高速電極駆動装置による放電加工速度の改善

今井祥人* 佐竹 彰* 種田 淳* 小林和彦*

Improvement of EDM Machining Speed by using a High Frequency Response Actuator

Yoshihito IMAI, Akira SATAKE, Atsushi TANEDA
and Kazuhiko KOBAYASHI

Abstract

The authors developed a high frequency response actuator which is used as an adaptor for a conventional electric discharge machine. With the adaptor, the effects of frequency response to machining stability and machining speed were examined. Experimental results show that machining speed was improved by roughly 1.5~2.5 for (1) the machining with fluid flushing on the finishing condition ($10\mu\text{m}R_{\text{max}}$) (2) the machining with jump action on the high-gloss finishing condition ($1\mu\text{m}R_{\text{max}}$) (3) the machining of the micro-hole ($\phi 240\mu\text{m}$). The machining speed for the machining with jump action on the finishing condition ($10\mu\text{m}R_{\text{max}}$), however, was not improved. The difference of the improvement in the machining speed is explained qualitatively by the difference of the behavior of debris in the machining gap.

1. はじめに

近年、放電加工機は従来の金型製作分野だけでなく機械部品加工にも広く利用されつつあり、加工速度の向上に対する要求が高まっている。加工速度向上のためには、安定な放電加工状態をいかに維持するかが重要な課題である。従来、安定な放電加工状態を維持するために、例えば放電加工状態を極間平均電圧により検出しその検出値が一定となるように加工電極位置を調節する極間制御系が構成されてきた。しかしながら、数百Hz以上の繰り返し過渡アーク放電による加工プロセスのダイナミ

*三菱電機(株)

クスを考慮すれば、帯域が数十Hzしかない極間制御系による制御性能には限界があると予想される。これまでもこのような点に着目し加工用電源系での最小分散制御、微細加工領域においてのボイスコイルや圧電素子を用いた電極駆動装置、またマシニングセンタやロボットでの放電加工における専用電極駆動ユニットなどが加工速度改善に有効であることが報告されている^{1),2),3),4),5)}。

本研究では、これらの結果を踏まえ従来の放電加工機に付加することができる高速電極駆動装置を製作し、電極駆動系的高速応答が、どのように加工状態を安定化するか、そしてどのような加工領域において加工速度改善を実現できるかについて述べる⁶⁾。

2. 高速電極駆動装置の概略

試作した高速電極駆動装置の構造を図1に示す。この駆動装置では、高速応答の実現および電極の駆動方向以外への偏位を最小にするために、円筒状のダイヤフラム構造とし中央に圧電素子を配置している。そして圧電素子はヒステリシス特性を有するため、光学式変位センサーによる位置ループ系を構成することで指令電圧に比例した変位を得ている。表1に高速電極駆動装置の諸特性を示す。

図1 高速電極駆動装置の概略図

図1に示す高速電極駆動装置を従来機のZ軸に取付け極間制御系を構成する。図2は極間制御系のブロック図である。この制御系では、極間平均電圧が常に一定となるように、高速電極駆動装置が主に間隙距離を調節するとともに従来機のZ軸がジャ

図2 極間制御系のブロック図

表1 高速電極駆動装置の諸特性

圧電素子の形状(mm)	円筒状（内径：8，外径：20，高さ：52）
圧電素子の駆動電圧(v)	0～800
最大ストローク(μm)	±14（電極負荷1kg，800Hz：±7）
位置ループ応答周波数(Hz)	～800
位置決め分解能(μm)	0.1以下
偏位量 X/Z, Y/Z (dB)	－30以下（～1kHz）

図3 位置ループの周波数特性

図4 従来機に取付けた高速電極駆動装置

ンプ動作や加工の進みに対応した平均的な電極送りを行う。また、高速電極駆動装置のストロークでは不安定な加工状態を回避するのに不十分な場合には従来のZ軸が協調動作する。したがって、通常の加工状態は高速電極駆動装置の応答特性に支配され、その応答周波数を図2のローパスフィルタの帯域を調整することで変更する。図3は高速電極駆動装置だけの位置ループ特性、および30Hzと300Hzに設定されたローパスフィルタを含めた高速電極駆動装置の見かけ上の位置ループ特性を示す。図4は高速電極駆動装置を従来の放電加工機に取付けた様子を示す。

