

# マイクロ EDM における電極消耗

Electrode Wear in Micro-EDM

増 沢 隆 久\*・蔡 曜 陽\*・藤 野 正 俊\*

Takahisa MASUZAWA, Yao-Yang TSAI and Masatoshi FUJINO

## 1. 緒 言

マイクロテクノロジー、ナノテクノロジーの必要性の認識が深まる中で、そうした技術の最も基礎となる微細部品の生産技術としてマイクロ加工の重要性が高まっている。いわゆるシリコンプロセスと並んで、従来型の加工手法についてもマイクロ化が追求されており、切削、研削、放電加工、レーザ加工などの工作機械による加工法のマイクロ加工への適用研究が盛んになりつつある<sup>1)</sup>。

これら、従来型の加工手法の中でも、放電加工 (EDM) は加工に際して力の作用が極めて小さいため、細くて機械的強度が低下しやすいマイクロ加工用工具が問題なく使えることから、特に広い応用が期待できる加工法として注目されている<sup>2)</sup>。

マイクロ放電加工の現在の技術レベルとしては、直径 5  $\mu\text{m}$  程度の丸棒の加工や丸穴の加工が可能であり、丸棒や角棒といった単純形状電極を用いた数値制御加工では、数十～数百  $\mu\text{m}$  といった大きさの曲面を含む 3 次元的形状加工も可能であることが報告されている<sup>3)</sup>。

一方、切削等と異なり、放電加工では工具である電極が比較的速く磨耗するため、加工形状精度や電極の寿命の点でその影響を無視することができない場合が多い。しかしマイクロ加工の場合、電極の消耗量の絶対値が微小となるために、一般の放電加工に比べ電極消耗特性の把握が難しく、未だにどのような電気条件で、どのような材料の電極を用いるべきなのか明らかとなっていない。

本報では、SEM を用いて電極形状の変化を調べることで、微小な消耗量を測定することで、電気条件、材料条件による電極消耗の特性を明らかにした結果について述べる。

## 2. EDM における電極消耗

寸法が微細でない、一般の放電加工については、従来より多くの研究が行われており、いくつかの傾向が明らかになっている。以下に、本報と関連が深い、加工液として灯油を用いた場合に一般的に知られている事項を示す。

### 2.1 電気条件に関して

一般の放電加工では、電極として銅またはグラファイトが多く用いられているが、特に銅を用いる場合の電気条件について広く調べられている。この場合の一般的傾向としては

- (1) 電極を正 (プラス) とする極性で加工する場合にのみ、電極の消耗を微小 (例えば、工作物の加工量に対し 1% 以下) にすることができる。
- (2) 放電電流のピーク値が低く、パルス幅が長いほど電極の消耗が少なくなる。

これらより、電極の消耗を無視できるような加工条件設定も可能となっているが、そのような電気条件は一般にパルスエネルギーが大きすぎて、マイクロ EDM に適用することができない。

### 2.2 材料条件に関して

種々の電極材料について、材料物性と電極消耗の関係が調べられており、一般的な指標として、材料の融点と熱伝導率の積が比較的良い評価関数であることが知られている。すなわち、融点が高く、熱伝導率が大きい材料ほど、電極として消耗の少ない材料ということが出来る。しかし、マイクロ EDM に用いられるような電気条件、寸法条件の場合については適合性が確かめられていない。

### 2.3 測定法

放電加工における電極消耗の指標は電極消耗率と呼ばれ、(電極の消耗量) / (工作物除去量) (%) で示される。消耗量および除去量は体積で表わすのが国際的標準となっており、重量等の他の表示によるものと区別して体積消耗

\*東京大学生産技術研究所 マイクロメカトロニクス国際研究センター

## 研究速報

率と呼ばれることもある。記号としては  $v$  (ユブシロン) が用いられる。しかし、実際には消耗体積や除去体積の測定は手間がかかるため、加工前後の重量差を測定し、比重を用いて体積に換算する方法が広く用いられている。

マイクロ EDM の場合は、電極消耗重量は ng 前後のオーダーとなるため測定困難であり、このため正確な消耗特性評価が行われていない。

## 3. マイクロ EDM における電極消耗

## 3.1 測定法

上述のように、加工前後の重量差を測定するのが困難なため、本研究では、加工前後の体積変化を直接測定する方法をとった。図 1 に示すように、端面を平坦にした円柱状の電極 (a) により、板材に貫通穴を加工する。すると、(b) 穴が加工され、電極は消耗して長さが短くなり、端部の形状が崩れる (c)。そこで、この穴の形状および消耗後の電極端部の形状を電子顕微鏡による画像から求め、そのデータから加工体積、消耗体積を算出する。

