品質設計による W E D M の性能評価

松田次郎^{*} 富重定三^{**} 田中健一^{*} 矢野 宏^{*}

Evaluation of Performance WEDM by Parameter Design

Jiro MATSUDA, Sadami TOMISHIGE, Ken-ichi TANAKA, Hiroshi YANO

Abstract

The optimum machining conditions of a WEDM are estimated by the parameter design on the basis of Taguchi's method, and the performance evaluation is carried out.

When a dimension is adopted as a characteristic, it is estimated that, by optimizing the average machining voltage and wire speed, the improvement of the accuracy is expected by about 50%, and under the optimum machining conditions machining is done with precision of about $21\mu\text{m}(\sigma)$.

Other results concerning angle show that by optimizing the discharge currents for machining and quiescent time, the improvement of the accuracy is expected by 40%, and similarly under the optimum machining conditions, machining can be done with precision of about $8s(\sigma)$.

* 工業技術院計量研究所

** 熊本県工業技術センター

1. 結 言

ワイヤー放電加工機（以下、WE DMという）は、金型の加工精度の要求が高まりかつ短納期が望まれるようになったことから、その高速度化、高性能化、高機能性に注目され需要を大幅に延ばしている¹⁾。また、新材料の開発分野からは、非接触加工法の面から重要視されている。

このような背景にも関わらず、実稼働したときの動的性能（ここでは、加工物のばらつきの程度と定義する）を、形を創成する基本の加工寸法や角度に着目して検討された例が少ない。たとえば、報告²⁾されているものは加工条件と特性値の平均値の傾向を議論しているもので、加工条件とばらつきの傾向については検討されていない。

本報告では、WE DMの性能評価を品質工学の中心となるパラメータ設計によって、加工寸法と角度を特性値として加工条件とばらつきについて検討し、WE DMの性能を評価したものである。本実験は、ファーストカットによるポンチを試料とした場合である。

2. 実験計画

2.1 実験条件の選定

加工性能を評価するためはじめに制御因子、信号因子、誤差因子を選んだ。制御因子はいずれの水準が良いかの優劣を見きわめるために選ばれるものである。信号因子は、意図的に変化させた量に対して実際の加工試料がどの程度追従して加工されたかを見るためのものである。誤差因子は、WE DMにおいて加工にともなう誤差変動として考慮しておかなければならない誤差要因で、パラメータ設計では最も重要な因子である。各因子の水準と水準値を表1に示す。制御因子のうち、加工液比抵抗は放電現象の難易度と考えると良い。加工流量は、スラッジの除去、ワイヤー冷却効果を検討するためである。電気特性のうち平均加工電圧は本機がサーボ機構を採用しているので、ワイヤーと加工物の間隙を常に一定にコントロールするためのものである。ピーク電流は、加工速度あるいは加工面粗さなどに対する影響を検討するために選定した。各水準値の設定は、ノッチ番号で行ったが、その絶対値は実験後測定したので併せて示した。

誤差因子として、ここでは、加工板厚、ワークの切り出し位置、試料形状を取り上げた。加工では様々な板厚を対象としなければならないことはごく当り前のことであり、そのことによって放電面積が変わってくる。それにともなって特性値が変動することが予想されることから取り上げた。加工物の切り出し位置はその大きさや形状によって、加工開始点が異なる。また、ワイヤーの経路も誤差と考えておかなければならない。つまり、X-Yテーブルの位置制御の精度が誤差として目的特性をばらつかせると予想したものである。つぎに、性能評価のための試料形状は重要な要素であるが、これについては2.2節の試料形状で述べる。

本報告では信号因子が2種類ある場合で、両者を同時に変化させて加工した。実験機はM社製（DWC

表1 加工実験の因子とその水準値

制御因子 L_{18} へ割付け		水準値			単位
		1	2	3	
加工液比抵抗	A	17	10	--	k Ω cm
加工液流量	B	8	6	4	l/min
無負荷電圧	C	3 78.5	4 82.5	5 87.1	ノッチNo. V
ピーク電流	D	5 19.5	7 20.4	9 30.7	ノッチNo. A
休止時間	E	6 8.09	7 9.36	8 10.8	ノッチNo. μ S
平均加工電圧	F	50	47	44	V
ワイヤ張力	G	5 5.88	6 7.06	7 10.3	ノッチNo. N
ワイヤ送り速度	H	7 7.0	6 8.7	5 10.7	ノッチNo. m/min

