三角形断面電極による微細複雑形状放電加工法*

岡田 晃** 岡本康寛** 宇野義幸** 渡部晃次*** 田中英登† 岡田三郎††

A New Micro EDM Technique for Fine Complicated Hole with Triangular Section Electrode

Akira OKADA, Yasuhiro OKAMOTO, Yoshiyuki UNO, Koji WATANABE, Hidetou TANAKA and Saburo OKADA

In EDM process, material removal is performed by repetitious generation of a micro crater produced by a single discharge, and the machining force acting on tool electrode and workpiece can be reduced by controlling electrical discharge energy. Therefore, EDM is particularly effective method in micro machining. However, in die-sinking EDM process, it becomes more difficult to make a fine complicated shape electrode when its size becomes smaller, and it takes a lot of time to form the electrode, which makes the process inefficient. On the other hand, in the case of wire EDM, the corner of machined hole becomes round, since the wire electrode has round section. Furthermore, in the case of thinner wire electrode, it is not easy to handle the wire. From the above points of view, a new micro EDM technique for machining various fine complicated shape holes with a simple shape electrode is proposed. In this method, a slender electrode with triangular section, which was made by extrusion with fine precision die, is efficiently used. Experimental analysis made it clear that fine hole could be machined efficiently with the electrode. Various fine complicated shape holes could be obtained easily by combining machined holes with a triangular section electrode. It was also made clear that smaller corner radius shape could be machined with the electrode, which was reformed on the machine using the reverse discharge method.

Key words : micro EDM, fine complicated hole, triangular section electrode, micro extrusion, fine precision die

1. 緒 言

放電加工では、材料除去が個々に独立した短時間の放電現象（単発放電）にともなう工作物の溶融の連続によって行われるため、電極および工作物に作用する加工力が極めて小さい。また、加工電源から与えられる放電パルスエネルギーによって単発放電の除去量を制御できるため、微小量単位の加工が可能である。さらに加工形状は微小間隙を隔てて電極形状が反転転写された形状となる。これらの特徴から微細複雑加工に適しており、化繊ノズルやエンジン用燃料噴射ノズルなどに広く応用されている^{1)~3)}。化繊ノズルの穴加工においては、機械加工等で電極製作が可能な形状ならばマイクロ型彫り放電加工、電極の製作が不可能な形状ならばワイヤ放電加工というように、それぞれの特徴を生かして使い分けられている。しかしながら、型彫り放電加工においては、電極の製作工程まで考慮すると必ずしも能率が良いとは言えない。また、ワイヤ放電加工においてはワイヤ径に相当する角部の丸みが不可避であり、これを避けようとしてワイヤ径を小さくした場合にはワイヤの取扱いが困難になるなどの問題がある。

そこで本研究では、断面が三角形の細長い棒状電極を精密ダイスにより効率的に作製し、様々な複雑形状をこの1種類の電極で得られる形状を組み合わせるという加工法を提案し、その可能性について実験的検討を行った。

2. 電極作製法

型彫り放電加工において微細加工を行う場合、電極の形状がそのまま被加工物に転写されるために、微細形状加工の可否は電極の作製の可能性に左右される。こうした微細電極の作製方法には切削加工で所要の形状を得る方法や、加工機上で成形用ブロックを用いて放電加工の逆極性加工を利用して作製する逆放電法がある⁴⁾⁵⁾。また、最近ではブロックの代わりに走行ワイヤを用いるワイヤ放電研削法（WEDG法）⁶⁾も提唱されている。しかしながら、これらの方法では、電極の作製に時間を要することや、電極として使用できる部分の長さが短いといった問題があり、能率的であるとは言えない。

そこで本研究では微細な三角形断面形状電極を押出し成形法によって作製し、その加工形状を組み合わせることにより様々な複雑微細形状を能率的に創成する加工法を提案する。図1は本研究に用いた細長三角形断面電極の押出し成形による作製法