加工量の算出については、穴形状が円錐台であると仮定して、上面の直径と下面の直径の測定値から計算する。

消耗量の算出については、図 1 (d) に示すように、消耗を長さ部分と角部分に分けて測定した。

長さ部分については、加工の前と後に、電極先端を基準表面 (工作物の未加工面の一点を用いる) に接触させ、その電極位置の軸方向座標の変化として測定する。(SEM 画像は用いない。)

角部分については、加工後も形状は軸対称であると仮定して、先端部側面の SEM 像から、先端が平坦な円柱形状との差として消耗体積を算出する。

これらにより、手間はかかるが、比較的正確に  $v$  のデータを得ることができる。

## 3.2 実験結果

次のような条件の下に体積消耗率測定実験を行った。

電極：記載のないかぎりタングステン、直径  $50 \mu\text{m}$ 、加工前の長さ  $500 \mu\text{m}$

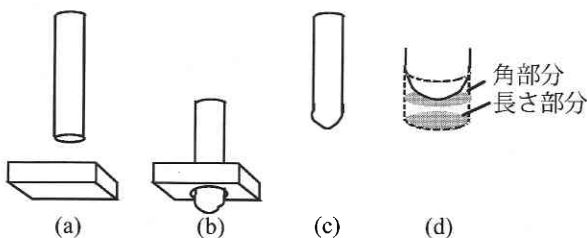


図 1 穴あけによる電極消耗

工作物：記載のないかぎり SUS 304、厚さ  $100 \mu\text{m}$

加工液：放電加工油 (三井 EDS)

電極は WEDG により所定の寸法に成形し、回転させながら加工開始後  $300 \mu\text{m}$  送り込み、貫通穴を加工した。加工回路は図 2 に示す RC 回路で、開放電圧  $E_0$  は記載のないかぎり  $100 \text{V}$ 、 $R = 1 \text{k}\Omega$  とし、 $L$ 、 $C$  および電極材料を変えて特性を調べた。 $L$  は回路中にコイルを挿入して変化させたが、 $L$  の影響に関する実験以外は短絡させており、その場合はリード線のみインダクタンス  $0.15 \mu\text{H}$  が回路定数としての  $L$  になっている。

## 3.2.1 コンデンサ容量と電極直径の影響

図 3 は直径  $25 \mu\text{m}$ 、 $50 \mu\text{m}$ 、 $75 \mu\text{m}$  の各電極により、 $C$  を変化させた時の体積消耗率の変化を示している。 $C$  が小さくなると  $v$  が減少する傾向が見られ、 $100 \text{pF}$  以下では電極直径によらず  $10\%$  以下となる。 $C$  が大きい領域 (マイクロ EDM では荒加工領域になる) では直径が小さいほど消耗が大きくなる傾向がある。

## 3.2.2 コンデンサ容量とインダクタンスの影響

種々の  $L$  を挿入した場合の、 $C$  による体積消耗率変化を図 4 に示す。このように、 $L$  の大きさによって  $C-v$  曲線は異なった形となるが、それぞれが  $v$  の極小値を持ち、その極小値に対応する  $C$  の値は、 $L$  が小さいほど小さい側に移

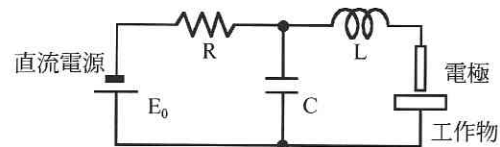
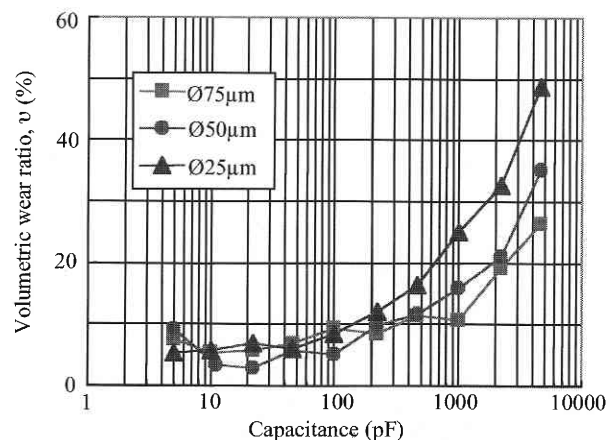


図 2 マイクロ EDM 回路図



電極：W (-) 工作物：SUS304 (+)

$E_0 = 100 \text{V}$ ,  $R = 1 \text{k}\Omega$ , without additional inductance

図 3 C による消耗率の変化

る傾向がある。

RC回路では放電パルスの電流波形は主としてLとCにより決まり、パルス幅がおよそ $\pi\sqrt{LC}$ 、ピーク値がおよそ $(E_0 - E_g)\sqrt{C/L}$ の正弦波に近いパルスとなる。

