

非固定電極を用いた放電加工による 金型冷却液曲がり穴流路の革新的加工法の開発

岡山大学 大学院自然科学研究科

教授 岡田 晃

(平成 29 年度 重点研究開発助成 B AF-2017002)

キーワード：放電加工，曲がり穴，金型

1. 研究の目的と背景

射出成形金型等において、金型冷却時間の短縮は成形サイクルを短縮し、結果的に生産性向上をもたらす。そのために金型内に設けられる冷却穴は、流体や熱の効率的移動の観点から考慮すると、流動抵抗を低減でき、かつ金型表面温度の均一な分布を可能にする、金型の成型品形状に沿った曲がり穴が理想的である。金型のみならず、様々な放熱・冷却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も貢献できるブレークスルーとなり得る。しかしながら、従来の機械的除去技術では金属塊材に対しての小径曲がり穴の高精度加工は困難である。従って、図1に示すように、従来はドリル加工による直線穴を組み合わせることで冷却穴を構成し、不要な部分を塞いで冷却流路を作成している。

近年、その技術発展が目覚ましいアディティブマニュファクチャリングにおいては、金属粉末をレーザや電子ビームを用いて焼結させる粉末床溶融結合法が実用化されており、ヨーロッパでは、ニッケル基合金製のジェットエンジンのタービンブレードやチタン合金製人工関節コンポーネントに応用されている。エンドミルによる切削加工と組み合わせて金型を作成する複合加工法も提案され、わが国の工作機械メーカーでも切りくず低減による材料節約を主目的とし、普及しつつある。しかしながら、塊材からの削り出しと比較すると金型強度が完全ではなく、サポート無しで造形できる穴径には制限がある。また、冷却穴内面の表面性状や脱落粉末の冷却液への混入などの課題も残っている。さらにその造形加工時間は長時間に及ぶ。

一方、放電加工や電解加工等では、従来の切削や研削などの機械加工と異なり、工具（電極）と工作物は非接触で工具に作用する加工力は極めて小さいため、原理的には工具を強固に固定しなくても加工可能である。曲がり穴加工

では穴入口から加工点までが湾曲し、その形状に合わせ工具が柔軟に変形することが必要であるが、工具に作用する加工力が小さければそれが可能となる。このような観点からこれまで放電加工や電解加工を利用した曲がり穴加工法が提案されている。

石田ら¹⁾はワイヤとコイルバネから構成される屈曲電極支持構造を提案し²⁾、それを用いた曲がり穴加工を報告している。また、深穴加工のために加工穴内部を走行する電極送り機構を提案している。竹内ら³⁾はある曲率半径をもった形状記憶合金をガイドから押し出すことによって設定した曲がり穴を加工する方法を検討している。さらに、内山ら⁴⁾はフレキシブルチューブで支持された電極球を用いて、電解加工による曲がり穴を実現している。しかしながら、これらの方法では、構造が複雑なために、加工できる穴径が10mm以上と大きく、曲がり穴の曲率半径が大きい、加工穴径が深さ方向で不均一など、複雑な曲がり穴を精度よく加工することは困難である。

そこで、我々は極めて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2に示すような柔軟に変形する箔でつり下げられた非固定の直径数mmの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している^{5),6)}。近年の放電加工における加工技術や極間コントロールの高応答化の進展は目覚ましく、それを駆使し様々な従来にない加工形状を実現できる可能性がある。同時に設計の自由度も格段に高くなり、従来にない高機能の機械要素を実現できると期待される。

