

創成放電加工による微細穴の高精度化*

和合 健**、飯村 崇**、触沢 晃***

本共同研究において岩手県は放電加工原理による微細穴加工の高度化を担当している。ここでは $\phi 240 \pm 5 \mu\text{m}$ 深さ 2.4mm を目標値としてパイプ電極による深穴加工を試みた。 $\phi 0.1\text{mm}$ の Cu パイプ電極を使用して割り付け実験により有意因子の抽出を行ったところ、深穴加工の能率向上に有利となる電極消耗率を低減する効果を持つ二つの因子の組み合わせを見つけることができた。

キーワード：創成放電加工、深穴加工、 $\phi 0.1\text{mm}$ Cu パイプ電極、電極消耗率

Development of Precision Processing for Micro Diameter Hole by Use of Machining-EDM

WAGO Takeshi, IIMURA Takashi, FURESAWA Akira

Micro holes processing by use of electrical discharge machining has been studied by Iwate prefecture group in order to manufacture mold. This study has been located in IMY cooperation meeting "Development of ultra-precision machining technology for manufacturing automobile". In this report, the processing of deep holes of $\phi 240 \mu\text{m}$ and 2.4mm depth as target value was attempted. The hole processing was performed by use of pipe electrode tool of $\phi 0.1$ Cu material in accordance with an experimental planning method. As a result, it was found that combination of two positive factors by which consumption coefficient of electrode tool reduced was effective for high efficient deep holes processing.

key words : Machining-EDM, deep hole processing, pipe electrode tool of $\phi 0.1\text{mm}$ Cu material, consumption coefficient of electrode tool

1 緒言

金型を加工する代表的な方法として放電加工がある。本研究は型彫加工による微細深穴加工の高精度化について検討した。放電加工は電極と加工物間で局所的な電気エネルギー集中によりアーク柱が形成されることで起こる爆発の物理的かつ化学的作用による除去加工である¹⁾。このような放電現象を生じさせるためには適正な加工液環境を整える必要があるが、深穴加工では加工が進行するに従い、放電加工くず（以下、スラッジという）が穴中に滞留して放電アーク柱形成を妨げる問題がある。ここでは、深穴加工を行う場合に要点となるスラッジの除去方法としてパイプ電極の使用による加工液噴流方式を採用した。微細深穴加工は、結果として振れ量、放電ギャップ量、電極消耗量が誤差要因となる偶発的な加工であるためこれらの誤差を制御できる因子抽出が重要であると考えた。

本研究は、加工穴径や加工深さ及び電極消耗率を特性

値として評価し、取り上げた制御因子の効果の大きさを求めた。また金型の入れ子ではガイド穴がダイプレートへの嵌め合い基準として用いられることから穴位置精度が重要であるため、多数個穴加工での位置誤差の大きさを求めた。さらに加工条件と穴の円筒度の関係から、高精度な円筒度の加工方法を求めた。

2 実験方法

2-1 実験装置

本研究では、実験装置として創成放電加工機（三菱電機製 EDSCAN8E）を用いた。EDSCAN8E は型彫放電加工機に微細加工機能を付加した高精度 NC 加工機である。特に、微細電源、 $0.1 \mu\text{m}$ 位置決め目盛及び完全フィードバック制御により $1/1000\text{mm}$ 台の加工精度（ばらつき誤差）を NC プログラムの指令により実現できる。

* IMY 連携会議共同研究「自動車部材関連における超精密加工技術」Gr

** 電子機械技術部

*** 岩手大学工学部機械工学科先端加工研究室

表3 微細放電回路の調査

| 水準 | M111 | M113 | M115 |
|----|------|------|------|
| A1 | OFF | ON | OFF |
| A2 | OFF | OFF | OFF |
| A3 | ON | OFF | ON |

