研 究

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 —

小原治樹** 河合 保** 大住 剛**

Fundamental Study of Accuracy of Wire EDM (2nd Report)

— Improvement of Rough Cut Convex Corner and Corner R Accuracy
by a Combined Power and Path Control —

Haruki OBARA, Tamotsu KAWAI and Tsuyoshi OHSUMI

Abstract

This present paper investigates about accuracy of rough convex corner and convex corner R . Previous some reports proposed methods to improve corner and corner R accuracy of Wire EDM. One method controls EDM conditions and other method modifies a program path at the corner and corner R , and 3rd method is a on-line system which detects wire deflection and corrects a contouring path. But 1st method has problems that the corner accuracy is insufficient and it lacks details to decide EDM parameters. Also 2nd method has a problem that the accuracy on top surface differs from that on middle cross section surface of a work piece. In addition 3rd method is only useful for special machines. In this paper we propose a combined power and path control method to improve the convex corner and corner R accuracy which is useful for ordinary operators. In the method, discharge power is adjusted so that the error of convex corner and corner R on the top or bottom surface of the work piece decreases within a desired value. The program path is corrected so as the residual error on the middle surface of the work piece to be 0.

Key words: Wire EDM, Corner accuracy, Combined power and path control method

1. 緒 論

ワイヤ放電加工のコーナー、コーナー R の荒加工形状は、ワイヤ撓みや振動、電界集中によって内側に歪んだ形状になるが¹⁾、その改善方法として従来例えば真柄ら²⁾はコーナー部でオフ時間を増し、ワイヤ撓みを減少させ、精度を改善できることを指摘した。そのほかにも指令加工速度、張力などを変える多数の加工条件制御方法が提案さ

れている^{3),4)}。一方近藤らはコーナー、およびコーナー R ^{5),6)}の経路修正方式を提案し、またDauwら⁷⁾は加工中にワイヤ変位を計測し、経路修正する方法を開発している。このように従来の制御方式は、経路を修正するか、パワーを調整するものであったが、最近の詳細は不明だが加工条件制御と経路修正を組み合わせた方式も存在するようである。

これらの中では加工中にワイヤ撓みを計測し経路修正する方式が優れた方式と思われるが、特殊

* 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)

な計測装置とNCソフトが必要であり、一部の機械に限られる。一方、加工条件を調整する方式やあらかじめ経路を修正する方式は、多少煩雑になるものの一般ユーザーが用いることは可能である。しかしパワーを制御する方式は、真柄らの実験結果にもあるように改善できる加工精度に限界が見られ、さらにコーナー加工時間が増加するという問題がある。また加工経路を修正する方式は板厚が厚くなった場合に、ワーク上下面と中央面の撓みが異なるため、ワーク上下面と中央面の精度を同時に確保することができないという問題がある。そのほか従来の研究では一般に、

- (A) おもに凸コーナーの精度のみが論じられており、凸コーナー R の精度の議論が不十分である。また凹コーナー、凹コーナー R の精度についてほとんど触れていない。
- (B) 加工条件の修正値や補正経路の計算方法、決定方法が提示されていないため、一般ユーザーが用いる場合には加工条件ごとにトライエンドエラーで値を定めざるを得ない。
- (C) ワーク上下面の加工精度のみで評価されており、ワーク中央面の精度は無視されている。などの問題がある。

したがって本研究の目的は、ワーク上下面と中央面を所望の精度に納めることができ、また一般ユーザーが使用可能なコーナーおよびコーナー R 加工の制御方法と、そのパラメータの決定方法を提案することにある。本研究ではこのために加工条件制御と加工経路修正を組み合わせた制御を行う。これは上述のようにパワー制御のみでは得られる精度に限界があり、他方経路制御のみではワーク上下位置で加工精度が異なってしまうためである。

一般に荒加工中のワイヤは、進行方向のワイヤ円周上の前半面で放電する（前面放電と呼ぶ）ため加工進行と逆方向にたわむが、コーナー加工の場合にはコーナーを過ぎた直後に放電面積が減少した状態で放電するため（片面放電と呼ぶ）、コーナー内側に寄せられるたわみ成分をもつことが知られている^{2),5)}。前面放電におけるワイヤ撓みの

