

## 放電加工用加工液としての水の利用

The Application of Water as Inter-Electrode Medium for EDM

増 沢 隆 久\*

Takahisa MASUZAWA

放電加工用加工液としては一般に灯油が用いられているが、可燃性であるなどの欠点がある。これに代わるものとして水を用いることが考えられ、その実用化が国際的関心を高めつつある。そこでこれに関する研究の現状と展望について解説した。

### 緒

金型、プラスチック型をはじめ、各種の三次元形状加工に多用される放電加工法では、加工は絶縁性の液体(加工液と呼ばれる)の中で行われる。この加工液としては、ほとんどの場合灯油類を主に、鉱油が用いられている。しかし、灯油等を加工液として用いることにより、いくつかの問題点が生ずる。たとえば、パルス状であるとはいえ、局部的高温を伴うアーク放電が加工の主役であることから、灯油等の可燃物を利用することによる火災の危険性をゼロにすることはできない。また、石油を原料とし、白灯油より高い精製度を要する放電加工油は、資源面からも、価格面からも将来の見通しは明るくない。さらに、加工に伴う各種の分解生成ガスや蒸気による作業環境の汚染、人体への直接接点によるカブレや荒れなど、環境・衛生上の問題点も今後ますます無視できないものになっていくと思われる。

このように灯油系加工液が多くの問題点を有することから、これに代わる加工液の出現が強く望まれるようになってきた。そして、この要望に応えうると目される加工液の一つに水がある。

以下に、放電加工用加工液としての水の利用について、実用化に関連する諸点を中心に解説してみる。

### 加工液の要件

放電加工においては次のような機構で加工が行われる。

1) 媒体中で対向した工具電極と工作物の間に放電(過渡アーク放電)が発生する。2) 放電により放出されたエネルギーにより工作物の局部が加熱され、溶融または気化する。3) 媒体の局部が加熱され、発生した高圧により溶融部が飛散、除去される。4) 以上が繰り返され、クレータの集積により工具電極にならった形状が加工される。

以上のような除去機構から、媒体としては少なくとも次のような条件を満たすものが必要となる。

1) 絶縁性流体であること。2) (急な)加熱により局部に高圧を発生すること。3) 絶縁性の固体を生成しないこと。

気体は2)の要件を満たすのが難しいが、大部分の絶縁性の液体は上の必要条件を満足する。したがって、たとえば炭化水素、アルコール、エーテル、エステル、水など、多くの液体中で放電加工を行うことが可能である。しかし、それらのうち、どれを選ぶかは、次のような適性を比較検討のうえ決定されることになる。

4) 経済性、5) 供給の安定度、6) 加工性能、7) 人体への有害性、8) 安全性、9) 装置類への有害性、10) 取扱いやすさなど。

放電加工法発展の初期に各種の加工液が試みられたことから、以上の諸点を一応満足するものとして定着してきたのが灯油類、もしくはそれよりやや粘性の高い絶縁油類で、型彫り加工用の加工液としては世界的にはほぼ100%この加工液が使用されている。

灯油類が選ばれるようになったのは主として条件4)~6)に関して他の液体より優れているという判断があったためである。しかし、その後の情勢変化から、4)、5)については必ずしも優位を保てなくなっており、また7)、8)項がだんだん重視されるようになってきている。このような状況において加工液の選択は再検討を迫られることとなった。

一方、放電加工法の一方式として、ワイヤ放電加工が近年著しい普及を見せている。これは細いワイヤを工具電極とし、工作物を相対的にXY軸のNC制御で移動させることにより、ちょうど糸鋸による切抜き加工と同様の加工を行う方式である。このワイヤ放電加工では、テーブル移動を伴うことや、ワイヤ繰出しのため大きなふところを必要とするなど、加工液中に浸漬して加工を行っていく面がある。そのため、加工液を加工部に向け流す方式が採られている。したがって可燃性の加工液は使用できないので、水が一般的に使われるようになった。

このようにワイヤ放電加工では水が加工液として使わ

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

れているので、一般の型彫りの場合にも水を適用することが考えられる。しかし、電極形状を転写する放電型彫り加工と、ワイヤによる切抜き加工を行うワイヤ放電加工とはかなり性質が異なっているため、ワイヤ放電加工では良好な加工液であっても放電型彫り加工に適用できるとはかぎらない。