Fig.1 Electrode making process by extrusion with fine precision die

* 原稿受付 平成10年8月3日

** 正 会 員 岡山大学工学部（岡山市津島中3-1-1）

*** 川崎重工業（株）（神戸市中央区東川崎町1-1-3）

†（株）化繊ノズル製作所（井原市東江原町祝部838）

†† 中国工業技術研究所（呉市広末広2-2-2）

Fig.2 Slender electrode with triangular section

Fig.3 Electrode holding equipment

を模式的に示す⁷⁾。まずはじめに、直角二等辺三角形の形状を有するダイスを微細ワイヤ放電加工およびその後の仕上げ加工で精密に作製する。次に押し出し成形により、その断面形状を持つ細長い電極を作製する。本研究で用いた押し出し成形は、コンテナと呼ばれる容器中に入れた材料に圧縮荷重を加えることにより、端部に設けたダイスを通して材料を流出させ、目的の断面形状をもつ製品を得る加工法であり、圧縮応力下での加工であるため材料破断の危険が小さく、押し出し比（素材の断面積と製品断面積の比）を大きくとることができるという特徴をもつ。また変形抵抗が小さい材料では冷間加工も可能である。本研究で電極材料として用いた銀は fcc 構造であり、一般に変形抵抗が少なく延性に富んでいるため、ダイス形状を忠実に転写することができる⁸⁾。以上の方法により一つのダイスから多くの電極を効率的に作製することができる。

図 2 に電極の外観を示す。電極全体の長さは約 150mm と非常に細長い形状になっている。電極の断面形状は直角を挟む二辺の長さが 280 μm の直角二等辺三角形である。このような断面形状を用いて様々な多角形の複雑形状を 1 本の電極により加工する場合、従来の創成放電加工で使用される円形や四角形の電極を用いるよりも所要の形状が容易に得られ、かつ 45° 以上の任意の角度もシャープに得られるという特徴を有する。

3. 実験方法

図 3 は電極保持部分の模式図である⁷⁾。図に示すように電極

Fig.4 Schematic diagram of micro EDM apparatus with RC-circuit

Table 1 Machining conditions

Electrode	Silver
Workpiece	Stainless steel SUS 304 (t=0.2mm)
Polarity	Electrode: (-)
Machining fluid	Deionized water ($\rho = 1.0 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$)
Open circuit voltage	V=120 - 210V
Condenser capacitance	Ca = 500 - 5000pF

は保持部と一体となっているパイプの中にあり、さらにそのパイプは電極心出し部をもつ外側のパイプにより支持されている。電極保持部には写真に示すように、電極と同一形状の孔が高精度加工によって設けてあり、電極は保持部との摩擦により保持される。そして電極送り出し棒により必要長さだけ送り出される。加工中に電極が消耗しても消耗長さ分だけ電極を下方へ送ることで電極を交換することなく、次の加工を行うことが可能である。図 4 は本研究に使用した RC 型精密放電加工装置の模式図である。電極は前図の電極保持部と電極自動送り出し機構によって設定量だけ送り出すことができる。工作物を X-Y テーブル上に固定し、外部コンピュータによって加工位置の制御を行う機構となっている。また電極の回転角度は分度器を Z 軸に取り付けて設定した。工作物には厚さ 0.2mm のオーステナイト系ステンレス SUS304 の薄板を用いた。加工液には脱イオン水を用い、極間へ約 650mL/min の流量でノズルによって噴出させた。主な加工条件を表 1 に示す。

4. 実験結果および考察

4.1 加工特性

まずはじめに、効率的で安定した加工が行えるように、1 回の貫通穴加工における最適加工条件を調べた。図 5 は加工電圧を変化させた場合の電極消耗率および加工時間を示す。加工時間は厚さ 0.2mm の工作物を貫通するのに要した時間としている。なお加工電圧 120V 未満の条件では放電が生じず加工が不可能であった。図より明らかなように、加工電圧 120V から 210V の間では、電極消耗率は加工電圧の増加にほぼ比例して大きくなり、210V の時、最高で約 110% の消耗になる。また加工時間については、120V の場合に約 40 秒と最も大きく、135V

Fig.5 Effect of open circuit voltage on electrode wear and machining time

Fig.6 Effect of condenser capacitance on electrode wear and machining time

以上の加工電圧では約 10 秒とほぼ一定の値になる。加工電圧 120V の場合には放電のエネルギーが小さいために加工粉の排出が良好に行われず、加工が不安定であったため加工時間が長かったものと考えられる。以上のことから本実験の範囲内では加工時間が短く、電極消耗の比較的小さい 135V が最適加工電圧と考えられる。

