２００１年９月例会資料

形彫り放電加工機の設計の変遷　阿部　津和男（機械）

1．はじめに

わが国の産業の基盤を形作っているのは自動車、家電品、情報機器などの消費財の製造である。これらの製品の量産に大きく貢献しているものに、金型製作技術がある。

乗用車と金型の生産額の推移を図１に示す。両者の間には極めて強い相関関係があり、量産と金型製作とは切っても切れない関係にあることがわかる。金型なくして量産なしといっても過言ではない。

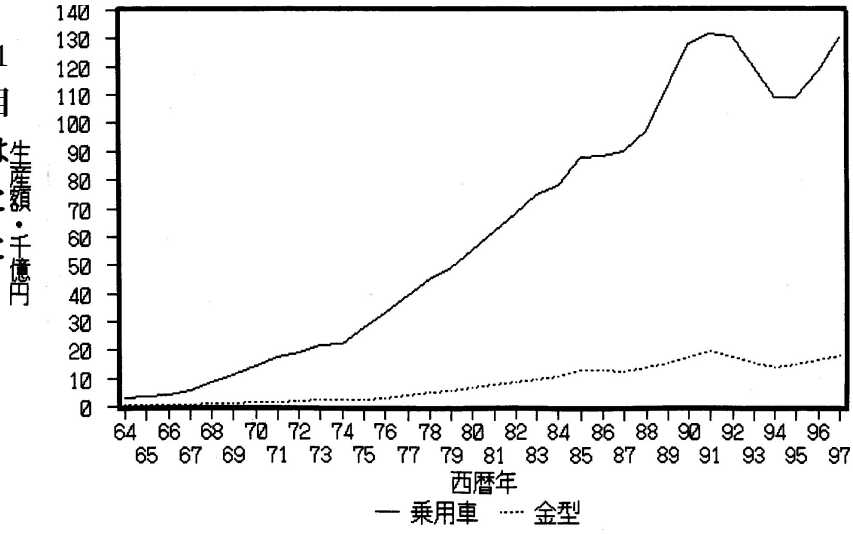

図１乗用車と金型の生産推移

本稿では、乗用車用金型の製作に大きく貢献している形彫り放電加工(以下放電加工と略)および形彫り放電加工機(以下放電加工機と略)について、設計の変遷と将来の展望について解説する。

1．１金型製作の難しさ

金型は、強度的にも、熱的にも、腐食的にも過酷な条件下で使用されるため、損耗が大きくその寿命は短い。

そのため頻繁に金型を補充しなければならないが、金型製作には、次のような難しさが存在している。

（1）　金型の材料（金型用鋼や超硬合金など）は、硬く靭性に富んでいるため、切（2）　削加工や研削加工などの機械加工がしにくい。

（3）　金型の宿命として、内形加工（プレス金型のダイなどの内面加工）やキャビティ加工（鍛造金型やプラスチック金型などの凹み加工）とならざるを得ない。そのため工具や砥石を内形部に挿入することが難しい。また挿入できても、工具を損（4）　傷しないように低負荷・低能率の加工とならざるを得ない。

（5）　オス・メス型のクリアランスの精度、上型・下型の合わせ面の精度など、重要な部分の精度が極めて高く（０～数μm)、精密な加工が要求される。

１．２放電加工の特徴

放電加工は、基本的には総形に製作した電極を用いて、金型材料にキャビティを彫り込むいわゆる反転加工である。現時点での特徴は次のようである。

（1） 加工プロセスが、一発一発の放電による微小部分の加熱・蒸発・溶融・除去の累積によるものであるため、加工物の材質が導電性のものであれば、その硬さや靭性に関係なく加工できる。

（2） 電極を作る必要があるが、この材料は銅やグラファイトなどの機械加工しやすい材料であり、しかも形状もキャビティとは逆の凸型となるため機械加工しやすい。
また、放電間隙は電極全面にわたって、ほぼ均一であるため、電極は自動プログラミング装置と NC 工作機械(マシニングセンタなど)を使用して、比較的容易に製作できる。しかし、基本的に電極の消耗は避けられないので、電極を補充する必要がある。

