

# 補助プレートを用いた放電加工微細穴のダレ抑制に関する研究

富澤貴之<sup>\*1</sup>・吉澤好良<sup>\*2</sup>・香川勝一<sup>\*3</sup>

## Reduction in Corner Dullness of Machined Microhole by EDM Using Assisting Plate

by

Takayuki TOMIZAWA, Yoshiro YOSHIZAWA and Masakazu KAGAWA

(Received on Sep.16, 2003 & accepted on Nov.26, 2003)

### Abstract

When hole and microhole machinings are carried out by electric discharge machining (EDM) using a straight electrode, the hole and microhole diameters become different at the inlet and outlet of the machined hole. This shape irregularity is caused by the wear of the electrode and debris. A method was proposed for reducing the diameter difference between the hole and the microhole by EDM using a stepped electrode. Experiments showed that the difference in diameter between a hole and a microhole is reduced by EDM using a stepped electrode but the corner dullness of the machined hole and microhole is caused by electrolysis. In a previous paper, a new method was proposed for reducing the corner dullness of a machined hole by EDM using an assisting plate. Experiments showed that the corner dullness of a machined hole is reduced by EDM using an assisting plate.

This paper describes the application of this assisting plate method to microhole machining. The following experimental results were obtained. (1) The corner dullness of a machined microhole is reduced by EDM using an assisting plate. (2) Microholes of the desired diameter and without corner dullness can be machined by EDM using an assisting plate.

**Keywords:** EDM, Microhole, Microholes, Assisting plate, Corner dullness

### 1. 緒言

放電加工は、導電性材料であれば硬さに関係なく、非接触で加工ができ、かつバリも生じないことから金型加工<sup>1)</sup>、各種精密部品の加工<sup>2)</sup>等に用いられているが、直径が $\phi 0.5\text{mm}$ 以上の穴<sup>3)</sup>および直径 $\phi 0.3\text{mm}$ 以下の微細穴<sup>4)</sup>加工にも用いられている。穴および微細穴加工においては一般にパイプおよび中実のストレート電極を用いて加工しているが、図1(a)に示すように、放電屑<sup>5)</sup>の排出にともなって電極→放電屑→加工物間で生じる二次放電の影響により加工入口の穴直径が大きく、出口のそれが小さいテーパ形状の穴および微細穴が形成される。この穴および微細穴のテーパ形状をできるかぎり小さくする方法として図1(b)に示すパイプおよび中実の段付電極を用いて穴および微細穴を加工する方法が提案<sup>6)</sup>されている。この方法を用いればほぼストレートな穴および微細穴を加工することができるが、加工液に純水を用いた場合、電解現象により穴および微細穴の加工入口と出口にはダレが生じる。前報<sup>8)</sup>において、穴の加工入口と出口に生じるダレを抑制する方法として、図1(c)に示すような補助プレートを用いて加工を行う方法を提案し、その効果について実験的に検討を行った。その結果、補助プレートを用いて加工を行えば、穴の加工入口と出口に生じるダレを抑制できることがわかった。一方、微細穴加工では中実電極を用いて加工を行うので、パイプ電極を使用して加工を行う穴加工に比して放電屑の排出が困難になり、加工時間が長くなる。このことにより微細穴に生じるダレが穴のそれに比して大きくなると考えられる。

そこで、本研究では、補助プレートを用いて加工を行う方法を中実電極を用いて加工を行う微細穴加工に適用した場合、微細穴の加工入口と出口に生じるダレ抑制に有効であるかについて実験的に検討を行った。

