

## 放電加工による微細キャビティの形成

Machining of Microcavities by EDM

余 祖 元\*・増 沢 隆 久\*

Zuyuan YU and Takahisa MASUZAWA

放電加工で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、微細放電加工の場合、電極消耗率が大きく、成形された電極形状が加工中に変化してしまう。単純形状の電極を用いると、この変形現象を単純化できるので、三次元形状の加工を高精度に行える可能性がある。本研究では、正確な形状を形成するため、電極消耗の問題を二つの部分に分けて解決した。これは電極先端形状を維持することと電極消耗を補正することである。本稿ではこれらについて紹介する。

## 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、総形電極法（転写加工法ともいえる）、ワイヤフレーム法<sup>1)</sup>、単純形状電極法などである<sup>2)</sup>。放電型彫り加工は通常は加工される形状と同じような電極（以下、総形電極という）を用いる一次的な転写加工である。電極消耗があるので、荒加工から仕上げ加工までいくつかの総形電極を用意しなければならない。またそれぞれの電極の寿命も短い。この問題の対策の一つとして、コンピュータ技術の導入による単純形状電極を用いた三次元形状放電加工の実用化が進められている<sup>3,4)</sup>。総形電極の方が加工スピードが速いが、単純形状電極は総形電極と比べて利点が多い。単純形状電極を使用する場合、総形電極を製作する費用、時間が節約できる。電極が移動しながら加工するため、加工屑や気泡を排出しやすい。集中放電への配慮があまり必要ない。電極の消耗過程は総形電極のと比較して把握しやすいなどである。

微細放電加工では電極消耗が大きく総形電極による加工では形状くずれをおこしやすい。従って、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。しかし、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電極先端部の形状を維持することと適切な補正を行うことが必要である。

本報告では、電極先端部の形状を維持するため、均一

\*東京大学生産技術研究所 第2部

電極消耗法を提案し、また切り込み深さと電極消耗長さ、加工深さの基本関係から微細放電加工における補正式を導き、これを利用していくつかの異なる縦断面のキャビティを加工した。これらについて総合的に報告する。

## 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。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であれば、正確な形状が加工できる。

均一電極消耗法は、微細放電加工における電極消耗が

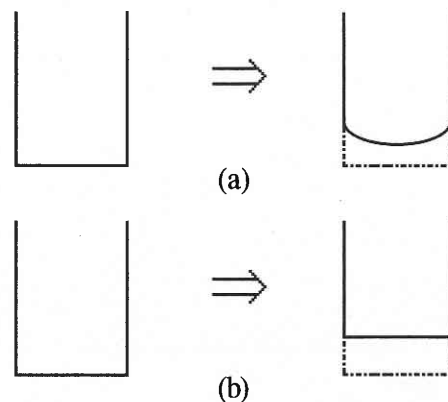


図1. 通常の電極消耗と均一電極消耗

大きいことを利用して均一に電極底面を消耗させ、一層の加工が完了した時に、電極底部形状が回復する手法である。これを実現するため、局部的ではなく全体的な考察が必要である。従って、工作物と電極の形状、加工パラメータ（電極消耗率や切込み深さなど）の選択、加工経路設計に注意しなければならない。以下に示すルールを守れば、電極先端部の形状を維持することができる。

(1) できる限り、電極底面で放電加工する。

微細三次元形状を加工する時、図2のような階層状に行う。切込み深さが大き過ぎると、電極が十分に消耗されない、また消耗により電極が変形しすぎて回復できない。

(2) 往復スキヤニング加工する。

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。往復スキヤニング加工とは、電極を加工開始点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。これだけではなく、一回往復スキヤ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一回分の切込み深さ以内と考えられる。

(3) オーバーラップ加工する。

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4(a)のように、加工面に条痕を生ずる。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4(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。

