

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：15301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18829

研究課題名（和文）つり下げ電極を用いた放電加工による小径曲がり穴の創成

研究課題名（英文）Curved Hole Drilling by EDM Using a Suspended Ball Electrode

研究代表者

岡田 晃（Okada, Akira）

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：60263612

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、金属球を薄い金属箔でつり下げた電極を用い、放電加工による金属塊材への曲がり穴加工技術の確立を目指し、基礎的検討を行った。その結果、穴加工が安定して実現できる電極構造および電気加工条件を明らかにした。また、加工中の工作物を傾斜することで加工方向を制御できるため、曲がり穴加工を実現できることに成功した。鉄鋼系金型材料やアルミニウム合金に対しても加工中に工作物に数100ミクロンの微振動を付加することで、短絡を防止し安定した加工状態を維持できることも明らかとした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで金属材料に対して従来の機械的除去加工によって小径の曲がり穴を創成することは難しく、最適な部品形状や設計の妨げとなっていた。本研究の遂行によって金属に対して曲がり穴加工の可能性が示されたことは工業的な意義は大きく、金型の冷却流路や油圧の機器の作動油流路への応用、そのほか他分野への応用が期待できる。また固定しない電極を用いて、極間距離を精密に制御しなくとも放電加工が可能であることから、この現象を利用した様々な加工形状創成の応用も期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, a curved hole drilling method into metal materials by electrical discharge machining using a suspended ball electrode with thin film was newly proposed and the EDM characteristics were investigated. As a result, the electrical conditions for stable hole drilling using the suspended ball electrode and the electrode structure for stable hole drilling could be optimized. By tilting the workpiece during the process, the drilling direction could be controlled to some extent, and curved hole drilling became possible. Moreover, a stable curved hole drilling was possible even for steels and aluminum alloy by giving small vibration to the workpiece because short circuit between electrode and inside surface of drilled hole.

研究分野：特殊加工

キーワード：放電加工 曲がり穴 つり下げ電極

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

従来切望されているが実現が難しい加工形状の一つに曲がり穴がある。曲がり穴は流体や熱の効率的移動、キャビテーション防止のため理想的流路形状であり、金型や様々な放熱部品に対してこれが実現すれば、省エネルギー持続可能社会に大きく貢献できる。しかし、従来加工技術では金属塊材に対して小径曲がり穴を高精度に加工することは難しい。最近では **Additive Manufacturing** で内部に冷却穴を有する金型等の加工が提案されているが、実際には製品強度、加工効率、穴内面性状などの点で課題がある。

2. 研究の目的

放電加工は放電プラズマの高温を利用して材料を熔融除去する加工法であり、従来機械加工と異なり工具電極を強固に固定しなくても加工が可能である。これまでに基礎実験として電極球を柔軟なワイヤ等でつり下げた電極を用い、加工途中に工作物を傾斜させることで曲がり穴を創成する可能性を探ってきた。その結果、固定しない電極でも加工可能であり、工作物の傾斜に伴い加工方向を制御できることを見出した。

本研究では、簡便な方法で小径曲がり穴を実現することを目的とし、図1に示すように、柔軟に変形するワイヤや箔でつり下げられた直径数 mm の小径電極球を用いて放電加工を行い、加工中に工作物を任意の角度に傾けることで加工方向を制御し、高精度の小径曲がり穴を得る全く新しい加工法を提案する。加工性能向上のために基礎的加工特性の解明、電極構造と加工条件の最適化、加工形状精度向上と安定加工状態維持のための検討、ならびに従来不可能な様々な曲がり穴の加工を実施した。