評価は比較的容易であるが⁶⁾、片面放電状態でのワイヤ撓みの評価、予想は現在でも難しく⁷⁾、それゆえできるだけ片面放電状態を避けた加工が望ましい。本報告では凸コーナーで従来と異なるオフセット経路を取ることににより、片面放電の問題を避けて取り扱う。また後述のように、一般に凸コーナー、凸コーナー R が良好でも凹コーナー、凹コーナー R が良好になるとは限らない。ここではコーナー、コーナー R 加工を、凸コーナー、凸コーナー R 、凹大円弧コーナー、凹コーナー、凹小円弧コーナーの5つに分けて考えることとし、本報告では凸コーナー、凸コーナー R の加工精度の改善方法について述べる。

2. 加工経路の修正方法

2.1 凸コーナーのオフセット経路と修正経路

従来凸コーナー加工においては一般にFig.1(a)の一点鎖線のオフセット経路が取られていた。そのため例えば破線の修正経路が提案¹⁾されている。この方法は撓みぶん過切削の後、なだらかにもとの経路に復帰するものであるが、この戻りの経路をどのように定めるべきかは実験的に定める必要があり、実用的とは思われない。またコーナー R の場合へそのまま拡張できない。

これに対し(b)のようにオフセット経路をコーナー頂点を中心とした円弧とすると、幾何学的には片面放電にならないため、破線のように修正経路を定めることができる。すなわち加工経路の接

Fig.1 Corner path control methods

Fig.2 45° corner shape cut with control ($2H=20mm$, middle surface)

線方向にワイヤ撓み分だけ常にガイドを進ませて加工する。例えばコーナー加工の場合には、(b)の破線で示すように、直線部で撓みぶん過切削の後、コーナーの頂点を中心とした円弧を描き、次の経路に移行すればよい。これは近藤⁶⁾により提案された方式で、円弧加工のための方式であるが、円弧半径を溝幅の1/2にすればコーナー加工に適用することができる。すなわちコーナー加工のオフセット経路をFig.1(b)の一点鎖線のように取れば破線の経路補正を使うことができる。またこのようにすると、凸コーナー加工と凸コーナーR加工を同種のものとして取扱うことが可能になり、全体の制御を簡素化することができる。

ここで簡単のため、ワークと上下ガイドが上下対称な配置の場合を考える。Fig.1(b)のA点はワーク上下方向中央面の最大たわみ箇所であり、たわみ δ_A と半径修正量 ε_A の関係は次式で与えられる。

