

導電領域制御工具による複雑形状穴の電解加工

東京農工大学, ○野村英碩, 米大海, ◎夏恒

要旨

難削材の逆テーパ穴や複雑形状穴の加工が求められている。そのため、レーザーや放電加工、電解加工を用いた加工法が提案されているが、レーザー加工の場合は穴の表面に熱影響層が発生し、放電加工の場合は工具の消耗が激しいことが問題である。一方、電解加工を用いた場合は加工精度が高いうえ、穴に加工変質層もなく電極消耗もない。本研究では、側面の導電領域を制御した工具を作製し、逆テーパ穴と複雑形状穴を加工した。

1. 緒言

難削材の逆テーパ穴や複雑形状穴の加工が求められている。Chang Hee Jo¹⁾らは側面を絶縁した電極を用いて送り速度とパルスオン時間を制御して、逆テーパ穴を加工した。またLi Yong²⁾らは同様に絶縁した電極を用いて印加電圧や送り速度を制御して逆テーパ穴を加工した。しかし、電源や電極の運動制御が必要であることや加工が電極底面でしか行われなため、加工効率が低いことが問題である。そこで、米ら³⁾は電極側面の導電領域を制御することで、複雑な制御装置が不要で軸方向の加工量を変化させることが可能な工具を考案し、シミュレーションで有効性を確認している。

本研究では、側面の導電領域を制御した工具電極を作製し、逆テーパ穴と複雑形状穴を実際に加工した。加工実験により本方法が有効かを検証する。また加工電流と加工時間の影響を確認した。

2. 加工原理

電解加工の加工速度は工作物表面の電流密度に依存する。そのため工具電極表面の面積あたりの導電領域を変化させることで対応する工作物表面の電流密度を制御できると考えられる。本実験では図1のように絶縁体の円柱にスズメッキ軟銅線をピッチを変化させながら巻きつけた工具を用いる。その工具電極を回転させながら電解加工を行うことで軸方向の加工量を制御する。

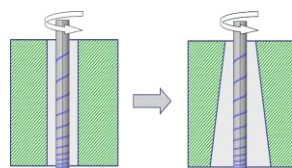


Fig.1 Concept of proposed ECM method electrodes

3. 実験装置

3.1 電解槽

実験装置の概略図を図2に示す。図のように、工具電極が偏心しない様に上端と下端を支持し工具電極を回転させ通电することにより下穴を開けた工作物に加工を行う。また電解液の供給は、極間生成物と熱を除去し、常時新鮮な電解液の供給を行うためにポンプによる吸引を行った。

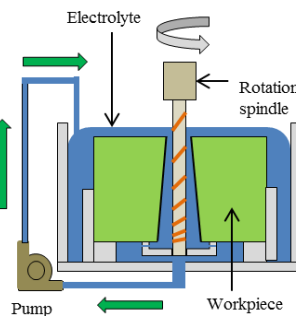


Fig.2 Experimental equipment

3.2 工具電極

本実験で使用する工具電極の絶縁体円柱は、3Dプリンタ(Stratasys EDEN250)を用いて作成した。この円柱に予めピッチと同じ溝を付与しておくことで銅線を巻きやすく、また銅線が緩みにくくなる。この円柱にφ0.4 mmのスズメッキ軟銅線を巻きつけることで作成した。実際に作製した逆テーパ加工用の工具電極を図3に示す。工具のピッチを測定し、設

計時のピッチと比較した結果を図4に示す。図4より半径方向の形状は最大で0.1 mm程ずれており、軸方向ではピッチが最大1 mm近く異なることが分かる。また、図5に複雑形状穴加工用工具電極の外観を示す。

