微細放電加工*

増沢隆久**

Micro EDM / Takahisa MASUZAWA

Key words: micro EDM, WEDG, micropunching, micromilling, micropipe, microhole, microelectrode, microspindle, irregularly shaped hole

1. はじめに

放電加工は切削や研削と同じように工具形状とその軌跡を工作物に写し込んでいく加工法である。このタイプの加工法の中で放電加工が際立って特異である点の一つは加工単位（単位除去現象に基づく除去量）が主として電気的な諸量によって決まることである。平たく言うと、加工面の粗さが装置の構造や動作とは関係なく、加工電源から与える放電パルスによって決まってくる。そして、電気的な諸量は現在にあって広範囲に変化させることの最も容易な物理量と言えよう。そのせいもあって、放電加工によれば極めて小さな切込みを、放電パルスエネルギーを小さくする、つまり、放電パルスの電流値とパルス幅を小さくすることによって容易に実現できるし、このことは、放電加工が微細加工への適性を備えていることを明らかに示している。

もう一つの放電加工の特徴に、加工力が小さいことが挙げられる。これは放電加工の原理として、除去作用は溶融体になされるためである。この特徴は工具に対する力学的負担を軽減する意味で、微細工具が必須である微細加工においての大きな利点である。

このように、放電加工は本来微細加工への適性があり、かなり以前からいくつかの加工例も発表されてきている¹⁾²⁾。しかし、需要との関係、電極作成等の生産技術面の不備などのため、普及は遅いペースで進行してきた。近年になって各種機器、部品、金型等のマ

イクロ化が急速に進み需要が急増したことで、電極作成技術の整備により、再現性の良い加工が可能となったことにより、実用的な加工法としての地歩が固まりつつある。本稿では主としてこの実用化のキーテクノロジーとなった電極作成技術と、それを中心とした応用技術について概説する。

2. 新しい電極作成技術—WEDG^{ウエッジ}

2.1 従来の電極作成法

微細な穴加工のための電極を準備する方法としては、次の二つが主に行われてきた。

- (1) 線引きにより得られた細線を加熱伸展等により真直ぐになるように矯正し、放電加工機に取り付ける。
- (2) 切削、研削等により作成した電極（極く細かい場合は、シャンク部を設けたもの）を放電加工機に取り付ける。

しかしながら、両手法とも加工機への取り付け時の垂直出し、芯出しが難しく、精度、再現性、技能依存性など、問題が多かった。また、(2)では矯正が省ける反面、製作可能な電極径は実用上 50 μm 程度が限界であった。

上のような手法の電極取り付け時の精度低下を避けるための方法としては、あらかじめ放電加工機のヘッドに取り付けた電極の素材を、同一機上で成形し、そのまま電極として用いる、いわゆる逆放電法がある。これは図1のように、ブロック状の金属を成形用電極として用い、ヘッドに取り付けた電極素材を穴加工時とは逆の極性で放電加工することによって微細電極に成形する方法である。この方法では電極の垂直出し、芯

* 原稿受付 平成3年3月20日

** 正会員 東京大学生産技術研究所（東京都港区六本木7-22-1）

図1 逆放電による電極成形法

図2 ワイヤ放電研削法 (WEDG)

出しの問題は解決する。また、最小径 $15\mu\text{m}$ 程度まで加工可能である。しかし、電極の精度については問題が多い。それは、この方法がブロックの面を転写する放電加工であるため、ブロックの形状、姿勢、ブロック電極の消耗などのため精度や再現性が低下する。従って逆放電法においても作業者の熟練技術に負うところが大きい。

2.2 WEDG³⁾⁴⁾

ブロック電極を用いた逆放電法の欠点を全面的に解消する方法として最近登場したのが WEDG (ワイヤ放電研削, Wire Electrodischarge Grinding, 略称ウェッジ) 法である。これは図2に示すように、逆放電法におけるブロック電極を、ワイヤガイドとその縁を滑行する金属ワイヤで置き換えたものである。ワイヤはブロック面と異なり電極軸方向の直線形状を持たないので、電極素材を軸方向に送り込むことにより円筒形状を生成する。

上の加工原理から、WEDG は次のような特徴を持つ。

- (1) ワイヤは点加工工具として働くので、形状は工具軌跡のみにより生成される。従って加工精度はワイヤガイドと電極素材を駆動 (位置決め) する NC 装置の精度によりほぼ決まり、作業者の

図3 WEDGにより加工した微細形状例

技能とは無関係となる。

- (2) 工具 (ワイヤ) の消耗を考慮する必要がない。
- (3) 放電間隙が小さくなり、その変動の影響が少ないので、より細い電極も加工可能となる。
- (4) 加工可能な形状の範囲が広く、しかもすべて自動的に行うことができる。