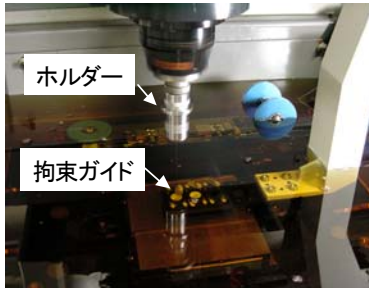


図1 ホルダーと振れ抑制ガイド

表1 L18 直交表 (実験1 加工条件)

| No. | M111 | M113 | M115 | 回転速度 (r/min) | 電気条件 | 揺動半径 (μm) |
|-----|------|------|------|--------------|-------|-----------|
| 1 | ON | ON | ON | 100 | E855 | 50 |
| 2 | ON | ON | OFF | 200 | E1951 | 55 |
| 3 | ON | ON | ON | 400 | E1952 | 60 |
| 4 | ON | OFF | ON | 100 | E1951 | 55 |
| 5 | ON | OFF | OFF | 200 | E1952 | 60 |
| 6 | ON | OFF | ON | 400 | E855 | 50 |
| 7 | ON | ON | ON | 200 | E855 | 60 |
| 8 | ON | ON | OFF | 400 | E1951 | 50 |
| 9 | ON | ON | ON | 100 | E1952 | 55 |
| 10 | OFF | ON | ON | 400 | E1952 | 55 |
| 11 | OFF | ON | OFF | 100 | E855 | 60 |
| 12 | OFF | ON | ON | 200 | E1951 | 50 |
| 13 | OFF | OFF | ON | 200 | E1952 | 50 |
| 14 | OFF | OFF | OFF | 400 | E855 | 55 |
| 15 | OFF | OFF | ON | 100 | E1951 | 60 |
| 16 | OFF | ON | ON | 400 | E1951 | 60 |
| 17 | OFF | ON | OFF | 100 | E1952 | 50 |
| 18 | OFF | ON | ON | 200 | E855 | 55 |

表2 電気条件の詳細

| 電気条件 | | E855 | E1951 | E1952 |
|----------|-------|------|-------|-------|
| 回路選択 | 回路 | SF | SF | SF |
| 補助電源 | AUX | 3 | 3 | 9 |
| 極性切替 | 極性 | - | - | - |
| 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 |
| F回路 | GAP | 10 | 14 | 15 |
| コンデンサ切替 | PCON | 0 | 0 | 0 |
| 加工調整 | GAIN | 10 | 40 | 40 |
| 放電安定 | JUMP | 0 | 0 | 0 |
| 上昇距離 | JU JD | 0 | 0 | 0 |

2-2 実験1：穴径の加工誤差に影響を及ぼす因子の検出

電極は市販されているφ0.1mmの銅パイプを使用し、加工材にはSKH51(HRC60)を使用した。ツールパスは単純Z軸下送りとし、加工液はパイプ内からの噴出、振れ抑制ガイドの高さは50μmに設定した。電極の回転速度、電気条件であるEパック、3種類の微細電源回路及び円揺動半径を制御因子として、水準が3つの組み合わせで直交表を用いて18通りの条件で加工を行い、加工径と加工深さを測定した。表1に18個の実験条件、表2に電気

表4 L9 直交表 (実験3 加工条件)

| No. | 微細放電回路 | 回転速度 (r/min) | 電気条件 | 揺動半径 (μm) |
|-----|--------|--------------|-------|-----------|
| 1 | A1 | 100 | E855 | 50 |
| 2 | A2 | 200 | E855 | 55 |
| 3 | A3 | 400 | E855 | 60 |
| 4 | A2 | 400 | E1951 | 50 |
| 5 | A3 | 100 | E1951 | 55 |
| 6 | A1 | 200 | E1951 | 60 |
| 7 | A3 | 200 | E1952 | 50 |
| 8 | A1 | 400 | E1952 | 55 |
| 9 | A2 | 100 | E1952 | 60 |

条件の詳細を示す。表1中のM111はマイクロSF回路、M113はコンデンサ回路、M115は電圧LOW回路である。直交表L18は交互作用が各列に均等配分されるので誤差列を考慮する必要がない。加工時間は30分とした。測定には非接触三次元測定装置(三鷹光器株式会社製NH-3NP)を使用した。

