

## 공작 기계로의 micro가공 Micromachining by Machine Tools (MMMT)

東京大学生産技術研究所  
増沢隆久

### 1. micro가공의 필요성

최근 micro가공 또한 micromachining라고 하는 말썬이 많이 보이게 되었다. micro가공이라는, 치수가 예를 들면  $50\mu\text{m}$ ,  $100\mu\text{m}$ 라는 미세한 대상의 가공이다.

왜 미세한 대상의 가공이 주목을 모을까? 그것은 미세한 부품이 필요한 공업제품이 착실히, 계속적으로 늘고 있기 때문이어서, 이런 부품을 생산하는 기술이야말로 micro가공 기술이다.

예로, 컴퓨터가 대표하는 전자기기 안에 많이 쓴 IC(집적회로)를 생각하자.

IC의 생산에서는 처음 작은 silicon 칩 위에 미세하고 고도로 집적된 회로를 형성해야 하여, 크기가 몇  $\mu\text{m}$ 의 transistor와 switch, 또 그것들을 맺는 폭이  $1\mu\text{m}$  내외의 배선군을 만들어야 된다. 그리고, 그 칩에서 기판까지에 접속하기 위하여, 미세한 구조의 lead frame가 필요하다.

lead frame 각 부분은 몇 십  $\mu\text{m}$  부터 몇 백  $\mu\text{m}$ 의 치수로 구성 되어서, 그것을 양산하기에는 그 가공을 위한 미세 구조를 갖는 금형이 필요하다. 이렇게 칩 가공, lead frame 가공, 금형 가공, 그것들 모든 것이 micro가공의 기술로 실현 된다.

공업 제품에서는, 한도 있는 용적에,

할수 있는 한 많은 기능을 넣고 싶을 때가 많아서, 이런 요구 경향은 장래도 계속적이라고 생각할 수가 있으므로, micro가공 기술에 대한 미세화, 고정밀도화, 고능력화의 요구는 이 후 더 높게 될 것이다.

### 2. 공작기계로의 micro가공의 유용성

micro가공에 알맞은 방법은 많이 있다. 대국으로는 반도체소자 제조 process에 기초를 둔 것

(Micromachining by Silicon Process, 이하 MMSP 라고 한다) 과, 공작기계로의 가공법이 기본이 된 것(Micromachining by Machine Tools, 이하 MMMT라고 한다)의 두개 그룹이 있다. MMMT의 각 방법은 처음부터 일반 공업 제품의 부품에 대하여 널리 적용된 방법이어서, 평면적인 미세 pattern 작성이 중심인 MMSP와 비교하면, 이하의 삼대 특징을 갖는다.

(1) 큰 aspect ratio의 가공이 용이하다.

(2) 3차원적 형상가공에도 맞는다.

(3) 다종류 재료를 가공 가능하다.

타반, MMMT의 방법은 대부분, 그 재료 제거원리에 따라서, 가공 단위를 원자, 분자 order까지 축소하기가 어려우므로, 가공의 미세 한도에 관

해서는 MMSP에 못 미친다.

이상의 특징에 따라서, 가공 단위  $0.1\mu\text{m}$  이상, 가공 치수 몇  $\mu\text{m}$  이상의 범위에서의, 고 aspect ratio 형상가공, 곡면을 갖는 등의 3차원적 형상가공, 그리고 silicon 등 반도체 재료 이외의 재료에 대한 가공에서는, MMT의 유용성이 높다.

### 3. 현상과 전망

지금까지에 실용적 level에 도달한 MMT 방법으로서, 절삭, 연삭, 방전가공 (EDM), 전해가공, 초음파가공, laser 가공, punching 등을 들 수 있다. 축가공에서는 절삭으로  $50\mu\text{m}$  이상, 연삭으로  $20\mu\text{m}$  이상, EDM으로  $5\mu\text{m}$  이상, 또 구멍가공에서는 EDM, 초음파가공으로  $5\mu\text{m}$  이상, 절삭, laser 가공, punching으로  $30\mu\text{m}$  이상, 전해가공으로  $300\mu\text{m}$  이상이 대개 현상에서의 적용 범위다.

이 등 방법들 속에서, 절삭, EDM, 초음파가공에서는, 상기 치수 정도의 미세도로 3차원적 형상가공도 가능하다. 특히, 최근 기술 진보가 현저한 것은 EDM과 초음파가공이어서, 양자를 합치면 적용범위는 절삭 이상이 되었다.

laser 가공은 가공한 후에 열영향층이 크게 남는 것이 결점인데, excimer laser, 특히 파장이 짧은 ArF 에 관해서는 이 결점이 작고, 또, 최근 개발이 진행하고 있는 초 단 pulse laser는 파장이 짧아서 energy rate부터 이 결점을 극복할 수 있는 가능성이 증명 되므로, 이후의 장치 개발에 기대가 크다.

MMT의 장래 전망인데, 미세 한도, 정밀도 등의 개선은 당연 기대할 수 있는데, 그 이상, 개발이 필요한

것은 가공 속도 향상이어서, system 구축을 포함하여, 어떻게 양산에 대응하는 기술까지 기르는지가 큰 과제가 될 것이다.

