

令和元年6月10日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17994

研究課題名（和文）放電環境制御によるマイクロ部品の形状創成と高精細表面改質法に関する研究

研究課題名（英文）Research on micro machining and high definition surface modification by using micro EDM with environment control

研究代表者

平尾 篤利 (Hirao, Atsutoshi)

新潟大学・人文社会科学系・准教授

研究者番号：70455111

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、気中、減圧雰囲気などの放電環境を適宜選択して、マイクロ放電による高アスペクト比の微小径深穴加工方法を確立し、マイクロ表面改質（医療用デバイス：微細針/注射針）などへ展開することである。特に、放電加工における加工速度の改善、放電表面改質法における特殊電源・電極工具などの課題解決を試みた。電極工具に対して超音波振動を援用することで、放電加工の課題である加工速度に対して効果が認められた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

同一機上で放電環境を自在に変更することが可能となれば、製品を加工機から取り外すことなく仕上げ加工することが可能となり、現在の加工精度より更なる高精度化が期待できる。近年、放電を用いた表面改質法が耐熱性・耐摩耗性に優れた特性を有していることが確認されており、微小径深穴加工を実施した加工穴内面に対して表面改質を施すことで、より耐高熱・耐高圧性が要求されている燃料噴射ノズルの微小径深穴などへの使用用途が拡大し、実用性の面からも社会的意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：In this research, we establish a process to high aspect ratio micro diameter deep hole machining method by micro EDM. EDM environment was properly selected such as air or reduced pressure atmosphere. Finally, we develop micro surface modification such as fine needle. We investigate EDM characteristics by using assisted ultrasonic vibration of the tool electrode. The result showed that the machining speed was increased several times by using assisted ultrasonic vibration of the tool electrode. In particular, when applied to deep-hole machining, this method is extremely effective in machining deeper holes.

研究分野：放電加工

キーワード：放電加工 表面改質 微細加工 微細軸成形

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

微小径穴加工法としてはドリル加工、レーザ加工、放電加工が適用されており、小径ノズル、真空チャック、吸着プレートなどは、直径 0.3mm 以下の微小径深穴加工が求められており、従来の加工法での対応が困難となっている。ドリル加工による穴加工は、加工精度、加工パターンの変化に柔軟に対応できるが、深穴加工になるほど切り屑の排出抵抗が大きくなるため工具折損を生じ易い。また、より微小径穴加工においては工具回転が機能しなくなり制限も大きい。レーザ加工を用いた連続穴加工は加工速度に優位性があるものの、深穴加工に適用した場合、表面・裏面の穴直径が異なってしまうため実用的ではない。

放電加工は加工速度に課題があるものの、加工反力が極めて小さく、精度・深穴加工などの点から微細加工の分野において効果を発揮している。これまでのところ微小径穴 100 μm 程度であれば、たとえばタングステンなどの引き抜き細線が用いられる。それ以下になると個別に電極工具を成形することになり、増沢らによる放電研削法（WEDG 法）が知られている。これまで、成形軸を回転させながら成形プレート側へ走査放電加工する微細軸走査放電成形法を提案し、高アスペクト比の微小径の軸成形が実現している。

近年、放電加工は電極材料を被加工物へ移行堆積させる放電表面改質法が実用化されている。表面改質に要求される性質は、耐食性、耐摩耗性、耐高温性といった材料の強化にとどまらず、潤滑性、色、艶などの機能的要素も含まれる。放電表面改質法は、圧粉体電極や焼結体電極を用い、被加工物に対して電極材料を移行堆積させる技術である。高度に電極材料を相手材に移行できるものの、電極工具の製作や放電の電源回路が特殊であるなど課題もあり、通常の放電加工機をそのまま利用することが困難である。

これらの課題を解決するため、加圧、気中、減圧雰囲気下等、多様な環境における放電加工法が考案されており、いずれの放電加工法も加工特性に影響を与えていると考えられている。これまで、鋼材に対して減圧雰囲気放電加工を実施した結果、蒸発加工（クラックレス加工）が確認されている。

2. 研究の目的

本研究では、気中、減圧雰囲気などの放電環境を適宜選択して、マイクロ放電による高アスペクト比の微小径深穴加工方法を確立し、マイクロ表面改質（医療用デバイス：微細針/注射針）などへの展開を目的としている。特に、放電加工における加工速度の改善、放電表面改質法における特殊電源・電極工具などの課題解決を試みる。

