研究

放電加工における電極表面プロファイルが 放電遅れ時間に及ぼす影響*

新家一朗** 佐野定男*** 国枝正典****

Effect of Electrode Surface Profile on Discharge Delay time in Electrical Discharge Machining

Ichiro ARAIE, Sadao SANO and Masanori KUNIEDA

Abstract

In this study, we investigated the discharge delay time of single pulse discharge when the surface of one of the electrodes is rough and that of the other is smooth. Although the delay time of single pulse discharge was shorter when the surfaces were rougher, the delay time was also affected by the surface topography. When the surface of the cathode was rougher than that of anode, the discharge delay time was shorter than that in the reverse case. In addition, in this study, we investigated the discharge delay time of three types of wire electrode used in WEDM. The work functions of the wire materials were measured and the surface electric fields of different surface topographies were analysed. It was found that the discharge delay time of the wire with the highest cutting efficiency was shortest due to the highest surface roughness. The effect of work function on the delay time was found to be insignificant in this work.

1. はじめに

放電加工において新しい工具電極と被加工物により加工を行う際、加工開始後しばらくはサーボが不安定で加工速度が上がらない場合がある。過去の報告¹⁾では、銅丸棒電極で製作された工具電極と被加工物を用い固定ギャップで電圧を印加した場合の放電遅れ時間について、粗い面とより滑らかな面を比較すると、粗い面の方がより滑らかな面よりも放電遅れ時間が短いことが示されている。これは、ほぼ鏡面に近い面と少し荒れた面では荒れた面の方が放電遅れ時間が短いという結果であるが、電極表面の局所的な電界の集中を考えると単純に面粗さが粗いほど放電遅れ時間が短く

なるとは限らず、電極表面凸部の曲率半径やギャップ長、その周辺形状などの影響を受けると考えられる。

そこで本研究では、4種類の面粗さを有する電極を製作し、表面プロファイルによる放電遅れ時間の違いについて実験を行った。そして、その実験モデルの静電界解析を行い電極表面の電界の強さと放電遅れ時間の関係を調査した。さらに、気中放電では陽極と陰極の形状により放電発生電圧が異なること（極性効果）²⁾が知られているため極性を変えて同様の調査を行った。

また、ワイヤ放電加工に用いられる高速加工用ワイヤ電極は表面のコーティング材である亜鉛の影響で放電が生じ易くなり加工速度が向上すると報告されている³⁾。しかし、その理由については明らかではない。このため本研究では、一般的に使用されているワイヤ放電加工用のワイヤ電極についてその表面プロファイルと仕事関数、放電遅れ時間の関係について調査を行った。

* 2006 年度精密工学会春季大会にて発表

** (株)ディック リニアテクノロジーカンパニー
(福井県坂井市坂井町長屋 78)

*** (株)ディック 研究開発本部
(横浜市都筑区仲町台 3-12-1)

**** 東京農工大学大学院工学府
(東京都小金井市中町 2-24-16)

2. 電極の表面プロファイルの影響

2.1 実験方法

2.1.1 電極の製作

表面プロファイルの異なる数種類の電極として円筒研削により仕上げた $\phi 10\text{mm}$ の銅電極と、ワイヤ放電加工による1回カット、3回カット、5回カットした $\phi 10\text{mm}$ の銅電極、計4種類の電極を製作した。Fig.1に製作した電極の表面プロファイルを示す。表面プロファイルについて、特に表面電界に影響を与える要素として電極表面凸部の高さや分布密度、ならびにギャップ長などがある。これらの影響を調べるため各表面プロファイルの粗さと凸部から凸部までの周期を測定した。Fig.1(a)は円筒研削面を手磨きしたもので表面粗さ $0.5\mu\text{m}$ 以下である。Fig.1(b)は放電5回カット面で面粗さ約 $2\mu\text{m}$ 、粗さ周期が $15\sim 25\mu\text{m}$ 、Fig.1(c)は放電3回カット面で面粗さ約 $8\mu\text{m}$ 、粗さ周期が $10\sim 30\mu\text{m}$ である。Fig.1(d)は放電1回カット面で、面粗さは Fig.1(c)とほぼ同じで約 $9\mu\text{m}$ であるが、粗さ周期が長く $20\sim 40\mu\text{m}$ である。

Fig.1 Surface profile of electrodes

2.1.2 放電遅れ時間の測定方法

前項にて説明した4種類の $\phi 10\text{mm}$ の銅電極を超音波洗浄したものを陰極に、円筒研削仕上げ面を手磨きした $\phi 10\text{mm}$ の銅電極 ($0.5\mu\text{m Rz}$ 以下) を陽極に用いた。そして、両電極を互いに直交す

