

# 最近の放電加工について

三菱電機株式会社  
(名古屋製作所)

斉 藤 長 男  
小 林 和 彦

## 1. ま え が き

二つの電極間で放電を起こすと、放電の足になる電極点の温度は非常に高く沸点にも達し、その部分の材料が蒸発・溶融し、衝撃圧力により吹き飛ばされる。この作用は、気体中よりも絶縁液（油・水）中の方がはるかに効果が大きいので、加工は通常油中で行なわれる。蒸発・溶融と局部的衝撃圧力が、放電加工の加工機構の主たる要因であるから、工作材料の硬度・強度に無関係に加工できる。これが従来の機械加工にない放電加工の特色であり、特殊加工法（Non-Traditional Machining Process）と呼ばれるのもこのためである。ところで、改めていうまでもなく、加工といえば機械的加工法が主流であり、これは昔も今も変わりはない。

しかし、工業の発展にともない強じん・高硬度の材料を複雑形状・精密寸法に加工する必要が生じ、一方、合理化・省力化という社会的な要求も加わって、機械加工以外の新しい加工法の必要性が広く認識されるようになり、特殊加工法の発達が進められた。

特殊加工法としては、放電加工、電解加工、超音波加工、電子ビーム加工、レーザ加工等があるが、なかでも放電加工は、技術的進歩が目覚しく、驚異的に用途を拡大し、金属加工法としてなくてはならない存在になっている。

本文では、最近の放電加工の技術的進歩について、ひととおり紹介し、参考に供したいと思う。

## 2. 放電加工の本質的傾向

従来の加工法に対比して、放電加工の一大特長と言え、まずこの加工法自体が、種々な加

工の組み合わせでなく、直接加工と言われるもので、いわば現物合わせ的加工の性格を持っていることがあげられよう（図1参照）。放電加工においては、電極形状と製品形状とは雌雄対称の関係にあり、両者のかん合精度は、放電加工条件によっても変わるが、一般に非常に高く $10\mu$ 程度の精度も容易に得られる。そのうえ、加工は自動的に行なわれ、工作物の材料の硬度・強度にはまったく無関係に加工ができるという特長もある<sup>1)</sup>。反面、図面より如何に精度良く電極を作るかということが、この加工法において最も重要で、加工自体の失敗がほとんど考えられなくなっている現在、電極製作がこの加工法の成否を決すると言っても過言ではない。

放電加工の加工速度自体は、本質的には従来加工法に比べ著しく遅く、単純形状加工の場合には、数10～数100倍の開きがある。たとえば、 $10\text{ mm}\phi$ の穴をボール盤で加工することを放電加工で行なうと、同程度の精度で、高々 $1\sim 2\text{ mm/min}$ の切入速度になり、到底同一レベルで両者を比較することはできない。

しかしながら、形状が複雑になったり、シャープエッジ（Sharp Edge）や微細穴のような

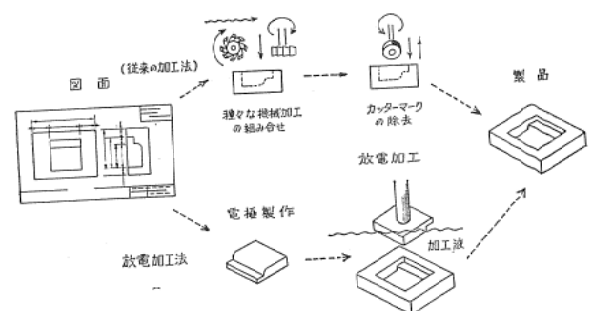


図1 放電加工と従来の加工法との比較

加工になると、従来法ではいろいろな加工の組み合わせで行なわねばならず、さらに図面に対する加工精度を上げるため、かなり加工速度が低下する場合が一般的で、両者の加工速度における優劣関係が逆転する場合が多く見られるようになる。放電加工が従来、単純形状を加工する生産加工にはあまり用いられず、金型のような複雑形状の加工を主とした、比較的付加価値の高い加工に用いられてきたゆえんでもあろう。

ところで、放電加工では、電極と加工物を数 $10\mu$ の距離に対向させ、絶縁油中に浸漬して放電を発生させることにより加工を行なうので、極間距離を一定に保つためのサーボ機構が必ず付属する。このことは、加工を自動化するという点で、従来の加工法より一歩進んだ考え方に立ち、その意義は大きい。反面加工特性がサーボ機構の性能でかなり左右されるということも、この加工法の特徴である。

電極材料としては、導電性のものであれば一応理論的には、どのような材料でも利用できるが、加工容易な材料（銅、グラファイト、鋼、黄銅、銀タングステン、銅タングステン）が一般に使用される。キャビティ（Cavity）を加工する場合には、電極消耗が図面に対する加工精度に大きな影響を及ぼすことになるので、電極消耗の極めて少ない銅ないしはグラファイトが多く用いられる。この場合、電源回路とその電気条件の選定が非常に重要で、従来の技術開発

