を検討する。

* 電気加工学会全国大会（1997）にて発表

** 台湾 南台科技大学 機械工程技術系

*** 東京大学生産技術研究所 第2部

2. ツイン WEDG 加工システムの原理

ツイン WEDG 加工システムは図 1 に示すように、1つの WEDG ユニットの荒加工に、もう 1 つは仕上げ加工専用として使うことが特徴である。(以下 WEDG A と WEDG B と称する)。電極を加工する際に、最初は WEDG A だけで荒加工を行うが、加工した電極の長さが $300\mu\text{m}$ (WEDG A と WEDG B の設定距離) を超えると WEDG B が同時に仕上げ加工も行うようになる。このように、ツイン WEDG 加工システムでは従来の単一 WEDG と違って、荒加工と仕上げ加工を同時に行うことができる。

Fig.1 Principle of Twin-WEDG System

3. 実験装置と加工条件

本研究で試作したツイン WEDG システム加工装置の構成を図 2 に示す。このシステムの概観の写真を図 3 に示す。以下加工機の各部について述べる。

(1) 駆動系

加工装置は X,Y,Z 方向の 3 軸に加え、回転軸の C 軸があり、合わせて 4 軸をもつ。電極側が Z 方向に動き、WEDG ユニットが X 方向に動く。X,Z 方向はステッピングモーターとミットヨ製のマイクロメータヘッドで駆動されており、Z 方向に送りは 1 パルスが $0.05\mu\text{m}$ である。リニアスケールが X 軸に取り付けられており、X 軸の位置座標値をフィードバックすることができる。位置がコンピュータにより制御されており、また、回転軸 C 軸は直流モーターを用いて 3000rpm で回転させている。加工液は市販の灯

油を使用している。

Fig.2 Configuration of Twin-WEDG System

Fig.3 Photograph of Twin-WEDG System machine

(2) 仕上げ加工用 WEDG ユニット (以下 WEDG B と称する)

試作装置は WEDG ユニットが 2 組取り付けられているのが特徴である。(図 2) WEDG B は X 軸方向に移動できるように構成されており、位置制御によって電極の仕上げた直径を容易に得られる加工電極である走行ワイヤは、直径 $200\mu\text{m}$ の黄銅である。放電電源は直流電源の電圧が 80V に固定される。

(3) 荒加工用 WEDG ユニット (以下 WEDG A と称する)

WEDG A の基本構造は WEDG B と全く同じであり、荒加工径を調整するため、水平方向に移動できるステージに固定し、アクチュエータで駆動される。

また、WEDG A は WEDG B と同様に X 軸に取り付けられているが、WEDG A と WEDG B の加工点（放電点）は同一平面に存在せず、およそ $300\mu\text{m}$ の距離を保持し固定されている。

電極を加工する際、最初に WEDG A ユニットで荒加工のみを行い、電極の長さが $300\mu\text{m}$ を超えた時点で、WEDG B が仕上加工を開始する。以後、WEDG A と WEDG B の両方で、同時に電極を成形する。

(4) 放電状況の検出回路

従来の単一 WEDG ユニットは検出回路が 1 つだけであるが、ツイン WEDG 加工システムでは、荒加工と仕上げ加工と両側に同時に検出回路が必要である。常に加工中に WEDG A と WEDG B の放電状況を監視しながら比較し、両方のどちらかに異状放電が起こったら、コンピュータの制御で Z 軸を後方に戻し、正常な放電状況に回復させる。

(5) 加工条件

加工液は灯油を用いてステンレス製の注射針から極間および周辺に流すことにした。加工電圧を 80V に設定し、放電回路は RC 回路を採用した。また、本研究では、微細放電によく使用されているタングステンと超合金の電極素材を用いて、実験を行った。

4. 実験結果

(1) コンデンサ容量の影響

微細放電回路から分かるように、RC 放電回路では各放電エネルギーはコンデンサの容量によってほぼ決まる。また、電極の成形時間、電極の表面荒さもコンデンサの容量に大きく影響される。

ツイン WEDG 加工システムでは、加工速度を上げるために荒加工側（WEDG A）には大容量のコンデンサをつけ、仕上面の荒さを小さく抑えるために仕上げ加工側（WEDG B）に小容量のコンデンサを用いる。荒加工のコンデンサ容量と時間の関係を調べるため、電極素材として $\phi 300\mu\text{m}$ のタングステンを用い、極性はワイヤが（-）、被加工工具が（+）になるよう電源を設定する。また、仕上げ加工用の WEDG B 側