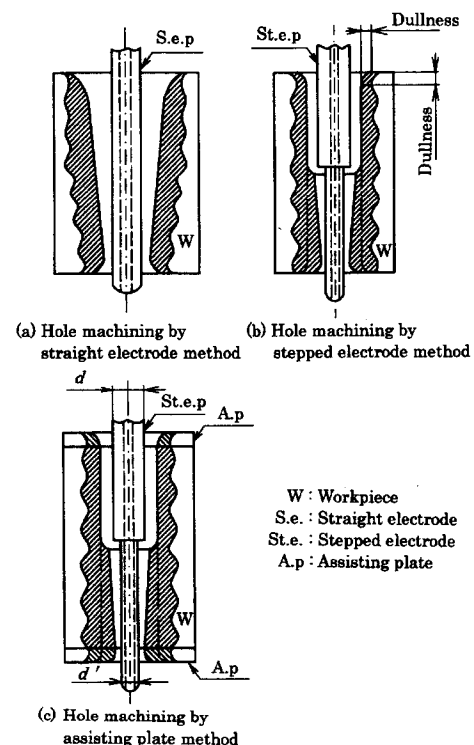


Fig.1 Schematic explanation for hole machining methods

\*1 工学研究科機械工学専攻博士課程前期  
\*2 技術支援課一級技術員  
\*3 工学部動力機械工学科教授

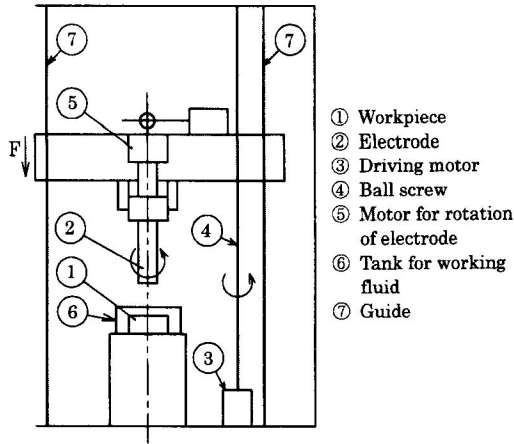


Fig.2 Mechanism of EDM machine

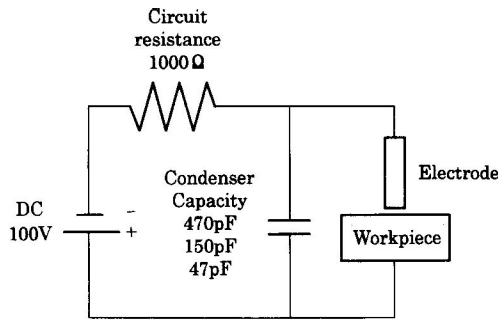


Fig.3 RC circuit for EDM

## 2.実験方法

### 2.1 試験片

加工物には SUS304 を用い、その形状・寸法は縦 15mm×横 5mm×厚さ 0.5mm の平板試験片とした。

### 2.2 放電加工機

微細穴加工に用いた放電加工機の全体機構の概略を図 2 に示す。微細穴加工に際しては、まず加工槽⑥に加工物①を取り付け、加工物に垂直になるように電極②を取り付ける。次いで、加工液タンクからポンプにより加工槽に加工液を供給する。なお、加工槽に供給された加工液は、試験片の上部側から下部側に流れるようになっている。最後に、電極を駆動モータ③とボールねじ④により適当な送り速度  $F$  で送る。これで加工が行われるが、放電屑の排出を促進させるために電極を電極回転モータ⑤により回転 (1200rpm) させる。電極の回転振れはダイヤルゲージ ((株) ミツトヨ製のハイケータ, 最小目盛  $0.5\mu\text{m}$ ) を用いて測定した結果  $2.0\mu\text{m}$  であった。

### 2.3 放電回路と加工条件

微細穴加工を行うための放電回路は図 3 に示す直流電源, 抵抗, コンデンサより構成されるコンデンサ放電回路 (RC 回路) を用いた。RC 回路の直流電源電圧, 抵抗値は,  $100\text{V}$ ,  $1000\Omega$  の一定値とし, コンデンサ静電容量は  $47\text{pF}$ ,  $150\text{pF}$ ,  $470\text{pF}$  の 3 種とした。

### 2.4 電極作成法

電極はストレート電極と段付電極を用いた。ストレート電極作成法は図 4 に示すように、電極に回転  $r$  ( $1200\text{rpm}$ ) を与え、電極成形用銅プレートを  $x$ ,  $y$  方向に送り込み、設定した直径  $\phi 100\mu\text{m}$  ( $\pm 5\mu\text{m}$ ) に成形した。また段付電極は、図 5 に示すようにストレート電極で加工を行った際に電極先端部が消耗するので、こ