放電型彫り加工（以下EDMと略記）とワイヤ放電加工（以下WEDMと略記）の加工方式の相違から考えられる加工液選択上の問題点には次のようなものがある。

ア) WEDMでは工具電極(以下、単に電極と略記)であるワイヤが繰り出されながら加工が行われるので、電極消耗が加工精度に及ぼす影響が比較的小さいのに対し、EDMでは電極形状が転写されるための電極消耗率が小さくしなければ加工精度が確保できない。

イ) WEDMではワイヤ電極と工作物が近距離で対向しているのは放電の起こっている局部に限定され、加工のすでに終わった部分や非加工部はほとんど電界にさらされないが、EDMでは加工後の面や加工部周辺が長時間にわたり強い電界にさらされる。したがって加工液のわずかな導電性でも電解作用の原因となり、加工精度の低下や加工面あるいは非加工面の性状を劣化させる恐れがある。

ウ) WEDMでは電極が細いため多くの場合  $200\mu\text{C}$  / パルス以下の小エネルギーパルス放電とするが、EDMでは仕上げ加工を除き  $10^2 \sim 10^5 \mu\text{C}$  / パルスという、かなり大きなエネルギーの放電が主体となるため、加工現象も異なると考えられる。したがって十分な加工能率が得られるかどうか分からない。

エ) 電極と工作物の幾何学的関係が異なるため、加工くずの排出などの点で、加工液の粘性や生成物(主にガス)の違いの影響が異なる。

上のような問題点を別にすれば、加工液としての水は灯油類に比べ次のように多くの利点があると考えられる。

ア) 不燃性である。したがって火災の心配がないため、夜間を含め無人運転が可能となる。また加工液保管にも危険がまったく無い。

イ) イオン交換の経費を含めても放電加工油に比べ低価格である。

ウ) 純国産であり、供給面での問題はほとんど無い。ただし、イオン交換樹脂の供給が前提となる。

エ) 人体に無害である。液そのものも無害であるし、有害ガスの発生も無い。

オ) ほとんど変質しない。脱イオンと固形物のろ過のみではほぼ完全に復元する。(放電加工油は徐々に変質するため、加工特性も経時変化がある)

以上のように、水は多くの点で灯油類より優れており、適性条件の6)加工性能さえ十分であれば灯油類の代わりに使用することができると考えられる。なお、適性条

件の9)装置類への有害性についても一応検討を要するであろう。

水のほかにも灯油類に代わる加工液は考え得るが、最も有望なものの一つとして、水を取り上げ、さらに検討を加えることとする。

## 研究の動向

放電型彫り加工用の加工液としての水の実用化を目的とした研究は、従来あまり発表されておらず、まとまったものが二、三見られるようになった<sup>11,12)</sup>のは最近のことである。しかし、加工液の一つとして水についてのデータが挙げられているものとしては、10年ほど前に木本らを中心に行われた電極低消耗加工に関する一連の研究<sup>3)~19)</sup>がある。

当時は放電加工の精密な金型加工への適性を決定づけた電極消耗の極めて少ない加工条件の開発についての研究が盛んに行われた時期で、灯油類を加工液とした研究と並行する形で水中での加工実験も行われた。これら一連の研究で木本らは水中において放電電流ピーク値  $I_p$  / パルス幅  $\tau$  の比を小さくすることにより、正極性(電極が負、工作物が正となる接続)で超硬合金、鋼の電極低消耗加工ができることを示した。しかし、すでに主流となっていた灯油によっても優れた電極低消耗特性が実現できたため、さらに実用化研究へと進展するには至らなかった。また、これらの研究では加工電源としては静電蓄勢式の回路が主に用いられたため、現在のトランジスタによるスイッチング回路を主体としたものとはパルス条件が必ずしも同一ではない。

その後、灯油類が加工液として使われることが一般的となったが、前述のような各種の欠点が、防災、環境等に対する考え方や石油資源をめぐる情勢が変化するとともに問題とされるようになった。