3. 研究の方法

電極球には、直径 5.5mm の銅タングステン合金 (30 mass%Cu-70 mass%W, 以降 CuW) を用いた。つり下げ部には細い銅ワイヤ、銅箔、およびチェーンを用いて適性を比較した。工作物には、亜鉛合金、アルミニウム合金 (JIS A5052) および合金工具鋼 (JIS SKD11) を使用し、加工特性を比較した。実験は NC 形彫り放電加工機 (Sodick 製, AP1L / AQ35LR) を用い、主に放電電流値とサーボ基準電圧を変化させて、加工特性への影響を検討した。電極のジャンプ動作は行っていない。

図2には工作物振動付与に用いた振動装置の外観を示す。タービンバイブレータ (EXEN 製, BTP24) を用いて振動を発生させており、給気エア圧力の増減により振動をある程度変化させることができる。図に示すようにタービンバイブレータの振動を上部に支点を設けた L 字型ステーを介して工作物に伝達する機構となっている。図中に Z 方向と X 方向の工作物振動波形を示す。工作物は水平方向よりも鉛直方向に大きく振動し、その振幅はそれぞれ約 185 μm 、49 μm であり、振動数は両者とも約 121Hz である。

つり下げ電極を用いた曲がり穴放電加工の高性能化のために、電極つり下げ部構造の最適化、加工形状精度向上の検討、工作物振動による加工安定化と加工再開の検討、実用的曲がり穴形状の加工を順次行った。

4. 研究成果

(1) つり下げ電極構造の最適化

まず、吊り下げリード部の構造について、金属箔、細線ワイヤ、およびチェーンでの加工性能を比較した。それぞれの電極構造の外観を図3に示す。そして、図4に加工進行状態の比較の結果を示す。加工速度等の放電加工特性に大きな違いはなかった。ただし、大きな放電電流を流すためには十分な断面積を有し、かつ、曲がり穴加工の

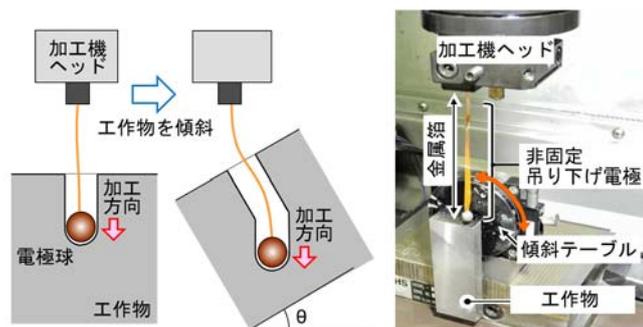


図1 つり下げ電極による曲がり穴放電加工の原理

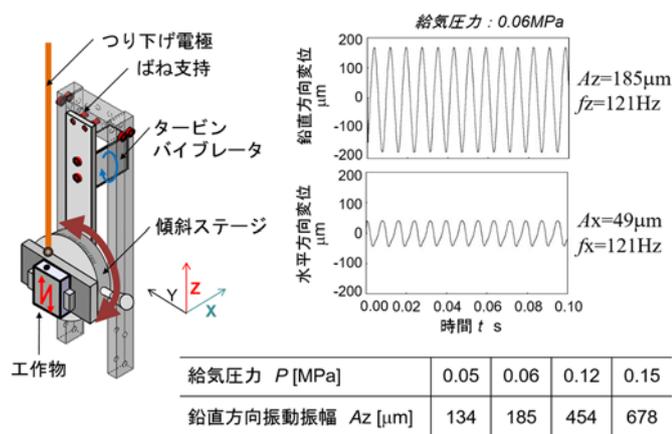


図2 振動付与装置および工作物振動特性

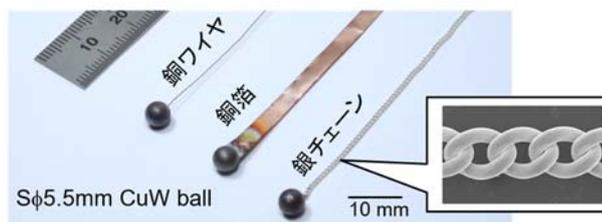


図3 つり下げ部構造

ためには柔軟性に優れることが必要である。この点においてワイヤは柔軟性がやや乏しく、また、チェーンでは放電加工時にリング同士の接触部分において放電が発生する場合があるなどの問題がある。したがって、金属箔が吊り下げ部として最適であることが判明した。金属箔の場合、曲がる方向が箔平面の法線方向に限定されてしまうことが懸念されたが、実際には加工中の箔は適切にねじれを生じることから、あらゆる方向に柔軟に曲げることができる。

