つり下げ電極を用いた曲がり穴放電加工*

Curved Hole Electrical Discharge Machining Using Suspended Ball Electrode

山口 篤** 岡田 晃***
Atsushi YAMAGUCHI and Akira OKADA

Key words electrical discharge machining, curved-hole, suspended ball electrode

1. はじめに

曲がり穴は流体移動のための理想的な流路形状とされている。また、直線穴の組み合わせで不可能な位置への部品の組み込み、センサの取り付け、熱伝導経路などに利用でき、金属製品の高機能化に大きく寄与する可能性を有している。この曲がり穴を有する金属部品は、中子を用いた铸造法や積層造形法などで作製が可能であるが、除去加工法では、加工した曲がり穴に沿って工具を送る必要があるため、工具に加工力の作用する機械加工法ではほぼ不可能である。一方、工具にほとんど加工力の作用しない電気加工はその可能性を有しており、種々の工夫が試みられている。代表的な試みとして、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用いた放電加工による方法¹⁾、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方法²⁾、フレキシブルチューブで支持された金属球を電極として加工液の噴出方向を制御する電解加工法³⁾などが提案

されている。しかし、電極の制御機構が複雑、加工できる曲率が限られている、角度精度が低いなどの課題を残している。

筆者らは、簡便な方法で形状精度のよい曲がり穴加工を実現することを目的として、汎用の放電加工機と図1(a)に示すような電極球を導線でつり下げた電極（以降、つり下げ電極）を用いる方法を提案している⁴⁾。この方法はまず、加工機の主軸（Z軸）を下降させて重力方向へ直線穴加工を行う。次に、電極球が角度を変化させたい位置へ到達した際、図1(b)のように工作物を所定の角度（ θ ）に傾ける。導線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、回数を設定することによって、所望の曲がり穴を得ることができ得る。

本方法による曲がり穴加工では、電極球を重力方向（鉛直下向き）に進めることが必要であるため、導線が十分に柔軟でなければならない。それゆえ、電極球は振り子のように揺れ動く構造になる。一般的な放電加工では剛性のある電極が使用されるため、つり下げ電極のような低剛性の電極を用いた研究は報告されていない。そのため、工作物の傾斜による曲がり穴加工法を開発するには、まず、つり下げ電極の放電加工特性を解明しなければならない。

筆者らはこれまで、導線種類の検討⁵⁾、電極球直径の検討⁶⁾を通じて、主として亜鉛合金の工作物に対する加工特性を解明するとともに、曲がり穴加工の可能性を検討してきた。つり下げ電極の構造と加工条件を最適化することによって、直径が約4 mm以下で、屈折角度が45°の小径曲がり穴が角度精度よく加工できることを示した。

本稿は、つり下げ電極による曲がり穴加工のうち、実用金属材料として広く使用されている合金工具鋼とアルミニウム合金への曲がり穴放電加工の研究を紹介する。まず、つり下げ電極を用いた放電加工の特徴を理解するために、直線穴加工における丸棒電極との比較実験結果を示す。次に、工作物を傾斜させることによる曲がり穴加工について解説する。

図1 つり下げ電極による曲がり穴の加工手順

*原稿受付 平成27年8月18日

**正会員 兵庫県立工業技術センター生産技術部 金属・加工グループ（兵庫県神戸市須磨区行平町3-1-12）

***正会員 岡山大学大学院自然科学研究科（岡山県岡山市北区津島中3-1-1）

図2 つり下げ電極と丸棒電極の外観

図3 加工時間と主軸の変位の関係

表1 放電加工条件

電極極性	(+)
無負荷電圧, u_i/V	120
電流ピーク値, i_e/A	28
サーボ基準電圧, S_v/V	40~100
デューティーファクター, $\tau/\%$	50
加工時間, $t_c/\mu s$	400
電極ジャンプ	つり下げ電極
動作	丸棒電極, t_j/ms , t_{rm}/ms , $J_s/m \cdot min^{-1}$
	20, 20, 10

2. つり下げ電極と放電加工条件

つり下げ電極による放電加工では電極球を重力方向に進める必要があるため、電極球の質量は大きい方が望ましい。そこで材質には比重が大きく、耐熱性の高いCuW合金(30Cu-70mass%W)を用いた。導線は、柔軟性に優れ、放電に必要な電流を許容できる銅箔が有用である。本実験では、Sφ7.0mmのCuW球を厚さ30μm、幅5.0mmの銅箔を銀ろうで接合し、つり下げ電極とした。比較実験用の丸棒電極は、先端を半球形状に加工したφ7.0mmのCuW丸棒を用いた。それらの外観を図2に示す。曲がり穴の加工実験では、銅箔と工作物との短絡を防ぐ必要がある。そこで、柔軟性を低下させず、かつ絶縁性を確保するために、銅箔の両面に絶縁フィルムを張り付けた。工作物には合金工具鋼(JIS SKD11)およびアルミニウム合金(JIS A5052)を用いた。加工を開始する部分に深さ3mm程度の下穴加工を施した。これは、加工開始時に電極球が弾かれなくするためのためである。