図 6 は加工電圧を 135V 一定としてコンデンサ容量を変化させた場合の電極消耗率および加工時間の変化を示す。電極消耗率はコンデンサ容量の増加とともに増加し、5000pF の場合には約 70% となる。一方加工時間はコンデンサ容量の増加とともに減少し、放電エネルギーが大きい 5000pF の場合には約 11 秒と短い。しかしながらこの場合には電極の消耗が大きくなるばかりでなく、加工面粗さが大きくなり、バリも発生することを確認している。そのため加工形状、加工時間および電極消耗率を合わせて考慮するとコンデンサ容量は 2200pF 程度が適当と考えられる。以上の解析によって以下の実験では加工電圧を 135V、コンデンサ容量を 2200pF と設定した。

4.2 複雑形状の加工

次に複雑形状の加工について検討を行った。1 回の加工で得られる形状を組み合わせる様々な複雑形状を加工する際には、異形穴の一边をつなげて直線を加工することが最も基本となる。そこでまず、直線形状の加工を試みた。

図 7 にその加工例を示す。まず三角形の穴をひとつ加工し、その位置から被加工物を直線方向と平行に 100 μ m 移動させて次の加工を行う。これを十数回繰り返す、長さ約 1.5mm の直線加工を行った。図より明らかなように、加工を組み合わせせた境

Fig.7 Machining of straight line

Fig.8 Examples of fine polygonal shape hole

目はほとんど確認できず、加工穴の組み合わせで直線加工が精度よく行えることがわかる。

次に数回の加工を組み合わせる多角形状穴の加工を試みた。図 8 に正五角形および正六角形の加工例を示す。図のハッチングを施した部分が 1 回の加工で得られる加工面積を示しており、この加工では電極断面の最長辺が多角形の一边に対応するように加工した。正五角形および正六角形は番号順にそれぞれ 72°, 60° ずつ回転させ、5 回および 6 回の加工を組み合わせるで得られる。写真に見られるように、比較的シャープな角部を持つ精度の良い異形穴の加工が可能であることがわかる。このような加工は、電極の回転中心位置と電極断面形状があらかじめわかっているならば、移動距離と回転角度を計算することで容易に可能であり、様々な複雑形状を効率的に加工できる。

4.3 修正電極による加工

これまでの実験で、1 本の単純形状の電極から様々な形状を加工できることが明らかとなった。しかしながら本研究で使用している電極は、ダイス穴形状が転写されるため、その作製段階で電極自体の角部に半径 25 μ m 程度の丸みがあり、加工穴の角部にはそれ以上の丸みが残る。これは押出しダイスをワイヤ放電加工により製作するために、最小でもワイヤ径の丸みが角部に残ってしまうためである。より精密な加工を行うには電極角部の丸みをできるだけ小さくすることが必要である。そこで電極を加工機上で修正し、角部の丸みを小さくすることを試みた。その修正方法を図 9 に示す。図に示すように、加工槽内に電極修正用の銅ブロックを設置し、電極修正部分と銅ブロッ

Fig.9 Reforming method of triangular section electrode

Fig.10 Reformed electrode and machined hole

クとの間に放電が生じるように位置決めを行う。そしてその位置でZ軸下向きに逆極性（電極：+）で加工を行う。コンデンサ放電回路を用いた加工では、陽極側の除去量が大きいため電極を容易に修正することができる。

図10 上部はこの修正方法で作製した電極とその加工穴のSEM写真であり、下半分は修正前の電極と加工穴を示す。両者を比較すると、修正によって半径約25 μ mの電極角部の丸みが半径約10 μ mまで小さくなっていることが確認される。またこれらによって加工された穴の角部の丸みも半径約30 μ mから半径約15 μ mと半分程度になり、よりシャープな角部が生成されることがわかる。

図11 は、修正電極を用いた組合せ加工穴の一例を示す。図は電極を120°ずつ回転させ、3回の加工を組み合わせることで正三角形の貫通穴を加工した場合を示す。修正により三角形の一辺は若干短くなっているが、角部の写真から明らかなように、2回の加工を組み合わせることで得た60°の角部では修正電極を用いた場合のほうが、未修正電極よりも鋭いことがわかる。

