

審査の結果の要旨

論文題目：Fundamental research with respect to thermal phenomena of micro EDM（微細放電加工の熱現象に関する基礎研究）

氏名 モハマド ザヒルディン

本論文では、放電加工を微細加工の領域で用いた場合に、加工間隙で生じる熱的な現象を解明している。放電加工はパルス放電により工作物が溶融・蒸発して生じる放電痕の累積で加工が行われる。よって、材料の硬度に関わらず複雑な形状を精度良く加工できるので、金型加工などに広く使用されている。また、加工反力が小さいので、微細加工にも応用が広がっている。

微細加工で使用される加工機は、浮遊容量の影響を除くため、導電部や配線をなるべく短く製作し、放電パルス電源にはコンデンサ放電回路を用いることにより、放電エネルギーを小さくしている。よって、放電持続時間は数 ns から数百 ns と、一般の放電加工よりも1ケタから3ケタ短い。従って、絶縁破壊後、アークプラズマが成長する過渡的な状態で放電が終了するので、定常アーク状態が支配的な一般の放電加工とはアークプラズマの挙動が異なっている。また、放電面積が小さいため、加工間隙が数ミクロンと小さく、放電痕の直径も一般の放電加工に比べて小さい。

一般の放電加工においては、除去のメカニズムを解明するために単発放電にともなう工作物内の熱伝導解析が広く行われている。そのために、プラズマ直径、工作物へのエネルギー配分、それらによって求まる熱流束が調べられている。また、放電エネルギーのうち除去に使用される割合を示すエネルギー効率や、融点以上に達した領域のうち実際に除去された体積の割合を示す除去効率などのパラメータが調べられている。しかし、微細放電加工では、空間的、時間的、エネルギー的にスケールが小さいため、アークプラズマの直接観察や、単発放電による工作物温度上昇の測定に困難が伴う。従って、微細放電加工における除去メカニズムの特徴の理解に必要な、上記のパラメータを求めることが困難であった。

そこで本研究は、複数放電による工作物温度上昇、放電一回当たりの除去体積、放電痕直径、放電電圧・電流波形の測定結果と、工作物の熱伝導解析結果とを比較し、逆問題解析によりプラズマ直径、エネルギー配分を求めた。また、熱流束、エネルギー効率、除去効率などを求め、一般の放電加工におけるそれらの値と比較することによって、微細放電加工における加工間隙現象の特殊性

について論じている。

また、放電加工面に生じる引張りの熱応力によって、加工した微細軸や微細フィンが変形する現象は微細放電加工特有の問題である。この熱変形の解析には正確な境界条件を用いた熱応力解析が必要であるが、本研究で求めたプラズマ直径、エネルギー配分、熱流束などを用いて正確な計算が可能となった。そこで、まず単発放電痕周りの熱応力分布を計算している。そして、連続放電の結果、単発放電痕の中心軸上に生じる半径方向の熱応力が加工表面に沿って均一に分布すると仮定して構造解析し、微細フィンの熱変形を解析している。

第1章では、微細放電加工と一般の放電加工の放電エネルギーの違いや、加工装置の違いを述べ、加工現象の観察の困難さについて記述している。そして、微細放電加工の加工現象の解明の必要性和、本研究の目的について記述している。

第2章では、微細放電加工における陽極と陰極へのエネルギー配分率を求めた結果について述べている。一般の放電加工に比べてエネルギーは小さいので、単発放電だけでは温度上昇を正確に測定できない。従って、複数放電によって求めている。熱入力を仮定して解析した電極上のある点での温度変化と、熱電対を用いて測定した結果を比較することによって、逆問題解法によって放電エネルギーの6.02%が陽極へ、3.25%が陰極へ熱伝導で失われることを示している。また、除去によって加工層が持ち去るエネルギーは、除去量のうち沸騰による割合 g ($0 < g < 1$) に影響され、陽極では1.07%~5.77%、陰極では0.11%~0.58%である。一般の放電加工に比べてエネルギー配分率が小さい理由は、絶縁破壊後の過渡状態では、プラズマの形成に多くのエネルギーが消費されているからであると考察している。

第3章では、 g の値を仮定し、実験で求めた放電痕直径と、放電1回あたりの除去量を基に、熱伝導解析結果と実験結果を照合した。この逆問題解法により、 g 値、プラズマ直径、熱流束、エネルギー効率、除去効率を求めている。そして、それらを一般の放電加工での値と比較し、微細放電加工の加工現象の特異性を論じている。微細放電加工では放電持続時間が短いため、プラズマ直径が小さく、熱流束が一般の放電加工に比べて二桁大きい。従って、工作物へのエネルギー配分率は小さいが、配分されたエネルギーのうち加工層が持ち去るエネルギーの割合は一般の放電加工よりも、本研究で使用した条件下で4倍以上大きく、工作物内への熱伝導で損失するエネルギーの割合が小さいことが分かった。また、エネルギー効率が10倍以上大きく、除去効率は2~19倍大きいことを示している。

第4章では、前章までで求めた熱入力条件を境界条件に用いて、単発放電で生じる放電痕周りの熱応力解析を行っている。降伏応力の温度依存性を考慮し

た完全弾塑性体近似を用い、材料の除去を考慮した場合と考慮しない場合の残留応力場を計算している。

第5章では、連続放電で生じる微細フィンの熱変形を解析している。単発放電痕の半径方向残留応力の、放電痕中心の深さ方向に沿った分布が、連続放電で片面を加工した微細フィンの長手方向に均一に残留すると近似し、2次元の熱変形解析を行っている。熱変形によって表面の残留応力が部分的に解放されるが、繰り返される放電によって新たな応力場が形成され、さらにフィンのたわみが増加する。これによって放電面と反対側に蓄積した応力場と、放電面近傍の熱応力場が均衡するという仮定により、微細フィンの熱変形が計算でき、実験結果との良い一致を見た。また、拘束の少ないフィン先端の曲率半径が、拘束の大きな根元の曲率半径よりも大きいことも実験結果と一致した。

第6章では、第2章から第5章までに得られた知見を要約し、本論文の結論と今後の展望を述べている。

以上のように、本論文では可視化や測定の困難な微細放電加工のプラズマ直径とエネルギー配分を、熱伝導解析と温度測定による逆問題解法を用いて求め、プラズマ形成の過渡状態における高い熱流束が、一般の放電加工に比べて極めて高いエネルギー効率と除去効率をもたらしていることを定量的に示している。また、その熱入力によって生じる熱応力場が、微細工作物の熱変形に及ぼす影響を定量化している。これらの基礎的な知見は、微細放電加工現象の理解に大きく貢献しただけでなく、今後の放電加工の微細加工分野への応用を大きく促進すると考えられる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。