も、前述のサーボ機構や電極製作法と合わせてもっぱらこの点に注がれてきたといえよう。

### 3. 放電加工の技術進歩の展望

電気加工、とりわけ放電加工の技術的進歩はおそらく機械工業の中でも最も急速で、最近の技術は10年前の技術水準と比較すると、その工業的価値において雲泥の相違があり、過去の電気加工の常識からは信じられないほどの驚異的な進展がなされている。その技術の進歩の過程を一本の成長する樹木になぞらえて示してみると、図2のようになりそうで、大別して、機械系、電源系、そして応用技術の3系統に分類できよう。

まず、機械系においては、極間隙のサーボ機構が電動モータ制御から油圧制御に置き換ったことが最も大きな技術的進歩であり、それにより機械剛性が著しく増加し、大重量の電極を保持しても、安定にしかも精度よく加工することが可能になった。その結果、機械構造の大形化と進み、自動車ボディーのプレス型やトリミング型を加工する超大形放電加工機（図3）も出現した<sup>2)</sup>。この機械に用いる電極は、大きさが最大 $2\text{m} \times 3\text{m}$ もあり、しかも一般に自由曲面をしていることから、電極製作がかなり難しく、その解決策として、銅電鑄による電極製作技術が導入され（図4）、そしてまたそれに関する新しい技術も生れた。

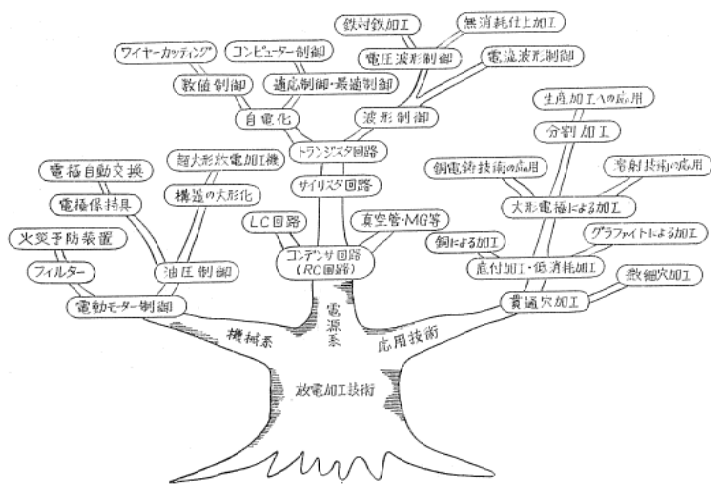


図2 放電加工技術の進歩

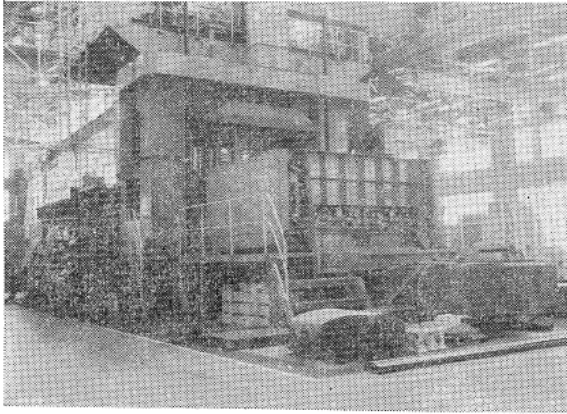
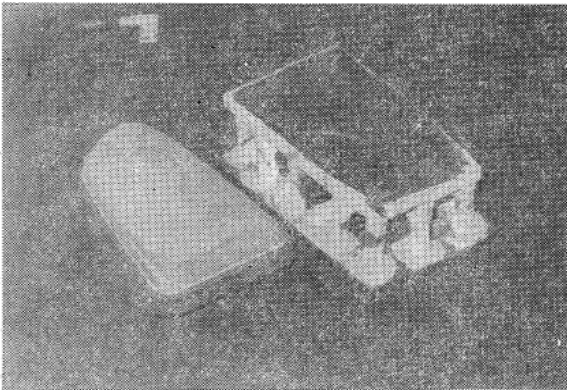


図3 DM-5000形放電加工機



銅電電鋳電極による加工  
図4 (自動車のフロントフェンダー絞り型)

電極面積が大きくなってくると、それに比例して加工時間が増加し、経済的に引き合わなくなるという問題が生じてきた。また非常に多くの細穴をあける場合も同様に、加工時間の増加が問題になり、このような事情から分割加工法<sup>9)</sup>が開発された。これは、電極を複数個に分割し、その各々に電流を供給して加工するもので、加工速度を分割数倍にまで増加させることができる。

さて、放電加工の性能そのものは、ほとんど電氣的な条件によって本質的に決まるという特質を持っているので、放電加工の技術進歩も、電源系のそれに負うところが非常に大きいといえよう。とりわけ、放電回路方式の進歩は、現在ないしは将来にわたる、放電加工の金属加工法における地位を決定づけた程の大きな効果を持っていると言っても過言ではない。