（3） 加工精度は良好である。後述するように揺動加工法などを採用すれば、加工面粗さ２～５μmRmax、加工精度も三次元形状で５～１０μmが可能である。

（4） どんなに広い面積を加工していても、放電はある時点では一発しか起こっていない。したがって、加工速度はある程度以上に大きくはできない。実用上の最大加工電流は４５０A、そのときの加工速度は４５００mm^3/min（３６g/min）程度である。

（5） 加工面には、急速加熱と急速冷却による大きな応力が生じるため、表面には必ず割れ(クラック)が生じている。また、残留応力も大きい。したがって、放電加工面を手磨きなどで、完全に除去しないと、金型として使用できない。

2．放電加工機

従来は、機械加工では歯が立たない硬い材料を加工したり、微細で複雑な形状を加工したりするときに、放電加工機を使用するのが一般的であった。
しかし、後述するように加工機自体の NC 化、それを使いこなすための加工プログラム（加工ソフト）や三次元形状を創成する加工データ処理装置の開発が行われて、三次元の自由曲面も放電で容易に加工できるようになった。
そのため、放電加工機を積極的に使用することで、これまで実用化できなかった複雑な形状の金型が製作できるようになった。

２．１放電加工の加工原理とポイント

放電加工の電極と加工物が相対する部分を図２に、放電加工機を図 3（文献[1]より転載）に示す。

放電加工は、加工液（石油を精製した絶縁性鉱油）中で、電極と加工物との間（極間）に、パルス状の電圧をかけて、適切な間隙（放電間隙）を保ちつつ、高い周波数で放電を行う。放電が起こった個所の表面温度は、加工物も電極も１万℃以上に達し、気化・蒸発する。その下の層は溶融しているが、放電が止んだ瞬間、気化していた加

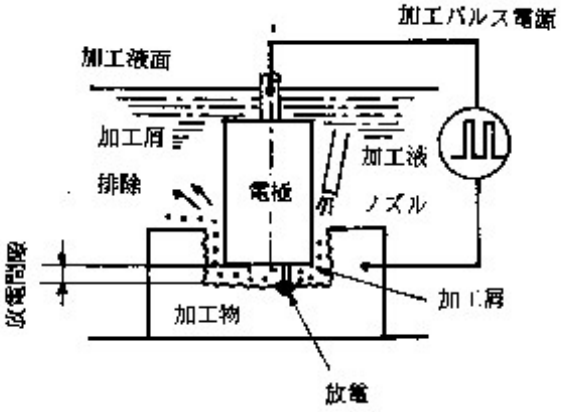

図２放電加工部分

工液のガスが萎むにしたがって、微粒子の加工屑となって加工液中に吸い出されて飛散する。

そして、清浄になった極間に再び電圧パルスが印加され、放電が行われる。このサイクルが繰り返されて加工が進行する。
上述したように、放電加工は加工物の微小部分を溶融・除去し、それらを連ねて加工を進める。極間には、加工屑が高い濃度で分布しており、これを効率よく外部へ除去してやれば、間隙は一定に保たれ加工は順調に進行する。
しかし、加工屑が十分に排除されず、極間に滞留するようになると、やがて放電は１点に集中し（これをアーク放電という）、加工面に大きな凹みを生成して、加工物を不良品にしてしまう。したがって、放電加工のポイントは放電による加工屑の生成と、加工液供給などによるその排除とのバランスを維持しながら加工を進めていくことにある。