# 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）を用いる一次元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

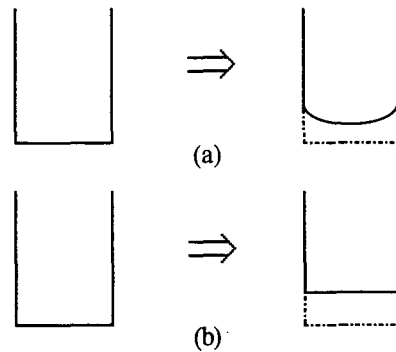


図1. 通常の電極消耗と均一電極消耗

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。切込み深さが大きすぎると、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边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。

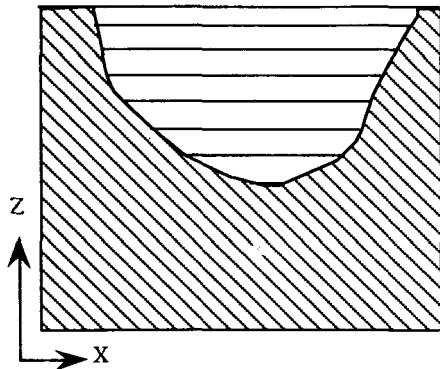


図2. 階層状加工

(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>3)</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

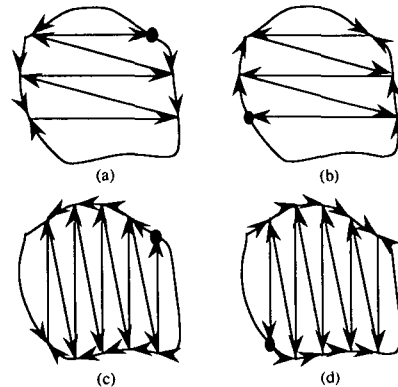


図3. 層内加工経路の略図

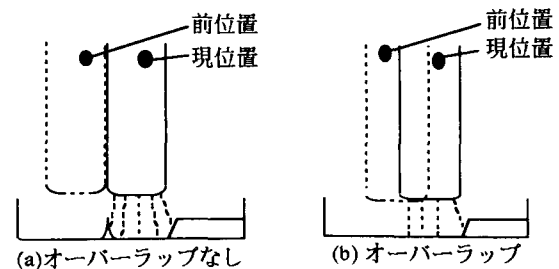


図4. オーバーラップ加工の略図

にもRがついている。電極をさらにスキミングすると、消耗により再び平坦な端面となる。繰り返しスキミングする時は、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。

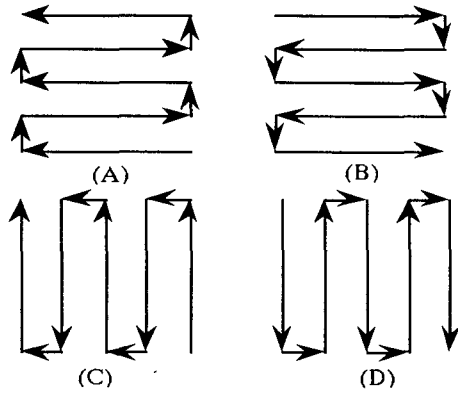


図5. 正方形の加工経路

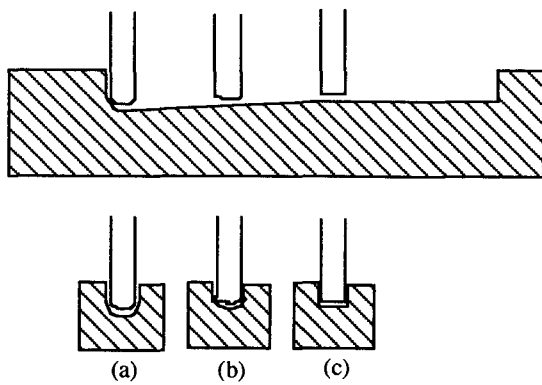


図6. 電極消耗プロセス

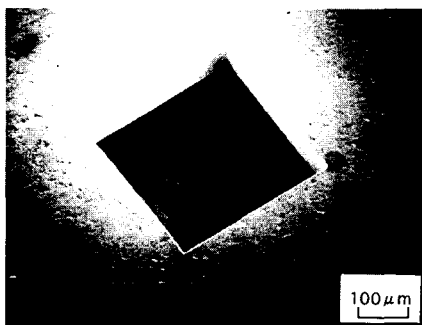


図7. 加工されたキャビティ

## 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ため丸くなる。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向へ引き上げて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。

