

水中放電加工に関する研究

是 枝 賢 一

(受理 昭和50年5月31日)

Study on Electric Discharge Machining under Water

Kenichi KOREEDA

This paper describes some experiments about the electric discharge machining in the water bath by hand feeding from the outside, when the electrode of brass is vibrating by magnetic force method under the condition of DC low working voltage supply. The results are as follows.

- (1) Maximan working speed can be obtained 0.24g/min by setting of DC 30 Volts power and the electrode vibrating of 60 Hz to make a hole of 6 mm in diameter and depth, then the power supply is possible to do with 500 Watts.
- (2) The amplitude of electrode is necessary to set in 0.2 mm at least for discharge stability, and the minimun voltage supply can be used at 20 Volts.
- (3) A wave-form in the observed discharge current is found to be enveloped by high pulse frequency components.

1. 緒 言

従来より電極振動法による放電加工¹⁾は早くから報告されており実用化されているが、筆者の意図する水中放電加工で電極振動法を用いれば、30V程度の低電圧電源でも手動による電極送り操作によつて比較的容易に加工可能なことが確かめられた。そこで放電加工専用の電気回路条件を持たない一般の交流全波整流型の小容量低電圧電源を加工電源として電極振動型に利用した場合、その加工性能がどうなるのかしらべてみることにした。したがつて数段と早い加工速度や能力を望むならば従来の定説化された電気回路条件を踏襲するか、あるいは大容量の加工電源を利用すればその効果は当然期待できることになる。実験に使用した電源は、900Wの小容量電源で放電加工用にすれば小型の部類に属するもので、その加工能力や性能について少しく報告してみたい。

2. 実験装置および方法

低電圧の電極間を手動送りによつて接近させながら、短絡させないようにして放電開始させるには、電極振動型の方が静止型よりも比較的容易なことをすでに実験しており、特に穴あけ加工には利用し易いようである。そこで工具電極(負極)の振動が簡単にしか

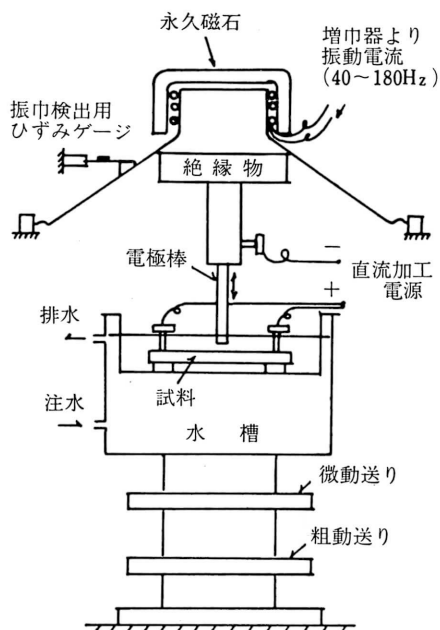


図1 実験装置

も比較的広範囲にわたり連続的に変化させようような低周波の電磁振動型機構を選んだ。図1にその概要を示す。超低周波発振器から増巾器を経て振動器(改造スピーカー)のコーンに電磁振動が与えられる。

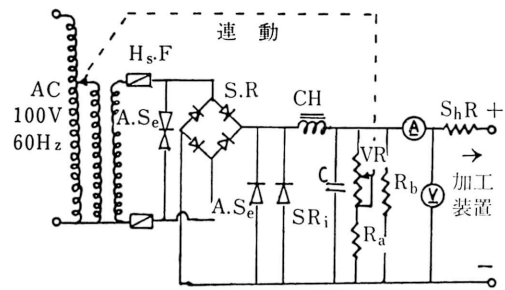
コーンには付加質量をなるべく軽くするための木製の電極ホルダーと加工電源の負極端子が取り付けられた。負電極は正弦波の上下運動を繰り返すから電極に取り付けられる導線はたわみやずみ、より線が使用された。さらに電極の振動振巾を測るために、コーンとその固定わくとの間に取り付けた弾性体のひずみ検出部から抵抗線ひずみ計と電磁オシロを通して振巾を記録した。そして粗動、微動装置の変位の記録から振巾の絶対値を静的に校正した。電極間すきま調整は図1に示すごとく 0.6 mm/rev の微動送り装置と、その下部の粗動送り装置の手動にたよった。電極の振動振巾は最大 1.4 mm (変位 2.8 mm) まで変化させて加工能力におよぼす影響をしらべた。

電極棒は市販 6 mmφ の黄銅棒を約 80 mm の長さで切断し、その断面は軸に直角に研削仕上げしたものを用いた。加工試料は水槽の上部水面から約 20 mm 下の位置に黄銅製端子で固定され、両側の端子に直流正電圧がかかるようにして加工電流が左右平衡して流れるよう留意した。電極接近時すきまは非常にせまいので両極面は相互に水平に位置するごとく配慮して巾 25 mm、長さ 80 mm の試料はあらかじめ表裏とも研削仕上げにより 6 mm の均一な厚さにした。試料の材質は S55C である。水中における加工を目的としているので、水道水をそのまま利用した。電極振動型では加工液の交代が盛んで加工屑のすみやかな排除が利点であるが、加工中徐々に液がにごるとともに水温があがることを避けるため水槽にゴム管を通して一定水位を保つよう注排水した。

