ドットマトリクス方式を用いた放電加工による 3次元形状創成加工法 (第1報)*

— 加工法の提案 —

古谷 克司** 江南 俊夫*** 毛利 尚武**

3D Profile Generation by Dot-Matrix EDM (1st Report)
- Proposal of Dot-Matrix EDM -

Katsushi FURUTANI, Toshio ENAMI and Naotake MOHRI

This paper deals with a new prototyping method called a dot-matrix method by electrical discharge machining (EDM). In this method, shapes are machined on a workpiece by scanning bundled wire electrodes. The machining process by the dot-matrix method is similar to the printing process with a dot-matrix impact printer. A prototype of a machining unit has six miniaturized electrode feeding devices. It measures $55 \times 55 \times 80$ mm. Wire electrodes of 0.3 mm in diameter are arranged with the pitches of 0.72 mm. This machining unit can control the length of each electrode independently. Planes and slopes are machined on a silicon wafer with a planetary motion. By compensating the wear of the electrode during EDM, various shapes with the accuracy of micrometers order can be obtained. Since it is unnecessary to produce a tool electrode before machining shapes, this method is available to reduce the total machining time.

Key words: 3D profile generation, electrical discharge machining, dot-matrix, linear drive, piezoelectric element

1. 緒 論

近年、加工の形態が多品種少量生産に移るにつれてフレキシブルな高精度加工機械への要求が高まっている。微小形状の創成法には、放電加工による方法¹⁾²⁾、光造形法³⁾⁴⁾、切削による方法⁵⁾⁶⁾などが提案されている。ラピッドプロトタイプング法として用いられている光造形法の場合、現状では分解能がサブミリ程度であるため表面の凹凸が目立つ。また、光硬化性樹脂しか用いることができない。したがって、金属への直接的なラピッドプロトタイプングには用いることができない。切削などの機械加工による場合には、微細形状を加工する工具の機械的な強度が弱い、工具欠損やバリが問題となる。放電加工では上記のような問題がないため、金属への微細加工法として有効であると言われている。

一方、マシニングセンタにおいてボールエンドミルを用いて加工するのと同様にして、放電加工機においても、円筒形などの単純形状を持つ1本の電極を走査することで三次元形状を創成する試みがなされている^{7)~9)}。加工速度を大きくするには、ピーク電流を増加させることが考えられる。しかし、1本の電極の場合には集中放電と同様の状態となり、電極の温度が上昇する。その結果、放電は連続アークとなり、加工面の性状を低下させる可能性が高くなる¹⁰⁾。全体の加工時間の短縮の方法として、複数の電極を用いて加工時間を短縮する方法が提案されている¹¹⁾。この方法の場合には、放電回路をそれぞれの電極に持たせることが可能であるから、1本あたりの加工速度は同じでも、全体の加工速度は電極数にほぼ比例して増加する。

三次元形状の創成法の一つとして、多数の棒を束ね一体化して

プレス型に用いることが提案されている¹²⁾¹³⁾。このシステムでは、1台の送り機構により棒が送られるため、棒の位置決めにかかる時間がかかるという問題があった。また、棒どうしの摩擦力により、棒の位置決めが困難になる場合があった。放電加工においても同様に、多数の電極を固定しその先端を切削加工により任意の形状に仕上げ、それを総形工具電極として用いて加工することが試みられた例がある¹⁴⁾。この方法では、切削加工により電極先端プロファイルを整形するため、一部分だけが異常に消耗した場合でも全体を整形し直す必要がある。また、総形工具電極となるため、工具電極と被加工物の大きさは等しくなる。そのため、電極断面積より大きな工作物にこの方法を適用する場合には電極の数が膨大になる。

これらの欠点を補う方法の一つに、少数の比較的細い電極を束にして走査しながら加工することが考えられる。また、この場合に電極束の先端プロファイルが容易に変更可能にするためには、少数の電極それぞれに送り機構を持たせることが考えられる。

本研究では、放電加工もしくは電解加工などにおいて、一列または複数列に配置された多数のピン状の電極の長さを制御しながらxy方向にスキャンすることで、三次元の微細形状を創成する方法を開発することを目的とする。以下では、この方式をドットマトリクス方式と呼ぶことにする。本論文では、まず、ドットマトリクス方式を提案し、その原理と特徴について述べる。その後、プロトタイプを用いて放電加工を行った結果について述べる。

