

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：53101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17955

研究課題名(和文) 電界共役流体の活発な流動を利用した微細複雑穴の放電加工

研究課題名(英文) Electric discharge machining of micro complex hole using active flow of electro conjugate fluid

研究代表者

金子 健正 (Kaneko, Kensei)

長岡工業高等専門学校・機械工学科・助教

研究者番号：60708618

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では微細放電加工における安定した加工によって加工速度、加工精度及び加工限界深さを向上させることを目的として、電圧印加によって加工液に流れが生じる電界共役流体を用いて微細複雑穴の放電加工を行った。その結果、工具電極の先端形状が極間の流れに及ぼす影響を明らかにした。また、ECFを用いた場合微細放電加工特性を明らかにし、アスペクト比20以上の加工が可能になることが分かった。さらに、工具電極を回転させない状態においても、安定した放電加工を実現した。

研究成果の概要(英文)：In this research, for the purpose of improving the processing speed, the processing accuracy and the processing limit depth by stable processing in the fine electrical discharge machining, electrical discharge machining of a micro complex hole by using an electro conjugate fluid in which flow occurs in the machining liquid by voltage application. As a result, the influence of the tip shape of the tool electrode on the flow in the gap was clarified. In addition, it was found that when ECF is used, the characteristics of micro electrical discharge machining are clarified and processing with aspect ratio of 20 or more becomes possible. Furthermore, stable electric discharge machining was realized even when the tool electrode was not rotated.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：微細放電加工 電界共役流体 ECFジェット サーボ送り ピエゾステージ

### 1. 研究開始当初の背景

近年、機械・電子技術の進歩にともなって、ミクロンオーダーの加工技術が不可欠になっている。特に、エンジン用噴射ノズル、紡糸ノズル、インクジェットプリンタノズル及び光ファイバーコネクタなどで高精度・高アスペクト比の微細で複雑な穴加工が求められている。これらの加工には切削や研削加工が用いられるが、被削性が悪い難削材の部品加工は難しい。放電加工は導電性ならば硬度に関係なく加工できるため、難削材料に対しても加工が可能である。

一方で、 $\phi 500 \mu\text{m}$  以下の微細でアスペクト比の高い放電加工においては、加工屑の排出が困難であり、集中放電や短絡が多発するため加工速度が低く、加工精度が悪化しやすい。さらにアスペクト比が 10 を超えると加工が不可能になる。

これに対し、機能性流体の一種である電界共役流体 (Electro Conjugate Fluid, 以下 ECF) に着目した。ECF は電気絶縁性及び誘電性の液体であり、液中に挿入された電極対に直流高電圧を印加することによって活発な流動が発生する。

ECF を加工液に用いた場合の放電加工プロセスを以下に示す。加工電源から電圧を印加する時間中に工具電極と被加工物間に流れが生じる。放電が発生すると極間に加工屑や気泡が生じる。休止時間後の電圧印加によって極間に流れが発生し、加工屑や気泡の排出が促されることで、微細で高アスペクト比においても安定した放電加工が実現できると考えられる。針状工具電極を用いた場合、500 V 程度の電圧印加によって極間に流れが生じることを実験的に確認している。本研究では微細放電加工における安定した加工によって加工速度、加工精度及び加工限界深さを向上させることを目的として、電圧印加によって加工液に流れが生じる電界共役流体を用いて微細複雑穴の放電加工を行った。

### 2. 研究の目的

本研究では、電圧印加によって流れが生じる ECF を加工液に用いて微細放電加工を行い、加工速度、加工精度及び加工限界深さを向上させる微細複雑穴加工技術の開発することを目的とする。ECF を用いた場合は加工液の変更だけで目的を達成するものである。また、工具電極を回転させなくても流れが生じるため、角型や十字型などの複雑穴の加工に対応できる利点がある。本手法を用いれば、従来では不可能な、さらに微細な複雑穴の放電加工が実現できる可能性がある。

### 3. 研究の方法

#### (1) ECF ジェットによる極間の流れ観察と工具電極形状の検討

微細放電加工における ECF の加工屑排出効果を明らかにするため、ハイスピードカメラと拡大撮影用レンズを用いて放電加工時の極

間の流れを観察した。メタルハライド照明を光源として、放電加工中に発生する加工屑と気泡の挙動を観察した。放電加工機は自作微細放電加工機を用いた。ECF はセバシン酸ジブチルを用いた。これは、これまでに実験的に行った放電加工に適した活発な流動が生じる ECF を選定した結果に基づいている。

ECF は電極の電界強度によって流速が変化する。そのため、工具電極の先端形状を検討することで、より流速の強い ECF ジェットを発生させることができると考えられる。そこで、電解研磨機を用いて工具電極として用いるタングステン細線を尖頭加工した。先端の曲率半径やテーパ角度の異なる工具電極を作製し、工具電極の先端形状が極間の流れに及ぼす影響を明らかにした。

