ギャップ長変動による 気中ワイヤ放電加工の極間現象の解明*

東京農工大学 古舘 周** 国枝正典**

Understanding Dry-WEDM Phenomena

Through Periodic Oscillation of Discharge Gap

Chika FURUDATE and Masanori KUNIEDA

Abstract

This paper describes the influence of oscillation of the gap length on gap phenomena in dry-WEDM. Dry-WEDM was found to have some problems such as a higher susceptibility to wire breakage due to the localization of discharge spots and a lower material removal rate than conventional WEDM, because of the frequent occurrence of short circuiting due to a narrower discharge gap length. Since the material removal rate depends on the normal discharge frequency, the gap length was altered periodically using a piezoelectric actuator to obtain the relation between the gap length and normal discharge frequency. It was found that 1) The fluctuation of total discharge frequency corresponding to the change in gap length is larger in the dry method than in the conventional method because of the narrower gap length in dry-WEDM. 2) Hysteresis was observed in the change in total discharge frequency, and the total discharge frequency was higher during the period of gap widening compared with the period of gap narrowing. 3) Since the short circuiting rate is high in dry-WEDM, the normal discharge frequency is one third that in conventional WEDM. 4) The ratio of the normal discharge frequency in dry-WEDM to that in conventional WEDM is higher than the ratio of the material removal rates. Hence, it is considered that the total volume of debris evacuated from the gap per one pulse discharge in the dry method is smaller than that in the conventional method.

Key words : dry-WEDM, gap, oscillation, material removal rate, normal discharge frequency

1. 緒言

放電加工は通常、液中で加工が行われ、放電時に加工液の気化・解離により気泡が生成される。その気泡は極間で膨張しようとするが、周囲の加工液の持つ慣性や粘性の影響により膨張が妨げられるため、気泡内圧力は極めて高くなる¹⁾。また、絶縁破壊前の放電遅れ時間中に無負荷電圧の印加により、工具電極と工作物との間に静電引力が作用する現象が知られており^{2) 3)}、放電パルスのエネルギーが小さい場合には、気泡発生に伴う衝撃

力と比較して無視できない。これらの加工反力の発生が、ワイヤ放電加工などの工具電極や工作物の剛性が低い場合に、加工精度や加工速度に悪影響を及ぼす。

一方、気中ワイヤ放電加工⁴⁾は、加工液を基本的には使用しない加工法である。したがって、従来の水中加工に比較して気中加工は加工反力が小さいことが明らかになっている⁵⁾。また、水のように誘電率が大きい加工液を使用しないので静電力も小さい。そのため、ワイヤ放電加工においてはワイヤの振動やたわみが低減し加工精度が向上することが明らかにされている。その他の気中ワ

* 電気加工技術 (Vol. 26, No. 83, 2002) にて発表

** 東京農工大学大学院(東京都小金井市中町 2-24-16)

ワイヤ放電加工の特長として表面粗さがよい、ギャップが狭いために高精度な加工が行える、水を使用しないために電解腐食を生じないことなどが挙げられる。しかし、その一方で加工液を使用しないために極間が十分に冷却されず放電の偏が生じ易く、ワイヤ電極の断線が生じ易い。さらに、ギャップが狭いために短絡が多発し加工速度が液中加工と比較して遅いといった問題点が存在する。加工速度は正常放電の発生頻度に比例する。そこで、正常放電頻度を液中と気中とで比較することにより、気中加工で加工速度が低下する原因を明らかにすることを試みる。その際、正常放電や短絡の発生頻度はギャップ長の変動の影響を大きく受ける。ギャップ長の変動を考慮するため、圧電アクチュエータを用いて工作物を加振し、ギャップ長を周期的に変化させたときの正常放電頻度の変動を液中加工と気中加工とで比較する。これによって気中加工特有のギャップ現象を把握し、気中ワイヤ放電加工の加工速度を向上させるための、ギャップ長制御方法の指針を得ることを目的とする。

