

深穴電解加工におけるダレ形状の数値解析

東京農工大学 ○矢田 楓馬, 小玉 脩平, ◎夏 恒

要旨

電解加工では、その特徴から加工の際に電流が加工対象の外にも漏れることで加工孔入口のエッジが丸くなるダレ現象が発生する。ダレの発生は加工精度の悪化につながり、製品の性能に悪影響を与えるため、低減策の検討が必要とされている。本研究では、汎用解析ソフトウェア COMSOL を利用して電解加工のプロセスを再現し、深孔電解加工のダレ現象に影響を与える原因を探り、ダレ現象を改善するヒントを得ることを目的とする。

1. 緒言

電解加工は、電気化学的溶解作用を材料の所要の部分に集中することで所要の形状を得る加工法である。工作物の硬さによらず加工ができるため、ニッケル基超合金やチタン合金を材料とするタービンプレードなどの難削材の加工に適用されている。しかし、その特徴から、加工の際に電流が加工対象の外にも漏れることで、加工孔入口のエッジが丸くなるダレ現象が発生する[1]。ダレの発生は加工精度の悪化、すなわち製品の性能の悪化に繋がるため、ダレの発生を抑える方法を検討する必要がある。

2. 研究目的

本研究では、有限要素法を用いた汎用解析ソフトウェア COMSOL で深孔電解加工のシミュレーション解析を行い、電解加工のダレ現象の発生に関係する要因を解明し、ダレ現象の発生を抑えるヒントを得ることを目的とする。

3. 解析方法

3.1. 解析原理

電解加工の解析で用いる工作物の溶解速度 \vec{v} は、ファラデー法則により、式(1)で算出される。

$$\vec{v} = \eta \cdot \frac{K}{\rho} \cdot \vec{n} \cdot J \quad (1)$$

このとき、 η は電流効率[%]、 K は電気化学当量[kg/C]、 ρ は密度[kg/m³]、 \vec{n} は単位ベクトル、 J は電流密度[A/m²]である。電気化学当量 K と密度 ρ は工作物材料の物性値であり、電流密度 J は COMSOL の電流モジュールにより算出する。式(1)を COMSOL の変形ジオメトリモジュールに代入し、工作物表面が変形することで電解加工のプロセスを再現可能である。

3.2 解析モデル

実際の電解加工と同様の条件に合わせるため、図1に示すモデルを作成した。図1(a)にモデルの断面図の右半分を、図1(b)に実際の電解加工の概略図を示す。図1のモデルは2次元軸対称で、赤点線($r=0$)は中心軸を表している。

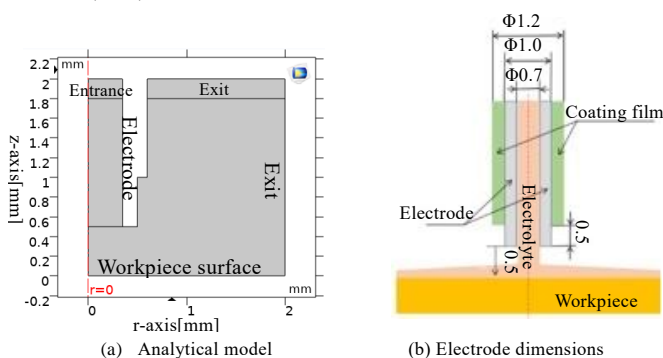


Fig. 1 Analytical model and electrode dimensions

3.3 解析パラメータ

表1に解析条件を示す。

解析では、解析の高速化のため、電極の送り速度を実際加工時の10倍とした。電極を電源の負極に、工作物を正極に接続し、電極の初期地点を工作物から0.5 mm 上部に設定し、解析を行った。また、図2に示す電流効率関数[2]により硝酸ソーダの電流効率を解析に利用した。

Table. 1 parameters

Cell voltage	8 V
Electrolyte conductivity	16S/m
Electrode's feed speed	8 mm/min
Workpiece's electrochemical equivalent	2.76×10^{-4} g/C
Workpiece's density	8.38 g/cm ³

