

水中放電加工に関する研究

—静水圧力の影響について—

是枝 賢一

STUDY ON UNDERWATER ELECTROSPARK MACHINING — EFFECTS OF THE STATIC UNDERWATER PRESSURE —

Ken-ichi KOREYEDA

This paper describes the effect of static underwater pressure to the machining process when S45C material is worked by electrospark machining in an electro-conductive liquid, such as city or salt water.

By synchronously controlling the period of charge and discharge of an electric power source circuit, and the phase of the movement of a vibrating cathode, it was experimentally confirmed that the circuit can be effectively utilized for the continuous electrospark machining in the water of 5.1 Mpa pressure. As a result, the removal volume of material showed a tendency to decrease with the increase of underwater pressure.

1. 緒 言

従来より、水圧力が大きい水中あるいは海中における金属加工作業にガスの燃焼エネルギーの利用では水深に限界があり、1MPa 以上の水深になると加工作業は困難となる。その点、電気エネルギーを利用した放電加工においては電極間の放電さえ発生させれば水圧下で比較的容易に金属加工が可能となる。そこで筆者は位相制御型放電電力供給機構を考案試作して、5MPa の水圧下における放電穴あけ加工を S45C 材に試みたところ、満足すべき成果が得られたのでここに報告する。

2. 実験装置と方法

実験に用いた位相制御型放電回路の概要を図 1 に示す。位相制御回路 (TCA708)¹⁾ からの出力信号 A₁ を充電側サイリスタのゲートに、A₂ を放電用サイリスタのゲートにそれぞれ与えて、両回路を一定の時間間隔でオンオフしている。加工方式としては実験室で簡単に電極間調整が容易な電極振動方式を用いた。

いま振動する電極が加工物からはなれているときは放電回路のサイリスタはオフとなり、電極と加工物間

が水のような導電状態にあっても電流は流れない。一方、充電側サイリスタはオンとなってコンデンサに電荷がたくわえられる。コンデンサへの充電後、振動電

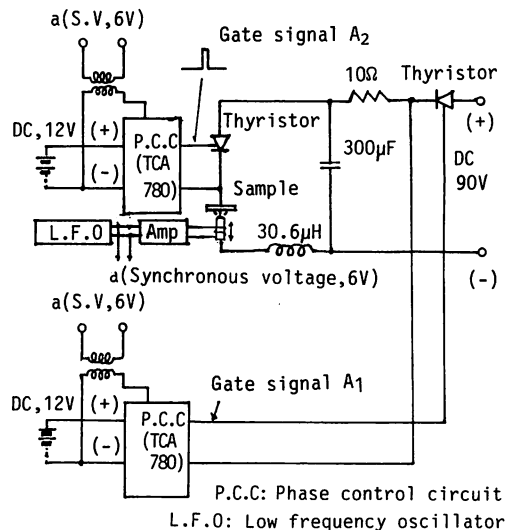


Fig. 1 Diagram of phase control IC element within working discharge circuit

極が加工物に最接近する直前、放電側サイリスタはオンとなって放電が始まることになる。この繰り返しによって放電加工されるが、電極間の電気抵抗は水中といえども放電時間を除いて電氣的に絶縁状態にあり、それだけ漏電や水の電解作用による損失が少なく、コンデンサにたくわえられた電気エネルギーが有効に使われることになる。

電極の振動数は商用周波数の約半分の32Hzと低くおさえてあるのは、充電と放電の時間間隔の余裕をとることによって連続放電時における放電率や放電電流の動向をつかみやすくするためである。さらに電極振動数の高い場合や無振幅いわゆる静止電極においても当然、位相制御型の放電電力供給機構は対応できる機構になっている。ただし加工中の消イオンや電極周辺の水の流れの影響を考慮すれば、電極の振動数と振幅の最適範囲は限られてくることになる。

図1の低周波発振器L・F・Oからの32Hzの信号は、電極の振動電源回路と、充電回路用位相制御回路および放電回路用位相制御回路の三回路に同時に与えられる。したがって上記三機構が常に一定の時間的關係によって動作することになる。

