

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	磁気浮上アクチュエータを用いた微細穴放電加工
Title(English)	Small-hole Electrical Discharge Machining Using a Maglev Actuator
著者(和文)	上山吉崇, 張曉友, 進士忠彦, 下河邊明, 中川孝幸, 佐藤達志, 三宅英孝
Authors(English)	Yoshitaka Ueyama, Xiaoyou Zhang, TADAHIKO SHINSHI, Akira Shimokohbe
出典(和文)	精密工学会誌, Vol. 76, No. 6, page 638-642
Citation(English)	, Vol. 76, No. 6, page 638-642
発行日 / Pub. date	2010, 6



# 磁気浮上アクチュエータを用いた微細穴放電加工\*

上山吉崇\*\* 張 暁友\*\*\* 進士忠彦\*\*\*\* 下河辺明\*\*\*\*  
中川孝幸† 佐藤達志† 三宅英孝†

Small-hole Electrical Discharge Machining Using a Maglev Actuator

Yoshitaka UEYAMA, Xiaoyou ZHANG, Tadahiko SHINSHI, Akira SHIMOKHBE,  
Takayuki NAKAGAWA, Tatsusi SATO and Hidetaka MIYAKE

This paper describes small-hole electrical discharge machining (EDM) with a high speed and high precision five degrees of freedom controlled maglev actuator. To machine deep small holes with a depth more than the positioning stroke of the maglev actuator, a conventional EDM machine having a long stroke and the maglev actuator were combined and cooperatively controlled. To avoid abnormal electrical discharge, we proposed two types of driving method for an electrode; jump and orbital motions using the maglev actuator. Experimental results show that high speed and high precision adjustment of the distance between a workpiece and the electrode by the maglev actuator is effective for high speed EDM. Moreover, the jump and orbital motions increase the machining speed due to improvement in the ejection of debris and bubbles.

**Key words:** electrical discharge machining (EDM), maglev actuator

## 1. 緒 言

放電加工では、液中で、工具電極（電極）と加工物間に電圧を加え、発生する放電のエネルギーによって加工物表面を溶解、除去する。導電性材料であれば、硬さによらず加工が可能であり<sup>1)2)</sup>、非接触加工のため、工具反力が切削加工に比べて小さく、微小工具の実現が可能である<sup>3)</sup>。

一方、切削加工と比べて、遅い加工速度の向上が課題である。放電加工では、電極と加工物の距離（極間距離）は、放電による加工物の除去によって、常に変化している。放電をたゆまなく発生させ、高速加工を実現するためには、放電に適する極間距離を常に保つことが必要である。このため、放電加工機の電極駆動機構には、高い応答性が求められる。しかし、一般的な放電加工機では、電極の多自由度駆動に、1軸ステージの積み重ね機構が用いられており、可動部質量が大きいステージが担う運動方向では、電極の応答性が低い。

これに対して、磁気軸受<sup>4)5)</sup>、可動コイル<sup>6)</sup>、圧電素子<sup>7)8)9)</sup>を用い、電極を1自由度方向に高速駆動する機構が提案されているが、3次元構造の加工に対応可能な、5自由度方向に、高速・高精度駆動可能なアクチュエータの利用は検討されていない。これに対して、筆者らのグループは、既存の放電加工機に取り付け可能な、5自由度制御型磁気浮上アクチュエータを提案・開発した<sup>10)</sup>。また、磁気浮上アクチュエータ単体を用いて、深さ数十～数百マイクロメートルの放電穴加工を行い、加工速度が従来比20～400%向上することを確認している<sup>11)</sup>。一方、近年、エンジン用噴射ノズル、インクジェットプリンタノズル、

医療機械などでは、直径数十～数百マイクロメートルで、高アスペクト比の微細穴が求められており<sup>12)</sup>、放電加工による高速・高精度加工が期待されている。

本論文では、磁気浮上アクチュエータのストロークを超えた、深さが数ミリメートル以上の微細穴加工の実現のため、磁気浮上アクチュエータを既存の放電加工機に取り付け、両位置決め機構を協調制御する加工システムを構築した。

また、異常放電の回避に対して、加工穴中の加工液を強制循環し、加工屑の排出性、気泡の流動性を改善するために、磁気浮上アクチュエータの、軸方向ミリメートルオーダーのストロークと高速駆動機能を利用したジャンプ、および多自由度・高速・高精度駆動を利用した、電極の高速・高精度揺動の効果を、それぞれ検討した。