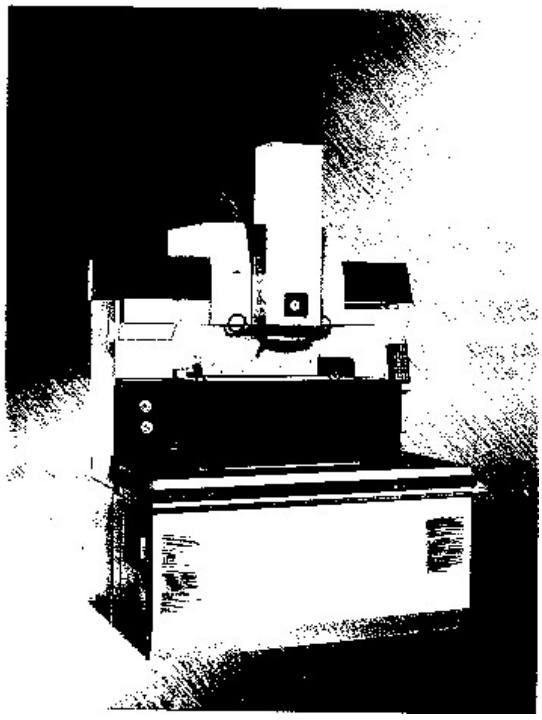

図３形彫り放電加工機

２．２加工電源回路の変遷
放電加工の加工特性（加工面粗さ、加工速度、電極消耗率）の改善は、その電源回路の進歩によるところが大きい。
放電加工機に使用される電源の回路には、１９５０年代初期から使用されているコンデンサ回路と、その欠点を改良して１９７０年代後半に登場したトランジスタ回路とがある。それぞれの回路と加工時の電圧・電流波形を図４，５に示す。

２．２．１コンデンサ回路
　この回路は、第二次大戦直後、放電加工を発明したロシアのラザレンコ夫妻が考案したものである。今日に至るまで、超硬合金の金型や微細な面粗さを要求される金型の加工、さらに小径穴の加工にも使用されている。

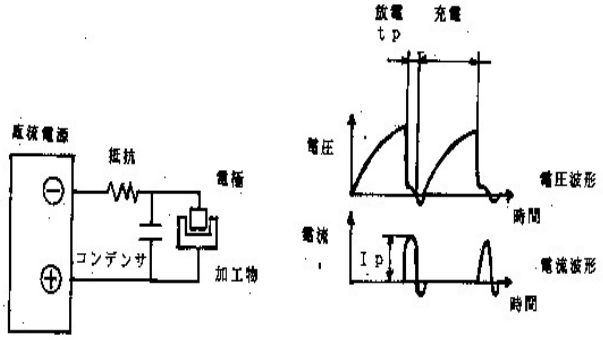

図４コンデンサ回路の電圧・電流波形

直流電源から供給された電気エネルギーは時間とともに増加し、コンデンサに蓄えられる(図４参照)。これを充電といい、これに要した時間を充電時間という。コンデンサの容量いっぱいに電気エネルギーが蓄えられると、最も極間が小さい個所で電流が流れめる。この状態を加工液の絶縁破壊、または加工液がイオン化したという。

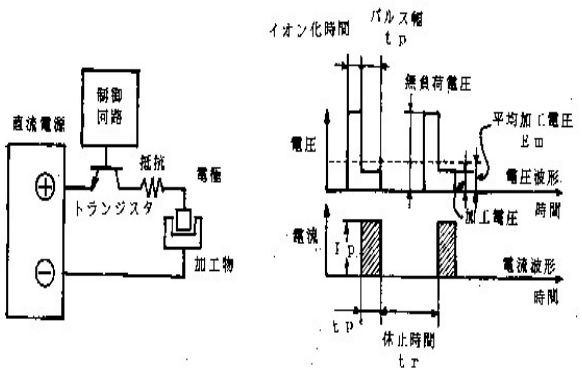

図５トランジスタ回路の電圧・電流波形

これが引き金になって、蓄えられた全エネルギーが一気に極間に流れる。これが放電であり、全エネルギーが放出されてしまうと放電は止む。そして絶縁が回復すると、またコンデンサの充電が始まり、このサイクルを繰り返す。

コンデンサ回路の特徴は、コンデンサの容量を大きくすることによって、容易に大きなピーク電流値（Ip）と短いパルス幅（tp）が得られることである。

しかし、極間の絶縁抵抗の変動（すなわち加工屑の濃度の変動）によって、十分に充電されないうちに放電してしまう現象が避けられず、Ip や tp を厳密に設定することが難しい。したがって、電極低消耗加工が不可能であり、またアーク放電を発生しやすい。

２．２．２トランジスタ回路

トランジスタ回路は、直流電源からの電流をスイッチングトランジスタ（tp を設定値にする役目をする）と抵抗（Ip を設定値にする役目を持つ）を通して極間に供給するものである（図５参照)。

