極間距離検出機能を有する電解加工用吸引工具の提案と検証

遠藤克彰*, 夏 恒*

Proposal and Verification of Electrolyte Suction Tool with Function of Gap-Width Detection

Katsuaki ENDO, Wataru NATSU

Abstract

Since electrochemical machining (ECM) is a contactless machining method, it is necessary to detect and control the gap-width to estimate the machining amount and improve the machining speed and accuracy. In this study, a tool electrode capable of detecting the gap-width via the suction pressure was proposed. In this method, the electrolyte is confined and circulated beneath the tool electrode using a single suction pump. It was found that the electrolyte is successfully circulated using the pump. In addition, the suction pressure indicates the gap-width and the pressure signal can be used to control the tool electrode feed.

Key words: Electrochemical, ECM, Machining accuracy, Gap-width control, Electrolyte, Tool

1. 緒論

電解加工は電気化学反応を用いた非接触の加工法であるため、加工反力が小さく、原理的に工具消耗が生じない。また、切削などの機械加工が困難な難削金属材料の加工にも適用できるという利点がある。一方で、非接触の加工法であることに起因して、工具電極と工作物の距離、すなわち極間距離が分からないと、工具移動量から実際の加工量を求めることができない。加えて放電加工の場合と異なり、極間距離の変化に対して、極間電圧または電流信号の変化が微小であるため、これらの電気信号に基づいた極間距離制御手法は難しいとされている。

電解加工において、極間距離の推定は加工量の把握という点だけでなく、工具と工作物の短絡を防止すると同時に加工精度および加工速度を向上させるためにも必要である。つまり、加工中の極間距離を非接触で検出し、加工の進行に伴い工具

電極を送ることは加工特性の向上に不可欠である¹⁾。従来、電解加工における極間距離の検出手法はいくつか提案されている。例えば、極間電流波形の解析方式²⁾、渦電流方式³⁾、高周波放射波方式⁴⁾、超音波方式⁵⁾、ピーク電流値方式⁶⁾などが提案されているが、検出システムが複雑であるため、実用化の段階まで至っていない。そこで、本研究では、極間距離の制御による電解加工特性の向上のため、極間距離検出機能を備えた工具電極を提案する。本工具は、単一のポンプによる吸引のみで電解液を工具直下で循環させると同時に、工具とポンプの間のチューブ内の圧力変化により非接触で極間距離を検出し、工具電極の送り制御に利用できる。以下、このチューブ内の圧力を吸引圧力 (P_s) と呼称する。本報では、提案した吸引工具の原理を報告し、吸引圧力に基づいた極間距離の制御が可能か流体解析および実験により検証した結果を報告する。

* 東京農工大学 工学府 (東京都小金井市中町 2-24-16)

2. 工具電極の構造と極間距離検出の原理

2.1 工具構造

工具電極からの吸引により電解液を循環させるため、Fig. 1 に示される断面形状を持つ工具電極を考案し、製作した。工具電極は共に黄銅製である工具内筒と工具外筒から成っており、これらの筒の間隙から供給した電解液を工具内筒の貫通穴より吸引することで、工具先端部に電解液を循環させている。また、-Z 軸方向への送りによる穴加工を可能とするために、工具先端部の全面に電解液を行き渡らせる必要があり、図のように工具外筒、内筒の先端にテーパをつけ、工具先端の外周部にも電解液が供給される形状とした。本研究で用いる工具電極は、電解液の供給側に加圧はせず、内筒貫通穴からの吸引のみにより電解液を循環させている。なお、本工具の構造により、外形が 3mm 以下の工具を製作するのは多少工夫が必要であるが、電解加工の工具は消耗しないため、製作した工具は半永久的に利用できる。