加工電源は図2に示すごとく単相 100V の入力、直流出力容量 30V×30A の交流整流電源である。

したがって整流ろ波回路の出力端子に直接、負荷(放電回路)がつけられる電極振動方式となる。整流ろ波回路のコイルやコンデンサーは、電極静止型の放電加工電源に使われる数値にくらべて通常大きくなっているから充電時間も長くなる。回路中のインダクタンスやコンデンサーにたくわえられるエネルギーや、消イオン時間などについても、もちろん考慮されているわけではない。加工電源となる直流出力電圧は、15V~40V までの範囲として、電圧調整器により電圧計を目測して電圧を設定し、放電開始後も設定された電圧そのままとした。

放電(スパーク)させるまえに、あらかじめ電磁オシロに記録される振動振巾を定めた中に、まず設定した。それから、試料のひたしてある水槽の下部に取



- H_sF : 遮断ヒューズ
 A.S_e : セレンバリスター
 S.R : シリコン整流器
 S.R_i : 転流ダイオード
 CH : チョークコイル 10⁻²H
 C : コンデンサー 10⁻²F
 V.R : 可変抵抗器 0~28Ω
 R_a : 抵抗器 1Ω
 R_b : " 12Ω

図2 交流整流電源 (加工電源)

り付けた粗動、微動装置のレバーをまわして試料を徐々に持ち上げて振動中の電極に接近させると、電極振動数と同じ断続的放電現象を生ずる。その時電極間のすきまをあまりつめると加工電流による電磁吸引力のため試料と吸着現象をおこして過大な短絡電流が流れる。また電極が試料をたたいたりすることになるので、なるべく一定のすきまを保ちながら安定した放電を持続するようにつとめなければならない。

放電現象や加工能力を知るために放電電流を測る必要がある。水中における放電電流の変化は激しいから、電流波形を測定する目的で放電回路に挿入されるシャントの抵抗値と時定数は、十分に小さくせねばならない。したがってピーク電流容量 400A、抵抗値 0.005Ω±10%、自己インダクタンス 0.01 μH 以下のシャントを試作して用いたが、シャント自体の時定数は 2×10⁻⁶ sec となり放電回路の時定数に留意すれば、ブラウン管測定による波形とせん頭値の検討には役立つようである。

穴あけ加工においては、通常穴の深さが深くなるにつれて加工条件が悪くなることが考えられるが、実験は電極棒が試料を貫通するまでとした。試料の加工量や電極の消耗量は感量 100 mg のてんびんを使って加工前後の重量測定によつて算出した。

放電ひん度の測定には、電磁オシロに記録された波形数について電極振動数をもとに百分率であらわし

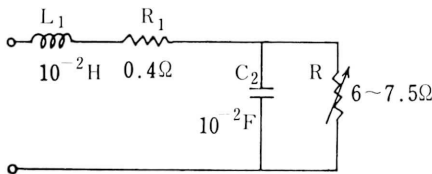
た。加工に用いた消費電力は、交流入力側に市販の積算電力計をつないで測つた。

穴径の加工拡大しろや加工面形状などは工具顕微鏡により測定した。この場合加工された穴の入口径と電極棒直径の差の半分を加工拡大しろとした。

3. 加工電源としての吟味

電極振動数を加工電源と同じ 60 Hz に選べば、振動電源機構がより簡単になることに留意して、その電極振動条件のもとに加工電源としての検討を加えてみた。電極が 60 Hz で励振すると充放電とも 60 Hz で周期的に繰り返されることになるからその時にコンデンサーにたくわえられる充電エネルギー量や充電時間が数量的にわかれば、それから加工速度や加工能率の良否につながる問題の解明に役立つことになる。単一放電の現象についての文献²⁾³⁾はすでに数多いが、繰り返し放電における放電現象については少なく単一放電特性の延長として現象を論ずることはむづかしいようである。液中における断続的な放電特性の様相は複雑でしかも瞬間刻々、電極が微小すまを上下運動しながらの放電現象はよく解明しえないのが現状のようである。そこでまず加工エネルギー源となつての放電電流が時間的にどのような変化をたどるのか、その大きさや形状はどの程度のものなのかを電気回路の単純化した理論と電流波形記録から比較検討してみた。

今、整流素子を通つた負荷側回路について注目すれば、充放電回路とも過渡現象論として取り扱うことによつて容易にその特性を示すことができる。図3は二次系伝達要素のステップ応答として考えればよいから次式で表わすことができる。入力電圧 E_0 は直流電圧と仮定し、放電後 L_1, C に残留電圧は存在しないものとすれば、



R_1 ：整流器，チョークコイル L_1 ，導線などの合成抵抗(推定値)

図3 充電回路

$$V_c(s) = \frac{w_n^2}{(s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2)} \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \cdot \frac{E_0}{s}$$

ただし $\xi < 1$ で、

$$w_n = \sqrt{\left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \frac{1}{L_1 C}} \quad \xi = \frac{R_1 C + \frac{L_1}{R_2}}{2 \sqrt{\left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) L_1 C}}$$