本研究では非固定電極を用いた曲がり穴加工技術の性

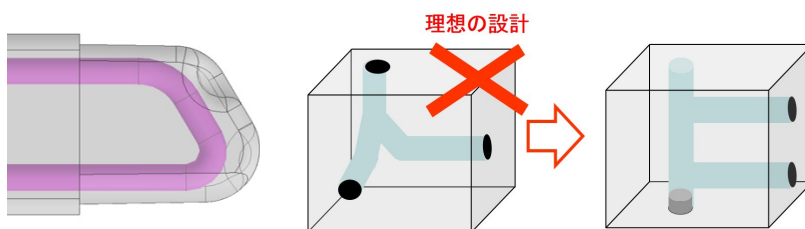


図1 コア金型理想冷却流路形状と従来加工

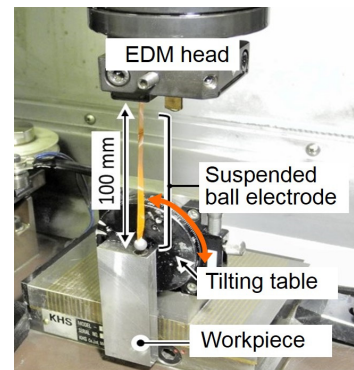


図2 非固定のつり下げ電極

能向上のため、鉄鋼系金型材料やアルミニウム合金に対する加工状態の安定化と深穴加工の実現、加工形状の機上で計測法、および小径穴加工における加工特性の解明と加工の安定化についての検討を行った。

2. 非固定つり下げ電極による曲がり穴加工法の原理

図3に非固定のつり下げ電極を用いた曲がり穴放電加工法の原理を示す⁵⁾。この方法では、薄い絶縁膜で被覆された筒でつり下げた電極球を用いる。加工機の主軸(Z軸)を下降させることで、電極球は常に重力方向へ加工を進める。電極球が角度を変化させたい位置へ到達した際、工作物を所定の角度に傾ける。つり下げ部が十分に柔軟であれば、その位置から重力方向へ加工が進行する。これらの制御を必要な角度、回数設定することによって、所望の形状の曲がり穴を得ることができる。

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)を使用した。放電加工はNC形彫り放電加工機(Sodick製, AP1L/AQ35LR)を使用した。使用した主な加工条件を表1に示す。電極消耗を極力低減するためパルス幅は400 μ sと長く設定している。加工機主軸の制御はZ軸方向のみで、電極のジャンプ動作は行っていない。

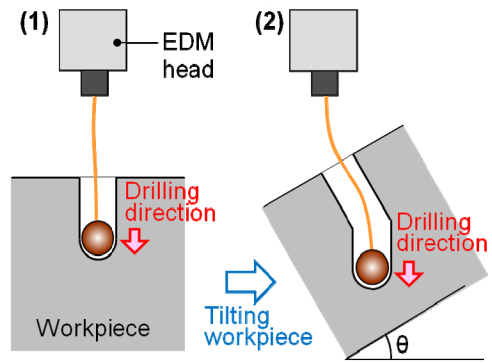


図3 曲がり穴放電加工の原理

表1 放電穴加工条件

Electrode polarity	(+)
Open circuit voltage (V)	120
Discharge current i_e (A)	12 - 36
Servo voltage S_v (V)	40 - 110
Pulse duration t_e (μ s)	400
Duty factor τ (%)	50

3. 亜鉛合金に対する曲がり穴加工

これまでに本加工法によって、その融点の低さから放電加工性の良好な亜鉛合金に対し基礎検討を行ってきた。得られた曲がり穴加工例を図4に示す。左の加工例は深さ30mm、直径約6.0mm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、右の例では、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。10mmの直線穴加工の後に曲率半径5.7mm角度60度の屈曲穴を加工し、次に10mmの傾斜した直線穴加工を行う。その後、曲率半径17.2mmの屈曲穴を加工、さらに直線加工となっている。設定形状を中心線で示すとおり、十分な形状精度で複雑な曲がり穴が加工できる。