2. ドットマトリクス方式の原理

ドットマトリクス方式の概念図を図1に示す。ドットマトリクス方式の加工ユニットは、超小型電極送り機構、電極ホルダ、ワイヤ電極より構成される。電極送り機構により駆動される複数のワイヤ電極の先端は、ホルダにより拘束され束ねられている。この加工ユニットはNC工作機械のような主軸およびテーブルを持つ機構に取り付けられている。本方式ではこの突き出し量を連続的に制御しながら

* 原稿受付 平成8年7月8日

** 正会員 豊田工業大学 (名古屋市天白区久方2-12-1)

*** 学生会員 豊田工業大学 (現、正会員 ユニチカ(株)中央研究所; 宇治市宇治小桜23番地)

Fig. 1 Concept of machining unit by dot-matrix method

Fig. 2 Two types of feeding

らスキャンすることで三次元形状加工を行う。この一連の動作はインパクトプリンタで印字する場合に似ている。異なる点は、プリンタはピンの突き出し量が一定であり、紙面に二次元の形状を印字するが、本方式の場合は突き出し量を連続的に制御するため、三次元の形状を創成することが可能となる。

放電加工に適用する場合の電極のサーボの方法には、図2(a)に示すようなそれぞれの電極に個別にサーボをかける方法と、同図(b)に示すような電極の束を一つの電極と見なして加工ユニット全体にサーボをかける方法の2通りが考えられる。

ドットマトリクス方式の特徴をまとめると以下になる。

- (1) 個々のワイヤ電極ごとに送り機構を持たせているため、それぞれの送り量を独立に制御することが可能であり、電極束の先端のプロファイルの調節が可能である。
- (2) 電極送り機構に電極ダイレクトドライブ装置を用いることで、電極消耗量を補償することができる。
- (3) 本方式では、ワイヤ長さを変更することで、加工深さを制御する。これを調整することで高精度な加工が行える。また、電極束プロファイルが転写されるため、形状に応じて加工ユニットをスキャンする軌跡を変更する必要がない。
- (4) スキャンしながら加工するため、被加工面全体をカバーするだけの電極が必要なく、ワイヤ電極の本数が少なくてすむ。したがって、比較的小規模な装置ですむ。
- (5) ワイヤ電極どうしを絶縁することで、放電の強制的な分散が可能となる。その結果、クラックレス加工が可能となることが期待できる¹⁵⁾。

3. プロトタイプの構成

3.1 全体の構成

Fig. 3 Configuration of dot-matrix EDM system

Fig. 4 Structure of Inchworm mechanism

システムの構成を図3に示す。加工ユニットが形彫り放電加工機（三菱電機製M35KC7G）に取り付けられており、この xy 方向の運動を利用して走査放電加工を行う。加工ユニットおよび電極先端の位置決め装置はパーソナルコンピュータ(80386, 16MHz)により制御される。

3.2 電極送り機構と加工ユニット

加工ユニット内に多数の電極送り機構を近接して配置するためには、機構を小型化する必要がある。これまでに、送りねじによる方法¹⁾の他に、インパクト駆動機構による方法¹⁶⁾¹⁷⁾、インチワーム機構による方法¹⁸⁾、楕円運動を用いる方法¹⁹⁾などを用いた小型の電極送り機構が多数開発されている。これらを比較した結果²⁰⁾、加工ユニットのプロトタイプには、この中でも電極送りが最も安定しているインチワーム機構による方法を採用することにした。また、電極ダイレクトドライブ方式を用いることにより、電極を繰り出すことで電極消耗を補償することができる。

インチワーム機構による電極送り機構の構造を図4に示す。インチワームの寸法は $15 \times 44 \times 53$ mm(ねじを除く)である。電極のたわみを最小限にするためには、電極のクランプ部を中心付近に近づける必要がある。したがって、クランプどうしの干渉を避けるために、電極のクランプ部は先端の角度が 60° である五角形状にした。インチワームのクランプとドライバのアクチュエータには、積層型圧電素子を用いた。それぞれの寸法は $5 \times 5 \times 20$ mm(150Vで $16\mu\text{m}$ の伸び)と $5 \times 5 \times 10$ mm(150Vで $8\mu\text{m}$ の伸び)である。クランプのクリアランスの調整が容易になるように、圧電素子をねじで押すようにした。ワイヤ電極には直径0.3mmのタングステン線を用いた。クランプとドライバに振幅100Vの電圧を印加した場合の1サイクルあたりの移動量は $1\mu\text{m}$ であり、この値は印加電圧の周波数が1kHzまで一定であった。