Fig. 1 Schematic of proposed tool

2.2 電解液循環の原理

工具中心の吸引口から吸引しながら、工具と工作物が接近すると極間距離の減少に伴って、吸引を行う流路の断面積も減少し、空気流の流速が増加する。(1)式の重力項を除いたベルヌーイの定理に従うと、極間の空気の流速が増加すると圧力が低下するため、電解液が工具外筒と内筒の間隙(液供給部)から吸引され極間での循環を開始する。

$$\frac{1}{2}v^2 + \frac{p}{\rho} = \text{const.} \quad (1)$$

ただし、 v = 流速、 p = 圧力、 ρ = 密度
そのため、本工具では極間距離が小さい場合の

みに電解液が極間を循環する。また、工具外部から多量の空気を吸引してしまうと電解液の循環が困難となる⁷⁾ため、工具外筒先端部を内筒先端部よりもZ軸負の方向へ約0.05 mm突出させることで空気流入路の断面積を減少させた。

本研究で提案した工具と類似した二重の円筒形状を持つ工具を用いた研究として、山村らによりローカルウェットエッチング法が提案されている⁸⁻⁹⁾。また、この同軸ノズル電極工具は電解加工にも応用されている¹⁰⁾。上記の研究は工具の走査を数値制御により行い、形状加工を目的としている。また、加圧供給された電解液を吸引する際の吸引圧力と極間距離の関係は明らかでなく、極間距離の検出機能を有していない。また、工具内筒貫通穴から加圧して加工液を噴出し、工具外筒と内筒の間隙から空気と加工液を吸引しているため、工具外筒近傍には電解液が存在せず、穴加工に不向きな点、加圧と吸引の両方を同時に行わなければならない点などで本研究とは異なる。

2.3 極間距離検出の原理

本研究の提案工具を用いた場合、極間距離の変化に伴い流路の断面積が変化し、吸引圧力も変化する。よって、吸引圧力を測定することにより極間距離の推定ができる。そこで、吸引圧力と極間距離の関係性を明らかにするため、極間および工

Fig. 2 Analysis model

具内筒、外筒の間隙に空気を循環させて流体解析を行い、極間距離の減少に従って吸引圧力も低下する傾向が得られるか調査した。なお、実験時に極間を循環するのは電解液および空気の2相流となるが、本節では極間距離と吸引圧力の傾向の確認を目的としているため、空気のみを循環させて原理の確認を行った。解析ソフトにはCOMSOLを用い、Fig. 2に示す解析モデルを利用してTable 1, 2の条件下で解析を行い、図内に点で示した部分の圧力を吸引圧力とし、極間距離別に解析した。

流れは定常、非圧縮性の層流として扱う。解析時には、ポンプの性能を解析に反映させるため、Fig. 3 に示した吸引ポンプの性能曲線¹¹⁾を流出口の境界条件に適用している。この解析では単純な解析条件での原理の確認を目的としているため、実験値と解析値は異なり、直接比較することはできない。

Fig. 4 に示した解析により求めた吸引圧力 P_s と極間距離の関係から、極間距離の減少に伴って吸引圧力も増大していることがわかる。また、極間距離が小さいほど、吸引圧力の変化率も大きくなっていることから、極間距離が小さいほど、吸引圧力に基づいた極間距離の推定精度が向上すると

Table 1 Tool dimensions

Diameter of outer cylinder	10 mm
Diameter of inner cylinder	9 mm
Diameter of through hole	3 mm

Table 2 Analysis conditions

Software	COMSOL ver. 4.3b
Modeling type	2D axial symmetry
Wall condition	No-slip wall
Flow type	Laminar flow
P_0	1 atm
P_{out}	-53.33kPa (max.)

Fig. 3 Performance curve of pump

Fig. 4 Pressure-gap relationship (analysis)

考えられる。以上の傾向より、吸引圧力に基づいて極間距離の推定が可能であると考えられる。

3. 吸引圧力に基づいた極間距離制御

流体解析により、吸引圧力 P_s が極間距離によって変化し、吸引圧力に基づいた極間距離制御が可能であることが明らかとなった。本章では、加工装置、実験より得た吸引圧力と極間距離の関係および極間距離制御のアルゴリズムを述べる。