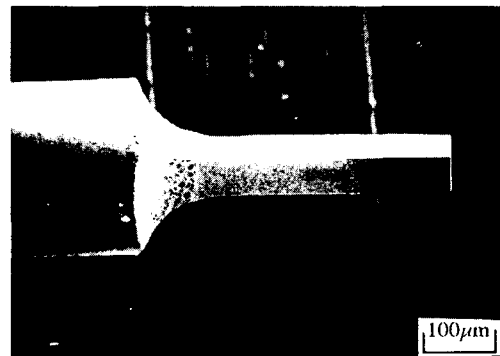


図8. 使用後の電極

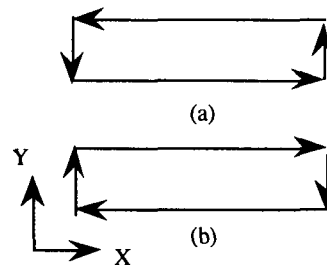


図9. 溝の加工経路

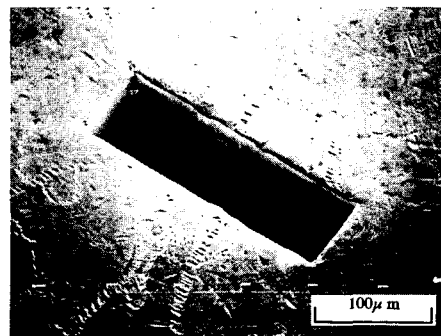


図10. 長方形の溝

### 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ヤニング法、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。

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

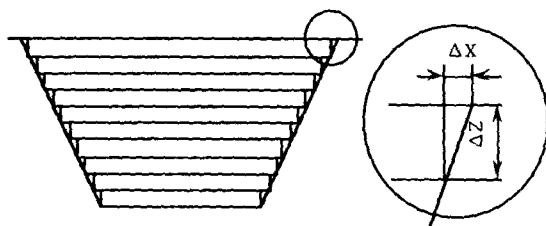


図11. 階層状加工における電極送り

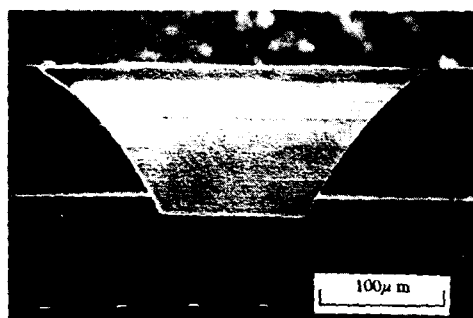


図12. 無補正加工の場合のキャビティ断面

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

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

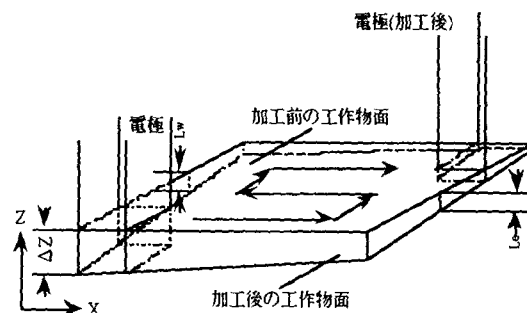


図13. 一層の加工前後の略図

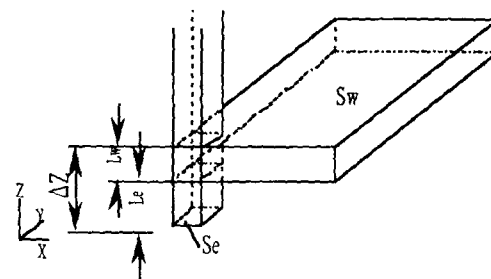


図14. 切り込み深さと電極消耗長さ、加工深さの関係

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

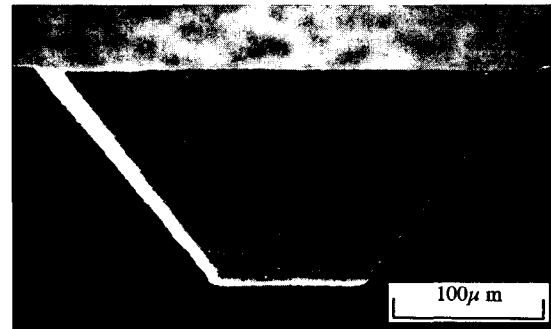


図17. 角錐台状キャビティ

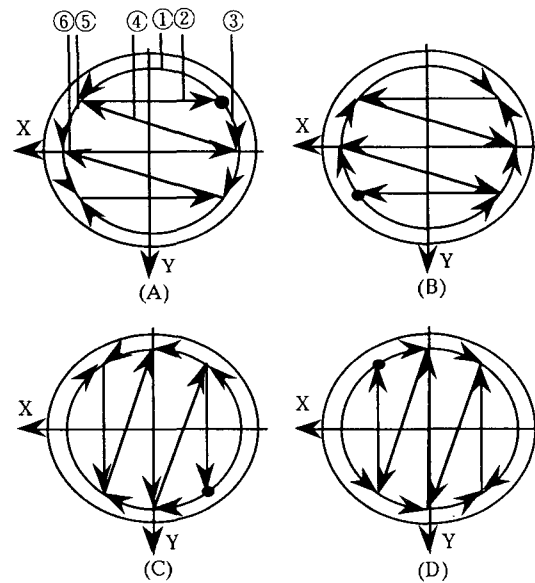


図18. 円断面形状の加工経路

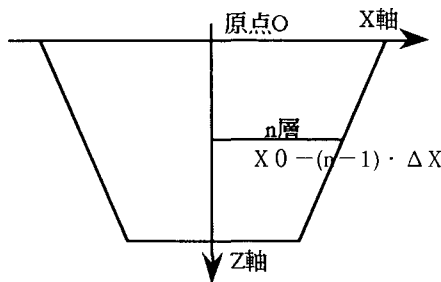


図15. 断面の座標系

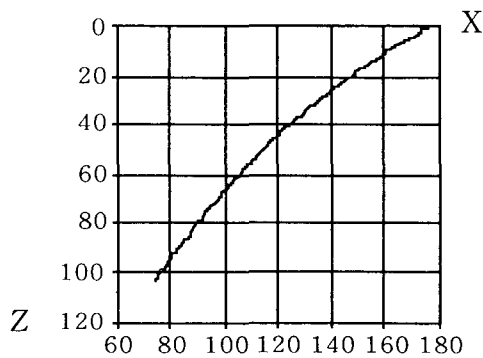


図16. 無補正として計算された壁面曲線

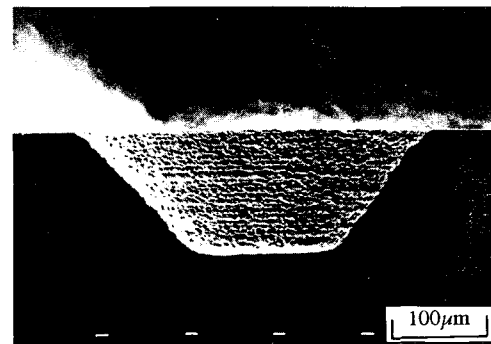


図19. 加工した円錐台

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

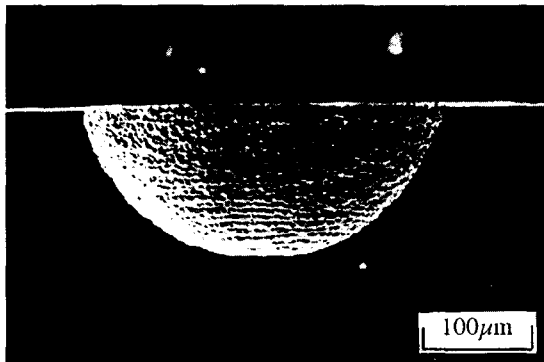


図20. 加工した半球面

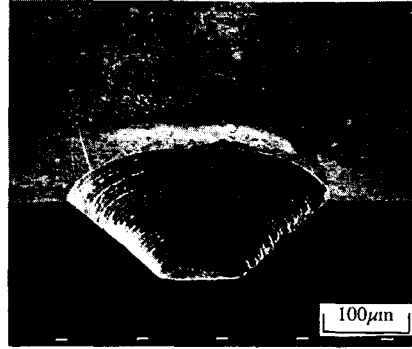


図21. 仕上げ加工後の円錐台面

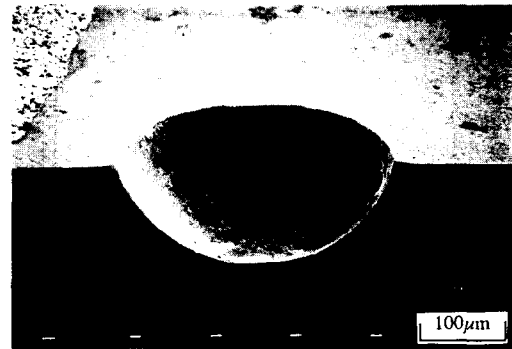


図22. 仕上げ加工後の半球面

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・今井洋人・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.



# マイクロ超音波加工の研究

—高精度工具回転機構および工作物側振動によるマイクロ超音波加工法—

東京大学生産技術研究所 ○江頭快 増沢隆久 藤野正俊