(2) 亜鉛合金に対する曲がり穴放電加工

図5に亜鉛合金に対し、一定深さの直線穴加工後に工作物をそれぞれ、 30° 、 45° 、および 60° と傾斜させた場合の加工穴断面カットモデルを示す。図より、いずれの傾斜角の場合も工作物を傾斜させた深さで穴が屈折し、また、工作物の傾斜角に応じた屈折角が正確に得られていることが分かる。すなわち、本手法によって穴加工方向を精度よく制御できることが明らかとなった。

亜鉛合金に対して曲がり穴を加工した例を図6に示す。(1)は深さ30mm、直径約5.5mmの直線深穴加工後に、工作物を徐々に傾斜させながら短い直線穴加工を繰り返すことで屈曲穴を加工した例である。この場合屈曲角度は 90° 、その曲率半径は11.5mmとなっている。深い直線穴加工に続いてほぼ設定通りの形状が得られていることが分かる。また、(2)では、曲率半径の異なる2つの屈曲穴形状が連続する複雑な曲がり穴の加工を試みた。深さ10mmの直線穴加工の後に曲率半径5.7mm角度 60° の屈曲穴を加工し、続いて10mmの傾斜した直線穴加工の後、最初の屈曲と異なる曲率半径17.2mmの屈曲穴を加工、さらに直線加工を行っている。設定形状を中心線で示すとおり、十分な形状精度で曲がり穴加工が実現できている。

(3) 工作物振動による実用金属への穴加工

これまで、融点が低く放電加工性に優れた亜鉛合金を工作物として用いてきたが、鉄鋼やアルミニウムなど実用材料に対しては放電が不安定で持続できないことが多く、深い穴の加工は不可能であった。これは亜鉛合金と比較すると、鉄鋼材料などの場合は加工中の電極と加工穴内面との距離が比較的狭く、放電爆圧に起因する電極球の揺れによって短絡が頻繁に発生することが原因である。

放電加工中に電極や加工液に微小な振動を付与することで、短絡回避や加工粉排出促進の効果によって加工状態が安定することが知られている。そこで、本加工法においても工作物を強制的に微振動させながら加工する方法を試みた。これにより広いクリアランスを確保でき、たとえ短絡が生じても工作物振動によって瞬時にそれを回避できると考えられる。また、加工粉の滞留もいくらか解消できると期待される。