$V_c(s)$ をラプラス逆変換すれば

$$V_c(t) = E_0 \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi w_n t} \sin(w_n \sqrt{1-\xi^2} \cdot t + \phi) \right\} \frac{1}{\frac{R_1}{R_2} + 1}$$

ここで $\phi = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}$

上式を微分して零とおき、 V_c の最大充電電圧 V_{cmax} を求めると、

$$t = \pi / w_n \sqrt{1-\xi^2}$$

の時 V_c は最大となり、

$$V_{cmax} = E_0 \left(1 + e^{-\pi / \sqrt{1-\xi^2} \cdot \pi} \right) \frac{1}{\frac{R_1}{R_2} + 1}$$

となる。図3に示す充電回路定数 ($R_2=7.1\Omega$) をあてはめて計算すると、充電時間 31.7 ms で V_c は最大となり、その時の最大値は $1.35 E_0$ となる。

整流素子ブリッジ回路や導線などの抵抗値はいずれも簡単な実測からの推定値であるが、実際の動作状態で整流素子の抵抗が充電回路における他の直列抵抗などに比較して特に大きいとそれだけ充電特性を左右することになる。コンデンサーの充電電圧を 60 Hz の振動電極の場合について試算してみると、今、放電時間を 2.5 ms とし、次の周期の放電開始までの充電時間を 14.2 ms (60 Hz の場合) とすれば V_c は $0.67 E_0$ までしか上がらない。理論的には充電電圧最大のときに放電をおこせば能率が良いことになるが、その目的のために電気回路定数を変えると充放電に要する時間とエネルギー量がともに変わるわけで、それらが加工性能におよぼす影響については電極振動数とともにあらためて検討してみたい。なお回路図に示すごとく電圧調整と連動してコンデンサーに並列に挿入された R_2 の抵抗値は加工電圧 20 V ~ 30 V までかえた時 $6\Omega \sim 7.5\Omega$ まで変化する。これが充電電圧におよぼす影響を計算してみると 1 V の差にもならず、放電エネルギー量についてもまず考慮しなくてよさそうである。また放電回路は充電回路のあとに結線されているわけだが両者の回路定数が相当異なっているから放電期間だ

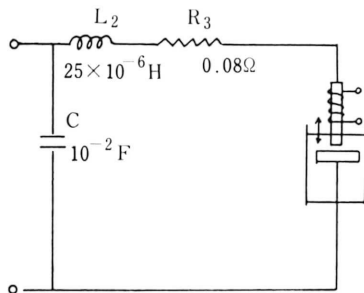
けに注目すれば充電回路の影響も無視して差支えないことになる。したがって今、図4に示す放電回路だけを考えてみることにする。今電極間すきまの電気抵抗は時間的に変化する量であるが、まず放電現象のあらましをつかむための平均的な推定値である。導線のインダクタンス、コンデンサーの内部インダクタンス、誘電損などは充電回路の場合と異なり無視しえないので放電回路に直列の等価回路として計算に入れた。したがってこれらの数値の大小によつて計算の結果画かれる放電電流波形の模様は異なつてくることになるが、実測された電流波形より R_3 と L_2 の値は推定してみた。

放電電流 i について充電回路と同様な方法（振動の場合が多い）で RLC の直列回路として解くと周知のごとく、

$$i = \frac{2V_c}{\sqrt{4L_2C - R_3^2}} e^{-\alpha t} \cdot \sin \beta t$$

$$\alpha = \frac{R_3}{2L_2}, \quad \beta = \sqrt{\frac{1}{L_2C} - \left(\frac{R_3}{2L_2}\right)^2}$$

となる。図4に示す数値を代入して計算すると、放電開始後 0.54 ms 後に波高値約 170 A が算出された。実際には電極間のふんいきが時間的に変化するから放電時間、波高値とともに波形中に含まれる高調波までも変るようになる。



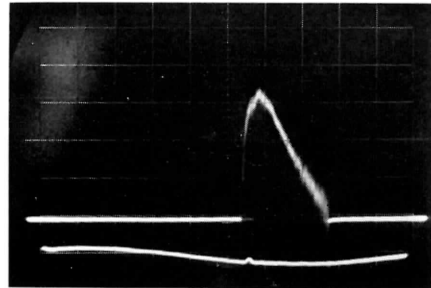
R_3 : 導線, 電極間, シャントなどの合成抵抗(推定値)
 L_2 : 回路のインダクタンス(推定値)

