姿勢制御電極による電解曲がり穴加工*

笹原 弘之^{*1}, 長尾 昇平^{*2}, 茅野 雅久^{*3}Electrochemical Curved Hole Machining with
Electrode Posture Control SystemHiroyuki SASAHARA^{*4}, Shohei NAGAO and Masahisa CHINO^{*4} Graduate School of Bio-Applications and Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Nakacho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588 Japan

Almost holes such as cooling channels of a mold or hydraulic equipments are machined by drilling process. It is desirable to establish a cooling channel located within a constant distance along a curved surface of a cavity or a core. However, the drilling process cannot make curved holes. Therefore a curved hole machining technique is required. Some kinds of curved holes machining process have been proposed, but they have not reached the practical level. The objective of this study is to develop a curved hole processing method using the electrochemical machining with an electrode posture control system. The posture of an electrode is controlled with a stepping motor and the wire. A simulation technique to predict the electrode position in a hole and the hole path was also developed. It was shown that the proposed system is able to make curved holes with the reasonable efficiency and accuracy.

Key Words: Curved Hole Machining, Electrode Posture Control System, Electrochemical Machining

1. 結 言

近年, 射出成形品の複雑形状化や高精度化に伴い, 成型時の金型温度の制御が重要となっている. 一般的に金型の冷却流路形状は, 成形される製品形状に沿って一定の距離に設けることが望ましいとされ, 例えば図1(a)の黒塗り部のような形状の製品に対しては, 冷却流路の形状も曲がり穴であることが望ましい. しかし, 現状では, 同図(b)のようにドリル加工による直線状の穴を繋ぐといった方法で妥協しており, 曲がり穴加工法の開発が求められている. また, エンジン部品や油圧部品の冷却液や油の流路の加工においても, 曲がり穴が要求される場合がある.

これまでに, いくつかの曲がり穴加工法が提案されている. 円弧状の電極を回転軸で円軌道上を送りながら電解加工する方法⁽¹⁾, ユニバーサルジョイントによる屈曲機構により電極の向きを制御しながら放電加工を行う方法⁽²⁾, フレキシブルなチューブの先端に電極を取り付け, 絶縁カバーの角度を傾けて電解加工を行う方法⁽³⁾⁽⁴⁾, 圧縮したコイルばねを主軸に固定し, 接続した複数のワイヤの送り量を制御することによりコイルばねを屈曲, 伸長させて先端に取り付けた電極に曲

線軌跡上を運動させながら放電加工を行うことにより曲がり穴加工を行う方法⁽⁵⁾⁽⁶⁾などが提案されている. いずれの研究も工夫を凝らし曲がり穴加工を行っているが, 高い自由度で長い距離の曲がり穴を加工できるまでには至っていない. したがって, 金型の成形性能を高めるような冷却流路を実用的に加工するまでには至っていないのが現状である.

そこで本研究では, ほとんどの金属の加工が可能であり, 工具の消耗がない電解加工を適用して, より自由度の高い曲がり穴を加工することを目的とする. 電解加工の, 電源と送り機構があれば加工が可能であり, 装置が比較的シンプルに構成することができるといった特徴を活かし, フレキシブルなチューブ先端に取り付けた電極に屈曲機構を設けて, ワイヤを介してステッピングモータにより電極の姿勢を制御しながら, 曲率が変化する曲がり穴を電解加工する手法を開発し

(a) Cooling channel consists of curved holes (b) Cooling channel consists of straight holes

Fig.1 Cooling channel of a mold

* 原稿受付 2007 年 3 月 2 日.

^{*1} 正員, 東京農工大学大学院共生科学技術研究院 (〒184-8588 小金井市中町 2-24-16).

^{*2} 東京農工大学大学院機械システム工学専攻[現: プリダストン(株)].

^{*3} 正員, 東京農工大学工学部.

