〔科学研究費助成事業（科研費）基盤研究(C)〕

深穴加工にも対応でき、高い形状精度を有する曲がり穴放電加工法の確立

山口篤

1　目的

曲がり穴は、金型の冷却水流路や油空圧流路などで必要とされている。しかし、曲がり穴を加工するには加工途中に工具姿勢が変形する必要があり、ドリルなどの切削法では実現不可能である。一方で放電加工は、工具電極に作用する加工反力が小さいため、曲がり穴加工の可能性を有している。例えば、ばねとワイヤで電極の進行方向を制御する方法が提案[1)]されているが、機構と制御が複雑で、加工可能な曲がり穴形状は限られている。また、電解液の噴流方向を制御する電解加工[2)]が試みられているが、制御性や加工穴径の均一性に問題があり、曲がり穴の曲率もかなり大きい。つまり、穴径・角度・距離を自在かつ正確に加工できる曲がり穴加工法は確立していない。

図 1 はいずれも、直線穴から 30 ° の方向変化を有する曲がり穴である。(a)は直線穴と直線穴が A 点で折れ曲がった形状で屈折穴と呼ぶ。(b)は徐々に方向が変化する形状で屈曲穴と呼ぶ。曲がり穴加工を実用技術として展開するには、これらの形状を正確に加工できる必要がある。

筆者らは、図 2(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）を用いる曲がり穴放電加工法を提案している[3)-6)]。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 2(b)のように工作物を所定の角度（θ_W）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）に進める必要があるため、十分に柔軟な導線を使用する。このため、曲がり穴加工時には図 1(b)に示すように導線と工作物との接触点（P）が発生する。この P を支点として振り子現象が発現するために、電極球の進行方向が鉛直下向きよりもやや右方向となる。屈折穴および屈曲穴の形状を正確に加工するには、つり下げ電極の振り子現象を支配する支点 P の位置を工夫する必要があるものの、これまでは解決できていなかった。

本研究ではこれらの課題を解決し、先述の屈折穴および屈曲穴を形状精度良く加工するための方法として、図 2(c)に示す固定ガイドおよび、図 2(d)に示す移動ガイド（タンデムガイド）を用いた加工法を開発した。本稿ではつり下げ電極の基礎的な加工特性を示すとともに、屈折穴、屈曲穴、深穴曲がり穴の加工結果を示す。

