研 究

ワイヤ放電加工における形状精度に関する研究（第2報）

— 仕上加工における工作物角部（コーナ部）加工精度の向上 —

真柄卓司* 弥富 剛* 山田 久* 小林和彦*

Study on machining accuracy in Wire-EDM

— Improvement of machining accuracy of corner parts in finish-cutting —

Takuji MAGARA, Tsuyoshi YATOMI, Hisashi YAMADA and Kazuhiko KOBAYASHI

Abstract

This paper describes a detailed research investigation on improvement of machining accuracy of corner parts in finish-cutting of Wire-EDM.

In finish-cutting (second cutting), forces by discharge are small in comparison with those of rough-cutting (first cutting) because of its small energy of discharge, so that the reason of corner shape errors may not be bends of wire electrodes. From this point of view, it is reasonable that there are some other reasons for corner shape errors in finish-cutting.

In this paper, the machining feed speed at corner part can be simulated by considering changes of removal thickness of finish-cutting. Shapes of corner parts after finishing can be also estimated by using the equation of side-gap integration effect. Non-linear control at corner parts improves accuracy of corner parts, and it corresponds to the result of preestimation in its trend.

1. 緒 言

前報¹⁾では、工作物角部（コーナー部）の荒加工（1st cut）においてワイヤのたわみを除去することによりコーナー部だれを低減する方法について報告し、荒加工におけるコーナー部加工精度が改善されることを示した。一方、高い勘合精度が要求される高精度金型などの加工においては、コーナー

* 三菱電機名古屋製作所

部形状精度として $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 以下が求められることも多く、コーナー部を含めた形状精度および加工面性状を向上する方法としてセカンドカット法による仕上加工を行うのが一般的である。

仕上加工を含めたワイヤ放電加工においては、加工中の極間電圧を平均化した電圧が一定となるようワイヤ電極送り速度（軌跡移動速度）の制御を行う。平均電圧は平均加工間隙に対応するものであるため、平均電圧を一定に制御することは、加工間隙を一定に保ち、加工後の形状精度を確保することを目的としている。しかしながら、こうした平均電圧一定制御により仕上加工を行っても、コーナー部など除去量が局所的に変化するような加工では、仕上加工後のコーナー部形状に数 μm 程度の誤差が生じる場合が多い。工作物板厚が薄く、加工エネルギーが小さな仕上加工においては、ワイヤ電極に作用する加工反力は小さいものと考えられるため、上記の形状誤差はワイヤ電極のたわみ以外の誤差要因に起因している可能性がある。

本報では、仕上加工におけるコーナー部の形状精度を向上することを目的とし、コーナー部加工における形状誤差発生要因について考察するとともに、コーナー部の加工制御方法について検討する。

2. 仕上加工における電極側面間隙

2.1 仕上加工における形状修正能力

前報¹⁾で述べたように、荒加工におけるコーナー形状誤差はワイヤ電極のたわみによるものが支配的であったが、放電反力の小さな仕上加工においてはこうしたワイヤ電極のたわみ量は比較的小さいものと考えられる。例えば、工作物板厚 60mm 、ワイヤ張力 $17.6\text{N}(1.8\text{kgf})$ 、加工速度 $0.196\text{g}/\text{min}$ ($100\text{mm}^2/\text{min}$) の加工におけるワイヤのたわみ量は $40\ \mu\text{m}$ 程度であるが¹⁾、仕上加工における加工速度は通常 $0.004\sim 0.008\text{g}/\text{min}$ 程度であり、たわみ量は $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 程度と推定される。よって、ここではワイヤ電極のたわみの影響は小さいものと仮定し、仕上加工 (2nd cut) における他の形状誤差要因について検討を試みる。

仕上加工においては極間の平均電圧が一定となるようワイヤ電極送り速度が制御されるが、その際加工位置の違いによりワイヤ電極送り速度のばらつきが発生し、加工面形状のうねりによる形状精度の劣化が見られる場合がある。このような現象は、加工テーブルの位置決め精度や加工機構造体の熱変形による影響などを無視し得る程度にまで低減した場合においても発生する。

