研 究

ワイヤ放電加工の加工精度に関する基礎的研究（第3報）*

－パワー制御と経路補正を組み合わせた大円弧凹コーナーRの
荒加工精度の改善方法－

小原治樹**, 河合 保**, 大住 剛**

Fundamental Study of Accuracy of Wire EDM (3rd Report)

－ Improvement of Rough Cut Concave Large Corner R Accuracy
by a Combined Power and Path Control －

Haruki OBARA, Tamotsu KAWAI, Tsuyoshi OHSUMI

ABSTRACT

In this report, we propose a method to improve accuracy of concave large corner R by rough cut of a work piece where the corner R radius is greater than a half of cut groove width and the wire discharges symmetrically on whole front surface of the wire. In the control method, program path and discharge power are modified simultaneously at the corner R. The discharge power is adjusted so that difference between error of corner R on a middle surface and that on a top or a bottom surface of the work piece decreases within a allowable value. Program path is modified so that wire guides move along a path going a head of a desired corner R path, and the form of corner R on the top or the bottom surface of the work piece will be correct. The corner R radius is modified depending on the wire deflection.

Key words : wire EDM, concave corner R accuracy, path control, power control

1. 結 言

一般にワイヤ放電加工のコーナー、コーナーRの加工精度について論じるとき、凸面が良好であれば当然凹面も良好になるものとして扱い、特別に凸面、凹面と分けて議論されることはなかった。しかし前報¹⁾の結果にも見られるように、凸面の精度が良好でも凹面の精度が良好になるとは限らない。前報では凸コーナー、凸コーナーRについて、加工条件制御と加工経路修正を組み合わせで荒加工精度を改善する方法を示した。そこではワーク中央面とワーク上下面の形状精度の差が許容範囲となるようにパワーを制御し、ワーク中央面が所望形状となるように経路を修正している。

本報告においては、この制御方法を大円弧の凹コーナーRに適用した場合の加工精度について調べる。ここで大円弧とは、コーナーRの経路半径が溝幅の半分よりも大きく、したがって片面放電とならない場合である。ここでも前報と同様のパワー制御を用いるが、前報と異なり、ワーク上下面が所望形状となるように経路を修正する必要がある。得られた加工経路修正式と加工条件制御式を提示する。

2. 加工経路の修正と加工条件制御の方法

2. 1 加工経路の修正

大円弧の凹コーナーRでは片面放電とならないので、前報と同じくワイヤのたわみぶん常にガイドを余分に進ませて加工する近藤等の加工経路

*電気加工学会全国大会(1997)にて発表

**富山大学工学部(富山市五福3190)

Fig. 1 Modified cutting path

修正方式²⁾を採用する。Fig. 1にこの時のガイドの補正経路とワーク上下面, 中央面のワイヤ移動経路を示す。Gを通る破線はガイドの経路, Aを通る点列はワーク中央面のワイヤ移動経路, Bを通る点列はワーク上下面のワイヤ移動経路を表す。但し点列はワイヤが常にガイド方向に引き寄せられるように移動すると考え, 作図によって求めたもので, 厳密ではない。

Fig. 1は前報の凸コーナー, 凸コーナーRの経路修正と類似しているが, 凸コーナー, 凸コーナーRの場合はワーク中央面が正しい形状となるように経路修正するのに対し, 凹コーナーRの場合はワーク上下面が正しい形状になるように経路修正している。この理由はFig. 1から分かるようにワーク上下面は常に中央面よりも円弧の外側となるから, 凹コーナーR加工においてワーク中央面が正しい形状になるように経路修正すると, 上下面は過切削となり, このワーク上下面の形状を仕上げ加工で修正する場合に仕上げ代が大きくなり, 全体の加工時間が大幅に増加してしまうためである。それ故凹コーナーR加工においては, 中央面は幾分切り残るが, ワーク上下面が所望形状になるように経路修正する必要がある。

ただしそのように経路を修正すると, 中央面に合わせて形状修正する場合と異なり, Fig. 1に示すように, ワーク上下面のワイヤの移動軌跡は所望の円弧経路からずれて, 点Cにおいて過切削, Dにおいて切り残しとなる。しかしこの誤差は次項の加工条件制御を用いてワイヤ撓みを減少させ

Fig. 2 Wire deflection model

ればほとんど観察できない程度であったので, これを無視して議論する。

加工中のワイヤはガイド方向に引き寄せられるように動く。そのため単純にガイドは常にワーク中央面の軌跡の接線上に位置すると考える。この時Fig. 1の三角形OAGは直角三角形であり, またC点近傍の誤差を無視すれば線分OBが所望形状の経路半径Rであるから, ワーク中央面のたわみを δ_A , ワーク上下面のたわみを δ_B とすると, 線分OAは,

$$OA = \sqrt{R^2 - (\delta_A - \delta_B)^2} \quad (1)$$

となる。従ってワーク上下面のワイヤたわみによる誤差を打ち消すために必要なガイドの経路半径の補正量は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_B &= \sqrt{R^2 - (\delta_A - \delta_B)^2 + \delta_A^2} - R \\ &= \sqrt{R^2 + \delta_A^2 x(2-x)} - R \end{aligned} \quad (2)$$