## 要旨

高精度工具回転機構と工作物側振動機構とを擁した加工装置を試作し、マイクロ超音波加工を行った。この手法により、ガラスやシリコンといった難加工な硬脆材料に対して、直径 $10\mu\text{m}$ 以下の微細な穴の加工が可能となった。

## 1. 緒言

近年、加工分野においては高精度化・微細化の要求がますます高まっており、また多様な材料への加工の必要性も増している。超音波加工は、電子部品材料やガラス、セラミックといった難加工な硬脆材料に対して機械的な加工が行える数少ない加工法の一つであるが、微細工具の取り付けの困難さからマイクロ加工への応用がなされておらず、例えば実用上では直径 $100\mu\text{m}$ 程度の穴の加工が限界とされてきた。

筆者らは、その問題を克服するために、超音波加工機に工具回転機構とWEDGユニット<sup>1)</sup>とを備え、加工機上で微細工具を製作するという手法で、直径 $20\mu\text{m}$ 前後までの微細穴の加工をシリコン上に行うことに成功した<sup>2)</sup>。しかし、工具の回転精度の問題から、加工された穴の真円度が悪く、またそれ以下の微小径への応用が困難であった。

本研究では、超微細放電加工機に使用されるV形軸受・マンドレルを用いて工具の回転精度の向上を図り、またそのために超音波振動を工具側でなく工作物側に付加する方式を考案し、マイクロ超音波加工を行った。

## 2. 実験方法

マイクロ超音波加工を行うためには、微細な工具の製作とそれの加工機への適切な取り付けが重要である。上述のように、筆者らは、超音波加工機に工具回転機構とWEDGユニットとを取り付け、加工機上で微細工具を製作することにより一つの解決法を示した。しかしこの機構では、工具を回転させるために、それに付随して超音波振動子・コーン・ホーンまでもを全て同時に回転させなければならない。工具寸法は直径数十 $\mu\text{m}$ というオーダーであるのに対して、回転部分は全体で直径数cm、長さ数十cmに及ぶ大きさとなる。これでは工具部分において高精度な回転を得ることは難しく、加工できる微細穴は直径 $20\mu\text{m}$ 程度、またその真円度も約 $5\mu\text{m}$ (直径)と悪かった。

そのため、本研究においては、より高精度なマイクロ超音波加工を行うために以下のような装置構成により工具の

回転精度向上を図った。

図1に加工装置の概略を示す。V形軸受とマンドレルは、工具製作に用いた市販の超微細放電加工機に使用されているものと同じである。V形軸受は、精密にポリシングしたSiCセラミックをV字上に配置したもので、マンドレルはセラミックキャピラリと一体で工具材料を保持し、DCモータによって駆動される。回転振れは $0.5\mu\text{m}$ 以下であり、またマンドレルを一度加工機からはずして再び取り付けても、回転の精度を保つことができる<sup>3)</sup>。

まず工具材料を超微細放電加工機上で加工し、加工された微細工具をマンドレルに保持されたまま超音波加工機上のV形軸受に取り付ける。これにより、超音波加工機上で微細工具の高精度な回転が実現できることになる。

この手法では従来の超音波加工と異なり工具側に超音波振動を付加することができないので、工作物側を振動させる必要がある。工作物は超音波振動子の一端に固定され、超音波振動が付加される。超音波振動子は共振周波数