加工ユニットの外観を図5に示す。外形寸法は、約 $55 \times 55 \times 80$ mmである。6台のインチワーム構造を持つ電極ダイレクトドライ

Fig. 5 Appearance of machining unit

ブ機構が放射状に配置されている。クランプと電極ガイドの間隔は22mmである。電極は、クランプ部では半径3mmの円周上に配置されており、電極ガイド部では760 μ mの間隔で一列に配置されている。それぞれの電極送り機構はベースプレート上に絶縁物をはさんで固定されており、それぞれの電極は内径320 μ m、厚さ150 μ mのふっ素樹脂(ETFE)製パイプにより絶縁されている。このように、電極送り機構と電極とはチャンネルごとに電氣的に接続されているが、異なるチャンネルの電極送り機構と電極とは絶縁されている。したがって、それぞれの電極に独立な放電回路を接続することが可能であり、強制放電分散法¹⁵⁾の適用が可能となる。放電電源からの給電線は、電極送り機構のハウジングに接続され、それを通して電極へ給電する。また、電極どうしは機械的にも分離されているため、それぞれの送りを独立に制御することが可能である。

3.3 電極位置決め装置

放電加工機の電極主軸を上下させずに位置決めを行うため、楕円カムを用いて電極先端の位置決めを行った。

各電極の先端は、楕円カムへの接触を電氣的に検知することにより、繰出し量が少ない電極から位置決めされる。まず、楕円カムを初期角度に戻す。このとき、楕円カムの高さは最大になる。次に、位置決めする電極の繰出し量に対応するだけ半径が減少するように楕円カムを回転させる。そして、インチワーム機構で電極を送り、位置決めを行う。これを繰り返すことで、電極先端のプロファイルが形成される。

この楕円カムはステッピングモータ(PM型、2相、ステップ角1.8°)により駆動される。楕円カムの長径は15mm、短径は14mmであり、位置決め可能な範囲は0.5mmである。設定分解能は10 μ m、カムの同一位置における繰返し位置決め精度は約1 μ mであった。

4. 三次元形状の加工

4.1 加工手順

試作した加工ユニットを用いて三次元形状を加工する手順について説明する。今回は図2(b)に示した方法により、電極長さを位

(a) Top view

(b) Side view

(c) Front view

Fig. 6 Machining process

置決めしながら、加工ユニットを送る主軸機構にサーボをかけることで加工した。加工手順を図6に示す。走査方向は xy 、加工方向は z とした。加工手順は、以下の通りである。

- (1) 形状データよりワイヤ電極の長さを計算し、入力する。
- (2) 電極先端を加工面の形状データに合わせて位置決める。
- (3) 加工ユニットを所定の xy 座標に位置決めする。
- (4) 放電加工機主軸の z 方向サーボ機能を利用して、加工ユニット全体を1個の電極のように送り、加工する。
- (5) 同図(b)に示すように、設定深さまで加工した後、主軸を上げる。
- (6) 加工位置を x 軸方向に一定ピッチ分だけ送る。その後、(2)に戻り、消耗の累積を避けるために再度電極位置決めを行う。
- (7) x 方向の設定範囲の加工が終了した後、加工ユニットを y 方向に一定ピッチ分だけ送る。

これらの手順を設定した xy の範囲に対して繰り返すことで、三次元形状を加工する。

4.2 加工条件

表1に示す加工条件の下で放電加工により三次元形状加工を行った。電極有消耗条件で加工して角部が消耗して丸くなるのを防ぐ方法が提案されているが⁹⁾、本研究では低消耗条件で加工した。

Table 1 Machining conditions

Gap voltage	150 V
Peak current	4 A
Pulse duration	16 μ s
Duty factor	10 %
Radius of planetary motion	100 μ m
Working fluid	EDF-K (Mitsubishi oil)
Polarity of electrode	+
Workpiece	Si