3. 研究の方法

研究期間において、以下の3つに対して実施した。

- (1) 超音波振動を工具電極に援用した放電加工
- (2) 減圧雰囲気が放電加工特性におよぼす影響
- (3) 放電加工におけるプラズマの滑り現象が表面改質におよぼす影響

(1) 超音波振動を工具電極に援用した放電加工

工具電極に対して、超音波振動を援用し、振幅を増大させることで加工速度の増大を確認した。そこで、工具電極に超音波を援用する周波数および振幅の条件を変化させることで、これらの条件が加工速度および表面粗さにおよぼす影響を調査する。また、超音波付与により加工速度が増大する要因について検討する。さらに、工具電極に超音波振動を与えた時に発生する気泡をハイスピードマイクロスコープによって観察し、気泡が加工特性におよぼす影響を調査する。

・ 超音波振動付与装置

超音波振動は、20~80 kHz で振動し、かつ振幅は数 μm と小さい。このため、振幅および振動周期を正確に計測することが難しい。そこで工具電極に付与した超音波振動の振幅および周波数を計測し、振幅が加工特性におよぼす影響を調査した。超音波振動子にランジュバン型振動子を用いる。振動子を超音波振動付与させるためには、図1に示した装置を構築した。ファンクションジェネレータ（F/G）から共振周波数と一致した正弦波を出力し、アンプを介して増幅する。増幅した正弦波を振動子へ入力することで、振動子は共振周波数で振動する。振動周期および振幅はレーザ変位計および渦電流変位センサを用いる。

・ 振幅と共振周波数

これまでの研究成果から電極工具は複数の共振点で振動することが確認されている。ここでは、37 kHz、49 kHz、67 kHz 近傍での共振を確認した。振幅の計測については図1に示す渦電流センサを用いた。周波数 37 kHz では振幅を 4 μm 、8 μm 、12 μm および 16 μm とした。一方、周波数 49 kHz、67 kHz では振幅を 4 μm および 8 μm とした。

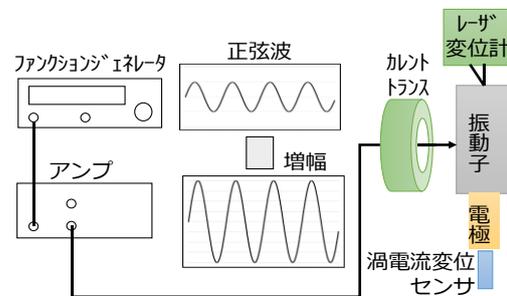


図1 超音波振動付与装置

- ・ 気泡の挙動観察

液層中に超音波を付与すると、キャビテーションが発生する。この発生した気泡が有限振幅で体積振動することにより、気泡周囲の流動が即されると報告されている。この現象は、放電加工においても影響を与えていると考えられる。そこで、超音波を援用することで油中内に発生する気泡を観察するために、一辺 18 mm のアクリル角棒にφ14 mm、深さ 14 mm の加工槽を製作した。加工槽の中心部には、放電ギャップを考慮し、φ 3.1 mm、深さ 0.6 mm の穴をあけた。実加工を想定し、加工油を用い、超音波振動を付与した電極を穴へ挿入し、ハイスピードマイクロスコープを用いて極間を撮影する。

(2) 減圧雰囲気放電加工特性におよぼす影響

これまでの研究において、極間は気泡で満たされていると報告されている。極間が気泡で満たされている場合、極間の状態は空中放電と近くなり、異常放電を引き起こし、表面粗さは悪化することも考えられる。このように放電加工において極間に介在する気泡の影響は大きい。ここでは、減圧雰囲気下における油中放電加工を実施し、圧力低下が加工特性におよぼす影響を調査した。

大気と遮断した真空チャンバー内に放電加工機を構築した。図 2 に放電加工システムを示す。放電は減圧雰囲気下での油中放電とした。本システムは、真空チャンバー接続部から大気の流れおよび減圧に伴う加工油の揮発を考慮する必要がある。図 3 に真空チャンバー内の圧力と真空引きの時間の関係を示す。600 秒で 30 Pa まで減圧され、その後 900 秒まで変化は見られない。このことから、減圧可能な到達圧力は 30 Pa である。減圧雰囲気 (30 Pa) および大気圧下 (1013 hPa) における油中連続放電加工を実施し、放電環境 (圧力) が表面におよぼす影響を調査した。