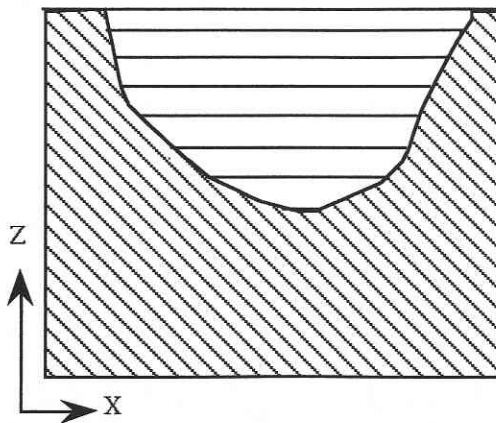


図2. 階層状加工

(4) 加工面の内部と周辺を交互に加工する。

図3の加工経路は加工面の内部と周辺を交互に加工する特徴を持っている。周辺を加工する時、電極エッジ部が消耗しやすいので、電極の先端は丸くなる。加工面の内部を加工する時、電極底面が全体に放電する。放電原理により、加工面に近いところで放電量が大きいので、電極の底面中心部は消耗量が大きく、底面形状は少し平坦になる。すなわち、丸くなった電極底部のエッジ部分がやや改善される。この場合、再び側面と底面の境を加工すると、工作物側につくRは小さくなる。つまり、加工面の内部と周辺を交互に加工すると、加工された加工面の精度を向上することができるだけでなく、一層加工後の電極形状を維持することもできる。

2.1. 正方形キャビティ加工

正方形キャビティは放電加工における代表的な形状である。まず、WEDG法で断面が正方形の電極を製作し<sup>5)</sup>、それを用いて図2に示すように階層状に加工する。図5は均一電極消耗法に基づいて設計した加工経路である。

電極底面消耗過程は図6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、電極の稜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

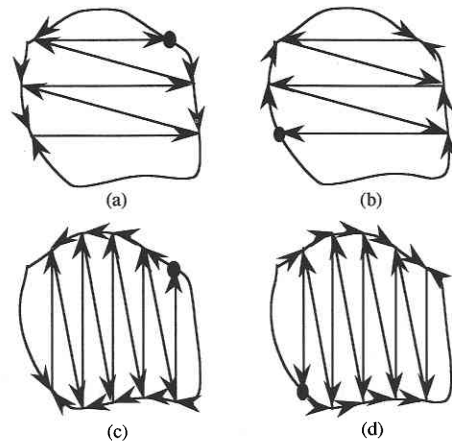


図3. 層内加工経路の略図

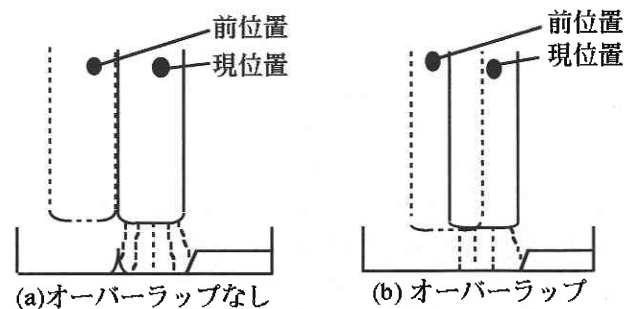


図4. オーバーラップ加工の略図

にも R がついている。電極をさらにスキヤニングすると、消耗により再び平坦な端面となる。繰り返しスキヤニングする時は、形状が回復された電極底部の稜線と角部が、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。

