

# ジャンピングと総形段付電極を用いた 微細四角溝放電加工に関する研究

友田 佑亮\*<sup>1</sup>・香川 勝一\*<sup>2</sup>

## Micro-Square-Groove Machining by Electrical Discharge Machining Using Jumping and Formed Stepped Electrode

by

Yusuke TOMODA and Masakazu KAGAWA

(Received on Sept.29 , 2004 & accepted on Jan.25 , 2005)

### Abstract

In a previous paper, a method was proposed for machining a microslit and a square-groove by EDM (Electrical Discharge Machining) using a simply shaped and framed electrode or a plate electrode but a method was not proposed for machining a micro-square-groove. In this paper, a method is proposed for the machining of the micro-square-groove by EDM using a jumping and formed stepped electrode. The following experimental results were obtained. (1) The micro-square-groove can be machined by using a jumping and stepped electrode. (2) The differences in width at the inlet and outlet, the width of the profile and the depth of the machined micro-square-groove are diminished by using a formed stepped electrode.

**Keywords:** EDM, micro-square-groove, jumping, formed stepped electrode

### 1. 緒言

近年、マイクロマシンの製作を念頭においたマイクロ加工に関する研究が行われており、マイクロ加工の一つに微細四角溝加工がある。微細溝加工については超精密ナノ加工機を用いて微細三角溝および台形溝加工を行った研究<sup>1)</sup>あるいはレーザ加工機を用いて微細溝加工を行った研究<sup>2)</sup>などが報告されている。一方、単純成形電極<sup>3)</sup>を用いた放電加工による微細スリット加工あるいはフレーム電極<sup>4)</sup>を用いた四角溝加工に関する研究が報告されている。しかし、総形電極を用いた微細四角溝加工に関する研究は報告されていない。これは微細四角溝加工においては電極に回転を与えられないことから、放電屑が排出できず加工初期に短絡が生じ加工が進行しないことが原因していると考えられる。また、放電加工によるマイクロ加工では、コーナ半径が $30\mu\text{m}$ 以下になると超精密加工<sup>5)</sup>とされており、金型の加工面表面の凹凸は $2\mu\text{m}$ 程度が必要<sup>6)</sup>とされているのに対して、総形電極を用いた加工では電極消耗が大きく形状精度の低下<sup>3)</sup>が生じることが原因していると考えられる。

なお、前報<sup>7)</sup>において段付プレート電極を用いた四角溝加工について報告したが、この方法を用いれば精度の高い四角溝加工のことが示されている。

そこで、本研究では放電屑の排出効果があるとされているジャンピング<sup>8)</sup>と段付プレート電極を用いる加工法に基づいた総形段付電極を用いる加工法を微細四角溝加工に適用し、

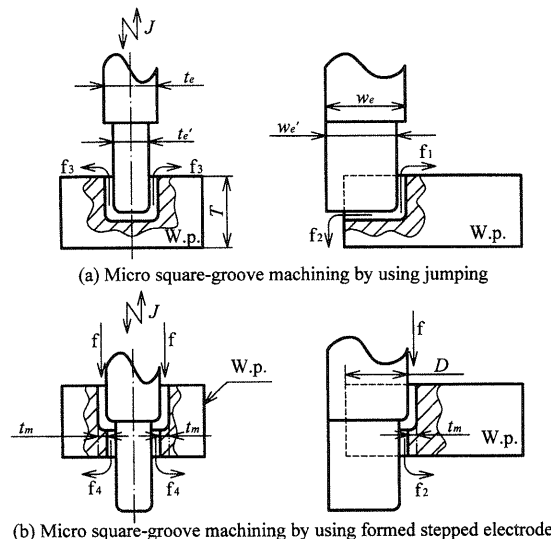


Fig.1 Micro square-groove machining by using jumping and formed stepped electrode

その効果について実験的に検討を行った。

### 2. 加工原理

本加工法は、微細四角溝加工中に電極に一定のジャンプ量とジャンプ周期を持つ連続したジャンピングを加え、かつ電極に総形段付電極を用いる加工法である。

本加工法の加工原理を図1に示す。図1は電極に連続したジャンピングJと、幅 $w_e'$ と厚さ $t_e'$ および幅 $w_e$ と厚さ $t_e$

\* 1 工学研究科機械工学専攻博士課程前期

\* 2 工学部動力機械工学科教授

からなる総形段付電極を用い、厚さ  $T$  の加工物 W.p. に加工深さ  $D$  の微細四角溝加工を行う場合について示す。

まず、加工は電極に連続したジャンピング  $J$  を加えて第 1 段すなわち幅  $w_e'$  と厚さ  $t_e'$  の部分で行われる。このジャンピングのポンプ効果により、図 1(a) に示すような加工液流れ  $f_1, f_2$  および  $f_3$  が生じ、放電屑が加工物と電極間から絶えず排出され、加工物と電極間を清浄な状態に保つことができるので、微細四角溝加工のできる加工法である。