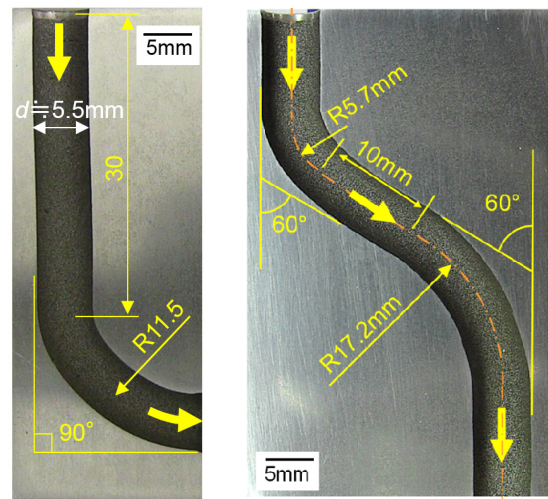


図4 亜鉛合金に対する曲がり穴放電加工例

4. 工作物振動による加工安定化と実用金属への加工

これまで放電加工特性の良好な亜鉛合金に対して基礎検討を行ったが、鉄鋼やアルミニウム合金などでは、極間が狭いため加工粉滞留に起因する短絡によって加工継続が不可能となる。基礎検討⁷⁾で加工中工作物に振動を付与することで短絡を防止し加工不能状態が解消できることを把握しており、これを利用して安定加工状態の継続性と穴加工再開を検討した。

図5に用いた振動付与装置を示す。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、

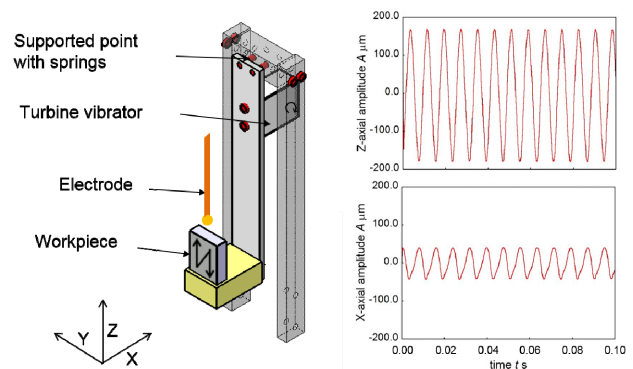


図5 振動付与装置と工作物振動波形

そ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。Z方向とX方向の工作物振動波形を示すが、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。

図6は、アルミニウム合金に直線穴加工を行った時の工作物振動の有無による加工進展の違いを示す。振動なしの場合、加工機ヘッドが頻繁に上昇を繰り返し加工が安定していない様子が伺える。これは電極球が加工穴内面と加工粉を介して接触し、放電が発生しない状態となり加工機が極間距離を広くする制御を行っているためである。そして加工深さ約16mmでアークして加工が停止した。これに対し、振動ありの場合、加工機ヘッドの上昇はなく、安定した加工が継続的に行っている。そして、振動なしの場合に比べ2倍程度の加工速度が得られる。振動付与により加工粉などの排出が促進されただけでなく^{8),9)}、電極球と加工穴内面の長時間の接触を防ぐことができたためと考える。

合金工具鋼に対しても同様に工作物振動付与により安定した穴加工が可能となった。しかしながら、本加工法では加工粉を排出するための電極ジャンプ動作を使用することが出来ないため、より深穴になると加工が停止する可能性が大いにある。もし、加工穴途中からの加工再開が工作物振動付与によって可能となれば実用上非常に有効であると考えられる。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7に示す赤線は、工作物振動を行いながらアルミニウム合金に対して、工作物表面から通常加工を行った場合の加工推移を示す。そして、深さ5mmの加工後にその加工穴底と電極球を接触させて加工再開した場合を青線で示す。工作物振動なしでは多少ギャップを開けても加工は再開できない。これに対し、工作物振動を付与した場合、加工再開が可能であり、かつ通常加工と同じ速度で加工できている。従って、工作物加振により容易に加工再開でき、安定した加工が継続できることが判明した。前述のように本加工法では、電極のジャンプ動作を行えないために加工深さが深くなると加工粉の排出が困難だが、たとえ加工が途中で停止した場合でも本手法を用いれば加工粉を排出した後に加工をそこから再開できるため、より深い曲がり穴加工が可能となる。