図7は加工した正方形キャビティの写真で、図8は加工後の電極の写真である。

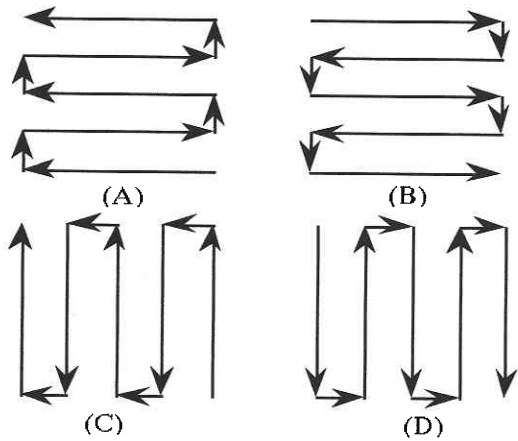


図5. 正方形の加工経路

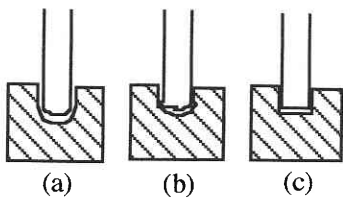
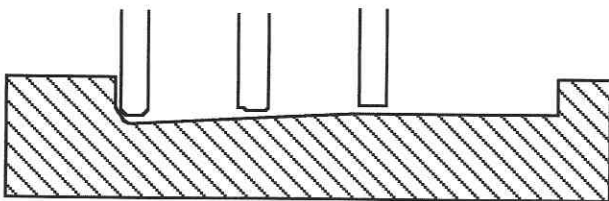


図6. 電極消耗プロセス

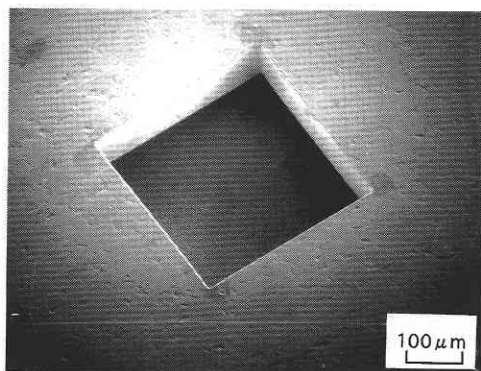


図7. 加工されたキャビティ

## 2.2. 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幅の狭い溝の階層状加工を行った。

各層の加工経路は図9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、電極を工作物の上方へ引き上げて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10は加工した溝の写真である。

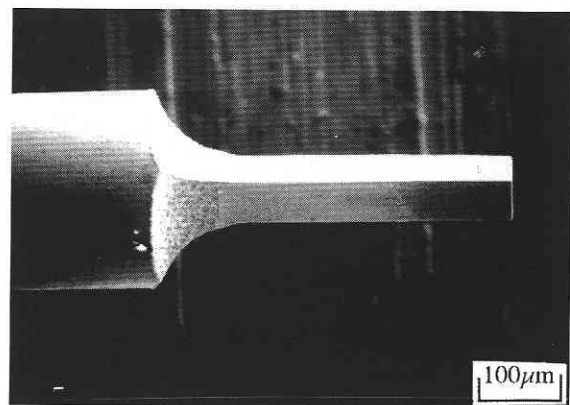


図8. 使用後の電極

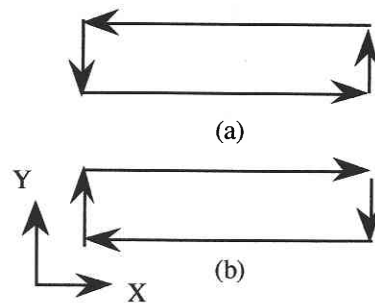


図9. 溝の加工経路

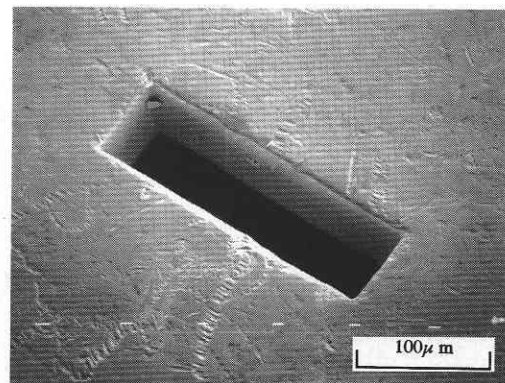


図10. 長方形の溝

3. 補 正 方 法

均一消耗法で加工後、電極先端形状を維持することができたが、三次元形状の成形に電極の長さの消耗がどのように影響するのか、まだ解明されていない。これを調べるために次の実験を行った。

