

補助事業番号 2023M-259

補助事業名 2023年度 高アスペクト比放電穴加工における実加工深さ計測と加工条件の適応制御 補助事業

補助事業者名 工学院大学・教授・武沢英樹

1 研究の概要

非接触熱エネルギー加工である放電加工は、高硬度材料などの難削材の加工が可能であり、金型の仕上げ加工に多用されてきた。また非接触のため加工反力が小さい特徴を生かし、精密微細加工に活用されている。中でも各種微細穴の用途が多いため、パイプ電極を用いて水系加工液を噴射しながら加工する細穴放電加工機が開発され普及している。高アスペクト比の穴形状を必要とする加工に、発電設備で用いられるタービンプレードの冷却穴加工があげられる。タービンサイズにもよるが直径1~3 mm程度、アスペクト比200以上になる場合もある。加工対象は難削材でありアスペクトが高いためドリル加工は難しい。そのため、放電加工あるいは電解加工が用いられている。両者のうち本研究では、パイプ電極を用いた細穴放電加工を対象とした。その場合でも、加工深さが深くなると放電の不安定状態が発生し、加工速度が低下することが知られている。

さらに、細穴放電加工では加工中の実加工深さをリアルタイムで把握できていない課題が残っている。加工中は、主軸の降下量のみ測定可能であり、その値は電極消耗長さを実加工深さを合算した値であり、両者を区別することができない。しかしながら、加工中に実加工深さと実電極消耗長さを把握することができれば、従来情報である極間電圧および電流波形に加えて、これらの情報をもとにした加工条件変更の適応制御により、従来よりも高速高アスペクト比の穴加工を実現できる可能性が高まる。

2 研究の目的と背景

世界的な温暖化対策が進められる中、発電設備で使用される大型タービンの冷却性能向上が求められている。再生エネルギー施設の開発も別途進めているが、直近では既存設備を改良した発電効率の向上が急務である。その有益な対策としてタービンプレードの冷却性能を向上させての、より高負荷な稼働が提案されている。それには、高アスペクト比の細穴加工を安定的に行える加工法の確立が必要となる。

本研究では、非接触熱エネルギー加工である細穴放電加工による高アスペクト穴加工に取り組む。パイプ電極を用いて加工液を噴射しながら加工を進行する細穴放電加工においても、アスペクト比が100を超えるような深穴加工になると、加工粉の排出が滞ることが要因と考えられる放電不安定状態が発生し、加工速度が低下することは経験的に知られている。さらに、電極長さ消耗が大きい細穴放電加工においては、加工中に主軸降下量を計測しただけでは、その瞬間の実加工深さを把握することができない。実加工深さと放電不安定状態が発生する関係が明らかとなれば、従来計測していた放電電圧および電流波形の情報と併せて、放電条件および加工液噴出ポンプ圧等を適切に制御することで、より高アスペクト比の細穴を高速に加工することを目指す。

3 研究内容

(1) 高アスペクト比放電穴加工における実加工深さ計測と加工条件の適応制御の研究

<https://www.ns.kogakuin.ac.jp/seisan/>

i) 細穴放電加工中の深さ方向温度計測

細穴放電加工の加工中の材料深さ方向の温度変化の計測を行った。このデータはii)の解析モデル構築の基礎データともなる。はじめに、図1に示すようなブロック鋼材の壁近傍の深さ方向に配置した熱電対による温度計測システムを構築し、実計測を行った。熱電対は、ガイド板に空けられた細穴に差し込まれ、測定壁に接触させた。高さ60mmの鋼材に対して直径1mmの黄銅パイプ電極で貫通加工を行った際の、各熱電対の温度変化を図2に示す。加工が進行すると下部に配置した熱電対が順次温度上昇し、さらにその最高到達温度は下部位置の熱電対ほど上昇していることが分かる。

