

創成放電加工に関する研究 ～加工形状ならびに加工時間に及ぼす加工条件の検討、 および微細形状モデルの加工例～

村上耕平^{*1)}、藤本昌義^{*1)}

Research on Electric Discharge Scanning ～ Effect of Processing Conditions on Processing Form and Machining Time, and Applications to the Processing for Minute Geometric Models ～

MURAKAMI Kohei^{*1)} and FUJIMOTO Masayoshi^{*1)}

The influence which diameter of electrode and power supply used which is the main processing condition exerted on processing form and machining time was evaluated about electric discharge scanning. As a result, it has been understood that the surface roughness and the processing changing in quality layer greatly receive the influence of the processing power supply. Moreover, the machining time is influenced by the difference of the processing process.

Then, minute geometric models were processed by CAD drawing based on the obtained finding.

1. 緒言

放電現象を金属材料の除去加工に利用した「放電加工」は、炭素工具鋼や合金工具鋼さらには超合金等の高硬度材を取り扱う金型製作においては必要不可欠な加工方法である。

従来の放電加工には総型電極を工作物に転写する要領で所望の形状加工を行う形彫放電加工機が用いられ、電極の精度が加工品精度を決定する。そのため、複数の荒・仕上げ用電極を使用し、まず高精度な総型電極を製作する必要があるなど多大な電極設計・製作コストならびに時間を要する。

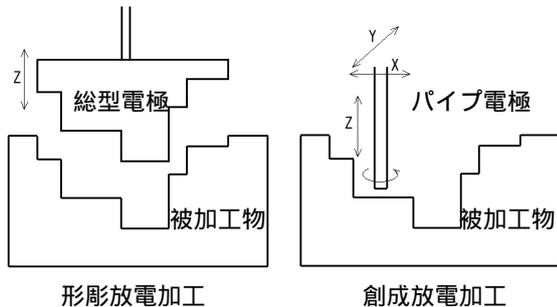


Fig. 1 Difference of method of electric discharge machining.

「創成放電加工機」は、総型電極のかわりに市販のパイプ電極を使用し、三軸方向ヘフライス盤のように移動させて加工する次世代型放電加工機である。したがって、電極設計・製作の工程が不要で、金型図面から直接金型加工を

行うことが可能となる。

そこで本研究では、この創成放電加工機について、主な加工条件である電極径と使用電源が、加工形状や加工時間に及ぼす影響について評価した。また、CAD 図面を基に微細形状モデルの加工を行った。

2. 実験方法

2.1 加工条件

Table 1 に加工条件を示す。

Table 1 Processing conditions.

放電加工機	三菱電機(株)製 創成放電加工機 EDSCAN8E
被加工物	SKD11 調質材
加工電極	銅パイプ電極 1.0、0.5、0.3、0.2
電源(回路)	・トランジスタ回路(TP) ピーク電流値(IP) =2.5A、5.5A、10A、15A および 25A ・高速加工用コンデンサ特殊回路(SS) ・コンデンサ回路(SF)
加工液	噴射法および噴出法

被加工物の材質はゲージ類・プレス金型等に使用される合金工具鋼 SKD11 の調質材とした。電源については、トランジスタ回路、高速加工用コンデンサ特殊回路、コンデン

*1)機械・材料技術チーム

サ回路の順で単発放電エネルギーは小さくなる。なお、加工 NC データの作成には CAD/CAM を利用した。CAD ソフトは[Auto CAD lt]、CAM ソフトには専用ソフトである [EDSCAN/CAM]を使用した。

2.2 評価機器

加工物の評価に用いた測定機器ならびに観察機器を Table 2 に示す。

Table 2 Measuring apparatus and observation equipments.

表面粗さ測定	三次元表面形状測定機、 テラホブソン(株)製、 フォームタリサーフ S4C 型
形状寸法測定	工具顕微鏡、 (株)オリンパス製、STM5-322 型
金属組織および SEM 像観察	電子顕微鏡、 (株)日立製作所製、S-2380N 型
マクロ写真撮影	デジタルカメラ 松下電器産業(株)製、DMC-FZ10-K 型

3. 結果及び考察

3.1 形状精度に及ぼす加工電極径、および電源の検討

Table 1 に示した加工条件で、Fig.2 に示す評価用型[test1]の加工をそれぞれ行った。評価用型[test1]は、直線や曲線に加え島形状も考慮に入れた 1 段形状である。各電極について使用電源を変え、その時の加工時間、寸法 (L1~L4、R1、R2 および加工深さ) および池領域底面の表面粗さを測定した。なお、トランジスタ回路での加工の際、パルス巾や休止時間は各ピーク電流値に対して加工機メーカーが推奨している値を用いた。

