研 究

品質工学を応用したマイクロ放電加工の高精度化の検討

若林公宏^{*} 大西章夫^{*} 増沢隆久^{**}

Investigation of Micro EDM Improvement by Quality Engineering

Kimihiro WAKABAYASHI, Akio ONISHI and Takahisa MASUZAWA

Abstract

High quality micro electric discharge machining (Micro EDM) was achieved by so called Quality Engineering. Micro EDM has been known as an excellent microhole machining method, but repeatability in accuracy was not good enough in case of multi-hole machining. In this report, the influence of machining parameters was investigated by Quality Engineering, and the main factors that influence the repeatability were found out.

* 富士ゼロックス(株)生産技術研究所

** 東京大学生産技術研究所

1. はじめに

近年、事務機器の高度化に伴い、インクジェットプリンタ、イオノグラフィックプリンタ、レーザープリンタなどの部品加工を目的とした微細加工に対する要求は年々高まっている。

特に、インクジェットプリンタノズルなどに用いられる微細穴加工においては、マイクロ放電加工法が優れた方法として知られている。¹⁾²⁾しかしながら、多数の穴を連続的に加工しようとする、加工穴径および電極径のばらつきが問題となる。

一方、マイクロ放電加工においては極めて多くの加工パラメータが存在するため、すべての加工条件と精度の関係をj知nることは容易ではない。そこで、多くのパラメータを同時に扱うことができ、かつ加工の安定度を評価する手法として品質工学を用い、加工条件の解析を試みた。その結果、各パラメータが加工の平均値及びばらつきに影響する度合を定量的に把握することができ、高精度化を達成する事ができた。これらの結果を報告する。

2. ワイヤ放電研削 (WEDG) 法について³⁾⁴⁾⁵⁾

マイクロ放電加工による穴加工では、高精度な工具電極の加工が必要となる。例えば、直径15 μm の穴加工のためには、片側約1 μm の放電ギャップを考慮して、 $\phi 13\mu\text{m}$ 程度の電極が必要になる。

この電極加工法には、主にブロック法とWEDG法がある。

ブロック法は、成形ブロックにより電極を放電加工する方法である。しかし、成形ブロックもわずかに消耗する事から、高精度化に限度があった。WEDG法はブロック法の欠点を除き、さらに電極を自動で、かつ高精度に作成する事を目的として開発された。

この方法は、電極加工用の工具として、金属ブロックの代わりに走行ワイヤを用いているのが特徴である。このようにすると、加工には常に新しいワイヤ面が使用されるため、ブロック法のような消耗を考慮することが不要になる。よって、ワイヤガイド位置を精密テーブルによって制御することにより、電極を自動で、かつ高精度に加工することができ、今回の実験ではこの方法を用いた。

WEDG法は、ブロック法と違い、漸近的に精度を追いつ込むことなく一度に高精度を得る加工法である。このため、テーブル、電極位置、ワイヤ走行系など各機械要素の持つ精度が、直接に電極加工精度となってあらわれる。使用したWEDG電極加工機では、電極と加工ワイヤの相対的位置精度にかかわる以下の項目に対して注意を払い、その改造を行った。

- 1) ワイヤガイド位置：ワイヤの走行系をすべてテーブル上に構築してテーブル駆動系との干渉をなくした。
- 2) ワイヤテンション：ワイヤ巻き取りとテンション印加を分離し、ポピンでのワイヤの落込みがテンションに影響を与えないようにした。

3) 電極位置：加工ヘッド構成を熱変形に弱い片持ち型から積み重ね型にした。

3. 実験装置

実験に使用した加工機及び測定に使用した画像解析寸法測定装置を下に記す。

加工機

マイクロ放電穴加工機 : MGED-03 (松下技研製)

WEDG 電極加工機 : MGED-05 (松下技研製, 一部改造)

測定機

画像解析装置 : オムニコン 3500 (ボシュロム)

顕微鏡 : オプチフォト顕微鏡 (ニコン)

対物レンズ : 150倍 (ニコン)