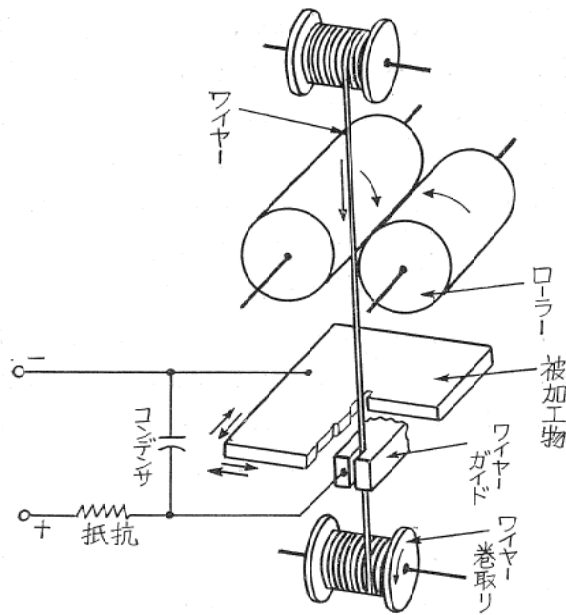
ラザレンコ夫妻によって考案されたコンデンサ放電回路(RC回路)は、途中いろいろな形

で改良が加えられてきたが、最近の半導体化された回路に到って、放電回路は、回路方式ばかりでなく、その加工特性においても著しい発達を遂げた。極間に印加する放電パルスの電流波形や電圧波形の制御が非常に容易になり、その結果、加工特性が一段と向上した<sup>9)</sup>。いわば、放電加工における技術革新が起きたともいえよう。とくに、銅ないしはグラファイト電極を用いた場合、ほとんど電極消耗の無い加工ができるようになったということは、放電加工の利用分野をどのとくい広げたか、計り知れないものがある。

ところで、このような電源の進歩にもかかわらず、複雑な形状の加工の場合には、加工の進行状態に応じて、最適な加工条件にオペレータが調整する必要があった。したがって、無人状態で、安定に、しかも高能率に加工することは難しく、また加工能率は、オペレータの経験と勤にたよらざるを得ないのも事実であった。一方、自動化、省力化という合理化に対する社会的要請もあり、このような背景をもとにして放電加工においても、加工プロセスの最適制御ないしは適応制御という手法が導入された<sup>9)</sup>。

この方法によれば、極間の状態に適応して、加工電流を最適に選定することができるようになるので、個人差がなく常に最適の状態で行なうことができる。さらに数値制御により電極と加工物のポジショニング(Positioning)や加工条件の切換えも自動的に行なう装置<sup>9)</sup>も既に開発されており、ついでコンピュータによる制御も近い将来には導入されるものと思われる。

新しい動きとしては、ワイヤ電極を用いた放電加工機(Wire Cutting EDM)(図5)が出現し、これは、繊維機械関係のノズル穴加工のような異形の微細穴加工が主目的であったが、最近では比較的大形の抜型加工にも用いられる傾向にある。電極消耗が避けられないという放電加工の短所(低電極消耗の加工でも僅かながら電極消耗がある)を、ワイヤを用いることにより積極的に除去しようとしていること。さらに図面ならい制御や数値制御を導入して、複雑



形状の貫通穴を自動的に加工できるという特長を考慮すると、今後かなりの期待が持てそうである。

以上、最近に到るまでの、放電加工の技術的進歩を一通り述べたが、さらにこれらのうちから重要な技術の幾つかを選んで、紙面の枚数の許すかぎり紹介してみたいと思う。

#### 4. トランジスタスイッチング式放電回路における加工特性

この放電回路は、図6に示すように、トラン

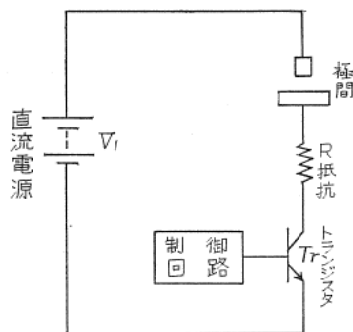


図6 トランジスタスイッチング式放電回路

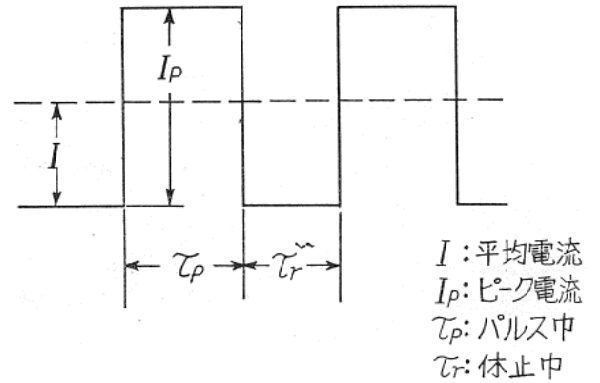


図7 電流波形と電気条件の関係

ジスタを ON—OFF させることにより、極間に方形波電流を流し加工を行なう方式で、電流波形と電気条件との関係は、図7に示す通りである。単一放電痕の大きさは、一パルスのエネルギーを決定する放電電流ピーク値  $I_p$  とパルス幅  $\tau_p$  の積の値で変化し、この値が大きい程、放電痕は大きくなる傾向にある。