E-mail: sasahara@cc.tuat.ac.jp

Fig.4 Relationship between electric current density and machining speed

工速度は高かった。一方、電極の形状の違いによる加工速度への影響はほとんど見られないことがわかる。

実験を行った電流密度 $0.09\text{A/mm}^2 \sim 0.43\text{A/mm}^2$ 程度の範囲では、加工速度はいずれの場合も電流密度にほぼ比例しており、加工速度 v と電流密度 i の間には、グラフの傾きとして $v=0.83i$ の関係が見られた。これは、電解加工される物質の量は電流量に比例するというファラデーの法則によるところが大きいと思われるが、 AS052 の電気化学当量から求められる加工速度の理論値は $v=1.25i$ であるのに対し、実験値では電流密度が増大するにつれて電流効率は低下する傾向が見られた。

一方で、電流密度が 0.3A/mm^2 程度より小さい領域では理論値よりも高い加工速度が実現されている。電流効率 η を算出すると、電流密度が 0.09A/mm^2 においては160%から175%程度に達している。これは、被加工金属が溶出だけでなくある程度の大きさの塊となって脱落するなどの状況が生じているためだと考えられるが、目視で確認できるほどの粗大粒は観察されなかった。一方、電流密度が 0.3A/mm^2 程度より大きい領域では、電流効率は100%を下回っている。電流効率が低下する原因として、陽極である被加工物表面からのガスの発生が考えられる。電流密度が増大するにつれて電気分解される水分子が増加し、酸素の発生に消費され

Fig.5 Schematic of curved hole machining

るようになるためであると考えられる。

3. 電極の姿勢制御による曲がり穴加工

本報では、フレキシブルなチューブ先端に取り付けた電極に屈曲機構を設け、ワイヤを介してステッピングモータにより電極の姿勢を制御しながら、電極、チューブ、姿勢制御用ステッピングモータなどからなる加工ユニットを別途設置したステッピングモータにより送り駆動する実験装置を製作し、実際に曲がり穴を加工した。

3.1 曲がり穴加工の加工原理 図5に提案する曲がり穴加工の概略を模式的に示す。電極はヒンジを介して電極支持部に接続しており、電極支持部はフレキシブルチューブの先端に固定されている。電極にはチューブ内を通過して2本のワイヤが接続されており、チューブの後端でプーリを介してステッピングモータにより制御され、片方のワイヤが引かれれば他方が同じだけ繰り出されるように動作し、ヒンジ周りに電極を首振り運動させることができる。チューブの直径は、電極の外径および加工される穴径よりも小さいため、チューブの電極支持部付近が加工穴の中央に保持されるようポリエチレン製のサポートを設置した。電解液の還流を妨げないように、サポートは幅×長さ×高さが $1 \times 5 \times 1\text{mm}$ の船底形状とし、チューブ外周の3カ所に 120° 毎に等間隔で取り付けた。

曲がり穴が加工される原理として、内山ら⁽⁹⁾は「電極方向に穴加工が進み、工具自らがその加工された穴に倣っていく」と想定した。基本的にその考え方に則るが、加工中においても電極方向を自由に制御可能である点が内山らの手法とは異なる。これにより、例えばS形状や直線と曲線を組み合わせたような曲率が変

Fig.6 Posture of electrode in machining

化する穴経路も加工可能となる。また、加工進行方向に対して電極を回転させることによりスパイラル状などの三次元的な穴経路の加工も可能である。

また、内山らが指摘しているように、穴加工の進行に伴い、電極が穴内面に引っかかる現象が本研究においても見られたが、提案する電極姿勢の制御によりこれが回避可能であることも後述する。

3.2 曲がり穴の加工経路予測 金型の冷却流路などを加工する場合、曲がり穴が深くなるほど、加工位置を予測・制御し、設計通りの経路で加工することが必要となる。本報告では、電極の姿勢制御状態と電極送り量とから加工経路を予測する手法を提案する。

