

# 放電加工の電極送り制御

Feed Control of the Electrode in EDM

増 沢 隆 久\*

Takahisa MASUZAWA

放電加工の制御において最も主要な役割を占める電極送り制御についての解析的研究は従来あまり行なわれていない。本文ではこの電極送り制御を極間現象と関連させて問題点を整理すると共に、仕上加工域でのいくつかの実験からその解決の方向を探ってみた結果について述べる。

## 1. 緒 論

放電加工を行う場合必ず行われる事項の一つに電極送りがある。これは通常二つの内容を含んでいる。第一は、ワイヤカット方式等は別として放電加工の基本的な特質である「電極形状を工作物に転写することにより必要な形状を得る」ことを実行するために、加工開始の位置から最終的には工作物中にすっぽり入ってしまう位置まで電極が移動しなければならない。この変位を行うのが電極送りである。次に、放電を繰返し起させて加工を進行させていくために、電極と工作物の間の距離（極間距離）を適当な大きさに常に調節しなければならない。このために電極を加工状況に応じて工作物に近づけたり遠ざけたりする必要がある。この操作が第二である。すなわち、機械的加工法で言う送りとはやや異り、常に極間距離の調節を行いつつ幾何学的条件を満足させるように電極を移動させる操作を指している。従って放電加工の電極送りを考える場合は、電極位置を時間の関数として変化させるという感覚で臨んだ方がよい。単に電極送りと言わず電極送り制御とした所似である。

本文では放電加工の電極送り制御についての問題点を示し、その解決への糸口となるべき実験等について解説する。

## 2. 電極送り制御の現状

### 1) 制御方式

電極送り制御にはさまざまな方法が考えられ、かつ実際に使われてきている。

最も単純なものとしては電極の送り込み（工作物に近づける方向）は常に一定速度として、短絡を生じた時のみ引き離すようにする方式が考えられる。すなわち、幾何学的条件を満足するための変位は必ず与えなければならないがその最も単純なものが定速の送り込みである。また、定速で送り込めばある時点で必ず加工液の絶縁破壊距離まで近づくと放電が起り、さらに近づくと放電は頻繁になるが、近づき過ぎればもちろん、そうでな

くてもある確率で短絡が生ずるのでそれ以後は放電が起らず、さらに送り込めば加工装置の破壊にさえ至る。従って短絡時の引離し機能だけは絶対必要であり、また、それさえあれば、短絡解消後再び送り込まれ放電が繰返されるので加工は進行する。つまり、この方式が送り制御としては必要最低限のものであると言えよう。しかし、短絡の発生と解消に対して電極位置は普通大きなヒステリシスを持つので、この方式では時間のロスが非常に大きく特殊な場合を除いては実用的でない。

そこで、多くは次のような方式によっている。まず電極と工作物の間（極間）の状態を開放、放電、短絡の三つに大別する。それぞれに対応する送り速度を $+A$ 、 $+B$ 、 $-C$  ( $A, B, C > 0$ : 送り込み方向を正とする)とし、 $C, A > B$  とする。さらに、 $B$  を放電の状況に応じて変えるのが普通である。 $B$  の変化させ方として最も多く用いられているのは極間電圧の平均値が一定の目標値に保たれるように feed back 制御を行う方式である。極間の状態と極間電圧の関係はトランジスタ等を用いたスイッチング回路を加工回路とした時、図1に示すような形となる。ここで、 $A$  は放電、 $O$  は開放、 $S$  は短絡をあらわす。また、破線がこの範囲での平均電圧となる。この時の電流波形も参考のために示したが、これから基準値に対する変化は反対となるが、電流の平均値も同様な制御の信号に使えることがわかる。この feed back 制御はそのままで $A$ 、 $C$  も与えることができるので、比較的