次いで、第 1 段の電極部で溝を貫通した後、電極をさらに送り込むと、図 1(b) に示すように第 2 段の幅  $w_e$  と厚さ  $t_e$  の部分で加工が行われるが、このとき加工液は  $f \rightarrow f_2$  および  $f \rightarrow f_4$  と流れ、また加工量  $t_m$  が少ないので、放電屑による二次放電の影響が小さくなり、加工精度の高い微細四角溝加工のできる加工法である。

さらに、総形段付電極を用いることにより、電極を取り換えることなく段付電極の第 1 段と第 2 段でコンデンサ静電容量を変化させて加工を行えるので、加工精度の高い微細四角

溝加工ができる加工法である。

### 3. 実験方法

#### 3.1 試験片材料とその寸法・形状

加工物には SUS304 を用い、その寸法・形状は、縦 10 mm × 横 20 mm × 厚さ 0.5 mm の平板試験片とした。

#### 3.2 放電加工機の機構と操作方法

微細四角溝加工に用いた放電加工機の全体機構の概略を図 2(a) に示す。微細四角溝加工に際しては、まず加工槽⑦に加工物①を取り付けた後、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上部より加工液(脱イオン水、比抵抗  $5.0 \sim 12.0 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ ) を供給(供給量 190l/min)する。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  $F(0.13 \sim 4.00 \mu\text{m/s})$  で送る。なお、電極には図 2(b) に示すジャンピング量  $60 \mu\text{m}$  とジャンピング周期 0.17s の連続したジャンピング  $J$  をモータ⑤と偏心軸⑥により与えた。

#### 3.3 放電回路と放電加工条件

微細四角溝加工を行うための放電回路は直流電源、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と抵抗値は、それぞれ 100V と  $1000 \Omega$  の一定値とし、コンデンサ静電容量  $4300\text{pF}$  を用いて正極性で加工を行った。なお、電極の送り量は電極の消耗を考慮して、加工物厚さの 3 倍とした。

#### 3.4 総形ストレート電極の作成

総形ストレート電極は、 $\phi 2500 \mu\text{m}$  のタングステン製の丸棒を放電加工により図 3(a) に示す方法を用いて作成した。すなわち、電極に対して電極成形用の銅プレート  $x, y$  方向に送り込み、A, B, C 面を用いて加工し、電極先端部長さ  $l=3000 \mu\text{m}$  を設定した幅  $1800 \mu\text{m}$  と厚さ  $200 \mu\text{m}$  ( $\pm 5 \mu\text{m}$ ) に成形した。成形した電極の断面の一例を図 3(b) に示す。図に示す電極の厚さは  $202 \mu\text{m}$  である。またコーナ半径は図 3(c) より  $15 \mu\text{m}$  である。