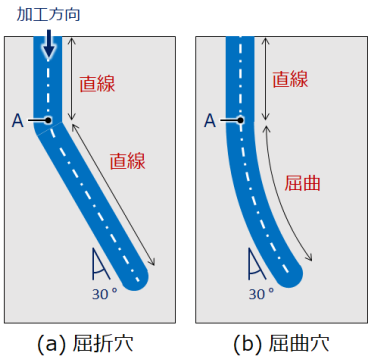


図 1　30 ° の方向変化を有する曲がり穴形状

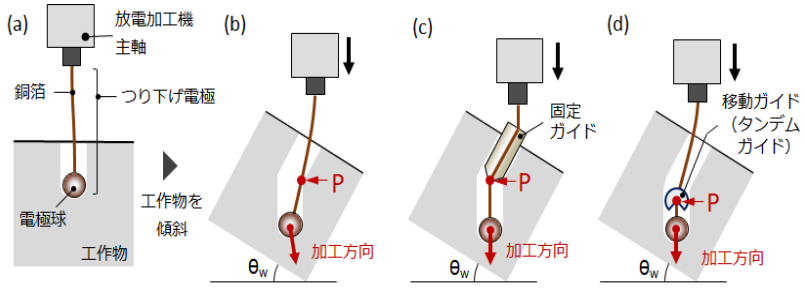


図 2 つり下げ電極による曲がり穴の加工手順
(a)(b)基本的な加工原理，(c)固定ガイドを用いた屈折穴加工，
(d)移動ガイドを用いた屈曲穴加工

2　実験方法

2.1　つり下げ電極と工作物

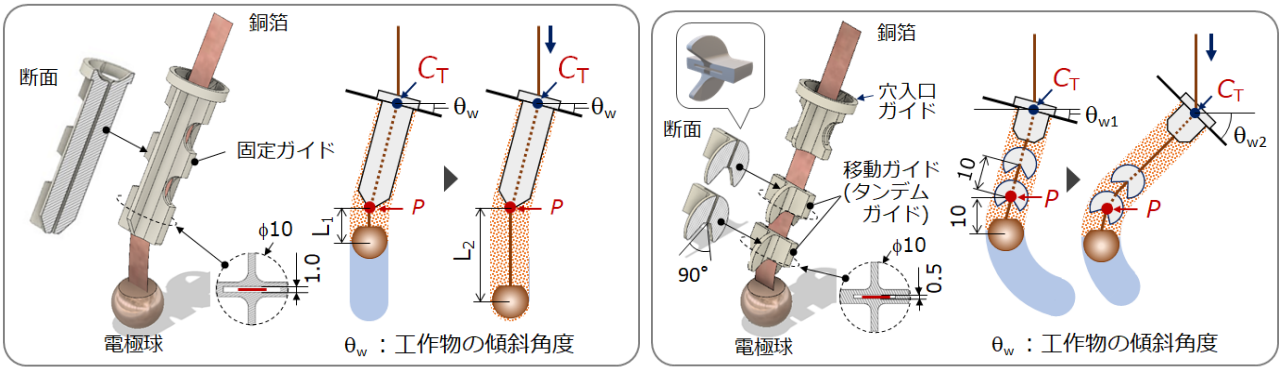
つり下げ電極は、Sϕ10.0 mm の CuW 合金（30 Cu-70 mass%W）球と、厚さ 20 μm、幅 5.0 mm、長さ 100 mm の銅箔を銀ろうで接合する構造である。曲がり穴加工時に銅箔と加工穴内壁が接触する場合は、銅箔の片面に厚さ 35 μm の絶縁フィルムを貼り付けた。

工作物の材質はアルミニウム合金（A5052）および構造用炭素鋼（S50C）であり、加工には NC 形彫り放電加工機（㈱ソディック、AP1L）を使用した。油中加工で、主軸のジャンプ動作は行っていない。曲がり穴の形状観察は、A5052 は X 線透視法を、S50C の場合は超音波探傷法を用いた。

2. 2　固定ガイドと移動ガイド（タンデムガイド）

図 3(a)は屈折穴を加工するための固定ガイドの模式である。直線穴底の屈折位置に電極球を配置し、工作物を所定角度（θ_W）に固定したままで加工機主軸を降下させる。銅箔の屈折点（P）は固定されており、銅箔のみが L_1 から L_2 へ送られる。固定ガイドは、支点位置、銅箔の滑り、加工液流路を阻害しなければ、筒状などでも差し支えない。

図 3(b)は屈曲穴を加工するための移動ガイド（以降、タンデムガイド）の模式図である。直径は約 10 mm、内部に 0.5 mm のスリットを有する形状で、銅箔の柔軟性を妨げないようするため、電極球側は 90 ° の切込みを有している。電極球の中心位置から 10 mm の位置と 20 mm の位置 2 か所に銅箔と接合しているため、電極球との銅箔の屈折点（P）の距離を一定に保ちながら加工が進行する。工作物の傾斜中心（C_T）は加工穴入口位置である。模式図のように工作物の傾斜角度をθ_{W1} からθ_{W2} に変化させても C_T 座標は変化しないようにするため、穴入口ガイドを取り付けている。これらのガイドの材質は紫外線硬化性アクリル樹脂で、樹脂 3D プリンタで作製した。



(a) 固定ガイド　　(b) 移動ガイド（タンデムガイド）

図 3 ガイドの模式図と加工イメージ

3　結果と考察

3.1　つり下げ電極の放電加工特性

つり下げ電極を用いた放電加工法は、工作物の材質と電極球の直径の組み合わせや加工条件によって、加工可否や加工特性が異なる。これは、電極球が放電反力や気泡の浮力などを受けて揺れ動いたり、加工中のギャップが異なるためである。まず、曲がり穴加工に先立って、直線加工における基礎的な加工特性を示す。

図 4(a)は、A5052 の工作物に対して深さ 50 mm の直線穴加工を行った場合の加工進捗である。つ

り下げ電極の特徴を示すために、同径・同材質の丸棒電極を用いた場合を併記している。つり下げ電極を用いた場合は、タンデムガイドの有り（○）、無し（●）に関わらず一定速度で加工が進行し、丸棒電極の場合よりも大幅に高速である。A5052 に対するつり下げ電極の体積加工速度、穴径、電極消耗率はそれぞれ、1.21 $mm^3 \cdot s^{-1}$、0.5 %、10.38 mm であった。加工速度は丸棒電極の場合と比べると、それぞれ約 2.7 倍であり、つり下げ電極の優位性を示す結果である。この理由はジャンプ動作の無加工時間が省略されるため、実加工時間が長いためである。また、つり下げ電極は丸棒電極と比べて加工粉と気泡の排出のための空間が広いため、電極球が振動することによって排出を促す効果も有している。