## 2. 協調制御放電加工システム

### 2.1 磁気浮上アクチュエータ

本実験で使用する、磁気浮上アクチュエータ<sup>10)</sup>の概要を図1に示す。磁気浮上アクチュエータは、電極を取り付けるロータ、ロータを軸方向（Z方向）に駆動するためのスラスト磁気軸受、半径方向（X, Y方向）、および、ロータの重心を中心に、X, Y軸回り（ $\Theta, \Phi$ 方向）に駆動するための、上下2組のラジアル磁気軸受、および電極への給電部からなる。

スラスト磁気軸受は、ミリメートルオーダーのジャンプ駆動が可能で、ボイスコイルモータ型磁気軸受を採用し、ロータに組み込んだ1個の永久磁石リングとハウジングに取り付けた2個の空心コイルからなる。また、別途、ロータの自重補償のため、ハウジングには、1個の永久磁石リングが取り付けられており、ロータ中の永久磁石リング間に吸引力を発生させる。これにより、スラスト磁気軸受のバイアス電流を低減でき、磁気浮上アクチュエータの発熱を抑制できる。ラジアル磁気軸受には、リラクタンソカ方式のヘテロポーラ型磁気軸受を採用し、電磁石のコアには渦電流損を減少する目的で、積層鋼板を使用する。

\* 原稿受付 平成 21 年 6 月 16 日

\*\* 学生会員 東京工業大学大学院（神奈川県横浜市緑区長津田町 4259）

\*\*\* 正 会 員 日本工業大学（埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1）

\*\*\*\* 正 会 員 東京工業大学精密工学研究所（神奈川県横浜市緑区長津田町 4259）

† 正 会 員 三菱電機（株）（東京都千代田区丸の内 8-1-1）

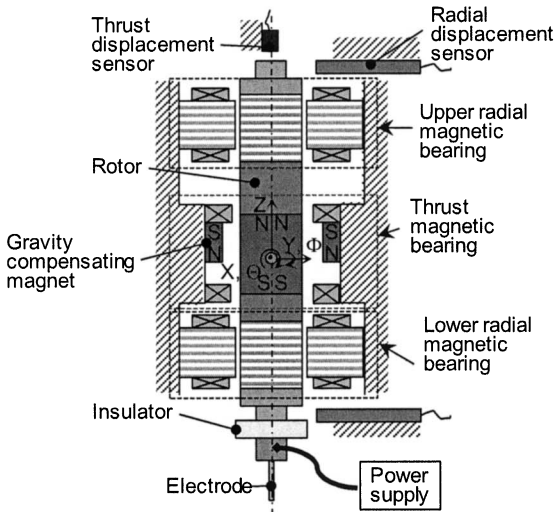


Fig.1 Configuration of maglev actuator

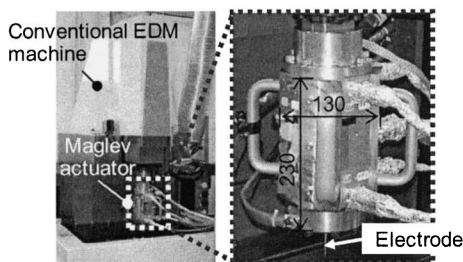


Fig.2 Cooperative control system using a conventional EDM machine and the maglev actuator

図2に、磁気浮上アクチュエータを、既存の放電加工機 (EA12-E, 三菱電機株) に取り付けられた状態の写真を示す。磁気浮上アクチュエータ単体は、幅130mm、高さ230mm、質量26kgである。また、写真には示されていないが、内蔵されるロータは、長さ200mm、直径φ26mm、質量0.64kgである。

表1にロータの5自由度方向の位置決め性能を示す。磁気浮上アクチュエータは半径、軸、傾き方向にそれぞれ、260, 240, 140Hzのバンド幅を、また、0.15μm, 0.50μm, 2μradの位置決め分解能を有する。このため、加工中は高速かつ高精度に極間距離や、電極の姿勢を調整可能である。Z方向の最大ストロークは2mmであり、ミリメートルオーダーの高速ジャンプ動作が可能である。