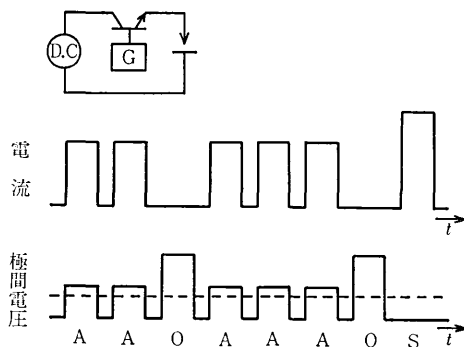


図1 放電加工の極間電圧波形と電流波形

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

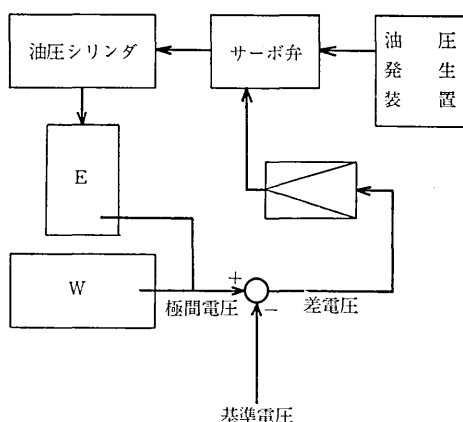


図2 電気油圧式電極送り制御系統図

単純な構成の制御系で済む。電気油圧式の送り制御系の一例を図2に示す。

## 2) 各種サーボ方式

上述の feed back 制御を行うためのサーボ機構としてはいろいろなものが考えられる。主なものは、1) 電気油圧式、2) サーボモータ式、3) ソレノイド式などであり、用途によっては、4) パルスモータ式、5) 電歪素子式、6) 熱歪式、その他の方式も用いられる。

数年前まではサーボモータ式、またはソレノイド式を組合せたものが主であったが、最近では電気油圧式が主流である。これは図2からわかるように、極間電圧の平均値と基準電圧の差を増幅し、その信号でサーボ弁を動かして油圧により電極を上下させる方式である。もちろん市販機では多くの付属的な機能を持っているが基本的には上述の形で制御が行われる。この方式の利点は従来多く用いられたサーボモータ方式に比べ、重量の大きい電極を駆動できること、速度範囲が大きい、応答が速く、バックラッシュが少ないなどである。価格が高くなるのが欠点であるが、大型の型加工などに放電加工がよく使われるようになったことや、高い加工速度（送り速度ではなく、単位時間当りの工作物除去量である）が要求されるようになったため、中型機以上では多くがこの方式となった。

小型機やごく低価格をねらったものではサーボモータ式やソレノイド式も使われる。サーボモータ式はサーボ弁と油圧シリンダのかわりにサーボモータを用いるもので原理的には電気油圧式と同じである。ソレノイド式はやや異り、極間電圧ではなく電流により制御するものである。極間に流れる電流の平均値に比例した電流をソレノイドに流し、その吸引力により電極を引上げる方式で、2.1 で述べた機能を一応満足しているが欠点も多い。

## 3. 仕上加工域での問題点

電気油圧式の制御が行われるようになってから放電線

返しは非常に安定となり、普通の加工領域（加工面あらさで  $10\sim 100\mu$  程度）では電源の能力によって原理的に可能な限界に近い加工速度が得られるようになってきている。しかし、それは加工面積の影響を受け、電源パルスの性質に対応した特定の面積範囲では良好に加工できるが、面積が極端に大きかったり小さかったりすると加工速度が低下する。一方、仕上加工領域（加工面あらさで  $10\mu$  程度以下）になると加工速度の低下は著しく、最良の加工面積でも電源能力から推測される加工速度を大きく下回る。また、面積が大きすぎると全く加工不能になってしまう。

これらの加工速度低下の直接の原因は電源の利用率（与えたパルスのうち放電するものの割合）の低下であると思われる。実際に仕上加工域では放電しないパルスの割合の著しい増加が観察される。仮に与えたパルスがすべて放電に結びつき加工に寄与するようにできれば、仕上加工域での加工速度は数倍になることも期待できる。

