マイクロパルス電解加工の研究*

阿部敬行**, 正木 健**, 和田紀彦**, 増沢隆久***

Study on Micro-ECM with Short Pulses

Takayuki ABE, Takeshi MASAKI, Toshihiko WADA and Takahisa MASUZAWA

Abstract

Electrochemical machining (ECM) has the advantage that it can quickly produce mirrorlike surfaces without causing any additional damage and stress on the workpiece surface. However, it has a limit in machining accuracy in the machining of microshapes. In this study, short current pulses of microsecond order are introduced to achieve selective dissolution and their effectiveness on the precision of machining is experimentally investigated. The differences among various electrode materials are also tested in terms of durability and machining accuracy, changing machining gap and pulse duration. As a result, it was found that titanium is a suitable material for the electrode for micro-ECM. The conditions of 20 μ s pulses and a 5 μ m machining gap could achieve the machining of 5- μ m-deep micropatterns of 50/50 μ m line/space into stainless steel.

Keywords: electrochemical machining, micromachining, ECM, pulsed ECM, short pulse

1. 緒言

デジタル家電を支える電子機構デバイスには、更なる小型化・多様化に伴い高精度な3次元マイクロ形状が求められる。たとえばインクジェットプリンターノズルにおいては、微小なバリがインクの吐出精度を大きく落とすことになり、ノズル径の微小化に伴い面粗さにおいてもサブミクロンからナノメートルのレベルが要求されている。従来、筆者らは放電加工のマイクロ化に取り組み、最小5 μ mまでの微小穴加工を実現し、表面粗さはステンレス鋼への加工で0.2 μ mRzを達成してきているが、さらに良好な形状・面粗さ精度が求められてきている。そこで、より高精度な3次元マイクロ形状加工を実現するため、電解加工技術に着目

した。

電解加工は工具消耗がなく、加工変質層の発生がない、加工面として鏡面が得られるという特徴がある。しかし、従来は極間のギャップ（以下、単にギャップとする）が数十ミクロン、印加パルスが数ミリ秒と大きく、形状転写精度は十分ではない。

そこで、本研究では電解加工の特徴を生かし、かつ高精度マイクロ加工の実現に向け、より短パルスとなるマイクロ秒パルスを用いその加工特性を評価した。

2. 開発のねらい

Fig.1に電解加工の概念図を示す。電解加工は、電解液に浸された工具電極とワーク間を電解質抵抗部と電気二重層と考えた場合、電解質抵抗部の抵抗値（以下、極間抵抗とする）はギャップにほぼ比例すると考えられる。電気二重層は等価的にコンデンサと見なすことができるが、容量はギャ

* 電気加工学会全国大会（2004）にて発表

** 松下電器 生産革新本部
（大阪府門真市松葉町2-7）

*** 東京大学 生産技術研究所
（東京都目黒区駒場4-6-1）

ップによらないと考えられている。このため、図のように電極底面および側面から電気力線に沿って工作物面に到る二つの経路を考えると各抵抗部の抵抗値は $R_n < R_w$ となり、電極底面部に対応する電気二重層の方が早く充電されて電解反応開始電位に達することになる。従って短パルス化により電解反応の選択性を高めることができる⁽¹⁾。

Fig. 1 Principle of pulsed ECM.

電解加工のさらなる高精度化のためには次の技術課題を解決する必要がある。

距離依存による電解反応の選択性を高めるためにはギャップを数十～数ミクロンオーダーに制御する必要がある。そして、従来の電解加工に比べ加工精度を向上させるためには印加電圧を数百～数十マイクロ秒に短パルス化し、選択的電解反応の制御性を向上させる必要がある。また、電解加工を用いた高精度転写加工を実現するためには高精度マイクロ形状を有する電極が必要となる。

本研究ではこれらの課題解決策として、電気的接触検出を用いた位置決め技術、ナノ秒パルス回路⁽²⁾を応用した定電圧マイクロ秒パルス回路、微細放電加工技術による数十ミクロンオーダーの微細パターンを有する電極作製技術を適用する。これにより、電解加工による加工精度をサブミリオーダーから数十ミクロンオーダーへ向上を図る。

3. 実験装置と方法

3-1. 装置構成

Fig. 2 に装置構成を示す。電源としてマイクロ秒パルス電源回路を用い、カソード(-)に電極、アノード(+)にワークを接続した。電極 $\phi 4.0\text{mm}$

の中心部に $\phi 0.5\text{mm}$ のフラッシング用吐出口を施した。ワーク材料として SUS304 を使用し、電解液として腐食性の低い中性塩電解液の硝酸ナトリウム 30wt% を用いた。

極間電圧はワーク(+)と電極(-)の近傍にパッシブプローブを接続し、オシロスコープを用いて測定した。極間電流は電流プローブを電極(-)に接続し、オシロスコープを用いて測定した。オシロスコープには (IWATSU, DS-8812)、電流プローブには (TEKTRONIX, TM501) を使用した。

Fig. 2 Experimental device composition.

