

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17992

研究課題名(和文) 5-axis Abrasive-assisted Electrochemical Jet Machining for Surface-processing of Difficult-to-machine Materials

研究課題名(英文) 5-axis Abrasive-assisted Electrochemical Jet Machining for Surface-processing of Difficult-to-machine Materials

研究代表者

趙 永華 (Zhao, Yonghua)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教

研究者番号：90759052

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：今まで、自由曲面への電解液ジェット加工技術は研究されていない。本研究では、自由曲面の加工をターゲットにして、5軸電解液ジェット加工を行い、その特性と原理を実験とシミュレーションの両面から調べた。実験から工作物表面に対するジェットの角度や姿勢は加工結果に大きな影響を与え、また工作物コーナー部の電解液ジェット加工は、コーナー部の幾何学的形状の影響を大きく受けることが分かった。一方、シミュレーションでは、ギャップ内の電解液流れ場と電流密度分布がジェット角度の影響を強く受けることが判明した。5軸のジェット加工では、安定した加工性能を得るには、工作物表面に対してジェット角度を一定に保つ必要がある。

研究成果の概要(英文)：Five-axis Jet-ECM can provide infinite possibilities in the machining of part sizes and shapes. However, this technique has not been developed. In this research, the characteristics and principles of the 5-axis Jet-ECM process were investigated through both experiments and simulations. It is found that the jet angle relative to the workpiece surface had significant influences on the Jet-ECM results. On the other hand, the jet direction had little influence on Jet-ECM. The performances of Jet-ECM of corners is greatly affected by the corner angles and geometric shapes. Special attentions must be given to the corner geometries in practice. Multiphysics-coupled simulation of Jet-ECM suggested that the electrolyte flow and current density distribution in the gap was significantly affected by the jet angle, which was verified by experiments. To achieve stable and constant machining results, the jet angle relative to the workpiece surface, usually perpendicular, must be kept constant.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：5-axis EJM Freeform surface

1. 研究開始当初の背景

電解液ジェット加工は、微細ノズルから電解液を工作物に向けてジェット状に噴出し、ノズルと工作物の間に電圧を印加することで、電解液のジェット直下のみを選択的に加工する方法である。電解加工は電解作用を加工原理とするため導電体であれば工作物の硬度によらず加工可能であり、また加工変質層や残留応力、バリ、クラックの発生などの問題点のない加工法である。NC と組み合わせることにより、任意パターンの彫刻加工、表面テクスチャリング加工などが可能である。一方、図1のように、電解液ジェットを用いて曲面形状をもつ工作物、例えばタービンブレード、の加工の研究はまだされていない。本研究は、自由曲面の加工を注目し、5軸電解液ジェット加工技術を提案した。

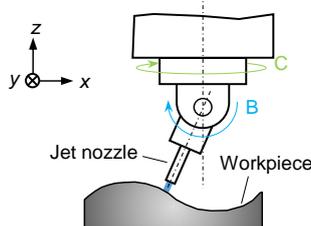


図1 5軸電解液ジェット加工概念図

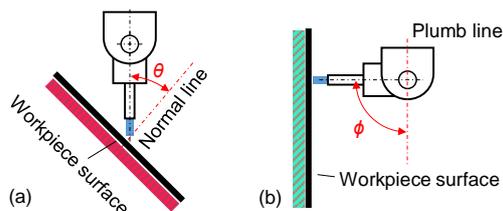


図2 a) ジェット噴射角度; b) 空間姿勢

2. 研究の目的

本研究は、5軸電解液ジェット加工技術を開発し、電解液ジェット加工の応用を広げることが目的とする。電解液ジェット加工において、曲面形状をもつ工作物の加工を行う際に、工作物に対する電解液ジェット噴射角度や姿勢(図2)により極間の電解液流れ場や電流密度が変化すると考えられる。本研究では、これらの電解液流れ場や電場を注目し、5軸電解液ジェット加工の特性と原理を実験とシミュレーションの両面から解明する。

3. 研究の方法

電解液ジェット加工実験を行うために、図3に示すような電解液ジェット加工の実験装置を製作した。工作物はxy方向への位置決めが可能で、電解液ジェットノズルはz軸方向に移動可能である。また、電解液ジェットノズルの空間姿勢の調整できる専用治具を作製し、5軸加工を可能にした。電解液はギャポンプによって送液される。ギャポンプのモータの回転数を制御することで、任意の流量を得ることができる。加工電源には高速バイポーラ電源を用い、ファンクションジェ