3.1 吸引圧力と極間距離の関係の実験結果

電解液に見立てた水を循環させ、極間距離を変化させた際の吸引圧力の変化を実験により得る。本来であれば、極間で生成する気泡や生成物の影響を考慮するため、加工中の吸引圧力と極間距離を調査することが望ましいが、加工の進行により実際の極間距離が不明となるため、本報では加工せずに吸引圧力と極間距離の関係を調査し、吸引圧力に基づいて極間距離が推定可能か調査を行う。

実験装置の概略図を Fig. 5 に示す。工具電極と工作物は 3 軸ステージに取り付けてあり、加工中の吸引圧力を測定するための圧力計を工具とポンプの間に挿入している。はじめに、平面状の工作物に対して吸引圧力と極間距離の関係を得た結果を Fig. 6 に before machining として示す。図より、2.3 節の空気循環時の解析結果と同様の傾向が得られており、さらに、極間距離が 100 μm 以下の領域においては極間距離の変化に対して吸引圧力が大きく変化している。以上のように、実験結果からも吸引圧力に基づいた極間距離の推定が行えるといえる。

以上の解析と実験の両方で吸引圧力と極間距離の関係を得たのは工作物表面が平面の場合であった。穴加工を行った際には、加工前は平面であった工作物の表面形状は加工の進行に伴い工具形状が転写されて変化する。つまり、加工穴底面形状の変化により電解液の循環する流路の形状が変化するため、極間距離と吸引圧力の関係も変化する。そのため、吸引圧力に基づいた極間距離制御の穴加工への適用には工作物の表面形状の変化を考慮する必要がある。そこで、工具移動量を 100, 300, 500, 1000 μm と変化した穴加工を行った後、それぞれ得られた穴底面に対し、電極と工作物の接

触感知とZ軸ステージにより、極間距離を設定した。そして、深さの異なる穴において、極間距離と吸引圧力の関係から、加工深さの増加に伴う極間距離と吸引圧力の関係の変化を調査した。それぞれの工具移動量および加工前において得られた吸引圧力と極間距離の関係を併せてFig. 6に示す。図より、加工後に測定した極間距離と吸引圧力の関係は加工前と比べて異なっている。一方、工具移動量が300 μm 以上の条件では極間距離と吸引圧力の関係が工具移動量によって変化しなくなった。これはある深さまで加工が進行し、加工穴底面形状に変化が生じなくなったためといえる。

加えて、加工前と工具移動量が300 μm 以上の条件を比較すると、工具移動量が300 μm 以上の条件において極間距離の変化に対する吸引圧力の変化量が大きくなっている。これは加工前よりも加工が進行した際の極間距離推定精度が向上することを示している。

Fig. 5 Experimental set-up

Fig. 6 Pressure-gap relationship

3.2 極間距離制御手法および実験装置

吸引圧力 P_s に基づいた極間距離制御を行うため、Fig. 7に示すフローチャートに従い、工具が取り付けられているZ軸ステージのモータを制御する。制御手法の詳細を以下に示す。まず、維持を目標とする極間距離に対応する吸引圧力を定め、 P_{tgt} とする。次に、Fig. 8に示すように、許容する P_{tgt} からの圧力変化の最小値を P_{lo} 、最大値を P_{hi} と設定する。圧力センサから P_s を随時取得し、吸引圧力が P_{hi} より大きい場合は、工具を-Z軸方向に送り極間距離を減少させ、 P_{lo} より小さい場合には、工具を+Z軸方向に送り極間距離を増加させることで吸引圧力を許容する誤差範囲内に留め、極間距離を維持する。なお、Fig. 8内の圧力と極間距離の曲線は工具移動量300 μm 時のものである。本論文内では、 P_{hi} と P_{lo} は式(2)の様に設定した。

$$\begin{cases} P_{hi} = P_{tgt} + 1 \text{ kPa} \\ P_{lo} = P_{tgt} - 1 \text{ kPa} \end{cases} \quad (2)$$