$$\varepsilon_A = \sqrt{R^2 + \delta_A^2} - R \quad (1)$$

またこの補正を行ったとき、ワーク上下面Bでは撓み δ_B が中央面と異なるため、半径誤差 ε_B は次式となる。

$$\varepsilon_B = \sqrt{R^2 + (\delta_A - \delta_B)^2} - R \quad (2)$$

それゆえこの方式ではワーク中央面が正確に加工できても、ワーク上下面の凸形状は膨らむため、上下面の精度が劣化する。逆にワーク上下面に合

わせて加工すると、ワーク中央面の凸形状は過切削となり精度が得られない。これが経路修正方式の本質的問題である。

実際に20mmのSUS304の板を2枚重ねあわせ、ワーク中央面の撓みに合わせて経路修正して45度コーナーを加工した場合のワーク中央面の加工形状をFig.2に示す。使用した加工機はファナック(株)製FTC-SPプロトタイプで、コンデンサ放電であるが、放電側にトランジスタを持つので、現行のトランジスタ電源タイプの加工機と基本特性は類似である。鋭角コーナーを加工したのはコーナー角度が小さいほど誤差が大きく出やすいためである。溝幅は0.3mmなので経路半径を $R=0.15mm$ とした。ワーク中央面のワイヤ撓みの計測値 δ_A (計測法はFig.3で説明する)は $100 \mu m$ であった。Fig.2の(a)は補正なしの場合、(b)は(1)式に従って補正した場合である。(a),(b)を比較すると、経路補正によりある程度コーナー形状は改善されたものの、十分ではない。図の(c),(d)は式(1)の δ_A をさらに増して $150 \mu m$, $200 \mu m$ とした場合である。 $\delta_A=200 \mu m$ では経路補正は過剰であるが、 $\delta_A=150 \mu m$ の場合に極めて良好なコーナー形状が得られた。なお図の(c)を見ると、凸形状が正しくても凹形状はえぐれており、正しい形状とならないことが分かる。これが凸形状と凹形状とに分けて取り扱う理由である。

2.2 凸コーナーRの半径誤差

Fig.3 Test cut form

以上の実験により、近藤らの方式がコーナー加工にも有効であることが分かったが、補正量は式(1)の理論値と一致しない。つぎに円弧半径を変えて各種条件で加工し、理論値との相違を調べた。

Fig.3にテスト加工形状を示す。左右の半円の経路半径を $R=0.5, 1.0, 2.0, 5.0\text{mm}$ とし、マイクロメータにより円弧誤差 ε_R を求めた。経路補正は行っていない。下の十字形状はワイヤ撓みを計測するための加工で、加工後の L_0 を万能投影機で計測し、プログラム寸法+溝幅と L_0 の差がワイヤ撓みの2倍であるとしてワイヤ撓みを求めた。

Fig.4に 0.25ϕ ワイヤで加工した場合の理論誤差との相違を示す。このときの加工条件をTable 1に示す。横軸は円弧半径であり、縦軸の ε_X はワーク中央部の円弧半径誤差 ε_R から撓みによる理論半径誤差 ε_A を引いたものである。本来(1)式の ε_A は補正量であり、理論半径誤差ではないが、その違いが小さいとして(1)式を用いた。Fig.4では円弧半径が小さいほど ε_X が大きくなっており、経路半径 0.5mm で $20\mu\text{m}$ 程度に達する。これはさほど大きな値ではないが、仕上げ加工の場合に円弧部の切り残しや間歇放電の原因となる。Fig.4では印加電圧、コンデンサ容量、加工速度、ワイヤ張力を変えたが、ばらつきが大きく加工条件の影響は明確ではなかった。

Fig.5にワイヤ直径を変えた場合を示す。ワイヤ直径が大きいほど誤差は大きい。図の ε_X と R

Table 1 EDM conditions

	◇	△	▲	□	▣	▽	○	◎	●
V_0	120	85	160	120	120	120	120	120	120
C	1.0	1.0	1.0	0.5	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0
τ_{OFF}	6.5	4.5	17.5	1.0	12.5	9.5	20.5	13.5	7.0
F	2.0	1.8	1.5	2.0	2.0	1.9	1.1	1.55	2.5
T	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	14.7	9.8	9.8	9.8

ϕ : wire diameter, $0.25[\text{mm}]$, work piece: SUS304, 20t, 2plate
 V_0 : charge voltage[V], C : discharge capacitance[μF]
 τ_{OFF} : pulse interval time[μs], F : machining speed[mm/min]
 T : wire tension[N]

Fig.4 Error of radius (0.25ϕ wire)

Fig.5 Error of radius (influence of wire diameter)

を溝幅 D で割ってまとめた結果をFig.6に示す。ほぼひとつの曲線にまとめることができる。このことはこの誤差が主として幾何学的形状に支配される誤差であることを示唆する。この誤差の発生原因としては、円弧部の電界集中¹⁾や、円弧加工時に接線方向力だけでなく、半径方向の力が作用している可能性が考えられる。また加工時の溝幅

Fig.6 Relation between R/D and ε_X/D (D : cut groove width)