3-2. パルス電源仕様

マイクロ秒パルス回路仕様を Table. 1 に示す。数十マイクロ秒のパルス電圧印加、 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 以上の電流密度が得られる定電圧高電流となる仕様に設計した。

Table. 1 Pulse generator conditions

Voltage	15V
Pulse duration	20 μs ～2.5ms
Pulse interval	2.7～688ms

3-3. フラッシング仕様

電極とワークが接触する基準位置は、電気的接触検出を用いた。電極は上下に位置決めできる機構 (Z 軸) に取り付けられ、ギャップを任意に設定できるようにした。

スラッジ発生による加工効率の低下⁽³⁾を防ぐため、極間をフラッシング (流速: 5m/s) した状態でパルス電圧を印加した。パルス電圧印加とフラ

ッシングのタイミングチャートをFig.3に示す。

加工中のギャップはフラッシング性確保のため $5\mu\text{m}$ 以上に設定し、加工中のZ軸変化はないものとした。

図 Electrolyte flow

Fig. 3 Timing chart of electrolyte flow.

3-4. 電極仕様

転写性を評価するため、電極 $\phi 4.0\text{mm}$ の表面に Fig.4 に示す微細パターンを施した。微細パターンは、幅 25, 50, 100, $150\mu\text{m}$ 、長さ $500\mu\text{m}$ のパターンを各々 25, 50, 100, $500\mu\text{m}$ 間隔で配列した。

Fig. 4 Electrode pattern.

電極作製には微細放電加工の繰り返し転写法⁽⁴⁾を用いた。電極作製工程(略図)をFig.5に示す。パターン配列を増やした繰り返し転写により、電極消耗の影響を無視した加工ができる。電極の

SEM写真をFig.6に示す。

微細パターン部分以外から流れる電流をなくするため、樹脂による絶縁加工を施した。絶縁加工は、電極表面をアクリル系樹脂で被覆した後、切削加工し、微細パターン表面のみを露出させた。

Fig. 5 Method of making electrode.

Fig. 6 SEM photographs of electrode.

4. 実験結果と考察

4-1. 電極材料

パターンを持つ電極を作製する前に種々の材料を電極として使用し、電解反応による電極材料の耐久性を評価した。なお電極直径は $100\mu\text{m}$ とした。電極材料は、イオン化傾向等の観点から W,

SUS304 (Fe70%以上), Cu, Pt, Au, Ir, Ti, C (グラッシーカーボン) を選定した。

Fig.7に積算通電時間 0 秒(使用前)と積算通電時間 10 秒の SEM 写真を示す。加工条件は、電圧 20V, ギャップ $5\mu\text{m}$, パルス幅 $20\mu\text{s}$, パルス繰り返し数 500000 であり、電極は導電部分(先端約 2mm)が電解液中に浸る状態で使用した。図中の寸法表示は電極先端部直径の実測値を示す。

Fig.7 SEM photographs of electrode.

W, SUS304, Cu の電極消耗量が大きく、イオン化傾向の低い Pt においてもわずかな電極消耗が確認できた。

電解加工では通常電極消耗は無視できるが、パルス終了時に電気二重層に蓄えられた電荷の放電によりわずかに逆電流が流れる。また、特にタングステンは OH^- 雰囲気中で電解溶出しやすいことが関係しているものと思われる⁶⁾。

イオン化傾向の最も低い金属である Au, 非イオン化材料 C は積算通電時間 10 秒においても電極消耗が確認できなかった。

これらの結果より、電解加工用電極としては非消耗材料と考えられる Au または C が適している。しかし、電極表面への微細パターン成形性、酸化膜等の保護膜形成性、材料コスト等まで考慮した場合には、Ti が電極材料として適していると考えられる。

以上より、以下のパターン加工の実験には Ti を用いることにした。

4-2. ギャップと極間電流

パルス幅 $20\sim 500\mu\text{s}$, ギャップ $5\sim 100\mu\text{m}$ における極間電流を測定した。パルス波形を Fig.8, 結果を Fig.9 に示す。Fig.9 の電流値は波形の終点部の値である。

ギャップが狭いほど極間電流が高くなっている。また、短パルスほど極間電流が高くなっている。これは狭ギャップ、短パルスにすることにより、極間抵抗が減少すると共に電極とワークのより近距離で選択的な電解反応が起こり、その結果、電

流密度が向上することを示している。

Fig. 8 Voltage and current wave form (pulse duration: 500μs).

Fig. 9 Relationship between machining gap and current.

4-3. パルス幅と転写性

ショートパルス (20μs) とロングパルス (500μs) の転写性について比較する。

転写性評価はワーク表面形状を光学干渉法による光学式非接触三次元表面形状測定装置 (Veeco, Wyko NT1100) を用いて測定した。溝幅、溝深さは各々加工断面における表面での幅、表面から溝底部までの深さとした (Fig. 10)。

Fig. 10 Measurement point.