2.2 協調制御放電加工システム

図2のように、磁気浮上アクチュエータを既存の放電加工機に取り付けることによって、磁気浮上アクチュエータのストローク不足を補い、深い穴加工を実現するため、協調制御放電加工システムを構築した。本加工システムでは、磁気浮上アクチュエータを電極の高速・高精度5自由度駆動機構として、既存の放電加工機を磁気浮上アクチュエータの並進3自由度方向の粗動機構として利用する。

図3に、協調制御放電加工システムを用い、Z方向に穴加工を行う場合の、ブロック線図を示す。本加工システムでは、加工中、極間電圧Vを、増幅、フィルタリング処理した後、加工用コントローラのフィードバック信号として利用する。加工用コントローラは、比例と積分要素からなり、フィードバック電圧値V<sub>b</sub>と極間電圧目標値V<sub>r</sub>との偏差から、電極の位置目標値Z<sub>r</sub>を生成する。Z<sub>r</sub>は、磁気浮上アクチュエータの位置決めコン

Table 1 Positioning performances of maglev actuator

	Bandwidth	Positioning resolution	Positioning stroke
X, Y directions	260Hz	0.15μm	200μm
Z direction	240Hz	0.5μm	2mm
Θ, Φ directions	140Hz	2μrad	2mrad

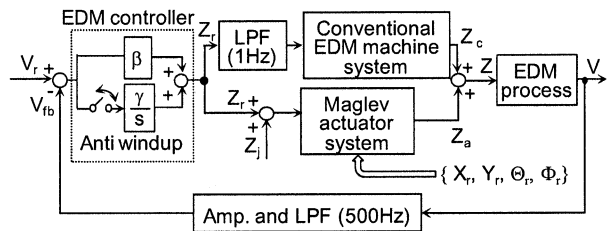


Fig.3 Block diagram of cooperative control system for machining a hole in Z direction

トローラに入力され、極間距離を高速・高精度に調整する。

また、同時に、ローパスフィルタにより、Z<sub>r</sub>の高周波数成分を取り除いたものは、既存の放電加工機の位置制御システムに入力され、既存の放電加工機は、電極とともに磁気浮上アクチュエータを緩やかに駆動する。図中、Z<sub>c</sub>は既存の放電加工機による磁気浮上アクチュエータの送り量、Z<sub>a</sub>は磁気浮上アクチュエータによる電極の送り量、両者の和Zは電極の総移動量である。

3. 高速微細穴放電加工のための電極駆動法

高アスペクト比の微細穴放電加工の問題として、加工穴中の加工屑、気泡の滞留によって、異常放電が発生し、加工速度や加工精度が著しく低下することが挙げられる。このため、加工穴中に滞留した加工屑の排出性、気泡の流動性の改善は、加工の高速・高精度化において重要課題である。

これに対して、本実験では、加工穴中の加工液を強制循環し、加工屑の排出性、気泡の流動性を改善するため、磁気浮上アクチュエータの軸方向ミリメートルオーダーのストロークと高速駆動を利用したジャンプ、多自由度・高速・高精度駆動を利用した電極の揺動の効果を、それぞれ検討する。

ジャンプは、電極を加工中の穴から退避・接近することにより、加工穴中の加工液を強制排出、また、穴外の加工液を強制流入させ、加工穴中の加工屑の排出性、気泡の流動性を改善することを目的とする。但し、ジャンプ中、極間電圧は開放となるため、加工が停止する。このため、ジャンプ振幅と速度はできるだけ大きく、ジャンプ時間をできるだけ短縮することが重要である。

但し、電極をステップ状に駆動すると、ジャンプ動作終了時に、電極がオーバーシュートして、加工物に接触する、残留振動が長時間持続し、適切な極間距離を維持することが困難になる恐れがある。このため、ジャンプ目標値軌跡Z<sub>j</sub>を、式(1)に示すような三角波形に設定した上で、電極がジャンプ終了後、オーバーシュートや残留振動しない、できるだけ大きなジャンプ振幅・速度を実験的に調査し、加工に適用した。

$$Z_j(t) = \begin{cases} 0 & t < nt_0, t > nt_0 + \Delta t \\ k(t - nt_0) & nt_0 \leq t \leq nt_0 + 0.5\Delta t \\ -k[t - (nt_0 + \Delta t)] & nt_0 + 0.5\Delta t < t \leq nt_0 + \Delta t \end{cases} \quad (1)$$

n = 1, 2, 3, .....