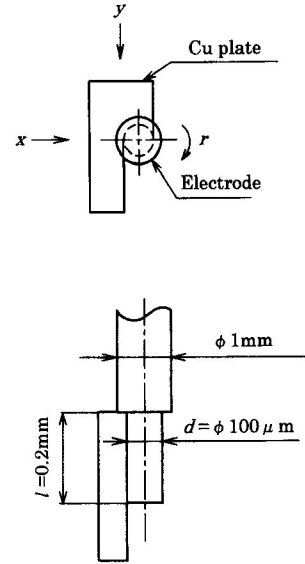


Fig.4 Dimension and form of straight electrode

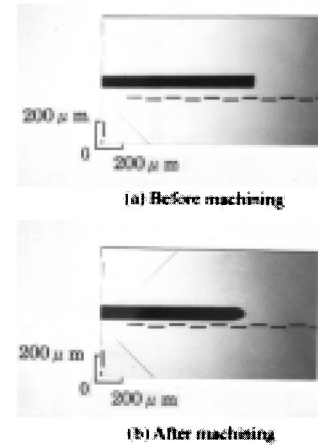


Fig.5 Electrode of before and after machining

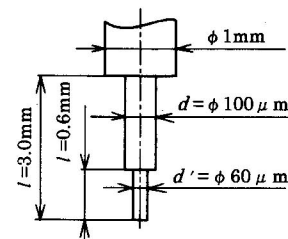


Fig.6 Dimension and form of stepped electrode

の消耗量を考慮して図 6 に示すように、ストレート電極作成後に電極先端部長さ  $l'=0.6\text{mm}$  を直径  $d'=\phi 60\mu\text{m}$  ( $\pm 5\mu\text{m}$ ) に成形した。電極作成時の放電回路は図 3 に示した RC 回路を用い、極性は逆極性とし、コンデンサ静電容量  $30\text{pF}$  を用いた。

上記項目および他の加工条件を表 1 に示す。

### 2.5 補助プレート

補助プレートには SUS304 を用い、その形状・寸法は縦 15mm×横 5mm×厚さ 0.2mm の平板とした。

### 2.6 加工穴の評価法

加工穴の評価に際しては、図 7(a) に示すように加工穴を金属顕微鏡で拡大撮影し、張り合せた後、トレーシング紙に転写し、この

Table 1 Machining conditions

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| Workpiece                            | SUS304, 15mm×5mm×0.5mm                               |
| Material of electrode                | W  |
| Diameter of straight electrode       | $d = \phi 100 \mu\text{m}$                           |
| Diameter of stepped electrode        | $d = \phi 100 \mu\text{m}, d' = \phi 60 \mu\text{m}$ |
| Feed of electrode                    | $0.667 \mu\text{m/s}$                                |
| Rotation of electrode                | 1200rpm  |
| Working fluid                        | De-ionized water                                     |
| Specific resistance of working fluid | $6.0 \sim 12.0 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$   |
| Amount of flow of working fluid      | 190ml/min  |
| RC circuit                           |  |
| • Unload voltage                     | 100V   |
| • Circuit resistance                 | 1000 $\Omega$  |
| • Condenser capacity                 | 47, 150, 470pF                                       |
| • Polarity                           | Workpiece+, Electrode-                               |

転写円に内接する円すなわち③を加工穴の直径とした。また、加工穴の軸方向形状の測定法に際しては図 7(a)に示す加工穴の中心を含む任意の A-A で縦割を行った。その形状を図 7(b)に示す。図に示すように、明石製のマイクロピカース硬さ試験機の測微接眼鏡を用いて図 7(b)に示す加工入口側から任意の距離  $d_0, d_1, \dots, d_{0.5}$  で穴直径を測定した。ダレの評価は図 7(b)に示すように加工入口と出口のダレ幅をそれぞれ  $D_{inlet-x}, D_{outlet-x}$  とし、 $D_{inlet-y}, D_{outlet-y}$  を加工入口と出口のダレ深さとして評価を行った。

加工穴の真円度の評価に際しては内接円中心法を用いた。すなわち、図 7(a)に示すような加工穴の転写形状②に内接する内接円③と外接円①を求め、内接円③を穴直径とし、外接円①と内接円③の半径差を真円度とする方法である。

## 2. 実験結果および考察

### 3.1 従来の微細穴加工法

従来の微細穴加工法にはストレート電極を用いる方法と段付電極を用いる方法があり、以下にこれらの方法による加工穴について検討を行った。

#### 3.1.1 ストレート電極を用いた微細穴加工

ストレート電極による微細穴加工について検討する目的で、SUS304 の厚さ  $0.5\text{mm}$  の加工物に、コンデンサ静電容量  $47\text{pF}, 150\text{pF}, 470\text{pF}$  で直径  $\phi 100 \mu\text{m}$  の中実ストレート電極を用いて微細穴加工を行った。加工穴の例として、コンデンサ静電容量  $47\text{pF}$  を用いて加工を行ったときの、加工穴の穴形状を図 8 に示す。図に示した微細穴の入口側と出口側の穴直径は、 $169 \mu\text{m}$  と  $140 \mu\text{m}$  となり、出口側に比して入口側が拡大することがわかる。また、加工穴の軸方向形状について測定した結果を図 9 に示す。図より、いずれのコンデンサ静電容量の場合も 2 次放電と電解現象の影響により、穴直径は加工入口側が大きく、加工入口からの距離が約  $0.3\text{mm}$  付近までテーパ形状で、 $0.3\text{mm}$  から  $0.4\text{mm}$  付近まではほぼストレートな穴直径となり、 $0.4\text{mm}$  付近から電解現象の影響により穴が拡大していく形状になることがわかる。