2-3 実験2：位置決め誤差補正

電極は実験1と同じφ0.1mmの銅パイプを使用した。基準穴には市販されているφ1mm銅電極を使用した。加工材にはSKH51(HRC60)を使用した。φ1mm電極で穴を2ヶ所にあけ、この2ヶ所でX軸を規定した。このX軸と加工機の案内軸が成すZ軸まわりのXY平面の角度を求め、座標回転角度としてプログラムに入力しソフトウェア上で座標回転を行った。ソフトウェアで座標回転を行うことでワーク座標系が決定され加工位置のずれ量が正確に算出できる。プログラムでランダムに指定した3ヶ所の座標にφ0.1mm電極で穴をあけ穴位置を測定した。3ヶ所の穴はひとつのプログラム実行により連続動作であけるものとした。測定には画像測定機(ミットヨ製HyperQV404-PRO)を使用した。

2-4 実験3：加工穴の断面形状と断面の粗さ測定

電極は実験1と同じφ0.1mmを使用し、加工材にはSKH51(HRC60)を使用した。加工材は厚さが同じ平板を合わせて固定し、そのつなぎ目に穴をあけた。加工後に加工材断面の形状と加工表面の粗さを観察した。実験条件は直交表を用いて表4の因子の組み合わせにより9通りの条件で加工を行った。微細放電回路はM111、M113、M115の3つの因子を調査して表3の組み合わせとし、A1が最強条件、A2が中間条件、A3が最弱条件となる。加工時間は90分とした。測定には画像測定機(ミットヨ製HyperQV404-PRO)、非接触三次元測定装置(三鷹光器製NH-3NP)を使用した。

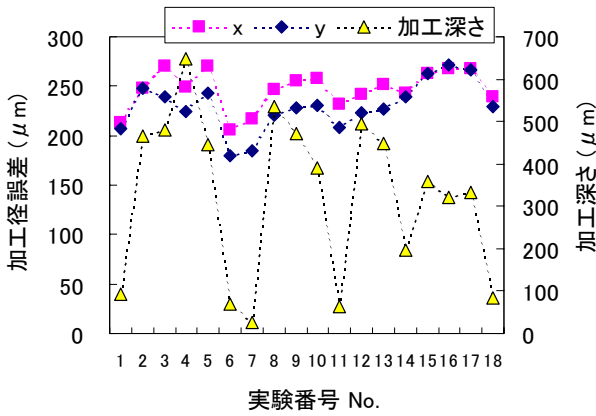


図2 誤差因子 N1:50 μ m 時の実験番号 No. 1~No. 18 の加工径と加工深さ

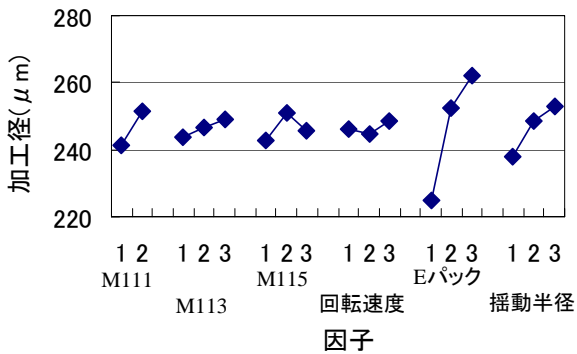


図3 工程平均 (放電ギャップ)

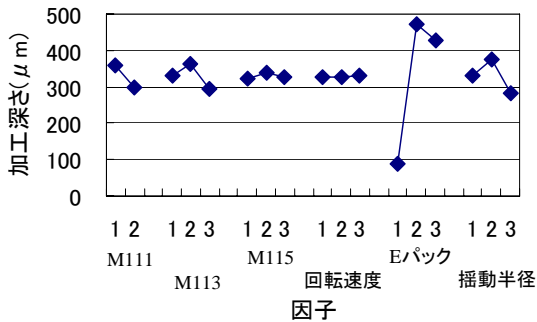


図4 工程平均 (加工深さ)

