

微細放電加工の高精度化のための加工条件*

(精度重視と能率重視の目的に応じた加工条件の探索)

和合 健**、浅沼 拓雄**、下河邊 秀行***

形彫放電加工機を用いて $\phi 0.25\text{mm}$ の小径針に $\phi 0.1\text{mm}$ 程度の多数個微細穴を開ける場合について、精度重視と能率重視の目的に応じた加工条件を探索した。その結果、目的に応じた入出力関係を設定して直交表実験を行うことで目的に応じた加工条件を求めることができ、能率重視では精度重視に比較して加工時間が $1/3$ に短縮できた。

キーワード：細穴放電加工、加工精度、加工能率、入出力関係

Conditions for Highly Accurate Microprocessing with Electrical Discharge Machining

(Method to determine conditions to assure accuracy and efficiency as a function of target)

Takeshi Wago, Takuo Asanuma and Hideyuki Shimokoube

This study proposes a method to determine the requisite conditions as a function of target to obtain accurate and efficient microprocessing. The target in this study consists of a 0.25-mm-diameter needle in which numerous 0.1-mm-diameter holes are fabricated by sinking electrical discharge machining. By defining input-output relations according to the purpose and conducting orthogonal-array experiments, suitable processing conditions are obtained. When using conditions for efficiency, the processing time was decreased by 67% compared with that obtained when using conditions for accuracy.

key words : sinking electrical discharge machining of minute hole, processing accuracy, processing efficiency, input-output relations

1 緒言

放電加工は加工用電極と加工物の間、所謂、極間に起こさせた放電の作用で、加工物表面層を除去する加工法で、高周波パルス電源により極間に連続的に電圧および電流を流す。トランジスタ電源の場合では、この際のピーク電流値とパルス幅が放電エネルギーの大きさを決定し、単発放電終了後から次の単発放電発生までの休止時間とともに加工速度に影響を与えている。ピーク電流は、大きさにより加工速度が最大となるパルス幅が存在するため、この組み合わせの結果により加工速度は変化する¹⁾。

放電加工の加工原理は非接触での金属加工を可能としており、微細かつ硬質な加工物への加工も可能にした。特に放電加工は付与エネルギー量と放電ギャップの関係が高い線形性を持つため、その二つの特性を制御することで $1\mu\text{m}$ 台の高精度寸法加工が行える。このため高精度な寸法加工が要求される精密金型製作においてマザーマシンの位置付けとなり広く活用されている。一方で加工速度が遅いため生産性に課題があり、加工速度の向上は加工時間の短縮につながるため金型製造におけるリード

タイムの短縮に寄与できる。

ここでは細穴放電加工において、精度と能率の相反する要求に対して精度重視の場合、または能率重視の場合とした目的を分けた細穴放電加工において適切な加工条件探索方法の構築について取り組んだ。

2 実験方法

2-1 実験装置

実験装置は創成放電加工機(三菱電機 EDSCAN8E)を用いた。EDSCAN8E は型彫放電加工機の本体に微細加工電源を搭載した装置であり、加工目的に応じた電源を選択できる。この装置の放電加工を行う際の電気条件は、E パックと呼ばれ、これは加工機械製造者が示す電気条件の最適値である。

2-2 細穴加工での要求事項

図1のとおり、穴開けの対象は $\phi 0.25\text{mm}$ の SUS 材の針とし、針の側面に $\phi 0.1\text{mm}$ 程度の穴を 10 個開けることが指示されている。この場合に高精度と高能率の各加工条件を求める。

* 平成 22~24 年度 基盤的・先導的技術研究開発事業、中東北 3 県公設試技術連携推進会議 (共同研究)