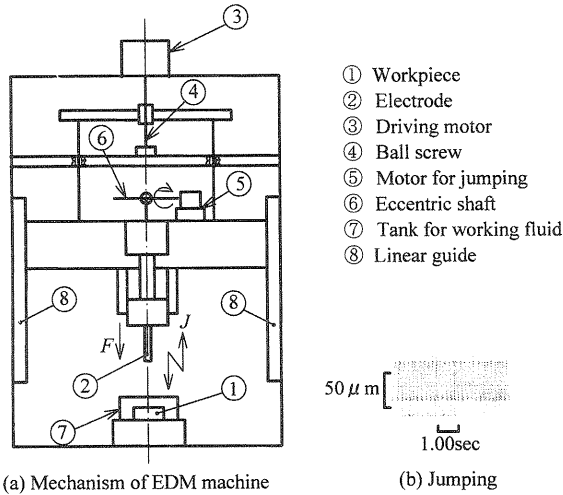


Fig.2 Mechanism of EDM machine and jumping

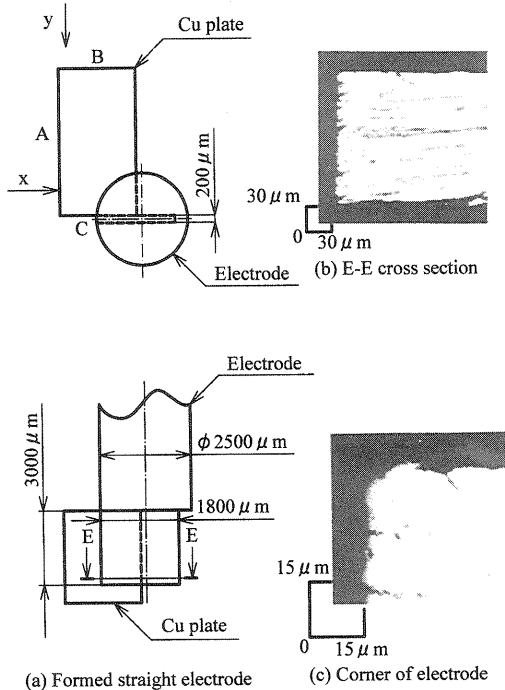


Fig.3 Dimensions and forms of formed straight electrode

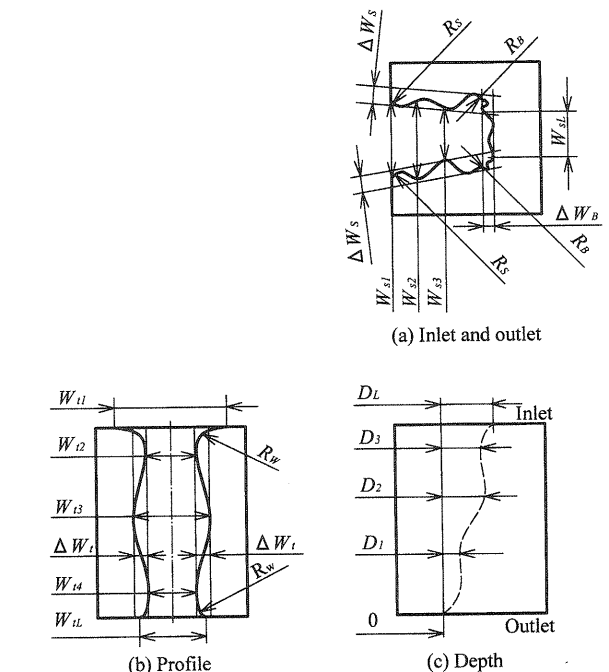


Fig.4 Evaluation method of machined micro square-groove

なお、総形ストレート電極の作成に用いた放電回路は 3.3 項と同一の RC 回路を用い、極性は逆極性とし、コンデンサ静電容量は 33pF を用いた。

3.5 加工溝の評価法

加工した微細四角溝については、加工開始面と終了面の溝幅、側面の溝幅および溝深さについて測定し評価を行った。

加工開始面と終了面の溝幅は、図 4(a)に示す任意の距離で  $W_{s1}, W_{s2}, \dots, W_{sl}$  を測定した。加工溝の側面の溝幅は、図 4(b)に示すように加工開始面から任意の距離で  $W_{l1}, W_{l2}, \dots, W_{ln}$  を測定した。加工溝の深さについては、図 4(c)に示すように加工終了面の溝底を基準とし、加工終了面から任意の距離で  $D_1, D_2, \dots, D_l$  を測定した。

上記溝幅および溝深さはマイクロビッカース硬さ試験機の測微接眼鏡を用いて測定した。

また、溝のコーナ半径  $R_s, R_b, R_p$  については、図 4(a)および(b)に示す箇所を測定した。さらに、溝の凹凸  $\Delta W_s, \Delta W_b$  および  $\Delta W_l$  についても図 4(a)および(b)に示すように、溝の内接線と外接線間の距離を測定した。

なお、溝のコーナ半径および凹凸は金属顕微鏡で拡大撮影 (280 倍) して測定した。

4. 実験結果および考察

4.1 微細四角溝加工におけるジャンピングの効果

微細四角溝加工におけるジャンピングの効果について検討するために、板厚 2mm の加工物にジャンピングを加えない

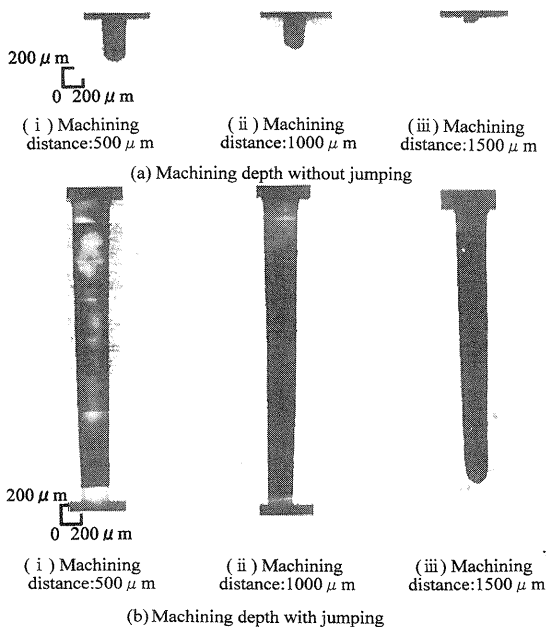


Fig.5 Machining depth without and with jumping

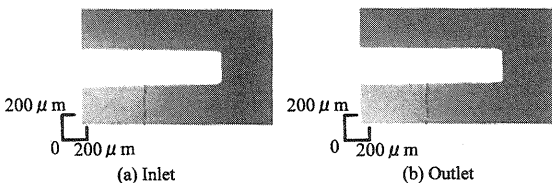


Fig.6 Machined micro square-groove by using formed straight electrode (Machining distance: 1000 micrometers)

