

令和 5 年 5 月 15 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04213

研究課題名（和文）細穴放電加工におけるパイプ電極形状創成の効果と深穴加工時の不安定性要因の解明

研究課題名（英文）Elucidation of effects of pipe-electrode shape in small-hole EDM and instability factors during deep-hole EDM

研究代表者

武澤 英樹 (Takezawa, Hideki)

工学院大学・先進工学部・教授

研究者番号：40334148

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：高硬度材料の形状加工が可能な放電加工の中で、細穴を加工する細穴放電加工がある。これは、パイプ状の黄銅や銅電極を用いて中空部から水系加工液を噴射しながら加工を行う。直径に対して深さが100倍以上にもなる深穴加工においては、加工粉の排出が滞るためか、放電状態が不安定となり加工速度が低下する。そのような現象を解消する目的で、電極外周部へのストレート溝の追加や、電極断面形状を変更した加工実験を行ったところ、放電不安定現象を回避することができ、加工時間が短くなった。また、加工液の噴射圧力を変更しても放電不安定現象が発生しない場合があり、加工液噴射圧制御による加工速度向上への取り組みにつながった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

深い細穴は、各種金型の冷却用細穴や発電用タービンブレードの冷却穴など、多岐にわたり必要とされている。特にアスペクト比100を超える深穴になると、放電加工あるいは電解加工が多く用いられる。ただし、どちらも加工深さが深くなると加工液および加工粉の排出が滞るため、加工速度の低下が生じてしまい、結果として加工時間を長くしている。

そのような状況において、本研究で提案する電極形状の工夫や加工液噴出圧を制御することで加工速度の低下を防ぐ効果があることが分かった。特に、加工液噴射圧制御は既存の設備ですぐに対応することが可能であり、すぐに活用可能な技術という意味では工業的意義は高い。

研究成果の概要（英文）：Electrical discharge machining is good at shape machining of high hardness materials. Among them, there is small-hole electrical discharge machining for machining small holes. This is done by spraying a water-based machining fluid from a pipe-shaped brass or copper electrode. In deep hole drilling, where the depth is more than 100 times the electrode diameter, the drilling becomes unstable and the machining speed decreases, probably because the discharge of debris is delayed. In order to eliminate such a phenomenon, we added a straight groove to the outer circumference of the electrode and performed a machining experiment by changing the cross-sectional shape of the electrode. In addition, it was found that the unstable discharge phenomenon did not occur even if the injection pressure of the machining fluid was changed.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：細穴放電加工 パイプ電極 放電不安定状態 加工粉 加工液噴出圧 高アスペクト比

1. 研究開始当初の背景

熱エネルギー加工である放電加工は、高硬度材料の形状加工が得意である。加えて非接触加工であるため、微細加工への適用が広がっている。その中で、細い深穴加工も放電加工が得意とする分野である。細穴放電加工は専用機が市販されており、直径 0.2 ~ 3mm、長さ 250 ~ 400mm 程度のパイプ電極を用いて、穴中央から水系加工液を噴出しながら加工を行う。加工中電極は数百 rpm で回転し、加工穴精度の向上と加工粉排出効果を高めている。ただし加工深さが深くなると、短絡や開放、集中といった異常放電が頻発して主軸の上下運動が激しくなる加工不安定な状態が多くなり、加工速度が低下することは経験的に良く知られている。最悪の場合は、ある深さ以上加工が進行しない状況も発生する。そのため、前述のガス抜き用細穴加工において必要な穴深さまで到達しない場合は、片側から半分程度の深さまで加工し、その後反対側から残り半分の細穴加工を行う手法が取られている。この場合、穴位置がずれてしまう問題点、および段取り替えによる時間の無駄が生じる。そこで、細穴放電加工における深穴加工時の加工速度低減の解消と、さらなる高アスペクト加工が望まれている。深穴加工時、加工現象としては放電不安定になることから、加工粉の排出が滞ることが要因とこれまで推察されてきた。その対策として、電極ジャンプ動作の工夫や超音波振動を援用する手法などが提案され一定の効果が確認されている。ただし、前述の通り現実的には対向させた穴加工が用いられており、その効果は一般的ではない。加えて、細穴放電加工において深穴加工時の加工不安定原因が加工粉の停滞によるものなのかを明らかとするために、加工粉の挙動について、解析的にあるいは実験的に報告された事例はほとんどないのが研究当初の状況である。

2. 研究の目的

本研究は、市販の細穴放電加工機を用いた深穴加工において経験的に知れている放電不安定に起因する加工速度の低下および加工の停滞現象の解消に向けたパイプ電極外周部への溝加工を含めた断面形状制御の効果を明らかとするものである。さらに、細穴放電加工時の加工部位近傍に着目した流体解析を行い、加工粉の挙動を予測するモデルを構築し、電極外周形状による違いを明らかとして最適断面形状の提案と検証を行う。