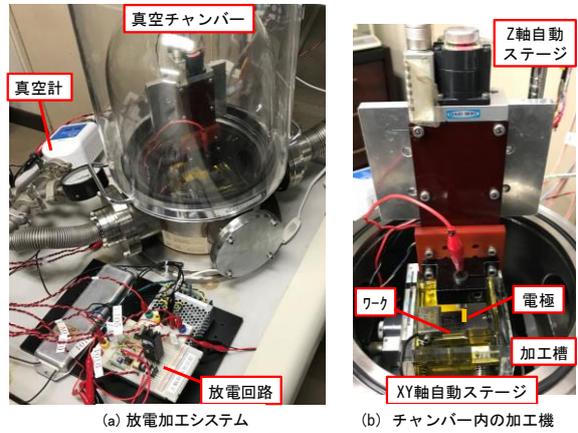


図2 減圧雰囲気放電加工機

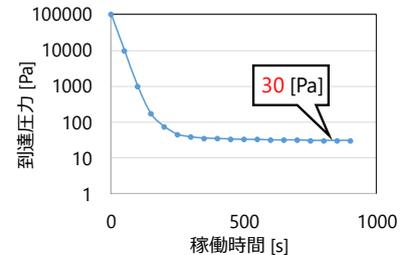


図3 真空圧力と稼働時間

(3) 放電加工におけるプラズマの滑り現象が表面改質におよぼす影響

放電加工では電極の消耗により、加工形状の形状精度が低下するという問題がある。特に、電極材料を移行堆積させる放電表面改質法において、電極消耗は重要である。これまで、陽極に棒電極、陰極に円板を用いて高速回転させ空中放電加工を行った結果、放電柱の滑りを確認するとともに、陰極消耗率の低減を確認した研究が報告されている。本研究では、パイプ形状の電極を高速回転させ、単発放電時の放電柱の滑り現象が、表面改質や堆積現象へおよぼす影響を調査した。図 4 に本研究で用いた電極・被加工物の概略を示す。

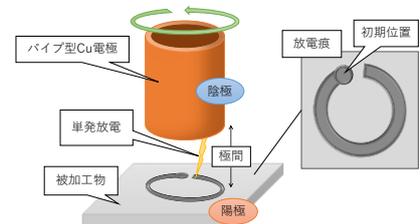


図4 回転体電極を用いた放電痕形状

4. 研究成果

(1) 超音波振動を工具電極に援用した放電加工

- ・ 振動周波数が加工特性におよぼす影響

図 5 に基準電圧 30 V および 50 V における電極速度と加工速度の関係を示す。ここでの電極速度は、周波数と電極の振幅の積から求めた値である。電極速度 0 mm/s は、電極に超音波振動を付与しない場合とする。電極速度 148 mm/s に比べ、592 mm/s の加工速度は大幅に増大した。一方で、表面粗さは超音波振動を付与しない場合と比べて、どの電極速度においても大きな違いはなかった。

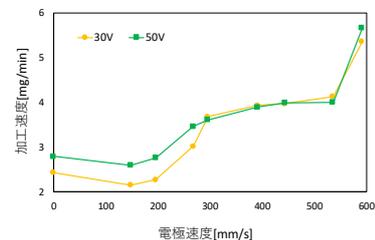


図5 電極速度と加工速度

周波数を 37 kHz とし、振幅 8 μm とした場合、電極速度は 296 mm/s となる。そこで電極速度を 296 mm/s と固定して考えた場合、周波数 49 kHz とすると、振幅は 6 μm となる。また、周波数 67 kHz とすると、振幅は 4.4 μm となる。この時の加工速度は、3.6 - 3.9 mg/min となった。このことから、異なった周波数と振幅を用いても電極速度が同じであれば加工速度に大きな違いは見られないことが分かった。電極速度は加工速度に大きく影響するものと考えられる。

- ・ 気泡が放電加工におよぼす影響

製作した加工槽の φ 3.1 mm の中心にある穴に電極を挿入し、超音波振動を付与したときに

ハイスピードマイクロスコープで極間の様子を撮影した。撮影によって、電極が振れている様子、気泡が穴底部に発生し、電極の振動により、発生した気泡が上昇し、排出される様子を確認した。気泡が排出される様子は、電極速度が速いほど多く見られた。フレームレート 6000 fps を用いたため、発生した気泡の挙動までは観察できなかった。キャビテーションの発生によって、気泡は流動していると考えられる。このように超音波振動を電極に付与した場合、加工速度が速くなった要因の一つに、放電加工時に発生する加工間隙の気泡や加工層が流動することで加工層が、排出されやすくなったためだと考えられる。