るように配置し、陽極と陰極のギャップは $3\mu\text{m}$ とした。また、常に新しい面の間で放電を発生させるため1回の測定ごとに両方の円筒電極を軸方向に 0.5mm ずつ移動させ、アセトンにて洗浄後、新しい加工液を滴下した。そして、両電極間のギャップを一定に保った状態で主回路電圧 120V を印加し、その時の単発放電の遅れ時間を調査した。Fig.2 に実験方法を示す。なお、10秒間電圧を印加しても放電が発生しない場合は中断し、10秒以上の放電遅れ時間の分類に入れた。

Fig.2 Experiment method

本実験を実施するため、市販の放電加工機を改造し Fig.3 に示す放電回路とした。用いた放電加工機では、印加電圧の立ち上がり速度の問題があるため、陽極近くにトランジスタ B を追加し Fig.3 のタイミングチャートに示すように、トランジスタ A がオン、トランジスタ B がオフの状態で 120V の直流電源をオンし、 120V に達したことを確認し単発放電検出回路を作動開始させ、その後トランジスタ B をオンすることにより陽極と陰極の間で単発放電を発生させ、その際の放電遅れ時間を調査した。また、放電遅れ時間の測定には、極間に接続したオシロスコープを用いた。

さらに極性が放電遅れ時間に及ぼす影響を調べるために、上述の極性とは逆に、Fig.2 に示す X 軸に平行で4種類の表面プロファイルを持つ $\phi 10\text{mm}$ の銅電極を陽極に、Y 軸に平行に置かれた円筒研削仕上げ面を手磨きした $\phi 10\text{mm}$ の銅電極を陰極に用いて前述と同様の方法で放電遅れ時間を測定した。

Fig.3 Circuit and timing chart for discharge delay time measurement

2.2 放電遅れ時間の測定結果

2.2.1 陰極の表面プロファイルが放電遅れ時間に及ぼす影響

放電遅れ時間の測定結果はラウエプロット⁴⁾により表記した。ラウエプロット法は、電極間に時刻 $t=0$ で電圧 V を加えた時、 N 回の試行で時刻 t までに破壊しないものの回数 n と N との割合 n/N の関係を、横軸が時間 t 、縦軸が $\ln(n/N)$ のグラフにプロットすることにより、放電遅れ時間を初期電子が生成されるまでの統計遅れと、電子なだれが生じ全路破壊に至るまでの形成遅れに分離する方法であり、 $n/N=100\%$ での時間より形成遅れ時間を、グラフの傾きにより統計遅れ時間の傾向を読み取ることができる最も一般的な放電遅れ時間の表現方法である。

Fig.4 に 4 種類の異なる表面プロファイルの電極を陰極として使用した場合の放電遅れ時間をラウエプロットで示す。円筒研削面を簡単に手磨きした面の放電遅れ時間に対し、これより粗い面粗さである放電加工面の放電遅れ時間は短い。

面粗さを粗い順に並べると

$$1st \approx 3rd > 5th > \text{円筒研削}$$

Fig.4 Discharge delay time measured with different surface roughness of cathode

であるが、放電遅れ時間を短い順に並べると

$$3rd < 1st < 5th < \text{円筒研削}$$

となっており、必ずしも面粗さの大小と放電遅れ時間は単調な関係にあるわけではない。

2.2.2 陽極の表面プロファイルが放電遅れ時間に及ぼす影響

Fig.5 に 4 種類の異なる表面プロファイルの電極を Fig.4 とは逆に陽極として使用した場合の放電遅れ時間をラウエプロットで示す。円筒研削の結果は両極とも同じ表面であるので Fig.4 と同じである。放電遅れ時間の長短の傾向は、陰極として使用した場合と同様に下記の通りとなった。

$$3rd < 1st < 5th < \text{円筒研削}$$

Fig.5 Discharge delay time measured with different surface roughness of anode

また、Fig.4 と Fig.5 より極性による放電遅れ時間の違いに注目すると、5 回カット面が陰極の場合は、極性が逆の場合より格段に放電が発生し易

い。つまり、表面が粗い面が陰極である場合の方が放電遅れ時間は短い結果となった。しかし、1回カット面および3回カット面では放電遅れ時間に大きな違いは見られない。

2.3 電極表面の静電界解析

2.3.1 解析方法

Fig.6 に示すとおり、陽極と陰極をギャップ $3\mu\text{m}$ を保って対向させ、幅 $250\mu\text{m}$ の解析領域内で、陰極の両側 $5\mu\text{m}$ は平面とし、内側 $240\mu\text{m}$ の範囲に山の頂上と陽極とのギャップを $3\mu\text{m}$ に保って Fig.1 の各表面プロファイルに従い解析する表面プロファイルを定義する。