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11に示すような斜面を持つ正方形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ミング法、すなわち、図5に示すような $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ の順番に行った。図12は無補正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13は一層の加工前後の略図である。これを単純化して図14に示す。切り込み深さ ( $\Delta Z$ ) 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。

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

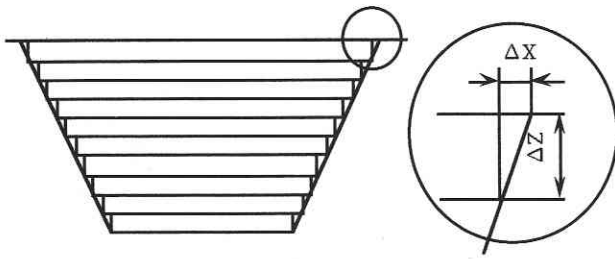


図 11. 階層状加工における電極送り

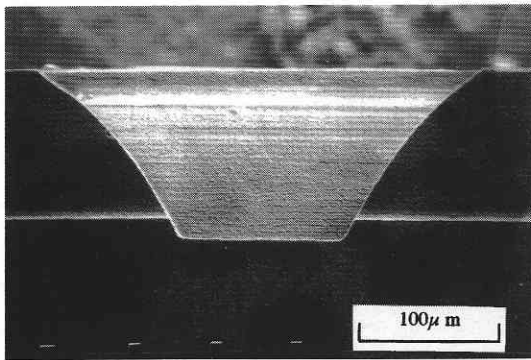


図 12. 無補正加工の場合のキャビティ断面

電極の体積消耗率  $R$  は、次式のようになる。

$$R = V_e / V_w = S_e \cdot L_e / (S_w \cdot L_w) \quad \dots\dots\dots(2)$$

- $V_e$  = 電極の消耗体積
- $V_w$  = 工作物除去体積
- $S_e$  = 電極断面面積
- $S_w$  = 工作物の面積

式 (1) と式 (2) から、切り込み深さ  $\Delta Z$  に対応する加工深さ  $L_w$  を求めると、

$$L_w = \Delta Z / (S_w \cdot R / S_e + 1) \quad \dots\dots\dots(3)$$

となる。これは切り込み深さ  $\Delta Z$  と工作物の面積  $S_w$ 、加工深さ  $L_w$  の基本関係式である。ある層  $n$  の加工深さを  $L_{wn}$ 、その層の加工面積を  $S_{wn}$  とすれば、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。

$$Z = \sum_1^n L_{wn} = \sum_1^n \Delta Z / (S_{wn} \cdot R / S_e + 1) \quad \dots\dots\dots(4)$$

工作物縦断面の座標系を図15のようにとると、加工されているある層  $n$  の面積は

$$S_{wn} = 4(X_0 - (n-1) \cdot \Delta X)^2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