放電回路はあらかじめ電氣的振動条件に回路定数を設定してあるので、電極間電圧は放電終了後逆電圧になると同時にサイリスタはオフ状態となり、放電回路もオフとなる。したがって、正の半波長のみの放電電流が流れて一周期の充放電現象がおおることになる。

放電電流は測定用に試作した分流器(時定数1.6μs)

により、電極間電圧とともに波形として記録計(100KHz)に記録される。電極の振幅とゲート信号A₁、A₂も同時に記録されてその時間的關係はチェックされる。もしも位相がずれている場合は、位相制御回路内の可変低抗によって調整される。位相制御回路用の電源には、放電時のノイズがはいるのを避けるため、バッテリーを使用した。放電回路に30.6μHのインダクタンスを挿入した理由は既に報告²⁾した単発放電実験において放電痕形状が比較的大きな結果が得られたからである。

実験に使用した加工容器と機構を図2に示す。電極は3.6mmφの黄銅棒先端を半球面状に仕上げ、加工試料はS45C材を直径58mm、厚さ4mmの円板状に研削仕上げしたものを使用した。電極の振幅は振動電極とその固定台の間に取り付けた薄鋼板にはりつけたひずみゲージから検出し、0.2mm~0.4mmの範囲で振幅調整される。使用した加工容器は外径297mm、肉厚25mm、高さ306mmの鋼製円筒容器で、容器内は水道水あるいは塩水で充満される。容器内の水は加圧装置によって加圧されて静水圧力下における放電加工実験ができるようになっている。

本実験では水圧力が放電現象におよぼす影響について明らかにすることを目的としているので、水圧下における放電加工の成否がまず、かぎとなる。常に一定の振幅で振動している黄銅電極に対して被加工物は、電子制御レバジブルモータ(サーボモータ)をもつ微動可変速送り機構によって加工が進むにつれて電極

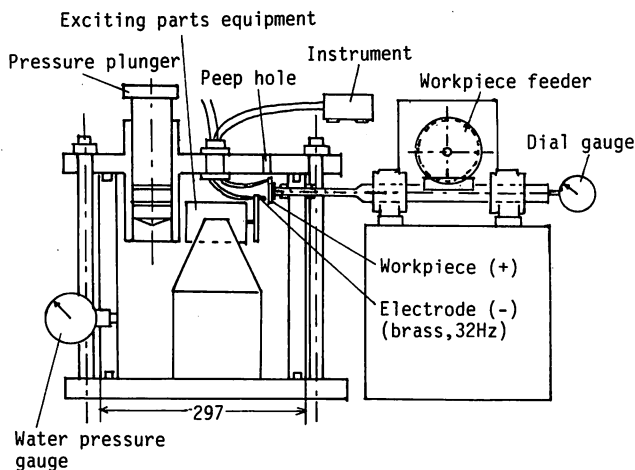


Fig. 2 Continuous discharge experimental apparatus

方向に送られてゆく。その時の送り速度はモニター用としてメモリスコープに畫かれる電流や電極間電圧の波形を観察しながら、安定した放電状態が維持できるように電極間間隙が調整される。通常、電極間が短絡すると電極間電圧は零となり、放電がとぎれると電流は零となるので容易に放電状態の良否は判断される。

加工時間は穴径によって多少異なるが、平均10分程度として加工条件による流路効果の差が少ないようにした。加工穴は穴径とその深さが測定され、加工されて減少した重さも測定される。電極の消耗分は天秤によって測定される。

3. 実験結果と考察

図3は電極の振動変位と充放電回路のサイリスタへのゲート信号 A_1 、 A_2 および放電回路のコンデンサ端子電圧の変化について時間的位相関係を示したものである。今、電極が加工物と最もはなれた位置（図3では電極の振動変位が最も上方の時点）から約1.5ms経過後、ゲート信号 A_1 が充電回路のサイリスタに働き、充電回路はオンとなってコンデンサに充電が始まる。充電電圧の変化は図3の最下の波形に示されるように信号 A_1 が作用するのと同時に充電が始まり、6ms後電源電圧まで充電される。充電完了と同時に充