方向の振動によってワーク壁面に接近するとき、その度に加工するから、円弧の内側が多く加工されるというメカニズムも考えられる。いずれが原因かは不明であるが、Fig.6から板厚40mmの場合のたわみに依存しない半径誤差 ε_X について次の実験式を得た。

$$\frac{\varepsilon_X}{D} = 0.075 \sqrt{\frac{D}{R}} \quad (3)$$

したがって、経路半径補正量は(3)式の ε_X と(1)式の ε_A を加えたものとなる。なおその半径補正量はFig.2のコーナー加工の場合に適用すると $62 \mu\text{m}$ となる。この値はFig.2(c)の半径補正值 $62 \mu\text{m}$ と一致しており、式がコーナー加工にも適用できることが分かる。

3. 加工条件制御

3.1 許容撓み量

仕上げ加工では、荒加工形状がえぐられるよりも切り残しているほうが望ましいが、凸コーナー、凸コーナー R でワーク上下面に合わせて経路を修正すると中央面の凸形状はえぐれるから、中央面に合わせて経路を補正すべきである。しかしそれでも上下面の切り残しが過大であると仕上げ加工は困難になる。そこでワーク中央面に合わせた経路修正とともに、ワーク上下面の誤差を許容範囲内に収めるための加工条件制御を併用する。

簡単のためのワークと上下ガイドがFig.7に示

Fig.7 Disposition of guides and work piece

すように上下対称な配置とする。板厚を $2H$ 、上下ガイドパンを $2S$ とする。Fig.1(b)において、ワーク中央面に合わせて経路補正を行った場合、上下面の半径誤差は(2)式の ε_B で与えられる。ただしワーク上下面、中央面の ε_X の違いは無視する。

許容半径誤差を ε_{AL} とし、 ε_B の値が ε_{AL} 以下となるように撓みを制御する。 $R \gg \varepsilon_{AL}$ と仮定して(2)式を変形すると、中央面の撓み δ_A についての次の条件式が得られる。

$$\delta_A \leq \frac{\sqrt{2R\varepsilon_{AL}}}{1-x} \quad (4)$$

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すると、ワイヤ撓みの微分方程式は次式で与えられる

$$T \frac{d^2 y}{dz^2} = -p \quad (5)$$

ただし T は張力、 p はワイヤの単位長さ当たりに作用する力で一様とする。(5)式を積分すれば δ_B と δ_A は次式で与えられる。

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

$$\delta_A = \frac{pH(S-H)}{2T} \quad (7)$$

(6)式と(7)式から(4)式の x は次式で計算できる。

$$x = \frac{\delta_B}{\delta_A} = 1 - \frac{H}{2S - H} \quad (8)$$

3.2 加工条件の設定方法

つぎに撓み δ_A が(4)式を満たすように加工条件を設定する。荒加工中のワイヤには放電の爆発による力と静電気力、電磁力、および注水による力が作用する。しかし一般に重要なのは爆発による力であり、その他の力は小さいとされる¹⁰⁾。ワイヤ撓みを減少させる方法としては単発放電エネルギーを小さく設定する方法や、ワイヤ張力を高める方法が考えられる。しかし単発放電エネルギーを変更すると、溝幅が変化する¹¹⁾。またワイヤ張力を増す方式は断線の原因となる可能性があるとともに、調整できる撓み範囲に限界がある。他方、現在のワイヤ放電加工機のほとんどには平均電圧サーボが用いられており、この方式ではオフ時間を変更しても溝幅がほとんど変化しないことが知られている¹²⁾ ので、ここでは円弧経路においてオフ時間を増して撓みを減ずる。

牧野らによれば⁹⁾、荒加工中のワイヤの単位長さあたりに作用する力 p は、単発放電による爆発力の時間積分値を ΔF とすると、次式で与えられる。

$$p = \frac{\pi}{4} \frac{f}{2H} \Delta F \quad (9)$$

ここで f は放電頻度である。この放電頻度は電流波形から求めても良いが、特別な計測器が必要になる。そこで次の方法で算出する。

平均加工電圧 V_w は通常の Tr 加工電源（交流放電など特殊電源を除く）の場合、および本実験に用いた加工機の場合次式で与えられる。

$$V_w = \frac{V_0 \tau_d + V_g \tau_{ON}}{\tau_{ON} + \tau_{OFF} + \tau_d} \quad (10)$$