5. 工作物振動下での放電加工特性

放電電流値、および極間距離を制御するサーボ基準電圧を変化させ、非固定つり下げ電極を用いた工作物振動による穴加工の可否や、加工速度と加工穴径の変化について検討した⁸⁾。図8は、工作物をSKD11とし、振幅134ミクロンでの工作物振動の下での放電穴加工が可能であった加工条件を示す。図より電流値が大きいほど、またサーボ基準電圧が高いほど加工可能条件が拡大することが分かる。これは、放電電流値が高いほど電極と加工面との距離であるクリアランスが広がること、またサーボ基準電圧が高いほど加工中の極間距離が広がることによるものと言える。本加工法では加工中に電極が放電衝撃によって揺れ動くため、ある程度のクリアランスを設けたほうが短絡を

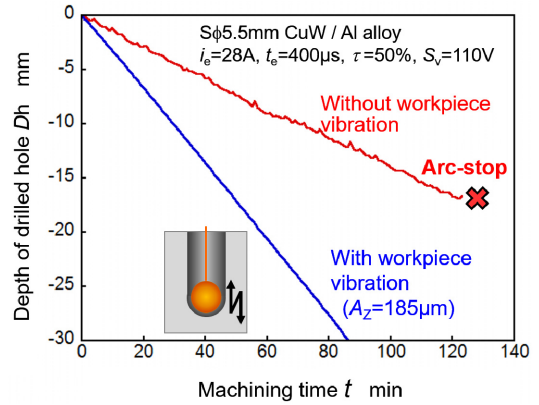


図6 工作物振動の有無による加工進展の違い

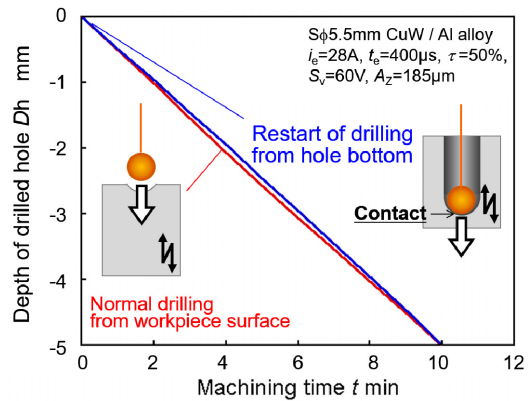


図7 工作物振動付与による加工再開

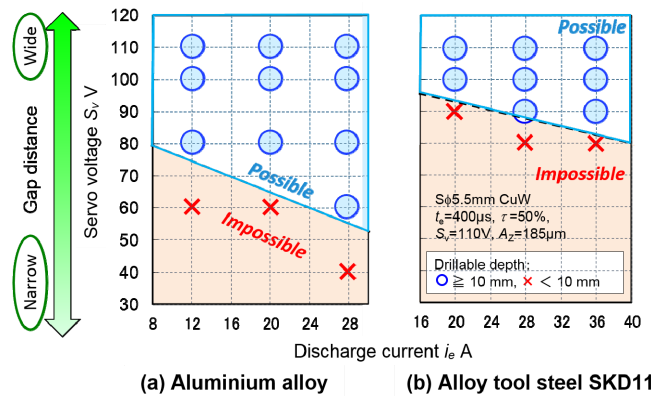
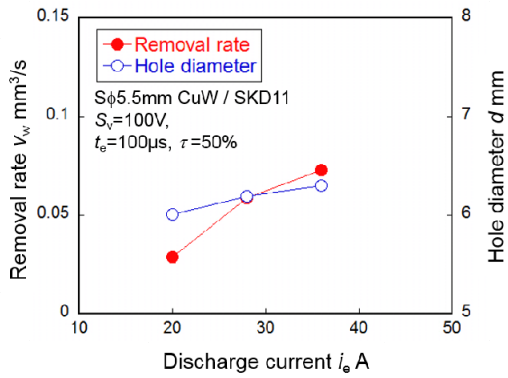