図4 放電回路

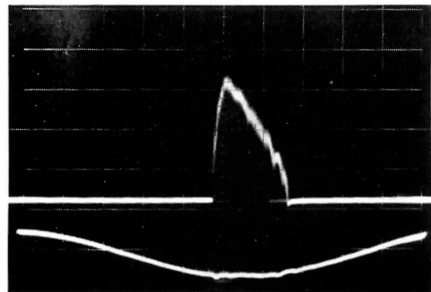
4. 実験結果と考察

4.1. 放電電流波形

加工状態で振動する電極の一サイクル中に放電する電流波形をブラウン管で撮影した例が図5の上側の波形で、電極の動きが下側の波形になる。両波形より放



60 Hz, 30 V, 振巾 : 0.4 mm, 200 mV/cm



60 Hz, 30 V, 振巾 : 1.0 mm, 200 mV/cm

図5 放電電流波形の例

電の開始、終了時の時間と位置関係がわかるが、一発ごとの放電開始時が常に同じとは限らず多少ずれて観察されたものもあつた。波形のせん頭形状もとがつたものから、やや丸みを帯びたものもあり、放電時間の長短などあり、したがつて波高値の大小とともに変動が相当にはげしく電極間抵抗の変化がうかがえる。一方試料の手送り作業が適当でないとき短絡や過渡アーク状態となつて高調波の含まれない単調な過大電流が流れることを経験した。通常の放電状態では、一波形中にキロ Hz 級の高い周波数のパルス波形が含まれていることがわかつた。パルスは放電開始から終了まで続き、一つの電流波形に重畳されたこれらパルスのピーク値や巾についてはさらに詳細に検討せねば不明である。放電終了前、わずかの逆流現象がみられるが静止電極のような明確な波形とはならず、したがつて電極に試料が付着する現象も少ないようである。一発毎の放電時間は 1~6 ms と巾ひろく観察されたが、これをエネルギー量とともにスパークの分類¹⁾から判断すればアーク放電に近いスパークの領域に属することになり火花放電の領域からは相当はなれている。しかし前述のごとく一波形中にさらにパルスが数多く含まれていることを考えれば、その判断はむづかしくなる。

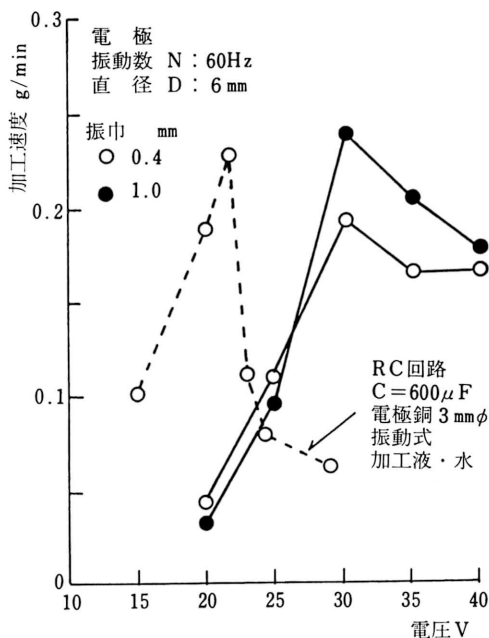


図6 加工電圧と加工速度

4.2. 加工速度

従来より加工速度に関係するいろいろな要因が取りあげられ、それらのなかから定数や関数のかたちで加工速度を求める実験式^{5) 6) 7)}が示されている。それらはいずれも加工量が放電エネルギーの関数として取り扱われていることは当然のことといえるが、電極振動型でしかも低電圧整流電源を使つての実験では特に電極の動的変位がおよぼす影響について考慮せねばならないだろう。電極と被加工物の材質のほか、それらの面積、形状や加工液とその流路などの効果も加工速度に影響をおよぼすものと思われるが、これらの問題については相互の影響も重なりあつてか明確にすることはかなり面倒である。したがつてここでは影響割合の大きい加工電圧を中心に電極の振動数、振巾、直径の大きさなどと加工速度の関係に焦点をしばつて解明を試みた。

(1) 加工電圧と加工速度

加工電圧によつて加工速度が大きく左右されることはすでにわかっているが、その傾向を電極振動型でしらべたのが図6である。加工電圧の上昇とともに加工速度は向上するが電圧 30V をピークとして加工速度のさがる現象が目立つべきことで従来の実験式にあてはめのはむつかしくなる。これと類似した傾向を示したのが図6の点線⁸⁾である。これは電極間電圧に対し