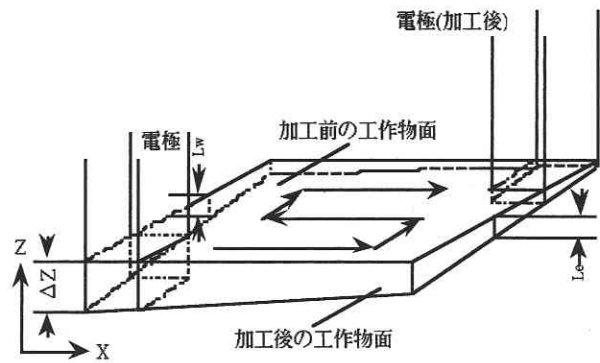


図 13. 一層の加工前後の略図

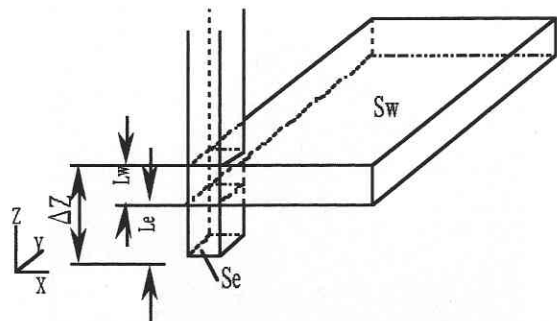


図 14. 切り込み深さと電極消耗長さ、加工深さの関係

と表せる。前実験のパラメータを式 (4) に代入して計算した壁面曲線は図 16 のようになる。この曲線は図 12 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。

式 (3) は加工面および電極断面の形状と関係がない。キャビティを加工する前、電極断面積  $S_e$  と体積消耗率  $R$  は既知のパラメータである。加工する時、 $\Delta Z$  を調整すれば、実際の加工深さを一定値に加工できる。これを制御による X テーブルの移動と組み合わせれば、任意縦断面形状が加工できると考えられる。

3.1. 角錐台状キャビティの加工

水平断面が正方形で  $45^\circ$  の壁面を持つキャビティを図 2 に示すような階層状に加工する場合、連続 4 層の加工は図 5 に示すような  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$  の順番に行う。斜面を真直にするためには、X テーブル位置の変化  $\Delta X$  と一層の平均加工深さ  $L_w$  の関係を線形にしなければならない。各層の切り込み深さ  $\Delta Z$  を調整することにより、図 17 に示すような角錐台状キャビティの加工ができた。

3.2. 円錐台状キャビティの加工

図 18 は均一電極消耗法による設計した円断面形状の加工経路である。補正方法は斜面を持つ正方形キャビティの加工と同じく、 $\Delta X$  を定数とすれば、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、切り込み深さ  $\Delta Z$  を式 (3) により各層ごとに变化させれば、電極長