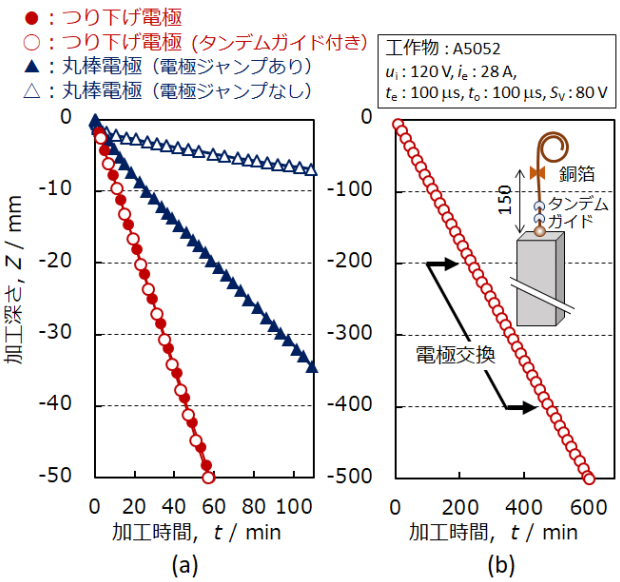


図 4 つり下げ電極の加工進捗
(a)丸棒電極との比較、(b)タンデムガイド付き長尺つり下げ電極による深穴加工

図 4(b)は、長尺のタンデムガイド付きつり下げ電極による深さ 500 mm の直線穴加工を行った場合である。なお本実験では、加工機の主軸ストロークが不足しているため、加工が 100 mm 進むごとに加工機の主軸を上昇（元の位置に戻す）作業を繰り返して加工を行った。途中で電極交換を行っているが、深さ 500 mm の加工においても、ほぼ一定の加工速度で加工が進行しており、深穴加工も適応できることが分かった。

3.2 固定ガイドを用いた屈折穴加工

図 5 は、固定ガイドを用いて加工を行った屈折穴の X 線透視像である。いずれも深さ 30 mm の直線穴底（A 点）で屈折する形状である。この形状を正確に加工するには、固定ガイドの先端を A 点に配置する必要がある。このため、穴底に電極球が収まるスペース（くぼみ）を予め加工しておき、固定ガイドと電極球を配置する。その後、工作物を所定角度（θ_W）に傾斜させたままで固定して、電極球を 60 mm 降下させて加工を行った。X 線透視像から分かるように、θ_W に相応する屈折穴が形成できていることが分かる。特に、(g)(h)は比較的大きな方向変化を伴うが、気泡と加工紛排出のための加工油注入を行うことで 90 ° を超える屈折穴も加工可能である。

3.3 タンデムガイドを用いた屈曲穴加工

図 6 は、タンデムガイドを用いて加工を行った屈曲穴の X 線透視像である。(a)(b)(c)は一定曲率の屈曲穴で、(d)(e)(f)(g)は屈曲の後に直線穴へ曲率が変化する屈曲穴である。いずれも深さ 30 mm の直線穴底（A 点）から工作物の傾斜動作を開始した。目的の形状に応じて、銅箔を 1 mm 送るごとの傾斜増分（$\Delta\theta_W$）を 0.1° ～$\Delta\theta_{W_max}$ の範囲で 0.1° 単位で細かく設定し、最大傾斜角度（θ_{W_max}）に達するまで増大させた。

工作物に傾斜動作を与えた後、電極球は振り子現象によってタンデムガイドの支点位置（P）の直下に向かって進む。基本的に$\Delta\theta_W$ を小さくすると曲率半径は大きく、大きくすると曲率半径が小さな屈曲形状が形成できる。しかし厳密には、タンデムガイドの P 点を支点とした振り子現象が作用する

ため、工作物の傾斜角度（θ_W）と電極の進行方向は一致せず、θ_W よりも曲がりすぎる現象（オーバーカーブ）が発現する。この現象を制御するため、設計形状に合致するような電極軌道を計算で求めておき、工作物に適切な傾斜制御を与えた。この制御を行うことによって、図中破線の設計形状と合致した屈曲穴が加工できる。