Fig.6 Analysis of electric field

境界条件として、陽極側の電位を $V_p(120\text{V})$ に陰極側の電位を $V_n(0\text{V})$ に固定し、ギャップ両端の開放部は陽極と陰極の電位差を直線補間した値で固定した。解析方法としては差分法を用い、 $0.025\mu\text{m}$ ピッチで正方形網目状に要素分割し解析した。

また、詳細に検討するうえでは3次元解析を行うべきであるが、放電加工により製作した電極の表面プロファイルは測定方向による違いはないため、解析は2次元で行った。2次元解析では3次元解析より局所性が低下するためピーク値が小さく算出されることが考えられるが定性的に検討する上で問題はないと考えられる。

2.3.2 解析結果

各電極表面上の電界の解析結果を Fig.7 に示す。電界は表面の法線方向の値を計算した。Fig.7(a) に示す円筒研削面では概ね $0.25 \sim 0.45 \times 10^8 \text{V/m}$ であり、ギャップが $3\mu\text{m}$ の理想的な平行平板間の

電界の強さ $0.4 \times 10^8 \text{V/m}$ ($=120\text{V}/3\mu\text{m}$) と比較してそれほど大きな変動はない。Fig.7(b) に示すワイヤ放電加工5回カット面は最大で $0.55 \times 10^8 \text{V/m}$ であり、理想的な平行平板間の電界 $0.4 \times 10^8 \text{V/m}$ の1.3倍に表面電界が集中している。Fig.7(c) に示す3回カット面では、最大で $0.75 \times 10^8 \text{V/m}$ と理想的な

(a) .7-1 Ground surface ($0.5\mu\text{m}$)

(b) h cut surface by WEDM ($1.5\mu\text{m}$)

(c) rd cut surface by WEDM ($8\mu\text{m}$)

(d) 1st cut surface by WEDM ($9\mu\text{m}$)

Fig.7 Calculated electric field

平行平板間の電界の約2倍の表面電界の集中がある。また、Fig.7(d)に示す1回カット面では最大で $0.7 \times 10^8 \text{V/m}$ となっている。

3回カット面は $0.57 \times 10^8 \text{V/m}$ 以上の強い表面電界が全体的に分布しているが、1回カット面はここのように強い表面電界の出現頻度は3回カット面の半分もない。また、5回カット面は $0.4 \sim 0.55 \times 10^8 \text{V/m}$ 程の平均電界よりやや大きな電界が全域に数多く存在する。

以上のように電極表面の電界ピーク値やその出現頻度を比較すると

3rd > 1st > 5th > 研削加工面の順であることが分かった。

2.4 考察

2.2.1 項、2.2.2 項に示すように放電遅れ時間の測定結果として

3rd < 1st < 5th < 円筒研削となり、前項で示した電極表面の静電界解析の結果と傾向が一致する。

ここで、ワイヤ放電での1回加工面である1st面では黄銅付着の可能性があるため考察する。黄銅の構成成分は銅と亜鉛であり、放電遅れ時間に影響を与える仕事関数の観点から考察すると、銅の仕事関数が 4.65eV であるのに対し、亜鉛は 4.33eV と小さい。このため陰極に1st面を用いた場合に冷陰極放出により放電は発生し易いことになる。しかし、本実験結果では3rd面と1st面では3rd面の放電遅れ時間が短い結果となっており、これは表面プロファイルの影響の方が強いことを示している。

従って放電遅れ時間は電極の面粗さではなく電極表面凸部の曲率半径やギャップ長、その周辺形状などに大きく依存し、表面プロファイルによって決定される電圧印加時の静電界において、電極表面の電界の強さが強い箇所が多数分布しているほど放電遅れ時間が短い確率が高くなる。

一方で、電界が強い部分が多く分布する5回加工面を陰極に用いた方が陽極に用いた場合より放電遅れ時間が短い理由としては、冷陰極放出⁶⁾による初期電子の発生が多いことが考えられる。