ただし、式中、 $k$ ,  $t_0$ ,  $\Delta t$  は、それぞれ、ジャンプ速度、ジャンプ周期、ジャンプ1回あたりの時間である。

また、ジャンプ中は、極間電圧が開放となるため、加工用コントローラ中の積分器に偏差が蓄積され続ける。このため、ジャンプ動作終了後、正常な加工制御に移行するには、積分器の偏差が減少する時間が必要になる。この問題を解決するために、ジャンプ中は積分動作を休止し、積分器の飽和を防止することで、ジャンプ終了後、速やかに正常な加工制御へ移行させる。

図4に、放電加工中の磁気浮上アクチュエータによる、電極の変位 $Z_e$ を示す。なお、ジャンプ目標値軌跡 $Z_j$ の設定は、 $t_0=1s$ ,  $\Delta t = 0.06s$ ,  $k = 26.7mm/s$ とし、ジャンプ高さを0.8mmとした。ただし、ロータの追従誤差のため、実際のジャンプ高さは0.75mm、ジャンプ速度は25.0mm/sであった。図4から、ジャンプ終了直後、ロータのオーバーシュートや残留振動が発生していないことが確認できる。

一方、同様に加工屑排出性および気泡流動性を改善することを目的として、加工方向と垂直な平面内で、電極が円軌道を描くような、高速揺動も実施する。なお、電極の揺動が加工穴直径に、大きく影響を与えないよう、揺動の振幅は数マイクロメートル程度とする。図3のブロック線図中、 $X_r$ ,  $Y_r$ は揺動の目標値であり、位相が $90^\circ$ 異なる同振幅の正弦波を入力している。図5は、加工中のロータのXY方向の軌跡を示したものである。300Hz、振幅 $2.5\mu m$ でのロータの揺動が確認された。

#### 4. 放電加工実験

##### 4.1 加工方法

磁気浮上アクチュエータによる極間距離の高速・高精度調整および異常放電回避のための電極駆動法の効果を検討するため、以下の4つの加工方法で、軸方向に貫通穴放電加工を行う。(1) 既存の放電加工機単体を用い、電極をジャンプおよび揺動させない加工、(2) 協調制御放電加工システムを用い、電極をジャンプおよび揺動させない加工、(3) 協調制御放電加工システムを用い、電極をジャンプさせる加工、(4) 協調制御放電加工システムを用い、電極をジャンプおよび揺動させる加工。また、本実験では、既存の放電加工機による磁気浮上アクチュエータ(電極)の送り速度が、非連続的に増加した時点で、電極が加工物を貫通したと判断した。

##### 4.2 加工条件

加工には、 $\phi 1$  および  $\phi 0.1$  の銅製円柱電極を使用し、加工液は油(メタルワーク EDF-K, ㈱新日本石油)、加工物は硬さ40Hrcのプリハードン鋼を用いた。加工電源はRC回路方式とした。 $\phi 1$ の電極を使用する場合、電源設定は、開放電圧、コンデンサ容量、抵抗値をそれぞれ150V, 0.01 $\mu$ F, 1.1k $\Omega$ とし、厚さ4mmの加工物の貫通加工を行う。またジャンプは、周期 $t_0=1s$ 、ジャンプ1回あたりの時間 $\Delta t=0.06s$ 、速度25.0mm/s、高さ0.75mmとし、揺動は、周波数および振幅をそれぞれ、300Hz, 2.5 $\mu m$ とする。 $\phi 0.1$ の電極を使用する場合、電源設定は、開放電圧、コンデンサ容量、抵抗値をそれぞれ80V, 0.01 $\mu$ F, 1.1k $\Omega$ とし、厚さ1mmの加工物の貫通加工を行う。電極のジャンプは、 $t_0=1s$ ,  $\Delta t=0.06s$ 、速度16.0mm/s、高さ0.48mmとし、電極の揺動周波数、振幅をそれぞれ、300Hz, 2.5 $\mu m$ にする。本実験では、ロータのZ軸回りに、特別な拘束は与えていないが、ロータの回転は、目視した範囲では確認できなかった。