WEDG の欠点は、ブロック電極を用いた場合のように電極の全長にわたる同時加工を行うことができないので、加工に時間がかかることである。しかし、荒加工、仕上加工を組み合わせた形での自動化が可能なので、電極作成の総所要時間では必ずしも不利にはならない。

図3に、WEDG によるいくつかの成形例を示す⁵⁾⁶⁾。このように、円柱はもちろん、テーパのあるもの、円すい、角柱、ねじれ形状など、多様な形状を得ることができる。最も単純な円柱の加工は1軸のみの NC 機能があれば加工可能である。またねじれ形状では直線2軸と回転1軸の3軸 NC 制御が必要である。

加工精度は上述のように NC 装置の精度が支配的であり、 $0.5\mu\text{m}$ 程度のものが得られている⁷⁾。WEDG により作成した電極による穴加工では、穴径の繰返し精度として標準偏差 $\sigma=0.2\mu\text{m}$ を得た例が報告されている (電極作成も繰り返した場合)⁸⁾。

加工時間の一例を挙げると、タングステン棒を元径 $40\mu\text{m}$ 、仕上がり径 $30\mu\text{m}$ 、加工長さ $300\mu\text{m}$ で仕上条件で加工するのに約2分かかっている⁷⁾。

最小直径としては $2.5\mu\text{m}$ (超硬合金) が報告されている⁹⁾ が、実用的には今のところ $5\mu\text{m}$ 程度までで

図4 丸棒電極による微細スリット加工例 (10 μm 厚ステンレス, スリット幅 11.5 μm)

ある¹⁰⁾。

加工できる電極長さについては原理上の制約はない。つまり、素材の送り込み量で長さが決まるので、いくらでも長い電極を作成することが可能である。実際には素材の残留応力の開放や、新たに生ずる表面の残留応力などにより生ずる曲がりなどがどこまで許容できるかで限界長さが決まる。後述のパイプ作成用のコア電極を成形した例では、直径約 100 μm で長さ約 3 mm のものが報告されている¹¹⁾。

3. 微細放電加工とその応用技術

3.1 各種形状の微細放電加工

最も単純な応用は、電極形状をそのまま転写するもので、いわゆる形彫り放電加工の基本的な形をそのまま微細加工に適用したものである。前述の各種の方法によって用意した電極の形状転写によって微細な穴やキャビティを加工することができる。丸穴の場合は電極を回転させて真円度を高めることができ、再現性の良い高精度加工が可能である⁸⁾。加工液として純度の高い水を用いるとアスペクト比 10 以上の深穴を加工することもできる¹²⁾。また、WEDG により種々の形状の電極が作成できるので、丸穴のみならず四角、三角等の穴も加工できる。

放電加工では電極の位置を順次ずらしたり、電極を変換したりして重ね合わせた形状を加工することができる¹³⁾。図4に示すのは丸棒電極を 1 μm ピッチで移して順次貫通加工を行なうことで生成した微細幅スリットの加工例である。

本号の別稿(金子・土屋：単純形状電極による創成放電加工)で述べられているような単純電極を用いた NC フライス式の三次元形状加工を微細加工に適用することもできる。この場合 WEDG を単純電極の作成、修正、再成形などに適用でき、フレキシビリティが高い。WEDG 機能を持つ微細加工装置により、マイクロエアータービンのロータなどの三次元形状を加工

図5 EDM, WEDG を応用したマイクロ打抜き加工システムの工程

図6 異形断面穴打抜き加工例 (50 μm 厚ポリイミドシート)

した例が報告されている¹⁴⁾。

3.2 マイクロ打抜きへの応用

打抜きによる微細穴加工は、生産性や、材料の導電性が不要などの点で放電加工より優れた面があるが、ダイセットの作成が難しい。微細放電加工技術をこのダイセット作成過程に導入すると、容易にマイクロ打抜きを実現することができる^{15)~18)}。

図5に WEDG を併用した放電加工の導入によるマイクロ打抜きシステムの工程を示す。工程は4段階から成り、ダイ加工用電極作成とパンチ成形に WEDG が、ダイ加工に EDM が利用されている。このシステムではダイセットの作成開始から実際に打ち抜くまでの時間が1時間程度と、一般の金型作成からは考えられないほど短いリードタイムにすることができる。また、パンチの再研磨も工程(c)に戻るだけでよく、数分間で完了する。図6にこの方法によりポリイミドシートに打抜きを行った例を示す。このように、異形穴の打抜きも可能である。