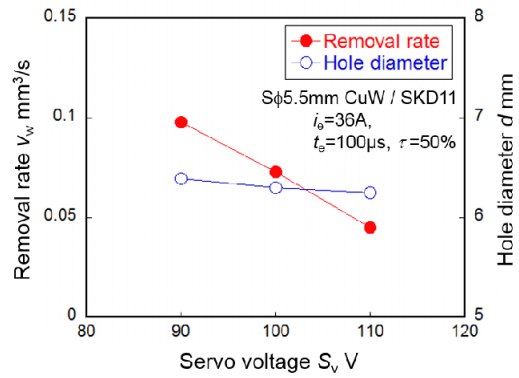
図8 放電加工可能条件

防止でき安定した加工状態での加工が可能になるものと考えられる。

また、図9には、工作物振動の下で電流値およびサーボ電圧を変化させた場合の加工速度 V_w 、および加工穴直径 d の変化を示す。一般の固定電極を用いた放電加工と同様に、電流値が大きいほど加工速度および加工穴径が増加することが分かる。一方、サーボ電圧を変化させた場合、サーボ電圧が大きいほど加工速度が低下することは一般の放電加工特性と同様であるが、加工穴径は一般的加工特性と異なりサーボ電圧が大きいほど小さくなっている。これはサーボ基準電圧が小さいと放電開始距離が小さくなることによって同じ放電パルス条件であっても非固定電極に



(a) 放電電流値の影響



(b) サーボ電圧の影響

図9 放電電流値およびサーボ電圧が加工速度および加工穴径に及ぼす影響

作用する力が大きくなり、電極の揺れが大きくなることで結果的に加工穴径が大きくなるものと考えられる。

次に、金型鋼に対して工作物振動振幅 A_z を変化させた場合の加工速度、および加工穴径変化についても検討した。図10は、工作物振動振幅を変化させた場合の穴加工速度 V_w 、および加工穴径 d の変化を示す。振動振幅が大きいほど穴径は当然大きくなるが、その変化量は振動振幅 A_z に対してかなり小さい。従って、工作物に数百マイクロンの振動振幅を与えるだけで金型鋼、および超硬合金に対する安定した加工が可能となるが、振動振幅ほど穴径は拡大しないことが明らかとなった。

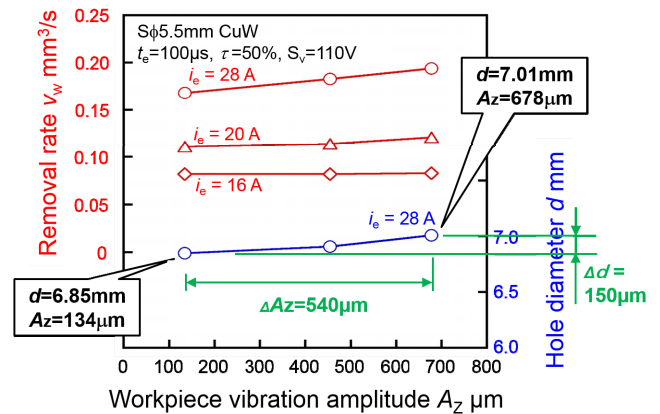


図10 工作物振動振幅が穴加工特性に及ぼす影響

6. 実用金属への複雑な曲がり穴加工

各実用材料に対して様々な曲がり穴加工を試みた。図11に合金工具鋼に対して屈曲穴加工を試みた工作物の断面写真を示す。それぞれの写真下に工作物の最終傾斜角と加工の際の回転比を示しており、左の場合であれば、直線加工を1.0mm行うごとに工作物を10°傾ける操作を3回行うことを表す。図より、60°までの屈曲穴形状が正確に得られていることが分かる。アルミニウム合金に対しても同様の加工が可能であった。

次に、複雑な曲がり穴を加工した例を図12に示す。左の写真は45°の屈折加工後に直線加工を行い、その後屈折方向を反対にして45°の屈折加工を試みた屈折形状が連続する曲がり穴の加工である。2つの屈折形状が正確に得られていることが分かる。また、45°の屈折加工が連続して行っているためさらに複雑な形状の曲がり穴加工が期待できる。また、右の写真は2方向から90°の屈曲加工を行うことで、U字の形状を加工した結果である。このように、工作物に微振動を付与しながら加工することで、これまで安定した加工状態での加工が困難であった、金型鋼やアルミニウム合金に対しても精度よく曲がり穴加工が可能となった。