上述したように、ストレート電極を用いて微細穴加工を行うと、加工出口側の穴直径に比べて入口側のそれが大きくなり、加工入口側では放電層による二次放電と電解現象によるダレにより穴の拡大が生じ、加工出口側では電解現象によりダレが生じる。

#### 3.1.2 段付電極を用いた微細穴加工

前述したように、ストレート電極を用いた微細穴加工を行うと、加工出口側の穴直径に比して入口側のそれが大きくなり、テーパ

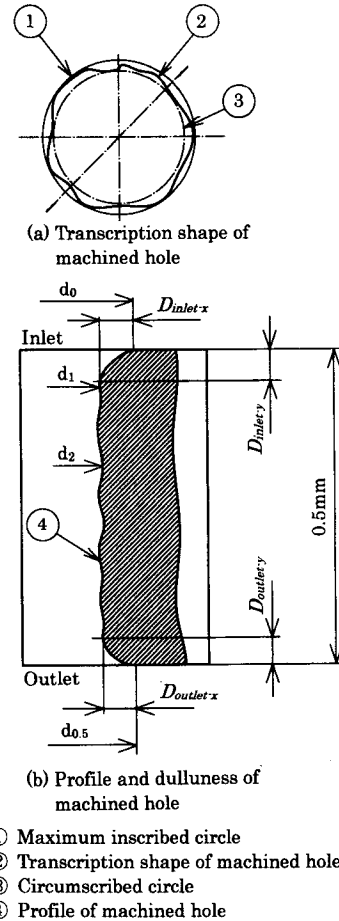


Fig.7 Evaluation method of machined micro hole

形状の加工穴が形成されるので、加工穴の入口側の穴直径と出口側のそれを等しくし、できるだけストレートな加工穴とする方法として、段付電極を用いた微細穴加工法が提案されている。

段付電極加工法を用いて、微細穴加工を行ったときの加工穴の軸形状について穴直径を測定した結果を図 10 に示す。図より、いずれのコンデンサ静電容量の場合も電解現象の影響により、加工入口側から  $0.12\text{mm}$  付近に向かってテーパ形状で穴直径が減少し、 $0.12\text{mm}$  から  $0.42\text{mm}$  付近まではほぼストレートな穴となり、 $0.42\text{mm}$  付近から出口側に向かって電解現象により加工穴が拡大していく形状で、前述のストレート電極を用いて加工を行った場合に比して、ストレートの部分が長くなっていることがわかる。

また、コンデンサ静電容量を  $47, 150, 470\text{pF}$  と変化させたときの加工穴の入口のダレ幅と深さは、いずれのコンデンサ静電容量の場合もダレ幅とダレ深さが  $25 \mu\text{m}$  と  $120 \mu\text{m}$  となり、ほぼ一定であることがわかる。これは、いずれのコンデンサ静電容量の場合も加工時間が  $30\text{min}$  とほぼ一定であることから、電解現象による金属の析出量が一定となり、加工穴入口のダレ幅と深さが一定になったものと考えられる。また、加工穴出口のダレ幅と深さも  $20 \mu\text{m}$  と  $80 \mu\text{m}$  となり、コンデンサ静電容量が変化してもほぼ一定であるが、加工入口に比して小さいダレ幅と深さになっていることがわかる。これは加工入口の加工時間に比して加工出口のそれが短いことが原因していると考えられる。

ここで、微細穴と穴のダレについて比較を行うために、微細穴および穴<sup>8)</sup>の直径とダレ幅の比および加工物厚さとダレ深さの比を求めた結果を表 2 に示す。なお、表中の ( ) 内は加工物厚さ  $5\text{mm}$  の穴加工の場合のそれぞれの比を表す。表より、微細穴のダレ幅と深さが穴のそれに比していずれも大きいことがわかる。これは、パイプ電極を用いて加工を行う穴加工に比して、中実電極を用いて加工を行う微細穴加工では、放電層およびガス泡等の排出が困難<sup>3)</sup>であるため加工時間が長くなる。その結果、微細穴加工では、