** ものづくり基盤技術第 2 部 (現 素形材技術部)

*** 岩手大学工学部

ここでの要求事項は、「φ0.25mm程度の非鉄材小径針側面の先端付近に高精度or高能率で10個の穴を開けること」

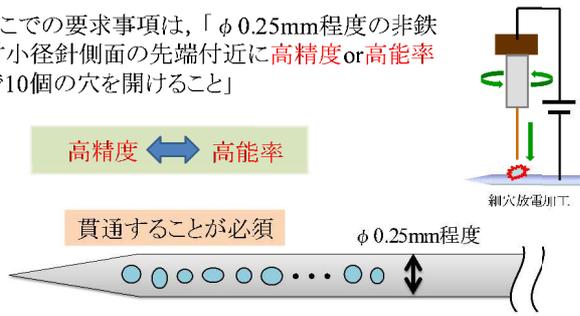


図1 穴開けの要求事項

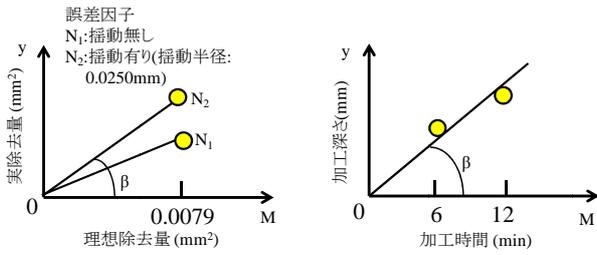


図2 目的に応じた入出力関係

2-3 入出力関係

図2に精度重視の場合と能率重視の場合の目的に応じた実験の入出力関係を示す。精度重視の場合は、入力Mが理想除去量 (mm²) で出力yが実除去量(mm²)とし、信号因子は1水準、誤差因子はN1：揺動無し、N2：揺動有り(揺動半径0.0250mm)を設定した。能率重視の場合は、入力Mが加工時間(min)で出力yが加工深さ(mm)とし、信号因子は2水準、誤差因子は設定しなかった。精度重視の場合は、式(1)に示すばらつきの影響σ²と感度の効果β²の二つの指標を総合的に判断するSN比ηで評価し、SN比ηが大きい程高精度測定が行われていると判定する。一方、能率重視の場合は、単に加工時間が短ければ良いと定義すれば式(1)の感度の効果β²が大きければ良いことになり、感度βのみで加工の良し悪しを判定した。

$$\eta = \frac{\beta^2}{\sigma^2} \quad (1)$$

ここでηはSN比(db)、β²は感度の効果、σ²はばらつきの影響である。

2-4 因子と水準

制御因子は表1のとおり設定した。精度重視の場合は最初の実験であるため直交表L18を使用し、各因子の効果の大きさが不明であったためA~Hの8種類の因子を割り付けた。能率重視の場合は2回目の実験であったため効果の大きい4種類の因子のみを取り上げて直交表L9に因子A~Dのとおり割り付けた。因子Dは調査して割り付けた。共通の加工条件は表2のとおりとし、特に加工材は図3のとおり精度重視の場合ではCCM合金、能率重視の場合ではSUS440とした。これは対象とした針の材質がその時の指示で異なっていたため、割付実験

表1 制御因子

精度重視(直交表L18)		水準		
		1	2	3
A	μSF回路	ON	OFF	—
B	コンデンサ回路	ON	OFF	ON
C	電圧LOW回路	ON	OFF	ON
D	ガイドの高さ μm	200	100	50
E	OFF時間(AUX)	3(大)	6	9(小)
F	付加電圧(GAP)	14(強)	12	10(弱)
G	戻り速度(GAIN)	10(遅)	25	40(速)
H	サーボ電圧	5	3	0

能率重視(直交表L9)

因子		水準		
		1	2	3
A	付加電圧(GAP)	10(弱)	12	14(強)
B	OFF時間(AUX)	9(小)	6	3(大)
C	戻り速度(GAIN)	10(遅)	25	40(速)
D	微細電源回路	①	②	③
D		①:強	②:中	③:弱
	μSF回路	OFF	OFF	ON
	コンデンサ回路	ON	ON	ON
	電圧LOW回路	OFF	ON	OFF

表2 共通の加工条件

電極	φ0.1mm銅パイプ
振れ止めガイド	セラミックス製φ0.1mm
加工材	精度重視:CCM合金, 能率重視:SUS440
加工液	メタルワークスEDF-K2
加工液噴出強さ	7/10
回転数	200min ⁻¹



図3 加工材(左:CCM合金、右:SUS440)

時の材質を針の材質に合わせた。

3 実験結果及び考察

3-1 直交表実験での結果

図4に精度重視の場合の直交表実験での結果を示す。直交表L18の実験番号No.1~No.18毎に加工深さと電極消耗率を明示した。ここで右側の縦軸とした電極消耗率とは電極消耗長さ(mm)/加工深さ(mm)×100(%)で表される除去深さに対する電極消耗長さの比である。図4から加工深さと電極消耗率は反比例の関係であることがわかる。また、誤差因子N2の揺動有りの場合は実験番号による加工深さの差が小さい。

図5に能率重視の場合の直交表実験での結果を示す。精度重視の場合と同様に実験番号毎に加工深さと電極消耗率を明示した。この図から実験番号No.8が加工深さが大きく、かつ電極消耗率が小さい良好な加工条件である

微細放電加工の高精度化のための加工条件

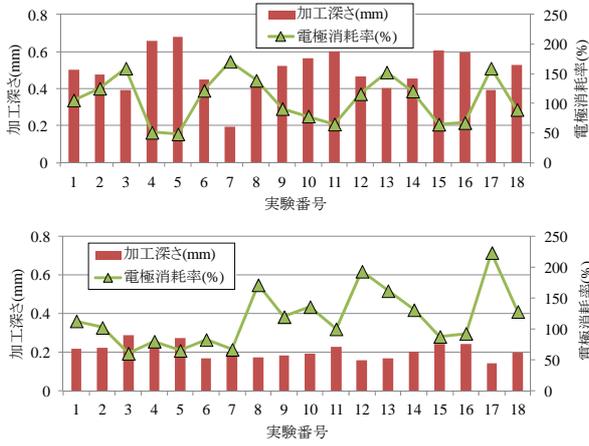


図4 精度重視の場合の実験結果
(上: N1、下: N2)