2. 実験方法

周期的にギャップを変動させるために工作物を加振させ、各ギャップ値ごとの総放電頻度および短絡率を計測した。Fig.1に実験装置概要を示す。加工テーブル上に置かれた圧電アクチュエータを用いて工作物（SKD11, 3mmt）をワイヤの加工送り方向に加振し、液中と気中にてファーストカットを行った。工作物は圧電アクチュエータに固定される。ファンクションジェネレータで正弦波を発生させ、その正弦波を圧電素子ドライバに入力する。圧電素子ドライバで正弦波を増幅し、圧電素子へ入力することで圧電アクチュエータがx軸方向に振動変位する。圧電アクチュエータは共振点以下の200Hzで加振することとした。また、振動の全振幅は9.5μmに設定した。

液中加工は上下ノズルから比抵抗53kΩcmの脱イオン水を噴流させて行った。また、気中加工は大気中で行った。このときの加工条件をTable 1に示す。ファーストカットは、ワイヤと工作物端面が接触する位置をワイヤ放電加工機の接触感知

Fig. 1 Experimental setup

Table 1 Working conditions

Wire electrode	φ 0.20 brass
Workpiece	SKD11, 3mmt
Discharge current	15A
Servo reference voltage	40V
Discharge duration	1μs
Pulse interval time	9μs
Open circuit voltage	80V
Wire tension	8N
Wire winding speed	250mm/s

機能により求め、接触した位置からNC指令値だけ切込ませることによって行った。なお、接触感知は、圧電アクチュエータによる加振振幅の中立点で工作物が静止している状態で行った。

3. ギャップの計測

圧電アクチュエータの振動による変位は、ギャップの変動成分であり、ギャップの絶対値を示すものではない。そこで、気中と液中、それぞれの場合についてワイヤ電極送り方向におけるギャップの絶対値を測定した。

3. 1 気中加工の場合

気中加工は加工反力が小さいため、ワイヤの振動やたわみがほとんど生じていない⁴⁾。ワイヤの振動やたわみを考慮しなくても良い場合は、Fig.2のようにギャップgは、実際の切込み量（実効切込み量）dから、切込みのNC指令値（設定切込み量）を差し引いて求められる。実効切込み量は、高倍率測定光学顕微鏡を用いて計測した。この方法により求められた気中加工におけるギャップは

Fig. 2 Measurement of gap in dry-WEDM

Fig. 3 Measurement of gap in conventional

Fig. 4 Diagram of force balance

Fig. 5 Relationship between actual depth of cut and reciprocal of tension in conventional machining

3.6 μm である。ただし、Fig.2においてワイヤの初期位置は、圧電アクチュエータの振動振幅の中立点で工作物が静止しているときに接触感知によって設定した。また、加工は前述のように9.5 μm の全振幅で工作物を加振した状態で行った。従って、測定された3.6 μm というギャップは、工作物が振動の中心位置にあるときのギャップを示す。この結果は、振動の片振幅が4.75 μm であることを考慮すると、加工中にワイヤが工作物に周期的に接触していることを示す。

3. 2 液中加工の場合

液中加工では加工液として水を使用するため、気泡発生に伴う衝撃力や絶縁破壊前の無負荷電圧の印加による静電力の影響があり、加工反力は無視できない存在である。加工反力の影響でワイヤが振動し、かつたわむため、ギャップをFig.2のように求めることはできない。加工反力を考慮した場合、Fig.3のようにワイヤが δ だけたわむと考える。このとき、ギャップ g は以下のように表される。