Fig. 7 Algorithm for feed control

Fig. 8 Method of gap-width control

この制御手法を実験装置 Z 軸に適用し、 0.6° 程度傾斜させた工作物表面を Table 3 の条件下で工具を水平方向に走査させ、工具が工作物表面に追従し、Z 方向の自動送りにより極間距離を維持するか調査を行った。その際、吸引圧力が-13 から -11 kPa となるように設定した。その結果、Fig. 9 に示すように、走査距離の増加に従って-Z 軸方向に工具送りが行われ、工作物表面に追従していることが確認できる。しかし、吸引圧力が-13 から -11 kPa となるように工具が制御されているため、極間距離はある範囲に保たれていると思われるが、工作物の加工面と電極の底面の間に 0.6 度の角度が存在しているため、極間距離は両者が平行の場合と異なる。

Table 3 Scan parameters

Feed rate	2 mm/min
Scanning distance	20 mm

Fig. 9 Gap-width control on sloped surface

4. 極間距離制御を伴う穴加工

3 章で述べた極間距離制御手法を用いて止まり穴加工を行い、実際の加工中においても極間距離の維持が行えるか調査する。

維持する吸引圧力 P_{tgt} は、電解液の循環に十分な流路幅が確保できる極間距離 $100 \mu\text{m}$ に対応する -12 kPa と定めた。この値は Fig. 6 に示した工具移動量が $300 \mu\text{m}$ 以上の条件より求めたものである。また、 P_{tgt} は加工開始から終了まで一定である。Table 4 に示す条件下で、Table 5 に示す電気条件を用いて加工を行う。加工は各工具移動量の条件に

おいて 2 回ずつ行った。Fig. 10 に各工具移動量で得られた加工形状の代表的なものを示す。

まず、加工形状について述べる。本加工では吸引圧力が -12 kPa となるように工具送りを制御しているため、図 11 (a)のように、工具移動量が $300 \mu\text{m}$ 以上の条件では極間距離が約 $100 \mu\text{m}$ に維持されるが、工具移動量 $100 \mu\text{m}$ 時には極間距離は約 $80 \mu\text{m}$ 、加工開始時には約 $60 \mu\text{m}$ に維持されることが Fig. 6 からいえる。本実験では工具移動量を定めて加工を行っているため、得られる加工穴の深さを図 11 (b)より求めると、式(3)となる。

$$D_m = F_t + G_{end} - G_{st} \quad (3)$$

ただし、 D_m は加工深さ、 F_t は工具移動量、 G_{st} は加工開始時の極間距離、 G_{end} は加工終了時の極間距離である。

したがって、各条件での加工深さは、工具移動量が $100 \mu\text{m}$ 時には $120 \mu\text{m}$ 、工具移動量 $300, 500, 1000 \mu\text{m}$ 時では、それぞれ $340, 540, 1040 \mu\text{m}$ となることが予想される。しかし、Fig. 10 を見ると、加工により得た加工深さはすべての条件で予想した深さより大きく、最大で $89 \mu\text{m}$ 程度の差が生じている。加工深さが工具移動量よりも大きくなった原因として、加工中に発生する極間生成物の影響が考えられる。加工により極間に泥状の生成物が生じると、生成物の介在により電解液の粘度が上昇する。そのために同じ極間距離においても加工前に比べて電解液の循環に大きな吸引圧力が必要となり、 $P_s = -12 \text{ kPa}$ に対応する極間距離がより大きくなったため、加工中に維持された極間距離が予想よりも大きくなり、加工深さも増加したためと考えられる。このような加工生成物の影響については、まだ解明されていないので、今後継続して調査する必要がある。

Table 4 Experimental conditions

Tool material	Brass
Workpiece	SUS304
Electrolyte	10 wt% NaNO ₃ aq
Total feed amount	100, 300, 500, 1000 μm

Table 5 Pulse waveform

High-level current	15 A
Low-level current	0 A
Pulse width	5 ms
Pulse period	50 ms