には、容量が 220pF のコンデンサを固定し、荒加工用の WEDG A 側のコンデンサ容量を変化させて実験を行った。その結果を図 4 に示す。図から分かるように、WEDG A 側のコンデンサ容量が大きいほど電極の成形時間が短くなり、コンデンサ容量が 22000pF 以上になると成形時間はほとんど一定となり、逆に増大することもある。また、C が大きいほど電極の荒加工径の精度が落ちるのみならず、あまり大きくすぎると溶融部の飛散効率も落ち、逆に加工時間が長くなる。そのため、以下の実験では WEDG A と WEDG B のコンデンサ容量をそれぞれ 22000pF 、 220pF に設定する。

Fig.4 Relationship between capacity of rough WEDG and machining time by Twin-WEDG System

(2) 荒加工量と仕上げ加工量の配分

ツイン WEDG 加工システムにより電極を成形する場合、荒加工量と仕上げ加工量の配分は電極の成形時間に大きく影響する。その配分と電極の成形時間との関係は図 5 に示す。図から分かるように、仕上げ径 $80\mu\text{m}$ の電極を成形する場合、荒加工径が大きければ大きいほど仕上げ加工量が大きくなる。仕上げ加工の放電エネルギーがわずかなため、WEDG B 側の負担が大きくなり、電極の成形時間は急激に増大する。一方、荒加工径を仕上げ加工径にあまり近く設定すると仕上げ加工の加工状態が不安定になる可能性がある。荒加工の放電クレータを考慮して、荒加工径は仕上げ加工径より約 $10\sim 20\mu\text{m}$ 大きく設

定することが望ましい。

Fig.5 Relationship between diameter of rough machining and machining time

(3) 電極成形の進行状況

ツイン WEDG 加工システムによる電極成形の進行状況を図 6(a), (b)に示す。最初は荒加工だけであり、成形された電極の長さが $300\mu\text{m}$ を超えたところで仕上加工が開始され、以降荒加工と仕上加工が同時に行われる。最初は荒加工だけを行うため、電極の成形速度は速いが、仕上加工を同時に行うと成形速度は遅くなる。また、荒加工径が大きければ大きいほど仕上加工の量が増えるため、成形速度が著しく低下する。図から分かるように、荒加工径を仕上加工径に近く設定すると、加工速度が大きくなる。一方、荒加工径を仕上加工径にあまり近く設定すると加工状態は不安定になる可能性がある。仕上加工径が $80\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$ の電極を成形する場合、荒加工径がそれぞれ $90\sim 100\mu\text{m}$ 、 $50\sim 60\mu\text{m}$ に設定されるのが望ましい。

(4) シングル WEDG とツイン WEDG の比較

シングル WEDG で電極を成形する場合、荒加工径が大きいかほど荒加工時間は減少する。しかし、仕上加工において除去量が大きくなるため、仕上加工時間が著しく増加し、電極の成形総時間は急激に増える。一方、荒加工径が仕上げ加工径に近く設定された場合、加工状況が不安定になる可能性がある。そのシングル WEDG での電極成形実験の結果を図 7 に示す。経験的に、

シングル WEDG により $\phi 80\mu\text{m}$ の電極を成形する場合、荒加工径は約 $90\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ 位に設定すると加工状況が安定する。

(a) Diameter is $80\mu\text{m}$ after finish machining

(b) Diameter is $40\mu\text{m}$ after finish machining

Fig.6 Relationship between feed length and machining time by Twin-WEDG System

ツイン WEDG の再現性を調べるため、仕上げ直径 $40\mu\text{m}$ の超硬合金電極成形を 10 回行い、シングル WEDG と比較した。実験の結果を図 8 に示す。また、図 9 は図 8 と同じ条件下で、電極素材としてタングステンを用いて同様の実験を行った結果である（この場合、仕上げ直径は $80\mu\text{m}$ とした）。図 8 と図 9 から分かるように、ツイン WEDG 加工システムはシングル WEDG より電極の成形時間をおおよそ 48% 短縮し、再現性も良いことがわかった。

Fig.7 Relationship between diameter of rough machining and machining time by single WEDG

Fig.8 Comparison between single WEDG and Twin-WEDG system

Fig.9 Comparison between single WEDG and Twin-WEDG system

(5) 成形した微細工具の形状

図 10 はツイン WEDG 加工システムで成形した電極外観の写真である。比較のため、シングル WEDG で成形した電極外観を図 11 に示す。これらから分かるように、ツイン WEDG 加工システムによっても、シングル WEDG と同様に真直度の良い電極を成形できることが確認できた。

Material : tungsten Diameter : 80 μm

Fig.10 View of microtool by Twin-WEDG System

また、タングステンおよび超硬合金について、ツイン WEDG 加工システムにより作成した微細電極の拡大写真を図 12、図 13 に示す。図から分かるように、荒加工の表面と仕上げ加工の表面の荒さの違いがはっきり見られ、荒加工と仕上げ加工において放電エネルギーは相互に影響を及ぼしていないと考えられる。