これらの電源利用率の低下の原因について考えてみる。まず普通加工域であるが、加工面積の著しく小さい場合は放電一発の影響のおよぶ範囲が加工面積に対してかなり大きい割合を占めるようになるために結局放電が局部に集中した時と同様の状態となり放電が繰返されるための条件を備えた区域が欠乏すると考えられる。そのため、ある限度以上の政電繰返し数は得られない結果となるのであろう。また、加工面積が著しく大きい時の低下は、加工液や加工くずの流出経路が長くなり過ぎるためと説明されている<sup>1)</sup>。いずれにしても、普通加工域では極端に小さい面積の加工を行う場合以外は加工しようとする面積に対し効率よく加工できるパルス条件を見出すことは比較的容易であるから、実用上さほど大きな問題とはならない。

一方仕上加工域の場合であるが、面積が小さすぎる場合については普通加工域と同じような原因によると思われる。しかし、十分効率よく放電繰返しの行われる面積範囲が全く存在しなくなってしまうことや、面積が大きくなると加工不能となることの原因は、極端現象をもう少し深く究明することなしには推定が困難である。これについては次節以下に少し詳しく述べるが、外見上どのような形で現われるかという点、図2のような制御系で基準電圧が高ければ放電が疎らにしか飛ばず、基準電圧を下げていくと短絡の頻度が増していき、結局与えたパルスの大部分（たとえば 90% ぐらい）が放電するような基準電圧値が存在しないのである。

以上の関係を模式的にあらわしたのが図3である。これは加工面積を一定とした時に、加工域と基準電圧の選び方によりどのような放電繰返し状態となるかを示したものである。図中、短絡領域とは短絡がひんばんに起って加工を行うことができない領域である。また、横軸は

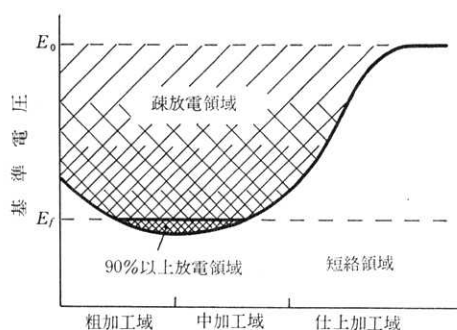


図 3 加工域と基準電圧による放電繰返し状態の区分

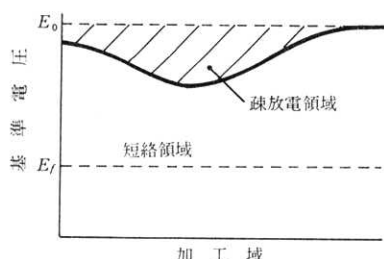


図 4 微細加工における放電繰返し状態

加工領域で示したが、右へ行くほど放電一発のエネルギーが小さいということである。

この図からもわかるが、加工領域に比し面積が小さすぎる時、逆にいえば、面積に比し加工条件が粗すぎる時は「疎放電領域」で加工することになるが、それは加工条件を仕上条件に近づけることによって逃れることができ、加工面も良くなるので、それほど困った問題とはならない。一方加工領域に比し面積が大きすぎる場合は、必要とする面あらしから加工条件を粗くすることができないので、どうしても疎放電領域で加工せざるを得ない。また、仕上加工で短絡領域のみになる範囲ではもは

や基準電圧をどのように変えても加工できなくなる。なお、微細加工のように非常に面積の小さい場合は図4のように疎放電領域のみになってしまう（横軸の原点は図3と異なる）。結局、加工面積に比し加工条件の細かい仕上領域での加工、および微細加工が現在の電極送り制御方式での最大の難点となっていることがわかる。

#### 4. 極間現象との関連

前節で現在の電極送り制御の問題点を示したが、これらの問題点を解決していく上で一つのポイントとなるのは極間現象と制御系との関係である。現在行われている制御は極間に起っている現象を全面的にブラックボックスとして捕えている。しかも、そのブラックボックスの特性解析もあまり行われていない状態である。それでも普通加工域では一応満足な線に到達したわけであるが、仕上加工域に残る難問を解決するためにはこの極間現象をもっとよく把握して制御系をそれに対応させていくことが不可欠と思われる。

仕上加工域における極間現象を把握するためには有力な資料となるものに次のような実験がある。これは仕上加工域でかつ加工面積が大なために加工がうまくいかない条件で行ったものである<sup>2)</sup>。