Fig.10 Cross-sectional shape of machined hole

(a) Gap-width corresponding to P_{tgt}

(b) Definition of parameters

Fig.11 Estimation of machined depth

Fig.12 Lateral gap-depth relationship

なお、図 10 に示すように加工穴の中央部に突起が生じているが、これは工具内筒にある貫通穴の影響である。この突起は貫通穴の加工においては特に問題にならないが、非貫通穴加工の場合、工具電極や工作物の揺動により除去する必要がある。なお、揺動する場合としない場合は、突起の有無により極間距離と吸引圧力の関係は変化するので、正確な極間距離と吸引圧力の関係が必要な場合は、実験から求めることができる。

ところで、本工具では、工具電極からの吸引により工具直下で電解液を循環させているため、工具側面に電解液が流出しないと考えられる。工具側面に電解液が存在しない場合、穴加工時に工具移動量が増加してもテーパのない加工穴が得られると考えられる。そこで、各加工深さにおいて工具側面と加工穴入口部直径の差である側面ギャップを Fig. 10 より算出し、加工深さと側面ギャップの関係を Fig. 12 に示す。図より、工具移動量が 100 μm から 300 μm に増加した際には側面ギャップの増加が見られるが、これは加工により生じる気泡の除去が不十分であるため、電解液が工具側面に隆起し、加工が生じたためと考えられる。しかし、その後は工具移動量が増加しても側面ギャップは変化しておらず、少なくとも 300 μm 以上の工具移動量を行えば、その後は工具側面で加工が進行しないことも明らかとなった。

5. 結言

極間距離検出機能を有する電解加工用吸引工具を提案し、解析によりその検出原理を確認し、実験によりその有用性を調査した結果、以下の知見が得られた。

- ・ 吸引のみで工具電極直下の極間に電解液を循環できる
- ・ 極間距離の変化に対応して吸引圧力が変化し、これを基に極間距離の検出と制御が行える
- ・ 電解液が工具直下で循環するため、工具側面の加工を抑制できる

謝辞

本研究は JSPS 科研費 25630021 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) K.P. Rajurkar, D.Zhu, J.A. McGeough, J. Kozak, A. De Silva: New Developments in Electro-Chemical Machining, *Annals of the CIRP*, 48(2), pp.567-579 (1999)
- 2) B. Wei, K. P. Rajurkar, S. Talpallikar: Identification of Interelectrode Gap Sizes in Pulse Electrochemical Machining, *J. Electrochem. Soc.*, 144(11), pp.3913-3918 (1997)
- 3) C. Ing, E.S. Bignon, C. Bedrin: Application of eddy currents to in-process measurement of the gap in ECM, *Annals of the CIRP*, 31(1), pp.115-119 (1982)
- 4) J.A. De Silva, K. McGeough, Process monitoring of electrochemical micromachining, *International Journal of Materials Processing Technology*, 76, pp.165-169 (1998)
- 5) D. Clifton, A.R. Mount, G.M. Alder, D. Jardine, Ultrasonic measurement of the inter electrode gap in electrochemical machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42, pp.1259-1267 (2002)
- 6) S. Harada, W. Natsu, Study on Sensitivity of Gap-width Detection with Peak Current in Pulse ECM, *Proceedings of the 12th euspen International Conference*, pp. 120-123(2012)
- 7) 遠藤 克彰, 夏 恒: 加工領域限定と極間距離検出のための電解液吸引 ECM 工具電極の提案, 第9回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, pp.213-214, (2012)
- 8) K. Yamamura, Fabrication of Ultra Precision Optics by Numerically Controlled Local Wet Etching, *Annals of the CIRP* 56, pp. 541-544, (2007)
- 9) K. Yamamura, Development of numerically controlled local wet etching, *Science and Technology of Advanced Materials* 8, pp. 158-161, (2007).
- 10) 永野 幹典, 田畑 雄壮, 山村 和也: 数値制御電解加工における金属ミラーの形状創成加工(第2報)ー同軸ノズル電極の基礎加工特性ー, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2012).
- 11) 株式会社イワキ, 気液混合移送用エアーポンプ APN-W シリーズカタログ, (http://www.iwakupumps.jp/products/air/apn_w), 2014-1-3.

(2014年1月7日受付)