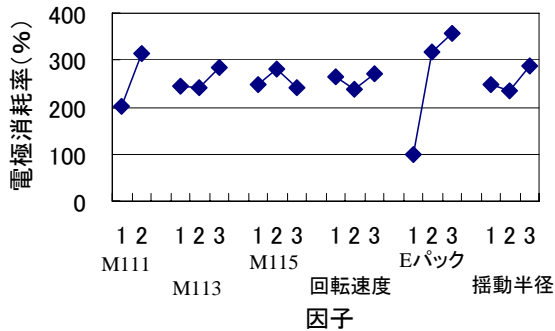


図5 工程平均 (電極消耗率)

3 実験結果及び考察

3-1 実験1: 穴径の加工誤差に影響を及ぼす因子の検出

直交表 L18 を使用し割付実験を行った理由は、L18 は交互作用が各列に均等に配分されるので少ない実験において、 $\phi 0.1\text{mm}$ の微小径による放電加工での各因子の特徴的な働きを把握したいためである。そのため、分散分析による有意差検定は、積極的に繰り返し等の外側割付因子を設定しない実験方針のため行わない。

実験1の結果を図2~図5に示す。加工径、加工深さ、電極消耗率に最も影響を与える因子はEパックであることが結果からわかる。原因としては E855 の電気条件では加工エネルギーの付与量が小さいためである。また、加工径と加工深さでは揺動半径の因子の影響も大きい。これは加工径では直接的に揺動半径の大きさにより加工径が決定されるため妥当な結果である。加工深さでは水準3の場合に加工深さが小さいことから加工エネルギーが分散されたためであり、体積で比較すると同等の除去量になっていることが推測される。放電ギャップは E855 の場合に半径相当で $8.9\mu\text{m}$ 、E1951 で $22.7\mu\text{m}$ 、E1952 で $27.4\mu\text{m}$ であった。

3-2 実験2: 位置決め誤差補正

実験2の結果を図6~図8に示す。図6の大きな円の中心が理論上の穴中心で小さい多角形が実験によるばらつきである。全体的に X 座標は負の方向に偏る傾向が見られ、Y 座標のばらつきは規則性が無かった。その後行った予備実験でも Y 方向に大きな誤差が見られた。Y 座標は正の方向にも負の方向にも不規則にばらつきがあったが X 座標は負の方向にずれる傾向があった。図7の結果において X、Y 方向の設計値からのずれ量の平均値を計算し、その分だけ加工開始時の始点をずらしたものが

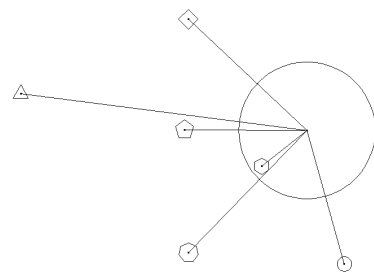


図6 予備実験での位置誤差 (大円の半径が 0.005mm)

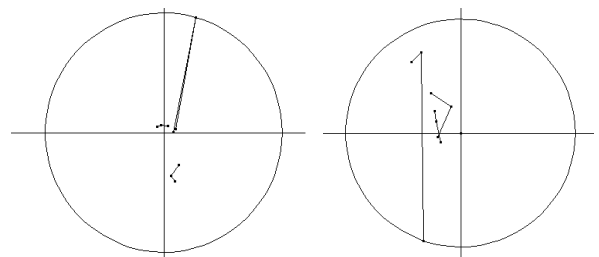


図7 補正前 (R0.130mm) 図8 補正後 (R0.049mm)

図8の補正後の結果である。結論としてX方向もY方向も位置誤差のばらつきを小さくすることに成功した。X方向にのみずれる傾向があったのはゼロ点設定でずれ量が決定されているためだと思われる。補正前加工での穴位置を求める方法は加工物を加工機から取り外し、非接触三次元測定装置で行った。そのため、放電加工機に取り付けた時点で再度、ゼロ点設定を行う必要があったためゼロ点設定誤差を取り除くことができなかった。今後、位置誤差を低減する対策は、一つ目として放電加工機上で穴位置を高精度に測定する方法を構築すること、二つ目は放電加工機上の加工物の着脱再現性を高めることの二つの改善案が考えられる。また予備実験の段階で加工プログラムの位置決め途中で振れ抑制ガイド内で電極が