ここで, x は δ_B と δ_A の比であり, 上下ガイドとワークの幾何学的配置で定まる。例えばワイヤを弦と仮定し, Fig. 2のように上下対称の配置とした場合, 前報と同じく次式で与えられる¹⁾。

$$x = \frac{\delta_B}{\delta_A} = 1 - \frac{H}{2S - H} \quad (3)$$

H は板厚, $2S$ は上下ガイドスパンである。

2. 2 加工条件の制御

ワイヤ撓みはワーク厚さ方向位置によって異なるので、ワーク上下方向の位置によりコーナーR形状の精度が異なる。そこで前報と同様に、経路修正と同時に加工条件制御を用い、ワイヤたわみを抑制してワーク中央面の寸法精度が許容範囲に納まるように制御する。(2)式に従って加工経路を修正し、ワーク上下面が正しい形状となったものとする、Fig. 1 からワーク中央面の半径誤差、 ε_{AB} は、厳密ではないがOBとOAの差として次式で与えられる。

$$\varepsilon_{AB} = R - \sqrt{R^2 - (\delta_A - \delta_B)^2} \quad (4)$$

許容半径誤差を ε_{AL} とし、 ε_{AB} が ε_{AL} 以下となるようにたわみ δ_A を制御する。 $R \gg \varepsilon_{AL}$ と仮定して(4)式を変形すれば、 δ_A は次式を満たす必要がある。

$$\delta_A \leq \frac{\sqrt{2R\varepsilon_{AL}}}{1-x} \quad (5)$$

(5)式は前報¹⁾と同じ式になる。

次に δ_A が(5)式を満たすように加工条件を決定する。これをオフ時間の調整によって行うものとする。計算方法は前報¹⁾と同じなので、計算結果のみを記すと以下のとおりである。

1) Fig. 2のワイヤたわみの計算式

$$\delta_A = \frac{pH(2S-H)}{2T} \quad (6)$$

T : 張力, p : ワイヤの単位長さ当たりの作用力

2) p の計算式³⁾

$$p = \frac{\pi}{4} \frac{f}{2H} \Delta F \quad (7)$$

f : 放電頻度, ΔF : 単発放電衝撃力 (力の時間積分値)

3) ΔF の計算式³⁾

$$\Delta F = K_F E_g^{1/2} \tau_{ON}^{-1/3} \quad [\text{N} \cdot \text{s}] \quad (8)$$

$$E_g = C(V_0 - V_g)V_g$$

$$\tau_{ON} = \pi \sqrt{LC}$$

$$K_F = 0.944 \times 10^{-6}$$

E_g : 放電エネルギー[J], τ_{ON} : 放電時間[s]

K_F : 実験定数, C : コンデンサ容量[F]

V_0 : 充電電圧[V], V_g : 放電電圧[V]

L : 放電回路のインダクタンス[H]

4) τ_{OFF} の計算式

$$\tau_{OFF} = f \tau_{ON} \frac{1 + (V_W - V_g)/(V_0' - V_W)}{1 + V_W/(V_0' - V_W)} \quad (9)$$

τ_{OFF} : 放電休止時間[s], V_W : 平均加工電圧[V]

V_0' : 無負荷電圧[V]

なお最近の加工電源では主放電回路と電圧印加回路を別に設けたタイプが多いので V_0 と V_0' を分けて記載したが、本実験の場合の V_0 と V_0' は同じ値である。

(3), (5)式を用いて許容ワイヤたわみ値 δ_A を求め、これを(6)式に代入して必要な p の値を逆算し、次に p と(8)式の ΔF を(7)式に代入して必要な放電頻度 f を逆算し、最後に放電頻度 f を(9)式に代入して休止時間 τ_{OFF} を定めれば良い。

(8)式は本実験に使用した加工機について牧野等により求められた実験式³⁾であり、他の機械には適用できない可能性がある。その場合は前報で述べた手続きに従い、任意の2枚重ねの板を実加工条件 (オフ時間, 板厚, 張力は異なって良い。) で直線加工してワーク中央部のたわみ δ_A とその時の放電頻度を求め、(6), (7)式に代入すれば他の加工機でも ΔF を容易に求めることができる。この値は主として放電エネルギー, 放電時間に依存し、板厚, 張力, 休止時間などの条件に依存しないので、一度求めておけばその他の条件の場合もそのまま適用できる。