$$g = d - \text{設定切込み量} + \delta \quad (1)$$

このワイヤのたわみ量 δ は加工反力とワイヤ張

力とのつり合いを考慮して以下のように計算式で表すことができる。Fig.4に力のつり合いを示す。 L をワイヤガイド間距離、 T をワイヤ張力、 F を加工反力、 z を下方のガイドから放電位置までの距離とする。ここでワイヤ電極のたわみがFig.4のように折れ線で近似されるのは、工作物の板厚(3mm)は L (90mm)に比較して充分小さいため、加工反力が作用する箇所を一点と考えることが可能であるためである。このとき、以下の式が成り立つ。

$$\tan \theta = \frac{\delta}{z} \quad (2)$$

$$\tan \phi = \frac{\delta}{L - z} \quad (3)$$

$$F \cos \frac{\phi - \theta}{2} = T \sin \theta + T \sin \phi \quad (4)$$

ここで、 δ は L に比較して充分に小さい値であることを考慮して、(2)～(4)式をワイヤのたわみ量 δ について解くと、(5)式が得られる。

$$\delta = \frac{F}{\frac{1}{z} + \frac{1}{L - z}} \cdot \frac{1}{T} \quad (5)$$

これよりワイヤのたわみ量 δ はワイヤ張力の逆

数 $1/T$ に比例することがわかる．この δ を (1) 式へ代入し，次式を得る．

$$d = \text{設定切込み量} + g - \frac{F}{\frac{1}{z} + \frac{1}{L-z}} \cdot \frac{1}{T} \quad (6)$$

そこで，張力 T の設定を変化させて加工を行い，実効切込み量 d とワイヤ張力の逆数 $1/T$ との関係求めた．この実験における設定切込み量は 0.5mm である．また，サーボ電圧を一定にして加工を行っているので，放電頻度は張力によらず一定であり，したがって F は定数である．よって，(6) 式において d と $1/T$ 以外は定数である．Fig.5 に液中加工における d と $1/T$ の関係を示す．ここで， T が無限大のとき，(5) 式より δ は 0 となる．すなわち (6) 式の第 3 項が 0 となる． T が無限大のときの d の値の外挿値は，Fig.5 のグラフにおける縦軸 d との切片であるから，切片の値から設定切込み量の値を差し引くことによりギャップが求められる．Fig.5 より液中加工におけるギャップは $15.5\mu\text{m}$ であることがわかる．このように測定されるギャップ g も，工作物が振動の中心にある時のギャップである．

4. 総放電頻度

放電周期の逆数を放電頻度とし，正常放電と短絡状態のパルスも含めた放電頻度を総放電頻度と呼ぶことにする．総放電頻度に次節で求める正常放電率（1 から短絡率を引いたもの）を掛けることにより正常放電頻度が求まる．ギャップ長に対する正常放電頻度の変化より，正常放電が最も起こりやすい最適なギャップ長を求めることが可能となる．

4. 1 加振時の極間電流と極間電圧の変動

Fig.6 (a) に気中加工における加振によるギャップ変動に伴う極間電圧と極間電流の変化を示す．CH1 および CH2 は圧電素子のドライバ出力電圧である．CH1 および CH2 に同じ信号を入力した理由は，複数の CH の信号の論理的組み合わせによってトリガを行ったためであり，後の 5. 1 節で詳述する．また，CH3 は極間電流，CH4 は極間電圧である．CH1 と CH2 の波形においてプラスの方向が，ワイヤが工作物に近づく方向，つまり，

Fig. 6 Discharge current and voltage with vibration

ギャップが狭くなる方向であり，電圧変動の peak to valley 値は実際の変位振動全振幅に換算して $9.5\mu\text{m}$ である．Fig.6 の極間電流と極間電圧の測定に際して，ギャップ変動に伴う変化を見やすくするため，ストレージスコープのアベレージング機能を用い，16 フレーム分のサンプリング（1 フレーム，10kword）を平均化して表示した．

