

## 審査の結果の要旨

論文題目: Research on Micro Electrochemical Machining Using Electrostatic Induction Feeding Method (静電誘導給電法を用いた微細電解加工の研究)

氏名 韓 偉

導電性のある材料を任意形状に微細加工できる加工法として放電加工と電解加工がある。電気化学反応を利用する電解加工は、熱加工である放電加工に比べて、残留応力、クラックなどの熱影響層が生じない、工具電極消耗がない、仕上げ面粗さが良い、などの優れた特長がある。しかし、放電加工に比べてギャップ長が大きい。また、ギャップが広がっても、浮遊電流をゼロにできないため、放電加工に比べて加工精度が低く、微細加工には適していないと考えられていた。しかし、数 ns～数十 ns の超短パルスを用いるとギャップ長が数 $\mu\text{m}$ の箇所のみ加工を限定でき、放電加工並みの微細加工が可能であることが知られている。その理由は、電解溶出は電気二重層が形成されてから（電荷が蓄積されてから）始まるが、ギャップが広いところでは電解液中の抵抗が大きく電流密度が低いため、電気二重層が形成される前（溶出が始まる前）にパルスがオフとなり、ギャップが狭いところに加工が限定されるからである。しかし、数 ns～数十 ns の超短パルス電流を得るには困難がともなう。

この問題を本研究では、第 2 章で述べる静電誘導給電回路を用いて解決した。パルス電圧が容量を介して加工間隙に印加されるため、パルス電圧の立上りと立下りの瞬間にだけ電流が流れる。従って、立上りと立下りの時間が短ければよく、パルス電圧の印加時間を数 ns～数十 ns と短くする必要はないので、高価なパルス電源は不要である。また、この回路で得られる電流は両極性なので、工具電極がプラスの瞬間に工具電極が消耗する問題が生じるが、本研究ではダイオードを加工間隙に並列に接続して消耗を防いだ。

上記の原理に基づく微細電解加工法は他の研究者によってすでに提案されているが、加工特性は詳細に調べられていない。そこで本研究では、まず第 3 章でパルス電流のピーク値から、ギャップ長の変動が検出できることを理論的に示し、ピーク電流の測定値を用いて工具電極の送りをサーボ制御する方法を開発した結果を示している。そして、加工条件が穴加工や軸加工の加工精度や微細化限界に及ぼす影響を詳細に調べ、第 4 章以降にその結果を記述している。

第 4 章では微細軸の成形加工を例に、加工条件が加工精度や微細化限界に及ぼす影響を加工実験を通して調べ、その結果を数値解析によって理論的に考察

している。具体的には、軸状のステンレス工作物を板状のタングステン工具電極に向かって軸方向に送る加工法と、半径方向に送る加工法について、加工精度の比較を行っている。その結果、板厚の薄い箔状電極を用いて軸の側面や端面に流れる浮遊電流の影響を小さくできるので、工作物を軸方向に送る方法が半径方向に送る方法よりもよりアスペクト比が大きく、真直度のよい軸加工が行えることを明らかにしている。

第 5 章では、活性化型と不活性化型の電解液として代表的な  $\text{NaCl}$  水溶液と  $\text{NaNO}_3$  水溶液を用いて、電解液の種類が加工精度に及ぼす影響を調べている。加工精度を評価するためには、得られる軸の長さの限界値、テーパ角、腐食孔の面密度を指標として用いた。 $\text{NaCl}$  水溶液は電流密度によらず電流効率がよいので、浮遊電流の影響が大きい。従って、 $\text{NaNO}_3$  の方が加工可能な軸長の限界値が大きく、テーパ角が小さい。また、 $\text{NaCl}$  水溶液では腐食孔が多く発生するが、 $\text{NaNO}_3$  では発生がほとんどないので、軸長の限界は実験に用いた範囲内では存在しなかった。その結果、 $\text{NaNO}_3$  水溶液を用いて直径  $100\ \mu\text{m}$ 、長さ  $2\ \text{mm}$  の軸が加工できた。送り方向のギャップ長は  $2\ \mu\text{m}$ 、側面ギャップは  $3\ \mu\text{m}$  であり、放電加工に匹敵する加工精度を可能にした。しかも、仕上げ面には放電加工の放電痕のような凹凸はなく、残留応力も理論的に存在しない。

次に、第 6 章では工作物材料の影響を調べている。放電加工は導電性がある材料であれば加工可能であるが、電解加工では酸化皮膜を形成しやすい金属（タングステン、チタン、超硬合金）や半導体材料（単結晶  $\text{Si}$ ,  $\text{SiC}$ ）、イオン化傾向が小さい貴な材料（白金、金）の加工は困難である。前章まではステンレス鋼を工作物材料として使用しているが、本章ではタングステンと超硬合金の加工を試みている。タングステンの電解加工では、酸化タングステン皮膜が電解溶出を阻害する。この問題は両極性パルスの使用により解決できることが知られている。タングステン工作物の極性が負極になった瞬間に  $\text{NaOH}$  が生成され、酸化タングステンが溶出する。そこで、静電容量給電回路のダイオードを外し、両極性パルスを用いてタングステンの軸加工が可能であることを明らかにしている。しかし、両極性パルスを用いるので工具電極が消耗し、放電加工のような高い加工精度が得られない。また、超硬合金については、酸化により材料の体積が膨張し、組織が破壊されるので加工が困難であった。

そこで、第 7 章では放電加工と電解加工を組み合わせたハイブリッド加工を提案している。電解加工では酸化皮膜を形成しやすい金属や、電気化学的に安定な材料は加工しにくい。また、微細電解加工の加工速度は放電加工に比べて小さい。電流密度に最適値が存在する電解加工は、加工面積が大きい一般の加工では、体積加工速度が一定である放電加工に比べて加工送り速度が大きい。加工面積が小さな微細加工では放電加工に比べて極めて遅い。そこで、加工影

響層が生じず仕上げ面粗さの良好な電解加工と、加工速度が大きく工作物材料を選ばない放電加工のハイブリッド加工を、静電誘導給電回路を用いて実現した。同じ加工装置、パルス電源、そして同じ電解液を用いて、回路にダイオードを脱着するだけで、放電モードと電解モードの切り換えが可能な独創的な方法である。工具電極には、タングステンなどの酸化皮膜が形成されやすい材料を用いる。ダイオードが挿入されていると、陽極側のタングステン電極に酸化皮膜が形成され、酸化皮膜が絶縁破壊することにより放電加工が行える。また、取り外すと両極性電流によって陰極側で NaOH が生成され、酸化タングステンが溶出するので電流が流れ、電解加工が行われる。加工モードの切り換えが可能であることは工作物面上の電解面と放電痕の存在により確認している。

以上のように、本研究により安価な回路で放電加工に匹敵する微細な電解加工が可能となった。また、加工速度の大きな放電加工で荒加工し、同じ加工機上で電解液を取り換えることなく、同じパルス電源を用いて電解加工による仕上げ加工が行えるハイブリッド加工システムが構築された。よって、従来の放電加工、あるいは電解加工だけでは不可能であった微細加工が本ハイブリッドシステムにより可能となり、加工の微細化限界や応用範囲が大きく広がることが期待される。

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。