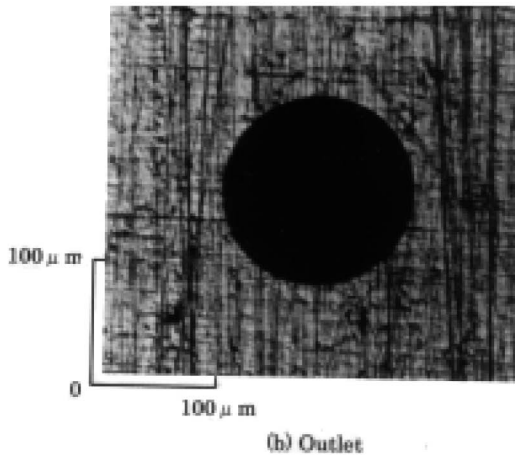
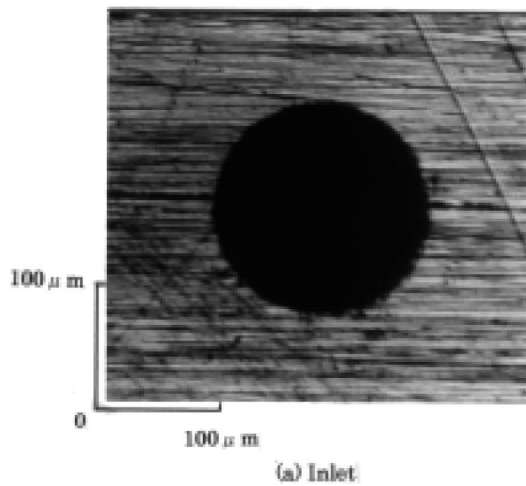


Fig.8 Machined micro hole by using straight electrode

電解現象による金属の析出量が多くなり、穴のダレ幅と深さに比して微細穴のそれがいずれも大きくなるものと考えられる。

### 3.2 補助プレートを用いた微細穴加工

上述したように段付電極を用いて微細穴加工を行った場合、穴の軸方向の形状はほぼストレートになるが、加工入口側と出口側ではダレが生じる。そこで、穴の軸方向の形状がストレートで、かつダレのない穴を加工する方法として、補助プレートを用いた加工法が提案されている。この加工法による加工過程を中実電極を用いて加工を行う微細穴加工に適用した場合について以下に述べる。図 1(c)に示すように加工物をダレ深さより厚い 2 枚の補助プレート A.p で挟み、それを直径  $d$  と  $d'$  からなる中実の段付電極で微細穴加工を行う。

まず直径  $d'$  の電極により形成される穴は、3.1.1 項のストレート電極による微細穴加工の場合と同様に、加工出口側の穴直径に比べて入口側のそれが大きいテーパ形状になる。

次いで、電極をさらに送り込むと、直径  $d$  の電極によって入口側から加工が行われる。3.1.2 項の段付電極による微細穴加工で示したように、入口側の穴は放電層の影響を受けないので穴直径の拡大は生じないが、補助プレートにはダレが生じる。

最後に、直径  $d$  の電極の消耗を考慮して電極の送り量を加工物厚さの 2 倍とすれば、入口側の穴直径と出口側のそれが等しくなる。また、この加工法を用いると補助プレートの部分にはダレが生じるが、加工穴にはダレが生じないはずである。

上記補助プレートを用いた微細穴加工の考えに基づき、Fig.10 よりダレ深さの最大が  $120 \mu\text{m}$  であることより厚さ  $200 \mu\text{m}$  の 2

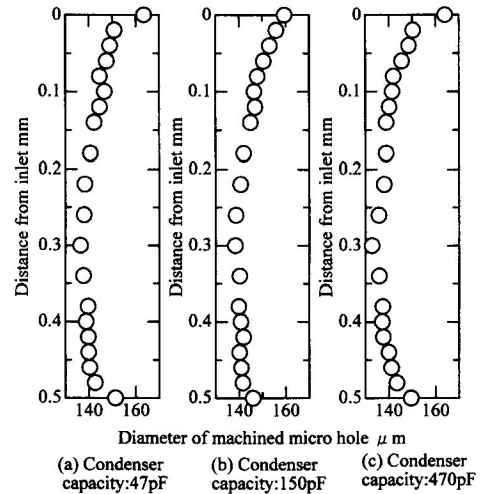


Fig.9 Relation between distance from inlet and diameter of machined micro hole by using straight electrode

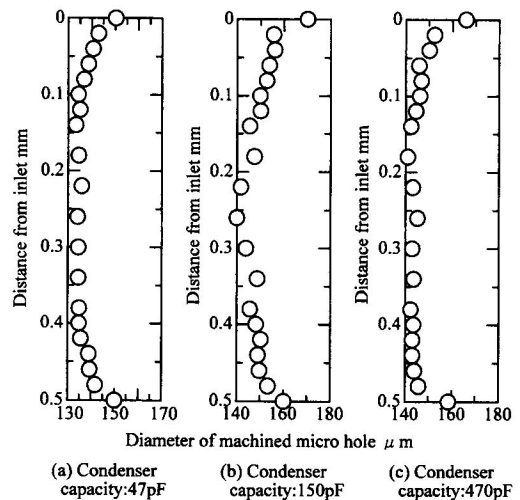


Fig.10 Relation between distance from inlet and diameter of machined micro hole by using stepped electrode