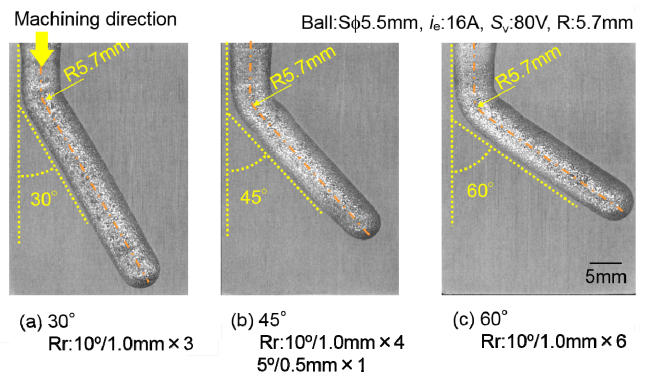
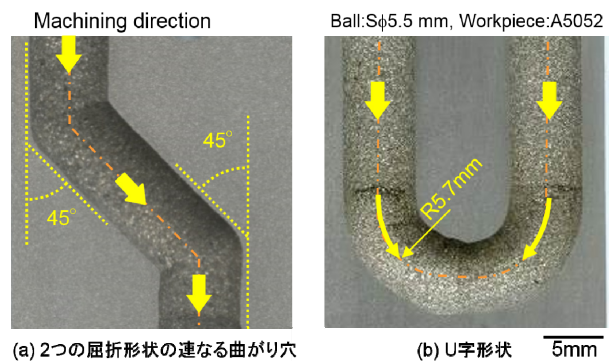


図11 合金工具鋼に対する屈曲穴加工

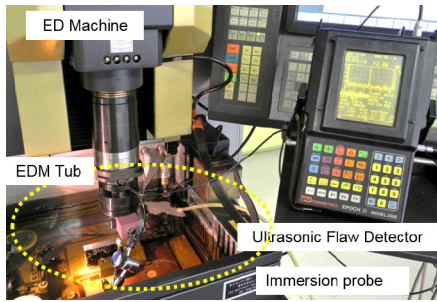


(a) 2つの屈折形状の連なる曲がり穴 (b) U字形状 5mm

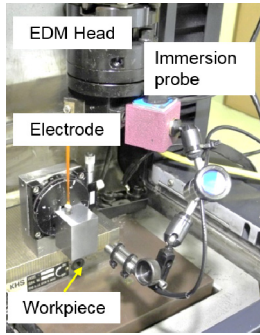
7. 加工穴形状の机上測定法の検討

加工穴が長くなると、加工中の電極箔つり下げ部

図12 アルミニウム合金に対する複雑曲がり穴加工



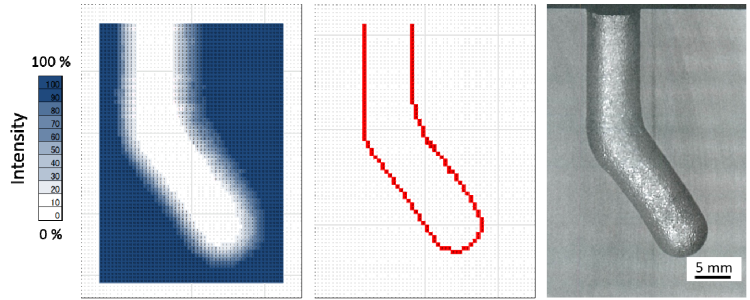
(a) 機上設置超音波探傷ユニット



(b) 耐液プローブ部

図13 超音波探傷を応用した機上加工形状計測

のたわみ等に起因して電極の送り量と実際の穴加工長さの誤差が大きくなり、設定値どおりの形状が得られにくく、形状精度が悪化する。加工形状が加工中に外部より計測できれば形状精度の向上につながる。そこで機上での加工途中での計測を可能とするため、図13に示すような超音波探傷法を応用した、加工形状の評価法を検討した。この装置では、工作物前面を0.5mm間隔でスキャンしながら、工作物背面での反射波の強度分布を計測して獲得する。その測定結果を図14に示す。左に工作物背面からの強度分布を色相で示す。反射波強度が高い部分は濃い色相となっており、内部に穴が存在する場合は工作物背面からの反射波がほとんどないため、色相が薄くなる。ここで強度20%の位置のみ抽出すると赤のドットが集めた輪郭形状となる。右に加工後に工作物