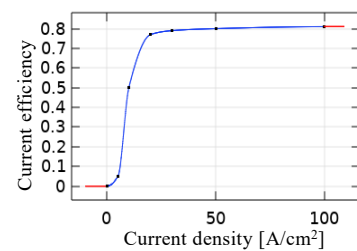


Fig. 2 Current density and current efficiency⁽²⁾

4. 解析結果

4.1 断続的な流体解析

COMSOL のフェーズフィールド機能による流体解析を加えた解析の場合、途中でエラーが生じて解析が中断するため、エラーにより解析が停止した時点での加工穴の形状を用いてモデルを再構成し、新たに解析を始める断続流体解析を行った。図3、4に加工から0.1、11.25 s 経過時点での電解液流れの様子をそれぞれ示す。赤い部分は電解液を示し、1と表示しており、青い部分は空気を示し、0と表示している。図3、4より、一定の時間が経過すると、加工穴の形状が変化し、電解液が工作物表面から離れて上に噴き出ようになり、電極に纏わりつくことがわかる。

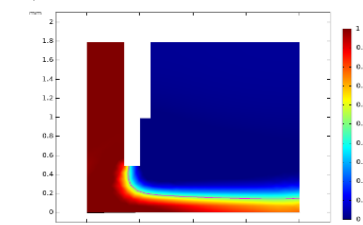


Fig. 3 Analytical result (0.1s)

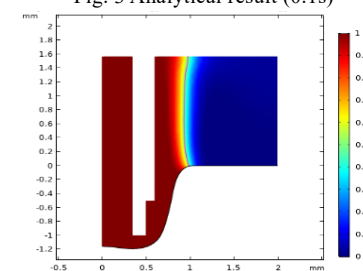


Fig. 4 Analytical result (11.25s)

4.2 電解液流れの変化点

断続的な流体解析では、どの時点で工作物表面に沿う流れから電極に沿う流れに変化するのかが不明である。そこで、解析領域を拡大したモデルを用いることで、電解液流れが変化するタイミングまで解析を進めることができる。電解液流れの変化の様子を図5に示す。同図より、約4.39s経過付近が、電解液流れが工作物表面に沿う流れから電極に沿う流れに変化する中間点となっている。この前後で電解液の流れ方向は異なっており、電解液の流れ方向がダレと関連があるか調べるため、電解液流れの変化点の前後の穴形状を比較した。図6に電解液流れが変わる経過時点とその前後の穴形状の入口部のエッジを示す。ダレは本来加工を想定していないエッジを加工してしまうことで発生するため、加工穴入口部のエッジの丸みでダレを判断した。図6より、電解液流れが変化する前の加工初期の方がダレが大きくなっており、電解液流れが変化した後はダレが小さくなっていることがわかる。したがって、工作物表面に沿う電解液の流れがダレの発生に繋がると考えられる。

