

# 深穴電解加工における穴の湾曲現象の解明

東京農工大学 ○大谷和菜, 酒本昌子, ◎夏恒

## 要旨

深穴電解加工において、電極が回転せず、またパイプ電極の肉厚が不均一である場合、加工される穴が湾曲することが実験により確認されている。これを利用すれば曲がり穴加工への応用も期待できるが、穴が湾曲する原因は判明していない。そこで本研究では、有限要素解析ソフト COMSOL を用いて穴が湾曲する理由を解明するために解析を行なった。その結果、電解液の圧力差の影響で電極が変形することにより穴が湾曲することが明らかになった。

## 1. 緒言

電解加工は電解液中における陽極材料の溶解現象を利用して加工を行う方法で、機械加工が困難な金属材料の加工が可能である<sup>1)</sup>。非接触、電極無消耗、高生産性などの特長により、電解加工は産業用ガスタービン翼の冷却穴のような深穴の加工に多く用いられている<sup>2)</sup>。しかし、電極が回転しない状態での深穴の電解加工においてパイプ電極の肉厚が均一でない場合、肉厚が厚い方に穴が湾曲し、加工精度が低下することが実験により確認されている。深穴の加工精度を向上し、また、この現象を利用して曲がり穴加工に応用するためには穴が湾曲するメカニズムを明らかにする必要がある。

そこで本研究では、有限要素法解析ソフトウェア COMSOL を用いて、電極先端形状の穴加工形状への影響を調査し、パイプ電極先端の肉厚が不均一な場合に穴が湾曲する現象を解明することを目的とする。

## 2. 加工穴が湾曲する理由に関する仮説

電極の肉厚が不均一な場合に加工穴が湾曲する理由は以下の二つが考えられる。

### (1) 工具電極側面の絶縁部と穴加工面との衝突

電極の肉厚が不均一である場合、電極が厚い部分で加工量が多くなり、穴の形状に差が生じる。その結果、加工量が少ない部分の穴側面に電極外側の絶縁膜が衝突し、逆方向に力が加わることで、力の方向に電極の進行方向が曲がり、加工される穴も湾曲することが考えられる。

### (2) 電解液流れにより発生する圧力の差

穴形状が非対称となることで、電解液の圧力が左右で非対称となる。その結果、電極に加わる力に左右差が生じ、圧力が高い方から低い方に力が加わることで、パイプ電極が変形し、穴が湾曲することが考えられる。

また、パイプ電極の先端に角度が設けられているが、角度の違いにより加工特性が異なることが実験より分かっている<sup>3)</sup>。そこで、角度と肉厚差が穴形状に及ぼす影響を調査し、上記のどちらの仮説が正しいのか検証した。

## 3. 解析モデルと解析条件

実験で用いられた電極の寸法を基に図1の解析モデルを作成した。本研究では、左右の肉厚の違いの影響を調べる目的で、解析時間の短縮とモデルの単純化のため、2次元モデルを利用し、穴の形状変化を解析した。穴の側面と電極の側面の間に電流が流れないようにするため、実際に利用されるパイプ電極と同様、側面を厚さ 25 $\mu$ m の絶縁膜で覆った。また、電極の肉厚差  $a-b$  と先端角度  $\theta$  (図1(b)参照)を変化させた際の穴形状の違いを調査した。解析は電解液の流れ、電流密度分布、材料溶出および形状変化を含め、統合的に行われる。解析条件を表1に示す。各パラメータの値は実験で用いられた値を参考にした。

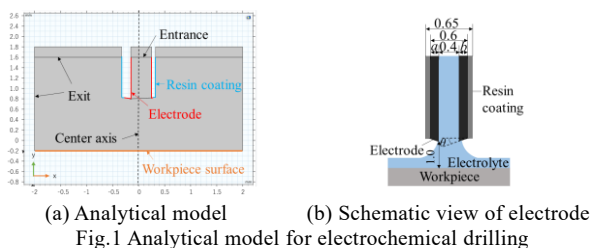


Fig.1 Analytical model for electrochemical drilling

Table 1 Analytical conditions

Electrolyte conductivity	16 S/m
Flow speed at inlet	2.6 m/s
Voltage	11.9 V
Electrode feed rate	1.8 mm/min
Initial gap distance	1.0 mm

## 4. 加工穴の形状解析結果

### 4.1 電極先端角度と肉厚差による影響

電極左側の肉厚を 0.15 mm、右側の肉厚を 0.05 mm、肉厚差を 0.1 mm と固定し、先端角度を 0–15°で変更したモデルと、電極先端角度を 10°にし、肉厚差を表2に示すように 0.05–0.19 mm で変更したモデルを用いて解析を行った。これらの解析は、電極の肉厚差の影響が顕著になるよう肉厚差を大きくしている。なお、解析時間は 5 秒間で、電極送り量は 0.15 mm とした。5 秒時点での穴形状を図2に示す。同図より、穴形状がわずかに異なることが分かるが、穴が浅く、左右差の確認が困難である。そのため、パイプ電極の外形の中心からの距離が等しい地点での左右の穴の深さの差の絶対値をとった。電極の肉厚が厚い左側の穴の深さから、肉厚が薄い右側の穴の深さを引いた値を図3に示す。同図(a)より、同じ肉厚差の場合、先端角度が大きいほど穴形状の左右差が拡大することが分かる。また、同図(b)より、先端角度が同じ場合、肉厚の差が大きいほど穴形状の左右差が拡大することが分かる。