次にこの電極修正方法を利用し、45°以下の角度を成形する

Fig.11 Machining of equilateral triangular hole using reformed electrode

Fig.12 Machining of star-shape hole

ことを試みた。具体的には図12に示すような36°の最小先端角を持つ電極を作りだし、それを用いて星形の加工を行った。電極角部の半径は約10 μ mであり、この36°の先端角を外側に向けながら五角形と同様に72°ずつ回転させ、図のような複雑形状を加工した。写真からも確認できるように、加工穴の角部も十分にシャープである。この方法を用いることによって必要に応じて加工機上で電極を所要の形状に修正し、さらに様々な複雑形状の加工が可能であることが明らかとなった。

4.4 底付穴加工

これまで貫通穴について検討を行ってきたが、ここでは多角形状の底付穴加工を試みた。しかし底付穴加工の場合、電極の消耗によって電極角部に丸みが生じ、組み合わせ方によっては

Fig.13 Bottom surface of triangular hole machined with electrode oscillation

Fig.15 Sample of fine polygonal shape cavity (b)

Fig.14 Samples of fine polygonal shape cavity (a)

加工底面に段差が生じる。そこで加工底面を揺動加工することにより、底面の加工精度の向上をはかった。図 13 は揺動の有無による三角形形状の加工底面の違いを示す。図より確認できるように、揺動（揺動距離：100 μm 、揺動速度 4.9 cycle/s）を行った（b）の場合には加工底面の段差がきれいに除去されている。揺動の有効性が確認できたので、次に複雑形状の底付穴加工を試みた。図 14 はその加工例である。それぞれ図のハッチングを施した部分が 1 回の加工で得られる加工面積を示している。いずれの場合も加工深さは 150 μm である。正方形の場合、一辺は 500 μm であり、加工底面には水平方向に揺動をかけている。また正六角形は、電極の最長辺が六角形の一辺に対応するように、60° ずつ回転させ、加工形状の中心方向および辺方向に揺動をかけながら、深さ 150 μm の加工を行った。さらに図 15 は 3 段の底付穴加工例である。加工は正方形の組合せで行い、1 辺は外側から 900, 600, 300 μm となっている。1 段目および 2 段目の加工深さは、それぞれ 150, 300 μm となってお

り中央は貫通穴である。以上の加工結果より、揺動を行うことによって底面に段差のない底付穴も加工できることが確認できた。

5. 結 論

本研究では、直角二等辺三角形の断面を有する細長い電極を用いて、微細な複雑形状の貫通穴および底付穴を高効率に放電加工する方法について検討を行った。本研究で得られた主な結論は次のとおりである。

- (1) 押し出し成形加工によって異形断面の電極を効率的に作製することが可能である。
- (2) 直角二等辺三角形の断面形状を有する電極での加工を組み合わせるによって、微細複雑形状の貫通穴を効率的に加工できる。
- (3) 電極を加工機上で修正することによって、電極角部の丸みを小さくすることができ、より精密な加工が可能である。
- (4) XY ステージの揺動によって、底付穴の形状精度を向上させることができる。

参 考 文 献

- 1) 増沢隆久：マイクロ放電加工，電気加工学会誌，32，69（1998）56。
- 2) 武田幸三，海野文隆：放電加工による高アスペクト比の微細加工，電気加工技術，18，59（1994）15。
- 3) （社）日本工業技術振興協会：次世代の超精密加工技術，下巻，（1994）341。
- 4) 鈴木靖夫，江口嘉夫：微細精密放電加工の研究，昭和58年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集（1983）575。
- 5) 河田耕一，水谷 武，松下久登，佐藤健夫，丸山祐二：微小穴放電加工，昭和58年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集（1983）361。
- 6) 増沢隆久，藤野正俊：高精度微細軸加工の研究（第1報），電気加工学会誌，24，48（1991）14。
- 7) 戸川忠雄，山田嘉昭，妹尾典久，秀平正男，田中英登：高性能小型微細放電加工機の開発，1997年度精密工学会中国四国支部技術賞資料集（1997）1。
- 8) 川並高雄，関口秀夫，斎藤正美：基礎塑性加工学，森北出版（1995）69。