単純成形電極による三次元微細放電加工（第1報）

— シャープコーナキャビティの加工および電極消耗補正 —

余 祖元* 増沢隆久* 藤野正俊*

3D Micro-EDM with Simply Shaped Electrode (1st Report)

Zuyuan YU, Takahisa MASUZAWA and Masatoshi FUJINO

Abstract

In this paper, we present 3D micro-EDM with electrodes having simple square cross section. In order to maintain the original electrode shape, the machining conditions are set so that the bottom of the electrode is properly worn. The influence on the precision of the machined surface is analyzed by changing machining conditions such as tool path and number of cutting steps. Furthermore, the formula for tool wear compensation in 3D micro-EDM has been derived. As a result, square cavities with sharp corners could be machined. Inclined planes could also be machined by applying the compensation equation.

1. はじめに

放電加工による三次元形状の成形について、さまざまな方法が提案されている。電極形状から分類すると、総型電極法（転写加工法ともいえる）、ワイヤフレーム法¹⁾、単純形状電極法などである²⁾。加工精度に影響を与える要因のうち、最も大きいのは電極消耗による誤差である。特に微細放電加工では電極消耗が大きく総合電極による加工では形状くずれをおこしやすい。したがって、微細三次元形状の成形には単純形状の電極を使用することが有効である。今までに報告されている微細放電加工に使用された電極形状は主として円形（中空、中実）断面電極に限定されていた³⁾。しかし、エンドミルによる切削等と異なり、電気エネルギーによる金属除去作用を原理とする放電加工では、必要に応じて正方形や三角形の断面形状電極を用

いて異形断面形状も加工できる。一方、微細放電加工では電極消耗率が大いので、単純電極を用いた三次元形状加工における正確な形状の形成には適切な補正を行うことが必要である。本研究では、均一電極消耗法を提案し、断面形状が正方形の電極を用いてシャープコーナを持つ正方形キャビティと長方形の溝を加工し、いくつかの加工経路について加工精度も分析した。また斜面加工を例として電極消耗の補正方法についても検討した。

2. 均一電極消耗法

従来の形彫り放電加工においては、加工深さの増大に伴って電極先端の形状が図1(a)に示すように中心部から両側に行くに従って電極の長さが減ってしまう。特に、断面形状が正方形のような電極では円形電極と違って、シャープな稜線に加えて角部を持っている。放電加工する時、電極全体と比べてこれらのエッジ部分が消耗しやすいの

* 東京大学生産技術研究所

で、放電加工の進展に伴って電極の形状精度は悪化することになる。微細放電加工では電極消耗が大きくても、電極断面形状が維持できれば、すなわち、図1(b)に示すように電極の消耗が長さだけとすれば、正確な形状が加工できる。これを実現するため、微細放電加工における電極消耗が大きいことを利用して均一に電極底面を消耗させ、電極エッジ部の形状を維持するのが均一電極消耗法である。

理想的な均一電極消耗プロセスは図2のようにして実現される。まず、電極を垂直に所定量切込む(a)。この時、電極先端部の断面形状は側面から見ても進行方向から見ても角が少し丸みをおびる。次に電極を水平方向に送り溝を加工していくと(b)、電極の底面が消耗してゆき、最後には底面消耗により、加工深さはゼロとなるかわりに、電極先端部のシャープコーナはどちらの断面から見ても回復する。このような、切込みと水平送りを左右に繰り返せば、先端形状を維持しつつ、深い溝を加工していくことができる。ただし、この方法では基本的に水平面ではなく斜面が形成されるので、最終的にはその左右方向が複合された図3のような形状の底を持つ溝が加工されることになる。

以下、従来の形彫りでは精度の良い加工が難しいいくつかの形状のキャビティ加工について、均一電極消耗法を適用した結果について述べる。

3. 正方形キャビティ加工

まず、単純な形状として図4に示す正方形キャビティの加工を取り上げる。WEDG法で断面が $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ の電極を製作し¹⁾、それを用いて図5に示すように階層状に加工する。図6は層内での水平面内の加工経路で、これらの4種類の経路を順次適用して、電極底面の均一な消耗を実現する。表1は本実験での加工条件である。

ここで用いた加工経路は次の特徴を持っている。

- (1) 主に、電極底面で放電加工が行われる。
- (2) 往復スキニング加工となっている。

往復スキニング加工とは、電極を加工開始点

図1 通常の電極消耗と均一電極消耗

図2 理想的な均一電極消耗プロセス

図3 往復スキニングにより加工された溝底部形状

図4 正方形キャビティ

図5 階層状加工

図6 層内加工経路の略図

表1 加工条件

加工回路	RC回路
開放電圧	80V
コンデンサ容量	100pF
電極材料	超硬合金
工作物材料	SUS304

で工作物に一定量で切り込み、ある経路に沿って加工し、終点に到着すると、同じ切り込み量で、同じ経路に沿って逆方向に引き返して加工することである。図3の中の(A)と(B), (C)と(D)を一組として用いることで、これが実現できる。電極底面消耗過程は図2のようになる。電極が経路の開始点で形彫りと同じように一定の送り量で工作物に切り込み、同時に、電極の消耗が始まり、電極の陵線と角部が丸くなる。したがって、加工された工作物のコーナ部にも R がついている。電極をさらにスキニングすると、消耗により再び平坦な端面となる。