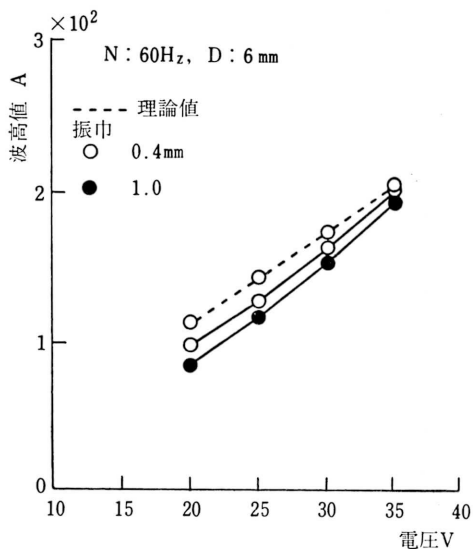


図7 加工電圧と放電電流波高値

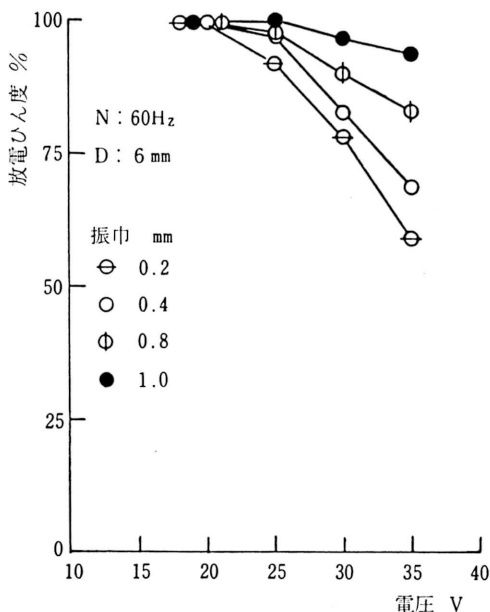


図8 加工電圧と放電ひん度

ての加工速度をあらわしており、また多少加工条件も異なるため曲線は左にずれているが、放電回路の導線による電圧降下分を差引いて考慮すれば、ほぼその傾向は似かよつたものとなる。これに対して放電電流波高値（高調波は除いたもの）は電圧の上昇とともに増大することが図7より明らかであり、放電ひん度は図

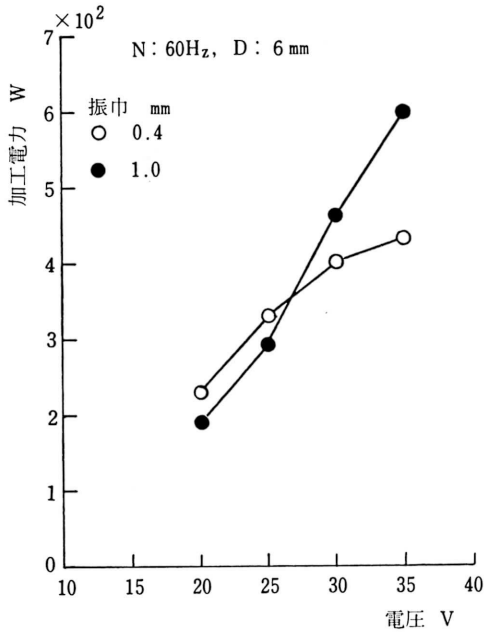


図9 加工電圧と加工電力

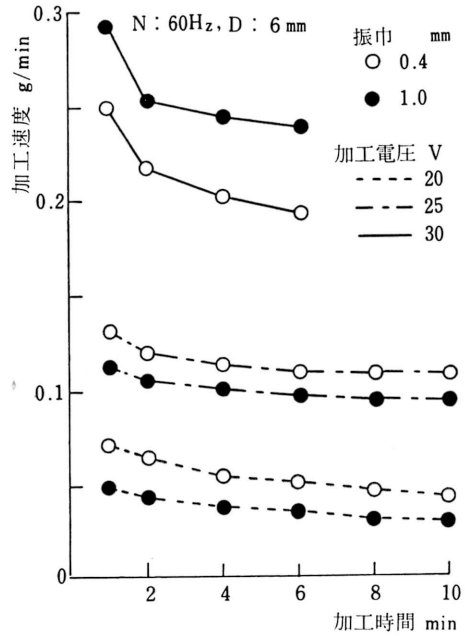


図11 加工時間と加工速度

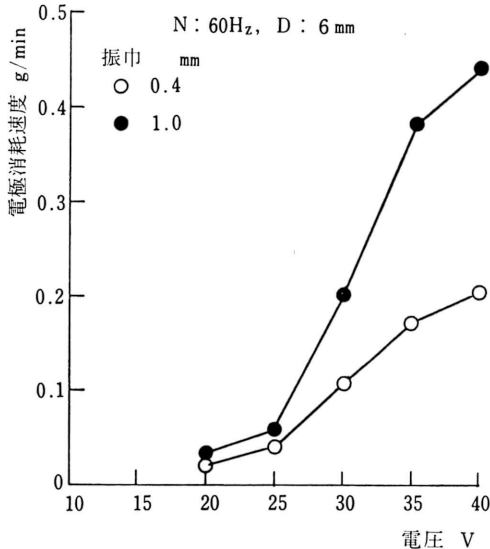


図10 加工電圧と電極消耗速度

8に示すごとく下がり、加工電力は図9のように増加してゆくことがわかる。この現象の一因として電極の消耗速度をしらべてみると図10に示すごとく加工電圧30V以上で消耗の割合がはげしくなつて被加工物以上の消耗量となり、電極の溶融エネルギーにかなり浪費されているものと解釈した方がよさそうである。

(2) 加工時間と加工速度

加工電圧や電極の動きを一定条件に保ち、所定時間までの加工速度を求めたのが図11である。加工時間が短い、いわゆる加工初期の加工深さが浅い時期においては加工電圧の大きいほど加工速度の変化も大きい、加工が進み穴が深くなるにつれて加工速度はほぼ一定値に近づく傾向を示している。放電ひん度は、他の加工条件が一定であれば加工時間に対してはいくら下がる程度であり時間による差はでないようである。