放電加工は、単一放電の累積で行なうものであるから、単位時間当りの放電パルスの数が多い程、言い換えれば平均加工電流  $I$  が大きい程、加工速度は大きくなる。筆者らが以前に銅電極について求めた実験結果によれば、加工速度  $W(g/min)$  は次式で与えられる<sup>3)</sup>。

$$W = k_1 I \cdot I_p^m \quad (1)$$

ただし、 $k_1 \doteq 9 \times 10^{-3}$ ,  $m \doteq 0.5$

(1)式より、単位電流当りの加工速度  $W/I$  は、 $I_p^m$  に比例するので、同一平均電流値でも  $I_p$  が大きい程、加工効率が高くなることがわかる。

一方、電極消耗比  $\epsilon$  (%) と加工面の面あらかさ  $H(\mu H_{max})$  は、同様に次式でそれぞれ表わされる<sup>3)</sup>。

$$\epsilon = k_2 (I_p - I_0) / \tau_p^\alpha \quad (2)$$

ただし  $k_2 \doteq 1.35$ ,  $I_p \doteq 13$ ,  $\alpha \doteq 10^2$

$$H \doteq k_3 I_p \cdot \tau_p^{0.38} \quad (3)$$

ただし  $k_3 \doteq 1$

電極消耗が少なくなるのは、(2)式より  $I_p$  が小さく、 $\tau_p$  が大きい場合であるが、この場合、 $I_p$  が小さいので、加工速度は低下する。また、面あらかさ  $H$  を小さくするためには、 $I_p$  と  $\tau_p$  を小さくする必要があるが、いま  $I_p$  を非常に大きくし、その大きくなった分だけ  $\tau_p$  を小さく

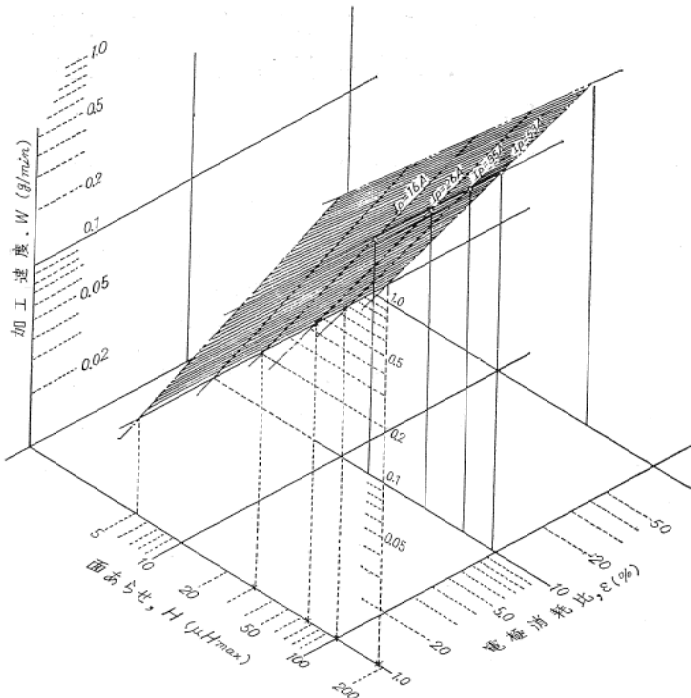


図8 放電加工特性の相互関係

することにより、Hの増加を防いだとすれば、電極消耗比 $e$ は増加するけれども、非常に高い加工速度 $W$ が得られることがわかる。したがって、前者の場合は底付加工、後者の場合は、電極消耗があっても精度には影響なく、速く加工できる方がよいということで、貫通穴加工に主として用いられる。

以上のように、加工速度、電極消耗比、面あらかの3要素については、互いに相反する傾向をもち、このうちの2要素を選定すれば、他の一つは自ら定まる関係にある。すなわち、面あらかと加工速度を高めれば、電極消耗を大きな値に許容せざるを得ず、電極消耗を小さくすれば、面あらかか加工速度のいずれかを犠牲にせざるを得なくなる。図8はこれらの関係を実際の加工データより図示したものである。

### 5. 電圧波形制御による放電加工<sup>6)</sup>

第4章では、電流波形における電氣的条件と加工特性について考えてみたが、放電加工は、あるギャップをおいて二つの電極を対向させ、その間で放電を発生させることにより加工を行なうものであるから、放電ギャップに影響を及ぼす電圧波形も、何らかの形で加工特性と関係を持つはずだと当然考えられる。放電ギャップ

が異なると、極間に与えられた放電エネルギーの、両電極に対する配分率や、放電痕を生成するのに作用する爆発力その他の力の大きさが変わってくるはずで、その結果加工速度や電極消耗比等の加工特性が変化してくる。

ところで放電加工においては、加工を安定に維持するということが最も重要で、加工の安定度を欠いては、いかなる放電現象も実用には供せないといえよう。そのために放電ギャップを一定にコントロールするサーボ機構はもちろんのこと、電気条件や、電極材料の選定に種々な工夫が施されてきた。加工の安定度を悪化させる要因としては、極間におけるひん繁な短絡で、これが発生すると極間間げきを一定にコントロールすることができず、その結果