図7はアルミニウム合金工作物の振動の有無による電極送りの、すなわち加工穴深さの時間変

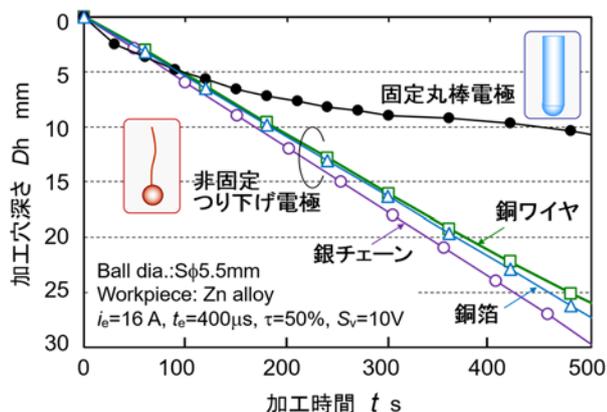


図4 つり下げ部構造による加工速度の違い

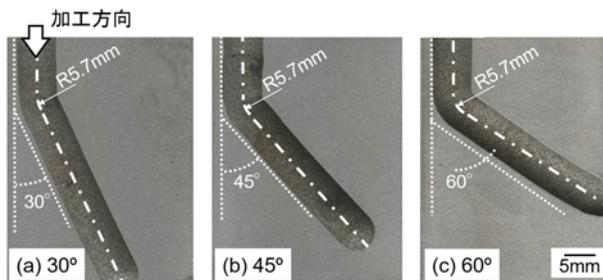


図5 工作物傾斜による屈折角の制御

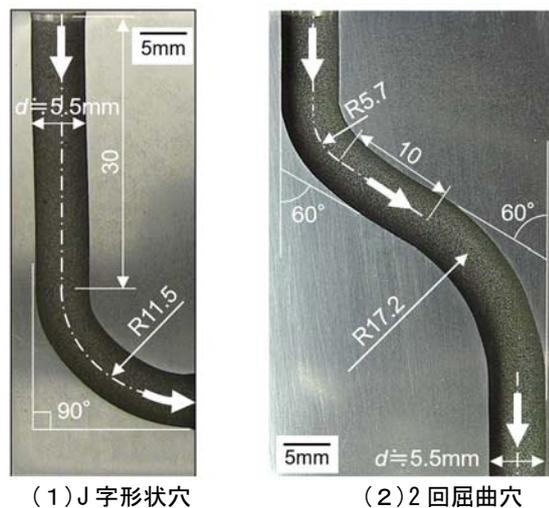


図6 亜鉛合金に対する曲がり穴加工例

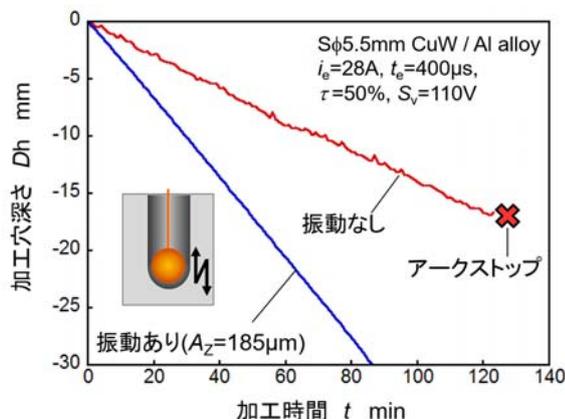


図7 工作物振動有無による加工状態の違い

化を示す。振動のない場合は電極と工作物が頻繁に接触するため、それを避けようと加工機が電極を上方に引き上げ、加工機ヘッドの上下動が頻繁に起こっている。そのため常に不安定な加工状態で加工速度も遅い。そして加工深さ約 16mm で異常放電状態となり、加工継続が不可能となった。これに対して工作物が振動する場合、見かけの極間距離が増大して短絡を防ぐことで常時安定した放電状態で加工が進行する。加工速度も振動なしの場合に比べて 2 倍程度増加するとともに、より深い穴加工が可能となった。合金工具鋼 SKD11 や超硬合金に対しても、同様の効果を示した。すなわち、これまで不可能であった実用金属材料に対しても工作物を振動させることでつり下げ電極による深穴加工が実現できるようになった。

次に工作物振動振幅が加工速度や加工穴径に及ぼす影響を調べた。図 8 は、工作物振動振幅を変化させた場合の加工速度および加工穴径の変化を放電電流値ごとに示している。通常の放電加工と同様に放電電流値の増加とともに加工速度および加工穴径は大きくなるのが分かる。また、加工速度および加工穴径は工作物振動振幅の増加に伴って僅かに増加している。これは工作物振動振幅に伴ってクリアランスが増大し、また加工穴に滞留する加工粉や気泡をより攪拌し、排出が促進されて安定した加工状態が維持できたためと考えられる。ここで、加工穴径の増加に着目すると、放電電流 28 の場合工作物振動振幅を 540 μm 増加させているにもかかわらず、加工穴径の増加は約 150 μm となっている。工作物に振動を与えなければ加工が不可能なことを考慮すると、僅かに振動を与えるだけで加工穴径をさほど増大させずに加工安定化の効果があることが分かる。