放電加工はNC形彫り放電加工機(Sodick社製, AP1L)を使用した。主要な加工条件を表1に示す。直線穴加工実験では深さ10mmの加工を行い、加工速度は除去体積を10mmの加工に要した時間で除して算出した。加工穴直径(d)は、深さ5mmの位置の直径を計測した。つり下げ電極を用いた実験では電極のジャンプ動作は停止し、丸棒電極を用いた実験では、ジャンプ動作(t_j :

図4 サーボ基準電圧(S_v)と加工特性(工作物:SKD11)

ジャンプ時間, t_{rm} : 実加工時間, J_s : ジャンプ速度)の有無について調べた。

3. つり下げ電極の直線穴放電加工特性

図3に、つり下げ電極と丸棒電極を用いて直線穴加工を行った場合の加工時間と加工機主軸の変位の関係を示す。ジャンプ動作なしの丸棒電極(Δ)は、加工深さが浅い場合は他の電極よりも加工速度が速いが、深くなるにつれて速度が低下した。これは、加工深さが深くなるにつれて加工屑と気泡の排出が滞り、放電が不安定になるためと考える。一方、つり下げ電極($\bigcirc$)は加工深さに関係なく、一定の速度で加工が進み、丸棒電極よりも早い加工速度が得られている。

つり下げ電極を用いた放電加工では、電極球と工作物の極間距離(サーボ基準電圧(S_v))が加工特性に大きく影響を及ぼすことが分かっている。そこで、電流ピーク値を一定($i_e=28A$)として、 S_v を変化させた場合の加工速度(V_w)と加工穴の直径(d)を調べた。図4にSKD11に対する実験結果を示す。

図5 サーボ基準電圧 (S_v) と加工特性 (工作物: A5052)

ジャンプ動作を行った丸棒電極 (○) は、ジャンプ動作なし (△) と比べて、 $S_v = 60 \sim 80$ V の範囲で加工速度が速かった。これは、ジャンプ動作によって加工屑および気泡の排出が促されたためと考える。 $S_v = 50$ V 以下は加工速度が低下するのは極間が狭くなりすぎるため、ジャンプ動作の設定に依存するものであり、一般的な型彫り放電加工の特性である。一方、つかり下げ電極 (○) を用いた場合は、いずれの S_v で放電加工が可能であり、ほとんど全ての S_v で丸棒電極よりも高い加工速度が得られていることが分かる。ジャンプ動作なし (△) の加工速度が低いことも分かるように、一般的な型彫り放電加工では、ジャンプ動作なしでは放電が安定しない。しかし、つかり下げ電極はジャンプ動作を行わずとも、電極球が放電反力によって揺れ動くことで加工屑と気泡をある程度排出するため、放電が持続したと考える。また、つかり下げ電極による加工速度がジャンプ動作ありの丸棒電極よりも速い理由は、ジャンプ動作による無加工時間がないためである。 $S_v = 50$ V 以下の場合の加工速度は、丸棒電極の場合との差が小さくなった。これは、極間が狭いことによって放電反力および気泡の浮力によって電極球が大きく揺れ動き、放電が不安定になったためと考える。SKD11 に対する電極消耗率 ($V = V_E/V_W$) は、つかり下げ電極の $S_v = 60$ V から 80 V の範囲で 0.3% から 0.5% の消耗が生じたが、それ以外の条件および丸棒電極は全て 0.1% 以下であった。消耗が生じる条件では、連続して放電することにより電極球の温度が上昇したためと考える。

図5にA5052に対する結果を示す。つかり下げ電極はA5052に対しても広い S_v 範囲で放電加工が可能である。一般的な型彫り放電加工と同様にSKD11の場合よりも加工速度は速く、穴径は大きかった。A5052に対する電極消耗率 (V) は、つかり下げ電極および丸棒電極の全ての条件で 0.1% 未満であった。SKD11への加工よりも極間が広いために、電極球の温度上昇が抑制されたためと考える。