加工特性、とりわけ加工速度を著しく低下させる。そこで、この短絡現象をできる限り少なくするためには、放電ギャップを広く保つこと、すなわち広いギャップからでも極間の絶縁液を絶縁破壊させるようにすることが必要で、電圧波形の制御が重要になってくる。

電圧波形を制御する方法としては、いろいろな方法が考えられるが、一例として図9に示すような方法がある。これは、図6に補助回路と

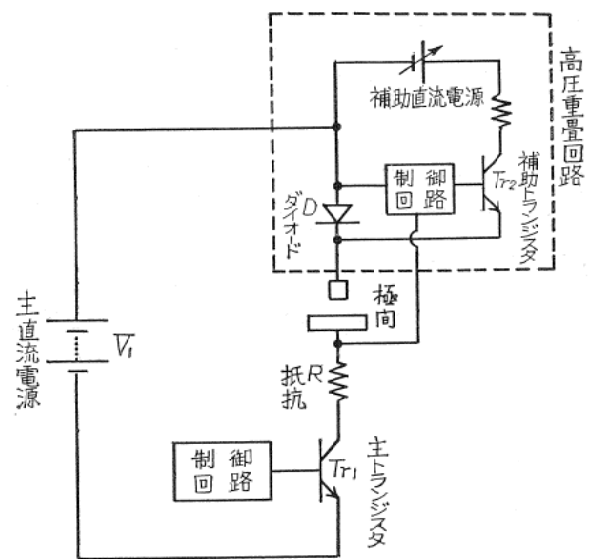


図9 高圧重畳放電回路

して高圧重畳用の回路が付加されたものであるが、制御できる電圧としては、補助トランジスタの定格電圧によって定まり、1000V位までは現在可能である。(市販の電源では300V以下になっている。)

極間に印加する放電開始電圧と放電ギャップとの関係は、図10に示すようなもので、電圧が高くなるとともに、放電ギャップは大きくなっている。つぎに放電ギャップの増加による加工状態への影響としては、図11に示す極間電圧の変化より、著しく加工が安定になることがわかる。このことは、従来難加工性と言われていた金属材料の加工や、放電ギャップが非常に狭く

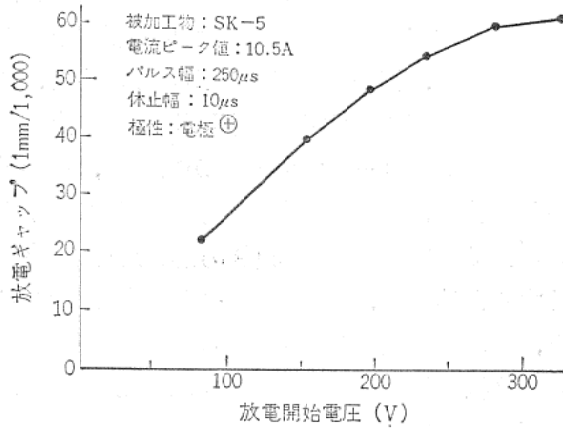
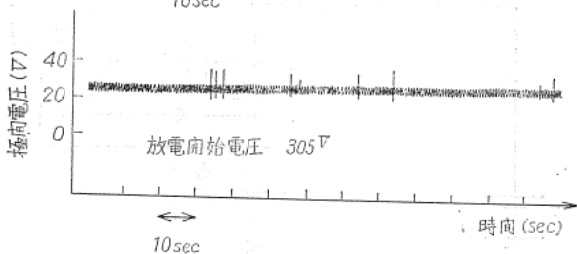
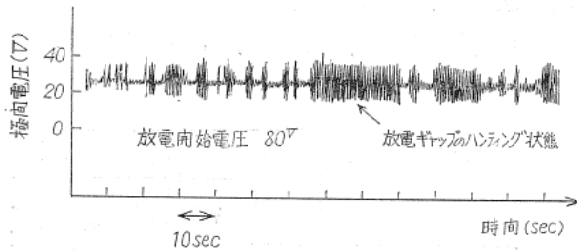


図10 単一放電における放電ギャップと放電開始電圧との関係



加工条件  
電極材料:SK-5 ⊕  
被加工物:SK-5 ⊖  
パルス中:8μsec  
平均電流:2A

図11 放電開始電圧の違いによる加工の安定度の比較

て安定加工の得られない加工にこの方法を応用すれば、好結果が得られるものと考えられそうで、事実比較的安定加工が得難いとされていた鋼対鋼の加工や、非常に面あらしがこまかい仕上加工において高い効果をあげている。

ところで、放電ギャップが大きくなると、放電通路 (discharge channel) のエネルギー損失が大きくなり、またエネルギー密度の減少も考えられるので<sup>7),8)</sup>、本質的には加工速度は低下するはずである。図12に、放電開始電圧を変化させて行なった実際の放電加工速度を示す。