電回路の電流は零となるので充電回路のサイリスタはオフとなる。その後コンデンサ電圧は電極が加工物に接近して放電が始まるまで約6ms、一定電圧を保つことになる。図3に示すごとく加工物に電極が接近したときに同期させてゲート信号 A_2 をサイリスタに与えると放電電流³⁾が流れてコンデンサ電圧は零となる。前述のごとく放電回路は電氣的振動条件に設定してあるので放電終了後は放電回路はオフとなる。以上で一サイクルの電極の動きと充放電の時間的位相関係を示したが、実用段階では電極振動数をさらにあげて加工速度を向上させることになる。筆者の経験によれば電極周辺のふんいきを良くしてやらないと電極の振動数だけをあげただけではその効果は少ないようである。

通常の水面下で電極間電圧80Vのとき、静止電極間間隙約25 μm 付近で放電が始まるが塩水（3.5%）では約50 μm で放電する。電極間電圧230Vになると、塩水では、水道水の場合の5倍近くの500 μm 付近で放電が始まることがわかった。これは電極間の直流抵抗の測定でも塩水は水の5、6分の1を示したことから裏付けられる。

静止電極と振動電極の相違による放電痕への影響をしらべるため、単發放電痕の場合についてしらべてみた。静止電極で電極間間隙を10～100 μm の範囲で放電させてみたところ、電極間間隙の長短による放電痕大きさにおよぼす影響について目立った傾向はみられなかったが、放電発生圧力のピーク値については、電極間間隙が長くなると大きくなる傾向を示したので、さらに詳細にしらべることにしている。

振動変位に同期させてゲート信号 A_2 を与える場合、いわゆる電極が加工物に接近したとき電極間電圧を与えるのに対して、振動変位と信号 A_2 との同期方式をとらない場合は結果的に放電回路はオン状態にある場合と同じ意味をもつ。このように電極間が常に導電状態にあるときの電極間抵抗は電極の形状寸法、面積、電極間距離によって容易に変化する。特に放電間近の電極間距離になると、電解作用のため極間は気泡混存の状態になる。電極間が常に導電状態にあるときはそれだけ極間の絶縁回復時間が長くなり、コンデンサへの再充電がおくれ、無駄な電流が流れていることになる。それゆえ、放電時間以外は放電回路はオフの状態にあることが電気エネルギーを有効に利用する点で望ましいことになる。さらに本実験のようなコンデンサの充電エネルギーを利用する回路方式では、充電中は放電

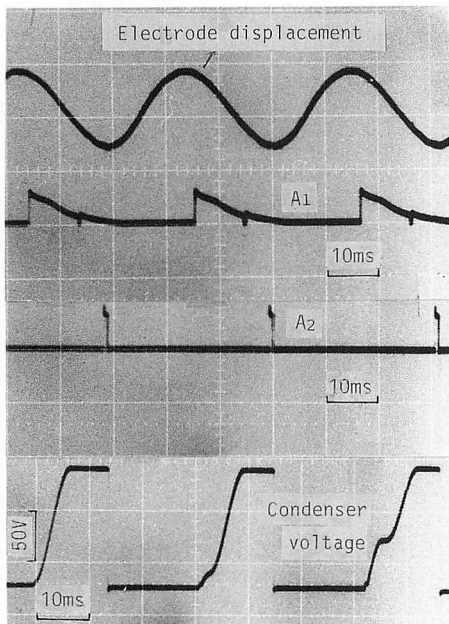


Fig. 3 Phase relation between IC out gate signal A_1 , A_2 and electrode displacement and condenser voltage respectively

回路はオフでなくてはならないことは明白である。矩形波エネルギーを静止電極に与える場合は前述のように電極の導線による最小のインダクタンスは免れないので矩形波の電流とはならないことになる。本実験のような放電加工においては効率よく、しかも加工速度は大きいほうが望ましい。したがって、比較的容易に大きな加工エネルギーを利用できる容量の大きなコンデンサ放電方式を用い、そして放電回路にインダクタンスを挿入することによって加工速度がさらにあがることを期待した。それゆえ、放電電流は正弦波に近い波形となる。一方、充放電回路にサイリスタを用いているので、コンデンサ方式において起こりがちな連続アーク放電への移行は全くみられなかった。