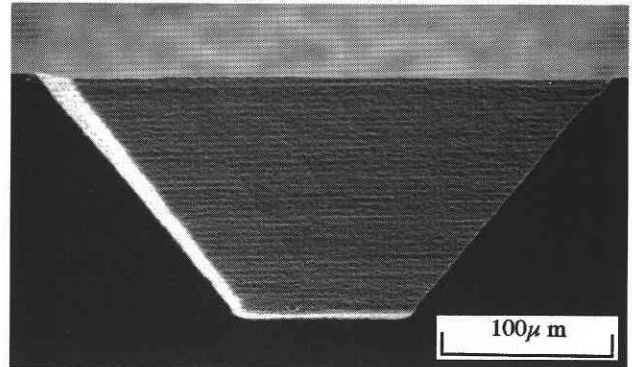


図 17. 角錐台状キャビティ

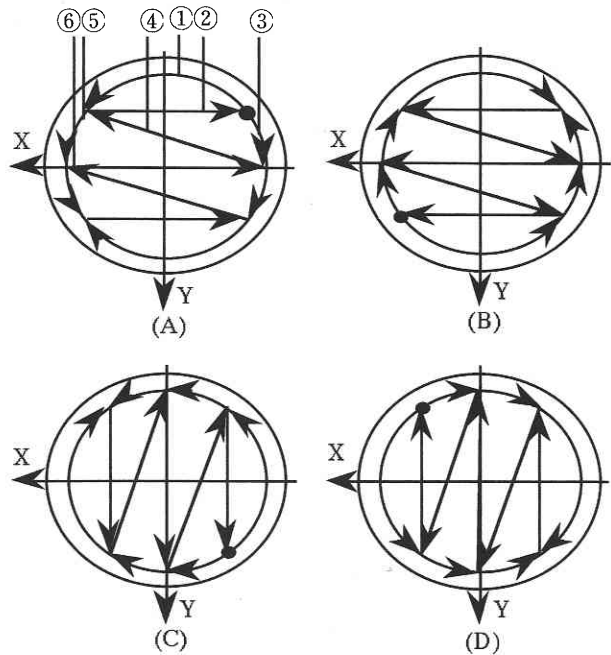


図 18. 円断面形状の加工経路

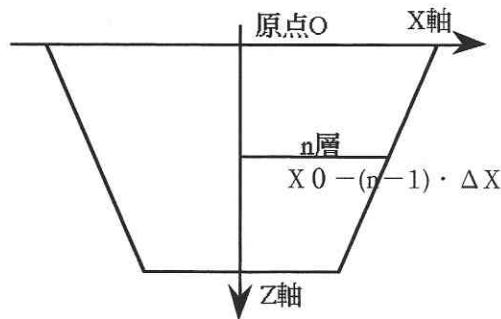


図 15. 断面の座標系

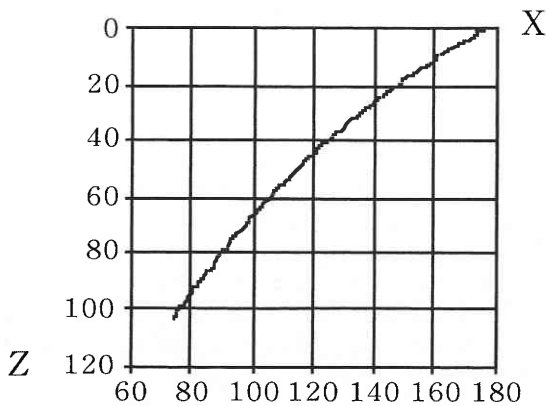


図 16. 無補正として計算された壁面曲線

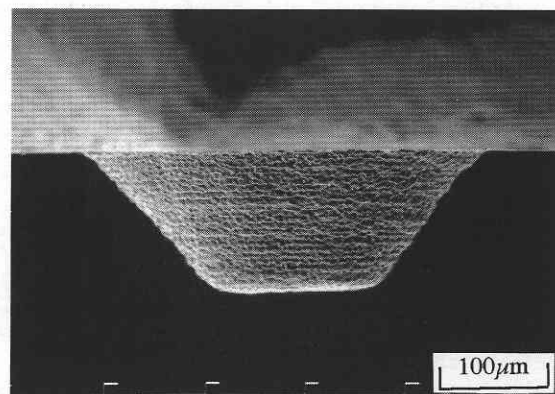


図 19. 加工した円錐台

さ消耗を補正してテーパ面を直線に加工できるはずである。図 19 は加工した円錐台の写真である。

3.3. 半球状キャビティの加工

半球面を加工する場合には、式 (6) を満足しなければならない。それを満足するために、各層の実際の加工深さが一定値  $L_w$  とする場合、 $Z_n$  ( $Z_n = L_w \cdot n$ ) を式 (6) に入れて  $X_n$  を求める。式 (3) により、 $\Delta Z$  を調整すれば、実際の加工深さを一定値に加工できるので、 $X$  テーブルを  $X_n$  に移動させれば、断面を半円の形状に加工できる。図 20 は加工した半球面の写真である。

$$X_n^2 + Z_n^2 = r^2 \dots\dots\dots (6)$$

( $r$  = 球面半径)

3.4 仕上げ加工

加工効率を向上するために、微細放電加工でも荒加工と仕上げ加工に分けるのが効果的である。仕上げ加工では荒加工した表面を除去するため、加工は輪郭加工になる。

均一消耗法を適用するには除去層の厚さは電極寸法の半分より大きくしなければならない。荒加工の粗さ分だけとすると、仕上げ加工に必要な電極が細くて長すぎる。加工する時、放電や気泡排出などによって生じた力が電極の先端に与えて電極の振動を引き起こしやすい。したがって、仕上げ加工用の電極の寸法を決める時、総合的に考えなければならない。