3. ワイヤ材の放電遅れ時間

3.1 ワイヤ電極の表面プロファイル

ワイヤ電極材としては、いずれも市販品KHS社製の標準的黄銅ワイヤ (KH WIRE Fig.8(a))、高速加工用亜鉛コーティングワイヤ (Sodick Z wire Fig.8(b))、超高速加工用ワイヤ (550Z Fig.8(c)) を用いた。写真を見て分かるようにワイヤにより表面プロファイルが異なり、標準的黄銅ワイヤはほぼ滑らかであるのに対し、亜鉛コーティングワイヤは条痕が多く見られる。また、超高速加工用ワイヤは条痕がさらに複雑で密に存在していることが分かる。

Fig.8 Wire electrodes used in experiment

3.2 各ワイヤ表面の仕事関数

放電し易さに関連する表面物性として仕事関数がある。仕事関数が小さいと表面電界による初期電子の放出が発生し易いことやTownsend理論における2次電子の放出量が多くなり火花放電に移行し易いと考えられる。そこで各ワイヤ材について大気中光電子分光装置により仕事関数の測定を行った。

大気中光電子分光装置は、試料に紫外線を照射し放出される光電子を電界により加速させ、その電子が大気と衝突し大気が衝突電離することによ

(a) Standard BS-wire[5.2eV]

(b) Zn coated wire[4.8eV]

(c) Super-high-speed wire[5.0eV]

Fig.9 Work function of wire electrodes

り増幅した電流パルスを計数し、その数と照射エネルギーと比較することにより仕事関数を測定する装置である⁸⁾。

Fig.9 に各ワイヤにおける紫外線照射エネルギーと、単位時間当たりの光電子放出量の平方根との関係を示す。紫外線照射エネルギーと光電子放出量 I の関係は、式(1)で表される⁹⁾。仕事関数未満の照射エネルギーで測定される光電子放出量は迷光によるものであるため照射エネルギーに依存しない。このため照射エネルギーが小さく光電子放出量が一定である範囲に対し横軸に平行に近似直線を描き、照射エネルギーに対し単位時間当たりの光電子放出量の平方根が単調増加している部分に近似直線を描く。それら2直線の交点の照射エネルギー値から仕事関数が求まる。この測定において表面プロファイルの影響は単調増加部のグラフの傾きに影響を与えるが仕事関数(交点)には影響を与えない。

$$I \propto (h \cdot \nu - e \cdot \phi)^2 \quad (1)$$

ただし、 $h \cdot \nu < e \cdot \phi$ の場合 $I = 0$

h : プランク定数 ν : 光の振動数

e : 素電荷 ϕ : 仕事関数

大気中光電子分光装置により測定した各ワイヤ材の仕事関数は、標準黄銅ワイヤが 5.2eV、亜鉛コーティングワイヤが 4.8eV、そして超高速加工ワイヤが 5.0eV となり、

亜鉛コーティングワイヤ < 超高速加工用ワイヤ < 標準黄銅ワイヤ
の順に小さい結果となった。

3.3 各ワイヤの放電遅れ時間測定実験

各ワイヤ材を用いて放電遅れ時間の測定を行った。Fig.10 に実験装置構成を示す。前述の ϕ 0.25mm の市販ワイヤ電極3種類を陰極に、SKD-11のラップ仕上げ(面粗さ 3nmPV)面を陽極に用い、ギャップを一定に保った状態で電圧を印加し、その時の放電遅れ時間を調査した。ワイヤ電極は、片側を固定し ϕ 10mm の銅丸棒に沿わせ他の一方をゴムにより引張ることによりテンションを加え常に銅丸棒に沿うようにした。この状

態で下部にある SKD11 ラップ面に対し位置決めを行った。印加電圧は 260V としギャップは予備テストにて黄銅ワイヤで放電が必ず発生する距離でできる限り長い距離を調査し $2.5\mu\text{m}$ とした。なお、実験回路は Fig.3 と同様の回路を用い、オシロスコープを用い放電遅れ時間を測定した。

Fig.10 Discharge delay time measurement of wire electrodes

(a) Range of discharge delay time(0-10000ms)

(b) Range of discharge delay time(0-1ms)

Fig.11 Discharge delay time measured for wire electrodes available in market

Fig.11 に測定結果をラウエプロットで示す。放電遅れ時間の最大値は、標準的黄銅ワイヤで 8s, 亜鉛コーティングワイヤで 1.5s, 超高速加工用ワイヤで $200\mu\text{s}$ と大きな違いがあり、ラウエプロットのグラフの傾きも超高速ワイヤ、亜鉛コーティングワイヤ、標準的黄銅ワイヤの順に急勾配であり、放電の遅れ時間は