Fig.6 (a) において CH1, 2 が最大値を示す近傍，つまりギャップが最小値を示す近傍で電流値が大きくなることから，ギャップが狭いと放電の頻度が増えることがわかる．そのとき，ギャップ電圧は 0V 近くにまで低下していることから，短絡状態であることがわかる．これは 3. 1 節で述べたように，加工中にワイヤが工作物に周期的に接触しているという推測を裏付ける結果である．また，ギャップが最大に広がったときは電流値がほぼ 0 となり，平均電圧が開放電圧 80V に近い値を示すことから，ほとんど放電が生じていないことがわかる．ただし，ここで注意深く観察すると，ギャップ変動の極大・極小を示すタイミングに対して，電流・電圧の変動の極大・極小を示すタイミングが少し遅れていることが分かる．このことについては後に詳述する．

Fig.6 (b) に液中加工における加振時のギャップ変動に伴う極間電圧と極間電流の変化を示す．CH1 はファンクションジェネレータ出力（すなわ

Fig. 7 Detailed waveform of gap voltage

ち圧電素子ドライバへの入力), CH2 はドライバ出力, CH3 は極間電流, CH4 は極間電圧である. Fig.6 (a) と同様に 16 フレームのサンプリングを平均化して表示している. 気中加工の場合に比べ, ギャップ変動に対する極間電圧と極間電流の変化が少ないことが分かる. これより, 液中加工は気中加工に比較してギャップ長が大きい⁴⁾ ので, 絶縁破壊強度がギャップ長変動に大きくは依存していないことがわかる.

4. 2 放電遅れ時間

Fig.6 (a), (b) に示す極間電圧の変動から, 各ギャップ値に対する放電の頻度を求めることができる. Fig.7 に放電電圧波形の模式図を示す. これより極間の平均電圧 $\langle u \rangle$ は, 以下のように求められる.

$$\langle u \rangle = \frac{80.6 \cdot \langle t_d \rangle + u_{normal} \cdot t_e}{\langle t_d \rangle + t_e + t_o} \quad (7)$$

ここで, $\langle t_d \rangle$ は平均放電遅れ時間, t_e は放電持続時間, t_o は放電休止時間, u_{normal} は正常放電における放電電圧である. 今回の加工条件において, 開放電圧 80.6V, u_{normal} は気中で 14.2V, 液中で 22.8V であった. これらの値は実測した放電波形から求めた. これより平均放電遅れ時間 $\langle t_d \rangle$ は次のように書くことができる.

$$\langle t_d \rangle = \frac{(u_{normal} - \langle u \rangle) \cdot t_e - \langle u \rangle \cdot t_o}{\langle u \rangle - 80.6} \quad (8)$$

上式の極間の平均電圧 $\langle u \rangle$ に Fig.6 (a), (b) の極間平均電圧の瞬時値を代入することにより, 各ギャップ値に対する平均放電遅れ時間 $\langle t_d \rangle$ を求めることができる.

Fig. 8 Change in total discharge frequency with gap length

次に, あるギャップ値に対する放電周期は, 平均放電遅れ時間 $\langle t_d \rangle$ 及び放電持続時間 t_e , 放電休止時間 t_o の和で求まる. この放電周期の逆数が放電の頻度である. しかし, ここで求められる「放電」の頻度には, 正常な放電だけではなく, 短絡状態のパルスの発生頻度も含まれている. そこで, ここで求めた放電の頻度を正常放電と短絡の両方の状態を含む意味で総放電頻度と呼ぶことにする. 結局, ギャップが狭いほど短絡や放電が生じやすくなり, 放電遅れ時間が短くなって総放電頻度が増加すると考えられる.

ここで, (7) 式の分子第 2 項目には短絡率が反映されておらず, 全ての放電が正常放電であるとして近似し, 計算している. 正確に計算するのであれば u_{normal} に全パルス数に対する正常放電の割合を乗さなければならない. 5 節で後述する方法によって正常放電率を求め, u_{normal} に正常放電率を乗して計算した場合, 考慮しない場合との総放電頻度の違いは 30% 以内であった. そして, 正常放電率を考慮した場合としない場合での平均放電遅れ時間 $\langle t_d \rangle$ 及び総放電頻度のギャップ長に対する変動の傾向に違いはなく, 後述する考察に影響を与えないことを確認した. そこで, 以降は (8) 式を用いることとする.