誤差因子 L_4 へ割付け		水準		単位
		1	2	
加工板厚	O	16	20	mm
加工形状	P	順	逆	--
ワークの取付位置	Q	中央	端部	--

信号因子と水準値

水準値 信号因子	1	2	3	単位
面間寸法	15	30	45	mm
角度	5	10	15	度

固定因子

加工材料 : SKD11 HRC60
 オフセット量 : 0mm
 F値 : 1,000mm
 プリテンション : 7ノッチ
 巻取りテンション : 10ノッチ
 安定回路A : 3ノッチ
 安定回路B : 6ノッチ

90 PF-CNC1), 加工電源G10F, 制御装置W5Fのシステムで, 高速加工機仕様ではなく, 高精度仕様となっている。母材はSKD11(250×300)を真空焼入れ(HRC59~61)したものである。使用したワイヤーは黄銅の ϕ 0.2mm, ワイヤーとガイドとのクリアランスは0.03mmである。ワイヤー支点間距離は加工板厚にプラス1mmである。

実験は制御因子を L_{18} の直交表, 誤差因子を L_4 の直交表に割り付け, 両者の直積の形で72通りの異なる条件で加工実験を行った。なお, WE DMは, 恒温室に設置され, 終日 $20^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ でコントロールされていることから, 環境における熱的变化は少ないと考えてよい。

2.2 試料形状

加工性能を評価するためには, どのような形の試料を加工するかが重要な課題となることはすでに述べた。換言すれば信号因子をいかに設定するかということでもある。本機は, X-YテーブルをNC制御(セミクロズド方式)しているので, そのことを考慮し図1のような基本形状を選定した。ここで $L_1 \sim L_3$ は寸法の信号因子の水準を表し, $\theta_1 \sim \theta_3$ は

図1 基本形状

角度の信号因子の水準を表す。つまり、試料形状は信号因子として選んだ寸法と角度の組合せで決まる。寸法と角度それぞれの3水準の組合せは共に3の階乗、つまり6通り存在する。寸法と角度との組合せによって形が決まるのでそのことを考慮すれば、3の階乗の積、つまり36通りの組合せができる。寸法と角度の組合せをたとえば小、中、大と変えたものを順、それに対して、大、中、小と変えたものを逆とすれば、形を創成する工程は2通りとなる。これを誤差因子とすれば、72通りの全く異なる試料が加工できることになり、これが表1でわりつけた72組の試料と対応する。その1部を写真1に示す。母材

写真1 加工試料の形状の一例

のワイヤ通し穴の位置は、縦寸法(300mm)を4等分する位置と、横寸法(250mm)の片側の辺から50mm, 130mmの位置との交点、計6箇所に通し穴を加工した。その位置は、それぞれの試料の加工開始点となっており、写真1に示したように、試料形状が異なっても同様である。この様に決定した試料形状について、付属の自動NCテープ作成機でテープを作りWE DMに記憶させた。試料は、設計値の中心を通り加工されるので、ワイヤーとガイド径の和の1/2を補正量として考慮し測定値に補正を加えて、加工評価のためのデータとした。

3.3 特性値の扱い方

加工された試料について、基本的には三次元座標測定機によって加工された平面の測定をした。すなわち、加工面を格子状に分割し、その交点(15点)を入力して最小2乗法によってデータ処理し平面を決定した。図1の上面の寸法20mmの平面を基準面とし、隣接する面についても同様な手順で面を決定した。そして順次決定された面と面の交線間の長さを加工した面の寸法とした。角度についても基準面からの角度を測定値とした。角度の場合には、測定される値は累積されることから、加工評価のために隣接角度に変換し、それを使ってSN比 η を求めた。SN比は誤差因子を割りつけた直交表 L_4 毎に、ゼロ点比例式のSN比 η を求めたが、そのための分散分析(偏差値)の一例を表2に示した。

信号因子 M の値がゼロのとき加工値 y がゼロであると仮定した場合に、 M と y の関係を式(1)の比例式で求める。特性値と指令値には本来次のような関係があると仮定したことになる。ここで y_i は目的