(3) 電極振巾と加工速度

電極振動振巾が小さくなると、それだけ電極の振動中心位置を試料に接近させるから、加工電流による電磁的吸引力が手伝つて電極間の短絡現象がおこりやすく不安定な放電現象となる。特に振巾0.2mm以下になると加工作業そのものが困難となり電極のあふりによる加工液の流通も悪くなるためか、放電ひん度は下がるのが図8よりわかり、円滑な持続放電の維持が困難となる。一方振巾があまり大きいと電極振動数一定の条件では、電極の動きが速くなるから放電期間は短くなる。しかし液の排除は容易となり放電状態は比較的安定したものとなる利点はでてくる。工具電極重量が重たいほど強い保持と振動エネルギーの増加が必要となるし、電極の上下運動の正確さも問題とな

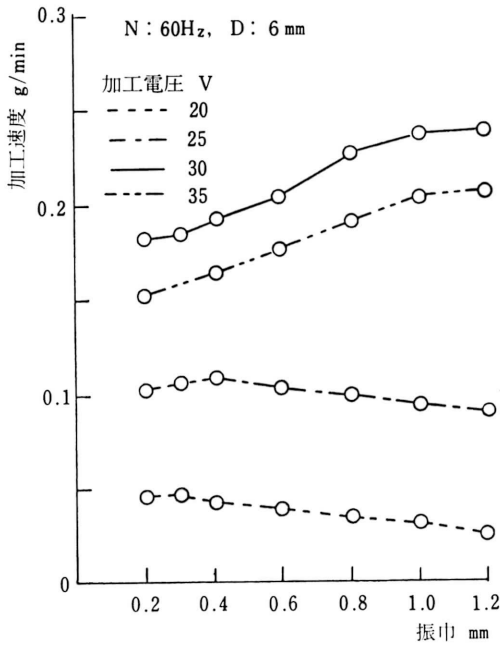


図 12 電極振巾と加工速度

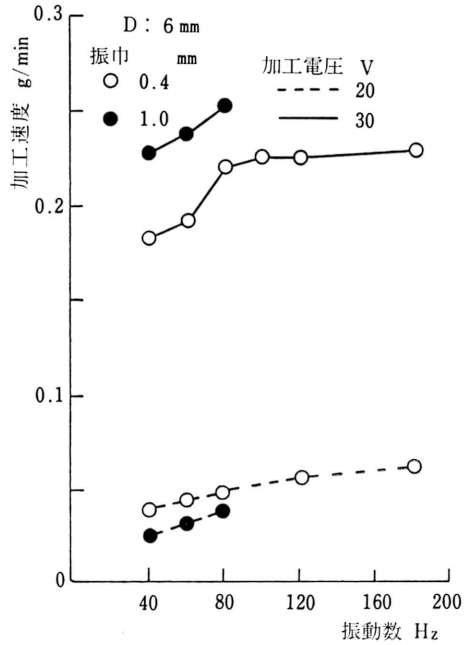


図 13 電極振動数と加工速度

る。そして電極先端の横ぶれは深穴加工などのような場合はなおさら面倒なことになる。実験によれば振巾 0.3~1.0mm (変位では 2 倍) 位が手動による比較的円滑な加工可能な範囲といえる。これらの振巾範囲における加工速度の動きをしらべてみると、低い 25V 位まではさほど振巾の影響は認められないが 30V 以上になると振巾が大きくなるにつれて図 8 に示すごとく放電ひん度がよくなり、図 12 から加工速度が向上してくることがわかる。また消費電力においては加工速度と同じくその傾向は似たものとなる。電極静止型では加工速度の最大となる放電すきまが存在することがわかっている⁹⁾。電極振動型においては、放電後おくれることなく電極間近傍に新しい加工液が流入してくれば安定した放電が維持できるものと判断してよいかから、その必要以上に電極振巾を大きくしても効果はうすく、放電時間も短くなって好ましくないものと判断される。実験によれば 1.0mm 以上の振巾になると加工速度はあまりあがらなくなることがわかった。

(4) 電極振動数と加工速度

電極振動数が増加するとそれだけ放電回数が増すため加工速度があがることを期待して振動数 180Hz まで変化させてみた。この場合電極の振動領域全部にわたって振巾を一定条件にすることは機構上容易でないので振巾の範囲を 0.4~1.0mm として検討してみ

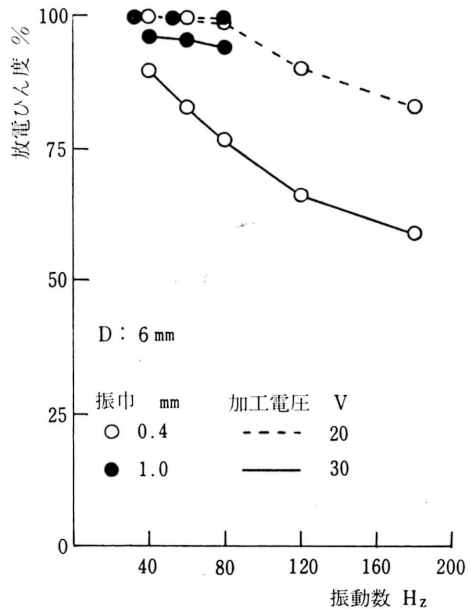


図 14 電極振動数と放電ひん度

た。したがって確たる傾向はつかみかたいが、振動数が上がると加工速度もいくらか上がることが図 13 よりうかがえる。しかしこの結果からすればたいしたこととはなく、加工電圧をわずか上げた方がずっと効果的