まず円柱状の電極（直径 0.5 mm および 1.15 mm を用いた）の端面を工作物と平行に向き合わせ、極間距離を必要な値に固定する。次いで電源スイッチを投入し、極間に電圧を印加する。ここで、極間距離がある程度小さければ放電が飛びはじめる。放電が開始してからの極間電圧の変化をシンクロスコープにより観察、または撮影する。加工電源としてはパルス幅約 0.5  $\mu$ s、電流ピーク値約 3.3 A、最小繰返し周期約 1  $\mu$ s のものを用いた。電極は銅、工作物は超硬合金、加工液は灯油、極間は実

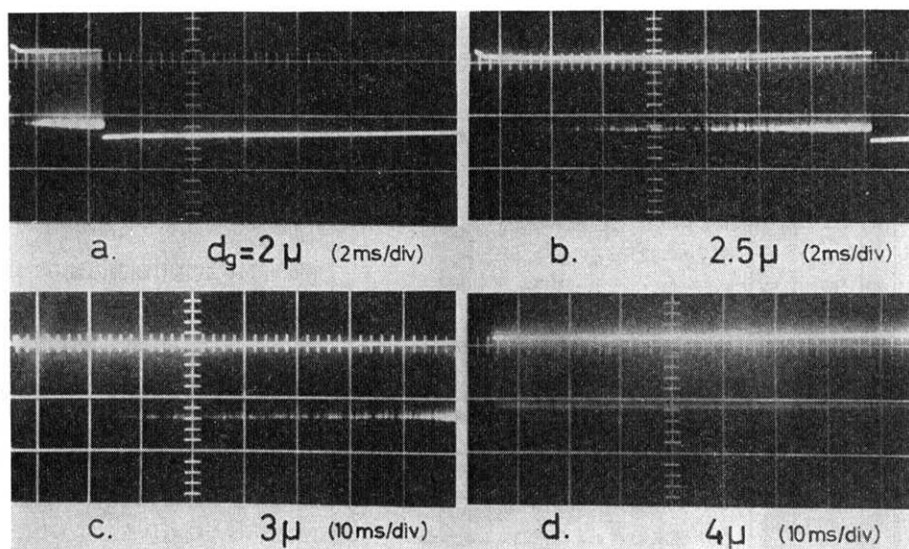


図 5 電極送りをかけない時の極間電圧波形

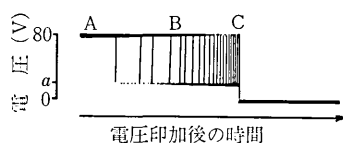
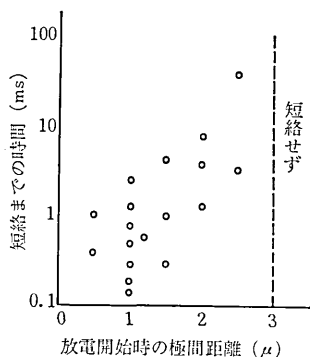


図 6 極間電圧波形の概観

図 7 極間距離と短絡までの時間との関係  
(電極 0.5 mm $\phi$ )

験 1 回ごとに清浄にし、加工液の噴流、かくはん等は行わなかった。

電極が 1.15 mm $\phi$  のとき極間距離を 2  $\mu$  から 4  $\mu$  まで変えた極間電圧のオシログラムを図 5 に示す。ここで時間軸は 2 ms/div および 10 ms/div であるから、1 回ごとの放電のようすは見る事ができないが、放電の繰返しのようすが ms オーダーでどのように変化していくかがよくわかる。この経過を図 6 により説明するとつぎのようになる。

電圧がかかり掃引が始まる (A)。時間とともに放電の繰返しが速くなる (B)。短絡する (C)。ここで 80 V は電源電圧、a はアーク電圧である。なお、図 5 の (a)、(b)、(c) では短絡に至るが、(d) では短絡せずに、しばらくするとほとんど放電しなくなる (したがって (d) のオシログラムは何回か繰返し掃引したものである)。このような経過は電極直径が 0.5 mm の場合も時間の差はあるが同様である。