前節の直線穴加工の実験では、アルミニウム合金の工作物に対して深さ 500 mm の加工結果を示した。つまり、つり下げ電極は加工距離が長く（深く）なっても、安定した加工状態を維持できる。この特性を活かして、曲がり穴加工への応用を試みた。図 7 は、S50C の工作物に対する深穴屈曲穴の加工結果（超音波探傷像）である。いずれも屈曲穴加工であるため、タンデムガイドを取り付けたつり下げ電極を使用するとともに、工作物の傾斜制御を行った。(a)は深さ 205 mm の直線下穴底から工作物の傾斜を始め、$\Delta\theta_{W_max}$ = 1.0 ° / mm で 15 ° の屈曲を経て約 100 mm の直線加工へ移行する形状である。(b)は深さ 255 mm の下穴底から$\Delta\theta_{W_max}$ = 2.0 ° / mm で 45 ° の屈曲後、直線へ移行する形状である。(c)は深さ 255 mm の下穴底から、一定の曲率半径（R = 50）になるように工作物の傾斜

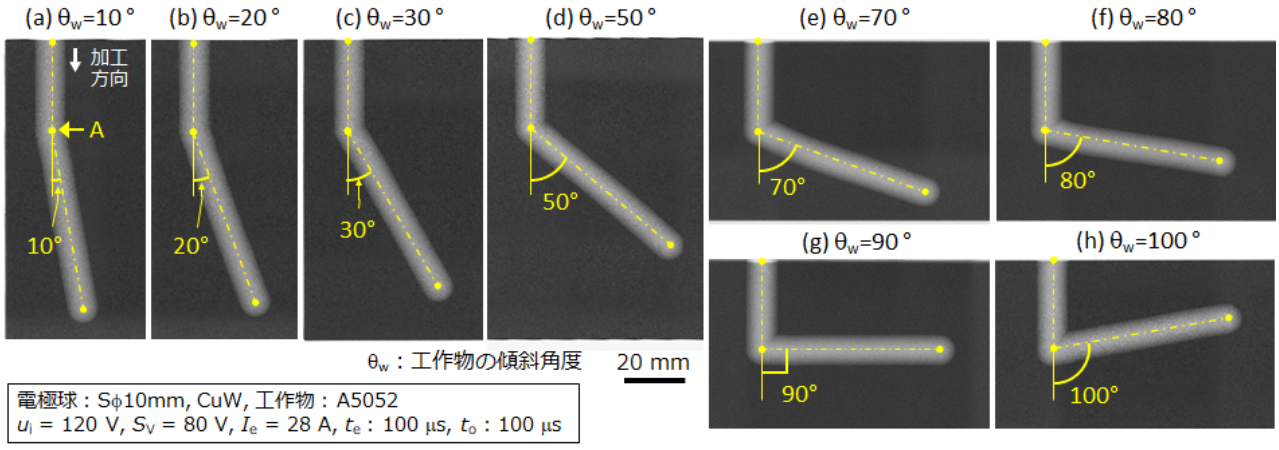


図 5 固定ガイドを用いて加工した屈折穴の X 線透視像

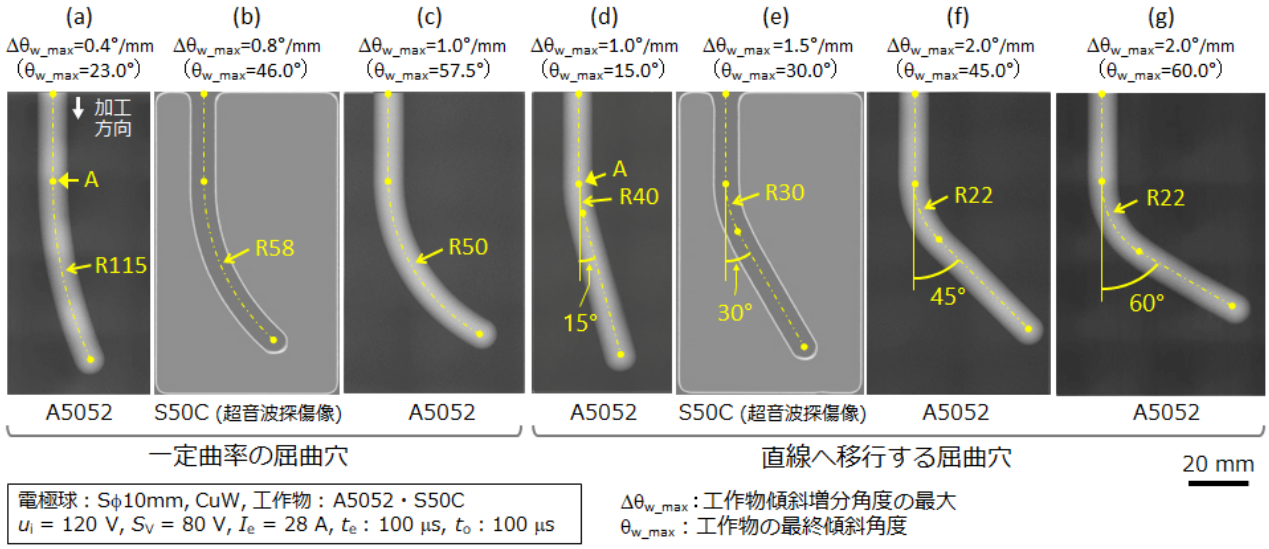


図 6 タンデムガイドを用いて加工した屈曲穴の X 線透視像および超音波探傷像

角度制御を行った屈曲穴である。長尺のタンデムガイド付き電極を用いることで、このような加工長さが 300 mm を超える深穴曲がり穴の形成も可能であった。

4　結論

本研究では、つり下げ電極を用いた曲がり穴放電加工について、屈折穴加工には固定ガイドを、屈曲穴には移動ガイド（タンデムガイド）を用いた方法を開発した。特に屈曲穴加工では、設計形状と電極軌道が合致するように工作物の傾斜制御を行う。これにより、様々な角度変化や曲率を有する曲がり穴が加工できる。また、加工長さが 300 mm を超える鉄鋼材料に対しても適用できることから、大型金型冷却水流路などの実用部品への応用が期待できる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 21K03816 の助成を受けて実施した。記して謝意を表する。