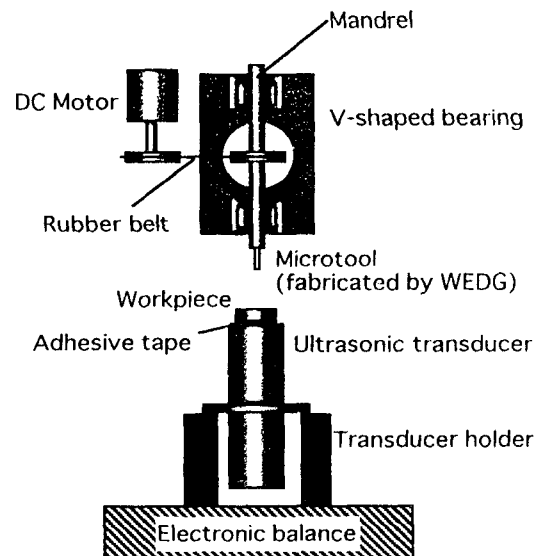


図1 マイクロ超音波加工装置の概略図

40KHzのものを使用した。

マイクロ超音波加工においては加工荷重が微小になるので、最小目盛 1 mgf の電子天秤を用いてその検出を行った。

また、加工穴の寸法が微小なため、スラリーに使用する砥粒にはそれに見合う微細なものを用いなければならない。本研究では、粒径  $0.25\mu\text{m}$  の超微細ダイヤモンド砥粒を使用して加工を行った。

### 3. 実験結果

上述の加工装置により、実験を行った。図2にWEDG加工により製作されたタングステン工具の例を示す。先端部分の直径は  $7\mu\text{m}$  である。このように製作された工具を用いて、超音波加工により微細穴あけを行った。

図3に、石英ガラス上に加工された直径  $9\mu\text{m}$ 、深さ  $20\mu\text{m}$  の微細穴の例を示す。これは、超音波加工で加工された微細穴として報告されている中では最小の直径のものと思われる。部分的にチッピングやだれが見られるが、真円度は良好であることがわかる。

図4には、シリコン上に加工された直径  $12\mu\text{m}$ 、深さ  $40\mu\text{m}$  の微細穴の例を示す。石英ガラスの加工例と比べて、チッピングも僅かであり、まただれも少なく加工されている。

### 4. まとめ

マイクロ超音波加工を行うために、新たな加工方式を提案した。これは、高精度な工具回転を得るために超音波振動子を工作物側に移し、微細工具の製作を超微細放電加工機でWEDG加工により行い、その放電加工機と同じ回転機構を用いて超音波加工を行うというものである。

その結果、石英ガラスやシリコンといった硬脆材料上に直径  $9\mu\text{m}$  までの微細穴の加工を行うことが可能となった。

### 謝辞

加工装置の部品を提供していただいた松下電器産業(株)、砥粒を提供していただいた(株)新東プレーターの両社に感謝いたします。

### 参考文献

- [1] 増沢, 藤野: 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
- [2] 江頭, Sun, 増沢, 藤野: マイクロ超音波加工, 電気加工技術, Vol. 20, No.65, 1996
- [3] 佐藤, 水谷, 河田: 微細穴放電加工機, National Technical Report, Vol. 31, No.5, Oct, 1985

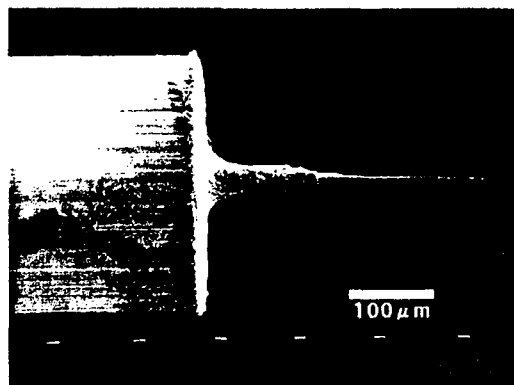
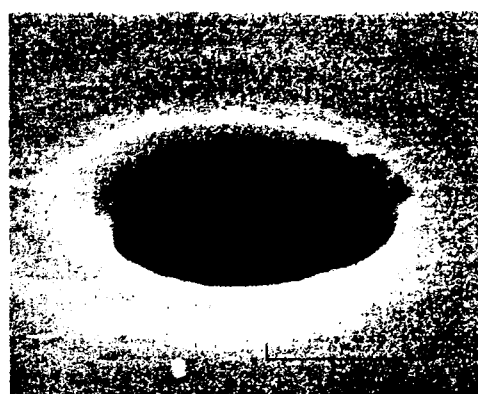
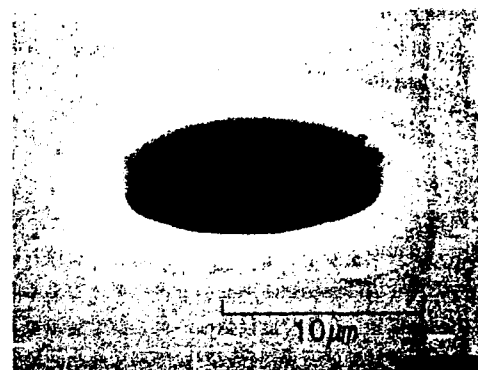


図2 WEDG加工により製作された微細工具



直径  $9\mu\text{m}$ 、深さ  $20\mu\text{m}$ 、加工時間6.5min

図3 石英ガラスに加工された微細穴



直径  $12\mu\text{m}$ 、深さ  $40\mu\text{m}$ 、加工時間10min

図4 シリコン上に加工された微細穴

ダイヤモンド焼結体工具によるマイクロ超音波加工

東京大学生産技術研究所 ○江頭快 増沢隆久

1. はじめに

工作物加振方式によるマイクロ超音波加工法により、ガラスやシリコンなどの材料に対して内径5 $\mu\text{m}$ までの微細穴の加工が可能となった。[1][2]

工具材料としては、小径工具の放電加工による成形性の良さと、靱性から、超硬合金を主に用いてきた。しかし、スラリーにダイヤモンド砥粒を使用しており、また工具径や砥粒径が小さくなるに従って工具摩耗が増大していく傾向があるので、工具寿命が短く、深穴の加工が困難であるという問題があった。そこで、本研究では工具材料として、耐摩耗性に優れ、焼結バインダに金属を使用しているために導電性のあるダイヤモンド焼結体を用い、工具摩耗の改善を図った。