Table 2 Corner dullness of machined micro hole by using stepped electrode (%)

| Inlet             |                   | Outlet             |                    |
|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| $D_{inlet-x} / d$ | $D_{inlet-y} / t$ | $D_{outlet-x} / d$ | $D_{outlet-y} / t$ |
| 0.10 (0.035)      | 0.24 (0.10)       | 0.10 (0.012)       | 0.16 (0.055)       |

枚の補助プレートで挟み微細穴加工を行った。加工穴の軸方向の形状について穴直径の測定をした結果を図 11 に示す。図より、いずれのコンデンサ静電容量の場合も加工穴の軸方向の形状がほぼ直線で、かつ加工入口側と出口側にはダレが生じていないことがわかる。

ここで、上記の各微細穴加工法による加工穴の真円度の測定結果を表 3 に示す。表より、加工穴の真円度は加工法がストレート電極法(S.e.)→段付電極法(St.e.)→補助プレート法(A.p.)となるにつれて小さくなっていることがわかる。ストレート電極法では二次放電と電解現象、段付電極法では電解現象の影響を受けるが、補助プレート法はこれらの影響を受けないため真円度の小さい微細穴加工ができることがわかった。

以上より、補助プレートを用いて穴加工を行えば、軸方向形状がストレートで、かつ加工入口と出口にダレのない微細穴を加工できることがわかった。

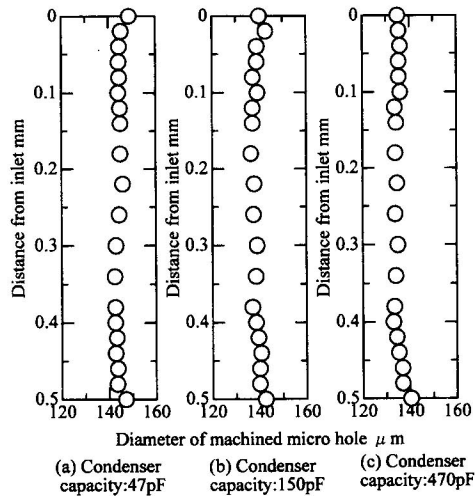


Fig.11 Relation between distance from inlet and diameter of machined micro hole by using assisting plate

Table 3 Circularity deviation of machined hole

| Machining methods | Condenser capacity pF | Circularity Deviation $\mu\text{m}$ Inlet / Outlet |
|-------------------|-----------------------|--|
| S.e.              | 47pF                  | 5.0/4.0  |
|                   | 150pF                 | 4.5/2.5  |
|                   | 470pF                 | 5.5/4.0  |
| St.e.             | 47pF                  | 3.0/2.5  |
|                   | 150pF                 | 3.0/2.0  |
|                   | 470pF                 | 4.0/3.5  |
| A.p.              | 47pF                  | 2.5/2.0  |
|                   | 150pF                 | 2.0/1.5  |
|                   | 470pF                 | 3.0/1.5  |

S.e.:Straight electrode method  
 St.e.:Stepped electrode method  
 A.p.:Assisting plate method

3.3 補助プレートを用いた設定直径微細穴加工

上述した補助プレートを用いた微細穴加工の実験結果に基づき、コンデンサ静電容量 47pF を用いて設定直径  $\phi 150\mu\text{m}$  の微細穴を加工する場合について以下に述べる。

コンデンサ静電容量 47pF を用いて微細穴加工を行うと、(2×放電間隙)=40 $\mu\text{m}$  の穴直径の拡大が生じるので、設定直径  $\phi 150\mu\text{m}$  の微細穴加工を行うには、段付電極直径 d は (150 $\mu\text{m}$ —40 $\mu\text{m}$ ) より  $\phi 110\mu\text{m}$  とすればよい。また、段付電極 d' は  $\phi 60\mu\text{m}$  とした。

上記の条件で微細穴加工を行った結果を図 12 に示す。図に示した微細穴の入口側と出口側の穴直径は 151 $\mu\text{m}$  と 149 $\mu\text{m}$  となり、ほぼ設定直径の微細穴になった。また、真円度は加工入口で 2.0 $\mu\text{m}$  加工出口で 1.5 $\mu\text{m}$  であった。さらに、微細穴の軸方向形状は図 13 に示すように入口側から出口側に向かってほぼストレートで、かつダレのない微細穴が形成されていることがわかる。