3. 高速電極駆動装置による放電加工

従来のZ軸に高速電極駆動装置を付加し、電極駆動系の応答周波数がどのように加工速度改善に寄与するかを検証する。ここでは、一般に安定な放電加工状態を維持することが難しい仕上げ加工を対象とし、ジャンプ加工と噴出加工とでの有効性を示す。また微細穴加工における加工速度の改善結果についても示す。表2は、ここで使用したそれぞれの加工条件である。仕上げ加工(1)は面粗さが約 $10 \mu\text{m} R_{\text{max}}$ の加工、仕上げ加工(2)は面粗さが約 $1 \mu\text{m} R_{\text{max}}$ の加工で垂鏡面加工に相当する。

3.1 ジャンプ加工

ジャンプ加工において電極駆動系の応答周波数を30Hzと300Hzにした場合の加工状態の安定性を比

表2 加工条件

	仕上げ加工(1)	仕上げ加工(2)	微細穴加工(RC放電)
パルス条件	$V_0=230(\text{V})$, $I_p=3.5(\text{A})$ $on=16(\mu\text{s})$, $off=16(\mu\text{s})$	$V_0=300(\text{V})$, $I_p=2.5(\text{A})$ $on=1.0(\mu\text{s})$, $off=3.6(\mu\text{s})$	$V_0=150(\text{V})$ $C=2200(\text{pF})$, $R=428(\Omega)$
電極	Cu(+)	Cu(-)	AgW(+)
ワーク	SK-3(-)	SK-3(+)	SUS306(-)
ジャンプ条件	$J_up=800(\mu\text{m})$ $J_down=500(\text{ms})$	$J_up=800(\mu\text{m})$ $J_down=500(\text{ms})$	—————

(噴出加工時はジャンプ動作なし)

図5 ジャンプ加工での極間平均電圧

図6 ジャンプ加工における電極駆動系の
応答周波数と加工特性の関係

べる。電極は $\phi 10\text{mm}$ を使用し表2の仕上げ加工(1)および仕上げ加工(2)の条件で加工を行う。図5はそれぞれの条件における極間平均電圧波形の一例である。電圧波形の状況から判断して、応答周波数が30Hzの場合、加工開始から200msぐらいまで不安定な加工状態になっているが、300Hzの場合には加工開始から明らかに安定な加工状態になっている。それぞれの加工条件で2時間加工を行った結果を図6に示す。それぞれの加工速度は、ジャンプ動作で電極が上昇している時間も含めて求めたものである。図の30Hzと300Hzの場合を比較すると、電極消耗率にはほとんど差がないが、平均加工速度は300Hzの方が仕上げ加工(1)で数%, 仕上げ加工(2)では約50%速くなっている。

3.2 噴出加工

噴出加工において噴出液圧と電極駆動系の応答周波数を変化させ加工状態を調べる。電極は $\phi 10$

図7 噴出加工での極間平均電圧

図8 噴出加工における電極駆動系の
応答周波数と加工特性の関係

図9 微細穴加工の概略

図10 微細穴加工における電極駆動系の応答
周波数と加工特性の関係

mmを使用し、 $\phi 5$ mmの穴をワークに設けワーク側からの噴出加工を行う。電気条件はジャンプ加工時の仕上げ加工(1)の条件と同じである。図7は噴出液圧が 0.1 kg/cm^2 で電極駆動系の応答周波数を30Hzと300Hzにした場合に観測される典型的な極間平均電圧波形である。応答周波数が30Hzの場合には、極間の短絡、オープン状態が頻繁に現われ、ジャンプ加工の時よりも加工状態がかなり不安定である。一方、応答周波数が300Hzの場合には安定な加工状態が維持されている。図8は噴出液圧が 0.1 kg/cm^2 、 0.2 kg/cm^2 における電極駆動系の応答周波数と平均加工速度および電極消耗率の関係を示している。図より噴出液圧が高いほうが加工は不安定になり易いものの、電極駆動系の応答周波数が高ければ安定に加工できることがわかる。300Hzの場合の加工速度は、30Hzの場合のそれと比べて約2倍になっている。また電極消耗率は電極駆動系の応答周波数にあまり影響を受けないと推測できる。