Fig. 7 Geometrical arrangement of electrodes

インチワームの駆動周波数は200Hz、1ステップあたりの電極送り量は約1μmとした。被加工物には、放電加工における加工速度が高い、ドーパされたシリコンを用いた。四端子法で測定した抵抗率は、 $7.52 \times 10^{-3} \Omega \text{m}$ であった。

ドットマトリクス方式で加工を行う場合には、図7に示すように電極間隔が電極径に対して広い場合、未加工部分をなくすには、電極の走査ピッチを細かくするか揺動を付加する必要がある。ピッチを細かくすると、加工位置や電極先端位置の位置決めに要する時間が長くなるため、全体の加工時間が長くなる。そこで今回は、揺動を付加することにした。予備実験を行った結果、表1の加工条件の場合にはギャップが33μmとなることが明らかになった。したがって、必要な最小揺動半径は86μmとなる。以下の加工では、 xy 方向の電極走査ピッチは電極の配置間隔の半分の380μmとし、揺動半径は余裕を持たせて100μmとした。

今回は6本の電極を並列に接続し、電圧を供給した。また、 xy 方向の走査は手動で行った。

4.3 加工結果の例

上記の加工条件の下で三次元加工を行った。

加工形状の例を図8に示す。同図(a)は設定形状であり、加工ユニットの走査範囲は $4.2 \times 4.2 \text{mm}$ である。この範囲をカバーするために加工ユニットを電極走査ピッチごとに x 方向に11回ずつ、 y 方向に1回送り、合計24か所で加工を行った。最大加工深さは0.5mmとした。加工形状をレーザ変位計(測定範囲3mm、分解能0.2μm、スポット径 $35 \times 20 \mu\text{m}$)を用いて75μmピッチで10回測定し、平均した結果を図8(b)に示す。平面部A、斜面部Bともに設定形状通りに加工されていることがわかる。加工中に揺動を加えた場合、A面のうねりは約20μmであった。総加工時間は位置決めの時間を含めて120分であった。総加工時間に実際の加工時間が占める割合は約15%、カムを用いた電極先端の位置決めが占める時間は約10%である。残りの時間は加工位置の位置決めと、被加工物と電極先端位置決め装置との間の往復に要した時間である。今回は、テーブルを手動で送ったためこれらの移動に要する時間の比率が高くなったが、自動化することでこの時間は短縮可能であると考えられる。

次に、平面を加工した結果について述べる。この場合には、ワイヤ放電加工におけるセカンドカットと同様に、1回目の加工後電極先端を位置決め直すことで電極消耗量を補償し、さらにもう一度同じ箇所を加工した。加工した平面の断面形状を図9に示す。走査範囲は $4.2 \times 3.8 \text{mm}$ 、設定深さは250μmである。加工時間は1回目、2回目ともに30分であった。同図(a)に示した1回目の加工後では深さの誤差の平均が10μm、うねりが31μm(いずれも突出部を

(a) Designed shape

(b) Result of Machining

Fig. 8 Example of machined plane and slope

(a) After the first machining
(Average depth=-240μm, Rmax=31μm) (b) After the second machining
(Average depth=-248μm, Rmax=14μm)

Fig. 9 Profiles of machined plane (Designed depth=250μm)

除く)であったが、(b)に示した2回目の加工後にはそれぞれ2μmと14μmまで改善されていた。また、突出部は解消されていた。

加工形状のうねりは、電極角部の消耗により先端が丸くなることが原因であると考えられる。しかし、実験の結果より、電極消耗を

補償しながら加工を繰り返すことで、加工誤差を減少させることが可能であると言える。

5. 結 論

本論文ではドットマトリクス方式による三次元形状創成加工法を提案するとともに、プロトタイプを製作し、加工実験を行った。結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 6台のインチワーム機構を用いて加工ユニットを製作した。
- (2) 加工ユニット全体にサーボを掛けるとともに、揺動を付加することで加工を行い、三次元形状の加工が可能であることを確認した。
- (3) 電極消耗を補償しながら複数回同じ場所を加工することで高精度な加工が可能となった。