い場合と加えた場合の加工距離  $D$  と加工深さの関係について実験を行った。

まず、ジャンピングを加えずに図 3 に示す総形ストレート電極とコンデンサ静電容量 4300pF を用い、加工距離を 500, 1000 および 1500 micrometers として微細四角溝加工を行った。

その結果を図 5(a)に示す。図より加工距離 500, 1000 および 1500 micrometers で加工深さが 406, 288 および 68 micrometers となり、加工距離が大きくなるにつれて加工深さが浅くなるのがわかる。

次いで、図 2 に示したジャンピングを加え、上記と同じ加工距離で加工を行った結果を図 5(b)に示す。図 5(b)の (i), (ii) より、ジャンピングを加えれば加工距離 500 micrometers と 1000 micrometers ではいずれも貫通した溝が加工できることがわかる。また、図 5(b)の (iii) に示すように、加工距離が 1500 micrometers の場合も 1600 micrometers の加工深さになることがわかる。

以上より、ジャンピングを加えて微細四角溝加工を行うと、ジャンピングによるポンプ効果によりジャンピングを加えない場合に比して加工深さの深い微細四角溝加工ができることがわかった。

4.2 総形ストレート電極による微細四角溝加工

総形ストレート電極と、コンデンサ静電容量 4300pF を用い、加工距離 500, 1000 および 1500 micrometers で微細四角溝加工を行った。

加工溝の一例として加工距離 1000 micrometers の場合について図 6 に示す。図 6 より、加工開始面と終了面の形状はほぼ四角な形状になっていることがわかる。

まず、上記 3 種の加工距離で加工を行った加工溝の加工開始面と終了面の溝幅を測定した結果について図 7(a)に示す。

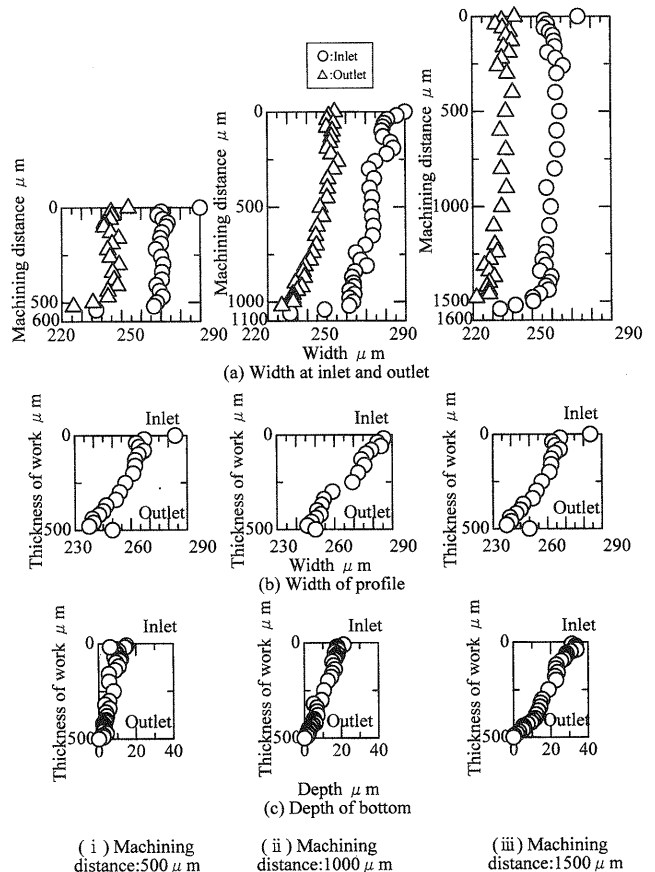


Fig.7 Width at inlet and outlet, width of profile and depth of machined micro square-groove by using formed straight electrode

図 7(a)より、いずれの加工距離の場合も加工終了面の溝幅に比して加工開始面の溝幅が大きいことがわかる。

次いで、上記加工溝の側面の溝幅について測定した結果を図 7(b)に示す。図 7(b)より、側面の溝幅はいずれの加工距離の場合も加工開始面から終了面に向かって減少し、テーパ形状になっていることがわかる。

上記の加工開始面と終了面の溝幅と側面の溝幅が加工開始面側で拡大するのは、いずれも図 1(a)の  $f_3$  の加工液流れによる電極→放電屑→加工物間で生じる二次放電が原因していると考えられる。

最後に、加工溝の深さについて測定した結果を図 7(c)に示す。図 7(c)より、加工溝の深さは、いずれの加工距離の場合も加工開始面側で深くなることがわかる。これは図 1(a)の  $f_1$  の加工液流れによる電極→放電屑→加工物間で生じる二次放電により加工開始面側で溝深さが深くなるものと考えられる。