ネレータの指令値により電流のパルス幅、ピーク値を制御した。

実験には円筒ノズルとスリットノズルをそれぞれ用いた。工作物表面に対する電解液ジェット噴射角度やジェットの空間姿勢を変更させて、電解液ジェット静止加工と走査電解液ジェット加工の実験をそれぞれ行い、加工特性を調査した。また、スリットノズルを用いフラットジェットを作り出し、曲面への大面積仕上げ加工を行い、加工性能を調べた。一方、曲面へ電解加工する場合の極間の流れ場や電場を解明するために、斜面への電解液ジェット加工のシミュレーションモデルを構築し、極間の電解液流れ場と工作物表面の電流密度分布を解析した。さらに、実験により解析結果を検証し、曲面への電解液ジェット加工の特性を解明した。

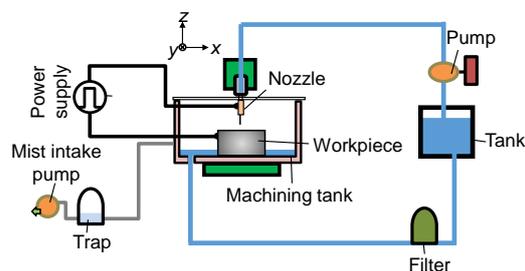


図3 電解液ジェット加工実験装置概略図

4. 研究成果

(1) 工作物表面に対する電解液ジェット噴射角度が加工面に及ぼす影響

(あ) 図4は円筒ノズルを用い静止加工した場合の実験結果である。ジェット噴射角度により加工痕の輪郭が非円状になり、加工中心が傾斜方向に移動することがわかった。一方、図5示すように、ジェット空間姿勢が加工結果に及ぼす影響がほぼないことがわかった。垂直な加工面に対しては、ジェット姿勢を水平方向にすることで加工できる。

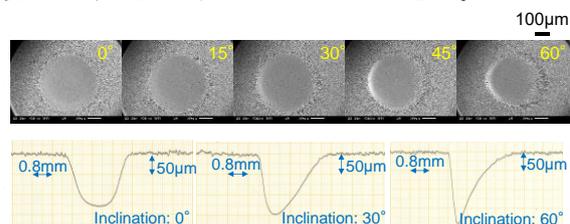


図4 静止加工においてジェット噴射角度を変化させた際の加工痕の様子と断面プロフィール

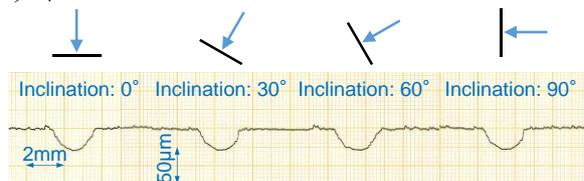


図5 ジェットの空間姿勢を変化させた際の加工痕断面プロフィール

(い) 図 6 は円筒ノズルを用い走査加工の実験結果である。同じ加工条件で、噴射角度 0° の場合と比較すると、 45° 傾斜した場合の加工面のプロファイルのうねりが大きくなることがわかった。



図 6 複数回走査加工により加工面の断面形状：走査方向に垂直

(う) 傾斜させたジェットの一回流より加工した溝断面形状は、静止ジェット加工の加工痕より計算できる。図 7 はその計算結果である。理論計算結果と実験結果ほぼ一致した。

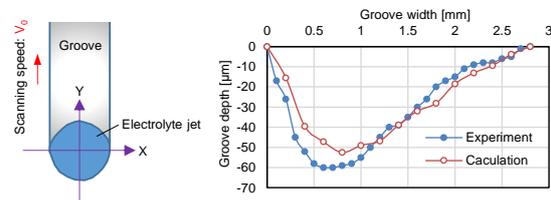


図 7 走査により加工した溝の深さの計算と実験検証（ジェット噴射角度： 45° ）

(2) スリットノズルを使用した電解液フラットジェットによる曲面加工

円柱面を持つ工作物を用いてフラット電解液ジェット加工の特性を調査した。実験方法を図 8 に示す。図 9 はその加工結果の一例である。実験により以下の結論を得た：

(あ) 工作物表面形状により極間距離が変化する際に、電流密度分布が変化し、電解除去量が場所により異なることが分かった。一般的に極間距離が近い場所に電流密度分布が集中して優先的に加工され、材料除去量が多くなる傾向がわかった。

