微細電解加工機による3次元形状の加工*

栗田 恒雄^{*1}, 近 森 邦 夫^{*2}窪田 真一郎^{*3}, 服 部 光 郎^{*2}

Three-Dimensional Micro Machining by ECM

Tsuneo KURITA^{*4}, Kunio CHIKAMORI,
Shinichirou KUBOTA and Mitsuro HATTORI^{**} Institute of Mechanical Systems Engineering, National Institute of Advanced Industrial
Science and Technology, 1-2-1 Namiki, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8564 Japan

Electrochemical machining (ECM) has an advantage of no tool wear. On the other side, it is difficult to carry out micro machining in ECM, because the electrode gap in ECM is large. In this paper, electrochemical micro machining with the developed electrode gap control system is demonstrated. The narrow gaps make the control of the process much more complex than normal ECM. Preliminary ECM experiments are carried out in order to investigate a proper condition of machining process. Small hole is machined by using a 0.2 mm Ni rod. Drilling time and electrode gap is measured. An optimum machining condition of ECM is determined in terms of machining voltage, machining pulse length, amplitude of electrode for flushing out a contamination, and electrolyte concentration. After preliminary ECM experiments, three-dimensional micro machining is carried out under the optimum condition. First, prismatic electrode whose base is 200 μm square is machined by ECM. Next, three-dimensional micro machining is carried out by scanning the prismatic electrode. Three-dimensional shape that is sub-millimeter order is successfully machined.

Key Words: Electro Chemical Machining, Drilling, Precision Machining, Gap Control System, Electrochemical Micro Machining, EC μ M

1. 結論

携帯電話やマルチメディア機器の小型化、高性能化は著しく、それに伴い高精度な部品、大量生産のための微細金型の需要が増加している。微細金型を加工するための技術のひとつとして放電加工がある。この加工法は非接触加工のため工具に働く力が小さく、切削力の点から機械的加工に比べて有利である。また凸形電極を使用して凹形状を転写加工する加工法であるので、機械加工では不得意な微細凹形状の加工に適する。従って放電加工は、機械加工では難しい形状、材料の加工に対して有効な加工法である。しかし放電加工は熱加工であるため、加工表面に変質層が発生する。また電極の消耗があり、特に微小形状加工においてその消耗率が大きい点は、加工を行う際電極を複数個用意する必要がある等の問題点がある。

一方、電解加工は電極の消耗がないため、放電加工に比べ、電極を多数用意する必要がない、電極の移動軌跡から加工形状が簡単に予測できる、等の特徴を持つ。さらに非熱加工であるために表面変質層が発生せず、局部加工の積み重ねではなく電極面全体で加工が進行する点は、表面粗さ、加工能率

の向上に有利である。また、電解加工を用いた微細形状の加工を考えると、加工液としての電解液使用量を微量にすることが可能なため、従来の問題のひとつであった、廃液の処理が比較的容易になる。これらのことから、微小部品、金型を対象とした微細電解加工技術を開発することは非常に有用であると考えられるが、従来の電解加工では加工間隙が0.1~0.7mmと大きいため、微細加工への適用は疑問視されてきた。もし、電解加工の加工間隙を放電加工なみに小さくすることができれば、微細加工に利用できる可能性が開けると思われる。

Osenbruggen らは¹⁾、形状精度を上げるために加工電源としてパルス電源を用い、加工物の不要な溶出を防ぐために電極の側面にCVD法によってSiC、Si₃N₄、SiCの3層構造の絶縁皮膜のコーティングを行うことにより電解加工による微細加工を試み、加工間隙(電極と加工物の間の距離)50 μm に設定して歯だけ0.7mmのラック歯形の加工が可能であることを示した。しかし、微細な電極の側面に電気化学的、熱的な悪環境条件に耐え得る絶縁薄膜を形成することは非常に困難を伴う。

筆者らは、微小加工間隙を維持するために接触検知方式による電極位置の制御方式を採用し、従来の電解加工と比べて2桁小さい電解液濃度、1桁低い加工電圧を用いることにより、 $\phi 200\mu\text{m}$ 程度の細穴の加工実験において、側面間隙を