#### (2) ECF の微細放電加工特性の評価

(1) において検討した、より流速の強い先端形状の工具電極を用いて、微細放電加工を行った。加工液は ECF 及び放電加工油を用いた。実験に使用する微細放電加工機は加工槽が小さいため、加工液の交換は容易にできる。各加工液における加工速度、工具電極消耗及び加工深さ限界から微細放電加工特性を明らかにした。

### 4. 研究成果

#### (1) ECF ジェットによる極間の流れ観察と工具電極形状の検討

ハイスピードカメラを用いて、ECF による加工液流れの観察を行った。工具電極先端を円筒形状とした場合、無負荷電圧 500V 程度で極間に流れが認められた。このとき、極間距離は 0.1mm としている。また、ECF は電極の電界強度によって流速が変化することから、工具電極形状の検討を行った。電解研磨により工具電極であるタングステン線先端を尖頭加工し、曲率半径が異なる工具電極を作製した。成形した工具電極を図 1 に示す。尖頭加工された工具電極により極間の加工液流れを観察した結果、曲率半径が小さいほど流速は大きくなる傾向が認められた。さらに、加工液流れが認められる限界の無負荷電圧が小さくなることが分かった。

#### (2) ECF の微細放電加工特性の評価

尖頭加工された工具電極を用いて、ECF 中で放電加工を行った結果、集中放電や短絡が発生しやすく、加工が不安定になりやすかった。放電加工油を用いた場合も、同様の傾向が認められた。これは加工屑の排出が困難であることや、極間の加工状態に対して工具電極のサーボ送りの応答性が低いことが原因である

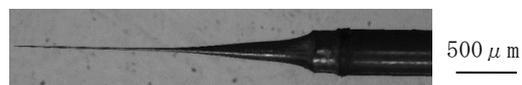


図 1 電解研磨による工具電極の成形

と考えられる．そこで，加工速度の向上と安定した微細深穴放電加工を目的として，ステッピングモーターによる粗動送りと圧電駆動による微動送りを組み合わせたデュアルサーボ送り機構を製作した．

製作したサーボ送り機構の概略図を図 2 に示す．本機構は深穴加工のための長ストロークを持つ一軸アクチュエータ，高応答サーボのためのピエゾステージ及び工具電極回転機構により構成されている．一軸アクチュエータはリニアガイドとボールねじからなり，マイクロステップ駆動されるステッピングモーターにより動作する．ピエゾステージは一軸アクチュエータの移動ブロックに搭載される．ピエゾステージはコントローラーに入力した電圧に応じて $\pm 5 \mu\text{m}$ の変位が可能である．さらに，工具電極を把持するコレットチャックが絶縁のためのベークライトを介してピエゾステージに搭載され，DC モーターと非接触動力伝達機構により回転する．

デュアルサーボ送り機構の制御系ブロック図を図 3 に示す．一軸アクチュエータを駆動するステッピングモーターは速度制御，ピエゾステージは位置制御とした．また，極間電圧に対する応答周波数は，ステッピングモ-

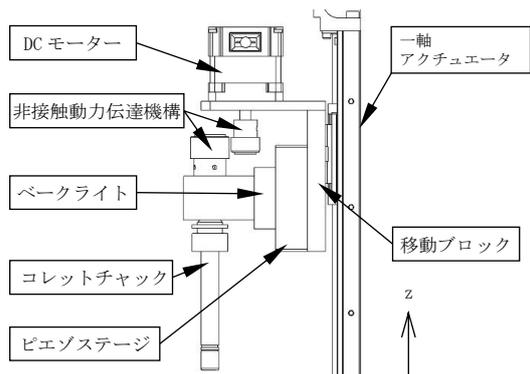


図 2 デュアルサーボ送り機構の概略図

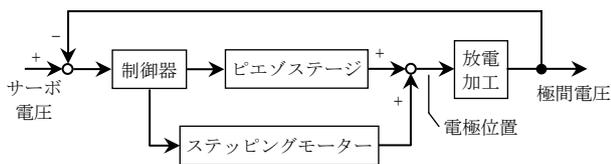
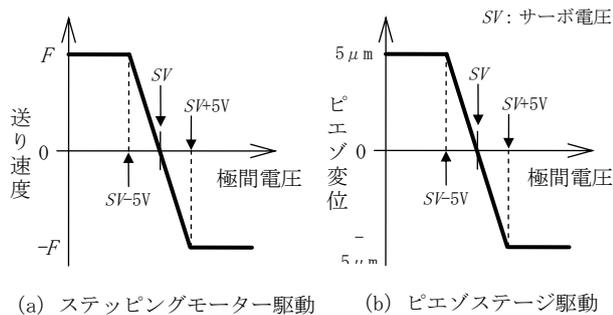


図 3 制御系ブロック図



(a) ステッピングモーター駆動 (b) ピエゾステージ駆動

図 4 極間電圧に対する各装置のサーボ送り制御

ターは 30 Hz，ピエゾステージは 300 Hz とした．

図 4 に極間電圧に対する送り速度とピエゾ変位を示す．工具電極が工作物に近づく方向をマイナスとして送り速度と変位を示した．ステッピングモーターは同図 (a) に示すように，サーボ電圧 (SV) の $\pm 5\text{V}$ の範囲において送り速度が変化し，SV において送り方向が反転する．一方，ピエゾステージは同図 (b) に示すように，SV $\pm 5\text{V}$ の範囲において変位が変化する．加工が始まって極間電圧が低下すると，工具電極が工作物から離れる方向に変位するように制御される．