寸法標準 : 蒸着クロム寸法標準 (ボシュロム)

1 画素 : $0.07 \times 0.09 \mu\text{m}$ (対物レンズ $\times 150$ 使用時)

繰り返し精度 : $\pm 0.03 \mu\text{m}$ (σ 値)

4. 品質工学を利用した実験計画および加工パラメータと加工精度の解析^{9) 10)}

4.1 品質工学について

電極加工から穴加工に至る工程には、多くの加工パラメータがある。このように多くのパラメータをそれぞれ単独で検討し、最適な条件の組合せを求めることは事実上難しい。これらのパラメータが精度に与える影響を同時に解析し、最適な条件を求める方法として品質工学を導入した。

品質工学は実験計画法の手法および統計的手法を用いて情報を得る方法である。取り扱うパラメータの数に応じて多元配置、あるいは直交表を選択し、パラメータを割り付ける。そして、それぞれのパラメータについて、実験の意図に応じて条件の値(水準値と呼ばれる)を決定する。実験結果は、それぞれのパラメータについて水準別の平均値とばらつきとして算出される。このようにして、選択したパラメータが結果の平均値とばらつきに与える効果を知ることができる。そして、それぞれのパラメータにおいて最もばらつきが小さくなる水準を採用することで最もばらつきを小さくできる最適条件を決定できる。ばらつきの評価尺度として SN 比(信号対雑音比)を用いる事により、最適条件におけるばらつきを推定する事ができる。

以下、このような手法に従って行った実験の計画および手順について述べる。

4.2 因子の選択

まず、電極加工パラメータとして主要と思われる 13 因子

テンション(2)	: 走行ワイヤのテンション
S/O極性(3)	: 電極の最終引き上げ加工(スパークアウト)時の極性
S/O速度(4)	: 電極の最終引き上げ加工(スパークアウト)時の速度
加工油流速(5)	: 加工ポイントに掛け流す加工液の流量
ワイヤ速度(6)	: ワイヤ走行速度
電極長さ(7)	: 作成する電極の長さ
C(電極)(8)	: 電源回路(CR回路)のコンデンサ容量
送り速度(電極)(9)	: 電極加工時のZ軸送り速度
加工電圧(電極)(10)	: 電極加工機の加工電源電圧
仕上切込み量(11)	: 仕上げ加工時の加工切り込み量
S/O逃げ量(12)	: スパークアウト時の電極からの走行ワイヤ逃げ量
電極種類(13)	: 使用電極材料種類
回転数(電極)(14)	: 電極加工時の電極を回転させる速度

そして、穴加工パラメータとして主要と思われる6因子

加工油種類(穴)(1)	: 穴加工機の加工液種類
加工電圧(穴)(15)	: 穴加工機の加工電源電圧
C(穴)(16)	: 加工電源回路(CR回路)のコンデンサ容量
送り速度(穴)(17)	: 穴加工時のZ軸送り速度
送り量(穴)(18)	: 穴加工時のZ軸送り込み深さ
回転数(穴)(19)	: 穴加工時の電極回転数

を選び出した。これらの因子、および水準の数より、 L_{36} 直交表を選択し、表1のように割り付けた。上記で()内に示した番号は表1の要因番号を示す。そしてこの直交表に従って加工実験を行った。

4.3 実験手順

以下のような実験手順に従った。

- ① 電極加工機により電極を加工し、径を測定する。

電極は、先端から一定距離毎($L=300\mu\text{m}$ の電極では $10\mu\text{m}$ 間隔で30点、 $L=500\mu\text{m}$ の電極では $20\mu\text{m}$ 間隔で25点)に直径を測定しデータとした。測定は電極径、穴径ともに上記の画像解析装置を用いて行った。

- ② 厚さ $25\mu\text{m}$ のSUS 304板に対し、電極1本あたり100個の穴を加工し、そのうち5穴ごと、20個の直径を測定し、データとした。