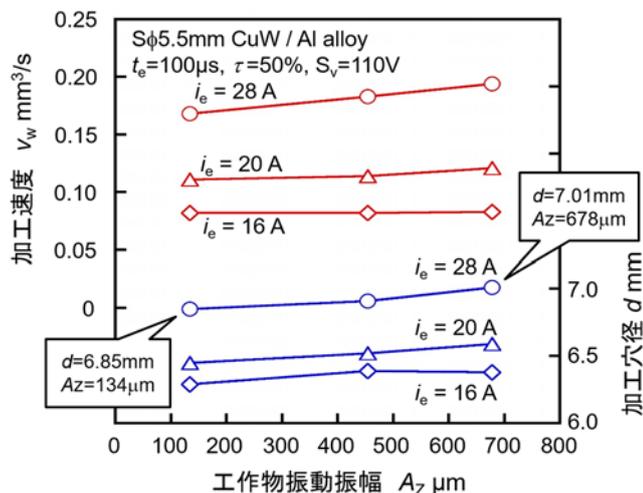


図 8 工作物振動振幅が加工速度と加工穴径に及ぼす影響

ここで、加工穴径の増加に着目すると、放電電流 28 の場合工作物振動振幅を 540 μm 増加させているにもかかわらず、加工穴径の増加は約 150 μm となっている。工作物に振動を与えなければ加工が不可能なことを考慮すると、僅かに振動を与えるだけで加工穴径をさほど増大させずに加工安定化の効果があることが分かる。

(4) 工作物振動付与による加工再開

前述のように、実用材質に対しても安定した放電状態での穴加工が可能となったが、非固定の吊り下げ電極に対しては電極ジャンプ動作が利用できないため、加工穴内での加工粉の滞留は加工深さとともに顕著となり、より深い穴加工ではやはり加工継続は難しいと考えられる。従って、加工を一時停止し、加工途中で加工穴内の加工粉を除去してから加工を再開することが長い距離の曲がり穴加工には合理的であると考えられる。この場合、既存穴底からの安定した加工再開が必要となる。加工再開時においては概ね加工穴内面と電極球が接触した状態となりやすいため、通常はそのまま放電を開始することは難しい。そこで、工作物振動付与によってギャップを生じさせることで加工再開を試みた。

図 9 に加工穴底と電極球を接触させた状態から工作物振動付与により加工再開を行った結果を示す。図より、容易に加工再開が可能であり、再開後の加工も通常の直線穴加工と同様の加工速度が得られている。従って、工作物加振により電極球と穴底部が接触した状態からでも加工が再開でき、安定した加工が継続できることが分かった。この結果から本手法を用いれば、たとえ加工が途中で停止しても、加工粉排出後に加工をそこから再開でき、またその際に工作物を傾斜させることも可能なため、より深く複雑な曲がり穴加工が可能となる。