図1は、前加工面での形状が変動している場合についての形状修正能力についての実験方法を示したものである。ここでは、図に示すように、あらかじめ $5\ \mu\text{m}$ の段差をつけた面に対して平均電圧一定サーボによる仕上加工を行い、加工後の形状を測定することにより形状修正能力を検定した。図

図1 形状修正能力の実験方法

図2 仕上加工速度の変化

2に本実験における仕上加工中のワイヤ電極送り速度を、図3に仕上加工後の形状測定結果を示す。図より、仕上加工時において平均電圧が一定になるよう制御されているにもかかわらず、加工後の形状は前加工面の段差に対して逆転した形状となっていることがわかる。このように、平均電圧一定サーボによる加工においても、除去量の変化による形状誤差の発生が確認されることは、仕上加工による形状修正を行う上で、平均電圧一定サーボが必ずしも十分ではない場合があることを示している。

2.2 電極側面放電の積分的作用による側面間隙の拡大

同一電気条件での仕上加工においては、ワイヤ電極送り速度が速いほど側面間隙は減少し、逆に、ワイヤ電極送り速度が遅いほど側面間隙は増大することが経験的に知られている。また、過去の研究によれば、荒加工において板厚が変化した場合、平均加工電流が一定であっても加工溝幅すなわちワイヤ電極の側面間隙は板厚の増加とともに増大することが報告されている²⁾。以上の点から、(2.1)にて観察された段差形状の逆転現象は、除去量の変化に伴ってワイヤ電極送り速度が変化し、その結果ワイヤ電極側面間隙 δ_s に差が発生することによるものと推測される。

図4に示すように、電極側面間隙 δ_s は電極が放電加工を行いながらある送り速度をもって移動した結果として形成されるものであり、その値は経験的に除去量 L 、ワイヤ電極送り速度 u （電極移動

図3 仕上加工後の段差形状

図4 仕上加工における電極側面間隙

速度)により変化する。以下、側面間隙を決定する要因、すなわち電極放電領域における放電の積分的作用について検討を試みる。

いま、ワイヤ電極は図5のように x 方向に u の一定速度で移動し、このときのワイヤ各部の加工間隙距離は時間によってかわらないとする。また、電極単位面積 ds あたりの放電による単位時間あたり加工量 dw は加工間隙・加工面積により変化し^{3),4)}、次式で与えられるものとする。

$$\frac{dw}{ds} = k \cdot L^{\alpha} \cdot (1 - \delta / \delta_{\max}) \quad (1)$$

ここで、 k : 係数

L : 除去量

α : 加工面積の影響係数 ($0 > \alpha > -1$)

微小部分 $R \cdot d\theta$ における加工量は、

$$dw = k \cdot L^{\alpha} \cdot (1 - \delta / \delta_{\max}) \cdot R \cdot d\theta \quad (2)$$

図より、

$$dw = u \cdot dy \quad (3)$$

ここで dy はワイヤ電極に対向するワーク表面の y 方向微小距離であり、

$$y = (R + \delta) \sin \theta \quad (4)$$

であるから、これを微分し、

$$dy = d\delta \cdot \sin \theta + d\theta \cdot (R + \delta) \cos \theta \quad (5)$$

よって、(2), (3), (5)式より、

$$u(d\delta \cdot \sin \theta + d\theta \cdot (R + \delta) \cos \theta) = k \cdot L^{\alpha} \cdot (1 - \delta / \delta_{\max}) \cdot R \cdot d\theta$$

まとめると、

$$\frac{d\delta}{d\theta} = \frac{k \cdot L^{\alpha}}{u} \cdot (1 - \delta / \delta_{\max}) \cdot \frac{R}{\sin \theta} - (R + \delta) \cdot \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \quad (6)$$

よって、(6)式の微分方程式を、Runge-kutta法を用いて $\theta = \pi/2 - \theta_0 \rightarrow \pi/2$ の範囲で数値積分することにより、電極側面間隙 δ_s を求めることができる。 δ_s の実測結果および計算結果を図6に示す。側面間隙の実測は、図7に示すように単純パンチ形状に仕上加工を施し、加工後の形状寸法