3.3 マイクロエンドミル加工

図7 WEDGで成形した工具によるマイクロエンドミル加工例

図8 放電加工と電鍍の組合せによるマイクロパイプ加工法

WEDGによりフラットエンドミルを作成し、それによって溝加工を行うことができる。図7はこうにしてアクリル板上に溝幅 $50\mu\text{m}$ の文字パターンを加工した例である。工具材料は超硬合金で、最初にドリル形状に成形し、各文字ごとにイニシャルホールを加工した後、エンドミルに成形しなおして溝加工を行っている¹⁹⁾。

3.4 マイクロパイプの作成

WEDGと電鍍を組み合わせることにより、内外径の寸法、形状の管理された精密なマイクロパイプを作成することができる¹¹⁾²⁰⁾。図8に示すのはその工程図である。最初にパイプの内側形状に相当するコアをWEDGにより作成し、電鍍後外形もWEDGにより成形し、最後にコアを引き抜く。電鍍を用いるので材質に制限があり、また処理時間がやや長いが、形状の自由度が大きく、管理された寸法で自動生産できるの

図9 マイクロパイプ加工例

が特長である。この方法により作成されたニッケルのパイプ（ノズル形状）の一例を図9に示す。

4. む す び

他の応用分野においてと同様に微細加工の分野でも放電加工は技術的に大きく発展し、サブミリ領域の微細加工において現在最も有力な精密加工法の一つとなっている。本稿ではその基盤技術および他の加工法との組合せによる高度な加工技術の代表的なものをいくつか紹介した。今後さらに精度、生産性の向上、あるいは専用加工機、複合加工機といった形で、基礎的にも、応用面でも、一層の発展が期待される。

参 考 文 献

- 1) ベ・イ・スタビツキー (久保田 護訳)：真空管等の精密部品の放電製作，第43回放電加工研究会資料 (1)，(1966) 37-91.
- 2) 倉藤尚雄，増沢隆久：超硬合金の放電による微細加工，電気加工学会誌，2, 3 (1968) 1.
- 3) T. Masuzawa & M. Fujino：Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining, Ann. CIRP, 34, 1, (1985) 431.
- 4) 増沢隆久，藤野正俊：ワイヤ放電研削による細軸加工とその応用，生産研究，37, 11 (1985) 441.
- 5) T. Masuzawa, M. Fujino, K. Kobayashi, T. Suzuki & H. Fujii：Wire Electro-discharge Grinding System for Machining Very Fine Rods, Proc. Computer-Aided Production Engineering, Edinburgh, (1986) 247.
- 6) T. Masuzawa & M. Fujino：A Process for Manufacturing Very Fine Pin Tools, SME Tech. Paper, MS 90-307, (1990) 1.
- 7) 増沢隆久，藤野正俊，小林一也：マイクロ放電加工の高精度化 (第1報)，昭和59年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1984) 359.
- 8) 若林公宏，大西章夫，増沢隆久：マイクロ放電加工による微細多数穴加工，1989年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1989) 507.
- 9) 増沢隆久：放電マイクロ加工の研究——走行ワイヤによる細軸加工，昭和61年度科学研究費補助金一般研究B研究成果報告書 60460087 (1987).
- 10) 微細放電加工機カタログ，松下技研(株)，(1988).
- 11) C.-L. Kuo, T. Masuzawa & M. Fujino：A Micropipe Fabrication Process, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, (1991) 80.
- 12) 増沢隆久，郭 佳龍，藤野正俊：微細深穴放電加工，電気加工技術，14, 44 (1990) 1.
- 13) 増沢隆久：ワイヤ放電研削による微細工具の加工，塑性と加工，29, 335 (1988) 1275.
- 14) T. Masaki, K. Kawata & T. Masuzawa：Micro Electro-Discharge Machining and Its Applications, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, (1990) 21.
- 15) T. Masuzawa, M. Yamamoto & M. Fujino：A Micropunching System using Wire-EDG and EDM, Proc. Int. Symp. Electro-Machining (ISEM-9), (1989).
- 16) 山本正樹，増沢隆久，藤野正俊：ワイヤ放電研削を利用したマイクロ打抜き加工，昭和61年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1986) 721.
- 17) 山本正樹，増沢隆久，藤野正俊：ワイヤ放電研削を利用したマイクロ打抜き加工，昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1987) 733.
- 18) K. Wakabayashi, A. Onishi & T. Masuzawa：Micropiercing on Stainless Steel, Bull. Japan Soc. Prec. Eng., 24, 4, (1990) 277.
- 19) 佐藤建志，増沢隆久，藤野正俊，大西幸夫：WEDGのマイクロドリル・エンドミルへの応用，1989年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1989) 1091.
- 20) 郭 佳龍，増沢隆久，藤野正俊：マイクロパイプの作成 (第1報)，1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1991) 441.