

## 数値解析による短パルス電解加工特性の検討

著者	小谷野 智広, 本多 拓人, 細川 晃, 古本 達明, 橋本 洋平
著者別表示	Koyano Tomohiro, Honda Takuto, Hosokawa Akira, Furumoto Tatsuaki, Hashimoto Yohei
雑誌名	精密工学会学術講演会講演論文集
巻	2016 Spring
号	R15
ページ	949-950
発行年	2016
URL	<a href="http://doi.org/10.24517/00050323">http://doi.org/10.24517/00050323</a>

doi: 10.11522/pscjspe.2016S.0\_949



# 数値解析による短パルス電解加工特性の検討

金沢大学 ○小谷野 智広, 本多 拓人, 細川 晃, 古本 達明, 橋本 洋平

Investigation of Machining Characteristics of Pulse Electrochemical Machining Using Numerical Simulation

Kanazawa University Tomohiro Koyano, Takuto Honda, Akira Hosokawa, Tatsuki Furumoto, Yohei Hashimoto

Machining characteristics of pulse electrochemical machining (ECM) were investigated using numerical analysis. The Current distribution of pulse ECM was analyzed considering the impedance of the power supply circuit. Analytical results showed that since the inductance decreased the current flowing through the machining gap when pulse voltage was applied, the longer pulse duration of pulse power supply was necessary to charge the electric double layer. In addition, since the current became larger when the machining area became large, the current built up slowly due to the inductance. As a result, the longer pulse duration of pulse power supply was also necessary to charge the double layer when the machining area became large.

## 1. はじめに

電解加工においては電極側面においても電流が流れ、加工の進行に従い側面のギャップが徐々に広がってしまうため、加工精度が悪いという欠点があった。一方で近年、微細加工の領域において、数十 ns の超短パルス電圧を用いることで、極間距離が広いところでの溶出を抑える方法が提案され、微細加工が可能となっている<sup>1)</sup>。これは、極間距離が広いところの電極表面で電気二重層が十分に形成される前にパルスをオフにすることで、溶出を抑えることができるためである。大面積の加工においても同様な効果が期待できるが、電解加工においては加工面積に比例して流れる総電流が増加するため、加工回路のインピーダンスの影響が大きくなる。Park ら<sup>2)</sup>は、微細加工の領域において、この影響を検討し、加工面積が大きくなり極間の抵抗値が小さくなるとインダクタンスの影響が大きくなるため、電気二重層の充電に長いパルス幅が必要になると述べている。しかし、コンデンサへの充電を考えた単純なモデルであり、電流密度分布などへ与える影響は明らかとなっていない。また、近年は数値解析を用いた電解現象の解明が盛んに行われている<sup>3, 4)</sup>。しかし、パルス電解加工において加工電源回路のインピーダンスが加工電流に与える影響を考慮して解析した例はなく、加工現象に与える影響は明らかになっていない。そこで本研究では、電気二重層を考慮した極間の電位分布の数値解析と、加工電源の回路方程式を連成解析する方法を開発し、加工電源のインピーダンスの影響を検討した。

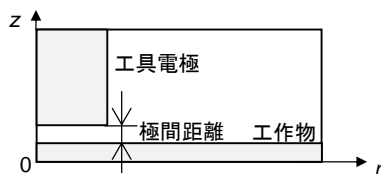


図1 電場計算の解析モデル

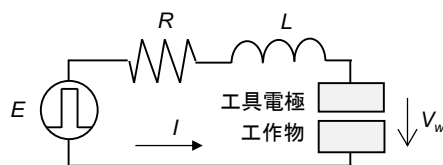


図2 電解加工電源の等価回路

## 2. 解析方法

電解加工電源の回路方程式と、電極表面での電気二重層を考慮した極間での電場の方程式を連成して解析を行った。なお、本解析では、羽田ら<sup>5)</sup>がワイヤ放電加工において、ワイヤ電極周りの電磁界と放電回路の回路方程式を連成して解析した手法を参考としている。図1に電場解析で用いたモデルを示す。円柱状の工具電極が一定の極間距離を隔てて工作物に対向していると、回転対称場として差分法にて解析を行った。工作物と工具間の電位差が  $V_w$  であるとし、濃度分極、抵抗分極を無視すると、この電位差  $V_w$  は各電極面上での電気二重層の活性化分極の過電圧と電解液中での電圧降下の和と等しい。そして、電場解析から工具電極上および工作物面上の電流密度  $i$  を求めることができる。ここで、 $i$  は充電電流  $i_c$  とファラデー電流  $i_f$  の和で