表 1 電極および穴加工 L 36 直交実験割付け表

№	要 因	1	2	3	備 考
1	加工機油種類(穴)	A社	B社	—	加工油メーカー別
2	テンション	H	L	—	
3	スパークアウト極性	+	—	—	電極の極性
4	スパークアウト速度	5	15	—	($\mu\text{m/s}$)
5	加工油流速	H	L	—	
6	ワイヤ速度	H	L	—	
7	電極長さ	300	600	—	(μm)
8	C(電極)	0	10	47	(pF) コンデンサ容量
9	送り速度(電極)	1	2	3	($\mu\text{m/s}$)
10	加工電圧(電極)	60	80	100	(v)
11	仕上げ切り込み量	1	2	3	(μm)
12	スパークアウト逃げ量	0	0.2	3	(μm) 3は加工無し
13	電極種類	WC, $\phi 0.3$	W, $\phi 0.3$	W, $\phi 0.12$	
14	回転数(電極)	1000	3000	5000	(r.p.m)
15	加工電圧(穴)	60	80	100	(v)
16	C(穴)	10	47	100	(pF) コンデンサ容量
17	送り速度(穴)	1	2	3	($\mu\text{m/s}$)
18	送り量(穴)	50	75	100	(μm)
19	回転数(穴)	1000	3000	5000	(r.p.m)

注) WCは超硬合金, Wはタングステン

4.4 データの解析方法

それぞれの実験から電極径, 穴径の SN 比, および平均値を算出する。これらの値を水準毎に合計して平均すれば, 各要因が平均値, SN 比に与える影響を知る事ができる。 SN 比はばらつきの測度であり, 値が大きいほうがばらつきが小さいことを示す。 SN 比は以下の計算によって得られる。対数値にするのは利得の加法性のためである。

まず, 得られたデータを $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ とすると

全変動に占める平均値の効果 Sm

$$Sm = \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 / n \quad (1)$$

データばらつきによる純変動 St

$$St = y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_n^2 - Sm \quad (2)$$

誤差分散 Ve が

$$Ve = St / (n-1) \quad (3)$$

で与えられる。

本実験で取り扱っている寸法は一定の目標値を持っているため、求める SN 比は望目特性の SN 比とよばれ、以下の計算式で求められる。単位は db (デシベル)である。

$$\eta = 10 \times \log((Sm - Ve) \times (1/n) \times (1/Ve)) \quad (4)$$

4.5 結果

各要因の電極径平均値、および SN 比に対する効果を、それぞれ図1、2に示す。同様に、穴径平均値、および SN 比に対する効果を図3、4に示す。図中、各要因ごとに左から条件1、2、3…の順でプロットした。

4.6 考察

まず、穴明けの加工油種類(パラメータ6, 以下同様)に関しては有意ではなかった。これは、ケロシンタイプを選択した場合に、そのメーカー間に差が生じなかったという事であり、例えば、純水などを使用した場合は有意な差が生じることも考えられる。

走行ワイヤテンション(2)、およびワイヤ走行速度(6)は加工の平均値、安定度にはほとんど影響しない。これは、改造前の特性と大きく異なる点であり、ワイヤ走行系とワイヤガイド位置決めの干渉を排除した効果があらわれている。

スパークアウト速度(4)は電極径に影響があり、これが穴径に影響を及ぼしていると考えられる。また、その極性(3)は電極および穴の SN 比に影響がある。

電極長さ(7)は、電極径の SN 比に大きな影響があるが、穴径の SN 比にはあまり影響が無い。これは、電極が長いと電極の先端で振れの影響が大きくなり、見かけの加工径が細くなる(電極径 SN 比が小さくなる)という現象による。電極

図1 電極径平均値に対する要因効果

図2 電極径 SN 比に対する要因効果

の先端の振れ分と電極の細りの径分の和（実効的な電極径）は、ワイヤ電極の位置で決まるものであり、この電極による加工穴径にはあまり影響が出ない事によるものと思われる。