こうした状況の中で、より欠点の少ない加工液として再び水が注目されはじめ、ヨーロッパを中心にぼつぼつその型彫り加工への適用が研究されるようになった。

1977年にはGodinhoら<sup>11)</sup>が特定のパルス放電の場合についての、鉱油、イオン交換水、および水道水の加工特性の違いについて調べた。また、Stavitskijら<sup>12)</sup>は水の導電性による電解現象を回路的に抑制する方法を示した。国内では木本らの研究の後、しばらく研究が途絶えたが、筆者により再開され、実用化研究が始められている。

このように、水を加工液として利用する研究は徐々に活発になってきているが、まだその加工特性については一部しか明らかにされていないのが現状である。

## 水の利用による加工特性

### 1. 加工速度

EDMの加工性能を示す基本的パラメータの一つであ

る加工速度についてみると、以下のような指摘ができる。

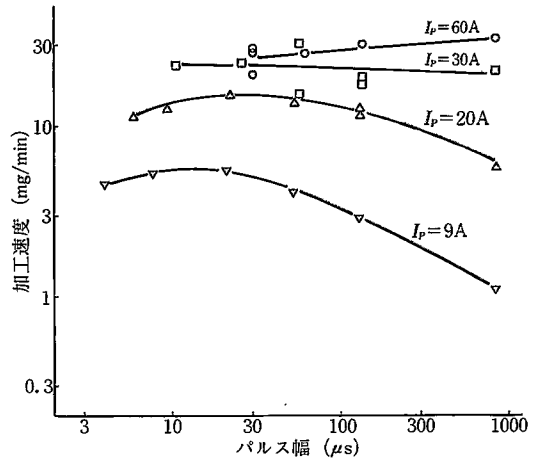
まず、同一パルスエネルギーの放電について、灯油類との比較をしてみると、全体的に水の方が加工速度が小さいようである<sup>11), 4), 20)</sup>。これは放電によって溶融した金属の除去は主として加工液の酸化、分解による圧力作用によるものと考えられるため、灯油と水の分子量の差が大きいことや、潜熱の違いなどの物理的性質の違いの影響を強く受けるためと考えられる。しかし、同一パルスでの除去量が小であっても必ずしも加工速度の上限が低いということにはならないので、水を用いることによる本質的なデメリットではない。

次に、具体的な加工工程で比較してみると、著しい差が見られるのは、いわゆる異常アーク（または疑似アーク）の発生状況である。灯油中の場合、穴あき電極を用いて加工液を噴出させながら加工すれば問題は少ないが、噴流できない形状の場合、加工開始後まもなく異常アークが発生して加工が進行不能になると同時に、電極が損傷を受けることが多い。これを避けるために電極を周期的に引き上げて極間をフラッシングすることが一般的に行われており、このため加工速度は理想的な状態に比べ大幅に減少する。特に加工深さが大きくなると、有効な加工時間の比率が極端に小さくなっていく。一方、水の場合は、異常アークの発生はほとんど観察されない。したがって加工液の噴流無しでも加工速度の減少は少ない。すなわち、加工液の噴流を理想的に行える形状の加工の場合を除いては、必ずしも灯油の方が実際的な加工所要時間が小さくなるとは言えない。このような現象の違いは主として加工液が炭素を含んでいるかどうかによるものと考えられる。なぜなら、異常アーク発生時には局部に大量の炭素の折出が見られるからである。

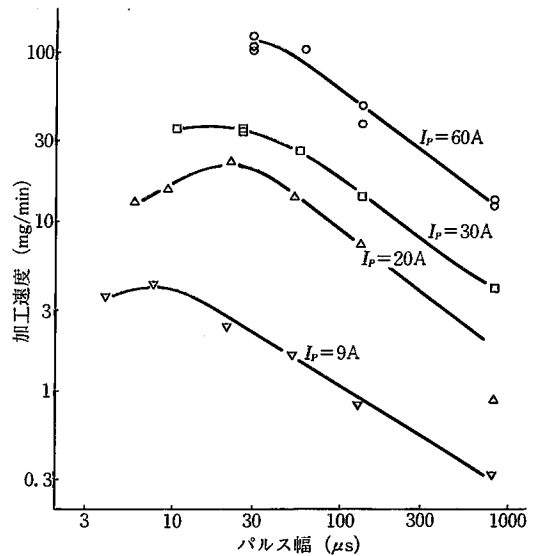
水を用いた場合の各種放電パルスによるSK4の基本的な加工速度特性を図1に示す。このグラフの平均電流  $I_{av}$  はパルスのピーク電流値  $I_p$  の約 1/10 になるように電極送りサーボが設定されているので、放電繰返し安定性が確保できる場合は（安定性は加工面積により影響される）定量的には図の3倍程度の加工速度で加工することが可能である。