トランジスタのオン・オフを繰り返して、強制的に放電をオン・オフさせるので、加工中の電圧・電流波形は矩形波となる。

一般的に放電加工では、Ip と tp の組み合わせよって、放電加工特性は大きく変化する。

トランジスタ回路を用いて、銅電極で鋼を加工する場合の加工特性を図６（文献[2]より転載）に示す。

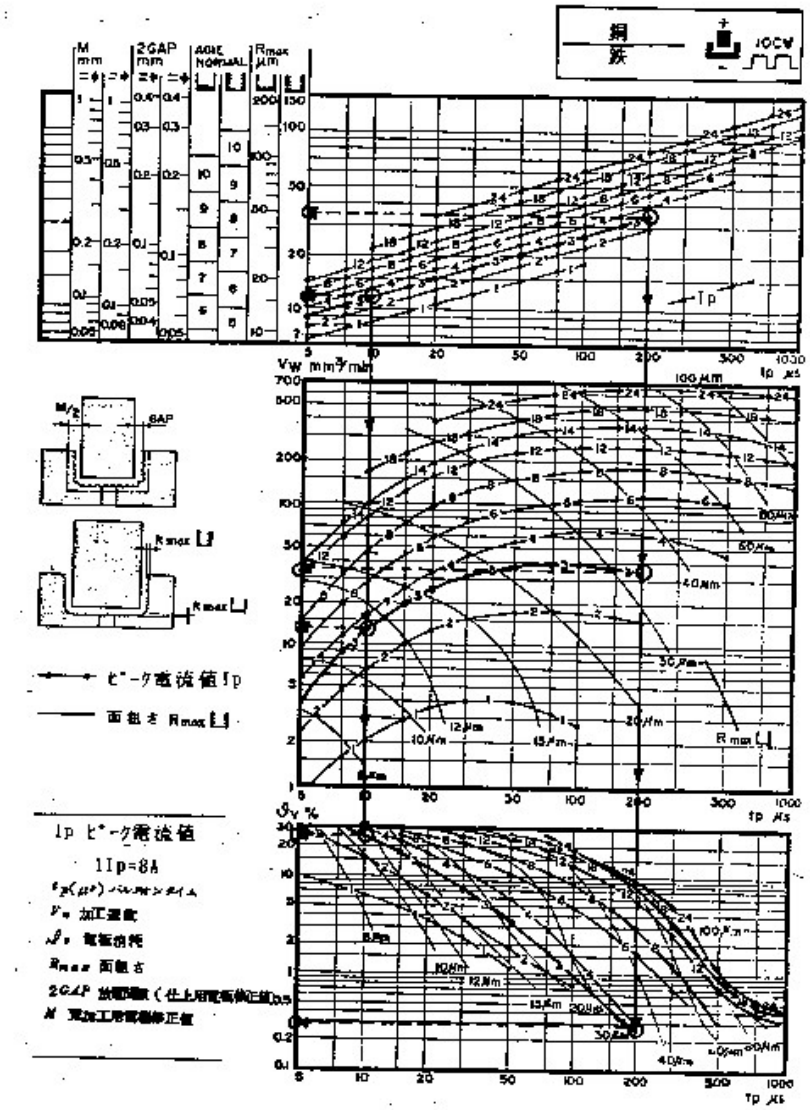

図６放電加工特性

例えば、図６の上図において、Ip が３目盛り（１Ip＝８A であるから３＊８＝２４A）で tp が２００μｓの組み合わせでは、加工面粗さ（側面）は３５μmRmax が得られることが判る。さらに中図から、その組合わせにおける加工速度は３５mm³/min であり、下図よりその時の電極消耗率（加工により除去した鋼の体積に対する消耗した銅電極の体積比）は 0.3%であることが判る。

しかし同様にして、同じ Ip が３目盛りであっても、tp が１０μｓの組み合わせでは、加工面粗さは１２μmRmax、加工速度は１４mm³/min、電極消耗率は２５%となる。

一発の放電のエネルギーを概略 Ip＊tp（すなわち図５の電流波形におけるハッチングした部分の面積）と考えると、Ip や tp が大となると加工面粗さが粗くなり、加工速度が大となることは理解される（ただし、tp が大になり過ぎると放電周波数が減少することの影響が出て、加工速度は低下する）。