Table 2 Electrode wall thickness

No.	$a$ [mm]	$b$ [mm]	$a-b$ [mm]
1	0.125	0.075	0.05
2	0.15	0.05	0.1
3	0.175	0.25	0.15
4	0.195	0.005	0.19

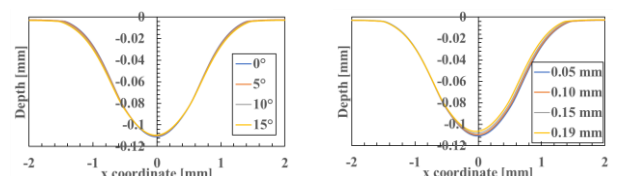


Fig.2 Machined hole shape

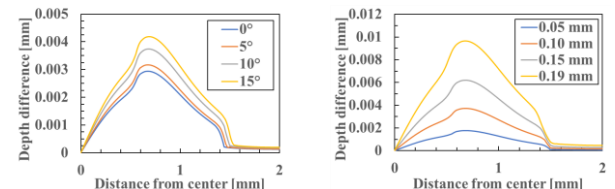


Fig.3 Depth difference between right and left part of machined hole

### 4.2 電極と穴側面の接触判定

表3に示す電極先端角度、肉厚差、電極送り速度の3通りの組み合わせで、電極と穴側面が接触するか、電極と穴側面との距離が変化しなくなる定常状態に達するまで解析を行い、電極と穴側面との距離の時間変化を調査した。表3の条件(3)において、電極送り速度を 10 倍としたのは、電極と穴側面がより接触しやすい条件にしたためである。なお、評価する電極と穴表

連絡先: 夏恒 TEL: 042-388-7776, Email: summer@cc.tuat.ac.jp

面との x 方向と y 方向の距離は図 4 のように定義した. x 方向と y 方向の結果を図 5, 6 にそれぞれ示す. 電極の肉厚が薄い方が電極と穴表面との距離が小さく, 電極先端角度と肉厚差が大きいほど左右での差が大きくなる. また, 電極送り速度が速いほど電極と穴表面の距離が小さくなり, 一定の値まで近づいた後, 接触することなく定常となる. 一定の値まで近づいた後, 接触することなく定常となる. 一定の値まで近づいた後, 接触することなく定常となる. 一定の値まで近づいた後, 接触することなく定常となる.

	Electrode tip angle [°]	Wall-thickness difference [mm]	Electrode feed rate [mm/min]
(1)	10	0.10	1.8
(2)	15	0.19	1.8
(3)	15	0.19	18

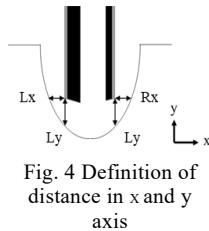
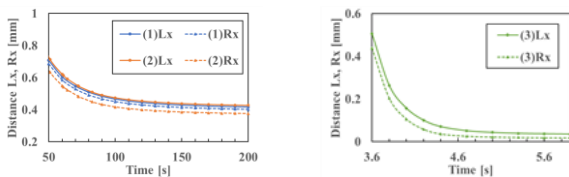
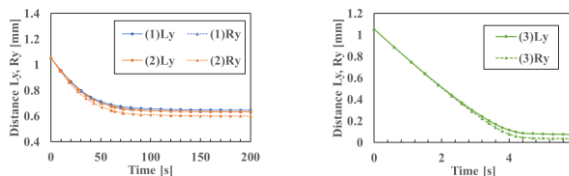


Fig. 4 Definition of distance in x and y axis



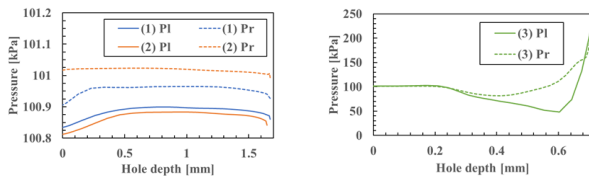
(a) Conditions (1) and (2) (b) Condition (3)  
Fig. 5 Distance between electrode and hole surface in x axis



(a) Conditions (1) and (2) (b) Condition (3)  
Fig. 6 Distance between electrode and hole surface in y axis

### 4.3 圧力差による影響

上記の結果より, 穴が湾曲する現象は, 電解液の圧力差が影響していることが考えられる. 加工穴の形状解析では電極の変形は考慮されていないが, COMSOL の解析内において流体の圧力は計算されている. そこで, 4.2 節の解析における電極と穴側面との距離が変化しなくなる定常時の流体に圧力差が生じているか調べた. 電極に加わる左からの圧力  $Pl$  と右からの圧力  $Pr$  を図 7 に示す. 同図より, 電極が薄い部分の圧力  $Pr$  が高く, 角度と肉厚差, 電極送り速度が大きいほど圧力差が大きくなる. これは, 加工形状が不均一となることで, 穴の内部を流れる電解液の圧力にも左右差が生じるためであると考えられる. この電極の肉厚差により生じる圧力差が, 加工穴が湾曲する原因の一つであることが考えられる.