* 原稿受付 2001年7月10日。

^{*1} 正員、産業技術総合研究所(☎305-8564 つくば市並木1-2-1)。^{*2} 産業技術総合研究所(☎305-8564 つくば市並木1-2-1)。^{*3} 岡山県工業技術センター(☎701-1296 岡山市芳賀5301)。

E-mail: t.kurita@aist.go.jp

放電加工並の $10\mu\text{m}$ 程度にまで小さくした^{2,3)}が、実験は穴加工のみしか行われていない。

従ってここでは、電解加工による微細形状創成の可能性を調査するために、三次元テーブル送り機構を備えた微細電解加工実験機を製作し、3次元微細形状を加工することを目的として研究を行った。

2. 実験機器及び実験方法

2.1 微細電解加工機 本研究ではX, Y, Z軸アクチュエータを備えた微細電解加工実験機を製作した。図1に微細電解加工機を示す。微細電解加工機は主に電極、加工液供給部、3軸パルスモータ、 piezotransducer (PZT)、加

Fig. 1 System configuration

工電源、パーソナルコンピュータ等より構成される。電極はパルスモータにより加工物に対して 0.0156mm/pulse 単位で移動が可能であり、さらに PZT によって最大 $100\mu\text{m}$ の範囲で、高速の動きを行うことができる。加工液は数 ml/min の流量でスポイトを用いて被加工物に供給する。パーソナルコンピュータは加工条件を設定、保存し、アクチュエータ、加工電源の動作を制御すると共に、適当な時間間隔で読みとった加工データを表示、保存する。

電極と加工物との距離が $0.1\text{mm}\sim 0.7\text{mm}$ の範囲で加工されていた従来の電解加工では電極と加工物との距離によって材料の除去速度が異なるために電極、加工物間の距離を一定とする自己調節作用が存在していた⁴⁾。しかし微細加工を目的とした本研究では、電極、加工物の距離は 0.1mm よりも短くする必要があるが、加工間隙が小さくなると加工液の粘性、加工中に発生する気泡などによる影響が無視できなくなり、自己調節作用が働かなくなる。そこで、加工間隙を設定する手段として、接触検知方式を採用し、強制的に電極、加工物間の距離を設定することによって、加工を行った。図2に接触検知方式による電極の制御法を示す。まず、加工電圧に比べて小さな電圧値である検知電圧を電極と加工物間に付加し、電極と加工物の接触を判定する。接触していない場合は、さらに電極を下方に送り、接触している場合は、電流値の監視を続けながら電極を引き上げ、接触の解消を確認し、ここから設定した加工間隙の距離まで引き上げる。次に、加工電圧パルスを付加して加工を始める。本研究における微細電解加工では、強制的に電極、加工物間の距離を設定している。また、加工形状が小さくなるにつれてレイノルズ数は小さくなり、加工液の粘性の影響が無視できなくなるため、加工生成物の排出は困難になる。従って加工生成物を排除するために PZT を用いて Z 軸方向に数十 μm の振幅で高速往復運動を、加工パルスの後に挿入している。加工パルスの休止後に 1 ス

Fig. 2 Machining gap control system

トップの加工送りを行う。加工送り後、通常は加工電圧付加工工程に移行するが、パルス休止期間中に付加した検知電圧により接触が検知された場合及び加工パルス挿入時に短絡が発生した場合は再度接触検知工程より行う。なお、電極、工作物間の距離を適正な範囲に保つため、加工送りの距離を、加工送り工程から加工電圧付加工工程に移行した場合に増加、接触検知、短絡発生時に減少させることによって調整している。

2.2 実験方法 微細電解加工機の加工特性を調査するために、種々加工条件を変化させて微細穴あけ加工を行った。電極はφ0.2mmのNi円柱、被加工物は0.2mm厚のNi板を用いた。変化させる加工条件は、加工電圧、パルス幅、ピエゾ振動振幅、電解液とした。まず、基本加工条件を設定し、その条件から1種の加工条件のみを変化させて、加工状態を観察した。加工状態としては以下の2つに注目した。