3.3 微細穴加工

図9に示す微細穴加工において電極駆動系の応答周波数と加工特性の関係を調べる。電極は $\phi 0.24$

mmを使用し、板厚0.7mmのワークに吹きかけ加工を利用して貫通穴加工を行う。この加工では表2に示す微細穴加工の条件でコンデンサ放電を使用する。

図10に加工結果を示す。ここでは、加工速度を評価する量として微細穴が貫通するのに要する時間を、そして電極消耗は長さ消耗を測定している。貫通時間は電極駆動系の応答周波数を高くするにつれてだんだんと短くなり、100Hzと800Hzの場合を比較すると加工速度として約2.5倍速くなっている。一方、電極消耗はほとんど変わらないようである。

4. 加工くずの挙動と加工速度改善の因果関係

高速電極駆動系による放電加工状態の安定化においては、加工条件によってその有効性が異なる。これは加工くずの挙動にもとづいてそれぞれ以下のように解釈できる。

4.1 ジャンプ加工

仕上げ加工(1)や仕上げ加工(2)では、加工の進行に伴う加工面の変化よりも加工間隙に存在する加工くず量の変動がおもに極間制御系への外乱として作用する。ジャンプ加工毎の加工間隙に存在する加工くず量は、ジャンプ動作により取り残された加工くずに加えて加工中に生成されるものと気泡などを介して排出されるものにより変動するが、その変動の極間制御系への影響は加工間隙が狭いほうが相対的に大きくなる。したがって、従来の極間制御系では、仕上げ加工(1)に比べて加工間隙が狭い仕上げ加工(2)において安定な加工状態を維持するのがより難しい。特にジャンプ加工では、ジャンプ動作後の加工開始時における、適度な加工くずがまだ加工間隙に存在していないような状態が問題となる。それ

図11 ジャンプ加工での電極位置の変化

図12 電極駆動系の応答特性の違いによる加工くずの挙動

は、図5に示した応答周波数が30Hzの場合の加工開始直後と約200ms経過後の極間平均電圧波形を見ると推察できる。

図11は仕上げ加工(1)におけるジャンプ加工中の高速電極駆動装置により制御された電極の動きを示している。電極位置は、高速電極駆動装置のストロークに限界があるためジャンプ動作と加工開始から数十msの間では従来のZ軸と高速電極駆動装置とが協調して制御されるが、その後は高速電極駆動装置だけで制御される。したがって観測された電極位置の変化は、加工開始から数十msの間を除いて極間距離の変化に対応している。図において電極が上方へ移動していく速さとその移動量を見ると、300Hzのほうが30Hzの場合より約2倍速くて移動量が多いことがわかる。

以上のことより、ジャンプ加工での極間制御系の応答特性の違いによる加工状態の相違を加工くずの挙動にもとづいて模式的に説明したのが図12-(a)である。すなわち、高速応答が可能な電極駆動系を用いて極間制御系を構成することにより、加工くず量の変動を高速に補償しながら効率よく加工くずを生成することで見かけ上の加工間隙を広げることができ、極間制御系への加工くず量変動の影響を相対的に小さくし、制御性能を改善できると考えられる。

