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—

内山 光夫** 芝崎 禎四郎***

Development of Curved Hole Machining with Electrochemical Machining (1st Report)
- Processing method by actuator-less tool -

Mitsuo UCHIYAMA and Teishirou SHIBAZAKI

A new method of a curved hole processing for cooling jackets of a metal mold is proposed. This processing technique is characterized by its simple mechanism without an actuator, where a tool is driven by the forward feed motion only. In the first step of the machining process, a tool slightly processes a hole into the direction where it is ordered to turn. In the subsequent step, the tool follows the hole machined by itself in the first process, and the repetition of these steps can produce a curved hole. The experiments carried out using electrochemical machining showed that the proposed method can produce smooth curved holes automatically. It was demonstrated that complicated curved holes with various curvatures were also produced successfully. These experimental results exhibited that the proposed method has a high potential as a processing method for curved holes in a metal mold.

Key words : curved hole, electrochemical machining, split electrode, cooling jacket, metal mold

1. 緒 言

曲がり穴加工は、金型の冷却液通路や油圧部品の油通路などの加工を目的として、従来様々な開発が行われてきている。前者は、主として鋳造用や射出成形用金型の冷却液通路の加工法としてニーズが高く、金型の温度を均一にして鋳造部品や射出成形部品の品質を向上しようとするものである。金型の加工であるため加工速度はそれほど厳しく要求されないが、部品形状に沿った曲がり穴を加工しなければならないため、対象とする部品によっては複雑な形状の深穴加工が要求される。後者は、エンジン部品や油圧部品の冷却液や油の通路の加工法としてニーズがある。現状では曲がり穴を加工できないため、2本の交叉する真直ぐな穴を明けた後、不要な穴をプラグで塞ぐという手法をとっている。こちらは大量に生産する部品の加工であるため加工速度に対する要求は厳しく、さらに曲がり穴の小径化も課題となる。

従来の曲がり穴加工技術^{1)~6)}の多くは工具本体にアクチュエータを取り付け、工具の形状を制御しながら加工を行なうもので、複雑な機構と高精度な制御を必要とした。このため、いずれの加工法もなかなか思い通りの曲がり穴が加工できず、実用化までには至っていないのが実状である。

そこで、曲がり穴加工をできるだけシンプルな機構で実現するため、工具自身の形状をアクチュエータで制御する必要の無い加工法の可能性を検討した。その結果、あらかじめ進みたい方向にわずかに穴を加工する動作と、工具自らがその加工された穴に倣うという動作を繰り返すことにより曲がり穴を加工する方法を提案し、開発を進めた。本加工法においては、あらかじめ加工した穴に工具を倣わせる必要があるため、工具の剛性

はできるだけ低く、加工反力も小さいことが望ましい。このことから、本開発では加工法に電気加工を選択し、さらに電極消耗やワーク・電極間のギャップの確保を考慮して電解加工で加工を進めることとした。

その結果、想定していた通りの曲がり穴の加工が可能で、さらに様々な曲率や複雑な形状の曲がり穴も加工できることがわかり、本加工法の実現性が確認できた。

本稿では、これまでに開発した加工装置と様々な構造の電極、およびそれらによる加工結果について報告する。

2. 加工原理

本開発の加工法は、前述したようにあらかじめ進みたい方向にわずかに穴を加工しておき、工具自らがその加工された穴に倣うことにより、曲がり穴を加工するものである。そのため、工具の中心軸に対してある角度を持った方向に加工を行なう必要がある。

図1はこの加工原理の模式図である。このように、工具の中心軸に対して傾いた角度で加工が行なわれるように、工具の加

Fig. 1 Model of curved hole machining

* 原稿受付 平成14年5月29日

** 正会員 日産自動車㈱（横須賀市夏島町1）

*** 日産自動車㈱

Fig. 2 View of curved hole machining equipment

Table 1 Experimental conditions

Electrolyte	NaNO ₃ solution
Specific gravity	1.12
Pressure	0.1 MPa
Temperature	20°C
Applied voltage	DC20V
Feed speed	0.3mm/min
Electrode tip diameter	φ 6mm

工作点を傾けておく。わずかに加工が行なわれたところで工具を前進させると、工具先端は加工された穴の底面に接触するが、加工された穴が傾いているため工具も同様に傾いた方向に曲げられることとなる。この動作を繰り返すことにより、シンプルな工具機構で複雑な制御も必要とせず、曲がり穴が加工される。本開発では加工作用点を傾けるために、電極カバーの形状変更や電極の極数変更等を行ない、その可能性を検討した。