だといえる。電極振動数と放電ひん度との関係をしらべたのが図14である。電極振動数が上がると放電ひん度は明らかに下がる傾向を示しており、消イオン時間などのことを考えれば電極振動数をやたらに上げることが効果的でないことがわかる。むしろ商用周波数

である 60 Hz では 100% 近くの良好な放電ひん度を示すことを考えれば、実用的にも簡単しかも安価に励振できる長所をもつ 60 Hz が放電加工に適した電極振動数だともいえる。もちろんそれは低電圧加工電源の時のことであつて、場合によつては倍調波の 120 Hz も容易に利用できる。

(5) 電極直径と加工速度

電極直径が 3 mm から 6 mm へと大きくなるにつれて加工電力、加工速度とも上がる傾向を図15、図16に示す。これは加工速度に対して寸法効果がきいているといえそうである。多少条件が異なるが電極静止型の場合¹⁰⁾とその効果はほぼ似たものとなつている。波高値、電極消耗速度いずれも電極直径いかにかわらず図17、図18に示すごとく変わらないようであるが、波高値のばらつきはやはり大きい。

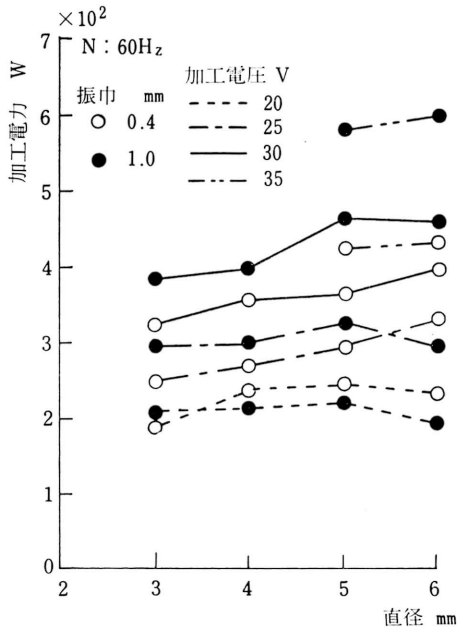


図15 電極直径と加工電力

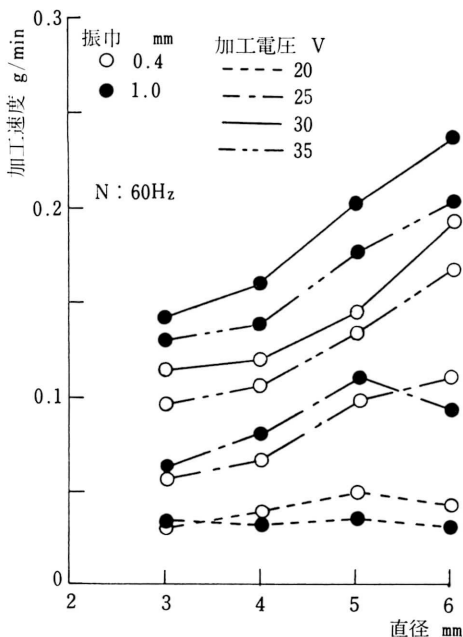


図16 電極直径と加工速度

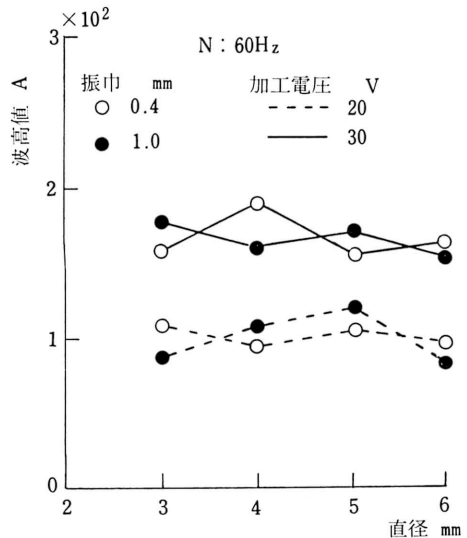


図17 電極直径と放電電流波高値

4.3. 加工拡大しろ

加工が進むにつれて電極側面からも放電が起り、電極、被加工物とも消耗してゆく。したがつて電極直径よりも穴径は大きくなり、貫通した状態では穴入口が最も大きく次第に深くなってゆくにつれて勾配のついた穴の状態となる。いわゆる工具電極の消耗による誤差を生ずる。図19は加工電圧が上がると拡大しろが大きくなることを示したもので加工精度を重んずるのであれば、加工電圧は低くおさえた方がよいことになるが、一方加工速度は落ちることになる。

消耗の大きな黄銅棒を使用していることと振動電極

という不利な条件が手伝つか静止型にくらべて加工精度はよくない。振巾の影響については前述の図6と考え合わせると振巾が大きくなると側面が余計に加工されたとも解釈できる。直径が小さくなると加工速度も落ちているから加工時間が長くなりそれだけ側面が余計に広がるとも判断できるが、電極と試料の寸法比、面積比などの効果については、さらに実験を重ねなければその傾向はつかめず今後それらの現象について解明してみたい。いずれにしても電極の消耗が加工精度を大きく左右するわけで、以上の結果だけから判断すれば荒加工用として考えられるが、低消耗型電極を利用することによって電極静止型と同様加工精度の向上をかなり期待できるものと推察される。しかし電極材料と被加工物の組み合わせいかんによっては加工条件を変えねば加工速度の低下をきたすことになる。

