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*

香 川 勝 一**

Study on Straight Micro Hole Machining by EDM Using Stepped Electrodes

Masakazu KAGAWA

It has been known that when micro hole machining was carried out by EDM using a straight electrode, the hole diameters became different at the inlet and outlet of the machining. This shape irregularity is caused by wear of the electrode and eroded particles. In this paper, a new method is proposed for diminishing the diameter differences of the micro hole and forming the straight micro hole by EDM using a stepped electrode. Following experimental results were obtained. (1) The micro hole diameters become different at the inlet and outlet of the machining by using a straight electrode. (2) The difference in the diameters of a micro hole is diminished and the straight micro hole of desired diameter can be machined by using a stepped electrode.

Key words: EDM, micro hole machining, stepped electrode, straight micro hole

1. 緒 言

微細穴加工を行うにはレーザ加工法、電子ビーム加工法等¹⁾があるが、放電加工も導電性材料であれば硬さに関係なく、非接触で加工でき、かつバリも生じないことから、微細穴加工に用いられている²⁾。

ストレート電極を用いて微細穴放電加工³⁾を行うと、電極消耗⁴⁾と放電くず⁵⁾の影響により加工入口側の穴直径が出口側のそれに比して大きくなるので、電極を加工物厚さの2倍送る方法が用いられている。この方法は、電極消耗によって小さくなる出口側の穴直径を改善するのに効果があるが、放電くずの影響を受けて拡大する入口側の穴直径の改善には効果がなく、入口側と出口側の穴直径は等しくならない。よって、厚さ100~200 μm の箇所に直径 $\phi 100 \sim \phi 300 \mu\text{m}$ の微細穴を寸法公差 $\pm 1 \sim 2 \mu\text{m}$ で穴をあける必要がある紡糸口金のような場合⁶⁾には、電極に揺動を与えて加工を行い、入口側と出口側の穴直径を等しくする揺動加工法⁴⁾が用いられている。しかし、揺動を与えて微細穴加工を行う方法では加工機に揺動機構を設けるとともに、揺動量の制御を行う必要があるため、加工機は大型化する。

そこで本研究では、微細穴の入口側と出口側の穴直径差を減少させ、できるだけストレートな微細穴の加工を実現する目的で、段付電極による微細穴加工法を新たに提案し、その効果について実験的に検討を行った。

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 $\square 10\text{mm} \times \text{厚さ } 200 \mu\text{m}$ 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1に

* 原稿受付 平成11年4月5日

** 正 会 員 東海大学工学部 (平塚市北金目1117)

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、加工液タンクより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で送るとともに、電極を電極回転用モータ⑤により回転(1200rpm)させる。電極の回転は放電くずの排出を促進させるためと、微細穴の真円度を向上させる目的で与えた。なお、電極の回転振れはダイヤルゲージを用いて測定した結果 $0.5 \mu\text{m}$ 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100Vと1000 Ω の一定値とし、コンデンサの静電容量を470, 150および100pFの3種とした。

上記項目およびその他の加工条件を表1に示す。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2倍とした。

2.4 ストレート電極の作成

ストレート電極は、 $\phi 1\text{mm}$ のタングステン丸棒を放電加工により、図2に示す方法を用いて作成した。まず、電極に回転

Fig.1 Mechanism of EDM machine

Table 1 Machining conditions

Workpiece	SUS304, □10mm×t200μm
Material of electrode	W
Diameter of straight electrode	φ100μm
Diameter of stepped electrode	φ90, 70, 50, 30μm
Feed of electrode	1.33μm/s
Rotation of electrode	1200rpm
Working fluid	De-ionized water
Specific resistance of working fluid	6.5-9.2×10 ⁵ Ω·cm
Amount of flow of working fluid	150ml/min
RC circuit	
•Unload voltage	100V
•Circuit resistance	1000Ω
•Condenser capacity	470, 150, 100pF
•Polarity	Workpiece(+), Electrode(-)

Fig.2 Machining of straight electrode

(1200rpm)を与え、電極成形用銅板を x , y 方向に送り込み、電極先端部長さ $l=2.5\text{mm}$ を設定した直径 $d=\phi 100\mu\text{m}$ ($\pm 2\mu\text{m}$) に成形した。なお、電極作成時の放電回路は表 1 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 30pF を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 ストレート電極による微細穴加工