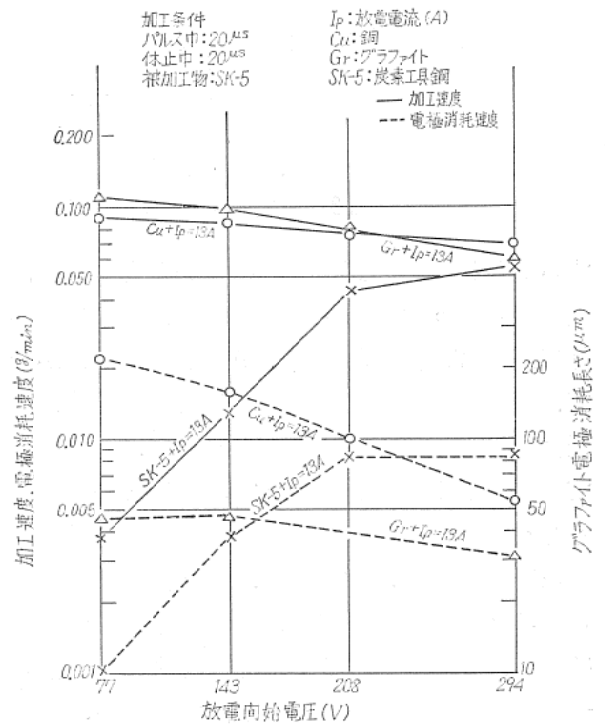


図12 放電開始電圧を変化させた場合の加工速度、電極消耗速度

鋼対鋼の加工の場合は、加工速度は増加しているが、銅ないしはグラファイト対鋼の場合は、逆に減少していることがわかる。減少するのは、単一放電痕の大きさ(直径と深さ)が減少するためその様子を図に13示す。

### 6. 放電加工の適応制御

実際の放電加工の作業において最も重要なことの一つは、高能率の加工を加工終了まで維持することである。そのためには時々刻々変化する放電現象の状態を常に安定に保つ必要があ

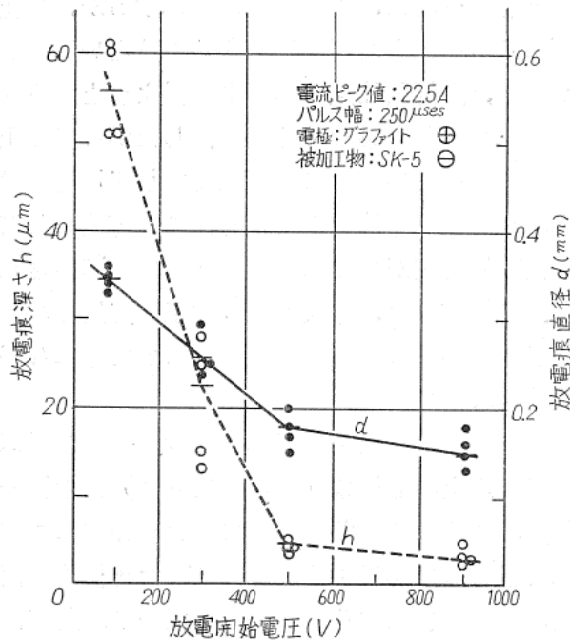


図13 放電開始電圧に対する放電痕の大きさ

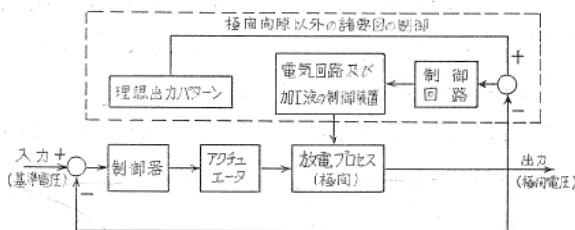


図14 放電加工における適応制御の一例

る。通常の放電加工機では、図14に示すように極間間隙を一定に制御する油圧式ないしは電動式によるサーボ機構が附属しているが、広範囲に安定な放電状態を維持するためには、放電状態に影響を及ぼす極間間隙以外の他の諸要因の制御も必要になってくる。放電状態に及ぼす要因としては、電気的な要因や加工液に関する要因等があり、制御の容易さから通常は前者が用いられ、とくに加工電流の制御は最も効果的である。

放電加工中の加工電流  $I$  (A) は、電流波形が図7で示すような場合、次式で与えられる。

$$I = I_p \frac{\tau_p}{\tau_p + \tau_r} \quad (4)$$

この式によれば加工電流を制御するためには、パルス幅  $\tau_p$ 、休止幅  $\tau_r$ 、および放電電流ピーク値  $I_p$  のうちいずれかを変化させればよいことになる。一般には、パルス幅と放電電流ピーク値は、前章で述べた通り、加工特性と密接な