(a) Conditions (1) and (2) (b) Condition (3)  
Fig. 7 Difference in pressure due to electrode shape

## 5. パイプ電極の変形解析

### 5.1 解析原理と解析モデル

パイプ電極から噴出される電解液の圧力差による電極の変形を調査するため, 4.3 節で求められた流体の圧力分布を用いて電極の変形のみを考慮した解析を行った.

実験での初期状態における電極固定位置と工作物表面との距離は 200 mm, 電極先端と工作物表面との距離は 1 mm である. 以上を基に, 図 8 に示す電極モデルを作成した. 電極の長

さは 199 mm とし, 上部を移動, 変形しない固定境界とした.

また, 前章では肉厚差が穴形状に及ぼす影響を顕著にするために, 肉厚差を非常に大きくしたが, 本章では現実的で小さい肉厚差でも電極の変形が発生するか確かめるため, 表 4 に示す 2 種類の電極を用いて解析を行った.

なお, 電極送り速度はどちらも 1.8 mm/min とし, 電極先端角度  $\theta$  は  $10^\circ$  とした. 電極には SUS304 を用い, 電極を覆う絶縁膜はテフロン樹脂とした.

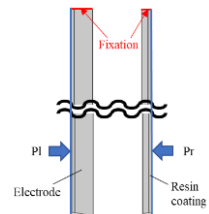
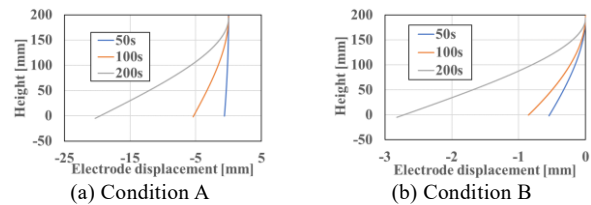


Fig. 8 Electrode model

	a [mm]	b [mm]	a-b [mm]
A	0.15	0.05	0.1
B	0.11	0.09	0.02

### 5.2 変形解析結果

加工開始から 50 s, 100 s, 200 s それぞれの時間での電極に加わる流体の圧力分布を求め, その圧力を分布荷重として図 8 の電極モデルに加えた際の変形を図 9 に示す. 電極の肉厚が厚い左側に電極が湾曲しており, 解析時間が長くなるほどその変形が大きくなる. これは, 肉厚が薄い右側の方が流体の圧力が高くなり, 電極全体に左側への力が加わったためである. 次に, 電極先端の変位をとり, 肉厚差の違いによる差を比較した結果を図 10 に示す. 電極の肉厚差が大きいほど変形も大きく, その差は加工深さの増加に伴い大きくなる.



(a) Condition A (b) Condition B  
Fig. 9 Electrode displacement

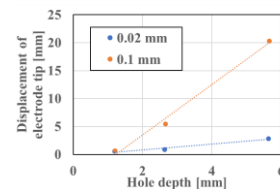


Fig. 10 Comparison of displacement at electrode tip

## 6. 結言

パイプ電極による深穴の電解加工において, 電極の先端角度と肉厚差が加工精度に及ぼす影響を解析によって調査した. また, 電極の左右の肉厚差によって, 加工される穴が湾曲する原因を解析結果に基づいて考察した. その結果, 電極が穴側面に接触する現象は確認されなかったが, 圧力差が生じていることが分かった. この圧力差による電極の変形を調査した結果, 小さい肉厚差でも変形が生じていることが確認されたことから, パイプ電極の肉厚がわずかでも不均一な場合に穴の湾曲が発生する可能性があることが明らかになった.

### 参考文献

- 1) J.F. Wilson: Practice and Theory of Electrochemical Machining, John Wiley & Sons, Inc.(1971)
- 2) M. Sakamoto, W. Natsu: Study on Machining Instability Phenomenon in Electrochemical Machining of Large Aspect-ratio Holes, Procedia CIRP, 95, pp.777-781 (2020)
- 3) 酒本昌子, 夏 恒: 深穴の電解加工における電極先端形状および電解液濃度の影響について, 電気加工学会全国大会 (2020) 講演論文集, pp.51-52 (2020)
- 4) COMSOL: Electrochemical Machining of a Microbore, COMSOL Multiphysics Application Library, <https://www.comsol.jp/model/electrochemical-machining-of-a-microbore-13267>.