図6(a)に屈曲機構と電極を示す。点aは電極中央先端、点bは電極の回転支点部、点cは電極ホルダの後端であり、線分bcはフレキシブルチューブ端の中心軸と一致する。ここでは、加工進行方向に対する電極の回転を伴う移動は考えず、電極の首振りによる加工経路の予測・制御について考えることにする。

初期状態として線分bcと平行にy軸をとり、点a, b, cの座標をそれぞれ (x_a, y_a) , (x_b, y_b) , (x_c, y_c) とする。ここで、電極ホルダに対する電極の傾きすなわちabとbcのなす角を α 、線分bcのy軸に対する角度を β とする。 α の値を制御しながら加工を行うことになる。

ここで、加工方向と電極の移動について以下のように仮定する。i) 電極先端において加工はbaの方向に進み、付随して点bは点aと同じ方向に進む。ii) それにより加工された穴内壁を電極ホルダ部が倣うように進むので、点cは点aと同じ軌跡上を一定時間遅れて移動する。

これを微小ステップ毎に繰り返すとき、 i ステップ時点の状態を同図(b)に示す。各点の座標を $(x_{a(i)}, y_{a(i)})$, $(x_{b(i)}, y_{b(i)})$, $(x_{c(i)}, y_{c(i)})$ とすると電極ホルダである線分bcのy軸に対する角度 $\beta_{(i)}$ は

$$\beta_{(i)} = \tan^{-1} \frac{y_{b(i)} - y_{c(i)}}{x_{b(i)} - x_{c(i)}} \quad (3)$$

となるので、電極部の線分abのy軸に対する傾き $\theta_{(i)}$ は

$$\theta_{(i)} = \alpha_{(i)} + \beta_{(i)} \quad (4)$$

となる。電極およびチューブ全体は、ステッピングモータにより送り駆動するが、ステッピングモータの1ステップで電極が進む距離を l とすると、1ステップ後の電極先端(点a)の座標は、

$$x_{a(i+1)} = x_{a(i)} + l \sin(\theta_{(i)}) \quad (5)$$

$$y_{a(i+1)} = y_{a(i)} - l \cos(\theta_{(i)})$$

により表すことができる。同様に点bの軌跡は、

$$x_{b(i+1)} = x_{b(i)} + l \sin(\theta_{(i)}) \quad (6)$$

$$y_{b(i+1)} = y_{b(i)} - l \cos(\theta_{(i)})$$

となる。

一方、点cは点aと同じ軌跡上を遅れて移動するものとするので、点aの各ステップ毎の座標値を記憶しておき、 $(ab+bc)/l$ ステップ前の座標を点cの座標値とする。なお、その値が整数値でない場合は前後の座標値から直線補間する。

以上の計算を繰り返すことにより電極の移動軌跡すなわち曲がり穴の加工経路を予測することができる。

3.3 加工穴径の予測 次に、加工される穴径の予測について述べる。提案する電解穴加工では、電極径よりも大きな径の穴が加工される。被加工物の電気化学当量を k_a (g/A・min)、比重を ρ (g/mm³)、加工時の電流を I (A)、加工速度を v (mm/min)とすると、電解加工による1分間あたりのワークの溶出量 M_a (g/min)は

$$M_a = k_a I \quad (7)$$

となるから、1分間あたり溶出体積 V (mm³/min)は、

$$V = \frac{M_a}{\rho} \quad (8)$$

となる。これは、単位時間に直径 D (mm)の穴が加工速度 v (mm/min)で加工される体積 $\pi D^2 v / 4$ に等しいので、加工される穴径は、

$$D = 2 \sqrt{\frac{V}{\pi v}} = 2 \sqrt{\frac{k_a I}{\rho \pi v}} \quad (9)$$

により表すことができる。

以上により、加工される曲がり穴の穴径と、加工経路が予測できる。

4. 曲がり穴加工実験

図7に実験装置の概略を示す。テーブル上に垂直にフレームを設置し、フレームに取り付けられたスライドレール上を上下に加工ユニットが移動する。加工ユニットには電極姿勢制御用のステッピングモータ、フ