表2 SN比を求めるための基本となる分散分析表
長さの L_{18} の1行目の場合 $(\mu\text{m})^2$

要 因	f	S	V
β 1次回帰項	1	612.892	612.892
M_{res} 残差	2	3881.504	1940.752°
L 誤差因子	3	85.577	28.526°
G 経路	1	6520.807	6520.807°
e 誤差	17	11246.599	661.565°
e' ○印プール	23	21734.487	944.977°
T 合計	24	22347.380	

特性値, β は感度係数である。

$$\hat{M} = \frac{y}{\beta} \quad (1)$$

信号因子 M_i ($i=1, k$), 目的特性値 y_i ($i=1, k$), 繰り返し r_0 とすれば
全変動 S_T は

$$S_T = \sum y_i^2 \quad (2)$$

感度係数 β は

$$\beta = \frac{\sum (M_i y_i)}{r_0 \cdot \sum M_i^2} \quad (3)$$

1次回帰項の成分 S_β は

$$S_\beta = \frac{\sum (M_i y_i)^2}{r_0 \cdot \sum M_i^2} \quad (4)$$

誤差分散 V_e は

$$V_e = \frac{S_T - S_\beta}{(r_0 \cdot k) - 1} \quad (5)$$

であり, SN比を次式で求める。

$$\eta = \frac{\frac{1}{r}(S_\beta - V_e)}{V_e} \quad (6)$$

ただし, r は有効除数で M_i^2 の総和と r_0 の積である。

$$\text{SN比 (dB)} = 10 \log \eta \quad (7)$$

式(7)のSN比は式(5)の誤差分散の選択によって変わるので, ここではワイヤー経路によって生ず

る変動を誤差に含めた場合と、そうでない場合との2通りのSN比を求め検討した。

4. 加工における最適条件の検討

4.1 制御因子の傾向

3章で述べた手続きによって、行き工程と戻り工程の変動を誤差に含めた場合のSN比を特性値にして分散分析を行った結果を表3、4に示す。寸法を特性値にした場合には加工液流量 B 、ワイヤ送り速度 H 、平均加工電圧 F 、休止時間 E の効果が認められた。寄与率は加工液流量 B が30.0%と最も大きく、続いてワイヤ送り速度 H 22.5%、平均加工電圧13.2%である。同じく角度を特性値にした場合、無負荷電圧 C 、ピーク電流 D 、休止時間 E 、平均加工電圧 F 、加工液流量 B に効果が認められ、逆にワイヤ送り速度の効果が認められない結果となった。寄与率はピーク電流 D 21.2%、休止時間 E 21.4%、平均加工電圧 F 15.0%、無負荷電圧 C 12.0%、加工液流量 B 13.4%である。誤差分散は角度を特性値にした場合には、寸法の場合と比較して約4倍大きくなっている。

表3 SN比による分散分析表

寸法を特性値とした場合 単位：(dB)²

要 因	f	S	V	$\rho(\%)$
A加工液比抵抗	1	5.0632	5.0632°	—
B加工液流量	2	74.0424	37.0212	30.0
C無負荷電圧	2	10.1483	5.0741°	—
Dピーク電流	2	3.7172	1.8586°	—
E休止時間	2	20.7005	10.3502	6.0
F平均加工電圧	2	36.7873	18.3936	13.2
Gワイヤ張力	2	3.4360	1.7180°	—
Hワイヤ送り速度	2	57.3933	28.6966	22.5
A×B交互作用	2	10.9283	5.4641°	—
誤差(○印プール)	9	33.2930	3.6992	28.3
T 合計	17	222.2166		100

表4 SN比による分散分析表

角度を特性値とした場合 単位：(dB)²

要 因	f	S	V	$\rho(\%)$
A加工液比抵抗	1	5.5028	5.5028°	—
B加工液流量	2	245.7250	122.8625	13.4
C無負荷電圧	2	224.5477	112.2738	12.0
Dピーク電流	2	370.7302	185.3651	21.2
E休止時間	2	373.4454	186.7227	21.4
F平均加工電圧	2	271.5444	135.7722	15.0
Gワイヤ張力	2	34.9131	17.4565°	—
Hワイヤ送り速度	2	3.5103	1.7551°	—
A×B交互作用	2	67.4638	33.7319°	—
誤差(○印プール)	7	111.3900	15.9129	17.0
T 合計	17	1593.382		100