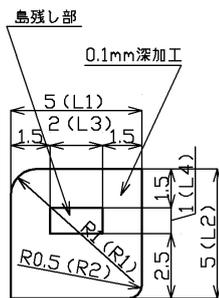


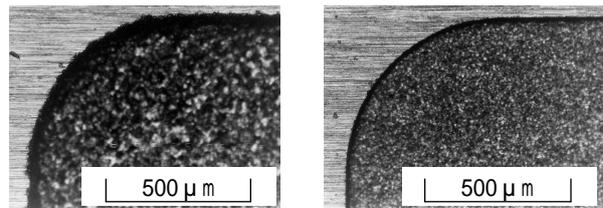
Fig. 2 Mold model for experiment[test1].

上記の加工結果から、使用した電極および電源について、加工時間ならびに形状精度を Table 3 に示す。電極径が小さくなるほど加工時間は長くなった。また、電極径が同じであっても、単発放電エネルギーが小さくなる電源ほど加工時間が長くなった。

Table 3 Machining time and form accuracy of [test1].

電極径 (mm)	加工条件		時間 (sec)	平均形状寸法差 (μm)			
	回路	IP (A)		L	R	H	
1	TP	25	65	96.3	518.9	86.9	
		15	168	8.2	71.4	86.9	
		10	259	4.3	28.6	57.3	
	SS	-	2067	1.4	21.7	8.6	
0.5	TP	5.5	570	5.6	7.4	3.6	
		2.5	1115	2.0	26.4	1.0	
0.3	SS	-	8380	2.4	6.2	11.3	
		TP	2.5	3077	15.2	8.5	0.4
		-	24426	3.2	5.2	2.2	
0.2	SF	-	32173	12.4	9.6	0.3	
		SS	-	44606	3.4	13.6	6.0
0.2	SF	-	38915	3.5	11.3	3.0	

Fig.2 で示した各寸法値と加工後の形状との差である平均形状寸法差は、電源にトランジスタ回路でピーク電流値を 25A とした加工時に大きくなった。加工後の評価用型[test1]の R1 部のマクロ写真を Fig.3 に示す。加工条件により、放電加工痕が側面にまで影響し、形状寸法の測定の際に位置座標として使用する輪郭線のエッジが荒れていることがわかる。このため、正確な形状測定ができなかったことにより、上記の結果となった。このことを考慮に入れると XY 平面の形状誤差については、数 μm ~ 10μm 程度であると考えられる。



電極径 1.0mm 左 : TP 回路 IP=10A 右 : SS 回路

Fig. 3 Photographs in corner part of [test1] workpiece.

ここで、加工の流れについて説明する。加工は捨て加工、初期加工および本加工で目標の深さまで行われる。捨て加工および初期加工では決められた層数を加工し、インライン計測により 1 層あたりの加工量が求まる。そして目標の深さまでの残り加工層数を算出し、その回数本加工が繰り返される。

Z 方向、ここでは ΔH は、電源をトランジスタ回路とし、ピーク電流値 25A、15A および 10A を用いた加工時に非常に大きくなった。評価用型[test1]では加工深さを 0.1mm と

浅くしたため、単発放電エネルギーの大きい電源では一層の加工量が大きく、捨て加工および初期加工の段階で目標の深さを越えて加工したためと考えられる。また、単発放電エネルギーの小さい電源での加工では、本加工で何層も加工を繰り返すため、インライン計測により得られた1層あたりの加工量の誤差が大きいと、目標深さまでの加工量の誤差も大きくなる。高速加工用コンデンサ特殊回路ならびにコンデンサ回路で加工した場合、比較的 ΔH が大きくなったのはこの理由によると推察される。単発放電エネルギーの小さい電源での加工の場合は、初期加工を多く取り、本加工での1層の加工量を精度良く算出する必要がある。

次に、電極および加工時間と池領域底面の表面粗さRzとの関係をFig.4に示す。

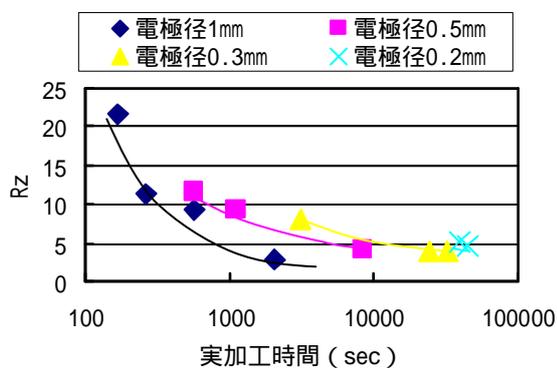


Fig. 4 Relationships between machining time and surface roughness.