パルス幅 500μs, ギャップ 5μm の加工条件における積算通電時間と溝深さの関係を Fig. 11 に、積算通電時間と溝幅の関係を Fig. 12 に示す。

溝深さは積算通電時間に対して比例関係にある。積算通電時間 50ms 以上からパターン幅の違いによる溝深さに差が生じてきている。これは、パターン幅が小さいほど印加電圧のパルス化による電解反応の選択性の影響が高いことを示す。また、溝幅についても溝深さと同様に、積算通電時間に対して比例関係にあることがわかる。これらのことから、ロングパルスであるパルス幅 500μs では、深さ方向と幅方向の加工が同時に進行しており、電解反応の選択性が低いと考えられる。

一方、パルス幅 20μs, ギャップ 5μm の加工条件において、積算通電時間と溝深さの関係を Fig. 13 に、積算通電時間と溝幅の関係を Fig. 14 に示す。溝深さの加工速度はパルス幅 500μs に比べ速く、パターン幅の違いによる溝深さの差も大きくなっている。パターン幅 25, 50, 100μm で

Fig. 11 Relationship between groove depth and total pulse time (pulse duration: 500μs).

Fig. 12 Relationship between groove width and total pulse time (pulse duration: 500μs).

は積算通電時間 25~50ms の傾きに比べ、50~100ms の傾きが小さくなっていることがわかる。

また、溝幅はパルス幅 500 μ s に比べて小さく、特にパターン幅 25, 50 μ m は積算通電時間 50ms まではほとんど変化がない。つまり、パターン幅 25 μ m, 50 μ m では溝深さ 5 μ m (積算通電時間 50ms) までは、電解反応の選択性が高いことがわかる。

これらのことから、パルス幅 20 μ s では、数十ミクロンオーダーの加工においても、高い転写精度が得られることがわかる。

Fig. 13 Relationship between groove depth and total pulse time (pulse duration: 20 μ s).

Fig. 14 Relationship between groove width and total pulse time (pulse duration: 20 μ s).

4-4. 断面形状測定

光学式非接触三次元表面形状測定装置によるロングパルス (パルス幅 500 μ s) とショートパルス (パルス幅 20 μ s) の測定結果を Fig. 15 に示す。

Fig. 15 (a) は Fig. 11, 12 の (a), Fig. 15 (b) は Fig. 13, 14 の (b) に各々対応している。

ショートパルスでは、距離依存性が高く選択的加工が可能であるため、ロングパルスに比べ溝幅が狭いことが確認できる。

Fig. 15 Sectional profiles obtained with an optical measuring system (electrode pattern width 25 μ m).

4-5. 加工表面の観察

パルス幅 500 μ s とパルス幅 20 μ s の加工によるパターン幅 25 μ m の実体顕微鏡写真を Fig. 16 に示す。パルス幅 500 μ s の方が溝幅が広く、パターン間隔 50 μ m 以下がほとんど確認できない。一方、パルス幅 20 μ s の加工では、溝幅が狭くパターン間隔 50 μ m 以下が確認できる。

(a) Pulse duration 500 μ s

(b) Pulse duration 20 μ s

Fig. 16 Comparison of machined patterns with short and long pulses (electrode pattern width: 25 μ m).

5. 電解加工の応用

繰返し転写法 (放電加工) を用いて ϕ 4.0mm

の電極端面に加工したスパイラル形状の SEM 写真を Fig.17 に示す。また、このスパイラル電極を用いて電解加工した加工形状の実体顕微鏡写真を Fig.18 に示す。加工条件はパルス幅 $20\mu\text{s}$ 、ギャップ $5\mu\text{m}$ 、積算通電時間 50ms であり、フラッシング等の動作も含め加工時間は約 10 秒である。

Fig.17 SEM image of spiral electrode.

Fig.18 Machining sample with spiral electrode.

6. まとめ

マイクロ秒パルスを用いた電解加工の加工特性として次のことがわかった。

- ・狭ギャップ、短パルス化により極間電流を高めることができる。
- ・印加電圧をパルス化することで、電極幅の違いによる電解反応の選択性に差が生じ、より短パルス化することでその差が顕著になる。
- ・ $20\mu\text{s}$ 程度のパルスとすることにより、数十ミクロンオーダーのパターン幅をもつ溝加工が可能である。

参考文献

- 1) Teppei Ejiri, Hans Langen, Didier Viquerat, P-F Chauvy : 超短パルスを用いた 3 次元電解加工, 電気加工学会全国大会講演論文集, pp.15-16 (2002)
- 2) 室 真弘他: 脱イオン水マイクロ放電加工の高精度化, 電気加工学会全国大会講演論文集, pp.67-68 (2002)
- 3) 近森邦夫他: 静止液電解加工について, 電気加工学会誌, Vol.9, No.18, pp.19-28 (1976)
- 4) 正木 健他: 繰り返し転写マイクロ放電加工の開発, 電気加工学会全国大会講演論文集, pp.47-48 (2000)
- 5) T.Masuzawa, M.Kimura : Electrochemical Surface Finishing of Tungsten Carbide Alloy, Annals of the CIRP, Vol.40, pp.199-202 (1991)

(2005 年 6 月 23 日受付)