3.4 補助プレートを用いた設定直径多数微細穴加工

微細穴加工においては、紡糸口金のように多数の微細穴を加工する場合がある<sup>4)</sup>、そこでコンデンサ静電容量 47pF を用いて加工物厚さ 0.2mm に設定直径  $\phi 100\mu\text{m}$  の微細穴を図 14 に示すような位置に加工を行った。

コンデンサ静電容量 47pF を用いて微細穴加工を行うと、(2×放電間隙)=40 $\mu\text{m}$  の穴直径の拡大が生じるので、設定直径  $\phi 100\mu\text{m}$  の微細穴加工を行うには、段付電極直径 d は (100 $\mu\text{m}$ —40 $\mu\text{m}$ ) より 60 $\mu\text{m}$  とすればよい。また、段付電極 d' は  $\phi 40\mu\text{m}$  とした。さらに、段付電極の長さは直径 d の部分を 5.0mm とし、直径 d' の部分を 0.8mm とした。

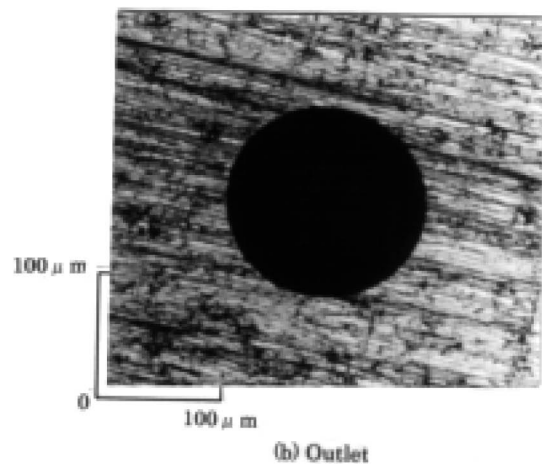
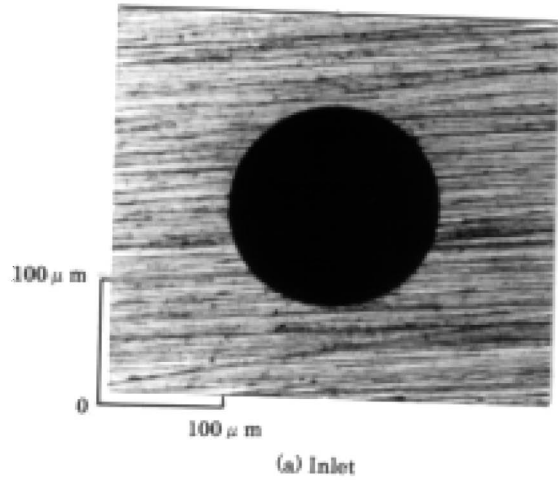


Fig.12 Machined micro hole by using assisting plate

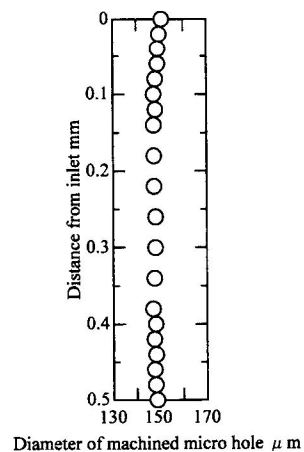


Fig.13 Relation between distance from inlet and diameter of machined micro hole by using assisting plate

加工に際しては、図の上段左端の穴を 1 番目に加工を行い、順次右側に加工を行っていく。次いで中段左端に 10 番目の加工を行い、同様に右側に加工を行っていく。最後に下段の 20 番目の加工を行う。加工穴の評価は 1 番目、10 番目、20 番目の穴直径と真円度および軸方向形状について行った。上記の加工条件で加工を行った結果を図 15 に示す。図よりわかるように、ほぼ設定位置に加工穴が形成されていることがわかる。また、微細穴の入口側と出口側の穴直径は 1 番目が  $\phi 102\mu\text{m}$  と  $\phi 103\mu\text{m}$ 、10 番目が