繰り返しスキニングする時は、形状が回復された電極底部の陵線と角部が、前層を加工する時にやや丸みのついたコーナ部を加工し、形状修正が行われる。

しかし、一方向だけで加工すると、電極の進行方向に対して前面および側面にややコーナ R が生じる。これにより図7(a)のように、加工面に条

図7 オーバーラップ加工の略図

図8 加工されたキャビティ

痕を生じる。これを解決するため、加工経路の移動距離を電極断面の一辺の長さより少し短くさせる。すなわち、図7(b)のようにオーバーラップ加工する。そうすると、加工残し部分が少なくなり、加工面あらさが改善されるだけでなく、電極底面に生じたコーナ R を減少させる効果もある。

電極が消耗によって少しずつ短くなり、一層加工が終わると、加工された平面は経路の開始点から終点へ傾いている。それを解決するため、1回往復スキニング加工が完了すると、主経路は横方向から縦方向に変換する。つまり、図3に示すようにA-Bの組合せとC-Dの組合せを交互に繰り返しながら、所望の深さまで加工を行う。最終加工された平面度は1回分の切込み深さ以内と考えられる。図8は加工されたキャビティの写真で、

図9 使用後の電極

図9は使用後の電極の写真である。

4. キャビティ底面の形状

加工経路、切り込み深さとオーバーラップ距離がどのように平面精度に影響を与えるかを調べるため、表2に示すような4種類の加工条件を設定した。それを利用して加工したキャビティの底面の測定結果を表3に示した。

測定結果からみると、もっとも精度に影響するのが加工経路であることが分かる。しかし、切り込みが深すぎると、消耗による電極底部の変形が起こり、一層加工が終了した時に電極底面が元の形状に回復できない。すなわち、電極底面を十分に

表2 加工条件

条件	図2の加工経路	切り込み深さ(μm)	オーバーラップ距離(μm)
1	(A),(B)の順番	1	40
2	(A),(B),(C),(D)の順番	1	40
3	(A),(B),(C),(D)の順番	1	30
4	(A),(B),(C),(D)の順番	0.5 (最後20μmの電極送り量)	40

表3 工作物底面の測定結果

条件	あらさ(Rz μm)
1	1.77
2	1.46
3	1.40
4	1.45

図10 溝の階層状加工

図11 層内の加工経路

消耗させないと、これによって加工されている平面精度に影響を及ぼす。切り込みが小さい場合には往復スキニング加工で電極底面の各部分を均一に消耗させることにより、放電消耗による電極の変形を回復しやすくし、底面形状を維持することができた。また、加工経路をオーバーラップする

ことにより、加工された平面の粗さを改善できることが確認できた。

5. 幅の狭い溝の加工
正方形キャビティ加工と同じく、断面が正方形の電極を用

いて図10に示すような幅の狭い溝の階層状加工を行った。

各層の加工経路は図11に示すように(a)→(b)を順番に繰り返して加工した。

この場合、電極をそのまま保持して加工していくと、進行方向に平行な稜線部分は消耗が多いので丸くなる。これを防ぐために、一層加工を完了

するごとに、電極を工作物の表面の上へ引き上げて90°ずつ回転することにした。そうすると、電極の底部を均一に消耗させ、シャープなエッジとコーナを持つ長方形の溝が加工できる。図12は加工した溝の写真である。

6. 斜面を持つキャビティの加工

まず、WEDG法で断面が $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ の電極を製作し、それを用いて図13に示すような水平断面が正方形で45°の壁面を持つキャビティを階層状に加工する。各層の加工は前に述べたような往復スキャンニング法、すなわち、図6に示すような

図12 長方形の溝

図13 階層状加工における電極送り

図14 無補正加工の場合のキャビティ断面

$A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ の順番に行った。図14は補正なしに $\Delta X = 0.4\mu\text{m}$ 、 $\Delta Z = 1\mu\text{m}$ として加工した場合の縦断面の写真である。

斜面を平面に加工する予定だったが、曲面に加工されている。理由としては、切り込み深さを一定とした場合、上層の加工面積の大きい部分では電極の消耗量が大きいため一層の加工深さが浅くなり、また下層では深くなるためである。