$\phi 50 \mu\text{m}$  のタングステン線を工具電極，板厚 1 mm の SUS304 を工作物として，加工油中において放電加工を行なった．放電回路はコンデンサ放電回路とした．デュアルサーボ送りによる加工と，比較としてステッピングモーター駆動のみの加工を行い，放電加工特性を評価した．

デュアルサーボ送り機構とステッピングモーター駆動のみの場合の加工時間と工具電極の z 軸変位の関係を図 5 に示す．工具電極の変位は工具電極消費を含んでいる．デュアルサーボ送り機構を用いた場合，工具電極の変位は安定しており，工作物を貫通することができた．一方，ステッピングモーター駆動の場合は工具電極の変位が 0.5 mm 付近から急速に低下し，加工が進展しなくなった．

この原因を明らかにするため，工具電極変位 0.2 mm 付近における放電電流波形を測定した．オシロスコープとカレントトランスを用いて測定した放電電流波形を図 6 に示す．デュアルサーボ送り機構の場合，放電が継続して発生して単位時間あたりの放電回数が多し．また，ピーク放電電流はほぼ一定である．一方，ステッピングモーター駆動においては，応答周波数と同じ周期で放電が発生しない時間があることが分かった．この間は電流がわずかに流れていることから，短絡が発生していると考えられる．また，ピーク放電電流が低い放電も発生しており，集中放電も認められた．以上の結果から，デュアルサーボ送り機構の高応答性によって集中放電や短絡の発生を防ぎ，安定した微細深穴放電加工が可能となったと考えられる．

デジタルマイクロスコープを用いて，デュ-

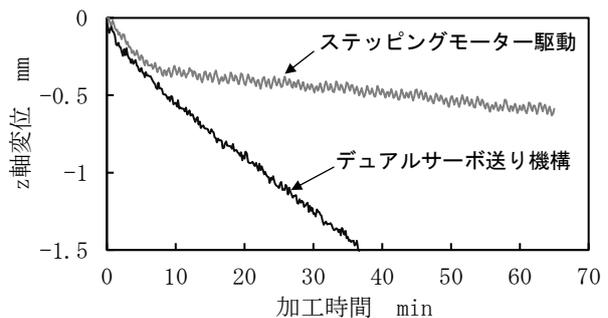
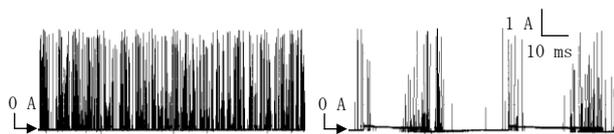
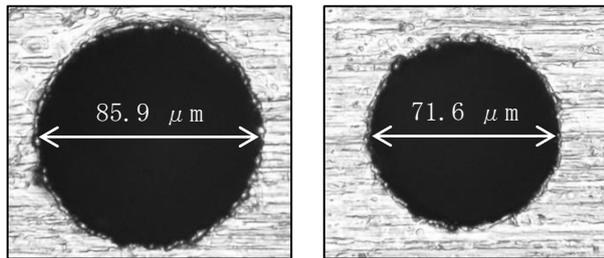


図 5 加工時間と工具電極 z 軸変位の関係



(a) デュアルサーボ送り機構 (b) ステッピングモーター駆動

図6 各サーボ送り装置における放電電流波形



(a) 入口側

(b) 出口側

図7 デュアルサーボ送り機構における加工穴

アルサーボ送り機構によって加工された加工穴を観察した。入口側と出口側の加工穴観察結果を図7に示す。出口側加工穴の直径は入口側と比較して  $15 \mu\text{m}$  ほど小さいことから、加工穴はテーパ形状になっていると考えられる。これは加工屑の二次放電によるものと推測される。また、入口側加工穴直径と板厚の比で示されるアスペクト比は 11.6 であった。

デュアルサーボ送り機構を搭載した微細放電加工機を用いて、加工液に ECF を用いた微細放電加工を行った。その結果、加工速度は放電加工油と同程度であったが、アスペクト比 20 以上の加工が可能になることが分かった。さらに、工具電極を回転させない状態においても、安定した放電加工を実現した。

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計2件)

- ① 金子健正, 牛腸歩駆人, 池田富士雄, 後藤啓光, 谷貴幸, デュアルサーボ送り機構を用いた微細放電加工, 2016年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
- ② 金子健正, 牛腸歩駆人, 池田富士雄, 後藤啓光, 谷貴幸, デュアルサーボ送り機構による微細深穴放電加工, 電気加工学会全国大会(2016)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

金子健正 (KANEKO Kensei)

長岡工業高等専門学校・機械工学科・助教

研究者番号: 60708618