(1) 加工速度 加工物の板厚を加工穴が貫通するまでの時間で割ることにより、加工速度を算出した。

(2) 側面間隙 加工間隙を実際に測定することは非常に困難であるので、加工穴の貫通後加工後に出口側の加工穴径を測定し、その値から電極直径を差し引いた値の1/2を側面間隙とした。側面間隙は、加工間隙を基に、電極の通過時間中にその側面から流れる電流による溶出分が加工間隙に加算されたものと考えることができる。側面間隙は加工間隙より大きい、ほぼ同オーダーであると考えられ、実測困難な加工間隙の代わりに加工状況を評価する因子として用いた。

加工特性を調べる実験後、加工の実例として、3次元形状の加工を試みた。加工方法はまず逆極性（成形する電極を+極に）で電解加工によって□200μm程度の角柱形状電極の成型を行い、これを用いて角穴加工を行った。2.5次元形状である角穴形状の加工実験より得られた内容を基に3次元形状加工の可能性を考察し、微細電解加工機の改良を行った。加工例として、電極を機上で移動し走査することによりサブミリ程度の3次元形状の微細加工を行った。

3. 基礎加工実験結果

ここでは、微細電解加工条件（加工電圧、パルス幅、ピエゾ振動振幅、電解液）が変化したときの加工特性を実験的に調べた。なお、表1に示す基本加工条件を設定し、この中

Table 1 Basic machining condition in ECM

Machining voltage	16 V
Pulse on-time	32 ms
Waiting time	57 ms
Amplitude of flushing out	±10 μm
Electrolyte concentration	3.5 g/dm ³ NaClO ₃

から1種類の加工条件のみを変化させて貫通穴あけ加工をそれぞれ行った。

3.1 加工電圧 図3に加工電圧を10~20Vに変化させた場合の加工速度、側面間隙の関係を示す。同図より加工速度は加工電圧の増加とともに増加し、加工電圧が16Vの時最大値を示すことが分かる。その後加工速度は加工電圧の増加とともに減少する。これは、電圧値が大きくなると電極表面が発生気泡に覆われるようになり、電解から放電に移行する状態になるためである。一方側面間隙は加工速度が最大値をとる加工電圧16Vにおいて20μmと通常の電解加工の加工間隙と比べて、一桁小さくなっている。

3.2 パルス幅 図4にパルス幅を0~150msにしたときの加工速度、側面間隙の関係を示す。なお、パルス休止時間は

Fig. 3 Etch rate and side gap versus machining voltage
パルス幅に関係なく一定とした。加工速度はパルス幅40ms周辺で最大値、側面間隙はパルス幅20ms周辺で最小値をとっている。このことから、ある領域までは通電している時間（パルス幅）に加工量が比例し、それよりもパルス幅が長くなると、電解生成物の発生が良好な加工を阻害し加工速度を遅くすると考えられる。従って加工を良好に行うためには、適切なパルス幅の選択と、電解生成物の除去が重要であると考えられる。

3.3 ピエゾ振動振幅 図5にピエゾ振動振幅が変化したときの加工速度、側面間隙の関係を示す。振幅10μmまで加工速度が上昇し、側面間隙が減少する傾向が見て取れるが、その値以上になると、加工速度が減少し、側面間隙が増加する傾向になる。図2にも示したように本研究では、加工パルス、ピエゾ振動、パルス休止時間の順を繰り返すことにより加工を行っており、またピエゾ上方移動、下方移動パルス挿入後にそれぞれ移動距離に比例した待ち時間を設定している。従って、ピエゾ振幅が増加した場合、ピエゾ振動に要する時

間が増大し、加工パルスが入力される周波数が小さくなり、加工能率が低下する。また、振幅の小さい ($10\mu\text{m}$ 以下) 領域では振幅の増加に伴い加工くずの除去効果が増大するが、振幅の大きい領域では振幅を増加させても除去効果は変わらない。これらの原因によって、加工速度の減少、側面間隙の増加が起こったものと考えられる。