この実験で注目すべき点は、電極を送り込まないのに放電繰返しが時間とともに増大していくこと、電極を送り込まないのに短絡すること、図 7 からわかるように極間距離が大きいほど短絡に至る時間が長いこと、また、ある程度極間距離が大きい場合 (0.5 mm $\phi$  で 3  $\mu$  以上、1.15 mm $\phi$  で 4  $\mu$  以上のとき) には短絡しないが、このような条件の時には最初極間に汚れた液 (加工くずの混った液) が存在しないと電圧を加えても放電開始しない場合が多い、などがある。

これらの結果から放電の繰返しと極間の加工くずが非常に密接な関係を持っていることが推定できる。すなわち、放電が繰返されるメカニズムとして図 8 のような形

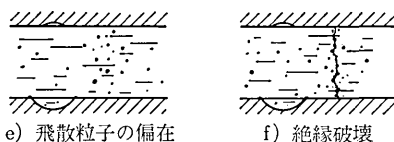
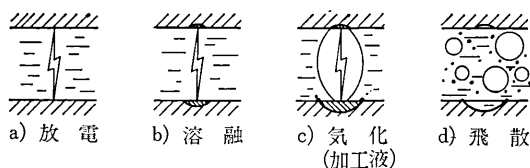


図 8 仕上加工域における極間現象モデル

が考えられるであろう。a) ~ d) は従来よりある程度はつきりしていたが、d) からどのようにして a) に戻るかは定説がない。上に示した実験から少なくとも仕上加工域での極間現象としては a)  $\rightarrow$  b)  $\rightarrow$  c)  $\rightarrow$  d)  $\rightarrow$  e)  $\rightarrow$  f)  $\rightarrow$  a) のループが最も妥当なものではないかと考えられるのである。このようなループがあるとすれば、当然電極の送り込みを与えなくても極間現象のみで放電繰返しが暴走してしまうことが起りうるから最適な送り制御を行うには加工くずに起因する極間状態の放電への寄与を考慮に入れなければならないわけである。

もう一度この実験をふり返ってみると、このような仕上加工条件では図 8 の a)  $\rightarrow$  b)  $\rightarrow$  ...  $\rightarrow$  f)  $\rightarrow$  a) のループが極間距離を時間とともに小さくしなくても放電の拡大再生産を行ってしまうことがわかる。また、その結果数百  $\mu$ s ~ 数十 ms 程度の短時間に短絡に至ることもわかった。このことは 3 に示した問題点の原因解明に有力な手がかりを与えている。つまり、一つには送り制御系の応答特性が不適当なために、放電開始後短時間でおこる短絡から逃げ切れないこと。もう一つは十分な放電繰返し数が得られることと短絡とが背中合せになっている、つまり十分な放電繰返し数は極間の加工くず濃度が大きいことを必要とするのに、加工くず濃度が大きくなれば短絡に近づくという制約があること。これらによって前述の面積効果があらわれていると考えることができる。このような認識にたつて対策を考えていけば新しく解決の道が開ける可能性が出てくるものと思われる。

## 5. MC 式送り制御の試み

前節までの検討から、仕上加工域で放電繰返しを大きくできない原因の一つは現存の加工機では機械的な応答速度が遅すぎるためと推定できる。そこで運動部分の質量を小さくできる MC (moving coil) 式の加工ヘッドによって電極位置を制御する実験を試みた結果について述べる。また、加工くずの影響を確かめる意味もあって、加工液に超音波をかけた時の加工速度への影響も調べたので併せて検討する。