以上の直線穴加工実験を通じて、つかり下げ電極は両材料

図6 曲がり穴加工のための電極、工作物、治具配置

に対する放電加工が可能であり、条件によっては丸棒電極よりも高速加工が可能である。

4. つり下げ電極による単純形状の屈折穴加工

つかり下げ電極を用いて安定した放電加工が可能であることが分かったため、直線穴加工実験で得られた加工条件を元に屈折穴加工を行った。図6に曲がり穴加工に使用する治具を示す。本実験では、図のように加工開始位置 (下穴の位置) と工作物の回転中心を一致させた。20 mm の直線穴加工を行った後に、加工最中に回転ステージを傾斜させた。傾斜動作は、加工機主軸 (Z 軸) が X mm 降下するごとに Y° 傾斜させる動作を目的の角度 ($\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$) まで繰り返した。この動作を傾斜比 (T_r , Tilting ratio) と称し、Y°/X mm と表記する。

図7にSKD11およびA5052に対する屈折穴加工の断面写真を示す。図よりいずれの工作物、傾斜角度においてもほぼ目的の屈折角度が得られ、本方法は高い角度精度の屈折穴が加工できることが分かる。SKD11の45°の屈折部は、屈折の内側が多く加工され、穴径が大きくなっている。これは、大きな屈折角度を与えた場合、電極球の側面方向の放電頻度が高くなることによって放電が不安定になり、主軸の極間制御のための上下動作が増えたためである。これを抑制するには、工作物の傾斜角度と加工機主軸の送り量を相関させて制御することで可能であると考えられる。

5. つり下げ電極による応用形状の曲がり穴加工

次に、本加工法のさらなる可能性を検討するため、80 mm (アスペクト比: 10 以上) の工作物に対する曲がり穴加工を試みた。図8に、得られた加工穴のX線透視写真を示す。図中には、工作物に与えた傾斜角度 (θ) を付記している。図8(a)(c)は、直線穴からの1回の傾斜動

図7 工作物を傾斜させて加工した屈折加工穴の断面写真 (傾斜角度：15°、30°、45°)

図8 応用形状曲がり穴のX線透視写真

作を与え、比較的長い距離の直線穴加工を行った例である。図8 (b) は、10°の傾斜動作と直線加工を同じ傾斜方向に3回繰り返した加工である。図8 (b) は、30°傾斜と直線加工の後に、1回目の傾斜とは逆方向に傾斜させた加工である。これらは80 mm以上の深穴であるが、加工が途中で停止することなく、安定して加工することができた。

20°以上の傾斜を与えた場合の屈折部は、やや湾曲したのちに傾斜角度に近づく。これは、工作物の傾斜時に、電極球の側面方向へ一時的に加工が進行するためである。このような深穴曲がり穴において形状精度を高めるには、傾斜比と傾斜角度を詳細に組み合わせることで、電極球の軌跡を制御できると考える。

6. おわりに

つり下げ電極による放電加工法について、実用金属材料として多用されている合金工具鋼およびアルミニウム合金に対する加工特性と曲がり穴加工を紹介した。本方法により曲がり穴を加工するには、つり下げ電極特有の加工特性を理解することが重要である。

曲がり穴は、施工が不可能とされていたために、理想と分かりつつも設計されることがなかった。穴径の多様化、工作物の多様化、形状精度の向上などの高性能化に向けた研究を進める必要があるが、本方法が金属部品の高機能化へ寄与する技術として活用されることを期待したい。

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) 982.
- 2) 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** (2001) 222.
- 3) 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) —アクチュエータを持たない工具による加工法—, 精密工学会誌, **68**, 11 (2002) 1476.
- 4) 山口篤, 岡田晃：つり下げ電極を用いた放電加工による曲がり穴加工の可能性, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, **2013** (2013) 505.
- 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—つり下げ構造の最適化と複雑曲がり穴加工の可能性—, 精密工学会誌, **81**, 5 (2015) 435.
- 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—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—, 精密工学会誌, in press.

山口 篤

2006年兵庫県入庁。県立工業技術センター生産技術部金属・加工グループ主任研究員。金属材料の組織制御、熱処理、加工に関する技術支援および試験産業に従事。岡山大学大学院自然科学研究科産業創成工学専攻博士後期課程在籍中。

岡田 晃

1994年岡山大学大学院工学研究科修士課程修了。博士(工学)。岡山大学教授。現在主に大面積電子ビーム照射による表面仕上げ、ワイヤ放電加工における高性能フラッシング法の開発、および粉末混入放電加工による高機能面創成の研究に従事。