この加工法によれば、電極をワークの中へ挿入してだけで曲がり穴が加工でき、電極を途中で180°回転させればS字形穴、一定回転させれば真直ぐ穴や螺旋穴が加工できるはずである。また、電極本体にアクチュエータを持たないため深穴を加工する場合には、単に電極の全長を伸ばすだけで対応することができる。

3. 実験方法

図2に実験装置の概要を示す。加工機はジャパックス社製電解バリ取り機を用い、電極を上下方向に移動するための位置決めテーブルを付加した。ワークにはS40Cの調質材を使用し、電極の位置決めが容易にできるよう、あらかじめ直径8mm、深さ5mmのドリル穴を加工した。

位置決めテーブルの先端に電極を取り付け、ワークに正極、電極に負極を接続し、電解加工液を供給しながら一定の送り速度により加工を行なった。

表1に加工条件を示す。電解加工液は硝酸ナトリウム水溶液、供給電圧は直流20V、送り速度は電極とワークの短絡を回避するため0.3mm/minにまで落としている。また電極チップの直径は6mmで、その周囲に設けた絶縁カバーの外径は7.5mmである。実験では、単極式電極の絶縁カバーの角度変更や、電極を多極

Fig. 3 Structure of flexible electrode

Fig. 4 View of single pole electrode

に分割し各々に供給する電圧の制御により、電極の加工作用点を電極中心軸から傾け、曲がり穴の曲率や形状変化への効果を確認した。

3.1 絶縁カバーの角度変更による効果

図3に本実験で用いた電極の構造を示す。電極チップは黄銅製で1極からなり、中心に電解加工液用の通路を設け、後方に通電のための導線を固定している。電極チップの周りにはアクリルで製作した絶縁カバーを設け、この絶縁カバーと後方の絶縁チューブを連結し内部から電解加工液が供給できるようにしてある。絶縁カバーは電極の中心軸に対して約5°から45°の範囲で斜めに取り付けることにより、加工方向が電極中心軸からずれるようになっている。

実験は、電極をワークのドリル穴に挿入し、電解加工液の供給と通電を行ないながら、電極を一定速度で送り込むことにより行なった。絶縁カバーが斜めに取り付けてあるため、加工部位は図3のように右側に偏る。この状態で電極が送り込まれてくると、電極は右側に曲げられることになる。このような偏りを持たせた加工と電極の屈曲の繰返しにより、曲がり穴が形成されるはずである。本実験では、絶縁カバーは固定式であるが、絶縁カバーの取り付け角度を自由に変えられるようにすれば、曲がり穴の曲率を可変にすることもできるはずである。

図4に本電極の全体写真を示す。電極は自らが加工した穴に倣いながら加工を行なっていくため、絶縁チューブはある程度の柔軟性を持っていることが必要である。しかし、絶縁チューブの内部には電解加工液と通電用導線を通さなければならないため、これらは柔軟性を低下させる要因となる。つまり、加工速度を上げるため、電解加工液を大量に流そうとすると加工液圧力を増大させることになるが、これは絶縁チューブを真直ぐ

Fig. 5 Single pole electrode at various cover angle

Fig. 6 Structure of triple poles electrode

Fig. 7 View of triple poles electrode (Type 1)

に伸ばそうとする力となる。また、同様に電流を多く流すためには導線の線径を太くすることになるが、これは絶縁チューブの柔軟性を低下させることになる。従って、曲がり穴の曲率半径を小さくする機能と、加工速度を向上させるための機能がトレードオフの関係となり、このバランスが課題となる。また、電解加工では加工後電極を放置すると、電解加工液中の硝酸ナトリウムの結晶が析出し、絶縁チューブの柔軟性をさらに低下させるため、加工後の電極の洗浄は不可欠である。

図5にカバーの角度を変化させた一例として3種類の電極を示す。右側の電極ほど、電極の中心軸に対して絶縁カバーの角度を大きく傾けてあるため、右側の電極の方が曲率半径の小さな曲がり穴を加工できるはずである。

Fig. 8 View of triple poles electrode (Type 2)