4.2 各要因の傾向

1) 加工液流量の傾向

図2に加工液流量 B とSN比の関係を示す。寸法の場合には、第3水準の流量が多いほどSN比が大きく、ばらつきが小さい。これは、流量が多いほど放電パルス数は多くなり安定な放電が確保されるためと考えられる。しかし、全体としては第2水準のSN比が最も小さいV字形となった。角度の場合にも同じ傾向を示した。流量は放電によるスラッジの排除、ワイヤ冷却等の目的があるが、わずか2リットルの水準差でSN比が変化することは制御因子として適当な要因でないことを表わしている

ことになる。

図2 制御因子とSN比の関係

2) ワイヤ送り速度の傾向

図3はワイヤ送り速度 H とSN比の関係を示したものである。ワイヤ送り速度が遅いほどばらつきの小さな安定した加工が可能で、SN比はワイヤ送り速度が増すとほぼ直線的に小さくなり、第1水準と第3水準とでは4 dB 相違が認められた。ワイヤ送り速度が増すほど常に新しい電極が供給され安定な放電が行われ、ばらつきが小さいと予想されたが、速度が遅いほど逆にばらつきは小さくなった。角度では効果は認められていない。

図3 制御因子とSN比の関係

3) 平均加工電圧

図4に平均加工電圧 F とSN比の関係を示す。寸法を特性値にした場合を○印で示したが、電圧が低いほど寸法のばらつきは小さくなっており電圧が増加するとともにばらつきも大きくなる傾向を示した。図中の破線で示したものは行き工程と戻り工程それぞれ個別に解析したSN比の傾向である。行き工程

図4 制御因子と SN 比の関係

の方がいずれの水準においても 3～4dB 大きい。つまり、加工工程でばらつきに相違のあることが確認できた。角度を特性値にした SN 比の傾向は、長さの場合と同じ傾向であるが SN 比の勾配が大きくなっている。これらのことは、サーボ機構が放電間隙を常に一定にするよう働き、電圧が低いほど放電が容易になるためである。つまり、単位時間エネルギーは大きくなり安定した加工が行われたためと推測される。ここでは、行きと戻りの差は顕著でないで示していない。平均加工電圧はいずれの場合にも第 1 水準を選択することにより寸法では標準偏差 σ 約 40 μm 、角度では σ で約 1 分で加工できることが明らかになった。

4) 休止時間

図 5 は休止時間 E と SN 比の関係を示す。寸法の場合、休止時間が短い第 1 水準が SN 比が大きく休止時間が長くなるに従い SN 比が小さくなっている。しかし、その差はわずか 2 dB であるから無視して

図5 制御因子と SN 比の関係

良い。角度では、第1水準と第2水準でSN比に変化ないが、第3水準になるとSN比が急激に小さくなった。両方の特性値とも第1水準のばらつきが小さい結果となり、休止時間は短いと放電パルス数・放電エネルギーも増大し安定になる要素があることからSN比が大きくなっているものと考えられる。その場合、長さでは σ ＝約40 μm 、角度で σ ＝約1分であった。

5) ピーク電流

図6にピーク電流 D の各水準とSN比の関係を示す。寸法を特性値とした場合には、いずれの水準においても差異は認められず-34dB(σ ＝50 μm)である。一方、角度については、右上がりの傾向で第3水準が最も安定した加工ができる。水準間においては12dB、 σ で約2分以上の相違がみられた。

図6 制御因子とSN比の関係

5. 補助特性の傾向

5.1 加工速度

加工性能の評価はしばしば加工速度で行われるが、本実験の場合には、加工速度のための信号因子がないので誤差因子を割り付けた L_4 直交表ごとに以下の解析を行い検討する。