これらからみて、水中ではパルス幅の小さいところで加工速度が向上する傾向がある。しかし、実際の加工においては、電極消耗率、加工面あらさなどがある範囲内であることが要求されるため、加工速度最大の条件が採用できるとは限らない。

水を用いる場合、その脱イオン処理の程度によって加工液としての電気的特性に差があるため、加工速度にも影響が現れる。Godinhoらが水道水(比抵抗約  $1.1 \times 10^4 \Omega \text{ cm}$ )とイオン交換水(約  $2.3 \times 10^5 \Omega \text{ cm}$ )で比較した例を図2に示す。また、イオン交換水(約  $7 \times 10^5 \Omega \text{ cm}$ )と、それに  $\text{NaNO}_3$  を加えて比抵抗を約  $3.5 \times 10^4 \Omega \text{ cm}$  にした



(a) (水中,  $7 \times 10^5 \Omega \text{ cm}$ ,  $I_{av} \approx 0.1 I_p$ ,  $\text{Cu}^+ - \text{SK} 4^+$ )



(b) (水中,  $7 \times 10^5 \Omega \text{ cm}$ ,  $I_{av} \approx 0.1 I_p$ ,  $\text{Cu}^+ - \text{SK} 4^-$ )

図1 パルス幅,  $I_p$  による加工速度の変化

(a) 正極性 (b) 逆極性

水と比較した例<sup>21)</sup>を図3に示す。これらの図からは脱イオン処理の差が加工速度に影響を与えることは明らかであるが、比抵抗に関しての一致した傾向は見られない。これは電極形状の相違、水道水のイオンと  $\text{NaNO}_3$  の違いなどが異なった影響を与えたためと思われる。

## 2. 電極消耗率

型彫りの場合、電極の消耗は加工精度に直接影響を与えるので、電極低消耗の加工ができなければ実用性が低い。水を加工液としたときにも灯油中と同じように低消耗で加工できる条件が存在することは木本らによって指摘された。その消耗率特性の1例を図4に示す。これはコンデンサ放電によるもので、放電回路にそう入したイ

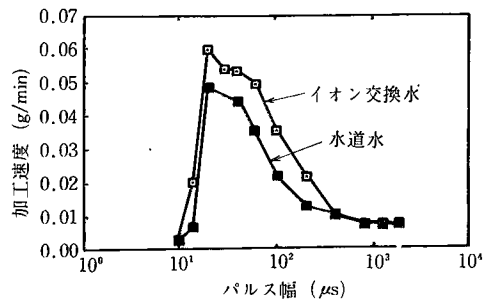
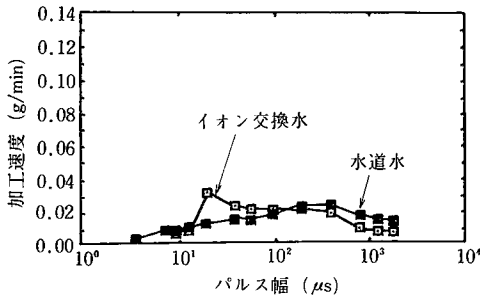


図2 イオン交換水と水道水の加工速度の比較 (Godinho & Noble)  
(電極: 銅, 工作物: 高速度鋼,  $I_p = 22.5 \text{ A}$ )