図5 積分的作用による側面間隙形成モデル

を測定することにより求めた。加工は平均電圧一定制御にて送り制御を行い、除去量はパンチごとにオフセット量 H を変更することにより変化させた。側面間隙の計算は、除去量の変化に対する電極送り速度 u を先の実測により求め、(6)式に代入することにより計算した。 k 、 $\delta_{\max}$ についても実測により推定した値を用い、 $\alpha = -0.5$ とした。

図6より、 $\alpha = -0.5$ として計算した電極側面間隙 δ_s は、実測値と傾向的に一致することがわかる。図において除去量が小さい場合に側面間隙がゼロに近くなっているが、これは平均電圧一定制御によって電極送り速度が非常に速くなったためである。このような状態においてはワイヤ電極のたわみの影響が増加していることも考えられるが、電極送り速度が適性範囲にある状態では、仕上加工後の加工面の真直方向精度(太鼓形状)は良好であったことから、ワイヤ電極のたわみ・振動の影響は少ないものと考えられる。

以上の結果から、仕上加工においては除去量が大きくなるほど電極放電領域での積分的作用が増大し、電極側面間隙は拡大されることが確認できる。これは、平均電圧を一定に制御した加工においても、コーナ部分での除去量 L の変化や仕上加工前の面(被加工面)のうねりなどに対して、数 μm 程度の形状誤差が発生する可能性があることを示唆している。

3. コーナ部仕上加工における除去量の変化

3.1 工作物内側角部(インコーナ部)における除去量変化

コーナ部においては除去量が増えるため、電極側面間隙も変化し、コーナ部形状精度劣化の一因となることが予想される。また、除去量変化が加工送りサーボの応答性と比較して急激な場合、短絡によるハンチングなどの発生も考えられる。ここでは、仕上加工におけるコーナ部での除去量変化を幾何学的に導出する。

図8に示す工作物内側角部(インコーナ)の仕上加工において除去量の変化を求めてみる。ここで

図6 除去量による側面間隙の変化

図7 電極側面間隙の測定方法

は、単位時間あたりの加工量（面積）をワイヤ中心の移動速度で割ったものを除去量として定義する。また、コーナ部での除去量を概算するため、放電間隙は無視して考える。

図より、インコーナ部での除去量はワイヤ電極が円弧軌跡に入る手前のB区間 ($O_1 - O_2$) において急激に変化し ($L_1 \rightarrow L_2$)、円弧移動区間 ($O_2 - O_D$) では一定となる ($L_2 = L_3$)。さらに加工が進行し、円弧終了直前のD区間 ($O_D - O_4$) において除去量は減少し ($L_3 \rightarrow L_4$)、直線加工部であるE区間ではA区間と同一の除去量に復帰する。

除去量増加区間（B区間）での除去量 L_B は、

$$L_B = R + r' - \{r^2 - [2R \cdot L_B - L_B^2]^{1/2} - x\}^{1/2} \quad (7)$$

を解くことにより求められ、また B 区間距離 B は、

$$B=[R^2-(r-r')^2]^{1/2} \quad (8)$$

となる。

ここで、 R はワイヤ電極半径、 r は仕上加工前の面（被加工面）の円弧半径、 r' はワイヤ電極中心の円弧軌跡半径を示す。

つぎに、除去量減少区間 (D 区間) での除去量 L_D および D 区間角度 θ_0 は、

$$L_D = R + r' - (x_p^2 + y_p^2)^{1/2} \quad (9)$$

ただし, $x_p = \frac{r + a \cot \theta}{\tan \theta + \cot \theta}$

$$y_p = \frac{r + a \cot \theta}{\tan \theta + \cot \theta} \cdot \tan \theta$$

$$a = r' \cos \theta - [R^2 - (r - r' \sin \theta)]^{1/2}$$

$$\theta_0 = \sin^{-1} \left(\frac{r^2 + (r')^2 - R^2}{2r \cdot r'} \right) \quad (10)$$