(a) Intensity mapping of reflected wave from back wall

(b) Cross sectional view of bended hole

図14 工作物背面からの反射波強度マップ、20%強度抽出ライン、実際の加工穴計測

を切断し撮影した曲がり穴形状を示している。両者を比較したところ、スキャン間隔の0.5mmの精度で両者が一致していた。従って超音波探傷法を活用して工作物背面からの反射波強度分布を調べることで、加工途中の曲がり穴形状を加工機上で精度よく計測できることが明らかとなった。プローブの走査計測間隔をさらに短くすることで精度向上も期待できる。

8. 加工穴小径化の検討

これまで主に直径5mm程度以上の曲がり穴加工を検討してきた。近年の工業製品の小型化・軽量化、電子機器や光学機器部品の需要が高まる中で金型も小型化しており、その冷却流路も直径数mmの場合もある。そこで、加工穴の小径化についても検討を行った。

図15は、直径 $d_e=2.0\text{mm}$, 3.0mm , 4.0mm , 5.0mm のつり下げ電極球を用いてアルミニウム合金に対して直線穴加工を行った際の、加工可否に大きく影響する放電電流およびサーボ電圧を変化させた場合の加工可能条件範囲を示している。加工の際には工作物に振幅約 $185\mu\text{m}$ の振動を付与している。図の○で示した条件は深さ10mm以上の穴加工が可能な条件、●は深さ10mm以上の穴加工が可能だが、加工が不安定で箔が撓んだ状態で加工される条件、

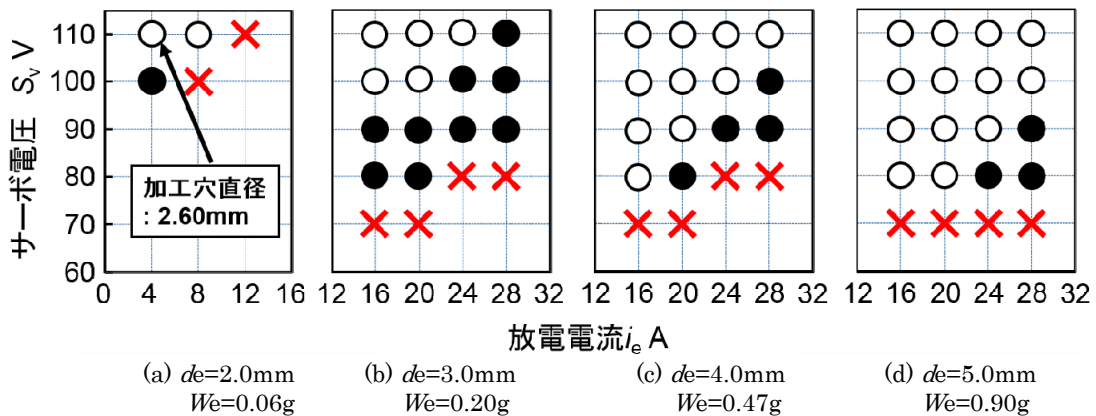


図15 電極球直径、サーボ基準電圧、および放電電流値による加工可能範囲の変化

×は深さ10mmの穴加工が不可能な条件である。図よりいずれの直径の電極球を用いた場合でも、高いサーボ電圧では広い極間距離でアークが生じにくいために安定した加工状態が継続でき、加工可能範囲が広がることがわかる。一方、放電電流値の変化に対しては、放電電流値の増加に伴って放電反力が大きくなって、非固定の電極球が過度に揺れ動くために頻りに短絡が発生するようになる。このため、電流値が大きいほど加工状態が不安定となる傾向が見て取れる。さらに電極球直径の影響については、電極球直径が小さくなるほど、すなわち電極球質量が小さくなるほど、放電反力に対する電極球の揺れが極端に大きくなるために、頻りに短絡に伴う加工状態の不安定が助長され、加工不可能な加工条件が顕著に多くなる。従って小径電極球を用いて小径穴加工を安定した放電状態で実現するためには、放電電流値を小さく、またサーボ電圧の大きい条件を用いることで加工可能となる。例えば、電極球直径2.0mmでは、工作物に振動を与えながら、放電電流値4A、サーボ電圧110Vの加工条件によって、これまで不可能であった加工穴径2.6mmという3mm以下の小径穴の加工も可能となった。