Material : tungsten Diameter : 80 μm

Fig.11 View of microtool by Single WEDG

5. 計算と分析

前節から分かるように、従来のシングル WEDG と比較して、ツイン WEDG 加工システムはより効率的に電極成形が可能であることが証明された。本節では、簡単な計算式に基づいてデータを分析する。

(1) シングル WEDG の加工時間

放電現象、除去量、エネルギーなどのマイクロ分

Material : tungsten Diameter : 40 μm

Fig.12 View of microtool by Twin-WEDG System

Material : tungsten carbide Diameter : 40 μm

Fig.13 View of microtool by Twin-WEDG System

析は要因が複雑であるため、はっきり把握するのは非常に困難である。そこで、除去量、成形時間などの平均された値を用いて解析する。各パラメータは以下のように設定する。

D_E : 電極素材の直径 [μm],

D_R : 荒加工の直径 [μm]

D_F : 仕上後の電極の直径 [μm]

T_S : シングル WEDG の電極加工総時間 [s]
(荒加工時間+仕上げ加工時間)

T_R : シングル WEDG の荒加工時間 [s]

T_F : シングル WEDG の仕上げ加工時間 [s]

L : 荒加工した電極の長さ [μm]

L_f : 仕上げした電極の長さ [μm]

V_R : シングル WEDG による荒加工の単位時間

あたりの除去体積 [μm³/s]

kV_R : シングル WEDG による仕上加工の単位時間あたりの除去体積 [μm³/s]

k : 仕上加工と荒加工の加工速度の比率関数

シングル WEDG による電極の成形時間の計算式は以下の通りである。

電極の総加工時間は荒加工時間と仕上げ加工時間の和であるから

$$T_S = T_R + T_F \quad (1)$$

ここで、

$$T_R = [(D_E^2 - D_R^2) \times \pi / 4 \times L] / V_R \quad (2)$$

$$T_F = [(D_R^2 - D_F^2) \times \pi / 4 \times L_f] / kV_R \quad (3)$$

である。

以上より、式(1)に式(2)、(3)を代入して、式(4)が得られる。

$$T_S = [L \times (D_E^2 - D_R^2) + (L_f / k) \times (D_R^2 - D_F^2)] \times \pi / 4 V_R \quad (4)$$

(2) ツイン WEDG 加工システムの加工時間

ツイン WEDG 加工システムでは、最初に荒加工だけを行い、成形された電極の長さが 300 μm を超えたところで仕上げ加工を開始し、以降荒加工と仕上げ加工を同時に行う。

ツイン WEDG による総加工時間 T_T は初期の荒加工だけの時間と同時加工の時間の和であるから、

$$T_T = T_R + T_{RF} \quad (5)$$

T_R : ツイン WEDG 加工システムによる初期の荒加工のみの時間 [s]

T_{RF} : 荒加工と仕上げ加工を同時に行う時間 [s]

L_d : WEDG A と WEDG B の距離 [μm]

他はシングル WEDG の場合と同じとする。

ここで、

$$T_R = [(D_E^2 - D_R^2) \times \pi / 4 \times L_d] / V_R \quad (6)$$

である。

式(6)を整理して、式(7)が得られる。

$$T_R = [(D_E^2 - D_R^2) \times L_d \times \pi / 4 V_R] \quad (7)$$

一方、荒加工と仕上げ加工を同時に行う場合、荒加工時間と仕上げ加工時間のうち、加工時間の長い方が総加工時間となる。

故に、

$$T_{RF} = \text{MAX} [(D_E^2 - D_R^2) \times \pi \times (L - L_d) / 4V_R, \\ (D_R^2 - D_F^2) \times \pi \times (L - L_d) / 4kV_R] \quad (8)$$

式(8)整理して、式(9)が得られる。

$$T_{RF} = \pi \times (L - L_d) / 4V_R \text{ MAX} [(D_E^2 - D_R^2), \\ (D_R^2 - D_F^2) / k] \quad (9)$$

以上より、ツイン WEDG 加工システムの電極成形時間は式(5)に式(7)と式(9)を代入して、

$$T_T = T_R + T_{RF} = [(D_E^2 - D_R^2)] \times (L_d \times \pi / 4V_R) + \\ \pi \times (L - L_d) / 4V_R \text{ MAX} [(D_E^2 - D_R^2), (D_R^2 - D_F^2) / k] \quad (10)$$