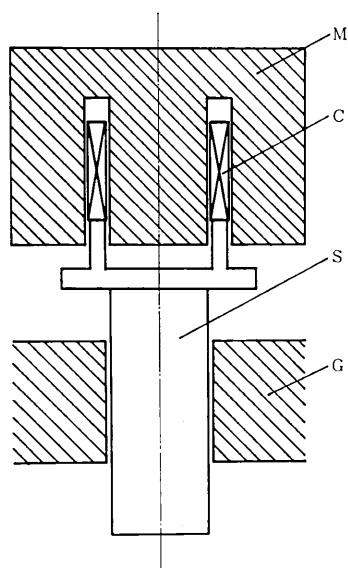


図9 MC ヘッドの構造

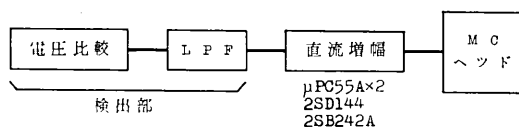
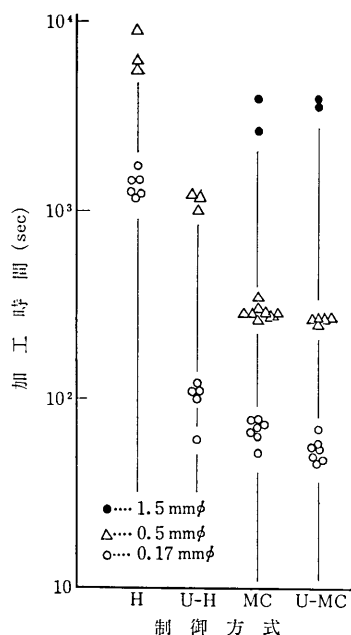
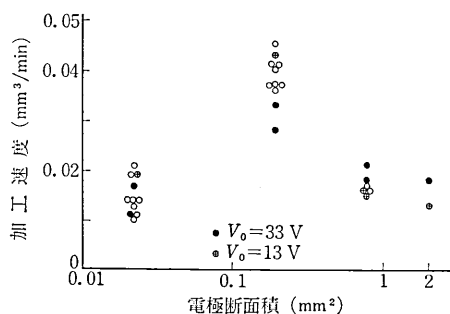
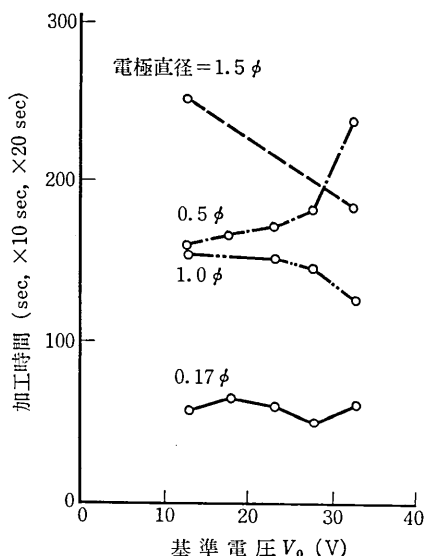


図10 制御回路ブロック図

図11 各制御方法による加工時間の比較 (0.5 mm<sup>2</sup> ステンレス板に貫通穴を加工)

実験に用いた MC 式加工ヘッド (以下 MC ヘッドとする) は図9のような構造のもので, Mは永久磁石, Cはコイル, Sはスピンドル, Gは案内である。コイルに流す電流によりこれと一体のスピンドルがMに対し相

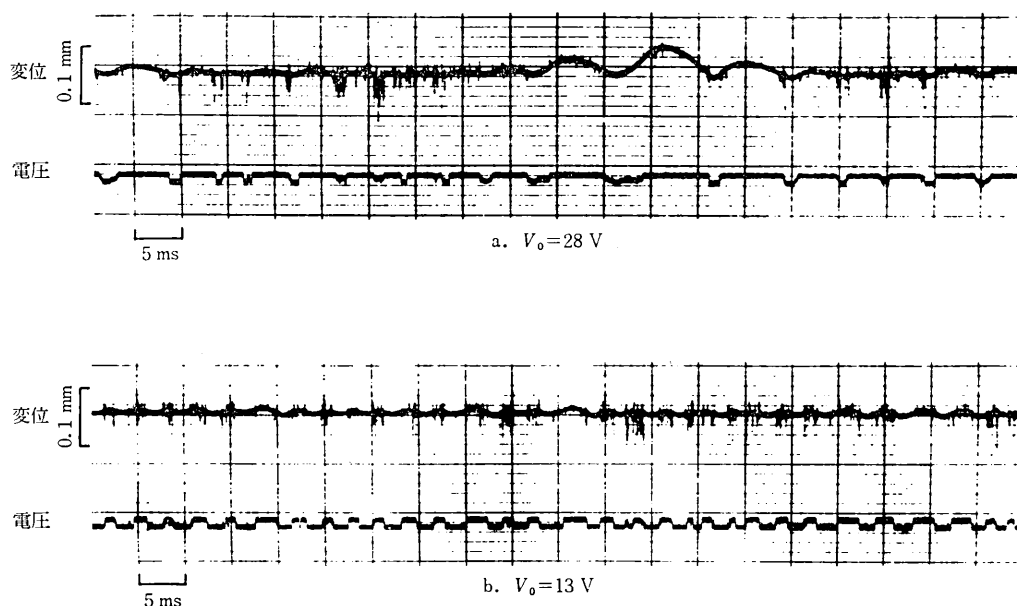
図12 電極断面積と加工速度の関係 (MC方式により 0.5 mm<sup>2</sup> ステンレス板に貫通穴を加工)図13 基準電圧と加工時間 (0.5 mm<sup>2</sup> ステンレス板に貫通穴を加工)