2. ダイヤモンド焼結体について

本研究で使用したダイヤモンド焼結体は、超硬合金のプレートの上に、ダイヤモンド粉末を高温高压で焼結したものである。厚さ1mmの超硬合金上に、0.6mmの厚さのダイヤモンド層を形成したものを、ワイヤ放電加工で直径1.5mmに切り出して使用した。それを金属棒の先端に接着剤により固定し、マンドレルに取り付けて用いた。ダイヤモンド粉末は、粒径0.3 $\mu\text{m}$ の微粒である。

図1は、放電加工によりマイクロ工具に成形されたダイヤモンド焼結体である。その直径は20 $\mu\text{m}$ である。

3. 実験結果

ダイヤモンド焼結体工具によりマイクロ超音波加工を行った結果を示す。図2は、従来使用していた超硬合金工具との、工具摩耗率

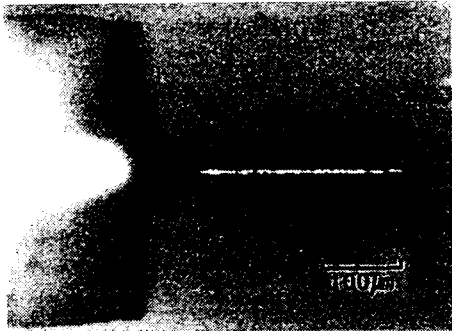


図1 マイクロ工具に製作されたダイヤモンド焼結体

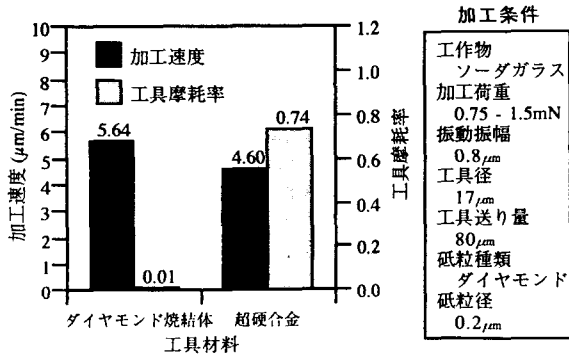
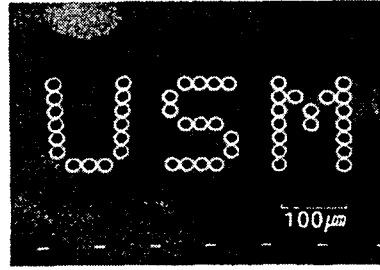
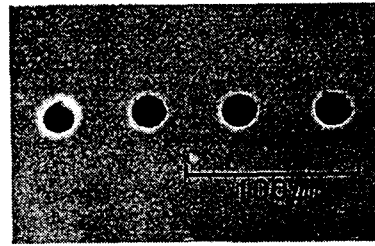


図2 工具材料と工具摩耗率・加工速度との関係



加工条件	
工作物	シリコン
加工荷重	0.5 - 1.0mN
振動振幅	0.8 $\mu\text{m}$
工具径	20 $\mu\text{m}$
砥粒種類	ダイヤモンド
砥粒径	0.2 $\mu\text{m}$

図3 同一工具による多数穴の連続加工



加工条件	
工作物	ソーダガラス
加工荷重	0.5 - 1.0mN
振動振幅	0.6 $\mu\text{m}$
工具径	18 $\mu\text{m}$
砥粒種類	ダイヤモンド
砥粒径	0.2 $\mu\text{m}$

図4 深さ150 $\mu\text{m}$ の貫通穴加工

及び加工速度の比較を表している。超硬合金工具の工具摩耗率が0.74であるのに対し、ダイヤモンド工具の工具摩耗率は0.01と非常に小さく、工具摩耗が極めて少ないことを示している。また、加工速度も増加することが確かめられた。これは、今まで工具の摩耗に使われていた分のエネルギーが、工作物の除去に向けられたためと思われる。

工具摩耗が少なくなったために、工具寿命が大幅に伸びた。図3は、シリコンに対する、同一工具による多数穴の連続加工の例である。穴の内径は平均で22 $\mu\text{m}$ 、深さは10 $\mu\text{m}$ である。総計の加工深さ480 $\mu\text{m}$ に対し、工具摩耗は4 $\mu\text{m}$ であった。

さらに、加工中に工具の長さがほとんど短くならないので、より深い穴の加工が可能となった。図4は、厚さ150 $\mu\text{m}$ のソーダガラスに対して、内径21 $\mu\text{m}$ の貫通穴の連続加工を行った例である。超硬合金工具の場合、この直径では4以上のアスペクト比を得るのは困難であるが、図の例では7以上のアスペクト比を達成している。

なお、ダイヤモンド焼結体は超硬合金に比較すると靱性が低く、工具径が15 $\mu\text{m}$ 以下になると急に脆くなる傾向があった。これを改善するには、焼結の際にWC粉末などを加えて、焼結体の靱性を向上させる必要がある。

4. まとめ

ダイヤモンド焼結体を工具材料に用いて、マイクロ超音波加工の実験を行った。耐摩耗性に優れるため、工具寿命が大幅に伸び、多数穴の連続加工及び深穴加工が可能となり、加工速度も向上した。

謝辞

ダイヤモンド焼結体の製造にご協力いただきました東名ダイヤモンド工業(株)に感謝いたします。

参考文献

- [1] 江頭, 増沢, 藤野: マイクロ超音波加工の研究, 1997年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集
- [2] 江頭, 増沢, 藤野: マイクロ超音波加工による微細穴の加工, 1997年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集