しかし、電極消耗率に関しては、一義的に tp が大になるほど小となる。この電極の低消耗化現象は、電極を陽極として放電すると、放電中（すなわち tp 時間中）に対極である鋼から転移した鉄と、加工液の熱分解によるカーボンが高温（約５００℃）となった電極表面に付着（銅表面に固溶体を形成）して、消耗分を補償するからと考えられている。

このように、トランジスタ回路は tp を長くすることによって、電極の消耗率を非常に小さくすることができる。このため現在は、トランジスタ回路が放電加工機の電源の主流になっている。
次に極間の様子を概観する。まず、無負荷電圧（約１００V）が極間に印加されると、極間がイオン化されて電流が流れ始める。イオン化に要する時間は極間の状態、すなわち、加工屑の滞留の程度に左右される（加工屑の滞留が多いほどイオン化時間は短い）。
放電が発生して極間に大きな電流が流れ出すと、電圧は急速に低下するが、放電が持続している間、ほぼ一定値（２０～３０V）に維持される。そして、強制的に電流が遮断されて一発の放電が終了する。そして、設定された休止時間（tr）後再び無負荷電圧が印加され、このサイクルが繰り返される。
トランジスタ回路では、tp、tr、Ip を自由に設定できるため、放電のデュティファクタ（τ＝tp/(tp+tr)）も任意に設定でき、安定で効率の良い加工ができる。
例えば、加工屑の滞留が多く、アーク放電が発生しそうな状況では、tr を長くして（τを小さくして）その間に液流による加工屑の排除を行って、加工を安定に導くことができる。
加工屑が極間に滞留するようになると、イオン化時間が短くなる。そうなると図 5 に示す平均加工電圧 Em が加工計画時に設定していたサーボ基準値よりも低くなる。
この Em の低下を検出して、自動的にτを小さくすれば、アーク放電を防止して加工を安定に導くことができる。
加工屑の滞留が消失すればイオン化時間が長くなってくるので、Em が回復してくる。そこで、τを大きくすれば加工速度も回復することになる。これを自動で行うのが適応制御装置である。
適応制御装置にはτのほかに、加工液圧（加工液の圧力を上げて加工屑の排除を図る）の制御、電極のハンチングサイクル（電極を強制的に上下にハンチングさせて加工屑の排除を図る）の制御なども併用するのが普通である。
さらに進歩した最新の適応制御装置では、加工中に最適なサーボ基準値そのものを探索してしまう。このような適応制御を可能にし、放電加工の安定化に大きく貢献したのがトランジスタ回路である。
このように、種々の優れた特性をもつトランジスタ回路が、今日の放電加工機を完成の域に押し上げたといっても過言ではない。

２．３サーボ方式の変遷

放電加工におけるサーボとは、図 5 に示す平均電圧 Em を検出して、それをサーボ基準値と比較して高ければ極間が開きすぎと判断して電極を下げ、低ければ極間が狭いと判断して電極を上げる動作をする。すなわち、サーボは極間を一定値に維持して加工を安定に進めるという重要な役割を持つものである。電源回路が有する加工特性が実際の加工で発揮されるかどうかは、サーボの性能如何にかかっている。
放電加工機が、自動車部品の熱間鍛造金型のように、大型で精度をあまり必要としない金型の製作に使用されていた１９７０年代までは、電極懸垂能力が大きい油圧サーボ方式が用いられていた。しかし、プラスチック金型の製作のように、形状が複雑で、高精度・微細面加工が要求されるようになってくると、電気サーボ方式が主流となった。
これは、後者の方がサーボ追従性がよく、放電間隙の厳密な維持に優れているからである。サーボ機構での発熱も少ないので、機械の熱変位も少なく高精度な加工に向いている。
さらに、１９９８年以降、ギアトレーンを必要としないリニアモータを用いた電気サーボ方式