### 4.3 総形段付電極による微細四角溝加工

前述したように、総形ストレート電極を用い、それにジャ

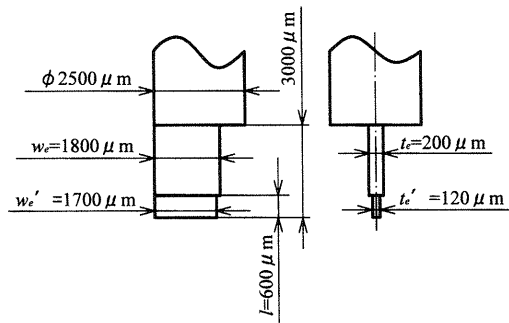


Fig.8 Dimensions and forms of formed stepped electrode

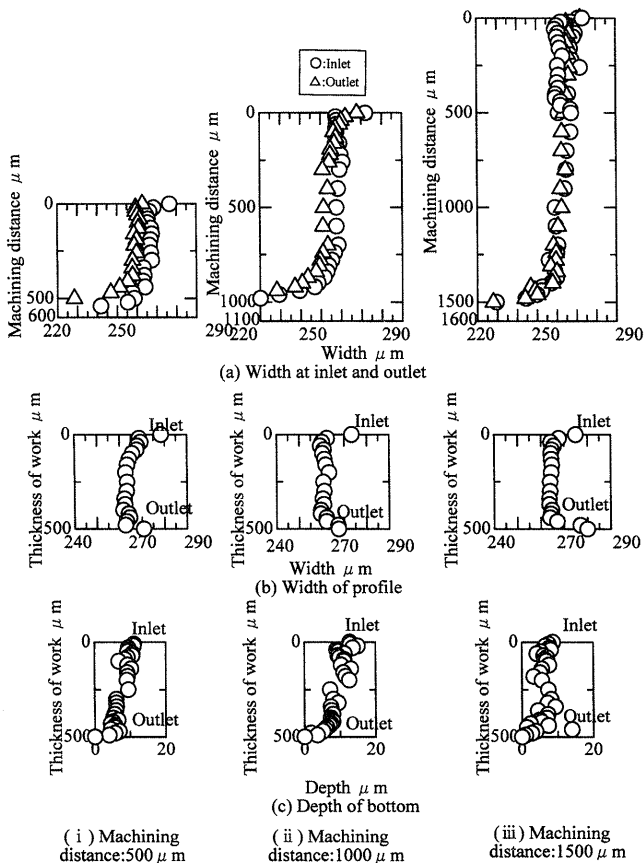


Fig.9 Width at inlet and outlet, width of profile and depth of machined micro square-groove by using formed stepped electrode

ンピングを与えて加工を行えば四角溝加工ができることがわかった。しかし、加工開始面と終了面の溝幅、側面の溝幅および溝深さはいずれも放電屑による二次放電の影響を受け、加工精度の低い四角溝になることがわかった。

そこで精度の高い微細四角溝加工を行う目的で、ジャンピングと総形段付電極を用いて微細四角溝加工を行った。

### 4.3.1 総形段付電極の設計

総形段付電極の寸法・形状は、図 8 に示すように加工物厚さと電極消耗を考慮して先端部の長さ  $l=600\mu\text{m}$  とし、厚さ  $t_e'$  については、総形ストレート電極を用いた場合の加工開始面と終了面の溝幅の差、側面の溝幅の差および溝深さの差の最大が約  $60\mu\text{m}$  であるので  $t_e'=120\mu\text{m}$  とした。また、幅  $w_e'$  は総形ストレート電極を用いた実験で、加工距離 500, 1000 および  $1500\mu\text{m}$  のときの溝深さが、いずれも約  $50\mu\text{m}$  深くなることから（電極消耗量十余裕）の  $1700\mu\text{m}$  とした。

### 4.3.2 総形段付電極による微細四角溝加工

(1) コンデンサ静電容量一定で加工を行った場合

上述した総形段付電極を用いて、コンデンサ静電容量  $4300\text{pF}$  を用いて加工を行った。

まず、加工開始面と終了面の溝幅を測定した結果について図 9(a)に示す。図 9(a)より、加工開始面の溝幅が加工終了面のそれに比して大きい、その差は総形ストレート電極を用いた場合より小さくなっていることがわかる。

次いで、側面の溝幅について測定した結果を図 9(b)に示す。図 9(b)より、加工開始面と終了面で電解現象によるダレが生じるが、その他の部分ではほぼストレートな形状になることがわかる。