細穴放電加工機による穴加工では、深穴加工になると加工不安定になることは経験的に知られてきた。その原因として加工粉の停滞が推察されており、前述のようないくつかの対策が報告されているが、その効果は限定的なものである。それに対して、市販のパイプ電極外周部に溝形状を追加、あるいは断面を切り欠き(ノッチ)形状にすることで加工粉の排出能力が高まることを期待している。その結果、電極標準長さ 400mm と電極消耗率で決まる加工深さ限界までの深穴加工や、加工速度の向上が期待できる。

3. 研究の方法

はじめに、市販のパイプ電極と、その断面形状を各種追加工した電極による深穴放電加工時の各種特性(主軸降下の時間的推移、放電状態の把握、加工液噴出状態の変化、電極消耗率など)を調べる。それにより、各断面形状の効果を明らかとする。そのために、パイプ電極の外周に成形する溝形状の安定的な成形法を各種検討する。溝形状では、溝本数、ストレート溝とスパイラル溝、スパイラル溝のねじり方向の違いなど各種成形を試みる。ノッチ形状では、切り欠き深さや片側切り欠きと両側切り欠きの違いなど成形する。深穴放電加工では、通常パイプ電極で深穴時に加工不安定になる条件を選定し、各断面形状電極の効果を確認する。加工は既設の細穴放電加工機(アステック製 A22M)を用いる。電極は直径 3mm、1mm および 0.8mm 程度までを候補と考える。つぎに、溝成形以外に市販のハイブ電極成形メーカーに異形状断面のパイプ電極を特注し、その効果を調べる。溝付きとの比較検討を行い、深穴加工時の主軸降下量の変化に注目する。その後、加工液噴出圧を変化させた影響も検討する。溝付き、異形状断面に加え中空部からの加工液噴出圧を変化させても、加工粉排出能力に差が生じるものと考え、比較検討する。パイプ形状から極間への流体噴出状況を数値解析することも検討し、実験結果との比較を行い、加工粉の滞留が発生しうる条件があるのか否かも検討する。

4. 研究成果

はじめは、直径 3mm のパイプ電極外周部へのストレート溝加工の効果を調べた。図 1 のような溝付き電極を自前で成形し、高さ 125mm のステンレス鋼への貫通加工を行い、主軸降下量の時間変化を記録した。結果を図 2 に示す。通常パイプ電極では、加工深さが深くなると加工速度が停滞しているが、溝付き電極では加工初期から加工速度が低下することなく貫通穴加工が終了している。



図 1 溝付き有無のパイプ電極断面

これより、溝付き電極の効果が確認された。さらに、加工後半の主軸降下量の変化を詳しく観察すると、両者の主軸の挙動に明らかな変化があることが分かり、溝付き電極のほうが、放電状態が安定していることが確認された。しかしながら、自前でストレート溝を成形しているため、溝深さにばらつきがある、溝エッジ部にバリが残るなどの理由から、安定的に溝付き電極を準備することが困難であった。そこで、市販のパイプ電極を製造しているメーカーに相談し、断面形状が円形ではない異形状断面のパイプ電極の成形依頼を特注した。直径1mmの通常パイプ電極を基本として、断面形状を図3に示す3種類(片側カット、両側カット、三角形)を入手した。電極を回転して加工が行われるが、加工される穴直径は通常パイプ電極と同等になるよう寸法が設計されている。また、電極長さは通常と同様400mmであり、その真直性も通常品と同等である。これらの電極を使用して、高さ125mmのステンレス鋼への貫通加工を行った。放電条件はメーカー推奨条件であり、加工液噴出圧は5MPaである。主軸降下量の時間変化を図4に示す。通常パイプ電極では、直径3mmと同様に加工深さが深くなると加工速度の低下および停滞が発生したが、異形状電極の3種ではそのような現象は発生せず、貫通穴加工が終了した。中でも三角形断面電極が最も安定的に早く加工が終了した。ところが、図3の電極断面形状を見てわかるように、特注した異形状断面電極の内径面積は、通常パイプ電極よりも大きく成形されている。これは、真直性や加工穴直径を優先して成形されたためであり、内径面積の統一がなされていない。そのため、加工液噴射圧を同一とした場合、異形状断面電極では加工液の流量が多くなり、その結果加工屑の排出能力が上がったとも推定された。そこで、加工液流量を変化させるため、加工液噴射圧を変化させた際の影響を調べた。異形状電極においては、設定噴射圧を使用したポンプの最低圧1MPaにしても、通常パイプ電極の流量を超えてしまうため、通常パイプ電極での比較を行った。ポンプ吐出圧1MPa、3MPa、5MPaの3種類の条件で比較した。同様のステンレス鋼に対する貫通穴加工における主軸降下量の変化を図5に示す。5MPaでは加工深さが深くなると加工速度が低下あるいは停滞するが、3MPaでもその影響は小さいが同様な状況が発生した。それに対して1MPaは、加工初期からの加工速度自体は他の2条件に比較して小さいが、加工深さが深くなっても加工速度の低下や停滞は発生せず、結果としてもっとも短い時間で貫通穴が加工された。これより、加工液噴射圧を変化させることで加工深さが深くなった場合の、放電不安定状態を回避できる可能性があることが明らかとなった。