対運動をする。電極はスピンドルに取付ける。MC ヘッドによる電極の変位は最大で±1 mm 程度なので, これを手動のスライダに取付けて実験を行った。駆動するための制御回路は図10にブロック図で示す。加工電源はパルス幅 0.5 μs, 電流ピーク値 5 A のものを用いた。また, 電極は銅, 工作物は 0.5 mm<sup>2</sup> ステンレス板, 加工液は灯油を用いた。

超音波をかける場合は投入み型振動子により振動子入力 150 W で 28 kHz の振動を加工液に与えた。

はじめに, 電極直径が 0.17 mm, 0.5 mm, 1.5 mm の各場合について貫通穴を加工し加工時間を測定した。送り制御として, 手送りのみ (H), 手送りのみで液に超音波をかける (U-H), MC ヘッドを用いる (MC), MC ヘッドを用い, かつ液に超音波をかける (U-MC) の四つの方法を用い比較した。結果を図11に示す。1.5 mm<sup>2</sup> の H, U-H は途中で加工不能となり貫通に至らなかった。

図から明らかなように, 超音波, MC ヘッド共に, 手

図 14 MC 方式における電極の動きと極間電圧 (電極  $0.5 \text{ mm}\phi$ )

送りのみの時に比べ著しく加工速度を向上させる。また、少なくともこのような加工条件 (加工面あらさで  $2 \mu \text{ Rz}$  程度) では超音波は細い電極の方が効果が大いようである。それに比べて MC の方は加工面積のより大きい場合でも大きな効果をおよぼしていることがわかる。MC と U-MC とではあまり大きな差は認められないが、細い電極では超音波の効果が多少あらわれているようである。また、電気油圧式の送り装置を用いた場合と比較するために MC 方式で板状電極を用い超硬合金 STi 20 も加工してみたが、約  $1.3 \text{ mg/min}$  の加工速度を得た。全く同じ条件で電気油圧式装置 (メーカー製) では  $0.5 \text{ mg/min}$  であったからかなりの向上がみられる。

次に同様に MC 式における加工面積の影響を調べるために電極断面積を変えて加工速度を測定した結果を図 12 に示す。これから、基準電圧 ( $V_0$ ) により傾向はやや異なるが MC 式においても加工速度すなわち放電繰返し数は加工面積により大きく左右されることがわかる。

図 13 には基準電圧による加工時間の変化を示した。ここで縦軸の単位は  $0.17 \text{ mm}\phi$ 、 $0.5 \text{ mm}\phi$  では sec,  $1.0 \text{ mm}\phi$  では  $\times 10 \text{ sec}$ ,  $1.5 \text{ mm}\phi$  では  $\times 20 \text{ sec}$  である。図から、加工速度の最も大きかった  $0.5 \text{ mm}\phi$  の場合だけが基準電圧の低いほど良いという傾向をみせているが、後述の極間電圧波形等から考えると、これを制御系の評価に結びつけるべきかどうかは疑問である。