上記加工開始面と終了面の溝幅の差が小さくなり、側面の

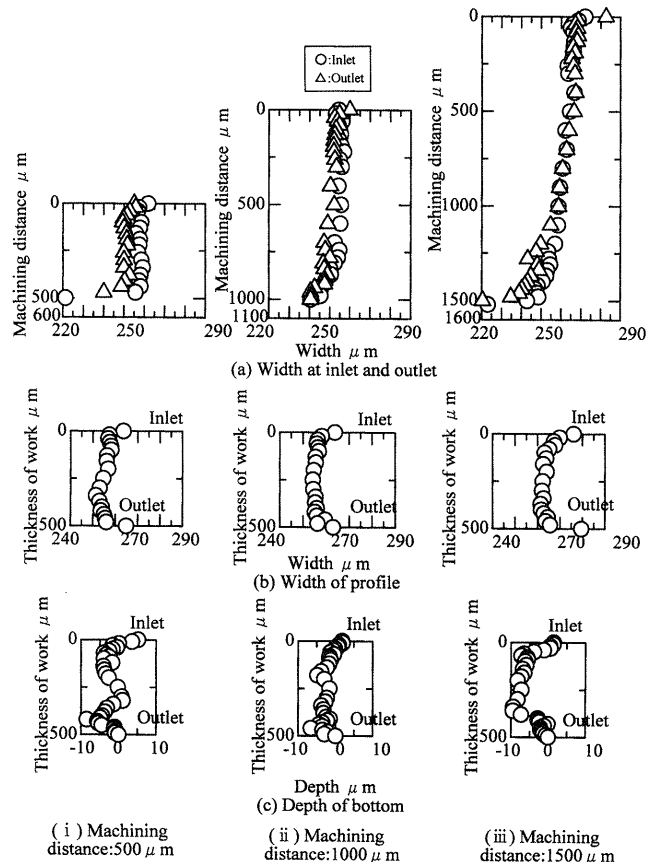


Fig.10 Width at inlet and outlet, width of profile and depth of machined micro square-groove by using formed stepped electrode (Condenser capacity:  $4300\text{pF} \rightarrow 47\text{pF}$ )

溝幅がほぼストレートになるのは、図 1(b)に示すように段付電極の第 1 段で溝を貫通した後に第 2 段で加工を行うため、加工量  $t_m$  が少なく、かつ加工液流れが図 1(b)の  $f \rightarrow f_1$  のように流れることにより電極→放電屑→加工物間で生じる二次放電の影響が小さくなることによるものと考えられる。

最後に、加工溝の深さについて測定した結果を図 9(c)に示す。図 9(c)より、いずれの加工距離の場合も加工開始面側で深くなるが、総形ストレート電極に比して深さの差は小さくなるのがわかる。これも、総形段付電極の第 1 段で溝を貫通した後に第 2 段で加工を行うため、加工量が少なくなり、二次放電の影響が小さくなるためと考えられる。

以上より、総形段付電極を用いれば、総形ストレート電極を用いた場合に比して四角溝の寸法・形状の精度が向上することがわかった。

(2) コンデンサ静電容量を変化させて加工を行った場合

前述したように総形段付電極を用いれば、四角溝の寸法・形状に、一定の精度向上が見られることがわかった。そこで、微細四角溝の加工精度をさらに向上させることを目的として、総形段付電極の第 1 段と第 2 段でコンデンサ静電容量を変化させて加工を行う方法について検討を行った。

一例として総形段付電極の厚さ  $t_e'$ 、幅  $w_e'$  による溝加工にはコンデンサ静電容量 4300pF を用い、厚さ  $t_e$ 、幅  $w_e$  による溝加工にはコンデンサ静電容量 47pF を用いる場合について以下に示す。なお、加工においては厚さ  $t_e'$  部の長さが  $l=600 \mu\text{m}$  なので、電極を  $600 \mu\text{m}$  送った時点で、コンデンサ静電容量を 4300pF から 47pF に変換して行った。

まず、加工開始面と終了面の溝幅を測定した結果を図 10(a)に示す。図 10(a)より、加工開始面の溝幅と終了面のそれとの差が、コンデンサ静電容量一定で、総形段付電極を用いて加工を行った場合に比してさらに小さくなっていることがわかる。これはコンデンサ静電容量を大→小と変化させることにより、加工量がさらに少なくなり、放電屑の影響が小さくなったことによると考えられる。

次いで、側面の溝幅について測定した結果を図 10(b)に示す。図 10(b)より、コンデンサ静電容量を一定にした場合と同様に、側面の溝幅はいずれの加工距離の場合も加工開始面と終了面で電解現象によるダレが生じるが、その他の部分ではほぼ一定になることがわかる。