9. まとめ

本研究では、非固定のつり下げ電極を用いた曲がり穴加工技術の性能向上のため、鉄鋼系金型材料やアルミニウム合金に対する加工状態の安定化、加工形状の機上での計測法、および加工穴小径化についての検討を行った。本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 非固定のつり下げ電極を用いた放電穴加工によって、放電加工性能の良好な亜鉛合金に対して様々な小径曲がり穴加工を創成できる。
- (2) アルミニウム合金や金型鋼に対して微振動を付与することによって、継続的に安定した放電穴加工が可能となり、加工速度も向上する。
- (3) 工作物微振動付与によって既に加工した穴底面からの加工再開が安定して行え、深い穴加工が可能となる。
- (4) 非固定のつり下げ電極を用いた放電加工によって、工作物に微振動を付与することで、実用金属に対して複雑な曲がり穴加工が可能となる。
- (5) 超音波探傷法を活用して工作物背面からの反射波強度分布を調べることで、加工途中の曲がり穴形状を加工機上で高精度に計測できる。
- (6) 電極球径の減少に伴い、安定した加工状態を得られにくくなる傾向があるが、最適加工条件下では直径3mm以下の小径穴加工も可能となる。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団平成29年度重点研究開発助成B(AF-2017002)のもとで実施されました。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 石田 徹, 竹内芳美: 圧縮コイルばねとワイヤを用いた曲がり穴放電加工用電極送り機構の開発, 精密工学会誌, **65** (7), (1999) pp.982-986.
- 2) 石田 徹, 竹内芳美: スライダクランク連鎖を用いた曲がり穴放電加工用電極送り機構の開発, 精密工学会誌, **68** (2), (2002) pp.206-210.
- 3) 竹内明伸, 幸地正信, 湯沢 隆: 曲がり穴形状の放電加工技術の開発, 型技術者会議講演論文集, (2001) pp.222-223.
- 4) 内山光夫, 芝崎禎四郎: 電解加工による曲がり穴加工法の開発(第1報)ーアークチューエータを持たない工具による加工法ー, 精密工学会誌, **68** (11), (2002) pp.1476-1480.
- 5) 山口 篤, 岡田 晃, 三宅達也: 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ーつり下げ構造の最適化と複雑曲がり穴加工の可能性ー, 精密工学会誌, **81** (5), (2015) pp.435-439.
- 6) 山口 篤, 岡田 晃, 池嶋俊貴, 三宅達也: 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ー小径曲がり穴加工のための電極球質量および直径の検討ー, 精密工学会誌, **81** (11), (2015) pp.1039-1043.
- 7) 三宅達也, 池嶋俊貴, 岡田 晃, 山口 篤, つり下げ電極を用いた曲がり穴放電加工における工作物振動付与の影響, 電気加工学会全国大会講演論文集, (2017) pp.81-84.
- 8) A. Okada, A. Yamaguchi, K. Ota: Improvement of curved hole EDM drilling performance using suspended ball electrode by workpiece vibration, CIRP Annals - Manufacturing Technology, **66** (1), (2017) pp.189-192.
- 9) D.Kremer, J. L. Lebrun, B. Hosari, A. Moisan: Effects of Ultrasonic Vibrations of the Performances in EDM, CIRP Annals - Manufacturing Technology, **38**(1), (1989) pp.199-202.
- 10) 小川 仁, 坂東和宏, 常本佳生: 放電加工における加工液超音波振動援用の効果, 電気加工学会誌, **41** (98), (2007) pp.163-168.