3.2 多極式電極による効果

図6に多極式電極の構造を示す。本実験では電極チップを3分割し、それぞれの電極チップの間に絶縁板をはさみ込むとともに、各チップに導線を接続している。各々の電極チップへの通電の有無により曲がり穴の曲率や方向を変えようとしたものである。電極チップの分割方法は、電極を先端方向から見て放射状に分割したタイプ1と、図6に示したように曲がり方向に平行な面で電極を切断した際、

電極チップが3分割となるように分割したタイプ2を準備した。

図7はタイプ1の電極先端部の拡大写真である。実験ではチップ1、2、3に適時通電し、曲がり穴の加工そのものの可能性と、方向制御の可能性を確認した。この構造では、各チップへの通電制御を最適化すれば、電極を回転することなくどの方向にも曲がり穴を加工できるはずである。

図8はタイプ2の電極先端部の拡大写真である。実験ではチップ2には常時通電し、チップ1あるいはチップ3への通電を制御することにより、タイプ1と同様に曲がり穴の加工そのものの可能性と、方向制御の可能性を確認した。

これら多極式電極は、絶縁チューブの内部に通す導線が3本となるため電極の柔軟性が低下するとともに、通電制御も複雑になるという問題が予想される。また、多極式電極は図3の絶縁カバータイプの電極と異なり、ワークと接触する部分に電極チップが露出しているため短絡の危険性が高いという欠点も合わせ持つ。

3.3 細穴および複合曲がり穴の加工

図9は細穴用電極の先端部の写真である。構造は図5に示した単極式の電極と同様であるが、細穴を加工できるよう絶縁カバーの外径を5 mmに縮小している。絶縁チューブ内の電解加工液通路の断面積は減少するものの、曲がり穴を加工するには十分である。

さらに、実際の金型や油圧部品への加工を想定して、複雑な形状の加工も試みた。この実験では、曲がり穴加工の途中で電極の円周方向の向きを変えることにより、複合曲がり穴の加工ができるかどうかを確認した。

Fig. 9 View of electrode for small bore

Fig.10 View of curved holes

Fig.11 View of small curved holes

4. 実験結果および考察

4.1 絶縁カバーの角度変更による効果

図10に、絶縁カバーを電極中心軸に対して40°、30°、15°、5°に傾けた、4種の電極で加工した曲がり穴の断面写真を示す。それぞれの絶縁カバーの角度に応じてきれいな曲がり穴が加工できているのがわかる。電極の中心軸に対して絶縁カバーの角度を大きく傾けるほど曲がり穴の曲率半径が小さく加工できており、さらに、曲がり穴の直径も穴の全長にわたってほぼ均一で約8.5mmとなっている。絶縁カバーの外径が7.5mmであることから、曲がり穴の直径は電極に対して径で約1mm拡大していることになる。

加工時間は一番右側の穴で深さ70mmを加工するのに4時間弱を要しており、実用化に向けてはさらなる加工速度の向上が必要である。また、この写真からも明かなように、曲がり穴の曲率半径が小さくなるほど穴表面にうろこ状の模様が顕著に現れているのがわかる。これは、電極が穴の表面に引っ掛かり、電極先端の動きが不連続になったために発生したもので、実用化に向けては電極に振動を与えるなどの対策により引っ掛かりを防止する必要がある。

4.2 多極式電極による効果

電極チップを放射状に分割したタイプ1の電極による加工では、電極先端付近で電極とワークが短絡し加工を継続できなかった。これは電極チップを放射状に分割したため、電極中心部の加工量が不足し加工残りが発生したためである。この対策として、電極中心部に4番目の電極チップを新設し、この電極に常時通電するようにすれば解決できると考えられる。しかし、この場合導線は4本必要となり電極の柔軟性がさらに低下するため、曲がり穴の曲率半径はかなり大きくなるとともに、加工速度も低下することが予想される。

上記の問題を考慮して製作したのが、図6に示したような断面で、電極チップが3分割となるように分割したタイプ2の電

Fig.12 View of combination curved hole

Fig.13 View of curved hole

極である。この電極による加工では曲がり穴の加工は可能であることが確認できた。しかし、電極の柔軟性はかなり低下しており曲がり穴の曲率半径が大きくなるとともに、電極内を流せる加工液の流量も制限されるため加工速度も低下せざるを得なかった。