そこで、図4のすべてのデータをパルス電流ピーク値と $v$ の関係に整理し直してみると、図5に示すような興味深い結果が得られる。すなわち、さまざまな波形に共通して、パルス電流のピーク値が0.5 A前後の場合に最も電極消耗率が低くなっている。0.5 Aより大きい側の傾向は一般の放電加工と似た傾向であり、類似の原因が関係していると考えられるが、0.5 Aより小さい側で $v$ が上昇するのは、マイクロEDMに固有の現象が現われたためである可能性がある。今後さらに検討を要するであろう。

3.2.3 パルスエネルギーの影響

特にコイルを挿入せずリード線のインダクタンスのみで、Cを10~4700 pF、 $E_0$ を50から125 Vと変化させた時、種々の組合せの加工条件での測定結果を放電パルスエネルギー(近似値 $=CE_0^2/2$ )で整理すると、図6のような結果が得られた。このように、特別にインダクタンス(コイル)を挿入せずに比較的小インダクタンスのまま、Cあるいは $E$ を変化させた場合については、一般的に小エネルギー放電の方が電極消耗が小さくなる。

3.2.4 電極材料の影響

電極材料の熱的性質が電極消耗率に影響することは良く知られている。一般の放電加工においては、材料の熱伝導率 $\lambda$ と融点 $T_m$ が重要であると考えられ、 $\lambda \cdot T_m$ が大きいほど消耗の少ない電極材料として評価されている。そこで $E = 100$  V,  $C = 100$  pF,  $L = 0.15 \mu\text{H}$ ,  $R = 1 \text{ k}\Omega$ , 電極直径 $50 \mu\text{m}$ の条件で、3種類の工作物材料に対し、種々の電

極材料の電極消耗率を比較した結果を、電極材料の $\lambda \cdot T_m$ を横軸にとって整理すると、図7のようになり、はっきりした相関性は見られない。

このような結果となる原因の一つはマイクロEDMの場合、放電点が微小となり、エネルギー密度が増大することから、放電中の材料表面温度は沸点を越えているためであると推定される。

そこで、評価関数として新たに、 $\rho c \lambda T_m T_{bc}$ を導入する、ここで $\rho$ は密度、 $c$ は比熱、 $T_m$ ,  $T_{bc}$ は融点 $T_m$ および沸点 $T_b$ にそれぞれ融解熱および蒸発熱を温度換算して加えたものである。

このパラメータを横軸にとって整理すると、図8が得られる。このように、沸点を考慮した比較により電極消耗率の電極材料による順位をある程度統一的に予測できることが分った。なお、これと似た評価関数、 $\rho c \lambda T_m^2$ が消耗強度として提案された時期があり<sup>4)</sup>、 $\lambda T_m$ よりは微細加工データへの適合性が高い。しかし、 $T_m^2$ の物理的意味は不明

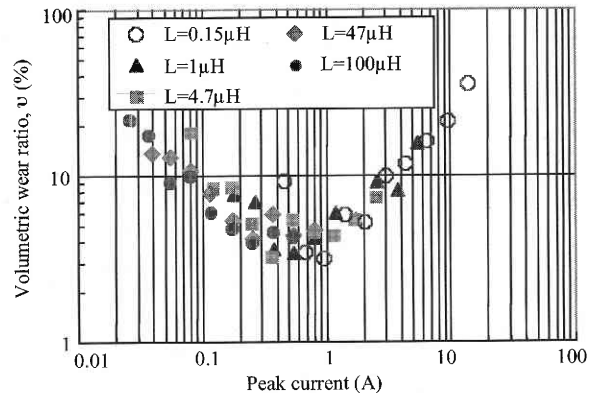
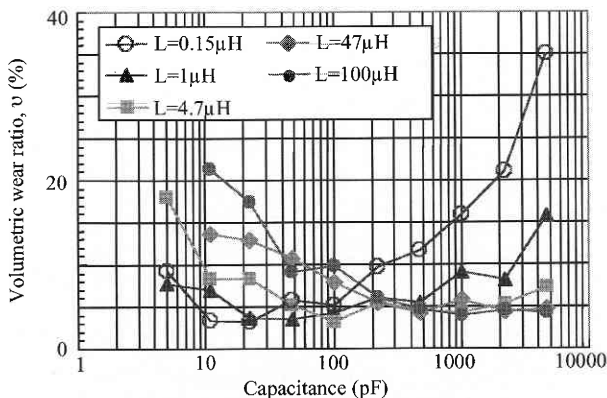


図5 パルス電流ピーク値による消耗率の変化



電極:  $\phi 50 \mu\text{m W} (-)$  工作物: SUS304 (+)