単発放電エネルギーが小さくなる電源ほど加工時間は大きくなるが、表面粗さは小さくなった。また、電極については、より大径なものほど加工時間が短くても表面粗さは小さくなる傾向が得られた。

Fig.5は、電極径0.3mmによるトランジスタ回路ピーク電流値2.5Aで加工した評価用型[test1]のマクロ写真である。

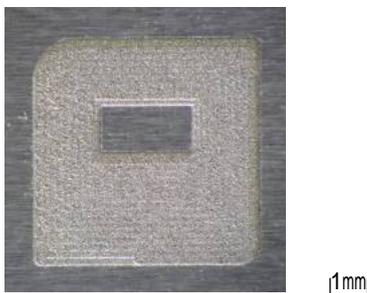


Fig. 5 Photograph of [test1] workpiece.

加工は外形から内側へ電極径の半分のピッチで描かれる加工パスに沿って行った。Fig.5からそのパスの痕跡が認められる。大径電極に比べ小径電極ほどパスの間隔が狭くなり痕跡が多くなることから、その凹凸が表面粗さに影響するものと推察される。ここでは、電極径1.0mmで高速加

工用コンデンサ特殊回路を用いた加工時に表面粗さ $2.7\mu\text{m}$ Rzの梨地仕上げ面が得られた。ただし、評価用型[test1]の加工に際し、大径電極を使用した場合は、コーナー部について電極半径以下のRを加工することができず、加工取り残しを生ずる結果となった。

3.2 加工面に生ずる変質層深さ

放電加工面には、スパークによる熱影響からなる変質層が生成され、材質の変質やクラックの発生が生ずる。放電加工後にこの変質層は研磨工程により取り除く必要がある。

そこで、3.1節で得られた加工面の断面について金属顕微鏡で変質層深さを観察した。その結果をFig.6に示す。

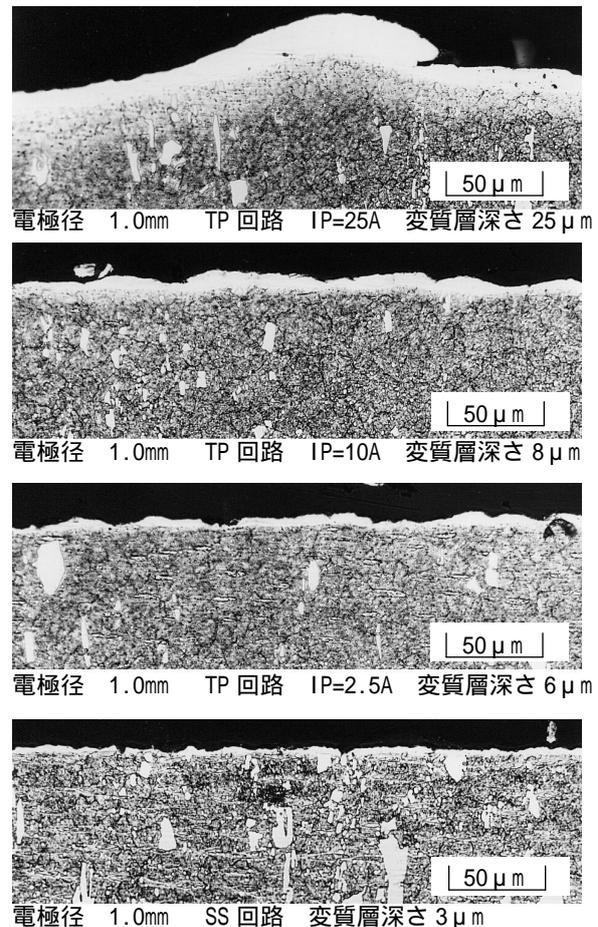


Fig. 6 Optical micro photographs of cross section of [test1] workpieces formed by various power supply.

単発放電エネルギーが小さくなるほど変質層深さは小さくなっていることがわかる。

3.3 形状側面部の表面粗さ

3.1節で加工条件により、放電加工痕が側面にまで影響し、輪郭線のエッジが荒れていることを述べた。放電加工面の表面形状としては、一般的に底面の表面粗さを指すが、側面についても把握しておく必要がある。

そこで、1.0mm の電極を用いて Fig.7 に示す深穴形状である評価用型[test2]の加工を行った。ここでは Table 1 に示した各回路での電源使用時における、加工側面の表面粗さについて、深さ方向ならびに水平方向の測定を行った。

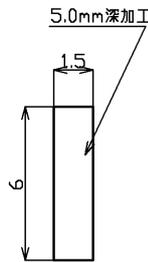


Fig. 7 Mold model for experiment[test2].