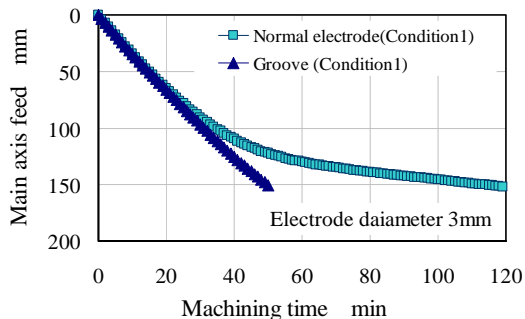


図2 3mm 電極の主軸降下量の時間変化

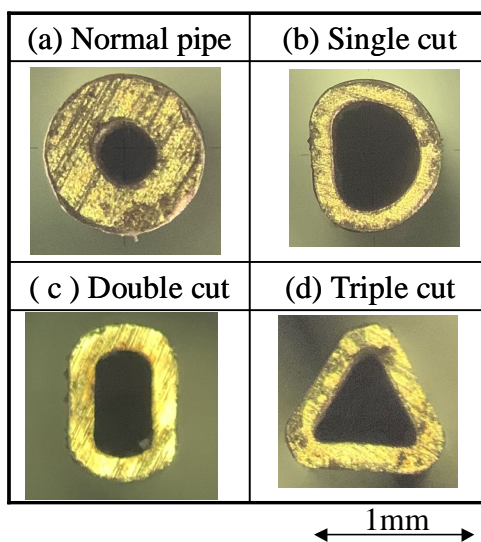


図3 1mm 通常電極と3種の異形状電極

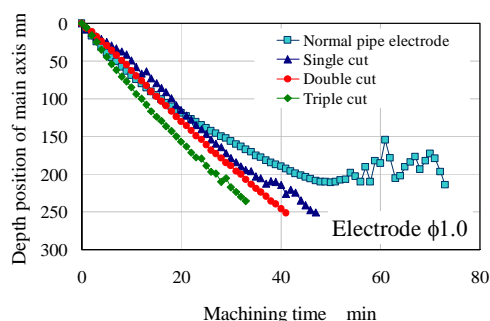


図4 1mm 電極の主軸降下量の時間変化

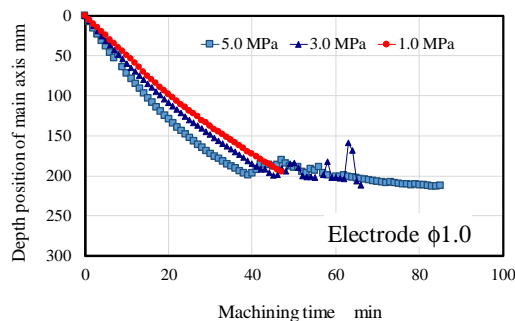


図5 1mm ポンプ圧の変化主軸降下量の時間変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hideki Takezawa, Kou Kikuchi and Nayu Urakami	4. 巻 27
2. 論文標題 Effects of electrode cross-sectional shape and machining fluid ejection pressure on small hole EDM	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Electrical Machining	6. 最初と最後の頁 28-34
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hideki Takezawa, Hiroki Toyoda and Kenta Yuasa	4. 巻 26
2. 論文標題 Effects of Thin Pipe Electrodes with Grooves in Small Deep Hole EDM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Electrical Machining	6. 最初と最後の頁 46-53
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 菊池 航, 武沢英樹
2. 発表標題 細穴放電加工における深穴加工時の加工液噴出圧の影響
3. 学会等名 電気加工学会 全国大会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武沢 英樹, 菊池 航
2. 発表標題 各種断面形状に成形された細穴放電加工用パイプ電極の効果
3. 学会等名 2021年精密工学会学術講演会春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hideki Takezawa, Hiroki Toyoda and Kenta Yuasa
2. 発表標題 Small-hole EDM using Grooved Pipe Electrode
3. 学会等名 20th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菊池 航, 武沢英樹
2. 発表標題 細穴放電加工におけるパイプ電極断面形状の違いによる深穴加工特性
3. 学会等名 型技術者会議2021学生ポスター発表
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関