(い) 工作物の加工面形状に応じて、ジェット方向また走査方向を制御することにより、電流密度分布を均一化にし、加工精度を向上することが可能である。

(3) 角部への電解液ジェット加工特性とその評価

図 10 に示すように、実際の応用において、工作物の角部への加工は避けられない。本研究では図 11 に示すような工作物を用い、角部への電解液ジェット加工特性を調べた。図 12 は加工前と加工後の角部のプロファイルを測定した結果である。先端部が一番多く加工されたことが分かった。先端部から離れるほど加工量が徐々に少なくなる傾向がみられた。

図 13 は上から見た角部加工後の加工面である。加工領域は滑らかに見える。図 14 に角部角度と加工領域の関係を示す。角部角度の増加に伴い加工領域の幅は線形的に増加

し、また、最大の加工深さが減少したことが確認できた。同じ角度の条件でも、角部先端の形状により加工結果が異なる。図 15 は加工深さを曲率半径に対してプロットしたグラフである。曲率半径の増加に伴い、加工深さはほぼ線形的に減少することがわかった。以上の実験結果により、角部の幾何形状により電解液の流れ場が変化し、加工結果に顕著な影響を与えると考えられる。

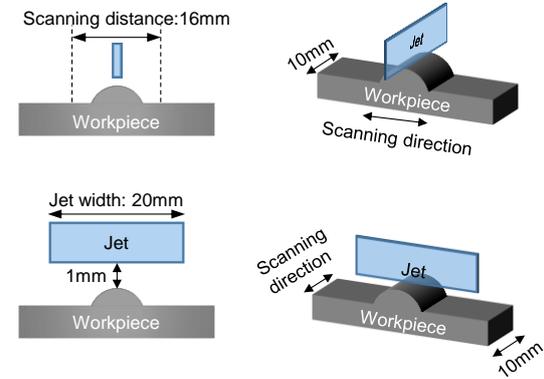


図 8 フラットジェットによる円柱面への走査加工方法：a) 断面と垂直と b) 平行なフラットジェット

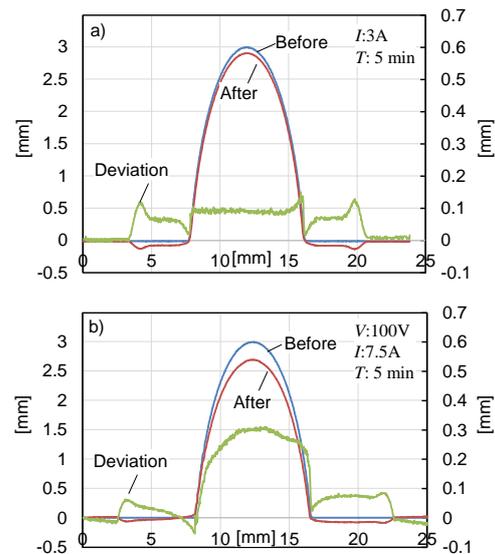


図 9 円柱面工作物加工前と加工後加工面プロファイルの比較：a) 断面と垂直と b) 断面と平行なフラットジェット

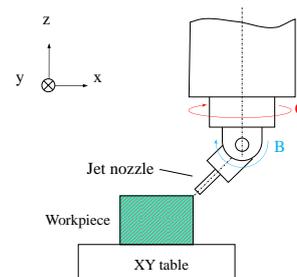


図 10 角部への電解液ジェット加工模式図

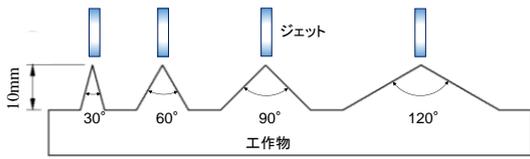


図 11 角部への電解液ジェット加工実験

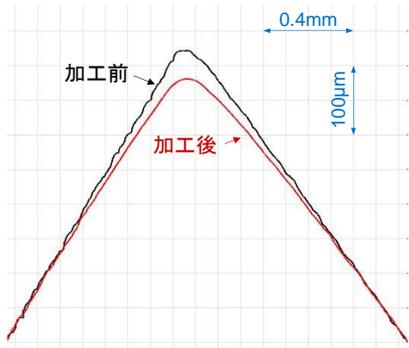


図 12 角部への電解液ジェット加工結果 (角部角度: 90°)