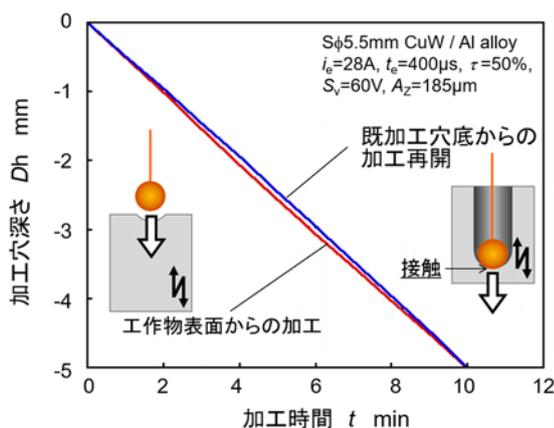


図 9 工作物振動による穴加工の再開

(5) 実用金属材料に対する曲がり穴加工

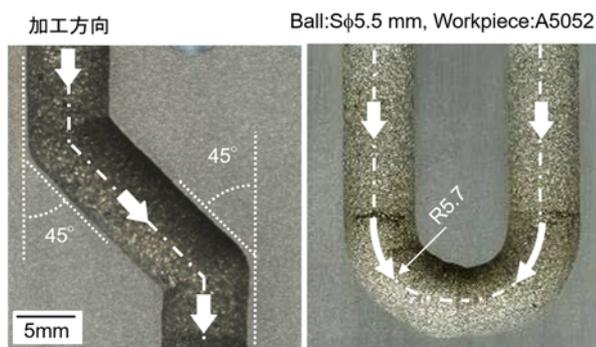
工作物振動の付与により非固定の吊り下げ電極を用いて実用金属に対する安定した加工状態での穴加工が可能となったため、実用金属に対する曲がり穴加工を試みた。図 10 にその結果を示す。(1)はアルミニウム合金に対し 10mm の直線加工を行った後に 60°屈折して直線加工、さらに反対方向に屈折と、2 回屈折した加工形状である。設計形状どおりの正確な曲がり穴が得られている。また、(2)の加工は U 字曲がり穴形状である。最初に 2 つの直線穴加工を行い、その穴底からそれぞれ曲率半径 5.7mm の屈曲穴加工を行い、二つの穴を合体させてこの形状を得ている。高い形状制御性により二つの穴を合体させることができ、正確な U 字形状が得られている。

さらに、本加工技術の実用展開への基礎検討として金型の冷却水流路を想定した小径非対称U字形状の加工を試みた。図11に示すようなコア金型に対して、内部に設けられた冷却水流路の加工を試みた。まず、ドリルを用いて二つの直線深穴を機械加工し、一つの深穴底から曲率半径5mmで90°の屈曲穴放電加工を行う。その後、もう一方のドリル穴底から曲率半径10mmで60°の屈曲穴加工、さらに屈曲後に8.7mmの直線加工を行った。仕様穴径が5.0mmであるため、直径4.5mmの電極球を用いて加工を行った。工作物材質はSKD61である。

図12に加工結果を示す。二つの曲がり穴の先端を合致させることで、非対称の直線部の長いU字形状加工が得られている。すなわち、工作物の微振動によって比較的大きな工作物に対しても、これまで全く不可能であった深穴で大きな屈曲角を有する曲がり穴を形成することが可能である。ただし、設計形状とは最大で1.5mmの形状誤差が生じていた。これは、比較的小径、かつ深穴の曲がり穴加工になると、箔部のたわみや加工粉滞留の影響が大きくなり、加工機主軸座標から算出される電極球位置と、実際の加工位置に誤差が生じているためである。今後、インプロセスでの精密な加工位置把握や加工形状計測などにより、更なる形状精度の向上について検討していく。

(6) まとめ

工具に加工力が作用しないという放電加工の特徴を生かした、非固定の吊り下げ電極による曲がり穴加工法について紹介した。今後、加工穴の更なる小径化、形状精度の向上、加工可能材質の拡大、穴形状の机上計測、および穴内面仕上げ等、本加工法の高性能化と実用化について更に研究を進めていく予定である。本技術により設計段階で断念していた形状や複数部品要素の組合せでのみ可能であった形状を単一プロセスで実現でき、設計の自由度も格段に高くなると考えられる。金型の冷却穴や油圧機器の流路だけでなく、工業製品や部品の高機能化にも寄与する加工技術として早期の確立を目指したい。