あり、以下の式で表される。

$$i = i_c + i_f \quad (1)$$

また、ファラデー電流はターフェルの式より以下のようなになる<sup>6)</sup>。

$$i_f = i_0 \{ \exp(\alpha_a F \eta / RT) - \exp(-\alpha_c F \eta / RT) \} \quad (2)$$

ここで、 $\eta$  は活性化分極による過電圧、 $i_0$  は腐食電流密度、 $\alpha_a$ ,  $\alpha_c$  はそれぞれアノード、カソード反応の電荷移動係数、 $R$  は気体定数、 $F$  はファラデー定数、 $T$  は絶対温度である。また、電極表面上での電気二重層への充電をコンデンサへの充電と考えると、以下の式から分極電圧を求めることができる。

$$\eta = \frac{1}{C} \int i_c dt \quad (3)$$

ここで、 $C$  は電気二重層の単位面積当たりの容量である。また、電解加工回路に流れる電流の総和  $I$  は、工作物面上を流れる電流の総和であるため、各点での電流を円周方向に積分することで、以下のように得られる。

$$I = \int i ds \quad (4)$$

次に、電解加工電源の回路モデルを図2に示す。本回路では、加工電源からパルス電圧  $E$  が印加され、電源から流れる電流  $I$  が抵抗  $R$  と回路配線のインダクタンス  $L$  を通って流れる。この回路において、ある時間における工具と工作物の電位差を  $V_w$  とすると、回路方程式は以下のよう表せる。

$$E = RI + L \frac{dI}{dt} + V_w \quad (5)$$

ある時間において  $V_w$  を仮定すれば、式(1)から式(3)を計算することができる。式(4)から回路を流れる電流  $I$  が求められる。この仮定した  $V_w$  と計算により求めた  $I$  が式(5)をみたしていれば、仮定した  $V_w$  が正しい値が正しい値ということになり、次の時間ステップの計算へ移行する。一方で、満たさない場合には  $V_w$  の仮定が間違っているため、値を変えて再度計算を行い、正しい値に収束するまで計算を続ける。解析条件を表1に示す。工具電極、工作物ともに同じ炭素鋼を使用していると仮定し、(2)式の腐食電流密度などの各パラメータには炭素鋼の塩酸中での分極曲線<sup>7)</sup>の結果を使用した。なお、この分極曲線測定における電流密度は電解加工で使用される電流密度よりかなり小さく、電解加工の様な大電流密度においては成り立たない可能性があるが、解析において定性的な理解には十分であると考えられる。

表1 解析条件

項目	値
電源電圧 $E$	4V
抵抗 $R$	0.1Ω
インダクタンス $L$	1μH, 2μH, 20μH
極間距離	5μm
電極直径	20μm, 40μm, 400μm
電解液	HCl 0.1M (0.36wt%)
電気二重層	10μF/cm <sup>2</sup>

## 3. 解析結果

### 3.1 充電電流とファラデー電流

図3に、工作物面上での充電電流密度とファラデー電流密度の時間変化を示す。なお、インダクタンスは1μH、工具電極直径は40μmである。パルス電圧が印加されると、工具と工作物の対向面上に充電電流が流れる。その後、電気二重層が充電され過電圧が大きくなると、ファラデー電流が流れ始め、充電電流はほとんど流れなくなる。また、ファラデー電流が流れる領域が工具電極の半径方向に徐々に広がっていくことがわかる。