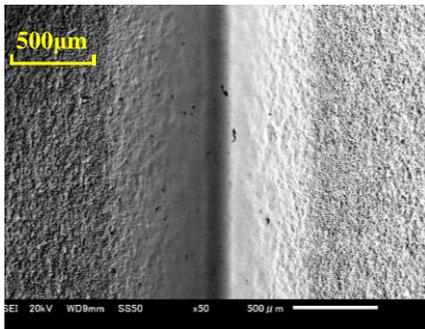


図 13 角部の上から見た加工面の SEM 画像

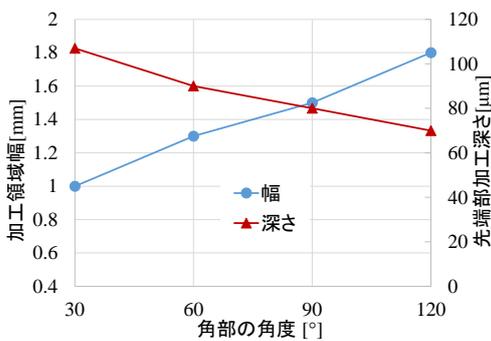


図 14 角部角度と加工領域の関係

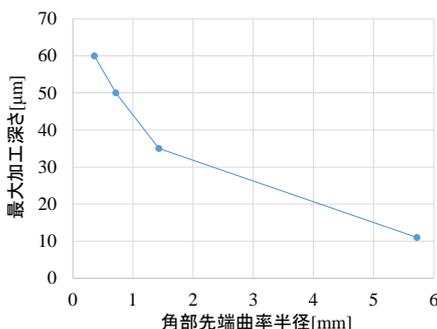


図 15 角部角度と加工領域の関係 (角部角度: 90°)

(4) 斜面における電解液ジェット加工シミュレーション及び電流密度分布の解析

曲面へ電解ジェット加工する場合の加工面上の電流密度分布を解明するために、斜面への電解液ジェット加工のシミュレーションを行った。フラットジェット加工と想定し、二次元の解析モデルを構築した。モデルを図 16 に示す。フラットなジェット面は紙面に垂直である。解析は COMSOL を用い気-液二相流の Navie-Stokes 方程式よりノズルから噴出される電解液の噴流形状を求めた。また、電解液流れ場と電場の連成解析により、電流密度分布が計算できる。工作物の除去は本解析では考慮していない。

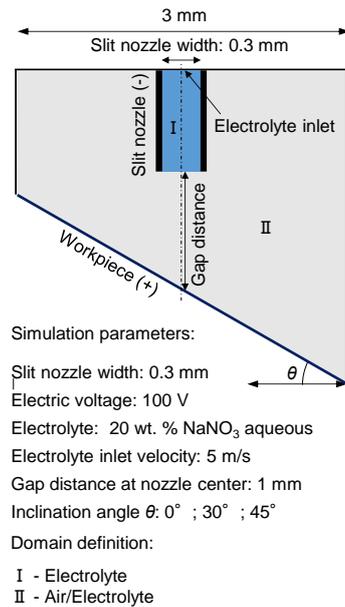


図 16 斜面へ電解液ジェット加工シミュレーションモデル

図 17 に電解液ジェット形状の解析結果を示す。図より、ジェット左側の電解液流れ層が薄く、右側の方が厚いことが分かる。電解液流速の最小値はノズル直下領域の左側に存在する。また、図 18 に工作物表面の電流密度分布を示す。濃淡は電流密度の大きさを意味している。図 19 は平面加工と斜面加工の電流密度分布解析結果の比較である。平面加工と比べると、斜面加工の場合、電解液流れ場により、工作物表面の高電流密度領域がノズル中心より左の方に集中していることが分かる。解析結果を検証するために、解析と同じ条件でフラット電解液ジェット加工実験を行った。図 20 にフラットジェットにより加工した溝の断面形状を示す。平面と比べると、斜面加工の場合に、除去量が最も多い場所はジェットの左側に存在することが分かり、電流密度分布の解析結果と一致した。