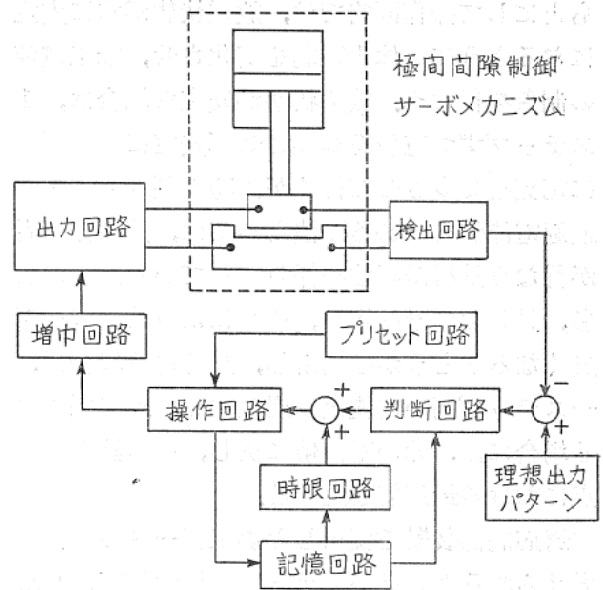


図15 放電加工の適応制御方式のブロック線図

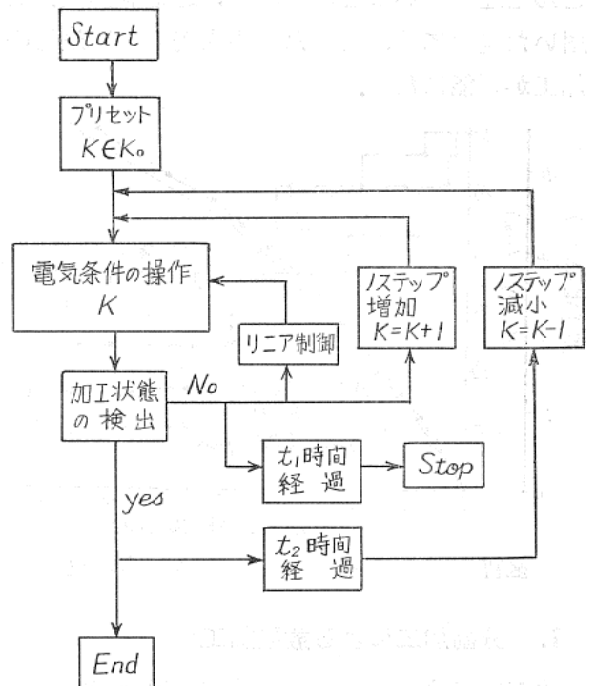


図16 放電加工適応制御方式のフローチャート

関係があるので、休止幅を変化させる場合が多い。

適応制御の一手法として、当社の適応制御装置オプティマイザを例にとり、その原理と効果について紹介してみたいと思う。適応制御方式の原理を図15に、ジクナルのフローチャートを図16に示す。

検出回路でまず放電状態が検出され、判断回路でそれが安定か否か判断される。その結果を

もとにして操作回路では、放電状態が常に安定になるように、休止時間を変化させ、加工電流の制御を行なう。放電状態が安定な場合は、1ステップずつ電流を増加させ不安定になれば逆に電流を減少させて行くが、時々刻々変化する最適電流値を求める手法としては、熟練作業者が行なう試行錯誤法を採り入れている。すなわち、試しの信号を入れ、それにより放電状態が良くなるかどうかを判断し、良くなる場合は、一ステップ高い電流値を選定する。逆に悪化する場合には、元の電流値に戻し、その値を現時点における最適値と定める。

適応制御装置を使用した加工データの一例を考えられる理想条件のデータと比較して、図17に示す。これらのデータから、理想の場合とほとんど変わらないことがわかり、適応制御装置を用いた場合には、まったく個人差のない最適の加工が可能になる。