超高速ワイヤ < 亜鉛コーティングワイヤ < 標準的黄銅ワイヤ
の順に短い結果となった。

(a) Standard BS wire

(b) Zn coated wire

(c) Super-high-speed wire

Fig.12 Surface electric field calculated for wire electrodes available in market

3.4 各ワイヤ材の表面電界解析

Fig.8 に示すように各ワイヤで表面プロファイルが異なる。よって、2 項で述べたように同じ条件下でも表面の電界の強さは異なるため、初期電子の発生のし易さや2次電子の放出量が異なることが考えられる。このため、Fig.8 の表面プロファイルより表面電界強さを解析した。Fig.12 に解析結果を示す。

各図における両端段差部に表れているピーク部2箇所については解析モデルの影響であることを考慮して観察する。Fig.12(a)に示す標準的黄銅ワイヤでは表面粗さが滑らかであるため電界の集中がほとんど見られず、電界の最大値は理想的に平滑な平行平板間の電界 $1.04 \times 10^8 \text{ V/m} (= 260 \text{ V}/2.5 \mu\text{m})$ の1.05倍にとどまっている。また、Fig.12(b)に示す亜鉛コーティングワイヤでは局所的に電界が集中し、 $1.6 \times 10^8 \text{ V/m}$ と理想的な平行平板間の電界の1.5倍となっている箇所が見られる。しかし、集中箇所はそれほど多い訳ではない。また、Fig.12(c)に示す超高速加工用ワイヤでは全体的に電界の集中箇所が多数分布している。

以上より表面電界のピーク値やその出現頻度を比較すると

超高速ワイヤ > 亜鉛コーティングワイヤ > 標準的黄銅ワイヤ

の順であることが分かった。

3.5 考察

超高速ワイヤ、亜鉛コーティングワイヤ、標準的黄銅ワイヤの3種類のワイヤ材について、仕事関数の測定、表面電界解析、放電遅れ時間測定を行った結果をまとめると以下の結果となる。

仕事関数の小さい順

亜鉛コーティングワイヤ < 超高速ワイヤ < 標準的黄銅ワイヤ

放電遅れ時間の短い順

超高速ワイヤ < 亜鉛コーティングワイヤ < 標準的黄銅ワイヤ

表面電界の強い順

超高速ワイヤ > 亜鉛コーティングワイヤ > 標準的黄銅ワイヤ

仕事関数の小さい順と放電遅れ時間の短い順は

異なり、表面電界の強い順と放電遅れ時間の短い順は一致している。これより放電遅れ時間に及ぼす影響はワイヤ材の仕事関数よりもプロファイルが支配的であることが分かる。

実際のワイヤ放電加工において、ワイヤ電極の表面プロファイルは加工時の消耗により即座に変化するため、新品ワイヤの表面プロファイルは被加工物へのワイヤ電極侵入部での放電の生じ易さに影響を与えると考えられる。

4. まとめ

- ・ 放電遅れ時間は電極の表面プロファイルに大きく依存する。また、陰極の表面電界の方が陽極よりも強い影響を及ぼすことから、冷陰極放出が初期電子生成の一つの要因であると考えられる。
- ・ 市販のワイヤ材について放電遅れ時間を調査した結果、ワイヤ表面の仕事関数よりも表面プロファイルの影響を大きく受けることが分かった。また、ワイヤ材の加工速度と放電遅れ時間、表面電界の強さについての傾向は定性的に一致したが、仕事関数との相関は見られなかった。これより加工速度に対する仕事関数の影響はそれほど大きくはないと考えられる。

参考文献

- 1) 新家一朗, 佐野定男, 国枝正典: 超精密加工における放電遅れ時間の研究, 電気加工学会全国大会講演論文集, pp.85-88 (2005)
- 2) 大木正路: 高電圧工学, 槇書店, pp.90-91
- 3) J.-P.Kruth, B.Lauwers, B.Schacht, J.vanHumbeck, Composite Wires with High Tensile Core for Wire EDM, Annals of the CIRP, 53, 1, 171-174 (2004).
- 4) 吉野勝美, 他: 液体エレクトロニクス, コロナ社, P.173 (1996)
- 5) 河野照哉, 宅間薫: 数値電界計算法, コロナ社, pp.13-24
- 6) 大木正路: 高電圧工学, 槇書店, P.31
- 7) 大木正路: 高電圧工学, 槇書店, P.54
- 8) 中島嘉之, 山下大輔: 大気中光電子分光法を用いた有機 EL 材料の仕事関数測定, 月間ディスプレイ, 2002年10月号別冊, pp.82-88
- 9) 日本表面科学会: 表面科学の基礎と応用, 初版, P.683

(2006年8月8日受付)