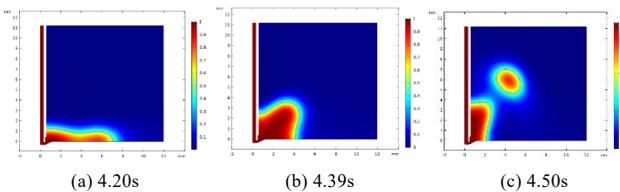


Fig. 5 Analysis result

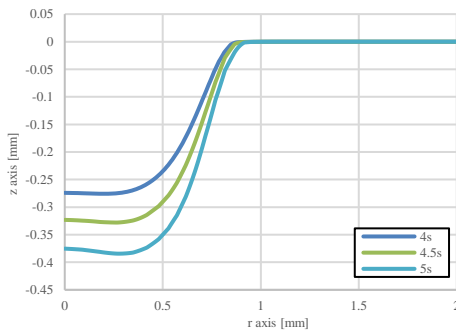


Fig. 6 Hole shapes around change point of electrolyte flow

4.3 電解液の質量保存の検証

信頼性のある解析結果を得るために、本解析でも扱っている二相流解析では、液体の質量保存の精度が重要である。そこで、従来の解析の精度とその改善方法を検証した。まず、有限要素法を用いた解析において、分割された領域の要素であるメッシュは、そのサイズをより細かくすることで、解析の時間は増えるものの計算の精度を上げることができる。しかし、二相流解析において、流体の特性は二つの流体間の界面全体で大きく変化するため、特に計算が難しく不具合が起こりやすい⁽³⁾。そこで、初期界面を中心にメッシュのサイズをCOMSOLの極めて細かくに設定して解析を行った。各メッシュサイズの場合の入口通過合計質量と出口通過合計流量を表2に示す。表2より、メッシュを細かくした場合のほうが、入口と出口ともに電解液合計質量が増加している。また、2条件それぞれで加工時間1[s]まで解析を行い、穴形状を比較した結果を図7に示す。同図より、メッシュサイズによって穴形状が変化している。表2の結果よりメッシュサイズが細かい方が実条件に近いので、メッシュサイズの細かい場合の穴形状の方が実際の加工形状に近く、計算の精度が低い方が余分に加工されてしまうことがわかる。

Table. 4.1 Relationship between mesh size and mass of passing electrolyte

	Theoretical	Entrance	Exit
Size :	990	813	845
Size : small	990	968	962

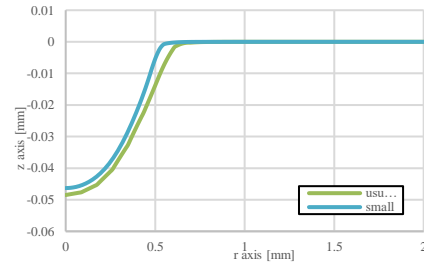


Fig. 7 Hole shapes around change point of electrolyte flow under different mesh

また、二相流解析では、急激で速い遷移に対応しなければならず、計算が困難である⁽³⁾。そこで、解析の計算タイムステップをより小さくして遷移を緩やかにすることで、計算の精度を向上させることができる。従来の解析では計算タイムステップを0.01[s]と設定していたが0.0001[s]に変更し、加工時間0.01[s]まで解析を行った。各計算タイムステップの場合の入口通過合計質量を表3に示す。表3より、計算タイムステップを小さくしたことで、電解液質量が増加して理論値に近づいている。さらに、計算タイムステップの2条件でそれぞれ加工時間0.01[s]まで解析を行い、穴形状を比較した結果を図8に示す。同図より小さい計算タイムステップで精度が向上し、加工穴の幅と深さがともに小さくなっていることがわかる。

Table.3 Relationship between calculated time step and mass of passing electrolyte

	Theoretical	Entrance
0.01[s]	10	9.78
0.0001[s]	10	9.90

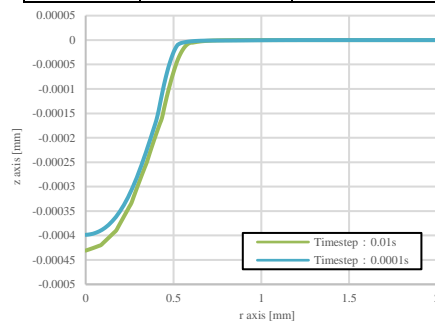


Fig. 8 Comparison of hole shapes under different calculation time steps

5. 結論

断続的な流体解析において、一定の時間が経過すると、電解液が工作物表面から離れて上に噴き出て電極に纏わりつき、その変化点はダレの発生しやすさと結びつきがあり、タイミングが加工初期だとわかった。また、電解液の質量保存について、メッシュのサイズを細かくすること、また、計算タイムステップを小さくすることで計算の精度が向上し、より信頼性の高い結果を得ることができた。

文献

- (1) 酒本昌子, 夏 恒: 冷却穴の電解加工における形状精度の影響因子の調査, 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.106-107
- (2) 能戸幸一, 奥平弘明: 硝酸ソーダ水溶液による電解加工の研究—電流効率について, 精密機械, Vol.42, No.494(1976), pp.209-214. 白井英治, 現代切削理論 (1990), pp. 320-340, 共立出版
- (3) COMSOL : Two-Phase Flow Modeling Guidelines, <https://www.comsol.jp/support/knowledgebase/1239> 2021/1/20