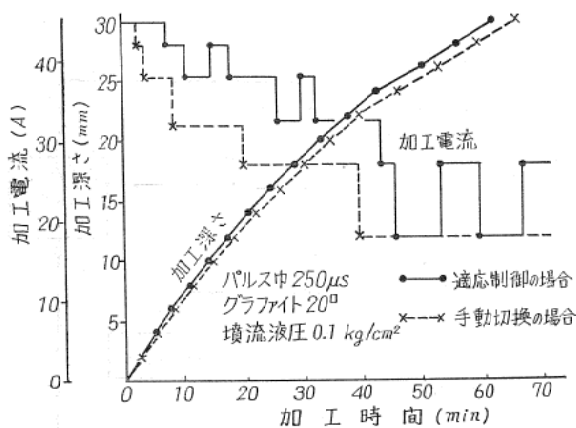


図17 適応制御を行なった場合の実験結果

### 7. 分割加工による放電加工<sup>9)</sup>

放電加工は、一つ一つの放電の累計で行なわれるものであるから、個々の放電のエネルギー

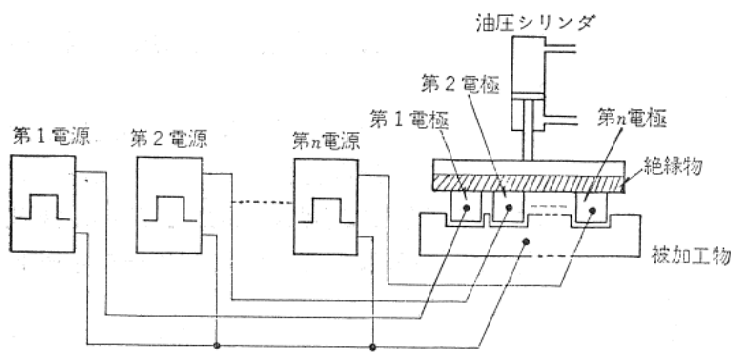


図18 電極分割方式の原理図

を増加させれば、加工速度は増加するが、仕上面あらさのほうも同時にあらくなるという性質があり、良好な仕上面あらさを得ようとする目的には必ずしも添わなくなる。したがって仕上面あらさを良い状態に保ったまま加工速度だけを増加させる方法が望ましく、この方法として分割電極方式がすでに当社で数年前に開発された。この方式は、超大形放電加工に応用され、加工時間が数分の一に短縮できるので非常に好成績を収めている。

この方式の原理図を図18に示す。一つの電極を二つ以上の電極数(図18ではn個)に絶縁分割し、さらにそのおのおのに互いに独立した電源を接続して加工する。分割された比較的小面積の電極で加工する時間とほぼ同一の時間で、全体の電極面積が加工されることになるから、加工時間としては分割しない場合の時間と比較して、ほぼ1/(分割数)に短縮され、かなり加工時間の短縮が期待できる。

つぎに図19は押しボタンのプラスチックモー

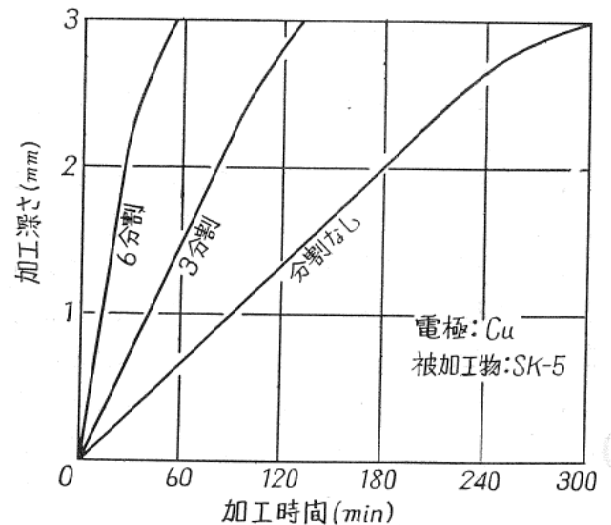


図19 分割数と加工速度の関係

ルド型(図20)の加工結果である。深さ(3mm加工するのに、分割しない場合には約300分かかっているのに対し、3分割のときには約130分、6分割のときには約55分に短縮されている。分割しないときの加工時間を1とすれば、3分割のときには約1/2.3、6分割時には約1/5.5となっており、



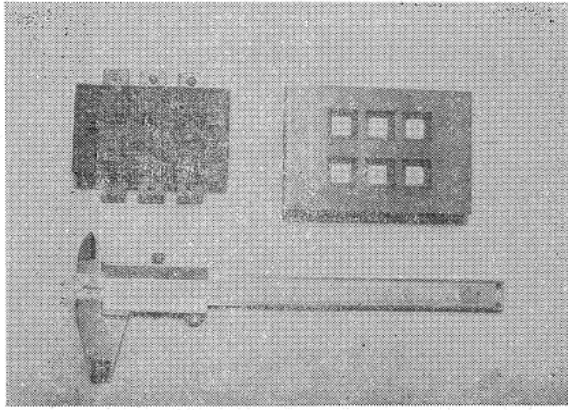


図20 押しボタンのプラスチックモールド型

分割しないときに比べれば相当の効果があることがわかる。なお、図4に示した銅電鍍電極も、4分割加工用に製作されたものである。

## 8. むすび

以上、最近の放電加工についてひとつおり述べた。半導体技術と制御技術を利用することにより、放電加工技術が著しく進歩したことが理

解して戴けたかと思う。これ以外に超大形放電加工機、数値制御放電加工等の技術があるが、もし将来機会があるようならば、それらも紹介してみたいと思っている。

## 参 考 文 献

- 1) 鳳, 倉藤: 放電加工, コロナ社
- 2) 青島, 小林: 超大形放電加工機 DM-5000 三菱電機技報 Vol. 45, No. 2 (1971)
- 3) 齊藤, 小林: パルス電源による放電加工特性 電気加工学会誌 Vol. 1, No. 1
- 4) 齊藤, 小林: 放電加工における適応制御の一手法 電気加工学会誌 Vol. 3, No. 6
- 5) 齊藤, 小林, 伊東: 第62回電気加工研究会資料
- 6) 小林他: 放電加工における最近の技術的進歩 Vol. 45, No. 10 (1971)
- 7) Zingerman and Kaplan; Soviet Physics Trans, Vol. 3 No. 2 (1958)
- 8) Zingerman and Kaplan; Soviet Physics Trans, Vol. 4 No. 7 (1950)
- 9) 齊藤, 小林, 電極分割方式による実験, 精機学会関西地方講演会資料 (昭43)