以上、多極式電極による加工は不可能ではないものの、絶縁チューブ内を通す導線の本数を増やすことによって、曲がり穴の曲率半径や加工速度に弊害を及ぼすことがわかった。

4.3 細穴および複合曲がり穴の加工

図11に細穴用電極で加工した曲がり穴の断面写真を示す。曲がり穴の形状にはなっているものの、結果的に電極の直径に占める導線の比率が増えた分、電極の柔軟性が低下しており、曲がり穴の曲率半径は大きくなる傾向にある。また、曲がり穴の直径は約6mmとなっており、絶縁カバーの外径5mmに対して径で約1mm拡大している。拡大1mmは前述の一般穴の加工と同様である。これは一般穴と細穴で送り速度や加工電圧が同様のため、拡大代も同様となったものである。

図12に複合の曲がり穴の断面写真を示す。これはワークの半分まで曲がり穴加工が進んだ段階で、電極を180°回転させて曲がる方向を変えてS字状の曲がり穴を加工したものである。電極を回転させた後も、電極とワークの間で短絡を起こすことも無く反対方向にきれいに曲がり穴を加工することができた。しかし、電極を回転させる際にも電極とワークの引っ掛かりが発生し、実際には電極の根元側では180°以上回転させる必要

があった。したがって、曲がり穴加工を効率的に行なうには、送り方向とともに回転方向にも電極の引っ掛かりを防止する対策が必要であることがわかった。

以上のことから、あらかじめ進みたい方向にわずかに穴を加工する動作と、工具自らがその加工された穴に倣うという動作を繰り返すことにより曲がり穴を加工する方法が、実現可能であることが確認できた。しかも、この加工法は非常にシンプルな機構の工具で実現できるため、細穴や長穴にも比較的容易に対応することができる。

また、その電極の構造としては、絶縁カバーの角度変更による加工法が曲がり穴の形状と加工速度を両立できる可能性が最も高いことがわかった。

しかしその反面、実験中電極とワークの引っ掛かりはたびたび発生しており、それを防ぐために電極をはじく動作は欠かすことができなかった。図13は、その電極をはじく動作を行わずに加工した曲がり穴の断面写真である。曲がり穴の直径が不均一になっているのは、電極の引っ掛かりにより特定の場所の加工時間が増加したためである。また、電極の引っ掛かりはS字形状穴を加工した際に問題となったように、回転方向でも発生することが明らかとなっており、引っ掛かり防止は今後の重要な課題である。

また、実際の金型などへの加工を考慮した場合、加工穴形状の自由度をさらに向上させるとともに、電極の先端位置を検出する計測技術も必要となる。つまり、金型では部品形状に沿って曲がり穴を加工できることが理想であるため、複雑な形状を持つ部品の金型では、加工途中で曲がり穴の方向や曲率を変えられるという自由度が要求される。また、この加工法は電極自らが電極の形状を制御する機能は持たないため、電極先端の位置を計測する技術は非常に重要となる。

5. 結 論

曲がり穴加工をできるだけシンプルな機構で実現するため、工具自身の形状をアクチュエータで制御するのではなく、柔軟性を持った工具が、自分で加工した穴に倣いながら曲がり穴を加工する方法に着目し装置を開発するとともに、様々な構造の電極を製作し実験を行なった結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) あらかじめ進みたい方向にわずかに穴を加工する動作と、工具自らがその加工された穴に倣うという動作を繰り返すことにより曲がり穴を加工する方法が、電解加工を適用することにより実現可能であることが確認できた。
- (2) この加工法で用いる電極の構造としては、絶縁カバーの角度変更による加工法が、曲がり穴の形状と加工速度を両立できる可能性の高いことがわかった。
- (3) 電極とワークの引っ掛かりは、電極の送り方向と回転方向でも発生しスムーズな加工を妨げるため、この引っ掛かりを防止することが重要である。
- (4) 実用化に向けた今後の課題は、曲がり穴径の縮小、加工深さの増大、加工速度の向上、曲がり穴位置の検出などが考えられる。

参 考 文 献

- 1) 福井雅彦, 加納英人, 木下夏夫: もぐら掘り放電加工法の開発, 電気加工技術, 12, 38 (1988) 1.
- 2) 後藤昭弘, 福井雅彦, 木下夏夫: もぐら掘り放電加工法の開発, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 683.
- 3) 後藤昭弘, 福井雅彦, 木下夏夫: もぐら掘り放電加工法の開発, 電気加工学会誌, 25, 50 (1991) 23.
- 4) 青木勇, 高橋俊典, 中野裕史, 藤本涼: 曲線状穴あけ加工の試み, 1998年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1998) 188.
- 5) 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