も出現している。リニアモータはバックラッシュがないため、加工特性の更なる向上に期待が集まっている。

２．４揺動加工の実用化

放電加工は、求めるキャビティの寸法よりも、放電間隙＋磨き代分だけ小さく製作した電極を用いて加工を行う。

面粗さが粗い加工条件は、放電間隙（図 6 上図の２GAP 値）が大きく、加工速度も大であるが、電極消耗率は小さい。また同じ Ip 値でも面粗さが細かい加工条件は、放電間隙が小さく、加工速度も小であるが、電極消耗率は大きい。したがって、通常は荒加工用の電極と、仕上げ加工用の電極とを製作して、それぞれ加工条件を変えて２工程でキャビティを加工する。一般に、荒加工の面粗さは仕上げ加工の３～５倍程度を選定するので、加工代が大きい場合には、電極の消耗や加工時間を考慮して、３工程で加工する場合も珍しくない。

この電極製作に要するコストを低減しようとして考案されたのが、NC 制御による揺動加工法である。これは、荒加工を終えた時点で、荒加工用電極をそのまま使用して、加工条件を仕上げ加工用のものに切り替える。そして、電極を Z 軸方向に送り込みながら、加工物を取り付けてあるテーブルを X―Y 平面上で、徐々に（荒加工の放電間隙＋仕上げ加工の放電間隙）分まで揺動幅を拡大して加工する方法である。この方法を図７（文献[1]より転載）に示す。この方法によって、使用する電極数を減らすことが可能になった。

この揺動加工法は、電極製作コストを低減したばかりでなく、加工時間の短縮（加工屑易になるため）と加工精度の向上（加工寸法を途中で測定し、確認しながら揺動幅を徐々に拡大できるため）にも大きな効果をもたらした。

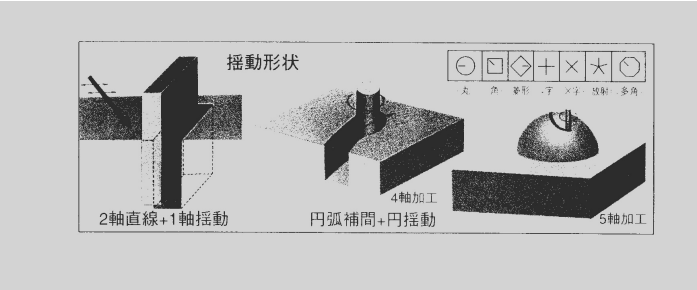

図７揺動加工法

２．５NC 放電加工と創成加工の発達

放電加工における NC 制御の導入は、当初 X、Y、Z、３軸の位置決めから行われた。その後、サーボ軸も Z 軸だけでなく、他の 2 軸および主軸の回転軸（C 軸）にも適用されるようになり、同時２～４軸制御による放電加工が可能になった。

放電加工の場合、極間間隙をサーボ制御しながら NC 指令に基づいて同時２～４軸の制御を行わなくてはならない。そのために、電極が前進してきた軌跡を記憶させておき、極間を大きくする場合は、そのメモリを逆にたどって電極を後退させる後退制御が開発された。

この NC 制御の進歩によって、前述した揺動加工法が発展したばかりでなく、総形電極を使用しないで、単純電極（例えば先端を半球形にした棒状電極を回転しながら使用するものなど）を使用して、創成加工（コンタリング加工）を行うことが可能になった。図８（文献 1）より転載）にその例を示す。すなわち、単純電極を多数 ATC（電極自動交換装置）に装着しておき、消耗した電極を交換しながら加工すれば、電極製作コストを大幅に改善できる。

２．６新しい放電加工法

最近の学会で、これからの放電加工法を改革するような興味ある研究が発表されている。２，３紹介する。

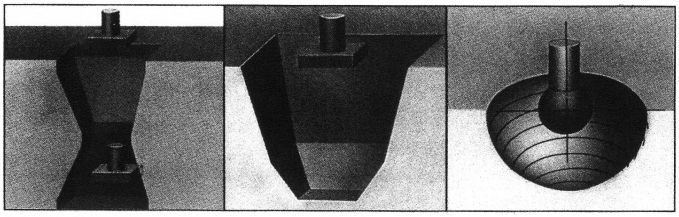

図８創成加工法

２．６．１非導電性材料の放電加工

従来から、非導電性材料は、電極との間で放電が発生しないから、放電加工できないものとされていた。

しかし、長岡技術科学大学の福沢氏ら[3)]は絶縁性セラミックスの上面に銅板を密着させて陽極とし、陰極とした銅棒を電極として、まず銅板を放電加工した。そしてそのまま加工を続けて、銅板の下のセラミックスをも加工することに成功している。図９（文献[3)]より転載）にその様子を示した。