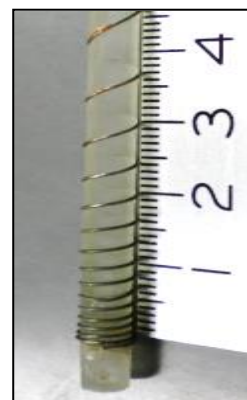


Fig.3 Tool electrode for reverse tapered hole

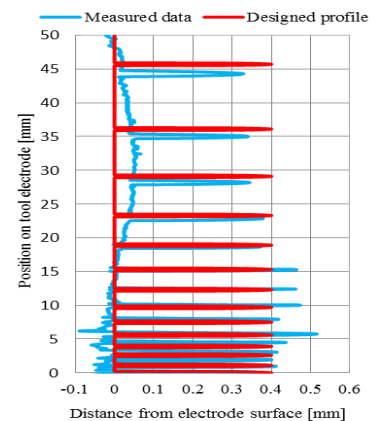


Fig.4 Designed profile and measured data of fabricated tool electrode

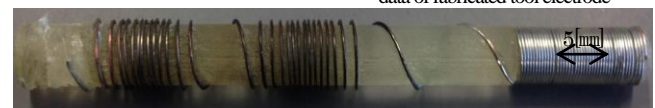


Fig.5 Tool electrode for complex internal features hole

4. 形状加工の実験結果

4.1 逆テーパ穴の加工

逆テーパ穴加工用工具電極を用いた実験の実験条件を表1に示す。10wt%NaNO₃ aq を電解液として用いた。工作物には厚さ45 mmのC2801(六四黄銅)試験片に直径6.8 mmの下穴を開けたものを用いて、作製した工具を挿入し、回転させながら加工を行った。その後、ワイヤ放電加工で穴を切断し、輪郭形状測定器を用いて穴の形状を測定した。結果を図6に示す。図6からワイヤのピッチ間隔が狭い箇所ではピッチ間隔が広い箇所より最大で半径0.4 mmほど大きく加工されている。

| Applied current | 5.0 A |
|------------------------|--------|
| Rotation speed of tool | 20 rpm |
| Machining time | 900 s |

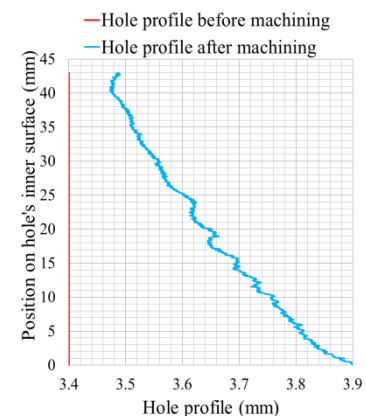


Fig.6 Experimental result

4.2 電流値による加工形状の制御

複雑形状穴用工具電極を用いて、電流値を変化させた実験を行った。実験条件を表 2 に示す。

| Applied current | 3, 5, 7 A |
|------------------------|-----------|
| Rotation speed of tool | 1000rpm |
| Machining time | 540 s |

4.1 と同様の電解液、および試験片に直径 7.0 mm の下穴を開け、作製した工具を挿入し、回転させながら加工を行い、実験後にワイヤ放電加工で穴を切断し輪郭形状測定器を用いて穴の形状を測定した。

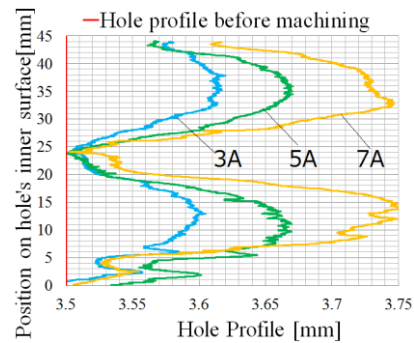


Fig.7 Experimental result

結果を図 7 に示す。電流値を大きくすると加工量も大きくなる。また電流値を大きくしても断面のピッチ間隔が広く電流密度の小さい箇所ほとんど加工されないことが分かる。一方、7.0A 時の加工断面の底面付近には焦げ付きが存在し、電流値に対するポンプの吸引が間に合っていないことが分かった。

4.3 加工時間による加工形状の制御

4.2 節と同様の工具

電極を用いて、加工時間を変化させた実験を行った。実験条件を表 3 に示す。

| Applied current | 5.0 A |
|------------------------|-----------------|
| Rotation speed of tool | 1000rpm |
| Machining time | 360, 540, 720 s |

4.1 節と同様の試験片に加工を行い実験後に輪郭形状測定器を用いて測定した結果を図 8 に示す。加工時間を長くすることで加工深さが大きくなる。また加工時間が長くなるにつれ、穴の断面が滑らかになっている。また加工時間を延ばしてもピッチ間隔の広い電流密度の小さい 20-25 [mm] 付近ほとんど加工されないことが分かる。これらの実験には焦げ付きが発生せず、良好な加工断面が得られた。