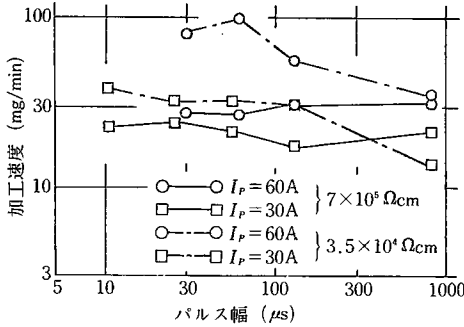


図3 (a) 加工液の比抵抗による加工速度の違い (正極性)  
(工作物: SK4<sup>+</sup>, 電極: 銅<sup>-</sup>)

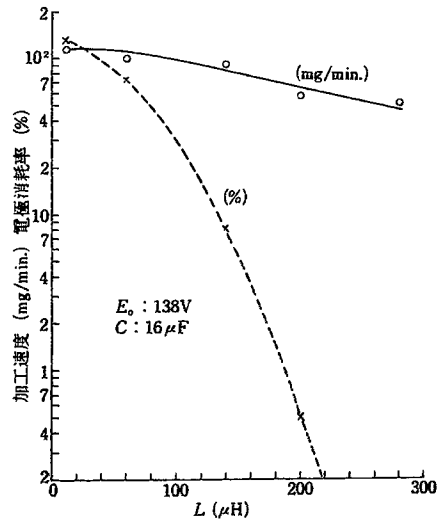


図4 Cu/Stの消耗特性に対するLの影響

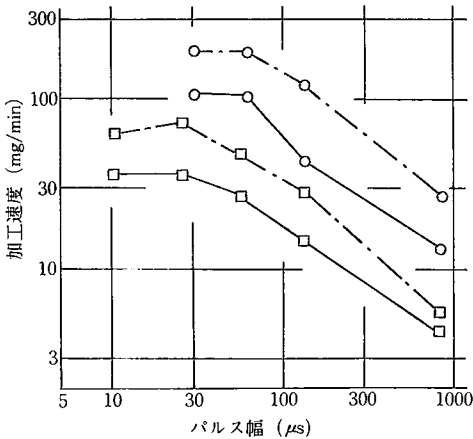


図3 (b) 加工液の比抵抗による加工速度の違い (逆極性)

インダクタンス  $L$  が大きいとき、つまり  $I_p$  が小さくパルス幅 ( $\tau$ ) が大なるほど低消費となっており、本らは正極性で  $I_p/\tau < 0.1 \text{ (A/}\mu\text{s)}$  のとき、1%程度以下の消費率になるとしている。

最近ではコンデンサ式の回路は仕上、微細加工以外はほとんど使われないので、トランジスタスイッチングによる矩形波で加工した場合の電極消耗率特性を調べた例を図5に示す。このように、正極性と逆極性では消費率の傾向はまったく異なっており、正極性の場合、電極消耗率をゼロにすることも可能であるが、パルス幅に対し

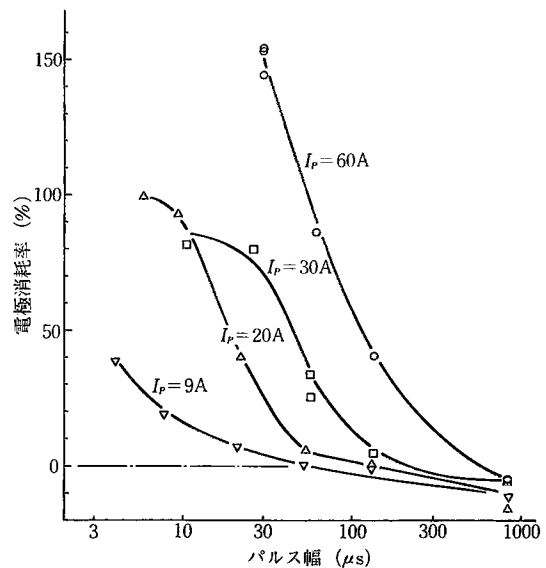


図5 (a) パルス幅,  $I_p$  による電極消耗率の変化  
(図1 (a) と同条件)

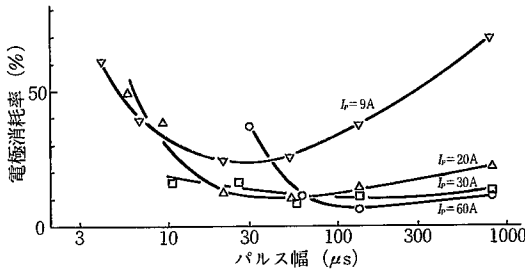


図5 (b) パルス幅,  $I_p$ による電極消耗率の変化 (図1 (b)と同条件)