図8 円弧インコーナ仕上加工のモデル

図9は円弧インコーナ仕上加工を想定し、直線部除去量 L_0 が $40\mu\text{m}$ で加工した際のインコーナ除去量変化を計算したものである。除去量はコーナ入口約 $80\mu\text{m}$ 手前より増加し始め、コーナ部では直線部の1.8倍の除去量となる。コーナ終了後 $65\mu\text{m}$ 手前より除去量は減少を始め、最終的に直線部の除去量 L_0 に復帰する。

図9 円弧インコーナ仕上加工における除去量変化

図10 円弧コーナ半径と除去量の変化率

図10は $\phi 0.05 \sim 0.3$ 電極について直線部除去量を一定($12 \mu\text{m}$)とした場合における直線部除去量 L_0 とコーナ部除去量 L_3 の比率 α を示したものである。いずれのワイヤ径についてもコーナ半径が小さくなるほど除去量変化率 α は大きくなるが、ワイヤ電極径が大きいものほどその傾向が著しい。すなわち、ワイヤ径に対してコーナ半径が小さくなるほど除去量の変化は大きくなる。

インコーナ部の仕上加工においては、加工部分(側面部分)でのワイヤ表面部はワイヤ中心より円弧移動半径が大きい。このため、ワイヤ表面の見かけの移動速度(以下、ワイヤ周速度とする)はワイヤ中心速度より大きくなる。この場合、ワイヤ周速度が大きくなった分だけ単位時間あたりの加工量が増大することになるが、これは上記のインコーナ部における除去量の増大と結局は同じことを示す。この点について検討してみる。

まず、円弧移動中の除去量は(7)式を $x=0$ の条件で解けば良いから、

$$L_B = R + r' - [r^2 - \{(2RL_B - L_B^2)^{1/2}\}^2]^{1/2}$$

$$\therefore R + r' - LB = [r^2 - (2RL_B - L_B^2)]^{1/2}$$

両辺自乗し、整理すると、

$$L_B = \frac{r^2 - R^2 - r'^2 - 2Rr'}{2r'}$$

図8より、 $r = r' + R - L_0$ だから、

$$L_B = L_0 \cdot \frac{r' + R - L_0/2}{r'}$$

よって、インコーナ部における除去量変化率 α は、

$$\alpha = \frac{L_B}{L_0} = \frac{r' + R - L_0/2}{r'} \quad (11)$$

図11 直角アウトコーナ仕上加工のモデル

図12 直角アウトコーナ仕上加工における除去量変化

(14)式の右辺は、ワイヤ中心速度とワイヤ周速度との比率となっている。すなわち、

$$\alpha = \frac{\text{円弧移動時の除去量}}{\text{直線移動時の除去量}} = \frac{\text{円弧移動時のワイヤ周速度}}{\text{円弧移動中のワイヤ中心速度}}$$

$$= \frac{\text{円弧移動時のワイヤ周速度}}{\text{直線移動中のワイヤ周速度}}$$

となり、インコーナ部における除去量変化率 α は、インコーナ部におけるワイヤ周速度の変化率と一致する。

除去量増加区間（B区間）や減少区間（D区間）の除去量・区間距離は(7)～(10)式を用いて計算する必要があるが、円弧運動時（C区間）における除去量（ $=L_B$ ）だけが必要な場合は上記の(11)式を用いて簡単に求めることができる。

3.2 工作物外側角部（アウトコーナ部）における除去量変化

図11に示すように、工作物外側角部（アウトコーナ）での除去量は、ワイヤ電極位置がA区間においては一定であるが、B区間（ O_1-O_2 ）において急激に減少し、 O_2 点にてゼロとなる。さらにC区間（ O_2-O_3 ）においてゼロのまま一定であった除去量 L は、D区間（ O_3-O_4 ）において急激に増加し、 O_4 点にてA区間と同一の除去量に復帰する。