Fig.7 Schematic of the experimental setup

レキシブルチューブの一端が接続されており、チューブ内には直流電源のマイナスラインと電極姿勢制御用の2本のワイヤが通っている。また電解液もこのパイプを通して供給される。加工ユニットはステッピングモータ、プーリを介してベルトにより駆動され、スライドレール上を上下に移動する。なお、二つのステッピングモータはモーションコントローラを搭載したPCにより制御する。

電極形状は図3(a)の球面状のものとし、直径は9.1mmとした。定電流13.7A、電解液流量5.4 l/min、電極送り速度0.3mm/minとして以下の曲がり穴加工実験を行った。なお、得られる曲がり穴の穴径は式(9)を用いると、約11mmとなる。

以下に例として3通りの加工を示す。電極姿勢(先端の角度 α)をスライドレール上の移動量すなわち加工穴深さに対して図8に示すように制御した。いずれの場合も、ワーク端面から5mmは $\alpha=0^\circ$ で直線加工を行い、それ以降で α を変化させて曲がり穴の加工を行った。

4.1 $\alpha=9.5^\circ$ にステップ状変化を与えた場合 図9に、加工開始から5mm直線穴加工し、次いで α を 9.5° 傾けて深さ45mm程度まで加工を行った穴断面を示す。図中の太実線は3章で示した予測方法により予測した経路の中心である。曲がり穴は加工出来ているが、予測した加工経路との一致は良好ではない。深さ5mmの位置で電極を 9.5° 傾けたことにより、被加工領域が急激に曲線経路の内側に移動し、曲がり穴側面が段状となっていることがわかる。その部分と電極保持部とが干渉し、電極の向きが予測とは異なったことがその主な原因と考えられる。

4.2 $\alpha=13.3^\circ$ まで徐々に変化させた場合 そこ

Fig.8 Control sequence of electrode tip angle α

で、加工開始から5mm直線穴加工した後、急激な電極姿勢の変化を避け、電極が1mm進むたびに α を 1.9° ずつ 13.3° まで増加させ、深さ45mm程度まで加工を行った場合の結果を図10に示す。 $\alpha=13.3^\circ$ と前述の 9.5° の場合より大きく傾けることにより、穴経路の全体的な曲率半径は小さくなっているにもかかわらず、比較的良好な形状の曲がり穴を加工することができている。電極の姿勢変化を急激に行わない工夫をすることで電極保持部と加工穴内壁との余分な干渉を回避し加工することができた。なお、穴径は11~12mm程度であり、予測値11mmより大きくなる傾向があるが、段差が生じることなく、ほぼ一定径の曲がり穴を加工できることが示された。

予測した加工経路と比較すると、図9の場合よりは良い一致が見られる。しかし、実加工の経路の方が曲率半径が大きくなっており、最深部において4mm程度のずれを生じている。これは、今回提案した加工経路の予測では、加工方向を電極先端の中心軸方向と仮定したが、実際の加工における電極先端の運動方向は、電極保持部の運動方向の影響を大きく受けるため、想定したよりも円弧状加工経路の外側の方で被加工面と電極とのギャップが小さくなって加工速度は内側に比べ高くなり、予測の加工経路よりも曲率半径が大きくなっていると考えられる。また、電解液の圧力による反力の作用や、チューブの復元力等の影響も加工経路の曲率半径が予測よりも大きくなる原因の一部と考えられる。

4.3 S字状の曲がり穴加工 図11に、加工開始から5mm直線穴加工した後、電極が1mm進む毎に α を 1.9° ずつ 11.4° まで増加させて深さ30mmまで加工し、次いで同様に α を 1.9° ずつ逆向きの -11.4° まで減少させながら、深さ90mm程度まで加工を行った結果を示す。加工された曲がり穴の経路は、電極姿勢の変化に対応してS字状のものが実現できた。