$E_0 = 100$  V,  $R = 1 \text{ k}\Omega$

図4 Lを変えた場合のCによる消耗率の変化

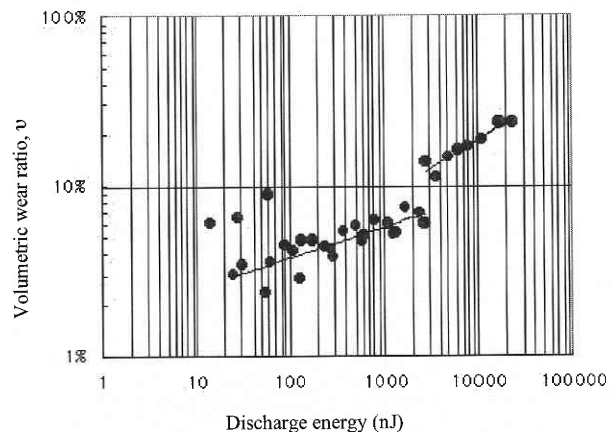


図6 放電パルスエネルギーによる消耗率の変化

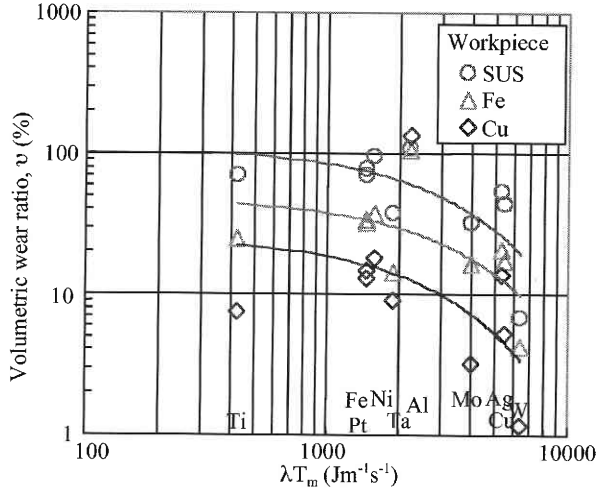


図7 熱伝導率と融点による消耗率の変化

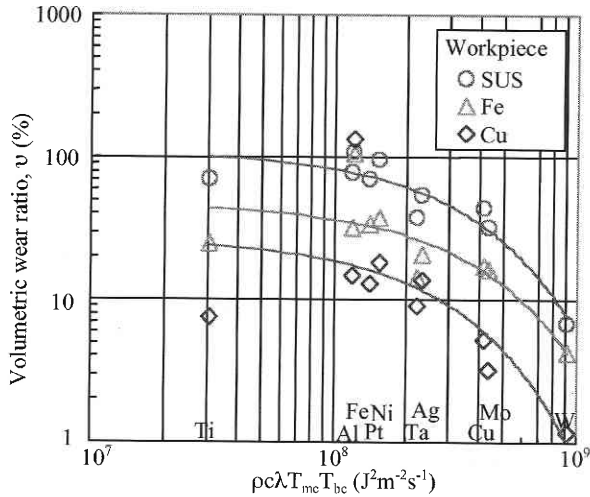


図8 沸点を考慮した関数による消耗率の変化

であり、 $T_{bc}$ 、 $T_{mc}$ による評価の方がより自然かつ正確であると考えられる。

結 論

RC回路によるマイクロEDMにおいて、いくつかのパラメータを変化させ、比較的精度の高い消耗量、加工量の測定実験を行った結果、電極消耗率（体積）に関して以下のような知見を得た。

- (1) コンデンサ容量および開放電圧を変化させた場合、それぞれが小さいほど（放電パルスのエネルギーが小さいほど）電極消耗率が小さくなる。
- (2) コンデンサ容量と、回路のインダクタンスの組合せによる放電電流波形の変化は消耗特性に大きな影響があり、ピーク電流が0.5 A前後のパルスで電極消耗率が極小となる（電極直径50 μmの場合）。
- (3) 電極材料として  $\rho c \lambda T_{mc} T_{bc}$  が大きいものほど電極消耗率が小さくなる。

(2002年4月9日受理)

参 考 文 献

- 1) T. Masuzawa: State of the Art of Micromachining, Annls of the CIRP, 49, 2 (2000) 473-488
- 2) T. Masuzawa: Micro-EDM, Proc. of ISEM XIII (2001) 3-19
- 3) K. P. Rajurkar: 3 D Micro-EDM using CAD/CAM, Annals of the CIRP, 49, 1 (2000) 127-130
- 4) C. J. Heuvelman: Some Aspects of the Research on Electro-Erosion Machining, Annals of the CIRP, 17, 1 (1969) 195-199