5. 結 論

電磁振動型電極を用いた低電圧交流整流電源の加工条件で、水中放電穴あけ加工を試みた結果次のような結論をえた。

1. 電極の振動数は多い方が加工速度が上がることを期待したがさほどその効果はあがらず、供給容易な商用周波数を利用した方が賢明である。また振巾の下限値は電極振動数 60 Hz で 0.2 mm より小さいときは手動による電極間すきま調整がむづかしくなり短絡現象などをともなつて円滑な加工作業が困難となる。

電極振巾値の上限は下限ほど区切る必要はないが、実際問題として振巾が大きすぎると電極振動機構や加工精度保持の点など難点が生じ死時間も多くなる。加工作業のしやすさと安定した放電の維持のためには振巾 1.0 mm 以上は必要ないものと判断してよい。

2. 小容量 900 W の加工電源でも手動によつて 20 V の低電圧から放電加工ができることがわかつた。加工能力は最大 0.24 g/min の加工速度をうることができ、従来市販されている加工機にくらべて電源容量の割には劣っていないことがわかつた。整流特性や充放電回路定数を適当に選定してその有効的エネルギーの活用をはかれれば、加工速度はさらに向上するものと思われる。

3. 加工電力を大きくすれば加工速度もより向上して荒加工用に適したものとなろうが、加工精度の向上を願うならば、黄銅電極を他の低消耗電極材に変えたり、適当な加工電圧に落としたり、或はあらかじめ拡大しろを見込んだ工具電極棒を選択すればよい。

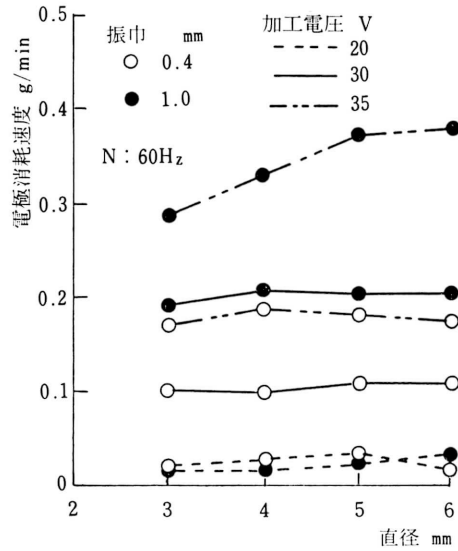


図 18 電極直徑と電極消耗速度

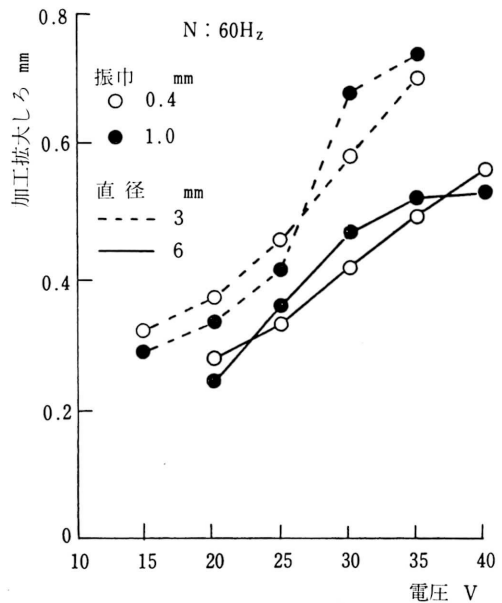


図 19 加工電圧と加工拡大しろ

4. 放電中一発ごとの電流波形に、さらにパルス状の高周波成分が含まれていることがわかつた。

以上水中放電加工における加工速度を中心に検討してきたが、加工電源の性質や、動的電極による放電現象の基礎的解明とともに、中空円筒型電極の効用や、加工液、加工粒についてもそれらの動向をさぐることによって加工速度や精度向上への有効的な加工条件が

みつかるものと思う。

参 考 文 献

- 1) 前田：機械振動型自動放電加工に関して，精密機械 Vol. 19, No. 8, p. 296.
 - 2) 八戸：放電研摩に関する研究，精密機械 Vol. 29, No. 11, p. 841.
 - 3) 倉藤・向山：高速放電加工の研究，精密機械 Vol. 31, No. 2, p. 166.
 - 4) 和泉：最近の放電加工電源，機械の研究 Vol. 18, No. 10, p. 1219.
 - 5) 元木：放電応用装置，日刊工業新聞社，p. 89.
 - 6) 王河：放電，共立出版社，p. 398.
 - 7) 電気加工ハンドブック，日刊工業新聞社，p. 18~19 など.
 - 8) 鳳・倉藤：改訂放電加工，コロナ社，p. 126.
 - 9) 井上：放電加工法，日刊工業新聞社，p. 277.
 - 10) 同上，p. 124.
-