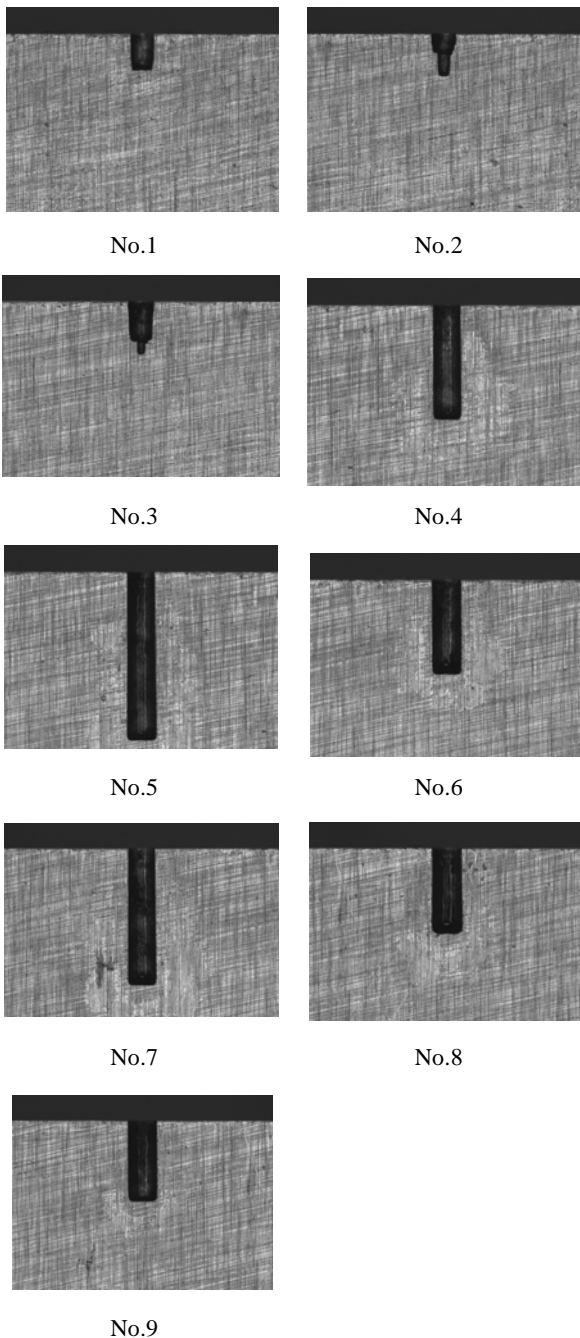


図10 穴の断面

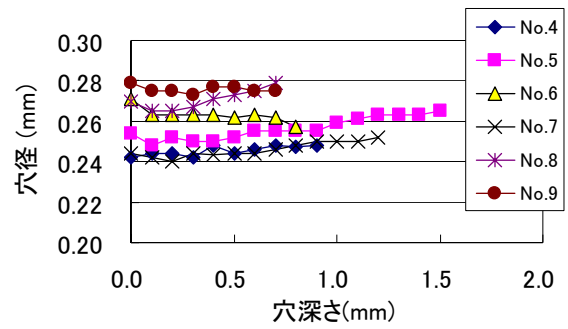


図9 穴深さに対する穴径

表5 穴側面の表面粗さ

| No. | | Ra (μm) | λ_c (mm) |
|-----|-------|----------------------|------------------|
| 1 | E855 | 0.84 | 0.08 |
| 5 | E1951 | 1.11 | 0.25 |
| 9 | E1952 | 1.74 | 0.25 |