Fig.8 に電極径 1.0mm での各条件における側面と底面の表面粗さの比較を示す。側面について、深さ方向と水平方向の値はほぼ同じであり、パスの痕跡に相当するような加工層等の跡はなかった。底面と比較してもほぼ同じ傾向であり、若干数値は小さい。このことから、側面についても表面粗さを得たい場合には、底面と同様の加工条件が必要であることがわかる。

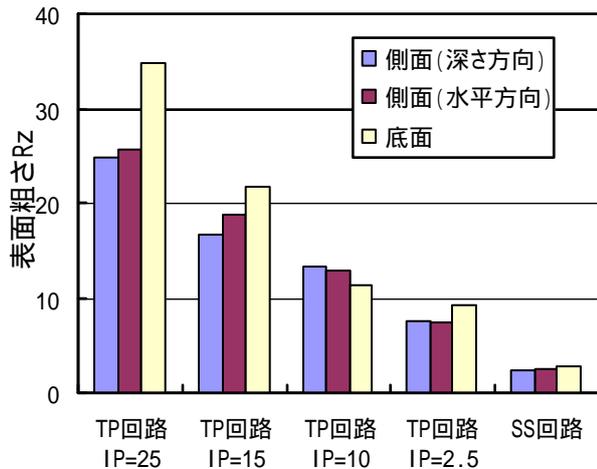


Fig. 8 Surface roughness of processing side and processing bottom.

3.4 加工工程の違いによる加工時間および形状精度の検討

Fig.9 に評価用型[test3]を示す。最大加工深さ 1.0mm の段付形状である。

ここでは加工取り残しを生じないように加工すること、かつ底面ならびに側面ともに表面粗さを $10\mu\text{mRz}$ 以内に仕上げられることを目標とした。最小 R が 0.2mm であるから 0.3mm の電極を用いることで取り残しなく加工できる。また、その場合 3.1 節ならびに 3.3 節の結果から、電源にトランジスタ回路(ピーク電流値 2.5A)を用いた加工により上述の表面粗さが得られる。しかし小径電極での加工となるため膨大な加工時間を要することが予想される。

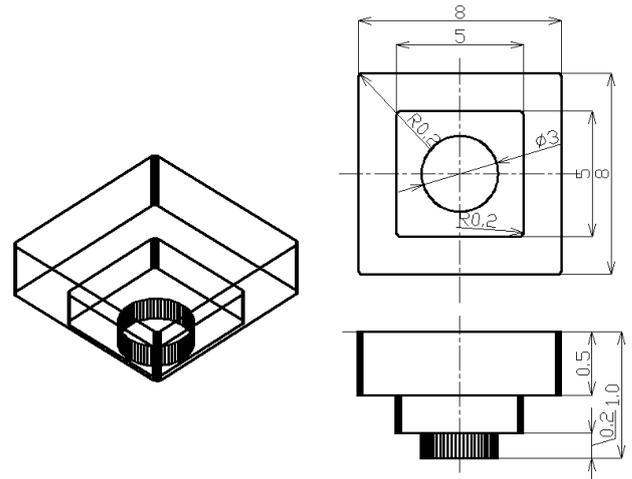


Fig. 9 Mold model for experiment[test3].

ここで、小径電極の使用を極力少なくし、加工時間を短くする工程について Fig.10 に示す。側面部以外を全て大径電極で加工し、最後に側面部を取り残しが発生しないように小径電極で仕上げる。大径電極での加工についても、底面近傍の加工のみ側面と同様の使用電源を選択し、それまでは単発放電エネルギーが大きく、加工速度も速い電源で加工を行う。

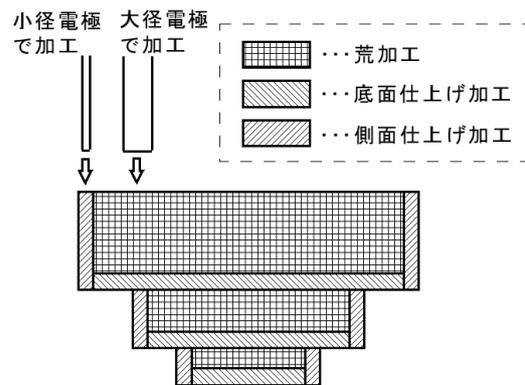


Fig. 10 Process of electrode combination processing.