電極加工および穴加工のコンデンサ容量(8, 16)および電圧(10, 15)は、それぞれの加工の平均値を変化させる要因となっている。特に穴加工のコンデンサ容量(16)および電圧(15)は穴径の平均値には影響するが、 SN 比にはあまり影響を与えない。このことは荒加工、仕上げ加工等の条件設定をこれらの要因を変化させて行った時に、電極径の設定値を対応して変えてやりさえすればよく、ばらつきには特に影響がないことを示しており、重要である。

電極の仕上げ切込み量(11)とスパークアウト逃げ量(12)は穴径の SN 比に大きな影響が有り、穴加工の安定度に極めて有意である事がわかる。

電極種類(13)は、材質とワイヤ径を組み合わせで3つの水準を設定している。材質では超硬とタングステン、径は0.3mmおよび0.125mmである。超硬はタングステンに対し、電極径平均値は小さくなり、穴径は大きくなる。また、電極径の安定度は高いが穴径の安定度に対しては有意でない。材質をタングステンとすれば、径0.3mmのものは電極径、穴径ともに平均値は大きい。しかし、安定度に差は少ない。電極材質はしんちゅう（ワイヤ材料）、SUS304（被加工材料）との放電ギャップ、電極消耗の問題も含んでおり、さらに検討を要する。

電極回転数は、電極(14)および穴(19)のいずれにおいても加工の安定度を左右する要因である。いずれも3000r.p.m.程度が最も高い安定度を示しており、それよりも低速側でも高速側でも安定度は低くなる。低速側では、加工屑の排出の効率低下による安定度低下が考えられる。高速側では、 V 軸受けの

図3 穴径平均値に対する要因効果

図4 穴径 SN 比に対する要因効果

振れまたは振動の影響が増大し、安定度を低下させている事が考えられ、さらに安定度を効果的に上げるためには改善を検討すべき項目である事を示している。

穴加工時の送り速度(17)は、今回の実験の範囲では安定度に差は生じなかった。

穴加工時の送り量(18)は、穴加工の安定度を左右しているが、これも75 μ mが最も安定し、これより短くても(50 μ m)長くても(100 μ m)安定度は低下する。送り量が長い場合になぜ安定度が低下するかは不明であるが、現在のV軸受けに固有の現象である可能性もある。

4.7 最適条件の選択

最適条件は各要因ともに最もSN比が大きい、したがってばらつきが小さい水準の組合せで求められる。今回の実験は穴径と電極径のふたつのSN比が算出されるが、穴径条件と電極径条件が一致しない場合は、SN比の差が大きく有意な条件を選択した。同程度の場合は穴径条件を優先した。

これよりSN比の評価をもとに電極加工/穴加工の最適条件表を作成すると表2のようになる。この表は各要因が平均およびばらつきにどのように影響を与えているか一覧できる。

表2 電極および穴加工最適条件表

No.	パラメーター	電 極		穴		総 合 最適条件	備 考
		平 均	S N比	平 均	S N比		
1	加工油種類(穴)	—	—		1*	1	
2	テンション	*	1		②*	2	穴加工を優先
3	スパークアウト極性	*	1	*	1*	1	
4	スパークアウト速度	*	②	*	1	2	電極加工有意
5	加工油流速		1		1*	1	
6	ワイヤ速度		1		②	2	同程度→低速
7	電極長さ	*	1**	*	1	1	
8	C(電極)	*	①	*	2	1	電極加工有意
9	送り速度(電極)		②*		1	2	電極加工有意
10	加工電圧(電極)	*	1*		1*	1	
11	仕上切込み量	*	2*	*	①**	1	穴加工が有意
12	スパークアウト逃量	*	1*	*	1**	1	
13	電極種類	*	1*	**	3*	1	電極加工有意
14	回転数(電極)	*	②*	**	1	2	電極加工有意
15	加工電圧(穴)	—	—	**	1*	1	
16	C(穴)	—	—	**	3*	3	
17	送り速度(穴)	—	—		3*	3	
18	送り量(穴)	—	—	*	2**	2	
19	回転数(穴)	—	—	*	2**	2	