(2) 減圧雰囲気放電加工特性におよぼす影響

ここでは、単発放電を実施することで、各雰囲気下における一発の放電が除去におよぼす影響を調査した。電極は直径 $\phi 0.5 \text{ mm}$ の Cu を用いた。図 6 に各雰囲気下におけるパルス幅と放電痕面積の関係を示す。パルス幅の増大によって放電痕面積は増大する。また、陰極極性の放電痕面積は陽極極性に比べて大きいことが分かる。一方、大気圧下 (1013 hPa) と減圧雰囲気下 (30 Pa) の放電痕面積には大きな差は見られなかった。減圧雰囲気下で放電加工しても、放電一発あたりの加工量には大きく影響しないことが考えられる。減圧雰囲気下、電極極性陽極、パルス幅 45 μs 以上の条件における単発放電は、パルス幅の後半において短絡が頻発した。

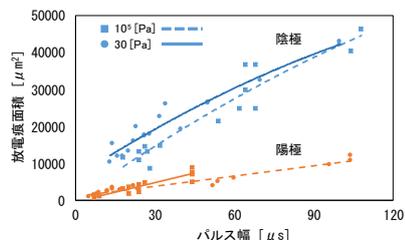


図6 パルス幅と放電痕面積の関係

(3) 放電加工におけるプラズマの滑り現象が表面改質におよぼす影響

・極性が放電痕形状におよぼす影響

パルス幅 5 ms, 回転数 9000 rpm の条件を用い、電極側 (Cu) と被加工物側 (NAK55) の極性を変えて単発放電を実施した。被加工物側 (NAK55) の陽極、陰極の場合で得られた放電痕を図 7 に示す。また、一部分を拡大した画像、デジタルマイクロスコープによって 3D 表示した画像を併せて示している。放電柱の滑りは、陰極側が陽極側に比べて長い。また、放電痕の幅は、陰極側が 0.1 mm であり、陽極側がさらに狭い。電極の肉厚 0.2 mm に対して、幅の狭い放電痕となっている。さらに、3D 表示の画像から、陰極側は全体的に堆積が見られ、陽極側は盛り上がった領域と除去された領域が混在し、凹凸が形成されている。このように、極性の違いが放電痕に大きな影響を与えていることが分かった。

・材料の違いが放電痕におよぼす影響

被加工物に Cu を用い、鋼材 NAK55 と比較する。電極が陽極極性の場合、放電痕の観察が困難であったため、電極が陰極 (被加工物側は陽極極性) の場合のみを示している。Cu は、熱伝導率が鋼材に比べて高いため、放電痕が明確に観察できなかったものと考えられる。

図 8 に NAK55 における各電極極性の放電痕および断面曲線を示す。図 9 に Cu における被加工物 (陽極極性) の放電痕および断面曲線を示す。NAK55 の場合は、除去加工された領域の周辺に盛り上がり形成されており、Cu は放電痕の全領域で堆積されていることが分かる。Cu は連続放電の際にも堆積が確認されており、電極 Cu-被加工物 Cu とする場合、電極を高速回転させて放電を行うと、堆積されることが分かった。