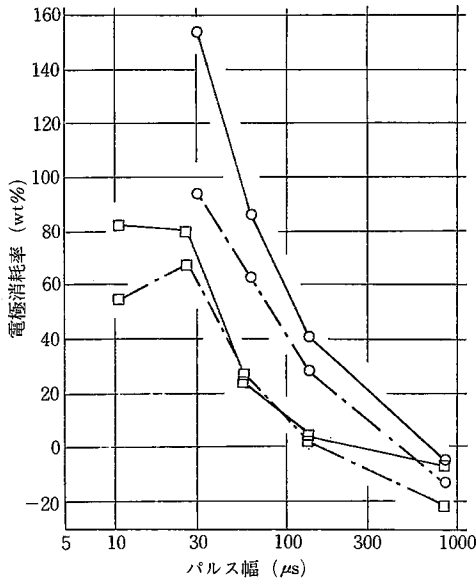


図6 (a) 加工液の比抵抗による電極消耗率の違い(正極性) (図3と同条件)

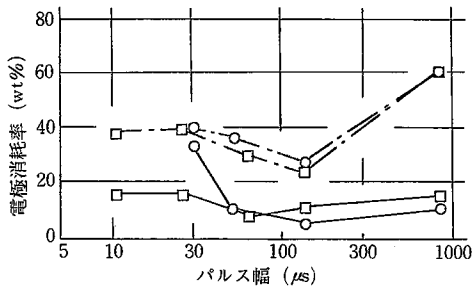


図6 (b) 加工液の比抵抗による電極消耗率の違い(逆極性)

てややクリティカルな特性となっている。一方逆極性では電極消耗率がゼロにはならないが、割合ブロードであり、数%の消耗率なら容易に実現できる。

電極消耗率は使用した水の比抵抗によっても変化する。その違いを示した例<sup>21)</sup>を図6に掲げる。このように、正極性では比抵抗が小なるほど、逆極性では比抵抗が大なるほど電極消耗率が小さくなる傾向がある。これは Godinho らの実験結果とも一致しており、比抵抗は電極消耗

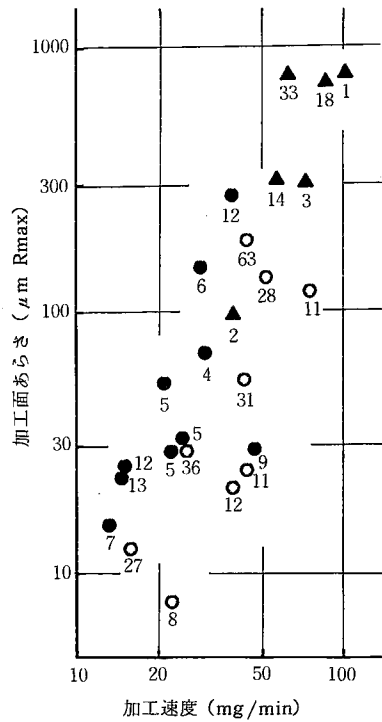


図7 あらさ — 加工速度での比較 (E: Cu, W: SK 4, ▲EDF・逆極性, ●水・逆極性, ○水・正極性) 率に直接影響するパラメータであることがわかる。

### 3. あらさ — 加工速度曲線

放電加工では一般に加工速度が大きくなる条件では加工面あらさが大きくなる傾向があるため、加工の能率の良さを比較するときは加工面あらさ — 加工速度平面上の位置で評価するとわかりやすい<sup>22)</sup>。そこで、水中(正極性および逆極性)および放電加工油 EDF (灯油系)中(逆極性)で加工したときの加工速度と加工面あらさを種々の  $I_p, \tau$  の組合せについての測定しプロットしてみると図7が得られた。このグラフ上で左上の点ほど加工の能率が良いことになるが、実用上は電極消耗率も問題になるので、各測定点にはその加工条件での電極消耗率(%)を併記した。