4.2 噴出加工

噴出加工では、排出される加工くず量は噴出液圧によって決まり、加工間隙に存在する加工くず量は生成される加工くず量と排出される加工くず量の差となる。いま、短絡状態が発生した場合を考える。極間制御系は、短絡を回避するために電極を上方に制御するが、再び安定な加工状態を取り戻すまでの間に加工間隙に存在していた加工くずが加工液により排出される。安定な加工状態を取り戻すのに要する時間は、極間制御系の応答が遅いほど長い。すなわち、図12-(b)に示すように極間制御系を構成する電極駆動系の応答周波数が低いほど間隙に存在する加工くず量は変動しやすく、かつ定常的に存在する加工くず量は少なくなり、安定な加工状態を維持するのが困難となり加工速度の低下を招くと考えられる。

このような加工くずの挙動に着目することで、前述の同じ仕上げ加工(1)の条件でも、ジャンプ加工時よりも噴出加工時に電極駆動系的高速応答が加工状態の安定化に大きく寄与する理由について考察することが可能である。すなわち、ジャンプ加工の例では、図5よりジャンプ動作後の加工開始時における加工間隙に存在する加工くず量が少ない状態に対しては電極駆動系的高速応答が加工状態の安定化に必要ではあるが、その後の加工間隙における加工くずの生成と気泡などを介しての加工くずの排出に起因する加工くず量変動に対しては、高速応答の電極駆動系でなくともかなり補償できると考えられる。一方、噴出加工の例では、加工間隙に存在する加工くずが加工液により常に強制的に排出されることから、ジャンプ加工時に比べて加工間隙が狭く、さらには例えば短絡状態の回避時に加工くずの生成量と排出量のバランスが大きく崩れ、加工間隙に存在する加工くず量が大幅に減少してしまう場合がある。このような場合には、高速応答が可能な電極駆動系により速やかに短絡状態を回

避することで加工間隙からの大量の加工くずの排出を押さえ、そして加工間隙での加工くずの変動を高速に補償しながら効率よく加工くずを生成することが可能となり、加工状態の安定化を図ることができる。

4.3 微細穴加工

微細穴加工では、加工面積が非常に小さく、また加工間隙も狭いことから、加工間隙における加工くず量の変動は加工状態を大きく変化させる。ジャンプ加工における仕上げ加工(2)と同じように高速応答が可能な極間制御系によりその変動を高速に補償することで加工速度改善が実現されている。

5. まとめ

本研究では、 piezo素子を用いた高速電極駆動装置を製作し、その高速応答がどのように加工状態を安定化し加工速度改善に寄与するかについて実験を行った。その結果、高速電極駆動装置により極間制御系を構成した場合、応答周波数が数十Hzである通常の電極駆動装置の場合に比べて、仕上げ加工(2)の条件でのジャンプ加工や仕上げ加工(1)の条件での噴出加工、さらに微細穴加工において約1.5～2.5倍の加工速度の改善ができることを示した。そして、加工くずの挙動にもとづいて電極駆動系の応答特性が加工状態の安定化と加工速度改善にどのように作用するかについて定性的に説明し、放電加工の加工速度を改善するうえで高速電極駆動装置が有効であることを明らかにした。

参考文献

- 1) 増沢, 田中, 藤野; 可動コイル式ヘッドによる放電微細加工の高速化, 電気加工学会誌, Vol.8, No.16, 43/52, (1975)
- 2) 今井, 森田, 丸山; 放電加工における最小分散制御の検討, SICE87学術講演会論文集, 441/442, (1987)
- 3) 田上, 毛利, 斉藤, 大竹, 成宮; 放電加工主軸ユニットの開発研究, 精密工学会春季大会学術講演会論文集, 567/568, (1988)
- 4) 千葉, 斉藤, 毛利, 大竹, 成宮; ロボットによる放電加工の研究, 精密工学会春季大会学術講演会論文集, 579/580, (1988)
- 5) 樋口, 古谷, 山形, 武田; 超小型放電加工機の重畳用圧電素子による性能の改善, 精密工学会誌, Vol. 58, No. 3, 501/506, (1992)
- 6) 今井, 佐竹, 森田; 高速電極駆動装置による放電加工状態の安定化, 精密工学会秋季大会学術講演会論文集, 685/686, (1990)

(1993. 4. 15 受付)