最後に、加工溝の深さを測定した結果を図 10(c)に示す。

図 10(c)より、いずれの加工距離の場合も約  $\pm 10 \mu\text{m}$  のばらつきはあるが、ほぼ一定の溝深さになることがわかる。

以上より、総形段付電極を用い、コンデンサ静電容量を変化させて加工を行えば、精度の高い微細四角溝加工を行えることがわかった。

ここで、加工開始面と終了面の表面と底面、側面のコーナ半径を測定した結果を表 1 に示す。また、加工溝の凹凸について測定した結果を表 2 に示す。表 1 より、コンデンサ静電容量 47pF を用いれば 4300pF だけを用いて加工を行った場合に比してばらつき範囲が小さく、溝底のコーナ半径がほぼ  $35 \mu\text{m}$  となることがわかる。放電加工ではコーナ半径が  $30 \mu\text{m}$  以下になると超高精度加工<sup>9)</sup>とされているので、コンデンサ静電容量に 47pF を用いれば精度の高い加工が行えることがわかる。また、表 2 より、溝の凹凸は、総形段付電極でコンデンサ静電容量を 4300pF→47pF と変化させると溝の凹凸が小さくなることがわかる。放電加工による金型の加工面の凹凸は  $2 \mu\text{m}$  程度に仕上げるのが示されているが<sup>9)</sup>、上記コンデンサ静電容量 47pF を用いれば加工面が  $2 \mu\text{m}$  程度の精度の高い加工が行えることがわかる。

4.4 補助プレートを用いた微細四角溝加工

前述したように、加工液に脱イオン水を用いると、加工開始面と終了面では電解現象によるダレが生じる。そこで、ダレを抑制する方法として微細穴加工で提案されている補助プレートを用いる加工法<sup>9)</sup>を溝加工に適用した。この加工法は、図 11 に示すように加工開始面と終了面にダレ深さ  $D_d$  より厚い  $T'$  の補助プレートを取り付け、加工する方法である。この加工法を用いれば、補助プレートの部分でダレが生じるが、加工溝にはダレが生じないはずである。

以上の考えに基づき、厚さ  $200 \mu\text{m}$  の補助プレートと総形段付電極を用い、第 1 段にコンデンサ静電容量 4300pF を、第 2 段に 47pF を用いて、加工距離  $1000 \mu\text{m}$  の条件で微細四角溝加工を行った。加工開始面と終了面の溝幅および溝深さを図 12(a), (c)に示す。図より、加工開始面と終了面の溝幅と加工溝の深さは、総形段付電極を用い、コンデンサ静電容量を変化させた場合とほぼ同様であるが、側面の溝幅は同図(b)に示すようにほぼストレートになり、かつ加工開始面と終了面でダレが生じないことがわかる。

以上より、補助プレートを用いて微細四角溝加工を行えば、側面の溝幅がストレートで、かつダレのない微細四角溝を加

Table 1 Radius of corner of machined micro square-groove

Electrode	Machining depth $\mu\text{m}$		$R_S$ $\mu\text{m}$	$R_B$ $\mu\text{m}$	$R_W$ $\mu\text{m}$
	Formed straight electrode (Condenser capacity: 4300pF)	500	Inlet	12.2/24.3	37.8/48.6
Outlet			18.9/37.8	48.6/44.6	8.1/23.0
1000		Inlet	29.0/ 9.5	54.0/13.5	16.2/23.0
		Outlet	6.8/48.6	9.5/18.9	8.8/14.9
1500		Inlet	21.6/27.0	54.0/48.6	37.8/40.6
		Outlet	5.4/48.7	27.0/44.6	6.7/23.0
Formed stepped electrode (Condenser capacity: 4300pF)	500	Inlet	37.8/18.9	48.6/40.5	14.9/14.9
		Outlet	6.8/10.8	48.6/67.6	13.5/ 8.1
	1000	Inlet	37.8/13.5	51.4/54.1	18.9/21.6
		Outlet	21.6/23.0	54.1/48.6	4.0/17.6
	1500	Inlet	21.6/12.1	25.7/48.6	23.0/17.6
		Outlet	8.1/ 6.6	86.5/29.7	13.5/13.5
Formed stepped electrode (Condenser capacity: 4300pF→47pF)	500	Inlet	15.3/ 6.3	33.8/28.4	5.4/13.5
		Outlet	5.6/ 9.7	31.1/29.7	4.7/12.3
	1000	Inlet	17.6/14.9	16.2/35.1	9.5/13.5
		Outlet	6.8/ 5.4	35.1/33.8	4.1/12.2
	1500	Inlet	16.2/13.5	37.8/33.8	13.5/16.2
		Outlet	9.5/13.5	33.8/44.6	9.5/10.8