すなわち、加工工程は

荒加工 (大径電極) 底面仕上げ加工 (大径電極)
側面仕上げ加工 (小径電極)

となる。

今回、評価用型[test3]の加工に大径電極に 1.0mm、小径電極に 0.3mm の電極を用い、下記の工程「電極組合せ加工」にて加工を行った。

「電極組合せ加工」

荒加工： 1.0mm 電極、TP 回路、IP=10A

底面仕上げ加工： 1.0mm 電極、TP 回路、IP=2.5A

側面仕上げ加工： 0.3mm 電極、TP 回路、IP=2.5A

また、比較検討のため、前述した 0.3mm の小径電極のみの加工「単電極加工」も行った。

「単電極加工」
 全域仕上げ加工： 0.3mm 電極、TP 回路、IP=2.5A

以上の 2 とおりの加工について加工時間ならびに形状精度を調べた。

「電極組合せ加工」と「単電極加工」についてそれぞれ 3 回加工した時の加工時間を Fig.11 に示す。ここで実加工時間とは、実際に電極から放電し加工が行われている時間である。また総加工時間とは、加工を開始してから終了するまでの時間であり、実加工時間にインライン計測や電極交換に伴う時間が加わる。

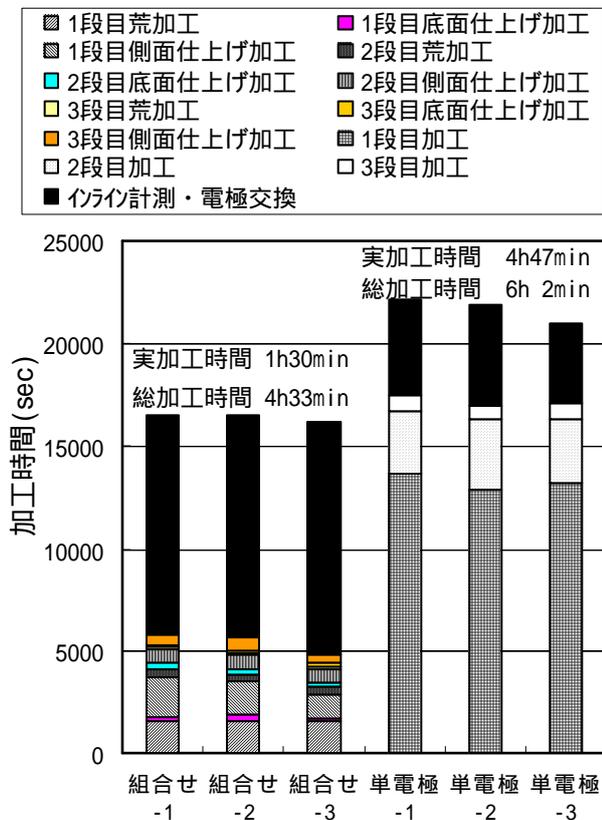


Fig. 11 Comparison of machining time of electrode combination processing and single electrode processing.

実加工時間は、「電極組合せ加工」で 1 時間 30 分であり、「単電極加工」4 時間 47 分に比べ約 31% の短い時間で加工できたことがわかる。「電極組合せ加工」では、加工速度の速い荒加工で大半の領域を加工したことや、「単電極加工」で使用した 0.3mm の電極に比べて大きな径の 1.0mm の電極で加工したためである。

しかし加工完了までに必要な時間である総加工時間を比較すると、「電極組合せ加工」で 4 時間 33 分、「単電極加工」は 6 時間 2 分と約 75% にしか短縮されなかった。これは、

Fig.11 から明らかなように、インライン計測・電極交換に要した時間が非常に長いためである。

インライン計測は前述したように、加工途中の深さと目標加工深さの差から、残り加工層数を算出する。これを繰り返すことにより精度よい深さを得ることができる。このインライン計測は各工程で行われる。仕上げ加工深さには関係のない荒加工についても、仕上げ加工代をどれだけ取るかによって目標加工深さが決まるため、当然インライン計測は必要となる。各段について「単電極加工」は 1 工程であるが、「電極組合せ加工」では 3 工程であり、単純に計算するとインライン計測時間は 3 倍となる。

電極交換は、使用する電極径が変わる時に行われる。高速回転する電極をサポートするガイドも交換するため、電極の芯ずれが生じる。そのため、交換時には X, Y および Z 軸について芯ずれ補正をするためにワークに対する柱中心位置決めが行われる。「電極組合せ加工」では(底面加工 側面加工)ならびに(側面加工 底面加工)時に必要となる。今回加工を行った評価用型[test3]の場合、計 5 回の電極交換が行われた。それに対して、「単電極加工」は全段とおして、電極径は変わらないので電極交換はない。

インライン計測は 1 回あたり約 5 分、そして電極交換には 1 回あたり約 10 分を要する。工程が多い「電極組合せ加工」ではこれらの回数が膨大となり、実加工の 2 倍以上の時間を費やす結果となった。尚、インライン計測の回数は、評価用型[test3]について荒加工工程のみ 1 回に、それ以外の各工程では 5 回に設定した。なお、3.1 節で加工を行った評価用型[test1]については 3 回で行った。

形状精度について、形状寸法差 ΔL、ΔH、加工芯ずれ B、そして表面粗さを Table 4 に示す。

Table 4 Comparison of form accuracies of electrode combination processing and single electrode processing.