3. 計測結果

実際に制御を行う場合は最初に加工条件を定め、次に残されたたわみによる誤差分の経路修正を行う。上記の経路修正と加工条件制御を用いて加工

Fig.3 Test cut form

Table 1 Standard EDM conditions

Charge voltage [V]	100
Discharge capacitance [μ F]	1.0
Servo voltage [V]	40
Wire tension [N]	9.8
Wire feed rate [m/min]	6.0

Wire : 0.25 ϕ Al added soft brass
Work piece : SKD11 hardened

し、半径誤差を計測した。Fig. 3にテスト加工形状を示す。B寸法を万能投影機により測定し円弧誤差を求めた。下の一形状はワイヤ撓みを計測するための加工で、寸法 L_0 を万能投影機で計測し、プログラム寸法+溝幅と L_0 の差がワイヤたわみ

Fig.4 Error of radius without control
(2H=40mm)

の2倍であるとしてワイヤたわみを求めた。板は20mm板厚のSKD11を2枚重ねあわせて加工し、ワーク上下面とワーク中央面の半径誤差を求めた。Table 1に標準加工条件を示す。用いた加工機はファナック(株)製FTC Model-SPプロトタイプであり、コンデンサ放電であるが、放電側にトランジスタを持つため基本特性はトランジスタ電源とほぼ同じである。サーボ送りで加工している。Fig. 4に板厚40mmを制御なしで加工した場合の計測結果を示す。横軸は円弧半径であり、縦軸は円弧半径誤差 ϵ_R である。0.5Rの半径ではワーク上

Fig.5 Error of radius after control
(2H=20mm)

Fig.6 Error of radius after control
(2H=40mm)

Fig. 7 Error of radius after control
(2#80mm)

下面に $45\mu\text{m}$ 程度の切り残り誤差がある。

Fig. 5, 6, 7 に許容誤差を $15\mu\text{m}$ として制御を行った場合の半径誤差を示す。Fig. 5 は板厚 20mm, Fig. 6 は板厚 40mm, Fig. 7 は板厚 80mm の場合を示す。Fig. 5 は板厚が薄いのでオフ時間の制御は必要なかった。Fig. 6, 7 では 0.5R の場合のみオフ時間を変更している。

Fig. 5 の板厚 20mm では全体に誤差はマイナスすなわち切り残り気味であり、中央面の誤差は $15\mu\text{m}$ を越えているがワイヤ屑の付着によるものと考えている。上下面精度は許容誤差内に収まっている。

Fig. 6 の板厚 40mm では、制御によりワーク上下面の誤差は数 μm 程度に改善された。中央面の精度も良好である。

Fig. 7 の板厚 80mm の場合も同様に上下面の精度は良好である。しかし 0.5R の場合は中央面の誤差は $30\mu\text{m}$ 程度になった。この誤差は厚さとともに増加する傾向にあり、これは前報と同様の傾向である。最終的にこの誤差は仕上げ加工によって除去することができるが、本解析で考慮されていない

要因があると思われる。

前報の凸コーナー、凸コーナーRでは、たわみを考慮した円弧補正のみでは不十分で、実験式に基づく補正項が必要であったが、上記の結果から、本報告の大円弧凹コーナーRの場合には、撓みのみを考慮した理論式、(2)式を用いた補正により、ほぼ所望のワーク上下面形状が得られることがわかった。

5. 結論

大円弧凹コーナーRの荒加工精度の改善のため、ワーク中央面とワーク上下面の形状精度の差が所望精度内に入るようにオフ時間を調整し、また同時にワーク上下面の形状が所望形状となるように経路修正する方式を提案し、その精度について検討を行い、以下の結論を得た。

- 1) 上記の加工条件制御と単純理論に基づく経路補正とを併用することによりワーク上下面については良好な精度が得られる。
- 2) ワーク中央面の誤差は板厚 20mm, 40mm のように薄い板の場合は良好であるが厚板になるほど誤差が大きくなる傾向が見られる。

参考文献

- 1) 小原, 河合, 大住: ワイヤ放電加工の加工精度に関する基礎的研究 (第2報) — パワー制御と経路補正を組み合わせた凸コーナーおよび凸コーナーRの荒加工精度の改善方法 —, 電気加工学会誌, Vol. 33, No. 72 (1999), pp. 20-27
- 2) 近藤, 西尾: ワイヤ放電加工の加工精度向上に関する研究, 電気加工学会誌, Vol. 19, No. 37 (1985), pp. 12-27
- 3) 牧野, 小原, 大住, 丹羽: ワイヤ放電加工の単発放電衝撃力と単発放電加工量, 電気加工学会誌, Vol. 30, No. 63 (1996), pp. 1-10

(1998年10月26日受付)