##### 4.3 電極取り付け誤差の補正

高アスペクト比の穴加工においては、電極取り付け時の姿勢

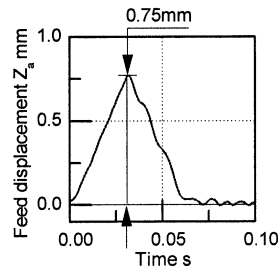


Fig.4 Displacement of electrode during jump

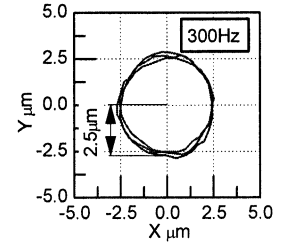


Fig.5 Trajectory of electrode during orbital motion

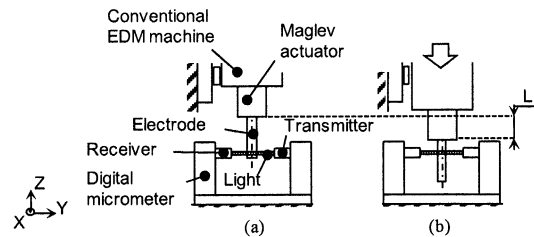


Fig.6 Principle of measurement of electrode's attitude

誤差が、加工精度に大きく影響する。このため、本実験では、磁気浮上アクチュエータの5自由度位置決め機能を活かし、電極取り付け姿勢誤差を補正する。

電極の傾きは、2次元の非接触光学式寸法測定器(LS-7010, ㈱キーエンス)を使用し、次の手順で測定される。ロータに電極を取り付け、磁気浮上を開始する。寸法測定器は、加工液を排出した加工槽に設置される。

次に、図6(a)に示すように、寸法測定器の投光部から、Z軸に垂直で、X軸に水平な方向に奥行きを持つ、帯状の光を、電極の先端付近に照射する。そして、受光部に生じる、電極の影を利用して、電極先端付近の、X方向における電極中心位置を測定する。次に、図6(b)のように、既存の放電加工機により、磁気浮上アクチュエータごと電極をZ方向にLだけ下降させ、電極根元付近における、電極中心位置を、先端付近と同様に測定する。電極の傾きは、上下2ヶ所における電極中心位置の差と、加工機によって磁気浮上アクチュエータを下降した距離Lから計算する。Y方向の電極の傾きの測定も同様に行う。

最後に、電極の取り付け姿勢誤差の補正方法を説明する。電極の姿勢誤差が、磁気浮上アクチュエータの傾き方向のストローク( $\pm 1mrad$ )を大きく超える場合、電極への給電部品と絶縁板との間に調整用シムを入れ、電極の傾きが、磁気浮上アクチュエータによって補正可能になる範囲まで粗補正する。次に、電極の取り付け姿勢誤差を打ち消すよう、磁気浮上アクチュエータの傾き方向目標値( $\Theta_r$ ,  $\Phi_r$ )を入力し、電極を傾き方向に駆動することによって、電極の取り付け姿勢誤差を補償する。電極の取り付け姿勢誤差は、直交する2方向(X, Y方向)について、それぞれ補正する。

#### 4.4 実験結果

##### 4.4.1 $\phi 1$ 電極を用いた穴加工

図7に、レーザ変位計(LC-2010, ㈱キーエンス)によって計測した、既存の放電加工機による磁気浮上アクチュエータ(電極)の送り量 $Z_c$ の時間変化を示す。加工終了時の総送り量は、電極の消耗によって、加工物の厚さ4mmを超えている。加工方法(1)では、電極が大きく振動しており、送り速度が最も遅い。

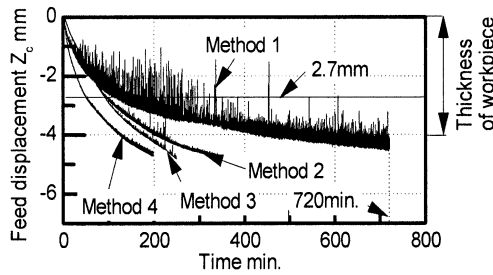


Fig.7 Feed displacement  $Z_c(\phi)$

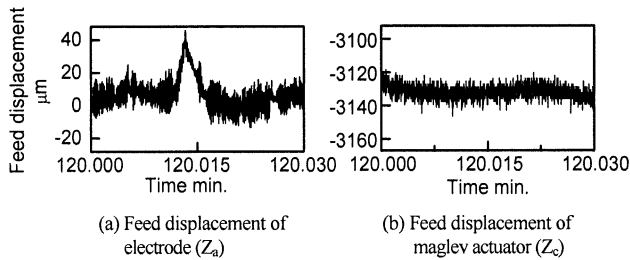


Fig.8 Feed displacement  $Z_a$  and  $Z_c(\phi)$

このことから、既存の放電加工機単体では、安定な放電状態を保つため、極間距離を高速・高精度に調整することは困難であると考えられる。尚、電極は加工物を貫通せず、加工を720分で中断した。