ここで V_0 は無負荷電圧、 V_g は電流が流れているときの放電電圧、 τ_{ON} は放電時間、 τ_{OFF} は休止時間、 τ_d は平均放電遅れ時間を表す。(10)式から放電頻度 $f = 1/(\tau_{ON} + \tau_{OFF} + \tau_d)$ を求めると、次式が得られる。

$$f = \frac{1}{\tau_{ON} + \tau_{OFF} + [(V_w - V_g) \tau_{ON} + V_w \tau_{OFF}] / (V_0 - V_w)} \quad (11)$$

すなわち、 τ_{ON} 、 τ_{OFF} 、 V_0 、 V_g が与えられれば V_w から(11)式を用いて放電頻度を計算することができる。また τ_{OFF} の値は(11)式を変形し、

$$\tau_{OFF} = f \tau_{ON} \frac{1 + (V_w - V_g) / (V_0 - V_w)}{1 + V_w / (V_0 - V_w)} \quad (12)$$

と与えられる。

したがって計算手順としては、ガイドスパン、ワーク板厚、許容誤差 ε_{AL} と経路半径 R から(4)、(8)式を用いて許容撓み δ_A を求め、さらに(7)式を用いて p の許容量を逆算する。つぎに ΔF が既知であれば(9)式を用いて f の許容量を逆算し、(12)式を用いて τ_{OFF} を決定すれば良い。その後、残された撓み分について前記の経路補正を行う。

なお本実験に用いた加工機の ΔF は牧野らの実験式⁹⁾を変形した次式で与えられる。

$$\Delta F = K_F E_g^{1/2} \tau_{ON}^{-1/3} \text{ [N} \cdot \text{s]} \quad (13)$$

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

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

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

ここで、 K_F は実験定数、 E_g は放電エネルギー[J]、 τ_{ON} は放電時間[s]、 C はコンデンサ容量[F]、 V_0 は充電電圧[V]、 V_g は放電電圧[V]、 L は放電回路のインダクタンス[H]を表す。

この実験式は加工電源方式によって異なるため、一般に他の機械には使用できないが、(13)式に見られるように、 ΔF は単発放電エネルギーと放電時間の関数であり、オフ時間や板厚、張力の影響はほとんど無視できる。したがって例えば任意の2枚の板を用い、実加工条件（オフ時間、板厚、張力は異なって良い。）でFig.3のような十字部分を加工し、ワーク中央部の撓み δ_A を計測する。つぎに δ_A から(7)式を用いて p を逆算し、またこの加工中の f を(11)式を用いて求め、(9)式に代入すれば ΔF を逆算することができる。一度求めてしまえば板厚、張力、オフ時間に関係なくその値を用いることができる。

4. 板厚の影響

Fig.8からFig.10に実際に上記の手順で円弧経路の加工条件と加工経路を修正し、板厚を変えてSKD11を加工した場合のコーナー形状を示す。許容誤差は $15\mu\text{m}$ とした。Fig.8は板厚20mm(10mm厚さの板2枚)、Fig.9は40mm、Fig.10は80mmを加工した場合である。加工条件がFig.2と異なるにもかかわらず、板厚20mm、40mmではワーク上面、中央面ともに精度は良好である。しかし板厚80mmでワーク上面は良好であるが、中央面に凸コーナー形状のだれが観察される。

Fig.11, Fig.12, Fig.13に各板厚で上記制御を用いて経路補正と加工条件制御を行い、Fig.3の円弧を加工したときの精度を示す。板厚20mmでは幾分過補正であるが、板厚80mmでは上面は膨

らみ、中央面は過切削になって、小円弧半径の場合に上下面と中央面の差が許容誤差を越えている。これは、式(4)の導出で無視したワーク上下面の ε_X とワーク中央面の ε_X の相違が、厚板では大きくなったためと思われる。