図からわかるように、ほぼ同じ消耗率を示す点を連ねてあらさ — 加工速度曲線としてみれば、EDF と水中での逆極性の加工特性は近似した直線上にのっていると判断できる。すなわち、水中で加工すると加工速度が小さくなるが、加工面あらさもそれだけ小さくなるので、実用上あまり問題ないということが予想される。ただし、高い加工速度そのものが要求される場合は、より大容量の電源が必要となり、またその場合でもあらさ — 加工速度特性が十分なものであるかどうか、現段階では不明である。水中での正極性の加工は、あらさ — 加工速度

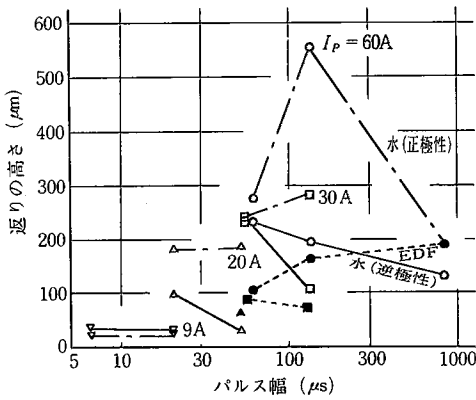


図8 返りの高さの比較  
(加工深さ0.2mm, 電極:銅, 工作物:SK4)

曲線に関してはあまり良好な特性とは言えないようである。

#### 4. その他

水中で加工を行った場合、灯油中に比べ返りが発生しやすいようである<sup>23)</sup>。加工深さを0.2mmとしたときに発生した返りの高さを水中での正、逆極性およびEDF中逆極性について比較すると図8のようになる。このように、水中、特に正極性の場合には灯油系の加工液を用いる場合に比べかなり大きな返りが発生する。ただし、返りの高さは加工深さとともに減少する傾向がある。こうした返りの発生し易さは、溶融物の除去が円滑に行われないう点で、加工能率の低いことと同様の基盤から発する特徴と思われる。また、返りの成分は工作物材料そのものであり、電極材料が転移したものではない。

その他、正極性で加工すると、工作物面の加工部付近が黄褐色に変色することが多い。これは電解作用により陽極部に発生する酸素が表面酸化を引き起こすものと思われる。しかし、この黄褐色の被膜は強固なものではないことが多い。また電極低消費条件では工作物材料の電極への転移が顕著に見られ、銅電極面は白色となる。転移層の厚さは、たとえば $I_p = 30\text{ A}$ ,  $\tau = 130\ \mu\text{s}$ の場合で10 $\mu\text{m}$ 前後である<sup>21)</sup>。逆極性でも転移現象が見られるが、転移層表面の酸化のために白色にはならない。

#### 展 望

以上の加工特性から、水を加工液として用いた場合の問題として、次の各項が挙げられる。

- (1) 加工速度が小さい。
- (2) 電極消費率が小さくなる条件と加工速度の大きくなる条件が一致しない。
- (3) 返りが発生しやすい。

など。

逆に灯油系加工液より優れている点として、

- (4) 加工面あらさが小さい。
- (5) 異常アークが発生し難い。

が挙げられる。

(1)については(4)から、より大きいエネルギーのパルスを用いれば同一加工面あらさに対して同等の加工速度を得る可能性があること、(5)から加工の安定性が優れているため十分な性能が得られるであろう。

しかし、(2)については特に正極性での低消費条件下で加工速度がかなり小さいことから、今後大きな障害となる可能性がある。解決の方法としては、正極性での加工速度向上、および、逆極性での電極消費率軽減の2つの方向が考えられる。前者は添加物の導入、後者は電解現象の抑制などが有効な手段と思われる。

以上のほか、表面の変色などが実際面では大きな問題となる可能性がある。この点では特に逆極性での加工技術の進展が重要と思われる。

#### ま と め

以上述べたように、放電型彫り加工用加工液としての水の利用は、まだいくつかの未解決な点を残してはいるが、灯油類に対して本質的に優れた特徴を多くもっているため、今後、放電型彫り加工における少なくともある分野はこれに置き換えられていくものと思われる。