除去量減少区間（B区間）での除去量 L_B および B 区間距離 B は、

$$L_B = R - (R^2 - x^2)^{1/2} \quad (12)$$

$$B = (2R \cdot L_0 - L_0^2)^{1/2} \quad (13)$$

除去量増加区間（D区間）での除去量 L_D および D 区間距離 D は、

$$L_D = [R^2 - (R - y)^2]^{1/2} - R + L_0 \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
 D &= R - y_0 \\
 &= [R^2 - (R - L_0)^2]^{1/2}
 \end{aligned} \tag{15}$$

図12はアウトコーナ仕上加工を想定し、直線部除去量 L_0 が $40\mu\text{m}$ の場合の除去量変化を計算したものである。除去量はシャープエッジ先端の約 $70\mu\text{m}$ 手前より減少し始め、エッジ先端部においてゼロとなる。方向転換後は約 $70\mu\text{m}$ の間に除去量が増大し、直線部除去量 $40\mu\text{m}$ に復帰する。

以上、コーナ部仕上加工においては、インコーナ、アウトコーナともに除去量が必然的に変化することがわかる。

4. コーナ部仕上加工精度の向上

4.1 コーナ部における加工制御のシュミレーション

前述のように、コーナ部においては必然的に除去量の変化が生じ、その結果、加工積分効果による形状誤差が発生することが考えられる。以下、コーナ部仕上加工の加工後形状のシミュレーションを試みる。

コーナ部加工における加工後形状を予測するためには、(3.1～3.2)で求めた除去量 L の変化とともに、コーナ部におけるワイヤ電極送り速度 u を求める必要がある。実加工中のワイヤ電極送り速度 u は、極間に検出した平均電圧をもとに制御装置により演算され、平均電圧が指令値と一致するように制御される。図13に平均電圧一定サーボにおける仕上加工の速度制御ブロック図を示す。

制御装置内のデジタルサーボアルゴリズム $G_s(s)$ は、検出器を通して得られた極間平均電圧 V_g' を指令電圧 V_s と比較し、所定のサンプリング時間ごとにテーブル（電極）の移動指令速度 u' を計算する。ワイヤ放電加工においては、加工の制御ループ内に剛性の低いワイヤ電極を含むため、極間サーボのゲインが高すぎると加工がかえって不安定となりやすい。このため、 $G_s(s)$ は一般的に積分成分を持った伝達関数となるよう制御装置内でデジタル処理がなされる。 $G_m(s)$ は移動指令速度 u' に対す

図13 平均電圧一定サーボにおける仕上加工の速度制御

る駆動系の伝達関数であるが、 $G_s(s)$ の応答性との比較において遅れはほぼ無視できるため、 $u=u'$ と仮定した。また、 $G_d(s)$ は平均電圧検出の平滑化のための遅れであるが、同時に $G_s(s)$ に比較して十分に小さいため、 $V_g'=V_g$ とした。

極間における平均電圧 V_g は、加工板厚が一定の場合、ワイヤ電極送り速度 u および除去量 L によって決定される。放電周波数 f は、単位時間あたりの加工量に比例すると仮定すると、

$$f = k_1 \cdot u \cdot L \quad (k_1: \text{係数}, k_1 > 0) \quad (16)$$

一方、図14のように、加工中の無負荷時間（開放電圧印加時間）を t_d 、パルスON時間を t_{on} 、休止時間を t_{off} 、開放電圧を V_0 、アーク電圧（放電時電圧）を V_a とすると、

$$\begin{aligned} V_g &= \frac{V_a \cdot t_{on} + V_0 \cdot t_d}{t_d + t_{on} + t_{off}} = \frac{V_a \cdot t_{on} + V_0(t_s - t_{on} - t_{off})}{t_s} \\ &= k_2 \cdot f + V_0 \quad (k_2: \text{係数}, k_2 < 0) \end{aligned} \quad (17)$$

(16),(17)式より、

$$V_g(u, L) = \gamma \cdot u \cdot L + V_0 \quad (\gamma: \text{係数}, \gamma < 0) \quad (18)$$