ストレート電極を用いて微細穴加工を行うときの微細穴の形状を図 3 に示す。図に示した微細穴の入口側と出口側の穴直径は、コンデンサ静電容量 $470, 150$ および 100pF で、それぞれ $185.1\mu\text{m}$ と $135.2\mu\text{m}$, $181.2\mu\text{m}$ と $132.9\mu\text{m}$, $150.1\mu\text{m}$ と $130.2\mu\text{m}$ となり、いずれのコンデンサ静電容量の場合も出口側の穴直径に比して入口側のそれが拡大することがわかる。

ここで上記コンデンサ静電容量のときの加工物と電極側面間の放電間隙は、コンデンサ静電容量 $470, 150$ および 100pF で、 $18.2\mu\text{m}$, $15.8\mu\text{m}$, $14.8\mu\text{m}$ であった。なお、加工物と電極側面間の放電間隙は、まず加工物と電極を短絡させ、次いで電源を切った後電極を加工物から任意の距離離し、最後に電極を加工物に近付けて放電を行ったときの加工物と電極間の距離をダイ

Fig.3 Machined micro hole by using straight

ヤルゲージで測定した。
上記微細穴の出口側の穴直径は、いずれのコンデンサ静電容量の場合も電極の直径にほぼ放電間隙の 2 倍を加えた穴直径になっていることがわかる。また、入口側の穴直径は放電間隙と放電くずの影響を受けて拡大し、放電くずによって生ずる穴の直径拡大代は、コンデンサ静電容量 $470, 150$ および 100pF

Fig. 4 Relation between distance from inlet and diameter of machined micro hole by using straight electrode

で、 $50\mu\text{m}$ 、 $48\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ であることがわかる。

上記微細穴の真円度を内接円中心法⁷⁾を用いて測定した結果、微細穴の入口側と出口側の真円度は、コンデンサ静電容量 470、150 および 100pF で、それぞれ $5.8\mu\text{m}$ と $1.4\mu\text{m}$ 、 $4.6\mu\text{m}$ と $0.5\mu\text{m}$ 、 $3.2\mu\text{m}$ と $0.5\mu\text{m}$ となり、いずれのコンデンサ静電容量の場合も微細穴の入口側の真円度が出口側のそれに比べて悪くなることがわかった。

次いで、微細穴の軸方向の形状について検討する目的で、微細穴の縦割を行い、加工入口側から出口側に向かって $20\mu\text{m}$ 間隔で穴直径を測定した結果について図 4 に示す。なお、図は加工後の穴中心を見つけることは困難であるので穴直径で示している。図より、ストレート電極による微細穴の軸方向の形状は、いずれのコンデンサ静電容量の場合も加工出口側の穴直径に比べて入口側のそれが大きく、入口側から出口側に向かって減少していくことがわかる。

Fig. 5 Wear of electrode
(Condenser capacity: 470pF)

最後に、微細穴加工後のストレート電極の消耗の一例をコンデンサ静電容量 470pF の場合について図 5 に示す。図より、微細穴加工後の電極は先端部が約 $10\mu\text{m}$ 消滅し、残った先端部は丸みのついた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

Fig. 6 Schematic explanation for micro hole machining by using straight electrode

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るということが確かめられた。このような微細穴が形成される理由については以下に示す簡単なモデルを用いて説明^{4) 5)}されている。

図 6 は、厚さ t の加工物 w に直径 d のストレート電極で微細穴加工を行う場合について示す。

まず、微細穴が貫通する直前の形状を図 6(a) に示す。図よりわかるように、電極はその先端部分が消耗し、穴の底の部分は電極の先端部を転写した形状になる。また、加工液 f は入口側 ① から排出され、かつその加工液には放電くずが含まれているので、①側の穴入口では電極→放電くず→加工物と放電が生じ、それにより①側の穴直径は電極先端部の穴直径に比べて拡大する。

次いで、電極が加工物を貫通した直後の微細穴の形状を図 6(b) に示す。図より、電極が加工物を貫通すれば、加工液は 2.2 項で述べたように①側から②側に流れるようになるので、①側の穴入口では電極→放電くず→加工物間の放電は生じなくなる。なお、微細穴が貫通しても電極先端部の消耗があるため、②側の穴直径は①側のそれに比べて小さくなる。そこで、微細穴加工においては電極の消耗を考慮して、電極を加工物厚さの 2 倍送り、①側の穴直径と②側のそれとの差を小さくする方法が用いられている。

最後に、電極を加工物厚さの 2 倍送ったときの微細穴形状を図 6(c) に示す。図より、電極を加工物厚さの 2 倍送れば①側の穴直径と②側のそれとの差は小さくなることがわかる。しかし、上述したように①側の穴入口では電極→放電くず→加工物間の放電により穴の拡大が生じているので、放電くずの影響を受けない②側の穴直径に比べて①側のそれが大きい貫通穴が形成されることがわかる。すなわち、微細穴の入口側の穴直径は電極の直径 $d + 2 \times (\text{放電間隙 } d_1 + \text{放電くずによって生ずる穴の半径拡大代 } d_2)$ となり、出口側の穴直径は電極の直径 $d + (2 \times d_1)$ となる。