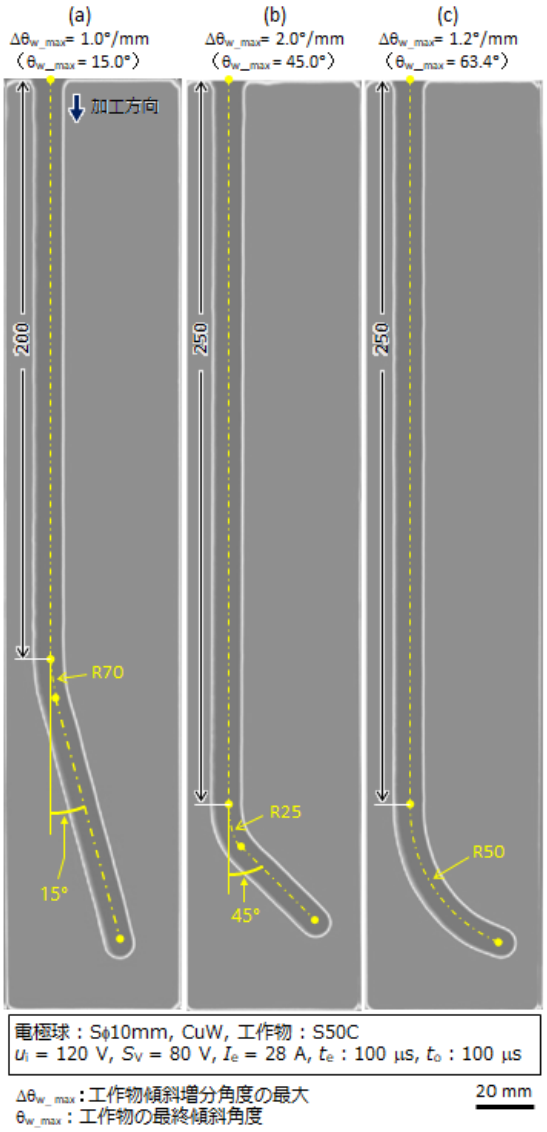


図 7　長尺のタンデムガイド付きつり下げ電極で加工した深穴屈曲穴の超音波探傷像

参考文献

1）　Tohru Ishida, Seiichi Kogure, Yasuhito Miyake, Yoshimi Takeuchi：Creation of long curved hole by means of electrical discharge machining using an in-pipe movable mechanism, Journal of Materials Processing Technology, 149-10(2004), pp.157-164.

2）　内山光夫：精密工学会誌，電解加工法を用いた小径曲がり穴加工, , 85-11(2019), pp.957-960.

3）　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.

4）　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, 81-11 (2015) 1039.

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－アルミニウム合金と合金工具鋼の放電加工特性と曲がり穴加工－，精密工学会誌, 82-10 (2016)907.

6）　山口篤，太田浩平，李碩勛，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法の開発－チタン合金の放電加工特性と曲がり穴加工－，精密工学会誌, 85-4 (2019)359.

（問合せ先　　山口　篤）
（校　　閲　原田知左子）