電極消耗の補正方法は荒加工する場合と同様で、ただ荒加工の電極消耗率を仕上げ加工の電極消耗率に、ある層  $n$  の面積をその層の輪形の面積に変更するだけで、精度良く加工できる。図 21 は仕上げ加工後の円錐台面の写真で、図 22 は仕上げ加工後の半球面の写真である。

4. 結 論

電極均一消耗法により設計した経路を用いていくつか

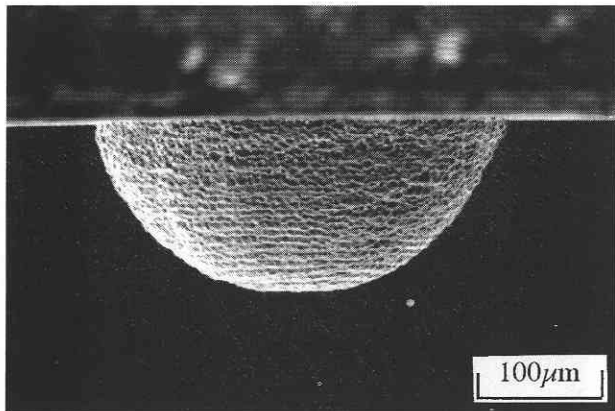


図 20. 加工した半球面

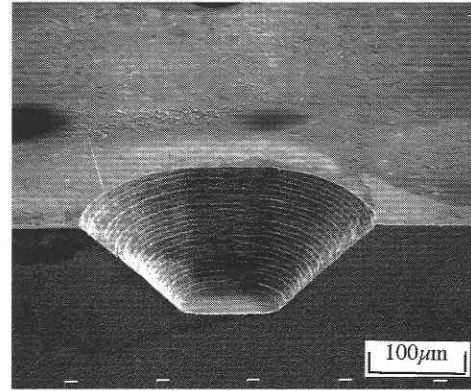


図 21. 仕上げ加工後の円錐台面

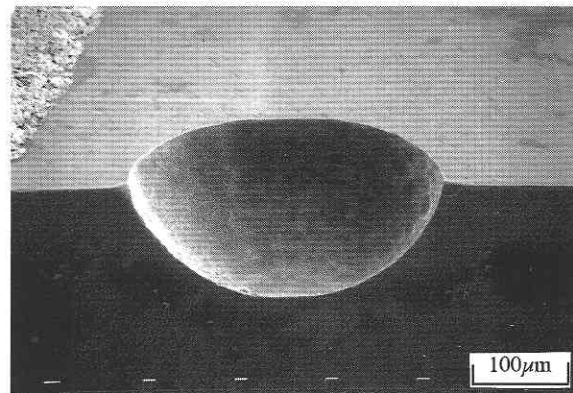


図 22. 仕上げ加工後の半球面

のマイクロキャビティを加工した。電極先端部の形状が維持できたことから、電極均一消耗法の有効性を確認した。さらに、微細放電加工における電極消耗補正法を示した。電極均一消耗法とこの補正法を適用することで、任意な曲面なども精度良く加工できる見通しが得られた。

(1997年6月10日受理)

参 考 文 献

- 1) 今野廣・岡本隆司・岸浪建史・斎藤勝政：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，Vol. 17, No 34 (1984), 1～12.
- 3) 湯沢隆・真柄卓柄・後藤昭弘・今井祥人・佐藤達志・千代知子：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) 真柄卓柄・湯沢隆・佐藤達志・千代知子：微細創成放電加工技術の開発，型技術，11, 5, (1996) p.79～84.
- 5) T.Masuzawa and M. Fujino: Wire Electro-discharge Grinding for Micro Machining, Annals of the CIRP, 34, 1 (1985) 431.