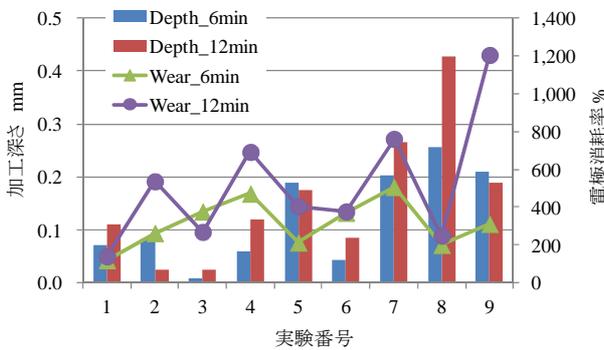


図5 能率重視の場合の実験結果

ことがわかる。

3-2 要因効果図

図6に精度重視の場合のSN比の要因効果図を示す。要因効果図とは、各因子において水準毎にSN比または感度の工程平均を計算しグラフ化したものである。図から因子においてSN比の最も大きい水準の組み合わせである最適条件はA1、B1、C1、D2、E1、F3、G2、H3となった。最適条件では微細加工回路の因子A、因子B、因子CがいずれもONの場合にSN比が高くなっておりφ0.1mm程度の細穴加工を行う場合での加工安定化に必須機能であることを示している。また、因子F:付加電圧(GAP)で因子内の水準間の効果が大きくエネルギーを小さくする方向でSN比が大きくなっている。

図7に能率重視の場合の感度の要因効果図を示す。ここでの基本機能は単に加工速度が速いことであるため、体積mm³の次元で感度の要因効果図を作成した。その結果、最適条件はA3、B2、C1、D3となった。これを図5で示した実験結果のNo.8と比べてところまさにNo.8の条件と完全に一致した。つまり、No.8の条件が要因効果図で求めた最適条件だったわけである。

3-3 検証実験

オフライン実験による直交表実験で得られた最適条件を使用して、針側面への細穴放電加工を行い、再現性を検証した。表3に精度重視と能率重視の場合の電気条件

精度重視(直交表L18)

因子	水準			
	1	2	3	
A	μSF回路	ON	OFF	—
B	コンデンサ回路	ON	OFF	ON
C	電圧LOW回路	ON	OFF	ON
D	ガイドの高さ μm	200	100	50
E	OFF時間(AUX)	3(大)	6	9(小)
F	付加電圧(GAP)	14(強)	12	10(弱)
G	戻り速度(GAIN)	10(遅)	25	40(速)
H	サーボ電圧	5	3	0

↑ (因子と水準)

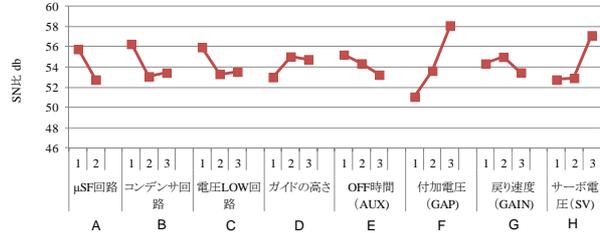


図6 精度重視の場合のSN比(db)の要因効果図

能率重視(直交表L9)

因子	水準			
	1	2	3	
A	付加電圧(GAP)	10(弱)	12	14(強)
B	OFF時間(AUX)	9(小)	6	3(大)
C	戻り速度(GAIN)	10(遅)	25	40(速)
D	微細電源回路	①	②	③

↑ (因子と水準)

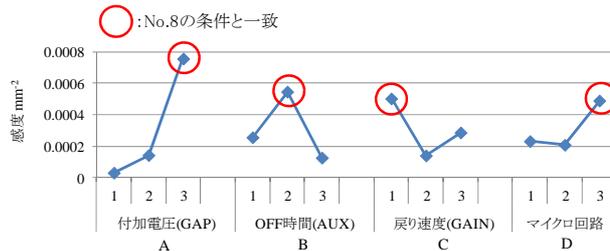


図7 能率重視の場合の感度(mm²)の要因効果図

を比較した。ここで推奨条件とはメーカーが示したEパックである。その結果、精度重視と能率重視では僅かに3因子のみ異なる設定であり、この3種類の因子が加工精度と加工能率の分岐となっていた。