この場合、まず通常の放電加工で上部の銅板が加工され、銅板の加工終了と同時に、セラミックス表面に、銅板との放電で生じた加工屑や加工液の分解生成物（カーボンなど）など導電性を有する皮膜が付着する。この付着物が上部の銅板と導通するため、付着物

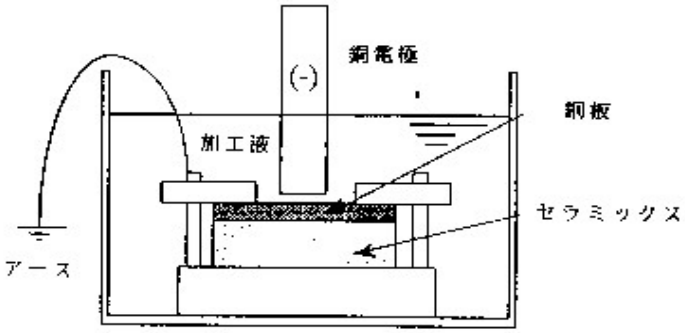

図９セラミックスの放電加工

を介してセラミックスが放電加工されると考えられている。

この加工は今なお研究途上であるが、同氏らは非導電性セラミックスにねじ穴や異形穴を加工するなど、実用的な放電加工サンプルの製作にも成功している。

今後の放電加工の適用範囲を大きく広げるものとして、これからの発展が期待されている。

２．６．２放電加工による付着加工

一般に放電加工といえば、今まで述べてきたように、除去加工（不要な部分を除去する加工）というのが常識であった。

しかし、名古屋工業大学の早川氏ら[4)]は、電極（直径 0.1mmの鋼、陽極）の材料を空気中で放電（Ip=2.5A, ｔｐ＝5μｓ）させることにより加工物（鋼の平板、陰極）の表面に移動・付着させ、直径 0.14mm、高さ 2mm以上の柱状とすることに成功している。

すなわち、放電により溶接や肉盛りのような付着加工（必要な部分を付着させる加工）が可能になることを実証した。

さらに、パルス条件と極性を適切に選び、空気中で放電させることで、同一電極により付着加工と除去加工の両方が行われることを実証している[5)]。

このことは、付着加工と除去加工を組合わせることによって、電極よりも幅の狭い溝や突起を

含む三次元形状の創成と造形を、同一の電極を用いて行える可能性を示唆している。
これにより、マイクロマシンの主要部品などの創成・造形加工が可能になれば、新たな精密加工法の誕生となる。更なる発展が期待される加工法である。

３．おわりに

放電加工は、従来の機械加工法にはない特徴を発揮して、金型の生産効率を飛躍的に向上させ、大量生産時代を支えてきた。
しかし、２１世紀を迎えて地球環境との関連（環境保全、省エネ、リサイクル、作業化環境など）で、金型製作法も見直されつつある。
放電加工機による金型製作では、キャビティ部分はほとんど放電加工屑と化す。そして産業廃棄物として処理されるが、銅が混入しているため、通常の切り屑のように鉄屑として溶解し、再生することはできない。
２１世紀の加工は、先に見たごとく、除去加工から付着加工へと転換することを視野に入れる必要がある。
コストを下げる加工法ではなく、地球環境の保全と修復に最も貢献する加工法を求めることが我々の責務となる。

参考文献

1） 日立 NC 精密放電加工機カタログ、1999 年 3 月作成（EE-056B）.
2） 日立 L 形電源加工技術データブック、P23.
3） 福沢、谷、岩根、毛利：放電加工機を用いた絶縁材料の加工、放電加工学会誌、Vol.60(1995)P11-21.
4） 早川、糸魚川、中村、松原：微細放電加工における電極消耗と付着加工（第１報）、1999 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集、P425
5） ORI、早川、糸魚川、中村、松原：微細放電加工における電極消耗と付着加工（第 2 報）、1999 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集、P426.

なお、本論文は日本設計工学会誌、設計工学 Vol.36(2001)P106-111 に掲載された。