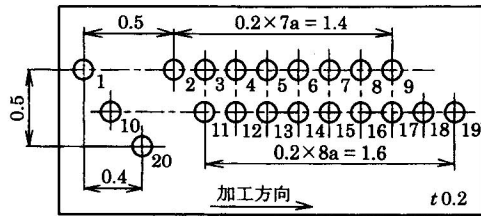


Fig. 14 Machining position of micro holes

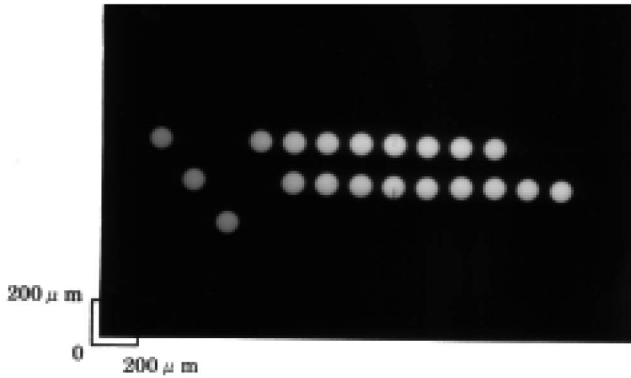


Fig. 15 Machined micro holes by using assisting plate

$\phi 101 \mu\text{m}$  と  $\phi 100 \mu\text{m}$ , 20 番目が  $\phi 102 \mu\text{m}$  と  $\phi 101 \mu\text{m}$  となり、ほぼ設定直径の微細穴となった。また、加工穴の入口側と出口側の真円度は 1 番目が  $1.6 \mu\text{m}$  と  $1.8 \mu\text{m}$ , 10 番目が  $2.0 \mu\text{m}$  と  $1.8 \mu\text{m}$ , 20 番目が  $1.8 \mu\text{m}$  と  $1.5 \mu\text{m}$  であった。さらに微細穴の軸方向形状は図 16 に示すように、それぞれいずれも入口側から出口側に向かってほぼストレートで、かつダレのない微細穴が形成されていることがわかる。

### 3. 結 言

本研究では、前報で穴のダレ抑制をする目的で新しく提案された補助プレートを用いて加工を行う方法を、中実電極を用いて加工を行う微細穴加工に適用した場合、微細穴の加工入口と出口に生じるダレ抑制に有効であるかについて実験的に検討を行った。

- (1) 従来のストレート電極を用いて微細穴加工を行うと、加工入口側の穴直径が大きくなり、加工入口側では放電屑による二次放電と電解現象によるダレが生じ、加工出口側では電解現象によるダレが生じる。
- (2) 従来の段付電極を用いて微細穴加工を行うと、ほぼストレートな穴形状の微細穴加工を行うことができるが、加工入口と出口にダレが生じる。

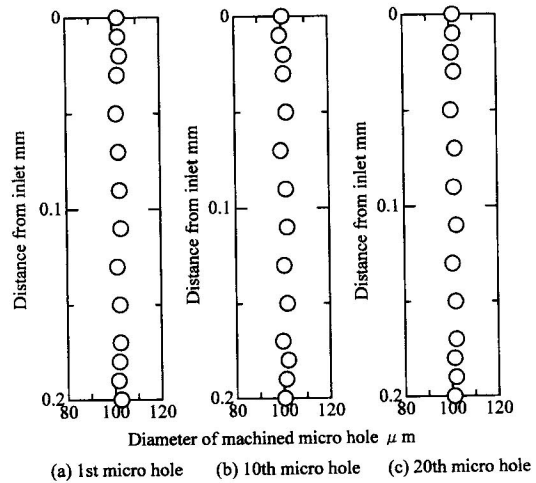


Fig. 16 Relation between distance from inlet and diameter of machined micro holes by using assisting plate

- (3) 補助プレートを用いて微細穴加工を行えば、加工穴のダレを抑制でき、ストレートな微細穴加工を行うことができる。
- (4) 補助プレートを用いて設定直径微細穴加工を行えば、設定直径で、かつダレのないストレートな微細穴を加工することができる。
- (5) 補助プレートを用いて設定直径多数微細穴加工を行えば、設定直径で、かつダレのないストレートな多数微細穴を加工することができる。

### 参考文献

- 1) 向山芳久, 「形彫・ワイヤ放電マニュアル」大河出版, 1989.
- 2) 中島宣世: 放電加工機による小径穴の高速・高精度加工, 機械技術, Vol.44(1996), No.5.42
- 3) 増沢隆久他 2 名: 放電微細加工における加工くずの影響, 精密機械, Vol.37(1971), No.9.680.
- 4) 香川勝一: 段付電極パイプによる放電直円筒穴加工に関する研究, 東海大学紀要工学部, Vol.37(1997), No.1.219.
- 5) 香川勝一: 段付電極によるストレート微細穴放電加工に関する研究, 精密工学会, Vol.65(1999), No.12.1793.
- 6) 高木六弥, 「金型工作法」, 日刊工業新聞社, 1987.
- 7) マイクロ加工技術編集委員会編, 「マイクロ加工技術-第 2 版-」, 日刊工業新聞社, 1988.
- 8) 香川勝一: 補助プレートを用いた放電加工穴のダレ抑制に関する研究, 東海大学紀要工学部, Vol.42(2002), No.1.63.