3.2 段付電極による微細穴加工

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るので、微細穴の入口側と出口側の穴直径差を減少させ、できるだけストレートな微細穴を加工する方法として、ここに段付電極による微細穴加工法を新たに提案する。この方法による微細穴の加工過程を以下に述べる。

Fig. 7 Schematic explanation for micro hole machining by using stepped electrode

ストレート電極の場合と同様に、厚さ t の加工物 w に直径 d と d' からなる段付電極を用いて微細穴加工を行う場合について図 7 に示す。ただし、上記ストレート電極の微細穴加工の実験結果より、直径 d' の最大直径は $d - (2 \times d_2)$ とする。

まず、図 7(a) は直径 d' によって加工される微細穴の形状を示す。図に示すように、直径 d' の電極により形成される微細穴は、前記ストレート電極による加工の場合と同様に、②側の穴直径に比して①側のそれが大きくなる。

次いで、図 7(b) に示すように、電極をさらに送り込むと、直径 d の電極によって①側から微細穴加工が行われる。このときの微細穴加工においては、加工液 f は②側より排出されるようになっているので、①側の穴入口においても放電くずの影響を受けず、穴直径の拡大は生じないはずである。

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、図 7(c) に示すような①側の穴直径と②側のそれが等しい微細穴になるはずである。このときの微細穴の入口側と出口側の穴直径は、いずれも $d + (2 \times d_1)$ となるはずである。

Fig. 8 Machining of stepped electrode

Fig. 9 Example of stepped electrode
($d = \phi 100 \mu\text{m}$, $d' = \phi 70 \mu\text{m}$)

Table 2 Diameter at the inlet and outlet of machined micro hole

Diameter of stepped electrode $d' \mu\text{m}$	Condenser capacity pF		
	470	150	100
90	161.2/134.6	154.8/135.1	145.2/134.1
70	154.0/135.6	142.3/133.3	131.4/130.4
50	136.3/135.4	134.8/134.0	131.4/131.2
30	135.4/135.6	134.4/134.2	131.1/130.9
Diameter at the inlet μm /Diameter at the outlet μm			

Table 3 Circularity deviation at the inlet and outlet of machined micro hole

Diameter of stepped electrode $d' \mu\text{m}$	Condenser capacity pF		
	470	150	100
90	5.2/1.2	4.6/0.5	2.4/0.5
70	3.3/1.1	3.2/0.6	0.5/0.6
50	1.3/1.4	0.5/0.6	0.6/0.6
30	1.4/1.3	0.6/0.6	0.5/0.5
Circularity deviation at the inlet μm /Circularity deviation at the outlet μm			

3.2.1 段付電極の設計

図 5 に示したように、放電加工後の電極はわずかであるがその先端部が消耗するので、図 8 に示すように段付電極の d' の長さは(電極消耗長さ+試験片厚さの 2 倍+余裕)の 0.5mm とした。また、段付電極の直径 d' は同図に示す 4 種とした。

段付電極は、2.4 項のストレート電極の作成方法と全く同じように電極の先端部 2.5mm を直径 $\phi 100 \mu\text{m}$ に仕上げた後、さらに先端部 0.5mm を設定した直径 d' ($\pm 2 \mu\text{m}$) にコンデンサ静電容量 30pF を用いて成形した。段付電極の作成例を図 9 に示す。作成した段付電極の直径 d および d' の寸法公差は設定した直径に対していずれも $\pm 2 \mu\text{m}$ 以内であった。

上記製作した段付電極を用いて加工を行ったときの段付電極の直径 d' と入口側と出口側の穴直径の変化を表 2 に示す。表より、いずれのコンデンサ静電容量の場合も、3.1 項に示したストレート電極による入口側と出口側の穴直径差に比して、段付電極による入口側と出口側のそれが減少していることがわかる。また、コンデンサ静電容量 470pF と 150pF では段付電極の直径 d' が $50 \mu\text{m}$ 以下において、100pF では d' が $70 \mu\text{m}$ 以下において、入口側と出口側の穴直径がほぼ一定になることがわかる。