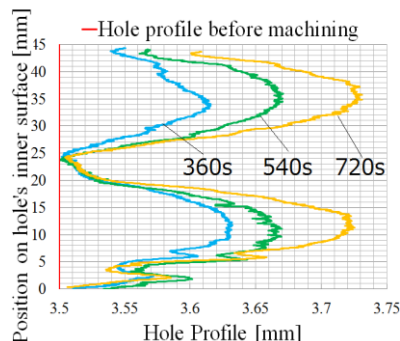


Fig.8 Experimental result

5. 逆テーパ穴の加工形状シミュレーション

任意の複雑形状穴を加工するためには、求める加工形状から逆算して工具の導電領域を設計する必要がある。初めに、既に行った実験と同様の条件で加工結果が一致するかどうかを確認する。シミュレーションには COMSOL Multiphysics を用いて有限要素法解析を行った。図 9 に解析モデルおよびモデルのメッシュ分割を示す。電解液中のメッシュの大きさを $5\mu\text{m} < e < 70\mu\text{m}$ 程度に設定し、電極の導電領域のメッシュ $0.25\mu\text{m} < e < 25\mu\text{m}$ に設定した。導電領域はピッチによって定義している。ピッチの変化によって導電領域を定義することでシミュレーションの設定を行いやすいことも本工具電極の利点として挙げることが出来る。シミュレーション条件を表 4 に示す。電圧値は 4.1 節の実験時に測定した電圧を用いた。

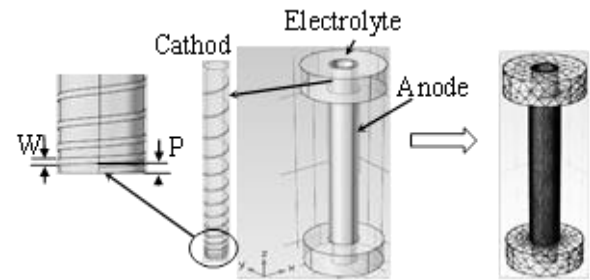


Fig.9 Simulated machining conditions

Table4 Simulated machining conditions

| Workpiece | 45 mm thick brass plate |
|------------------------|----------------------------|
| Electrolyte | 10wt% NaNO ₃ aq |
| Applied voltage | 4.6 V |
| Rotation speed of tool | 20rpm |
| Machining time | 900 |

図 10 にシミュレーションの結果を示す。また比較のために図 6 を再掲する。比較すると逆テーパ穴の加工においてシミュレーション結果は実加工とよく一致していることが分かる。実加工とシミュレーションが一致することから求める複雑形状穴の形状から導電領域のピッチをシミュレーションによって求めることが可能になると考えられる。

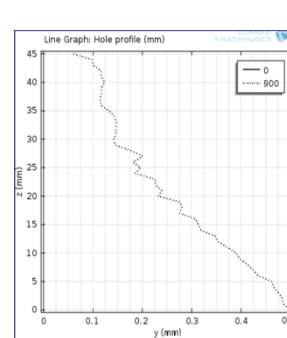


Fig.10 Simulation results

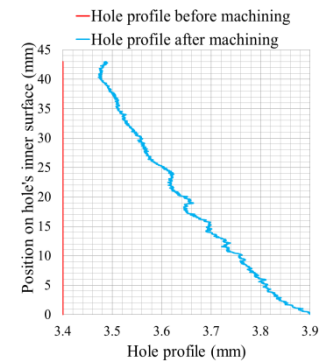


Fig.6 Experimental result

6. 結言

本研究の結果から導電領域制御工具による複雑形状穴、特に逆テーパ穴の電解加工は可能である。また、電流値や加工時間を変化させることで加工形状を変化させることが可能である。またシミュレーションによって作成した工具電極の加工結果を予想することが可能である。このことから任意の複雑形状穴を加工するために必要な工具電極の導電領域のピッチや加工時間、電流値を予想し、作成することが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) Chan Hee Jo, etc. Micro electrochemical machining for complex internal micro features. CIRP ANNALS – Manufacturing Technology. 2009, 58: 181-184.
- 2) L. Yong, H. Ruiqin, "Micro electrochemical machining for tapered holes of fuel jet nozzles", Procedia CIRP 6, (2013), pp.395.
- 3) Dahai Mi, Wataru Natsu, "Proposal of Machining Method for Reverse-tapered Hole and its Verification with Simulation," 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(2014), pp.1199-1200