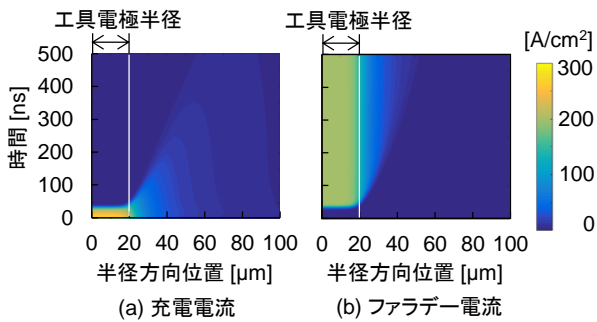


図3 工作物面上の電流密度

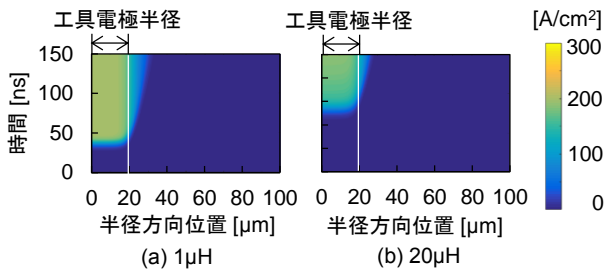


図4 工作物面上のファラデー電流密度

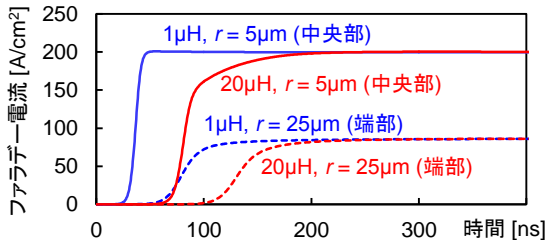


図5 電極中央部と端部での電流密度の違い

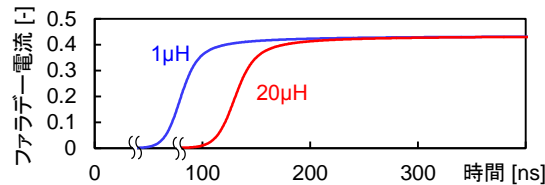


図6 電極中央部と端部での電流密度の比

### 3.2 インダクタンスがファラデー電流に与える影響

加工回路のインダクタンスを  $1\mu\text{H}$ 、 $20\mu\text{H}$  と変化させ、加工電流に与える影響を調査した。図4に工作物面上でのファラデー電流密度の時間変化を示す。また、図5に電極中央部付近 ( $r=5\mu\text{m}$ ) と工具外周から  $5\mu\text{m}$  離れた位置 ( $r=25\mu\text{m}$ ) でのファラデー電流密度を示す。図4、図5から、インダクタンスが大きくなると、ファラデー電流が流れ始めるのが遅くなることわかる。従って、インダクタンスが大きい場合には、加工を行うためにより長いパルス幅が必要となる。さらに、図6に工具外周から  $5\mu\text{m}$  離れた位置でのファラデー電流の電流密度を、電極中央部のそれで割った値を示す。この値は、工具から  $5\mu\text{m}$  離れた位置での除去量と、工具中央部での除去量の比率と等しい。従って、この値が小さいほど工具電極直下で選択的に加工が行われる。図6から、どちらのインダクタンスの場合でも似たような波形となっていることがわかる。つまり、インダクタンスの影響によりファラデー電流が流れ始めるのが遅くなっても、工具直下と工具端部での除去量の比はインダクタンスの大きさにはよらないということがわかる。

### 3.3 加工面積がファラデー電流に与える影響

加工面積が加工電流に与える影響を検討した。加工面積が大きくなると、極間の抵抗値が小さくなり電流が大きくなるため、回路のインダクタンスの影響が大きくなる。そこで、工具電極直径を  $40\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$  と変化させて解析を行い、ファラデー電流に与える影響を調査した。なお、インダクタンスの値は  $2\mu\text{H}$  とした。図7に工作物面上でのファラデー電流密度を示す。ま