# 三次元微細キャビティの放電加工

—微細金型の製作—

3 D micro cavities machined by EDM

—Fabrication of micro molds—

余 祖元\*・増沢隆久\*・藤野正俊\*

Zuyuan YU, Takahisa MASUZAWA and Masatoshi FUJINO

## 1. はじめに

微細放電加工では電極消耗が大きいため、単純形状の電極での走査加工が有効である。均一消耗法<sup>1, 2)</sup>に基づき、補正式<sup>3, 4)</sup>を利用して単純な三次元形状の製作には既に成功した。しかし、一般の微細金型の形状はより複雑であり、特別の走査パターンやいくつかの異なる単純電極が必要となる。本研究では、斜面を持つ十字キャビティとマイクロカーの金型の加工を例として、複雑な微細金型の製作について報告する。

## 2. 金型加工プロセスおよび結果

### 2.1 斜面を持つ十字キャビティの加工

図1に示すようなキャビティの横断面は十字である。これに対しては、正方形断面形状の電極が適当である。ただし、均一消耗が実現できるように工具経路を選定しなければならない。WEDG法で正方形電極 ( $60 \times 60 \mu\text{m}^2$ ) を製作し、これを用いて表1の条件で図2に示すような加工経路の(a)→(b)→(c)→(d)の順で階層状に加工した。各層の面積が違っているので、電極消耗に対する補正は必要である。補正の結果、一層の切り込みは最上層で  $1 \mu\text{m}$ 、最下層で  $0.5 \mu\text{m}$  となった。図4は加工したキャビティの写真である。

### 2.2 マイクロカーの金型の加工

図3はマイクロカーの金型の略図である。この金型は本体部(a)、ルーフ部(b)とホイール部(c)の三つの部分で構成される。各部分の形状や寸法が違っているので、異なる電極が必要となる。本体の断面形状はシャープなコーナを持つ長方形なので、断面形状が  $60 \times 60 \mu\text{m}^2$  の正方形電極で加工を行った。ルーフ部はコーナにRがあるので、円筒

\*東京大学生産技術研究所 第2部

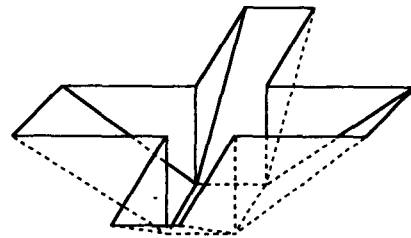


図1 斜面を持つ十字キャビティ

表1 実験条件

pulse generator	relaxation type
open voltage	80V
discharge capacitor	100pF
electrode material	WC alloy
workpiece material	stainless steel (SUS304)

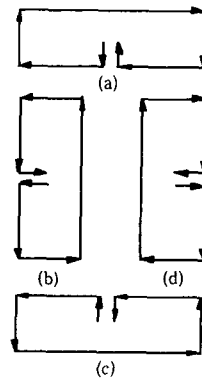


図2 十字断面形状の加工経路

電極を用い、その半径(30 $\mu\text{m}$ )はRより小さくした。本体部(a)、ルーフ部(b)は図5に示すような加工経路の(a) $\rightarrow$ (b) $\rightarrow$ (c) $\rightarrow$ (d)の順で階層状に加工を行った。ホイール部の断面形状は長方形であるが、幅が狭いので、40 $\times$ 40 $\mu\text{m}^2$ の正方形電極で加工することにした。加工経路は往復直線である。電極を均一に消耗させるため、一層ごとに電極を工作物の上方へ引き上げて90 $^\circ$ ずつ回転することにした。そうすると、シャープなエッジとコーナを持つホイール部が加工できる。

加工は本体部、ルーフ部、ホイール部の順に行った。各部分を加工する前に、三次元微細放電加工装置に付加されているWEDGユニット<sup>5)</sup>により、対応の電極を製作した。同一機上で電極製作と金型加工を行うので、加工位置をだすのが容易である。正確に成形するため、補正式により電極消耗の補正を行いながら加工する。図6は加工したマイクロカーの金型である。図7は各部を加工した後の電極の外観である。

### 3. プラスチック成形

作成した微細金型を用いてプラスチック成形を試みた。材料としてポリスチレンを選び、金型を200 $^\circ\text{C}$ まで加熱した後、加圧成形を行った。図8は成形した十字の写真で、図9はマイクロカーの写真である。

### 4. ま と め

この実験により、金型の形状を単純な形状に分割し、

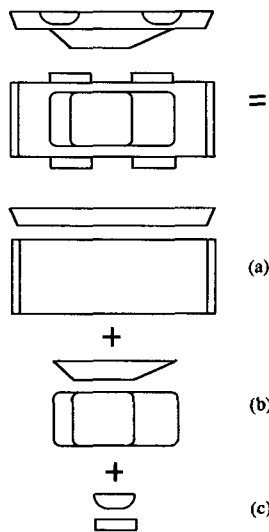


図3 マイクロカーの設計図

単純な電極を利用し、均一消耗法に基づいて設計した加工経路に沿い、補正式により電極消耗を補正しながら加工することにより、微細かつ複雑な金型の自動的な作成が可能であることがわかった。なお、成形に関してご協力を頂いた本研究所横井秀俊教授および増田範通技術官に御礼申し上げる。

(1997年9月9日受理)

### 5. 参 考 文 献

- 1) 余・増沢・藤野：三次元微細放電加工の基礎研究(第1報)一異形電極による底付平面加工一，電気加工学会全国大会講演論文集(1996)，p83-86.
- 2) 余・増沢・藤野：単純成形電極による三次元微細放電加工(第1報)一シャープコーナキャビティの加工および電極消耗補正一，電気加工学会誌，Vol. 31, No. 66, p18-24.
- 3) 余・増沢・藤野：三次元微細放電加工の基礎研究(第1報)一斜面加工および補正方法一，電気加工学会全国大会講演論文集(1996)，p87-90.
- 4) 余・増沢：放電加工による微細キャビティの形成，生産研究，Vol. 49, No. 9 (1997)，p19-24.
- 5) T. Masuzawa and M. Fujino: Wire Electro-discharge Grinding for Micro Machining, Annals of the CIRP, 34, 1 (1985) 431.