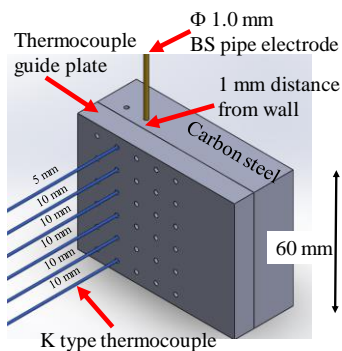


図1 熱電対による温度計測システム

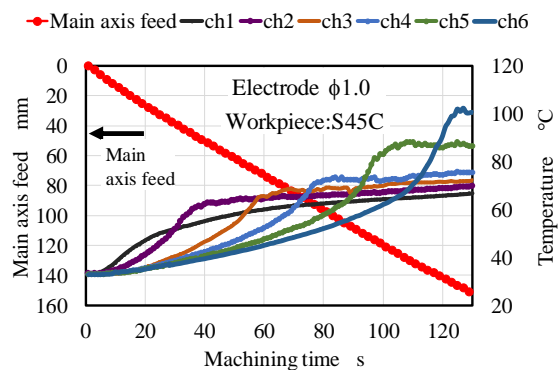


図2 加工中の主軸降下量と各熱電対温度変化

同様の加工を、非接触で温度計測できるサーモカメラ(購入備品)にて壁全体の連続温度変化を記録した。計測のセットアップを図3に示す。測定距離300mmを保ち、非接触で計測した。この場合、熱電対計測で使用したガイド板を用いる必要はなく、ブロック鋼材の壁面温度を直接観察可能である。データは連続動画で観察可能であるが、図4には熱電対計測と同じ位置に温度変化を画像データから抽出して示す。加工が進行するに従い、下部位置の温度が順次上昇する様子および下部位置の最高温度が高い点は熱電対計測とほぼ同様な傾向が得られた。

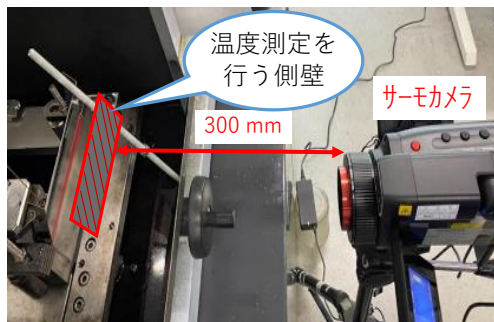


図3 サーモカメラによる温度計測

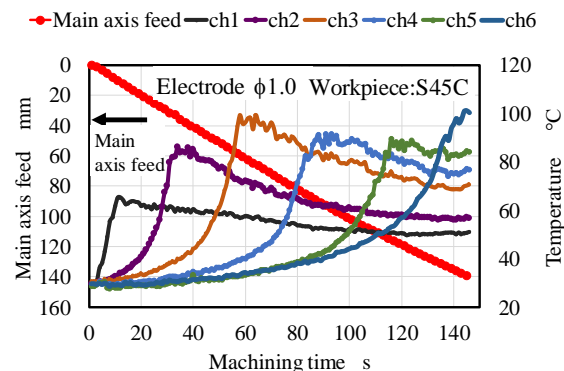


図4 加工中の主軸降下量とサーモカメラ計測温度変化

ii) 細穴放電加工中の深さ方向温度分布解析モデルの構築と温度分布解析

図1のような、ブロック鋼材の壁面近傍に細穴放電加工する際の、壁面温度を予測する解析モデルの構築を行った。用いた解析ソフトはCOMSOL Multiphysicsである。W30×D10×H60mmのサイズで鋼材を定義し、図5に示すようにオートメッシュ機能でメッシュ分割した。ここでは、パイプ電極からの加工液の噴出および材料除去は考えずに、電極先端で放電加工している熱源が材料内部を移動するという単純なモデルでまずは試みた。熱源の移動速度および熱量は i) の実加工における温度計測データを元に設定した。図1に示した熱電対計測位置と同じ位置における解析結果を図6に示す。今回は各測定点が最高点を示した後は同一温度を保つとしてデータ処理をしている。これより、熱源が下方に移動するに従い下部に配置した測定位置の温度が順次上昇し、最高温度も下部測定位置のほうが高く、実加工データの状況を再現できていることが分かる。