図14 極間平均電圧の計算

図15 加工速度と平均電圧の関係

図16 除去量と平均電圧の関係

図17 加工速度変化に対する平均電圧の応答

図15は定常状態での仕上加工においてワイヤ電極送り速度 u に対する平均電圧 V_g の関係を実測したものであり、図16は除去量 L と平均電圧 V_g の関係を示したものである ($V_0=80$ [V])。図15, 図16の結果から定常加工状態において、(18)式の成り立つことが確認できる。

$G_u(s)$ はワイヤ電極送り速度 u に対する平均電圧 V_g の伝達関数であり、一般に1次遅れとなることが過去に示されている³⁾。図17は除去量 L を一定としてワイヤ電極送り速度 u をステップ状に変化 ($2\text{mm/min} \rightarrow 5\text{mm/min}$: 定速送り) させた際の平均電圧 V_g の変化を測定したものを示したものである。

また、 $G_L(s)$ は除去量 L に対する平均電圧 V_g の伝達関数である。放電間隙の変化に対する放電の時間遅れはほとんど問題とならない程度とされており³⁾、除去量 L の変化は放電間隙の変化と同時であるから、除去量 L の変化に対する平均電圧 V_g の遅れはないと考えられる。

いま、ワイヤ電極送り速度 $u(t)$ に対する平均電圧 $V_g(t)$ の動的特性の評価関数を $\eta(t)$ とすると、図17の結果より $\eta(t)$ は $u(t)$ に対して1次遅れとなるから、

$$\eta(s) = G_u(s) \cdot u(s) = \frac{1}{1+sT_1} \cdot u(s) \quad (T_1: \text{時定数}) \quad (19)$$

(22)式は連続系での式なので、 z 変換を行って離散系に展開する。(19)式に

$$s = \frac{2(1-z^{-1})}{\tau(1+z^{-1})} \quad (\tau: \text{サンプリングタイム})$$

を代入して双一次変換を行うと、

$$\begin{aligned} \eta(z) &= \frac{1}{1 + \frac{2(1-z^{-1})}{\tau(1+z^{-1})} \cdot T_1} \cdot u(z) \\ &= \frac{\tau(1+z^{-1})}{\tau(1+z^{-1}) + 2 \cdot (1-z^{-1}) \cdot T_1} \cdot u(z) \\ \eta(z) \cdot [(\tau + 2T_1) + (\tau - 2T_1) \cdot z^{-1}] &= \tau(1+z^{-1}) \cdot u(z) \\ \therefore (\tau + 2T_1) \cdot \eta_{(k)} + (\tau - 2T_1) \cdot \eta_{(k-1)} &= \tau(u_{(k)} + u_{(k-1)}) \\ \therefore \eta_{(k)} &= \frac{\tau(u_{(k)} + u_{(k-1)}) - (\tau - 2T_1) \cdot \eta_{(k-1)}}{\tau + 2T_1} \end{aligned} \quad (20)$$

(20)式は離散系における V_g の状態方程式となる。

同様に、除去量 $L(t)$ に対する平均電圧 $V_g(t)$ の動的特性の評価関数を $\zeta(t)$ とすると、除去量 $L(t)$ の変化に対する放電の時間遅れは無視できると考えて良く、除去量 L に対する平均電圧 V_g の状態方程式は、

$$\zeta(s)=L(s)$$

$$\therefore \zeta(k)=L(k) \quad (21)$$

V_g の出力方程式は(18)式より,

$$V_g(k)=\gamma \cdot \eta(k) \cdot \zeta(k)+V_0 \quad (22)$$

図18 円弧インコーナ仕上加工における加工速度のシミュレーション

図19 直角アウトコーナ仕上加工における加工速度のシミュレーション

図20 円弧インコーナ仕上加工後の形状予測

図21 直角アウトコーナ仕上加工後の形状予測

(20)～(22)式により，ワイヤ電極送り速度 u および除去量 L の変化に対する離散系でのシミュレーションが可能となる。

図9のインコーナについて，除去量 L の変化を外乱入力として与え，その際の平均電圧 V_g およびワイヤ電極送り速度 u の変化を，(20)～(22)式およびデジタルサーボアルゴリズムによりシミュレートした結果と実測値を図18に示す。なお，ここでは $u = u'$ ， $V_g = V_g'$ と仮定した。