図4は電極振動数、すなわち放電ひん度 32H_2 のとき、実際なん回放電しているかを放電率で示したものである⁴⁾。放電率は理論的な単位時間あたりの放電回数（ここでは32回/秒）で実際に放電した回数を除して百分率であらわしたものである。40秒おきにサンプリングしたものの平均値を用いている。加工開始の初期は放電率が悪く、1分程度経過するとほぼ安定してくる。図4によれば水面下では約80%前後を示しており、水圧力が高くなると放電率はややさがり傾向がみられるが、塩水では電解作用をともなった放電電流

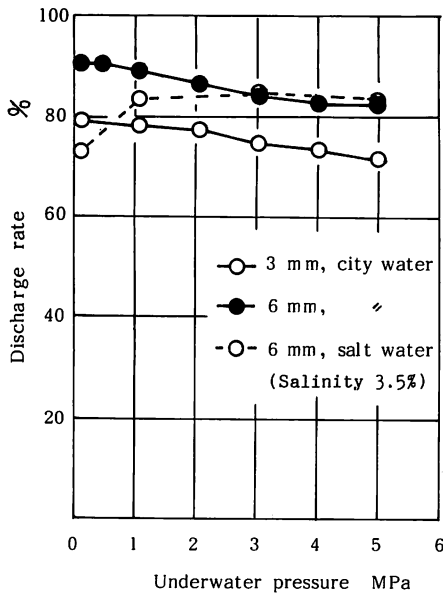


Fig. 4 Effect due to static underwater pressure on the discharge rate

が流れるので無放電との判別がやしにくくなる。

図5は水圧力による放電電流 I_a の影響を示したものである。一定水圧力下において加工が進むにつれて I_a は数%の減少傾向を示したが、水圧力が高くなった場合も同様に電流はやや減少することがわかった。

放電回路の全抵抗 0.2Ω 、全インダクタンス $37\mu\text{H}$ 、実効キヤパシタンス $285\mu\text{F}$ 、 E_g (実測値) 17V 、放電電圧 77V の条件で求めた計算値 I_{a2A} に比較すれば連続放電時には単放電に比較してかなり条件が悪くなり、全加工中の平均値では図5に示すごとく40A前後となった。

図6は水圧力が加工速度におよぼす影響について示したものである。単放電の場合、水圧力が 7.95MPa あたりまでは放電痕がいくらか大きくなる傾向²⁾を示したが、連続放電においては水圧力が高くなると加工速度は図に示すごとく、さがる結果となった。

塩水では水道水に比較していずれの水圧下でもかな低い値を示した。これはすでに指摘したごとく塩水の電気抵抗は水道水の5、6分の1程度におちるので放電中に電極間の側路を通電する量もそれだけふえたためと考えられる。加工中の電極間電圧を測定した結果によれば水道水の場合、約 20V が測定されたのに、塩水では 13V 前後を示した。これは塩水の場合、図5に示すごとく放電電流が水道水とさほど相違ないことからすれば電極間抵抗が低いことを裏付けている。図6で塩水のときの加工速度が低くなっているのは、これまでの実験結果と合わせ考えると、放電中、電極間側