MC 式制御で電極が実際にどのような動きをしているかを非接触式の微小変位計を用いて記録した一例を図 14 に示す。極間電圧も同時に記録し、相互の関係がわかるようにしてある。これは電極直径  $0.5 \text{ mm}$  で良好に加工

している状態のものである。ただし、 $20 \text{ kHz}$  以上の周波数成分と変位のうち直流分はカットされている。また細かいヒゲ状の変動は変位計の能力から考えて変位ではなく放電による noise を拾ったものと思われる。この図から特に指摘しなければならないのは、極間電圧がほとんど開放電圧または 0 でありアーク電圧に近づくことがあまりないことと、その極端な電圧変化がわずか数  $\mu$  程度の変位ともはっきり対応している点である。

以上の結果をまとめてみると次のようなことが言えるであろう。

まず、普通の加工機より機械的応答の速い MC ヘッドを用いると加工速度が向上する (つまり放電繰返し数が大となる)。しかし、この場合極間は開放と短絡を繰返し、いわゆる hunting の状態になっている。従って電源の利用率はまだ非常に低い状態である。また、超音波を加工液に与えると (特に電極直径が小さい時) 加工速度が向上することは、加工液を介しての加工くずに対する処置が放電繰返し数の増大に有効であることを示していると思われる。結局、この MC ヘッド方式では短絡から逃げるにより放電繰返し数を大きく保つというよりは、電極の上下運動によるポンピング作用で極間の加工くずの平均的濃度をある程度低く保つことに成功して加工速度の向上を得たと考えた方がよさそうである。

## 6. 今後の展望

仕上加工域における電源パルスの利用率の低下の原因が加工くず等を通しての短絡にあることはもはや疑いのないところであるが、これに対してどのような送り制

御,あるいは広く極間制御を行なっていったらよいかということはかなり難問である。しかし,ここに掲げた一連の実験から,電極送り制御を極間の加工液や加工くずの流動に積極的に利用する可能性,機械的応答のさらに高速化による短絡時間の減少,外部からの加工くずに対する直接的処理の可能性等,いくつかの方向に見通しが得られるようになった。また,電源パルス利用率について今まではっきりした数字がわかっていないが,MCヘッドを用いて hunting に近い状態でこれだけ大きな加工速度が得られたということは,仕上加工域での加

工速度にまだまだ大幅な向上が望めるということを示している。微細加工の将来への期待はさらに大きくなったと言えよう。さらに,これら仕上加工域での解析は普通の加工域で加工面積の大きい時の加工速度向上にも応用できるものと思われる。(1973年7月30日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 電気加工学会関西支部:放電加工の理論と技術,養賢堂(1972),155
- 2) 増沢,佐田,木下:放電微細加工における加工くずの役割,精密機械 37, 9 (1971) 52

## 次 号 予 告 (11 月 号)

## 研 究 解 説

梁理論の精密化に関する二・三の試み(その4)

一梁の剪断変形理論……………{川井忠彦  
藤谷義信

## 調 査 報 告

米国における画像情報処理の動向……………高木幹雄

## 研 究 速 報

FATIGUE CRACKS UNDER PLANE STRESS IN ELECTRODEPOSITED  
COPPER SINGLE CRYSTALS—PART II—……………{松永正久  
義生田善明

ファセットのある(001)Cu表面の酸化挙動……………{米岡俊一  
本間禎一

大きな金属単結晶のX線トポグラフィ 第3報……………{高片正植  
一岡色邦郎  
文

耐震ダンパーに関する研究 第2報

一起振実験および振動台実験……………{川股重也  
半谷裕彦  
米田京護  
金沢子

化学反応速度の起動力をそのエントロピー生成量から求むることについて……………野崎弘

FRICTIONAL BEHAVIOR OF SYNTHETIC MOLYBDENUM DISULFIDE  
IN HIGH VACUUM……………{松永正久  
中川多津夫

亜鉛アルミニウム共析合金の高温引張りに際するヒゲ結晶の生長……………{鈴木邦夫  
石田洋一  
市原正樹

ミクロ孔着剤における吸着平衡(Ⅲ)……………{河添邦太郎  
川井利長

## 研 究 室 紹 介

高羽研究室……………高羽禎雄