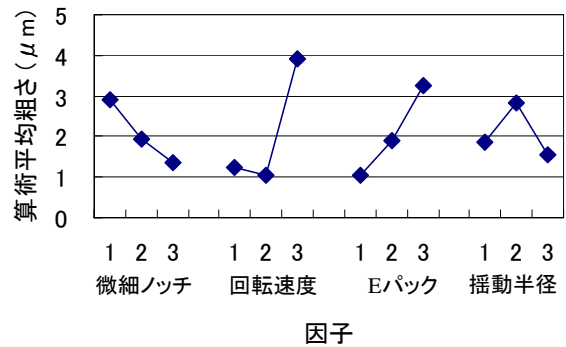


図11 工程平均 (穴側面の表面粗さ)

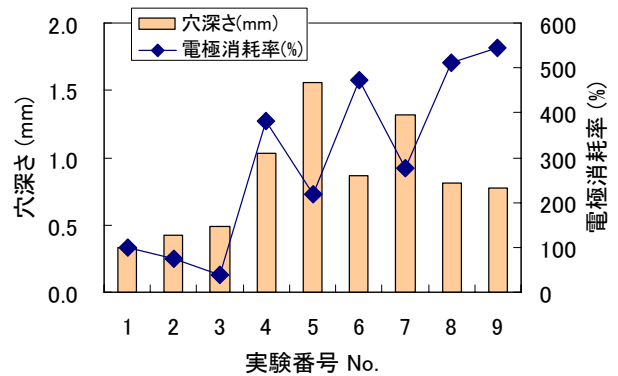


図12 穴深さと電極消耗率

下方向に通らなくなることがあった。原因としては電極の先端が加工によって炭素の付着で太くなり、加工によって短くなった電極の先端がガイド内まで引き上がることで詰まることが考えられる。解決策として適正な動作順序を求め、電極の引き上げに応じて拘束ガイドも引き上げるようにプログラムを修正したところ、電極がつまる現象は改善された。さらに加工開始時は弱い電気条件で始め、一定量加工が進んでから電気条件を上げる

プログラムに修正した。電極の先端がより正しい位置に食い付くためである。

3-3 実験3：加工穴の断面形状と断面の粗さの測定

実験3の結果を図9～図12に示す。9つの条件の中で円筒度が悪かったのはNo.1～No.3であった。この場合の円筒度は穴径の最大値と最小値の差と定義した。この3つの条件に共通するのは電気条件がE855であることから、Eパックが加工穴の形状に最も影響を与える因子だといえる。断面写真からはわかりづらいが穴の最深部の径が大きくなっているものがある。電極が拘束ガイドに詰まったのと同じで、電極先端に付着した炭素が放電に働いたものと考えられる。加工表面粗さに関しては微細放電回路と電気条件は図11より弱い条件ほど粗さが小さくなることがわかった。電極の回転数にも同じことが言えるが最良の結果が出たのは200rpmの条件だった。図12は穴の加工深さと電極消耗率のグラフであるが、電極消耗が少なく加工深さが大きい加工条件はNo.3、No.5、No.7である。この3つの条件に共通するのは微細放電回路がM111:ONかつM115:ONによる最弱の組み合わせの場合であった。この微細放電回路の設定により加工速度が大きく電極消耗率が小さい深穴加工を実現できることが分かった。実験1の結果と合わせてみても

やはりEパックが加工に与える影響が大きい。E855を使用した場合、穴径誤差、電極消耗率、穴表面の粗さは小さくなる。しかし他の条件に比べて十分な加工深さが得られず、加工穴の円筒度も悪くなるという欠点も生じた。

4 結 言

- (1)穴径はEパックと揺動半径の影響が大きく、微細放電回路で微調整が可能である。放電ギャップはE855の場合に半径相当で $8.9\mu\text{m}$ 、E1951で $22.7\mu\text{m}$ 、E1952で $27.4\mu\text{m}$ であった。
- (2)穴加工位置の再現性は高く、最初の食い付きによるばらつきは小さい。ゼロ点設定でのずれ量で穴位置誤差が決定される。
- (3)穴深さはメーカー指示値のEパックを使用し、微細放電回路のM111(μSF 回路)とM115(電圧Low)の組み合わせを併用することで電極消耗率が小さくなり、穴深さが大きくなる。

文 献

- 1) 三菱電機(株)：三菱NC型彫放電加工機EXシリーズ取扱説明書