表4に加工時間、表5に針穴加工での結果を示す。表1から精度重視の場合は穴10個の加工時間は1時間07分43秒、能率重視の場合は23分57秒であった。その結果、1個あたりの加工時間は精度重視の場合が6分46秒、能率重視の場合が2分24秒であった。その結果、能率重視の場合は精度重視の場合に比較して加工時間が約1/3に短縮できた。

表5から能率重視では加工時間が1/3に短縮できるがその反面、電極消耗率が精度重視の場合は32.6%に対し、能率重視の場合は200.2%と大幅に増加した。これは深さ1mmの穴を開ける場合に精度重視では電極の消耗長さが0.326mm、能率重視では2.002mmを要することを示している。また、精度重視では穴径がφ0.109mmとなりφ0.1mmの電極を使用していることから電極の振れ量を

表3 各目的での電気条件

項目	推奨条件	最適条件 (精度重視)	最適条件 (能率重視)
マイクロSF回路	OFF	ON	ON
コンデンサ回路	OFF	ON	ON
電圧LOW回路	OFF	ON	OFF
ガイドの高さ(μm)	50	100	100
EバックNo.	1951	5029	5033
回路選択	SF	SF	SF
OFF時間:AUX	3	6	6
極性切換	(-)	(-)	(-)
加工セッティング:IP	0	0	0
パルス幅:ON	0	0	0
休止時間:OFF	0	0	0
付加電圧:GAP	14	10	14
戻り速度:GAIN	40	25	10
上昇距離:JUMP	0	0	0
上昇距離:降下時間 JU/JD	0↑1↓	0↑1↓	0↑1↓
サーボ電圧:SV	0	0	0

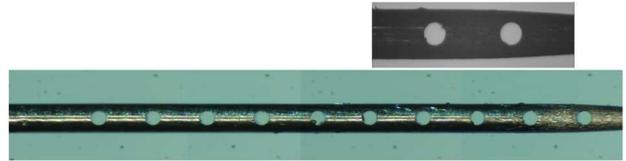


図8 精度重視での加工穴

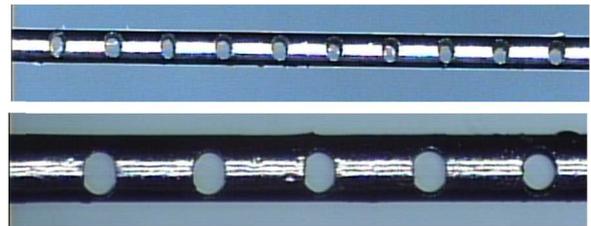


図9 能率重視での加工穴

表4 加工時間

穴番号	(h: m: s)	
	精度重視	能率重視
1	0:07:01	0:02:27
2	0:06:47	0:02:27
3	0:06:27	0:02:24
4	0:06:25	0:02:23
5	0:06:01	0:02:23
6	0:06:48	0:02:23
7	0:06:55	0:02:22
8	0:06:43	0:02:23
9	0:07:04	0:02:22
10	0:07:32	0:02:23
合計	1:07:43	0:23:57

表5 針穴加工での結果

1穴あたりの加工結果	精度重視	能率重視
穴径(mm)	0.109	0.143
放電ギャップ(直径, μm)	8.6	42.5
加工時間(h:m:s)	0:06:46	0:02:24
電極消耗長さ(mm): p	0.082	0.500
加工深さ(mm): q	0.250	0.250
電極消耗率(%): p/q×100	32.6	200.2
穴径のばらつき(σ, μm)	0.9	34(縦横の差)
総加工時間(h:m:s)	1:07:43	0:23:57

含めた放電ギャップが直径で 8.6μm であるのに対し、能率重視の場合は穴径の縦横差で 34μm と楕円形状の穴になった。図8と図9に精度重視と能率重視のそれぞれの加工穴を示す。図8の穴は真円に近い丸形状であるが、図9ではまさに楕円形状の穴となっている。これは、針の円筒側面への加工であるため針の肉厚の違いにより除去効率が異なり、楕円形状になったと予想される。

4 結 言

φ0.25mmの針側面へφ0.1mmの細穴放電加工を行う際の精度重視と能率重視の目的に応じた加工条件の探索に取り組んだ結果、以下の結論が得られた。

- (1) 各目的に応じた入出力関係を設定して直交表実験を行うことで、目的に応じた加工条件を求めることが出来た。
- (2) 1穴の加工時間が精度重視の場合は6分46秒に対し、能率重視の場合は2分24秒となり0.35倍を達成した。ただし、電極消耗率は精度重視の場合で32.6%に対し、能率重視では200.2%となり、6.1倍となった。
- (3) 精度重視の場合ではほぼ真円の穴形状であるのに対し、能率重視では穴の縦横差が34μmの楕円形状になった。

文 献

- 1) 三菱電機株式会社：形彫放電加工技術資料 (2001)