荒加工後の仕上げ加工では、上下面の凸形状が多少膨らんでも中央面は過切削とならないほうが望ましいので、中央面を正確に加工するために、Fig.11, Fig.12, Fig.13をもとに板厚の影響を考慮して(3)式を修正し、次の実験式を得た。

$$\frac{\varepsilon_X}{D} = (0.043 + 0.0018H) \sqrt{\frac{D}{R}} \quad (14)$$

ただし板厚は $2H[\text{mm}]$ である。この式はFig.13に見られるような厚板の場合のワーク上下面と中央面の精度の違いを小さくすることはできないが、

Fig.8 Corner shape cut with a combined path and power control ($2H=20\text{mm}$)

Fig.9 Corner shape cut with a combined path and power control ($2H=40\text{mm}$)

Fig.10 Corner shape cut with a combined path and power control ($2H=80\text{mm}$)

Fig.11 Error of radius after cut with a combined path and power control ($2H=20\text{mm}$)

Fig.12 Error of radius after cut with a combined path and power control ($2H=40\text{mm}$)

(1)式と併用することにより、各板厚におけるワーク中央面の正確な補正経路を与える。この実験式はワーク材質により異なる可能性もあるが、鉄系材料の荒加工精度としては実用的な精度を持つと予想される。

5. 結 論

凸コーナー、凸コーナー R の荒加工精度の改善のため、加工条件制御と加工経路制御を組み合わせた方式を提案し、良好な精度を得た。また制御に必要な各種パラメータの計算式を示した。この方式の考えは次のとおりである。

- 1) 凸コーナーにおいては従来のオフセット経路方式ではなく、コーナー頂点を中心とする円弧経路を採用する。
- 2) ワーク中央面の形状が所望形状となるように経路補正することを前提として、ワーク上下面の膨らみが所望精度内に入るように許容撓みを計算し、オフ時間を調整する。
- 3) ワーク中央面の形状が所望形状となるように、近藤らの経路補正方式を用い、2)で残った撓みによる誤差分を修正する。
- 4) しかし近藤らの経路修正量では不足であるため、式(14)の実験式を用いてさらに補正する。

なお本実験の結果、簡単な撓みの理論では説明できない半径誤差が見られ、これは厚板になるほど(ガイドから離れるほど)大きくなった。その原因についてはさらに検討が必要である。

Fig.13 Error of radius after cut with a combined path and power control ($2H=80\text{mm}$)

参考文献

- 1) W.L.Dekeyser and R.Snoeyers: Geometrical Accuracy of Wire-EDM, the 9th Int. symp. on ElectroMachining, 1989, pp.226-232
- 2) 真柄, 弥富, 山田, 小林: ワイヤ放電加工における形状精度に関する研究(第1報) - 荒加工における工作物角部(コーナー部)加工精度の向上, 電気加工学会誌, Vol.25, No.49 (1992), pp.23-32
- 3) 例えば, 井上: ワイヤカット放電加工方法, 特開昭51-85589
- 4) 例えば, 小原: ワイヤカット放電加工装置, 特開昭57-66827
- 5) 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
- 6) 近藤ほか: ワイヤカット放電加工における加工軌跡の補正方法, 特開昭51-43296
- 7) D.F.Dauw and I.Beltrami: High Precision Wire EDM by on-line Wire Position Control, Annals of the CIRP, 1994, 43(1), pp.193-197
- 8) 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
- 9) 小原, 大住, 牧野: ワイヤ放電加工のワイヤ変位計測 - 第2報 単発放電衝撃力と撓みの関係 - 1994年度精密工学会秋季大会講演集, pp.271-272
- 10) R.Panshow: Über die kräfte und ihre Wirkungen beim electroerosiven Schneiden mit Draht-electrode, Dissertation, T.U.Hannover, (1974)
- 11) 小原, 上脇, 大住: ワイヤ放電加工の加工精度に関する基礎的研究 - 第1報 荒加工の溝幅とワイヤ振動振幅, ギャップの関係 -, 電気加工学会誌, Vol.32, No.70 (1998), pp.16-23

(1998年6月29日受付)