上記の微細穴の入口側と出口側の真円度を測定した結果を表 3 に示す。表より、いずれのコンデンサ静電容量の場合も、3.1 項に示したストレート電極による入口側の真円度に比して段付電極による入口側のそれが減少していることがわかる。また、コンデンサ静電容量 470pF と 150pF では段付電極の直径 d' が $50 \mu\text{m}$ 以下において、100pF では d' が $70 \mu\text{m}$ 以下において、入口側と出口側の真円度がほぼ一定になることがわかる。

以上より、微細穴の入口側と出口側の直径が等しくなると、真円度も等しくなることがわかった。

ここで、上記段付電極を用いて加工を行ったときの微細穴の軸方向の形状について検討する目的で、ストレート電極の場合と同様にして穴の縦割を行った後、穴直径の測定を行った。その結果を図 10 に示す。図より、いずれのコンデンサ静電容量の場合も段付電極の d' が小さくなるにつれて微細穴の入口側の直径が小さくなり、コンデンサ静電容量 470pF および 150pF

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

では $50\mu\text{m}$ 以下において、 100pF では $70\mu\text{m}$ 以下において、ほぼストレートな穴形状になっていることがわかる。

以上より、3.1 項のストレート電極による実験で示されたように、放電くずによって生ずる穴の入口側の直径拡大率がコンデンサ静電容量 $470, 150$ および 100pF で、 $50\mu\text{m}$, $48\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$ であることから、いずれのコンデンサ静電容量の場合も段付電極の直径 d' を $(d: \phi 100\mu\text{m}) - (2 \times d_2)$ 以下とすれば、加工入口側と出口側の微細穴の直径はいずれも $(d: \phi 100\mu\text{m}) + (2 \times d_1)$ となり、ストレートな微細穴になることがわかった。

3.2.2 段付電極による設定直径微細穴の加工

前述した段付電極による微細穴加工に関する実験結果に基づいて、コンデンサ静電容量 100pF を用いて設定直径 $\phi 100\mu\text{m}$ の微細穴を加工する場合について以下に述べる。

前述したように、コンデンサ静電容量 100pF を用いて微細穴加工を行うと、 $(2 \times d_1) = 30\mu\text{m}$ の穴直径の拡大が生ずるので、設定直径 $\phi 100\mu\text{m}$ の微細穴加工を行うには、段付電極の直径 d は $(100\mu\text{m} - 30\mu\text{m})$ より $\phi 70\mu\text{m}$ とすればよい。また、コンデンサ静電容量 100pF を用いたときの $(2 \times d_2)$ が $20\mu\text{m}$ であることより、段付電極の直径 d' は $\phi 50\mu\text{m}$ とした。

上記条件で微細穴加工を行った結果を図 11 に示す。図の (a) および (b) に示すように、穴の入口側と出口側の穴直径は $\phi 100.8\mu\text{m}$ と $\phi 100.4\mu\text{m}$ となり、ほぼ設定直径の微細穴になっ

Fig.11 Machined micro hole by using stepped electrode ($d = \phi 70\mu\text{m}$, $d' = \phi 50\mu\text{m}$)

た。また、微細穴の入口側と出口側の真円度は $0.6\mu\text{m}$ と $0.5\mu\text{m}$ になった。さらに、微細穴の軸方向の形状は図 11(c) に示すように、穴の入口側から出口側に向かってほぼ直線的な形状になり、ストレートな微細穴が形成されていることがわかる。

4. 結 言

本研究では、微細穴の入口側と出口側の穴直径差を減少させ、できるだけストレートな微細穴を加工する目的で、段付電極による微細穴加工法を新たに提案し、その効果について実験的に検討した。その結果以下の事柄が明らかとなった。

- (1) ストレート電極を用いて微細穴加工を行うと、加工入口側と出口側で穴直径が相違する。
- (2) 段付電極を用いて微細穴加工を行えば、微細穴の入口側と出口側の穴直径がほぼ等しくなり、設定直径のストレート微細穴を加工できる。また、ストレート微細穴の真円度は加工入口側と出口側でほぼ等しくなる。

参 考 文 献

- 1) 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)。
- 2) C. van Osenbruggen: Philips Tech. Rev., 30, 6 (1969) 195.
- 3) 増沢隆久：微細放電加工，精密工学会誌，57, 6 (1991) 31.
- 4) 中島宣洋：放電加工機による小径穴の高速・高精度加工，機械技術，44, 5 (1996) 42.
- 5) 増沢隆久ほか2名：放電微細加工における加工くずの役割，精密機械，37, 9 (1971) 680.
- 6) 海野文隆，武田幸三：放電加工による微細穴加工，機械と工具，(1994) 50.
- 7) 日本機械学会編：機械工学便覧 B2 加工学，加工機器，丸善，(1992)。