加工方法	形状精度			
	L (μm)	H (μm)	B (μm)	Rz
電極組合せ加工	13.4	底面加工部 2.6 側面加工部 4.5	10.8	8.6
単電極加工	9.1	1.7	8.3	8.0

形状寸法差 ΔL ならびに ΔH は寸法値と加工後の実際の形状との差である。加工芯ずれ B は各段の加工形状について、そのそれぞれの中心位置からのずれ量を表す。表面粗さは 1 段目底面の最大高さ Rz で比較した。なお、ΔL および B は Fig.12 に記載した数式より求めた。

ΔL は「電極組合せ加工」では約 10μm 程度と 3.1 節で得られた結果に近い値となった。



Fig. 12 Mathematical formula to obtain form accuracy.

ΔH は、「単電極加工」では $1.7\mu\text{m}$ 、「電極組合せ加工」でも底面加工部については $2.6\mu\text{m}$ と精度良く加工できた。これは、インライン計測回数を 5 回と比較的多くしたためであると推察される。しかし、「電極組合せ加工」の「側面仕上げ加工」では、同じインライン計測回数でありながら ΔH は $4.5\mu\text{m}$ とさほど良い精度は得られなかった。Fig.13 に示すように、正確なインライン計測がしにくいことに原因があると考えられる。

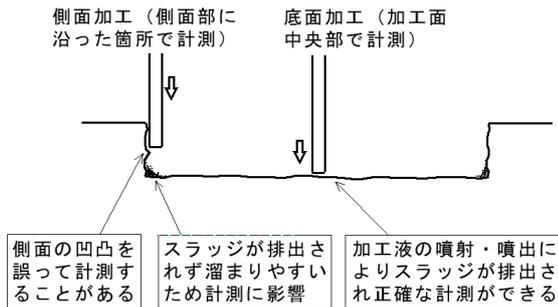
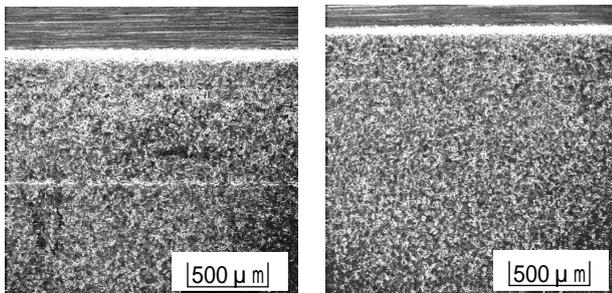


Fig. 13 Schematic diagram of inline measurement.

計測が加工面の中央部で行われる底面加工と異なり、側面仕上げ加工では、側面に沿った箇所での計測となる。そのため、計測の際に側面の凹凸や隅に溜まったスラッジの影響を受け、正確な計測ができないため、加工深さ精度も悪くなると考えられる。

Fig.14 は評価用型[test3]の 1 段階目底面の SEM 像である。



電極組合せ加工

単電極加工

Fig. 14 SEM images of bottom surface [test3].

「単電極加工」の加工面は一様であるのに対し、「電極組合せ加工」では加工パスの方向に線状の加工痕が入っている。これは、「底面仕上げ加工」と「側面仕上げ加工」の加工深さの違いにより生じるものである。工程が異なるため、「電極組合せ加工」では多かれ少なかれ必ず生ずる結果となった。

加工芯ずれ B については、「電極組合せ加工」ならびに「単電極加工」どちらも $10\mu\text{m}$ 程度となり、差異はほとんどなかった。「電極組合せ加工」では、各工程で電極交換をするため原点が変わり、都度電極の位置決めが行われる。位置決め作業は JIS に則り X 軸、Y 軸および Z 軸それぞれについて 7 回繰り返される。 B の値が電極交換をしない「単電極加工」とほとんど変わらなかったことは、この位置決め作業が正確に行われていると言える。ただし、非常に時間がかかることは前述したとおりである。

表面粗さは 3.1 節で得られた値とほぼ同じであった。ただし、前述した工程の違いにより生ずる加工痕を含んで測定すると、「電極組合せ加工」については大きくなると思われる。