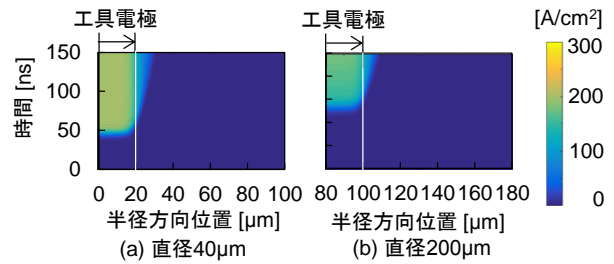


図7 工作物面上のファラデー電流密度

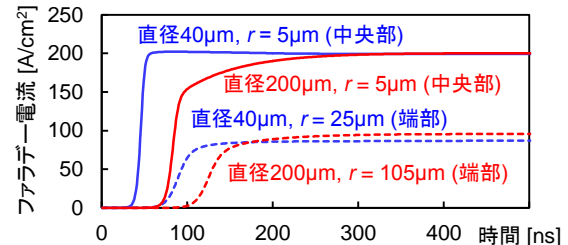


図8 電極直径による電極中央部と端部での電流密度

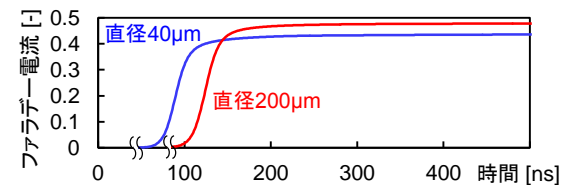


図9 電極直径による電極中央部と端部での電流密度の比

た、図8に電極中央部付近 ( $r=5\mu\text{m}$ ) と、各電極直径で工具外周から  $5\mu\text{m}$  離れた位置でのファラデー電流密度を示す。図6、図7より、工具電極直径が大きくなるとファラデー電流が流れ始める時間が遅くなっていることがわかる。これは、加工面積が大きくなったことで、極間の抵抗値が小さくなり電流が大きくなるが、インダクタンスが電流の流れを阻害したことで、工作物面上での電流密度が低下したためである。次に、図8に工具外周から  $5\mu\text{m}$  離れた位置でのファラデー電流の電流密度を、電極中央部のそれで割った値を示す。直径  $200\mu\text{m}$  の電極においては、定常状態に達した後の電流値の比率が直径  $40\mu\text{m}$  の場合よりも大きい。しかし、定常状態に達するまでは、電極直径によらず似たような波形となっている。従って、面積の大きい加工においても比較的長いパルス幅が必要にはなるが、短パルス電源を用いることで加工領域を工具直下に限定しやすくなり、加工の選択性を高められると考えられる。

## 4.まとめ

電解加工において、電気二重層を考慮した極間の電位分布と加工電源の回路方程式を連成解析した。回路のインダクタンスが増加すると、電流の立ち上がりが遅くなるため、電気二重層の充電に時間を要し、ファラデー電流が流れ始めるのが遅くなる。また、加工面積が増加すると、電流が大きくなるため、インダクタンスの影響により電流密度が低下し電気二重層の充電がされにくくなる。このため、ファラデー電流が流れ始めるのが遅くなる。しかし、大面積加工においても、短パルス電源を用いることで工具直下以外での電気二重層の形成を遅らせることができ、加工の選択性を高めることができると考えられる。

## 謝辞

本研究は、公益財団法人マザック財団の援助を受け行われた。

## 参考文献

- 1) R. Schuster, et al., Science, 289, 5476, 98-101, 2000.
- 2) B. J. Park, et al., CIRP Annals, 55, 1, 197-200, 2012.
- 3) F. Klocke, et al., CIRP Annals, 64, 1, 217-220, 2015.
- 4) Jason A. Kenney, et al., Appl. Phys. Lett. 84, 19, 3774-3776, 2004.
- 5) 羽田啓太, 国枝正典, 電気加工学会全国大会(2011)講演論文集, 45-48, 2011.
- 6) 電気化学会, 電気化学測定マニュアル基礎編, 丸善出版, 2002.
- 7) H. H. Hassan, et al., Electrochimica Acta, 52, 6359-6366, 2007.