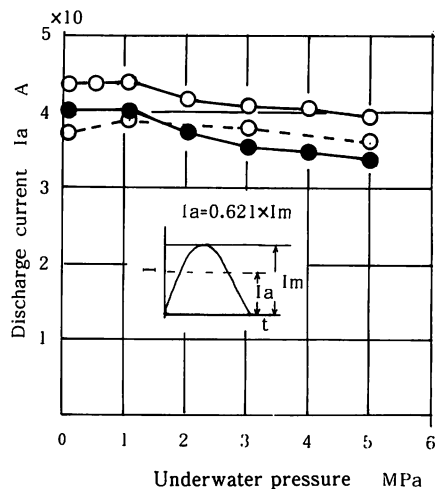


Fig. 5 Effect due to static underwater pressure on the discharge current

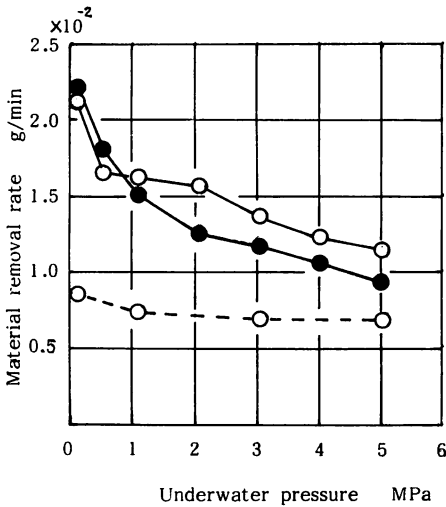


Fig. 6 Effect due to static underwater pressure on the material removal rate

路の通電による損失が水道水のときと比較してかなり大きいものと判断してよい。

図7は電極消耗比におよぼす水圧力の影響についてしらべたものである。水圧力が高くなると消耗比が大きくなるのがわかる。ただし塩水での消耗比は概して低く、水圧力による傾向はつかみがたかった。

これまでの実験結果から静水圧を5.1MPaまで高くしたとき、単発放電と連続放電の二つの場合についての現象の差異が次のように認められた。

水圧力5.1MPaで単発放電痕の体積は約4%ほど体積が増加するが、連続放電になると5.1MPaで放電率が約10%さがり、また放電電流が約12%さがり、さらに消耗比の結果から判断して加工材へのエネルギー配合比が28%ほど減少することになるので、結局、水面下に比較して5.1MPaの静水圧下における加工速度は40%程度減少する計算になる。図6によれば50%程度の減少割合を示しているが、およその減少傾向についての理由は説明できる。ただ塩水の場合は、水道水にくらべて静水圧力によるはっきりした傾向を放電率、放電電流、消耗比いずれについても示さず、したがって加工速度についてもその傾向がでなかったが、概して加工速度が水道水にくらべて低くなることは明らかである。

4. 結 言

水中における放電加工電源の一つとして、油中の場

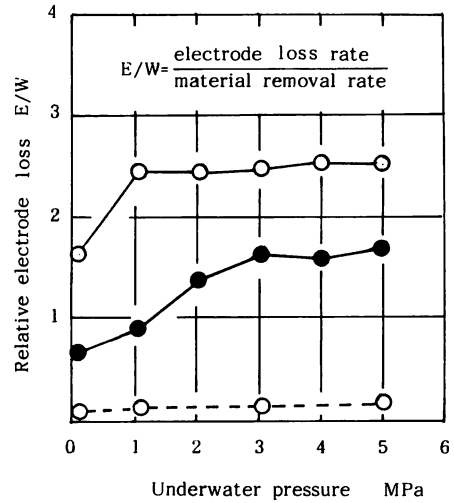


Fig. 7 Effect due to static underwater pressure on the relative electrode loss

合とは異なる水中専用の位相制御型加工電源回路を考案して、高水圧下におけるS45C炭素鋼の放電穴あけ加工を試みたところ、次のような結論を得た。

- 1) 5.1MPaの静水圧下においても断続的な連続放電によって鋼材の加工が十分可能である。
- 2) 静水圧力を高くすると放電率、放電電流は多少さがる傾向にあり、電極消耗比は大きくなる。加工速度は水圧力が高くなると減少する。
- 3) 塩水中では加工速度は水中に比較して低く、電極消耗比についても低くなる。

参 考 文 献

- 1) 富士電機製造株式会社：位相制御用 IC780, 7.
- 2) Ken-ichi KOREYEDA: Study on Underwater Electrosark Machining, — Single Discharge under Hydrostatic Pressure —, Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering. Vol.23 No2, June 1989, P111.
- 3) 是枝賢一, 中島繁：水中放電加工に関する研究, 一位相制御型放電電力供給機構について, 1987年度精密工学秋季大会学術講演会講演論文集, 476.
- 4) 是枝賢一：高水圧下における放電加工について, 1989年度精密工学秋季大会学術講演会講演論文集, 1101.