3.5 微細形状モデルの加工

複雑形状な微細形状モデルについて、3.1～3.4 で得られた加工データを参考に、加工を行った。加工の流れを Fig.15 に示す。

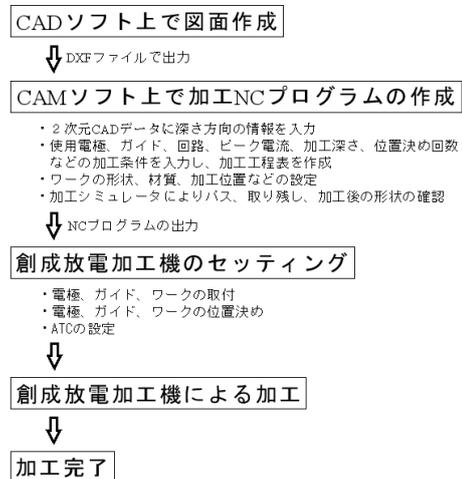


Fig. 15 Flow chart of processing of EDSCAN.

Fig.16、Fig.17 および Fig.18 に加工した微細形状モデル 3 例の CAD 図面と加工物のマクロ写真を示す。

ここでは 0.3mm 、 0.2mm さらに 0.1mm の電極を用いて加工を行ったが、マクロ写真からは図面どおりの加工が確認できる。しかし、「微細ポンプカバー」では、10 箇所のザグリ穴についてそれぞれ中央部に取り残しが生じた。これは、パイプ電極が中空であるため、加工面積が電極面積に対して充分広くない場合にパスの経路に関わらず生じてしまう。また、「微細模様」では中央に 0.03mm の島残

し部を設けたが、加工途中で折損した。この破片が底面に落ち、加工機がエラー停止した。そのため、0.2mm 深程度しか加工できなかった。

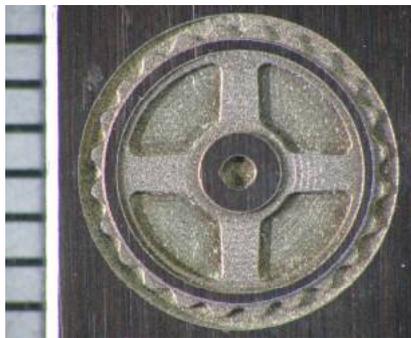
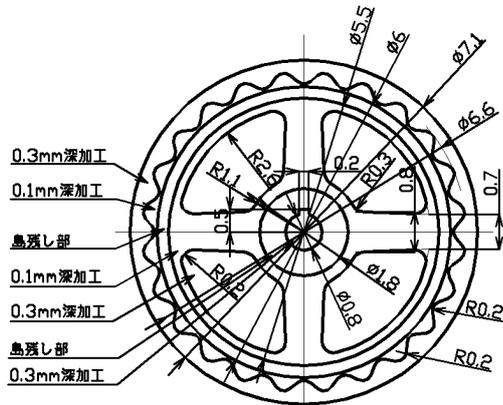


Fig. 16 Mold model [microwheel] and workpiece.

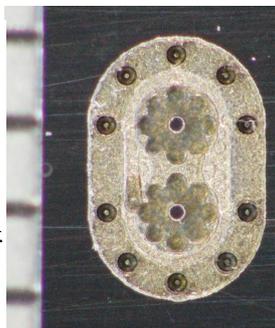
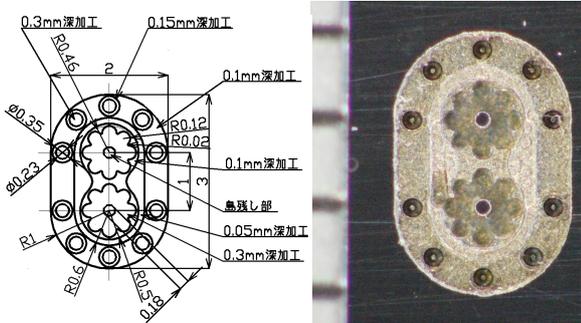


Fig. 17 Mold model [micropumpcover] and workpiece.

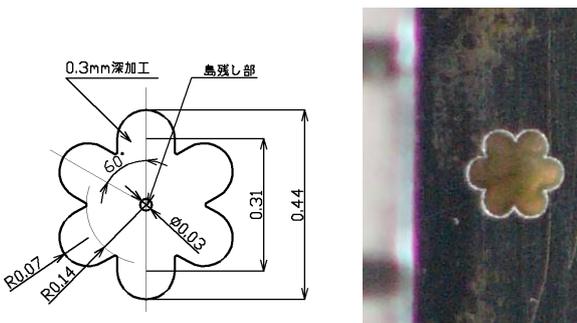


Fig. 18 Mold model [micropattern] and workpiece.