全変動 S_T は

$$S_T = \sum y_i^2 \quad (8)$$

一般平均 S_m

$$S_m = \frac{(\sum y_i)^2}{n} \quad (9)$$

誤差分散 V_e は

$$V_e = \frac{S_T - S_m}{n-1} \quad (10)$$

であり， SN 比を次式で求めた。

$$\eta = \frac{\frac{1}{n}(S_m - V_e)}{V_e} \quad (11)$$

$$SN\text{比}(\text{dB}) = 10 \log \eta \quad (12)$$

$$\text{感度 } S(\text{dB}) = 10 \log \frac{1}{n}(S_m - V_e) \quad (13)$$

ここで n は誤差因子を割り付けた直交表のデータ数， y_i はデータである。

以上の手続きによって， SN 比 η と感度 S が制御因子を割り付けた直交表の行，つまり18個求められる。つぎに L_{18} の分散分析を行い制御因子について検討する。表5に SN 比と感度 S の分散分析表を示す。

感度 S は，平均値の傾向を表わ

表5 加工速度の分散分析表

単位： dB^2

すものであるが，ピーク電流 D の効果が顕著で（寄与率で45.5%），ワイヤ送り速度（寄与率8.2%）効果が認められたほかは効果が認められなかった。加工速度の早い条件は，感度 S が大きい D_3, H_1 の組合せとなる。このとき感度 S の推定値は32.4dBとなり，真数に変換すると $41.7\text{mm}^2/\text{min}$ となる。つまり，加工速度を増すにはピーク電流を最適化すれば50%は改善できることになる。一方，ばらつき

SN比の種類		感度 S		SN比 η	
要因	f	V	$\sigma(\%)$	V	$\sigma(\%)$
A加工液比抵抗	1	0.4300°	—	0.9239°	—
B加工液流量	2	5.5314°	—	120.9421	7.1
C無負荷電圧	2	2.4314°	—	71.8859°	—
Dピーク電流	2	69.5709	45.5	145.5910	9.4
E休止時間	2	0.9117°	—	35.7909°	—
F平均加工電圧	2	5.4525	—	306.1545	25.1
Gワイヤ張力	2	4.9571°	—	191.9784	14.0
Hワイヤ送り速度	2	22.9648	8.2	104.9330	5.5
A×B交互作用	2	12.7402°	—	48.3838°	—
誤差（○印プール）		(4.9599)	46.3	(44.7207)	38.9
T 合計	17		100		100

きの指標の SN 比 η は，平均加工電圧（25.1%），ワイヤ張力（14.0%），ピーク電流（9.4%）に効果が認められた。

このことを図7に示す。平均値の傾向からは，ワイヤ送り速度が遅いほど増す傾向ではあるが，ピーク電流の電流が多い方がその効果が顕著で，これまでの知見と一致した。

SN 比 η （ばらつき）は，平均加工電圧が高いほど大きくなり安定した速度が確保される。ワイヤ送り速度は感度 S と同様に遅いほどばらつきが小さくなる。

つまり，加工速度を増すには電流が多いほど効果があり，そして安定な加工速度を確保するには，平均加工電圧を高くワイヤ送り速度の遅い条件の組合せとするのがよい。加工速度の最適条件は B_3, D_3, F_1, G_3, H_1 の組合せとなり，そのときの推定値は48.0 dB，真数で $\sigma = 0.17\text{mm}^2/\text{min}$ となる。

図7 制御因子とSN比の関係

図8 制御因子とSN比の関係
(加工面粗さ)

5.2 加工面粗さ

加工面粗さはワイヤーの走行方向と直角の加工面について測定した。データの実扱いについては、加工面粗さは、WE DMの加工目的から小さければ小さいほど望ましい特性値である。そこで、加工面粗さは以下の手続きによって解析した。

前節と同様に、誤差因子を割付けた L_4 直交表ごとに

$$V_T = \frac{\sum y_i^2}{n} \quad (14)$$

を求め、SN比 η は

$$\text{SN比 } \eta (\text{dB}) = -10 \log V_T \quad (15)$$

と求めた。つまり、平均値の大きさとばらつきを同時に評価することになる。

表6は制御因子を割付けた L_{18} 直交表の分散分析表である。寄与率の最も大きいのはピーク電流 D で寄与率90.4%，続いて加工液比抵抗 A の寄与率3.3%となった。このことから、加工面粗さを小さくしかつ安定な加工面粗さを確保するためには、ピーク電流 D の選択が最も重要であることが明らかになった。このことを図示すると図8となり、ピーク電流 D の小さいほど加工面粗さは小さくかつ安定していることが確かめられた。加工面粗さを小さくするための制御因子とその水準は A_1 , B_1 , D_1 , G_2 の組合せとなり、その推定値は -20.9 dB, 真数に変換すると $11 \mu\text{m} R_{\text{max}}$ となる。