Table 2 Irregularity of machined micro square-groove

Electrode	Machining depth $\mu\text{m}$		$\Delta W_S$ $\mu\text{m}$	$\Delta W_B$ $\mu\text{m}$	$\Delta W_I$ $\mu\text{m}$
			Formed straight electrode (Condenser capacity: 4300pF)	500	Inlet
Outlet	3.4/3.4	6.3			
1000	Inlet	4.5/6.1		3.8	2.5/3.8
	Outlet	6.9/2.5		5.0	
1500	Inlet	5.1/5.8		2.5	4.4/1.9
	Outlet	6.3/4.2		6.3	
Formed stepped electrode (Condenser capacity: 4300pF)	500	Inlet	3.1/2.5	3.8	3.8/3.8
		Outlet	4.4/4.4	3.1	
	1000	Inlet	3.8/4.4	3.1	1.9/3.8
		Outlet	1.5/2.5	2.5	
	1500	Inlet	3.1/2.5	3.8	2.5/2.5
		Outlet	3.8/1.9	2.5	
Formed stepped electrode (Condenser capacity: 4300pF→47pF)	500	Inlet	3.1/2.5	0.9	1.3/1.3
		Outlet	1.3/1.1	1.3	
	1000	Inlet	1.9/2.9	1.3	1.4/1.9
		Outlet	0.9/0.6	1.6	
	1500	Inlet	1.3/1.5	2.5	1.0/1.0
		Outlet	1.3/1.3	1.6	

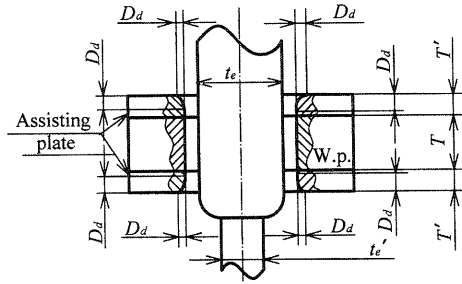


Fig.11 Schematic explanation micro-square-groove machining by using formed stepped electrode and assisting plate

工できることがわかった。

## 5. 結 言

本研究では、ジャンピングと段付プレート電極を用いる加工法に基づいた総形段付電極を用いる加工法を微細四角溝加工に適用し、その効果について実験的に検討を行った。その結果、以下の事柄が明らかになった。

- 1) ジャンピングを与えて微細四角溝加工を行えば、ジャンピングを与えない場合に比して深い微細四角溝加工ができる。
- 2) ジャンピングと総形ストレート電極を用いて微細四角溝加工を行うと、加工開始面と終了面の溝幅、側面の溝幅および溝深さに相違が生じる。
- 3) ジャンピングと総形段付電極を用いてコンデンサ静電容量を一定にして微細四角溝加工を行うと、溝幅の差が減少し、溝深さの差も減少する。
- 4) ジャンピングと総形段付電極を用いてコンデンサ静電容量を変化させて微細四角溝加工を行うと、精度の高い微細四角溝加工ができる。

### 参考文献

- 1) 沢田 潔他 4 名：超精密ナノ加工機の開発，精密工学会誌，68，6(2002) 761.

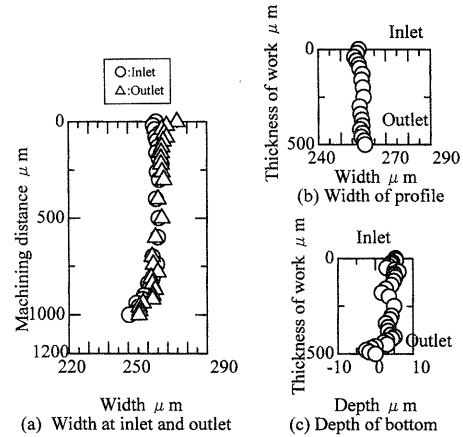


Fig.12 Width at inlet and outlet, width of profile and depth of machined micro square-groove by using formed stepped electrode and assisting plate (Machining distance: 1000 μm, Condenser capacity: 4300pF→47pF)

- 2) 大澤 健一郎，戸倉 和：エキシマレーザ照射による微小溝の形成，精密工学会誌，64，1(1998) 121.
- 3) 増沢 隆久他 2 名：単純成形電極による三次元微細放電加工，電気加工学会誌，31，6(1997) 18.
- 4) 南 久他 4 名：金型用亜鉛合金の高速放電加工—フレーム電極による三次元創成加工—，電気加工学会誌，37，84(2003) 17.
- 5) 阿久根 光明他 2 名：超高精度型彫放電加工機 MA2000 について，電気加工学会誌，36，83(2002)，46.
- 6) 毛利 尚武他 6 名：粉末混入加工液による放電加工，電気加工学会誌，25，49(1991)，47.
- 7) 根岸 正和，香川 勝一：段付プレート電極による四角溝放電加工に関する研究，東海大学紀要工学部，43，1(2003) 41.
- 8) 許 東亜他 2 名：放電による微細深穴加工の研究—ジャンプフラッシング機能の応用—，電気加工学会誌，35，79(2001) 32.
- 9) 富澤 貴之他 2 名：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，東海大学紀要工学部，43，2(2003) 41.