今後は個々の電極送り機構にサーボを掛けた場合の加工特性の検討、強制放電分散によるクラックレス加工¹⁵⁾の検討を行う予定である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり貴重なご助言をいただいた東京大学工学部樋口俊郎教授に感謝いたします。本機の試作、実験にご協力いただいた豊田工業大学試作工場の皆様、半導体センター三澤宏支副主幹、卒業生の石倉新治氏、安藤昇氏に感謝いたします。本研究の一部には平成5年度大澤科学技術振興財団、天田金属加工技術振興財団、中部電力基礎技術研究所の研究助成金および、平成6～8年度文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(2)(06452196)、同基盤研究(A)(1)(06555041)を用いました。記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) T. Masaki, K. Kawata and T. Masuzawa: Micro Electro-Discharge Machining and Its Applications, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical System '90, Napa Valley, CA, (1990) 21.
- 2) T. Masuzawa, M. Fujino, K. Kobayashi and T. Suzuki: Wire Electro-Discharge Grinding for Micro Machining, Ann. CIRP, 34, 1, (1985) 431.
- 3) J. P. Kruth: Material Ingress Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques, Ann. CIRP, 40, 2, (1991) 603.
- 4) 山口勝美, 中本剛: 光造形法による形状創成, 精密工学会誌, 61, 10 (1995) 1385.
- 5) Y. Takeuchi, K. Sawada and T. Sata: Computer Aided Ultra-Precision Micro-Machining of Metallic Materials, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Nagoya, Japan, (1995) 67.
- 6) 山形 豊, 樋口俊郎: 精密切削による微細形状創成, 精密工学会誌, 61, 10 (1995) 1361.
- 7) 金子 勉, 土屋政光: 円筒電極による三次元形状の放電加工, 精密工学会誌, 53, 4 (1987) 583.
- 8) 今野 廣, 小室克弘, 佐藤 真, 岸浪建史, 斎藤勝政: 多軸NC放電加工機による形状創成加工法に関する研究(第2報) - 電極の標準化と輪郭形状制御ソフトウェア -, 精密工学会誌, 49, 10 (1983) 1364.
- 9) 湯沢 隆, 真柄卓司, 後藤昭弘, 今井祥人, 佐藤達志, 千代知子, 小林和彦: 小径電極を用いた微細輪郭放電加工(第1報) - 基本特性評価 -, 1995年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1995) 965.
- 10) 毛利尚武, 齋藤長男, 大竹廣定, 高鷲民夫, 小林和彦: 大面積仕上げ放電加工の研究, 精密工学会誌, 53, 1 (1987) 124.
- 11) 樋口俊郎, 古谷克司, 山形 豊, 武田幸三: 多電極放電加工機の開発, 精密工学会誌, 58, 9 (1992) 1533.
- 12) 中島尚正: 針金束を用いた金型・電極の研究, 日本機械学会誌, 72, 603 (1969) 498.
- 13) E. v. Finckenstein and M. Kleiner: Flexible Numerically Controlled Tool System for Hydro-Mechanical Deep Drawing, Ann. CIRP, 40, 1, (1991) 311.
- 14) 鈴木 裕, 長岡政彦, 小栗達也: 棒状電極による荒放電加工の効率化, 型技術, 9, 7 (1994) 41.
- 15) 吉田隆夫, 毛利尚武, 齋藤長男, 鈴木政幸, 古谷克司: 多分割電極による加工現象の観察, 1994年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1994) 905.
- 16) 樋口俊郎, 古谷克司, 山形 豊, 武田幸三: 超小型放電加工機の開発, 精密工学会誌, 57, 5 (1991) 910.
- 17) 古谷克司, 毛利尚武, 樋口俊郎: 衝撃力を利用したリニアドライブ機構, 精密工学会誌, 61, 4 (1995) 527.
- 18) 毛利尚武, 森田浩充, 齋藤長男: 電極ダイレクトドライブ方式による細穴放電加工機の開発, 精密工学会誌, 58, 12 (1992) 2063.
- 19) 古谷克司, 毛利尚武, 樋口俊郎: 楕円運動を利用した放電加工用電極ダイレクトドライブ方式, 精密工学会誌, 61, 5 (1995) 661.
- 20) 古谷克司, 毛利尚武, 樋口俊郎: 細穴放電加工用電極送り機構の比較, 電気加工学会誌, 28, 59 (1994) 41.