3.4 電解液 図6に電解液濃度が変化したときの加工速度および側面間隙の関係を示す。同図の加工条件は基本加工条件と異なるが、加工速度、側面間隙は電解液濃度の増加に

Fig. 4 Etch rate and side gap versus pulse on-time

Fig. 5 Etch rate and side gap versus amplitude of flushing out

伴い、共に増加することが分かる。電解液濃度の影響は大きく、これらを高くすると、加工速度は上昇する反面、加工間隙が大きくなり、電極形状の転写精度が悪くなる。なお、電解加工で一般的に用いられる電解液として NaNO_3 水溶液を用

Fig. 6 Etch rate and side gap versus concentration of electrolyte
いて加工実験を行った結果、加工特性は電解液が NaClO_3 の場合と大差ないことを確認している。

4. 微細形状創成実験結果

ここでは、微細電解加工による3次元微細形状加工の可能性を考察するために、サブミリオオーダーの3次元形状を加工することを試みた。まず、逆極性（成形する電極を+極に）で電解加工により、微細角柱形状電極を作成し、この電極を用いた微細角穴加工を行った⁹⁾。この穴加工実験結果を基に、微細3次元形状創成のための問題点を考察し、考察結果を微細電解加工機に反映させ、3次元形状の加工を行った。

4.1 微細角柱形状電極を用いた穴加工 $\phi 500\mu\text{m}$ の Ni ワイヤから $\square 200\mu\text{m}$ 程度の角柱形状電極を成形した。加工方法は、まず加工機の接触検知機能を用いて加工物である Ni ワイヤの外周が成形電極の端面に接触する位置を求め、加工物を引き上げてから成形電極側に約 $100\mu\text{m}$ さらに送り込んだ位置に設定し、加工物を下方（-Z方向）に送り込みながら加工を行う。設定量 $750\mu\text{m}$ を送ることによって角柱の1面の加工が終わる。次に加工物を 90° 回転させ、同様に他の面の加工を行い、これを順次4回繰り返した。なお、加工条件は電極加工、角穴加工ともに、基本加工条件を用いた。

図7にその角柱形状電極を、また図8に製作した角柱形状電極を使用して厚さ $200\mu\text{m}$ の Ni 板に貫通穴加工を行ったときのSEM像をそれぞれ示す。

本研究では、電解加工用電源として、ここまで通常の電解加工に用いられている定電圧方式加工電源を用いてきたが、定電圧方式加工電源を使用した場合、短絡を起こした場合に大電流が流れ、電極などの損傷が問題になった。また、図8より分かるように、加工穴の深さが増すにつれて電流が増加

Fig. 7 Photo of machined electrode

Fig. 8 Photo of machined hole which is machined by using electrode in Fig. 7

し、これによって穴側面の溶出が進み、入口側の穴径が広がってしまう。従来これらの問題は、加工間隙が大きいこと、電極が大きいこと等の理由からほとんど問題とならなかったが、加工間隙、電極が小さい微細電解加工では、無視できない問題となることが分かった。そこでこれらの問題に対処するため、微細加工に好ましいと考えられる定電流方式加工電源を使用して加工実験を行い、その有効性を調べた。

図9に定電流方式加工電源を用い、 $\phi 0.5\text{mm}$ のニッケル電極で厚さ 0.2mm のニッケル板に貫通穴加工を行った結果の一例を示す。同図は加工電流と加工速度、側面間隙の関係を表している。加工速度は加工電流を増すにつれて向上していくが、 180mA を越えると逆に低下する。図3の結果と同様に、電流値が大きくなると電極表面が発生気泡に覆われるようになり、電解から放電に移行する状態になるためである。側面間隙は $10\mu\text{m}$ 程度であり、これはほぼ同等の加工条件にお