これに対して、加工方法(2)では、加工方法(1)と比較して、電極の振動が小さく、送り速度が大きい。このことから、磁気浮上アクチュエータによって、極間距離を高速・高精度に調整することで、安定な放電状態が維持されていると考えられる。加工方法(3)では、加工方法(2)と比較して、加工開始直後は、大きな違いがみられないが、送り量が約2.7mmを超えた後は、電極の送り速度が大きくなっていることが確認できる。このことから、深い微細穴加工においては、ジャンプによって加工屑の排出性と気泡の流動性が改善されていると考えられる。

さらに、加工方法(4)では、加工開始の加工深さが浅い段階から、他の加工方法より、電極の送り速度が大きくなっており、電極のジャンプおよび揺動の併用により、安定な放電状態を維持できていると考えられる。なお、加工方法(1)~(4)において、電極の総送り量に大きな違いはなく、従って、電極の消耗長さは、加工方法(1)~(4)で変わらなかった。

加工方法(1)では1回、他の加工方法では3回ずつ加工を行った。加工穴深さと加工時間の比から求めた加工速度は、各加工方法において、平均(1)  $0.08\mu\text{m/s}$ 、(2)  $0.17\mu\text{m/s}$ 、(3)  $0.26\mu\text{m/s}$ 、(4)  $0.36\mu\text{m/s}$ であり、加工方法(1)と比較して、加工方法(2)、(3)、(4)では、加工速度はそれぞれ2.1、3.3、4.5倍となった。これらの結果から、磁気浮上アクチュエータによる高速・高精度な極間距離の調整および、電極のジャンプと揺動が、微細穴加工の高速化に対して有効であることが明らかになった。

図8(a)は、加工方法(2)において、渦電流変位センサ(AEC-5505, 株式会社電子応用)によって計測した、短時間での磁気浮上アクチュエータによる電極送り量  $Z_a$  の波形である。波形が、三角形状になっている部分は、電極位置の高速な補正を示す。また、図8(b)は、同時間での、既存の放電加工機による磁気浮

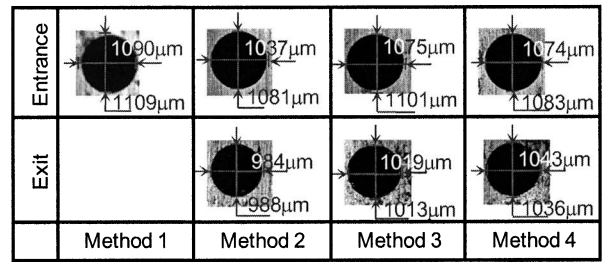
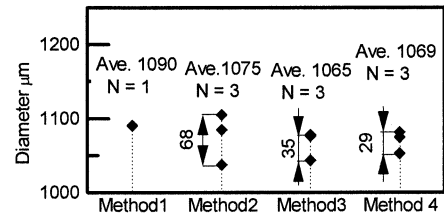
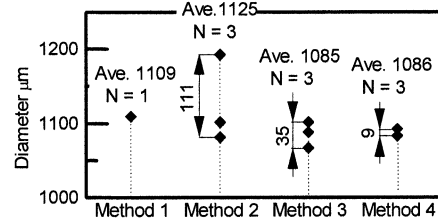


Fig.9 Machined holes ( $\phi 1$ )



(a) X direction



(b) Y direction

Fig.10 Diameter of machined holes ( $\phi 1$ , Entrance)

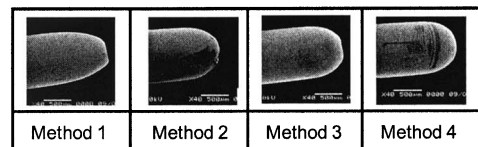


Fig.11 Tip of electrode after machining ( $\phi 1$ )