(1980年8月22日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) L. H. Godinho and C. F. Noble: The Use of Water as Inter-Electrode Medium in Pulsed EDM, Proc. of ISEM 5, 1977
- 2) В. И. Ставицкий, С. В. Конушин; К вопросу об оптимальной форме холостых импульсов напряжения и рабочих импульсов тока при прецизионной электроннолучевой обработке в воде, Электронная Обработка Материалов, No. 3(87), 1979
- 3) 田宮 他; 液中過渡アーク放電による電極消費, 第45回放電加工研究会資料I, 1966
- 4) 平田, 田宮, 木本; 水中の低消費放電加工(1), 昭和42年度精機学会春季大会前刷, 171, 1967
- 5) 田宮, 平田, 木本; 水中の低消費放電加工(2), 昭和42年度精機学会春季大会前刷, 173, 1967
- 6) 木本, 田宮, 平田; 液中過渡アーク放電による極性消費とその応用, 日立造船技報28, 2, 13-20, 1967
- 7) 田宮, 木本; 水中の低消費放電加工(4), 昭和42年度精機学会秋季大会前刷, 87, 1967
- 8) 木本; 電極低消費放電加工の一考察, 昭和42年度精機学会秋季大会前刷, 89, 1967
- 9) 木本; 液中過渡アーク放電による極性電極消費の一考察, 昭和42年電気関係学会関西支部連合大会前刷, 147, 1967

- 10) 田宮, 木本, 平田; 水中過渡アーク放電による電極消耗(Ⅲ), 昭和42年電気関係学会関西支部連合大会前刷 149, 1967
- 11) 平田, 木本, 田宮; 液中過渡アーク放電の電極消耗, 昭和42年電気関係学会関西支部連合大会前刷, 151, 1967
- 12) 平田, 木本, 田宮; 電極低消耗放電加工の電流密度の推定, 昭和43年度精機学会春季大会前刷, 139, 1968
- 13) 木本, 田宮, 平田; 水中の低消耗放電加工(5), 昭和43年度精機学会春季大会前刷, 147, 1968
- 14) 木本, 田宮, 平田; 電極微消耗放電加工, 昭和43年度精機学会関西地方大会シンポジウム資料115, 1968
- 15)~17) 木本, 田宮, 平田; 水中の低消耗放電加工(6)~(8), 昭和43年度精機学会秋季大会前刷, 39~44, 1968
- 18) 木本, 田宮; 水中の放電加工, 第54回電気加工研究会資料, 93-98, 1969
- 19) 木本, 田宮; 水中における電極低消耗放電加工(I), 電気加工学会誌3, 5, 23, 1969
- 20) 増沢; 水中での放電加工(第1報), 生産研究32, 3, 135, 1980
- 21) 増沢; 水中での放電加工, 第97回電気加工研究会資料, 1, 1980
- 22) 斉藤, 小林; パルス電流による放電加工特性, 電気加工学会誌1, 1, 5, 1968
- 23) 増沢; 水中での放電加工(第2報), 昭和50年度精機学会秋季大会講演論文集, 143, 1980

次号予告(12月号)

退官記念講演

金属材料と35年.....西川 精一

研究速報

A Note on Stochastic Finite Element Method (Part 1) ..... {久田 俊 明  
- An Extension of the Methodology to Nonlinear Problems - ..... {中 桐 滋

水滴の突沸崩壊実験と自然核発生.....西尾 茂文

予引張あるいは予圧縮ばねを利用した免震床の研究 ..... {藤田 隆 史  
(第3報 振動特性と免震性能-その3-) ..... {服部 二 忍  
石 田 郎

異形材の押し出し・引抜きに関する研究..... {木内 秀 学  
岸 田 敏

半溶融加工に関する実験的研究-第7報- ..... {木内 学  
- 粒子強化複合材料の製造および加工に関する検討・1 - ..... {杉山 澄 雄

非軸対称鍛造の研究..... {木内 学  
重 田 澄 夫

各種非晶質合金の高分解能電顕観察..... {市野 英 喜  
石 田 洋 一

弾性波の発生・伝播に関する計算手法の比較..... {大保 直 人  
片 山 恒 雄

総索引

生産研究・生研報告発行リスト(1980)