6. 最適加工条件の推定

これらの結果から最適条件を推定すると寸法を評価項目とした場合の組合せは (A_1) , B_1 , (C_3) ,

(D_1), E_1 , F_3 , (G_1), H_1)となり, そのときのSN比は-26.06 dB (標準偏差 σ で約21 μ m)となる。平均的な条件の組合せの第2水準では-35.97 dBとなるのでSN比で1.38倍, σ で3.12倍の改善となる。行き工程と戻り工程を個別に解析した場合には, 効果の認められる要因が若干異なっているが, それぞれについて最適条件を推定すれば, 行き-21.45 dB($\sigma=12\mu$ m), 戻り-22.53 dB($\sigma=13.4\mu$ m)となる。

角度を評価項目とした場合には, (A_1), B_1 , C_3 , D_3 , E_1 , F_3 , (G_1), (H_1)の組合せが最適条件となり, その場合のSN比は53.2 dB($\sigma=8$ 秒)となり, 第2水準での平均的な条件の場合に比較してSN比で1.98倍, σ で20.19倍改善されたことになる。

7. 結 論

品質工学の考え方によってWE DMのパラメータ設計を行い, 加工条件とばらつきの関係を実験的に検討し最適加工条件を推定し性能を評価した。その結果, 次の事が明らかになった。

(1) 加工寸法と角度の2特性の信号因子の組合せにおいて試料形状を作成し, WE DM性能評価の手法を提案した。

(2) 加工寸法と角度を特性値とした場合, 加工寸法はワイヤー経路でばらつきが異なることが確認された。

(3) 加工寸法と角度では, ばらつきを与える要因が異なることを示した。

(4) 最適条件での標準偏差 σ は加工寸法の場合21 μ m, 角度の場合 σ で8秒と推定される。

本研究では, 連続加工における評価について実験の水準を決定していることから, 加工速度は遅くなった。そのため, 材料の歪は逐次解放されながら加工されており, 材料のひずみが本実験の結果に与える影響は少ないと考えている。しかし, 材料の歪に関することがらは, 重要な要因であるので, 加工評価の中でいかに解決して行くべきか今後の検討課題である。

おわりに, 実験試料の測定においては, (株)東京精密, (株)ミットヨから測定機を借用させていただいた。ここに記して深甚なる謝意を呈します。

表6 望小特性の分散分析表

加工面粗さの場合 単位: dB²

要 因	f	V	$\rho(\%)$
A加工液比抵抗	1	1.8582	3.3
B加工液流量	2	0.2762	0.8
C無負荷電圧	2	0.0239°	—
Dピーク電流	2	25.0671	90.4
E休止時間	2	0.1956°	—
F平均加工電圧	2	0.1670°	—
Gワイヤ送り張力	2	0.2494	0.7
Hワイヤ送り速度	2	0.1241°	—
A×B交互作用	2	0.0627°	—
R測定位置	1	0.3060	0.5
誤差(○印プール)	27	(0.0726)	4.3
T 合計	35		100

参 考 文 献

- 1) 斉藤長男:電気加工の展望, 電気加工技術, 10-31(1986)

- 2) 尾崎菊治：ワイヤ放電加工における加工形状精度，計量研究所計測分科会資料集（1987.10）
- 3) 近藤 巖ほか：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，19-37
- 4) 田口玄一：実験計画法（上），（下），丸善（1979）
- 5) 松田次郎ほか：ワイヤー放電加工における加工の評価（1）－実験計画法の適用－，昭和62年度精密工学会秋季大会論文集第3分冊
- 6) 富重定三：ワイヤカット放電加工機の加工技術開発の研究（1），熊本県工業技術センター研究報告，No.24（1986）
- 7) 富重定三：ワイヤカット放電加工機の加工技術開発の研究（2），熊本県工業技術センター研究報告，No.25（1987）

（1989. 1. 20 受付）