上アクチュエータ(電極)の送り量  $Z_c$  の波形である。 $Z_a$  と比較して、 $Z_c$  は大きく変化しておらず、既存の放電加工機は電極を緩やかに駆動していることが確認できる。

図9は、加工穴の一部について、入口および出口をコンフォーカル顕微鏡(HD100D, 株式会社レーザテック)で観察した写真である。加工方法(1)では、電極が加工物を貫通していないため、写真は入口のみである。他の加工方法では、出口直径は、入口のそれより小さい。これは電極先端の消耗によるものと考えられる。写真では、入口と出口直径の差は、加工方法(2)から(4)になるに従い、小さくなっている。

また、図10(a)、(b)に、それぞれの加工方法ごとに、加工穴の入口直径の分布を、X、Y方向でまとめたものを示す。いずれの方向も、同じ加工方法でのサンプルの最大直径と最小直径の差は、加工方法(2)から(4)になるに従い、小さくなっている。

図11に、走査電子顕微鏡(JSM-5610, 株式会社日本電子)によって観察した、加工終了後の電極先端形状を示す。加工速度が遅い加工方法(1)と比較して、加工速度が改善された加工方法

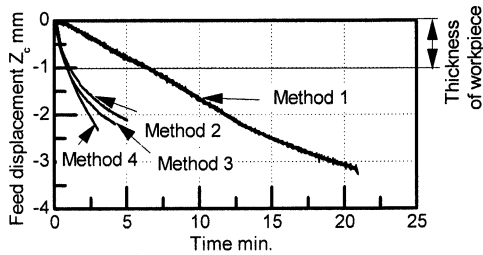


Fig.12 Feed displacement  $Z_c$  ( $\phi 0.1$ )

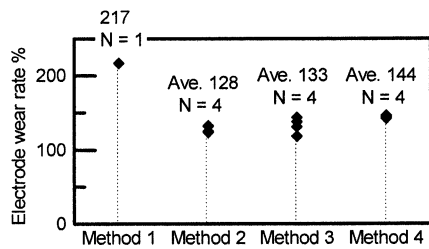


Fig.13 Electrode wear rate ( $\phi 0.1$ )

Entrance	147µm 89µm	144µm 134µm	151µm 151µm	149µm 147µm
Exit	139µm 35µm	138µm 51µm	131µm 32µm	147µm 145µm
	Method 1	Method 2	Method 3	Method 4

Fig.14 Machined holes ( $\phi 0.1$ )

(2) ~ (4) では、電極先端の消耗が低減されている。

4.4.2  $\phi 0.1$ 電極を用いた穴加工

図 1 2 に、既存の放電加工機による磁気浮上アクチュエータ (電極) の送り量  $Z_c$  を示す。送り量が、加工物の厚さ 1mm を超えているのは、電極の消耗による。加工方法 (1) では、他の加工方法と比較して、送り速度が最も遅い。一方、 $\phi 1$  の場合と同様に、加工方法 (2) ~ (4) になるに従い、送り速度が増加していることが確認できる。

加工方法 (1) では 1 回、他の加工方法では 4 回ずつ加工を行った結果から求めた加工速度は、平均 (1) 0.80 $\mu\text{m/s}$ , (2) 4.21 $\mu\text{m/s}$ , (3) 4.92 $\mu\text{m/s}$ , (4) 5.30 $\mu\text{m/s}$  となり。加工方法 (1) と比較して、(2), (3), (4) ではそれぞれ 5.3, 6.2, 6.6 倍となった。

図 1 3 に、電極消耗長さと同加工穴深さの比によって計算した電極消耗率を示す。電極消耗率の平均は (1) 217%, (2) 128%, (3) 133%, (4) 144% であり、既存の放電加工機単体を用いた加工方法 (1) と比較して、協調制御放電加工システムを用いた加工方法 (2) ~ (4) では、電極消耗を低減できることが明らかとなった。これは、磁気浮上アクチュエータの高速・高精度な極間距離の調整によって、異常放電が減少したことや加工時間が短縮したことによると考えられる。

図 1 4 は、加工穴の一部についての、入口および出口の写真である。 $\phi 1$  の電極を使用した場合と同様に、ジャンプと揺動を組み合わせた加工方法 (4) では、加工穴入口と出口の直径差が最も小さくなっていることが確認できる。ただし、 $\phi 1$  の電極