それぞれの加工時間を Table 5 に示す。

Table 5 Processing conditions and machining time of minute geometric models.

微細形状モデル	回路	電極径 (mm)	実加工時間 (sec)
微細歯車	SS	0.3、 0.2 (歯部)	53672
微細ポンプカバー	SF	0.2	12561
微細模様	SF	0.1	1800 で停止

最後に、「電極組合せ加工」にて、Fig.19 に示す「奈良県モデル」の加工を行った。

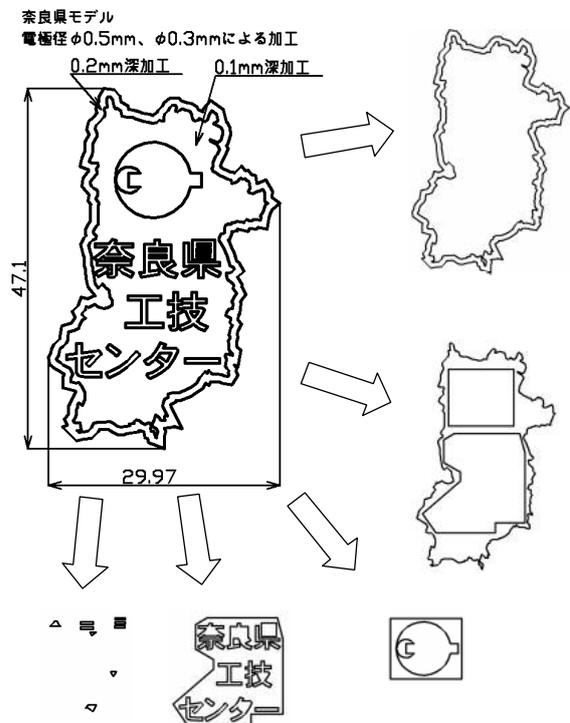


Fig. 19 Mold model [NARAKEN MODEL].

形状が複雑なため、CAM で作成する NC プログラムが長大となる。このため、 ~ のブロックに分割した。大径電極に 0.5mm、小径電極に 0.3mm を使用したが、 および の加工では、その形状から「電極組合せ加工」ではかえって加工時間が長くなると考えられ、「単電極加工」での加工を行った。電源は、全てトランジスタ回路でピーク電流値は 2.5A とした。

加工物のマクロ写真を Fig.20 に、また加工時間を Table 6 に示す。図面どおりの加工が確認できるが、単発放電エネルギーの大きい電源を使用した加工のため、パスの痕跡が目立つ。また、各ブロック間の継ぎ目にも段差が見られる。これは、ブロックごとのインライン計測となるため、ブロック間で加工深さに若干の差が生じることと、ワークの取

付精度による結果であると推察される。総加工時間については48時間10分と膨大な時間を要する結果となった。



Fig. 20 Workpiece [NARAKEN MODEL].

Table 6 Processing conditions and machining time of [NARAKEN MODEL].

	使用電極 (mm)	実加工時間 (sec)	総加工時間 (sec)
	底面 0.5、 側面 0.3	69403	77400
	0.5のみ	18086	19800
	0.3のみ	29373	32400
	底面 0.5、 側面 0.3	31674	36600
	0.3のみ	608	6600
合計		149144	172800

4. 結論

本研究では、創成放電加工機における加工について、その主な加工条件が加工結果に及ぼす影響を検討し、以下の知見を得ることができた。

- (1) 単発放電エネルギーが小さい電源ほど加工時間は長くなるが、加工面の表面粗さは小さくなる。また、加工変質層深さについても小さくなる。
- (2) 加工側面の表面粗さは底面の値とほぼ同じである。従って、加工した輪郭形状の精度を要する場合は、側面についても、単発放電エネルギーの小さい電源での加工が必要である。
- (3) 加工工程について、必ずしも「電極組合せ加工」が最適であるとは限らない。総加工時間については「単電極加工」に対して、さほど短縮を図れないばかりか、加工底面に加工痕を生ずることもある。加工形状に応じて工程は検討する必要がある。
- (4) 創成放電加工は高硬度材の加工の中でも、特に旋削加工の困難な微細形状の加工に有用であると思われる。

創成放電加工は、未だ広く普及していない新しい加工方法であるが、金型加工、特に微細加工の分野において貢献できる可能性は大きい。本研究で得られた知見に留まらず、今後もさらに追求していく予定である。

なお、本研究で使用した装置は、日本自転車振興会から競輪収益の一部である機械振興資金の補助金により設置したものである。

KEIRIN 

参考文献

- 1) 藤本昌義，奈良県工業技術センター研究報告，No.30,32-33(2004)
- 2) 三菱電機株式会社，放電加工の基礎，(1989)