注1) **は有意, *はやや有意, 無印はあまり有意でない事を示す。

注2) 最適加工条件が電極と穴で異なる場合, 選択した理由は備考に示した。

注3) №1および、№15～19は穴加工条件であり, 電極加工に関係しない要因である。

№2～14は電極加工条件であり, そのまま連続して穴加工実験を行うため, この結果は穴加工に影響する。

4.8 最適条件の工程平均の推定とその確認

以上のような検討から最適条件をとった時の工程全体の SN 比 ($\hat{\mu}$) を計算によって推定することができる¹⁰⁾ すなわち、 SN 比に大きな効果のある主要な因子を取り上げ、「その因子における SN 比の高い水準をとったときに得られる値と平均値との差」を「その水準をとることにより得られるゲイン」として足し合わせる。

電極加工、および穴加工について次の表 3、表 4 のように計算を行った。

表 3 電極加工における SN 比の工程平均の推定

№	パラメーター	水準	SN 比 (db)	ゲイン (db)
3	スパークアウト極性	1	28.15	1.77
4	スパークアウト速度	2	27.66	1.28
7	電 極 長 さ	1	28.43	2.05
10	電 極 加 工 電 圧	1	27.81	1.42
13	電 極 種 類	1	28.61	2.23
14	電 極 軸 回 転 数	2	28.91	2.53
			計 平均値 $\hat{\mu}$	11.28 26.38 37.66

表 4 穴加工における SN 比の工程平均の推定

№	パラメーター	水準	SN 比 (db)	ゲイン (db)
3	スパークアウト極性	1	32.14	1.11
5	電 極 加 工 油 流 速	1	32.23	1.21
11	電極仕上切込み量	1	33.03	2.00
12	スパークアウト逃量	1	32.64	1.62
18	穴加工送り込み量	2	32.24	1.22
19	穴加工軸回転数	2	32.28	1.26
			計 平均値 $\hat{\mu}$	8.42 31.03 39.45

この結果、平均値とゲイン (TOTAL) の和として

電極加工の SN 比は約 38 db

穴加工の SN 比は約 39 db

と推定される。

最適条件にて計算される SN 比が実際に得られるかどうかは、特性値の加法性が成立するか否かによる。これを確認するために、この最適条件での加工実験を行った。

その結果

電極加工の SN 比は平均で38.76 db

穴加工の SN 比は平均で39.06 db

となり、それぞれ約39dbが得られる事が確認された。これは例えば直径15 μm の穴加工を行った場合、 σ 値で $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 以内のばらつきで加工ができたことを示す。

5. まとめ

以上の結果より、微細な領域の多数穴加工において、これまで得られなかった安定した加工が実現できた。また、品質工学の手法が極めて有効であることが分かった。

参 考 文 献

- 1) 増沢, 佐藤, 河田: 微小穴の放電加工について, 電気加工技術, 4, 7, p18~23(1981)
- 2) 佐藤, 水谷, 河田: 微細穴放電加工機, National Technical Report. 31, 5, p105~113(1985)
- 3) 増沢, 藤野: ワイヤEDGによる細軸の加工, 昭和60年度精機学会秋季大会学術講演会論文集
- 4) 増沢, 藤野: ワイヤ放電研削による細軸加工とその応用, 生産研究, 37, 11, p92~95(1985)
- 5) 正木, 増沢, 河田他: 微細軸放電加工機, 昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会論文集
- 6) 増沢: マイクロ加工技術基礎講座「マイクロ放電加工」, 日刊工業新聞社
- 7) 倉藤, 増沢: 超硬合金の放電による微細加工, 電気加工学会誌, 2, 3, p1~16(1968)
- 8) 塚本, 増沢: 放電による微細深穴加工, 昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会論文集 241
- 9) 田口: 実験計画法第3版(上, 下), 丸善
- 10) 田口, 吉沢: 品質工学講座1「開発・設計段階の品質工学」, 日本規格協会

(1990.10.12 受付)