Fig.9 Predicted center line of machining path and machined curved hole
(Electrode angle = 9.5°)

Fig.10 Predicted center line of machining path and machined curved hole
(Electrode angle was controlled from 0 to 13.3°)

また、前述の場合と同様に、加工した曲がり穴経路は予測した経路と完全には一致しなかったが、曲がり穴の中心と加工経路の誤差は最大で約4mm程度であり、第一次近似的な予測モデルであることを考慮すればかなり近い形状が得られていると言えよう。また、加工時間は5時間程度であったが、より大きな電流を供給することにより加工速度は高くすることが可能である。

5. 結 言

本報告では、屈曲機構を設けた電極の姿勢をワイヤ、ステッピングモータを用いて制御しながら電解加工を行う曲がり穴加工法を提案し、以下の結果を得た。

- (1) $0.09\text{A}/\text{mm}^2 \sim 0.43\text{A}/\text{mm}^2$ の範囲の電流密度では、加工速度と電流密度にはほぼ比例関係が見られたが、電流密度が増大するにつれて、電流効率は低下した。また、電解液の流量を増大させると、同程度の電流密度であっても加工速度はわずかではあるが高くなった。
- (2) 屈曲機構付きの電極を、ワイヤ、ステッピングモータにより電極先端の姿勢を制御する実験装置を開発し、実際に穴径11mm、深さ90mm程度までの曲がり穴を電解加工した。電極の急激な姿勢変化を避け徐々に行うことにより加工をすることで、良

Fig.11 Predicted center line of machining path and machined curved hole
(Electrode angle was controlled from 0 to 11.4° then to -11.4°)

好な形状の曲がり穴を加工することができた。

- (3) 屈曲機構付きの電極を用いた電解加工の加工経路を予測する手法を提案し、実加工した曲がり穴形状と比較検討した。その結果、実加工による加工経路と比較的良好な一致が得られた。誤差の発生要因としては、実加工での電極の進行方向は、予測手法で仮定した経路より曲線の外側になるためと考えられる。

文 献

- (1) Komai S., Komine S., Electrochemical machining of Curved Hole (in Japanese), *Journal of The Japan Society of Electrical Machining Engineers*, Vol.8, No.15 (1974), pp.20-28.
- (2) Fukui M., Kinoshita N., Developing a 'Mole' Electric Discharge Digging Machining, *Annals CIRP*, Vol. 38, No.1 (1989), pp.203-206.
- (3) Uchiyama M., Shibazaki T., Development of Curved Hole Processing Technique Using Electrochemical Machining (1st Report) : Processing method by actuatorless tool, *Journal of Japan Society for Precision Engineering*, Vol.68, No.11 (2003), pp.1476-1480.
- (4) Uchiyama M., Shibazaki T., Development of Curved Hole Processing Technique Using Electrochemical Machining (2nd Report) : Controllability of curvature of machined curved hole, *Journal of Japan Society for Precision Engineering*, Vol.69, No.10 (2003), pp.1492-1496.
- (5) Ishida T., Takeuchi Y., Development of Electrode Feeding Drive Mechanism for Electrical Discharge Curved Hole Machining Using a Helical Compression Spring and Wires, *Journal of Japan Society for Precision Engineering*, Vol.65, No.7 (1999), pp.982-986.
- (6) Miyake Y., Ishida T., Takeuchi Y., Electrical Discharge Machining of Constant Curvature Curved Hole by Means of Electrode Motion Control Device, *Journal of Japan Society for Precision Engineering*, Vol.71, No.11 (2005), pp.1388-1392.
- (7) Ito H., Non-traditional Machining and Treatment, (in Japanese), (1970), Seibundoshinkosya.