高精度電解液ジェット加工を行うために、工作物の加工面形状に応じて、多軸加工機に使い、ジェット方向また走査方向を制御することが必要だと考える。

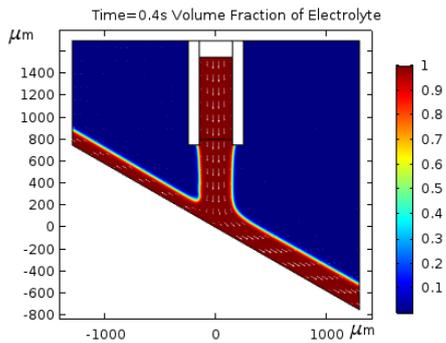


図 17 斜面へ電解ジェット加工のシミュレーション結果：ジェット形状

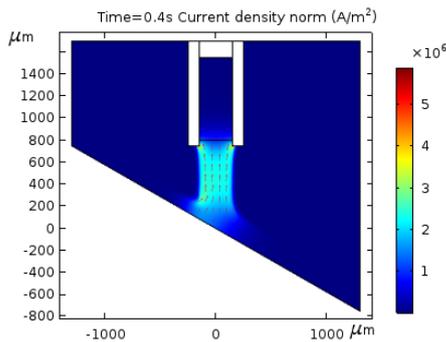


図 18 斜面へ電解ジェット加工のシミュレーション結果：電流密度分布

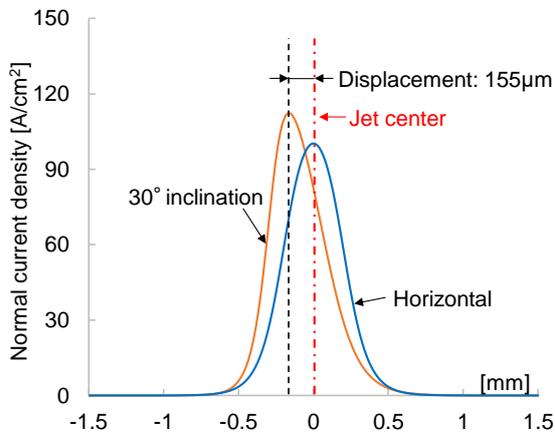


図 19 加工面の傾きにより電流密度分布の変化

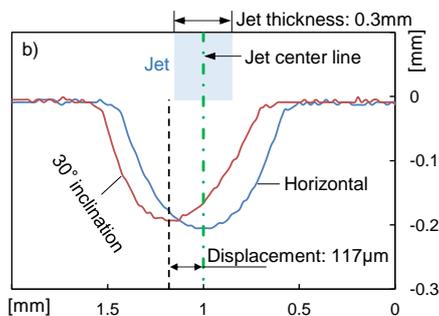


図 20 実験検証：加工面の傾きにより加工した溝の断面形状プロファイルの変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

投稿準備段階：

Y. Zhao, M. Kunieda, Research on three dimensional electrolyte jet machining of freeform surfaces

[学会発表] (計 5 件)

1) Y. Zhao, M. Kunieda, Influences of jet posture and workpiece geometry on performances of electrolyte jet machining, The 7th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, Nov. 2017, Seoul, Korea.

2) X. Lyu, F. Kimura, Y. Zhao, M. Kunieda, Y. Kajihara, Metal-polymer Injection Molding Direct Joining Using Electrolyte Jet Machining, The 7th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, Nov. 2017, Seoul, Korea.

3) 趙 永華, 国枝正典, スリットノズルを使用した電解液ジェットによる曲面加工, 電気加工学会全国大会 (2017), 電気加工学会全国大会講演論文集 (2017).

4) 趙 永華, 国枝正典, 電解液ジェット加工による任意曲面への電解加工, 日本精密工学会春季学術講演会 (2017), 精密工学会学術講演会講演論文集 I46, pp. 687-688 (2017).

5) X. Lyu, F. Kimura, Y. Zhao, M. Kunieda, Y. Kajihara, Current density dependence on joining strength in EJM based metal-polymer direct joining, 日本精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2017).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

趙 永華 (ZHAO, Yonghua)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号：90759052