(1) 2回屈折穴 (2) U字形状穴
図10 工作物振動による穴加工の再開

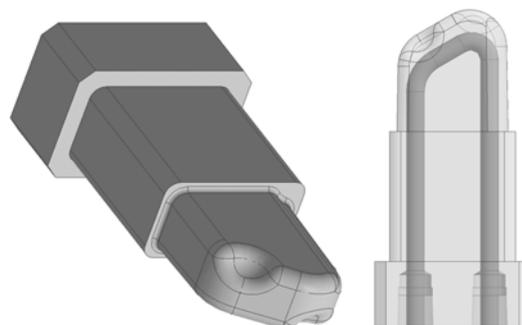
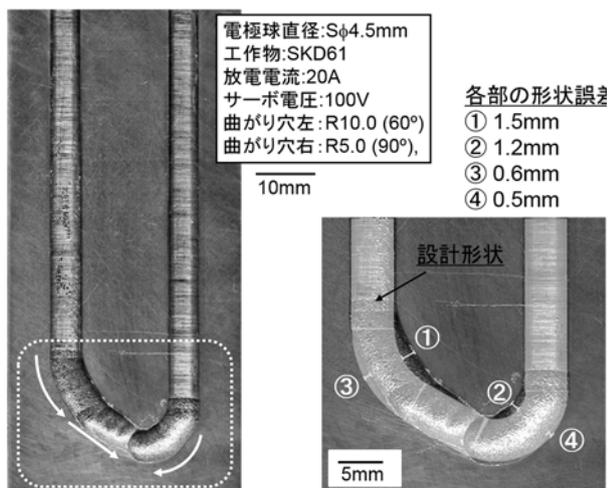


図11 金型（コア）の冷却水路例



(1) 加工穴断面写真 (2) 形状誤差

図12 冷却水路模擬形状加工結果

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 山口 篤, 太田 浩平, 李 碩勳, 岡田 晃	4. 巻 85
2. 論文標題 つり下げ電極を用いた放電加工による曲がり穴加工法の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 359 ~ 364
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2493/jjspe.85.359	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 Okada A., Yamaguchi A., Ota K.	4. 巻 66
2. 論文標題 Improvement of curved hole EDM drilling performance using suspended ball electrode by workpiece vibration	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 CIRP Annals -Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 189-192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.125	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6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 太田浩平, 李碩勳, 岡田晃, 山口篤
2. 発表標題 実用金属材料の曲がり穴放電加工における工作物振動の効果と加工穴小径化
3. 学会等名 日本機械学会第12回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kohei Ota, Shuoxun Li, Akira Okada, Yasuhiro Okamoto, Atsushi Yamaguchi
2. 発表標題 Fundamental Study on Curved Hole by EDM Drilling Using a Suspended Ball Electrode into Practical Materials
3. 学会等名 2018 International Conference on Machining, Materials and Mechanical Technologies (IC3MT 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山口篤, 太田浩平, 李 碩勛, 岡田 晃
2. 発表標題 つり下げ電極によるチタン合金の放電加工特性と曲がり穴加工
3. 学会等名 2018年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡田 晃
2. 発表標題 非固定電極を用いた放電加工による曲がり穴の創成
3. 学会等名 日本金属プレス工業協会第2回ホットスタンピング研究部会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Li Shouxun, 因幡勇汰, 岡田晃, 山口篤
2. 発表標題 放電加工による3次元空間形状の創成に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本機械学会第13回生産工学工作機械部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口篤, 浜田和也, Li Shouxun, 因幡勇汰, 岡田晃
2. 発表標題 つり下げ電極を用いた曲がり穴放電加工法における形状自由度の拡大
3. 学会等名 日本機械学会第13回生産工学工作機械部門講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 武沢英樹, ほか共著	4. 発行年 2017年
2. 出版社 日刊工業新聞社	5. 総ページ数 96
3. 書名 放電加工技術の最前線	

〔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
研究 分担者	山口 篤 (Yamaguchi Atsushi) (90470244)	兵庫県立工業技術センター・その他部局等・主任研究員 (84510)	