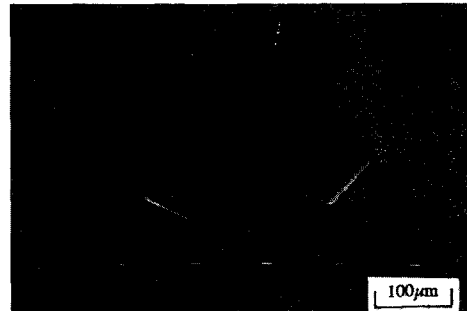


図4 十字キャビティ

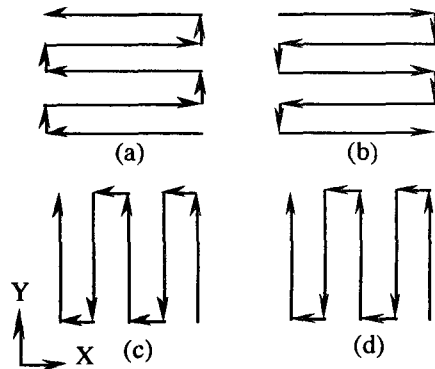
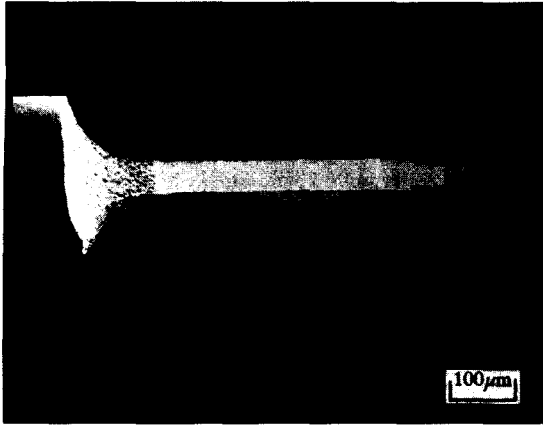


図5 マイクロカーの本体部とルーフ部の加工経路



a) 本体部の電極

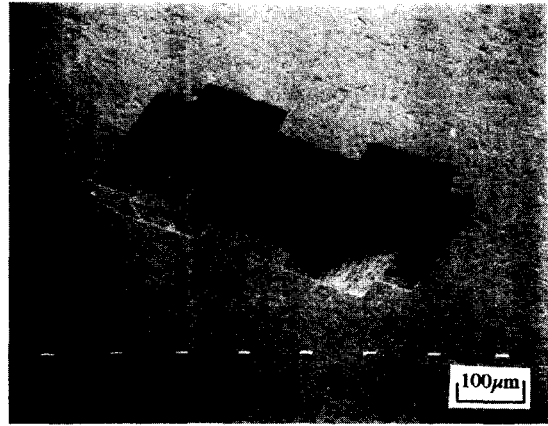
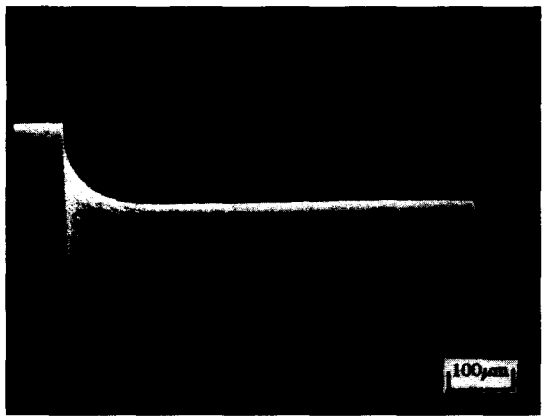


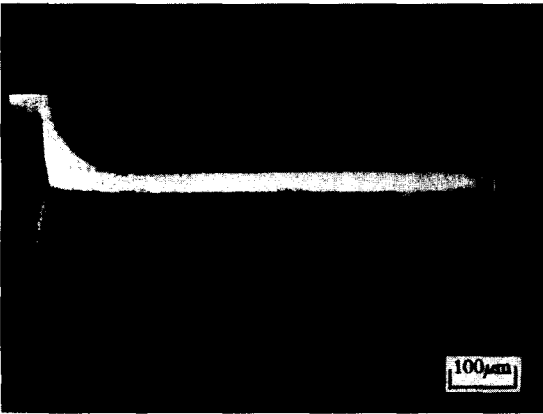
図6 マイクロカーの金型



b) ループ部の電極



図8 成形した十字ドライバ先端



c) ホイール部の電極  
図7 加工後の電極

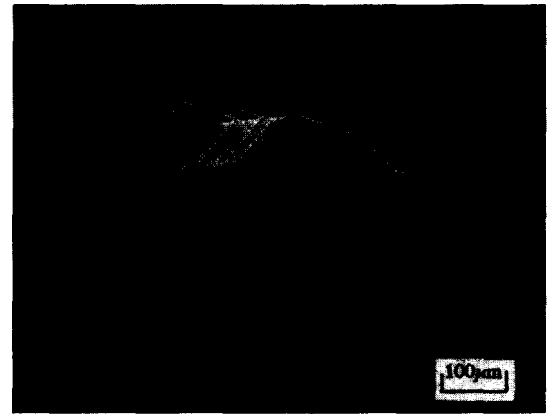


図9 成形したマイクロカー