となる。

ツイン WEDG 加工システムとシングル WEDG との電極成形時間の比率を α とする。 α は次の式で表わす。

$$\alpha = T_T / T_S \quad (11)$$

式(11)に式(4)と式(10)を代入し、式(12)が得られる。

$$\alpha = \{ L_d(D_E^2 - D_R^2) + (L - L_d) \text{ MAX} [(D_E^2 - D_R^2), \\ (D_R^2 - D_F^2) / k] \} / \{ [L(D_E^2 - D_R^2) + L_f(D_R^2 - D_F^2) / k] \} \quad (12)$$

電極長さ L を 1 mm 設定した場合、

$$L = 1000 \quad (13)$$

また、電極長さが $300 \mu\text{m}$ を超えたところで仕上げ加工を開始するため、

$$L_d = 300 \quad (14)$$

シングル WEDG と同じ仕上げ長さで比較するため、

$$L_f = 700 \quad (15)$$

以上よりシングル WEDG とツイン WEDG 加工システムの時間比率 α は式(12)に式(13)、式(14)、式(15)を代入して

$$\alpha = \{ 300(D_E^2 - D_R^2) + 700 \text{ MAX} [(D_E^2 - D_R^2), \\ (D_R^2 - D_F^2) / k] \} / \{ [1000(D_E^2 - D_R^2) + 700 \\ (D_R^2 - D_F^2) / k] \} \quad (16)$$

となる。

(3) 荒加工速度と仕上げ加工速度との比率 k の求め方

式(16)から分かるように、 k の値を求めることにより、シングル WEDG とツイン WEDG 加工システムの時間比率 α が得られる。 k の値を放電理論から求めるには、影響因素が多く存在するため、非常に困難である。影響因素として

は、コンデンサ容量、加工液、電極材料、荒加工径、機械浮遊容量などが考えられる。そこで、放電理論から導き出すのではなく、実際の実験から k の値（荒加工速度と仕上げ加工速度の比率）を求めることにする。

図 14 は実験から得られた荒加工径と k の関係図である。仕上げ径は $80 \mu\text{m}$ 、 $40 \mu\text{m}$ である。荒加工径が大きくなると k が急激に増大する。 k の値に基づいて、 α の値が容易な計算で求められ、ツイン WEDG システムと従来のシングル WEDG との電極成形時間の比率が分かる。

図 14 から得られた k の値を式(14)に代入し、 α の値が分かる。電極素材が $\phi 300 \mu\text{m}$ タングステン、荒加工径がおおよそ $100 \mu\text{m}$ 、仕上げ径が約 $80 \mu\text{m}$ を設定すると、 k の値はおおよそ 0.04 になる。従って、式(14)から、 α の値は約 51% になり、ツイン WEDG 加工システムはシングル WEDG より、加工時間は約 49% 短縮している。この計算結果は前節での 10 回繰り返し実験結果とほぼ一致している。

Fig.14 Relationship between parameter K and diameter of rough machining

6. 結論

ツイン WEDG の加工システムにより電極成形方式を提案し、加工特性および実用性について検討を行った。得られた結果は、以下の通りである。

(1) ツイン WEDG 加工システムにより荒加工

と仕上げ加工を両方同時に加工できることを確認した。シングル WEDG と比べて、同様に真直度がよい細長い電極を加工することができる。

(2) 仕上加工径 $80\text{ }\mu\text{m}$ のタングステン電極を加工する場合は、荒加工径を約 $97\text{ }\mu\text{m}$ に設定すると、加工効率が大きく、シングル WEDG より 48% の時間短縮が得られた。

(3) 仕上加工径 $40\text{ }\mu\text{m}$ の場合は、荒加工径を約 $50\text{ }\mu\text{m}$ に設定すると、仕上げ加工径 $80\text{ }\mu\text{m}$ の場合と同程度の効果がある。

(4) 微細放電加工に電極材料としてよく使用される超硬合金、タングステンなどの材料の実験結果はほぼ同じである。

(5) シングル WEDG の実験データをもとにした計算と分析から、ツイン WEDG 加工システムはシングル WEDG より電極の成形時間をおおよそ 48% 短縮できることが示された。これは、実際の実験結果とほぼ一致している。

謝辞

本研究の一部は、平成 12 年度笹川科学研究助成金の支援で行いました。記して感謝申し上げます

参考文献

- 1) D.Y.SHEU, T.Masuzawa and M.Fujino: Machining of deep Microholes by EDM ICPE'97 TAIPEI TAIWAN 593-596
- 2) 塚本純一、増沢隆久、藤野正俊：放電による微細深穴加工 昭和 63 年精密工学会春季大会学術講演会論文集
- 3) 許東亞、増沢隆久：放電による微細深穴加工の研究—ジャンプフラッシング機能の応用—電気加工学会全国大会 (1997)
- 4) T.Masuzawa, M.Fujino : Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-machining Annals of the CIRP Vol.34/1/1985

(2000 年 8 月 17 日受付)