Fig. 9 Etch rate and side gap versus machining current

ける定電圧方式加工電源で加工した値 ($20\mu\text{m}$ 前後) に比べて小さくなっている。加工電流 180mA 以上の条件において加工物、電極間で短絡が生じる場合があるが、電極の損傷は定電圧方式加工電源の場合に比べて減少した。これらの結果より、微細電解加工の電源供給方式として定電流方式加工電源を用いると、定電圧方式加工電源と同様の加工特性で、電極損傷の少ない加工が可能であることが分かった。

4.2 微細3次元形状の加工 ここでは、微細単一形状電極を走査することにより3次元形状の加工を試みた結果について報告する。前章において微細電解加工には定電流方式加工電源が有効であることを示したが、定電流方式加工電源を用いて電解加工を行う場合、電極と加工物との距離が加工間隙程度である部分の面積（対向面積）の変化に伴い、電流密度が変化する。電流密度は電解加工中に流れている電流値を対向面積で除した値であり、この値は電解加工における除去速度と対応している。例として単一形状の電極による穴あけ加工を考えた場合、電極進入深さが大きくなると、対向面積が増加するために、電流密度が小さくなり、除去速度が減少する。単一形状電極を走査することにより3次元形状を加工する場合、対向面積は刻々と変化することが予測され、加工速度が変化する。そこで本研究では、加工状況に応じて、定電流方式加工電源の一定電流の値を制御するプログラムを組み込むこととした。これは、まず良好な加工を行うことができる電圧範囲を基礎実験により明らかにし、次に実際に形状を加工する際、その電圧範囲内で加工を行うため加工電圧をモニターし、加工電圧を制御する方法である。このプログラムを導入すると、対向面積の大きい場合には加工電流を大きく、小さい場合には加工電流を小さく制御することができる。図10は制御プログラムの効果を確認するために行った穴あけ加工実験の結果を示している。同図より分かるように、プ

5. 結論

本研究において得られた結論を以下に示す。

- 1) 3次元微細電解加工を可能にする実験装置を開発し、加工条件の変化に対する加工特性を調べる実験を行った結果、以下のことを明らかにした。
 - ① 加工速度は加工電圧の増加と共に増加するが、ある電圧以上になると電極表面から発生する気泡の影響で速度は減少する。
 - ② 高い加工速度、小さい側面間隙に適した加工用パルス幅、ピエゾ振動振幅が存在する。
 - ③ 電解液濃度の増加に伴い加工速度は増加するが、側面間隙も同様に増加する。
- 2) 微細電解加工に適した定電流方式加工電源を開発して3次元形状の加工を行い、微細電解加工機による微細3次元形状加工の可能性を示した。

Fig. 10 Machining voltage and electrode feed versus machining time

プログラムを組み込んでいない状態では、加工穴深さの増加に伴い、加工速度が減少するが、プログラムを組み込むと、穴の深さに対応して、加工電流を制御し、 $200\mu\text{m}$ 厚さの工作物貫通時間が700sから470sに短縮されていることが分かる。最後にこれらの電源、制御プログラムを用いて行った3次元形状加工の結果を図11に示す。これは大きさ、深さ方向の送り量が異なる正方形の工具経路を組み合わせることによって加工した。電極は図7に示す電極を用いた。同図より、電解加工を用いた3次元微細形状の加工が可能であることが分かる。

参考文献

- 1) C. van Osenbruggen, C. de Regt, Electrochemical Micromachining, Philips Tech. Rev., 42(1985)22.
- 2) 近森邦夫, 微細電解加工の可能性について, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1997)265.
- 3) K. Chikamori, Possibilities of Electrochemical Micromachining, Int. J. Japan Soc. Prec. Eng. Vol. 32 No. 1(1998)37.
- 4) 佐藤敏一, 電解加工と化学加工 (朝倉書店), (1970) 38.
- 5) 近森邦夫, 窪田真一郎, 微細電解加工による角柱形状の加工, 電気加工学会全国大会講演論文集, (1998) 27.

Work material: stainless steel, Machining time: 50min

Fig. 11 An example of three-dimensional micro machining in ECM