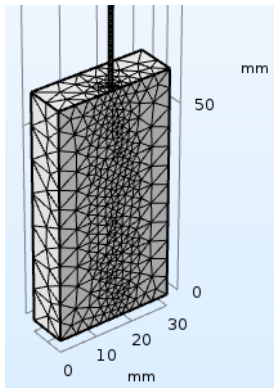


図5 温度解析モデル概要

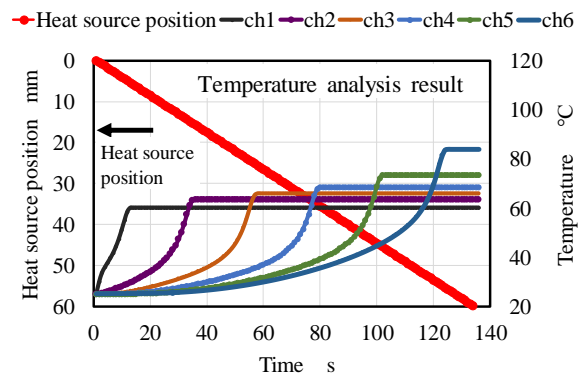


図6 熱源移動解析モデルによる壁面温度の変化

iii) 細穴放電加工における実加工深さ予測システムの構築

最後に細穴加工中に加工を停止し、それまでの主軸降下量と壁面温度分布実測データを元に、解析モデル結果と比較することで実加工深さの予測を行った。図2の実験条件と同様の細穴加工において、主軸降下量115mmに加工を停止した。それまでの主軸降下量と工作物壁面温度分布の計測結果を図7に示す。各熱電対の最高温度比率より、加工を停止した図7の瞬間では、ch5の温度はピーク温度に達していると判断され、その瞬間と図6の解析結果より、実加工深さは46mmと予測された。実際に細い電極を加工穴に差し込み、実加工深さを実測したところ48mmであり、誤差2mmではあるが実加工深さの予測を行うことができた。解析モデルにおいて、加工液の噴出や材料除去を考慮していないことが誤差の一因と考えられる。また、予測アルゴリズムも1つの熱電対のピーク温度に注目した予測であったが、前後の熱電対比率や温度上昇の立ち上がりなどを考慮することでも誤差を小さくすることができると思われる。

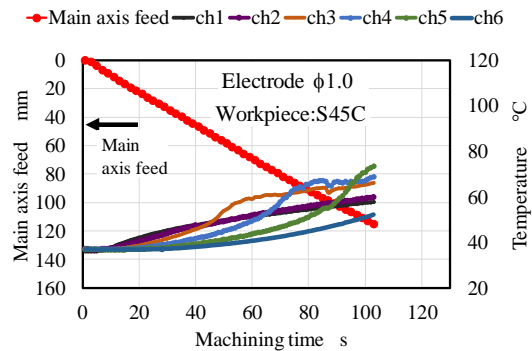


図7 主軸降下量115mmにおける各熱電対温度変化

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

発電タービンや各種金型など、冷却穴が必要な箇所は多くある。特に直径に対して深さがあるアスペクト比の高い穴加工はドリル加工では難しく、非接触加工の放電加工が有効である。ただし、深穴時の放電不安定性のため長時間の加工になっているが、本研究成果をフィードバックすることにより加工時間の短縮およびより深い細穴加工の可能性が見いだされた貢献は大きい。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

研究担当者は、これまで一貫して放電加工の研究に携わってきた。形彫り・ワイヤ・細穴・微細放電加工とそれぞれ各種研究を進めてきた。そのなかで、本研究は細穴放電加工においてこれまで未知であった加工中の実加工深さの把握と、材料深さ方向の温度分布の情報をを用いることで、深穴加工時の放電不安定状態の解消への対策の端緒が得られたことは大きな成果である。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

・武沢英樹, 渋谷佳希, 深穴放電加工における放電不安定性と材料温度の関係, 2024年精密工学会学術講演会春季大会講演論文集, pp.577-578 (2024)

・渋谷佳希, 武沢英樹, 細穴放電加工における実加工深さの推定, 2024年精密工学会学術講演会春季大会講演論文集, pp.575-576 (2024)

・武沢英樹, 渋谷佳希, 浦上奈由, 細穴放電加工における加工液噴射圧の影響と実加工深さ計測, 2023年精密工学会学術講演会秋季大会講演論文集, pp.294-295 (2023)

・渋谷佳希, 武沢英樹, 細穴放電加工における実加工深さの予測—加工中の深さ方向温度分布の計測—, 第31回茨城講演会講演論文集, No.709 (2023)

・Hideki TAKEZAWA, Yoshiki SHIBUYA, Influence of Machining Fluid Pressure and Actual Machining Depth Measurement in Small Hole EDM, ISAAT2023, No.118(2023).

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

高アスペクト比放電穴加工における実加工深さ計測と加工条件の適応制御調査研究報告書

<https://www.ns.kogakuin.ac.jp/seisan/>

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 工学院大学先進工学部(コウガクインダイガク センシンコウガクブ)

住 所: 〒192-0015 八王子市中野町2665-1

担 当 者: 教授 武沢英樹(キョウジュ タケザワ ヒデキ)

担 当 部 署: 機械理工学科(キカイリコウガッカ)

E - m a i l: htake@cc.kogakuin.ac.jp

U R L: <https://www.ns.kogakuin.ac.jp/seisan/>