また，図19は図12のアウトコーナについて同様に平均電圧 V_g およびワイヤ電極送り速度 u シミュレーションを行った結果と実測値を示したものである。

インコーナ，アウトコーナともにシミュレーションの結果は実測と良く一致していることがわかる。

4.2 速度補正によるコーナ部仕上加工精度の向上

(4.1)で計算したワイヤ電極送り速度 u のシミュレーション結果および電極側面間隙の計算式(6)を用いてインコーナ，直角ア

図22 コーナ部仕上加工における形状誤差の発生過程

ウトコーナについて加工後形状の予測を行った結果を図20, 図21に示す。

図20からわかるように、インコーナ仕上加工においては、除去量 L の増大に伴ってワイヤ電極送り速度 u が低下するため電極側面間隙 δ_s が増大し、結果としてオーバーカット（加工過多）が発生する。一方、図21に示したアウトコーナ加工においては出口側にアンダーカット（加工不足）が発生するが、これはアウトコーナにおける急激な除去量の減少によりワイヤ電極送り速度が大きくなり過ぎることに起因するものであり、実際の仕上加工後形状の傾向と良く一致する。

工作物板厚 60mmt
ワイヤ電極 $\phi 0.2\text{mm}$

図23 非線形速度制御による直角アウトコーナ精度の改善

図22にコーナ部仕上加工における形状誤差の発生過程を示す。前述のように、コーナ部においては、プログラム半径、ワイヤ電極径、オフセット量などから除去量の変化を求めることができ、この除去量変化に対するワイヤ電極送り速度の変化についてもシミュレーションが可能である。さらには、このワイヤ電極送り速度のシミュレーション結果から、積分効果を考慮することにより仕上加工後の形状の予測を行うことができる。

これらの形状誤差は、従来の平均電圧一定サーボによって完全に除去することは困難であるが、コーナ部において、①非線形な速度制御、②速度制御ゲインの変更、③加工電流の制御、などを行うことにより改善が可能である。図23に一例として、方向転換時のワイヤ電極送り速度が直線加工送り速度の4倍の値以上とならないよう非線形制御を行った場合における、コーナ出口部の形状を示す。制御なしの場合、コーナ出口形状が凸状に張り出しているのに対し、制御ありの場合にはこのような形状誤差が発生していないことがわかる。

5. 結 論

以上、仕上加工についてコーナ部における形状誤差発生要因を検討した結果、以下のような結論を

得た。

- 1) 仕上加工 (2nd cut) における電極側面間隙は、電極が加工を行いながら移動した結果として形成されるものであり、ワイヤ電極送り速度を加味した電極側面放電の積分的作用を考慮する必要がある。
- 2) コーナ部の仕上加工においては加工除去量が増加するため電極間隙も変化し、その結果数 μm 程度の形状誤差が必然的に発生する。
- 3) コーナ部における除去量変化率 α は、コーナ部におけるワイヤ周速度の変化率と一致する。
- 4) コーナ部の除去量変化から、積分効果を考慮した電極側面間隙の計算式を用いてコーナ部における仕上加工後形状を予測することが可能である。また、コーナ部において非線形的速度制御を行うことにより、コーナ部における形状精度が改善された。

参考文献

- 1) 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), 電気加工学会誌, Vol.25, No.49 (1991) 23.
- 2) 弥富, 小林, 田中, 尾崎: ワイヤカット放電加工における最適制御について (第2報), 電気加工学会誌, Vol.14, No.28.
- 3) 黒川: 放電加工の伝達関数, 電気学会誌, Vol.80, No.860 (1960) 571.
- 4) 増沢, 藤野: ワイヤ放電研削における放電面積, 電気加工技術, Vol.9, No.25 (1985) 7.

(1991.10.18 受付)