図15は一層の加工前後の略図である。これを単純化すると、図16に示すように、切り込み深さ(ΔZ)は L_w と L_e の二つの部分からなると考えることができる。 L_e が消耗した部分の長さで、 L_w は残った部分の長さである。すなわち、 L_w は加工された一層の平均の深さを示している。すると、次式が成り立つ。

$$L_w + L_e = \Delta Z \quad (1)$$

電極の体積消耗率は、

$$R = V_e / V_w \quad (2)$$

V_e = 電極の消耗体積

V_w = 工作物除去体積

図15 一層の加工前後の略図

図16 切り込み深さと電極消耗長さ、加工深さの関係

であるから、電極断面面積を S_e 、除去された工作物の面積を S_w とすると、式(2)は以下のように書き替えることができる。

$$R = S_e \cdot L_e / (S_w \cdot L_w) \quad (3)$$

式(1)と式(3)から、切り込み深さ ΔZ に対応する加工深さ L_w を求めると、

$$L_w = \Delta Z / (S_w \cdot R / S_e + 1) \quad (4)$$

となる。電極断面面積 S_e と電極消耗率 R の比を定数 C_1 、切り込み深さ ΔZ を定数 C_2 とすると、ある層 n の加工深さ L_{wn} は、その層の加工面積を S_{wn} とすれば

$$L_{wn} = C_2 / (C_1 \cdot S_{wn} + 1) \quad (5)$$

$$Z = \sum_{1}^n L_{wn} = \sum_{1}^n C_2 / (C_1 \cdot S_{wn} + 1) \quad (6)$$

となる。したがって、ある層 n まで加工された工作物の全深さ Z は次のように表される。

工作物縦断面の座標系を図17のようにとると、加工されているある層 n の面積は

$$S_{wn} = 4(X_0 - (n-1) \cdot \Delta X)^2 \quad (7)$$

と表せる。 X_0 は最上層(工作物上面)のキャビティ

図17 断面の座標系

図18 無補正として計算された壁面曲線

端の座標である。電極断面の一辺の長さ $50 \mu\text{m}$ 、切り込み深さ $C_2 = \Delta Z = 1 \mu\text{m}$ 、電極体積消耗率(他の実験による実測値) 0.112 、 ΔX を $0.2 \mu\text{m}$ とすると、これらのパラメータを式(6)に代入して計算した壁面曲線は図18のようになる。この曲線は図14に示された実加工による壁面の曲線の形状とよく一致している。

7. 補正方法

斜面を真直にするためには、 ΔX と L_w の関係を線形にしなければならない。他の条件が一定でも、電極消耗率は切り込み深さにより変化するが、切り込み深さの変動範囲が大きい場合はほぼ一定と考えられるので、各層の形状が正方形の場合、式(4)と式(7)から、ある層 n の実際の加工深さは次の式で表すことができる。

$$L_{wn} = \Delta Z / (C_1 \cdot 4(X_0 - (n-1) \cdot \Delta X)^2 + 1) \quad (8)$$

図19 切込み深さ補正を仮定したシミュレーションの結果

図20 切込み深さ補正を行った場合のキャビティの断面

各層の実際の加工深さが一定値 L_w となるようにするためには、式(8)より

$$\Delta Z = L_w \cdot (C_1 \cdot 4(X_0 - (n-1) \cdot \Delta X)^2 + 1) \quad (9)$$

となる。したがって、切り込み深さ ΔZ を式(9)により各層ごとに変化させれば、電極長さ消耗を補正して斜面の断面を直線に加工できるはずである。

図19は補正計算式によるシミュレーションの結果で、図20は実際に式(9)により補正しながら加工したキャビティの断面写真である。

8. まとめ

シャープなコーナを持つマイクロキャビティの加工法として、単純成形電極を用いる往復スキャンニング法を提案し、有効性を確認した。また、往復スキャンニング加工により斜面を持つキャビティ加工を行う場合の電極消耗補正法を示した。実際に正方形のろうと状キャビティを加工した結果、真直な斜面を得ることができた。この補正法を適用することで、曲面なども精度良く加工できる見

通しが得られた。なお、形状測定に関してご協力をいただいたレーザテック株式会社に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 今野・岡本・岸浪・斎藤：多軸NC放電加工機による形状創成加工法に関する研究（第2報）－ワイアフレーム電極による輪郭形状制御創成加工－，精密機械，50，8（1984），55
- 2) 土屋・金子・菅野：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，Vol.17，No.34（1984），1～12
- 3) 湯沢・真柄・後藤・今井・佐藤・千代：小径電極による微細輪郭放電加工，電気加工技術，Vol.19，No.63（1995），1～6
- 4) T.Masuzawa and M.Fujino: Wire Electro-discharge Grinding for Micro Machining, Annals of the CIRP, 34,1（1985）431
- 5) 真柄・湯沢・佐藤・千代：微細創成放電加工技術の開発，型技術，11，5，（1996）p.79～84
（1997年1月16日 受付）