の場合と異なり、(3) では、この値が加工方法 (2) より大きくなっている。この原因は、現在のところ不明であるが、今後検討する。

加工方法 (1) では、電極取り付け姿勢誤差の粗補正のみを行い、電極の傾きは 4.3mrad であった。一方、加工方法 (2) ~ (4) では、磁気浮上アクチュエータを用いて、電極取り付け姿勢誤差の高精度な補正を行ったため、傾きはそれぞれ、0.75mrad, 0.91mrad, 1.5mrad であった。図 1 4 から、加工方法 (1) では、他の加工方法と比較して、入口の形状がゆがんでいることが確認できる。このことから、サンプル数は少ないが、磁気浮上アクチュエータを用い、電極の傾きを小さくすることで、加工穴のゆがみが改善される可能性がある。しかし、電極の傾きが最も小さい、加工方法 (2) より、加工方法 (3), (4) で、加工穴のゆがみが小さくなっている。この原因については不明であり、今後は、電極の傾きの大きさと加工穴形状のゆがみの関係を検討する。

5. 結 言

本論文では、磁気浮上アクチュエータのストローク不足を補い、深い穴加工を実現するため、既存の放電加工機に磁気浮上アクチュエータを取り付け、両位置決め機構を協調制御する加工システム (協調制御放電加工システム) を構築した。

また、異常放電の回避を目的とし、加工穴中の加工屑の排出性、気泡の流動性を改善するため、磁気浮上アクチュエータの軸方向ミリメートルオーダーのストロークと高速駆動を利用したジャンプ、多自由度・高速・高精度駆動を利用した、揺動の効果を検討し、放電穴加工において、以下の結果を得た。

- (1) 協調制御放電加工システムを用いた穴加工では、磁気浮上アクチュエータによる、高速・高精度な極間距離の調整によって、既存の放電加工機単体を用いた加工と比較して、加工速度が向上した。
- (2) 磁気浮上アクチュエータを用いた、電極のジャンプおよび揺動により、加工速度が更に向上し、加工穴寸法のばらつきも軽減した。

参 考 文 献

- 1) 増沢隆久：マイクロ放電加工，精密工学会誌，68, 2, (2002) 180.
- 2) 国枝正典：放電加工の基礎と将来展望 I，精密工学会誌，71, 1, (2005) 58.
- 3) 国枝正典：放電加工の基礎と将来展望 II，精密工学会誌，71, 2, (2005) 189.
- 4) 中川孝幸，三宅英孝，今井祥人，戸倉和：磁気支持アクチュエータによる高速微細放電加工モジュールの開発，精密工学会誌，72, 6, (2006) 677.
- 5) 三宅英孝，中川孝幸，今井祥人：細穴放電加工の高速化，電気加工技術，28, 90, (2004) 1.
- 6) 増沢隆久，田中勝也，藤野正俊：可動式コイルヘッドによる放電微細加工の高速化，電気加工学会誌，8, 16, (1975) 43.
- 7) 今井祥人，佐竹彰，種田淳，小林和彦：高速電極駆動装置による放電加工速度の改善，電気加工学会誌，27, 55, (1993) 23.
- 8) 古谷克司，毛利尚武，樋口俊郎：インパクト駆動機構を用いた自走式放電加工機，精密工学会誌，63, 9, (1997) 1290.
- 9) 家澤雅宏，今城昭彦，鈴木智：高速微動アクチュエータを用いた細穴放電加工の高速化，日本機械学会論文集 C, 69, 680, (2003) 146.
- 10) X. ZHANG, T. SHINSHI, G. KAJIWARA, A. SHIMOKOHBE, Y. IMAI, H. MIYAKE and T. NAKAGAWA: A 5-DOF Controlled Maglev Local Actuator and its Application to Electrical Discharge Machining, Precision Engineering, 32, 4, (2008) 289.
- 11) X. ZHANG, T. SHINSHI, A. SHIMOKOHBE, T. SATO, H. MIYAKE and T. NAKAGAWA: High-speed Electrical Discharge Machining By Using a 5-DOF Controlled Maglev Local Actuator, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2, 4, (2008) 493.
- 12) 許 東亞，増沢隆久，藤野正俊：放電による微細深穴加工の研究，電気加工学会誌，35, 79, (2001) 32.