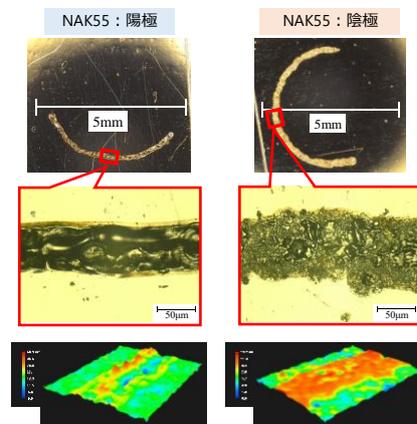


図7 極性による放電痕の違い

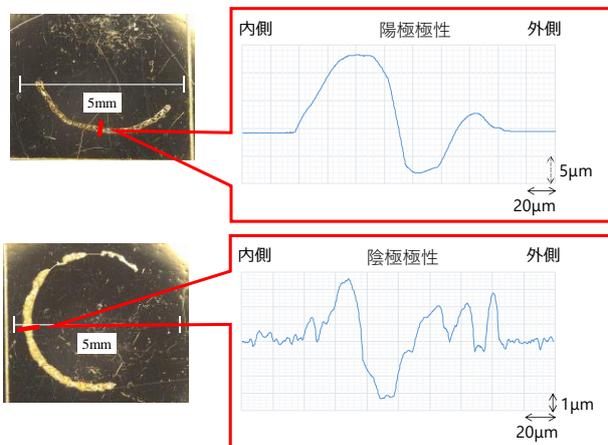


図8 NAK55の断面形状



図9 Cuの断面形状

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Atsutoshi HIRAO, Hiromitsu GOTOH, Takayuki TANI, Naotake Mohri : Relationship between electrode diameter and wear ratio in scanning electrical discharge machining, International Journal of Electrical Machining, No.24, (2019)7-12.
- ② Atsutoshi HIRAO, Hiromitsu GOTOH, Takayuki TANI : Some Effects on EDM Characteristics by Assisted Ultrasonic Vibration of the Tool Electrode, Procedia CIRP 68 (2018)76-80.
- ③ Takayuki Tani, Hiromitsu Gotoh, Atsutoshi Hirao, Naotake Mohri: Simultaneous Machining of Polygonal Microelectrode and Microholes Using Tandem EDM Mechanism, Procedia CIRP 42 (2016)521-525.
- ④ Atsutoshi Hirao, Takayuki Tani, Hiromitsu Gotoh, Shoji Aoshima, Naotake Mohri : Study of Deposition Machining Using Electrical Discharge with Reciprocation Rotation in Air Gap, International Journal of Electrical Machining, No.21, (2016)1-6.

[学会発表] (計 14 件)

- (1) 谷貴幸, 後藤啓光, 平尾篤利, 毛利尚武 : 放電加工におけるカーボン付着メカニズムの解明, 2018 年度電気加工学会全国大会全国大会講演論文集, (2018)39-40.
- (2) 後藤啓光, 谷貴幸, 平尾篤利, 毛利尚武 : 回転ワイヤガイドを用いたワイヤ放電ミーリング加工法の開発 -超硬合金に対する貫通穴加工-, 2018 年度電気加工学会全国大会全国大会講演論文集, (2018)55-56.
- (3) 岩間智哉, 平尾篤利, 谷貴幸 : 微小径穴加工における高応答折損回避に関する研究, 2018 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会, (2018)A13
- (4) 大輪拓也, 平尾篤利, 谷貴幸 : 工具電極の振動周波数が加工特性へおよぼす影響, 2018 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会, (2018)A12
- (5) 野口敬祐, 平尾篤利, 谷貴幸 : 放電加工におけるプラズマの滑り現象が表面改質におよぼす影響, 2018 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会, (2018)A11
- (6) 平尾篤利, 後藤啓光, 谷貴幸 : 単パルス放電のプラズマの滑り現象が表面におよぼす影響, 第 12 回生産加工・工作機械部門講演会, (2018)B06
- (7) 谷貴幸, 後藤啓光, 平尾篤利, 毛利尚武 : 放電加工における材料除去およびカーボン付着メカニズムの一考察, 第 12 回生産加工・工作機械部門講演会, (2018)B09
- (8) 平尾篤利, 後藤啓光, 谷貴幸 : 減圧雰囲気放電加工表面に及ぼす影響, 2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会, (2018)339-340.
- (9) 後藤啓光, 谷貴幸, 平尾篤利, 毛利尚武 : 回転ワイヤガイドを用いたワイヤ放電ミーリング加工法の開発-トランジスタ制御付コンデンサ放電回路の適用-, 2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会, (2018)341-342.
- (10) 堅田梨紗, 平尾篤利, 谷貴幸 : 放電加工法における高速回転電極が表面におよぼす影響, 2017 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会, (2017)C12
- (11) 平尾篤利, 谷貴幸 : 複合化加工を用いた細穴加工の試み, 2017 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会, (2017)C13
- (12) 本谷大, 平尾篤利, 谷貴幸 : 減圧雰囲気下における放電加工特性, 2017 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会, (2017)C14
- (13) 松島優登, 平尾篤利 : 研磨加工における添加剤(BTA)がもたらす加工特性の変容, 2016 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会, (2016)B21
- (14) 平尾篤利, 谷貴幸, 毛利尚武 : 高速回転工具を用いた高アスペクト比の微小径穴加工, 第 11 回 生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2016)79-80.

[その他]

ホームページ : <http://www.ed.niigata-u.ac.jp/~hirao/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平尾 篤利 (HIRAO, Atsutoshi)
新潟大学・人文社会科学系・准教授
研究者番号 : 70455111