4. 3 総放電頻度の計測結果

実験より求めたギャップと総放電頻度の関係を Fig.8 に示す. Fig.8 に示すギャップ値は, 圧電アクチュエータの振動によるギャップの変動成分を, 3 節で求めた振動の中立点でのギャップの絶対値

Fig. 9 Relationship between ignition delay time and gap length

に加算することで求めた加振時のギャップの絶対値である。サーボ電圧は気中も液中も同じ設定で加工実験を行っていることから、短絡を含む総放電頻度の平均は図中に破線で示すように気中で 30kHz、液中で 34kHz とほぼ同じ値になっていることがわかる。この総放電頻度の平均値は、あるギャップ長の近傍に滞在する時間が正弦波ではギャップ毎に異なることを考慮し、各ギャップ長での総放電頻度を滞在時間で重み付けした上で、1 周期の時間で平均化することで求めた。また、同じサーボ電圧下で気中は液中よりもギャップが極端に狭いことがわかる。さらに、気中ではギャップが 0 以下、つまりワイヤと工作物が接触していると考えられる区間がわずかではあるが存在している。

さらに、ワイヤが工作物に近づくときと遠ざかるときでは同じギャップでも遠ざかるときの方が放電頻度は高く、近づくときと遠ざかるときとで放電現象が非対称であり、ヒステリシスループを描くことが分かる。これは、近づくときは放電の喰いつきが悪く、いったん喰いついたら極間の温度上昇や加工屑濃度が高くなることなどで絶縁破壊強度が低下し放電が生じやすくなることを意味する。さらに、ギャップ変動に対する総放電頻度の変動が気中は大きく、液中は小さいことが分かった。

なお、圧電アクチュエータは圧電素子への入力電圧と振動変位の関係が非線形であり、ヒステリシスが存在する。今回用いた圧電アクチュエータは入力電圧に対して 3% 遅延の位相ずれで動作していた。そのため、位相ずれを補正して Fig.8 を

描いている。

4. 4 放電遅れ時間のギャップ長依存性

Fig.9 にギャップと放電遅れ時間との関係を示す。気中加工ではギャップが 2μm 以下である場合、放電遅れ時間が 0 に近く、短絡状態が多いことがわかる。逆に、ギャップが 2μm 以上になると、放電遅れ時間は急激に増大している。これは正常放電を持続させるにはギャップを数 μm に制御しなければならないことを意味しており、現在の液中加工用に作られた放電加工機のギャップ制御では安定して加工が行えないことが容易に予想できる。これが気中で加工速度が低下する原因の一つとなっていることがわかる。液中加工ではギャップが広がるにつれて、放電遅れ時間も増加しているが、気中加工と比較するとギャップが広いにもかかわらず放電遅れ時間が短く、しかも変動が少ない。また、どのギャップにおいても放電遅れ時間が 0 とはならず、短絡の発生頻度が少なく安定して加工が行えていることがわかる。

なお、Fig.9 に示すギャップと放電遅れ時間との関係は、気中加工に限らず従来の液中加工についても実測されたのは初めてである。岩田ら⁶⁾や Han ら⁷⁾は単発放電においてその関係を求めているが、単発放電における関係は実際の連続放電の場合とは全く異なると考えられる。Han ら⁷⁾はシミュレーションと実験結果との照合により、連続放電における両者の関係を同定している。しかし、本方法を用いれば直接その関係が求まり、ワイヤ放電加工のシミュレーションの実行に際して重要なデータベースが獲得できる。

Fig. 10 Method of triggering oscilloscope at specific gap length

5. 短絡率, 短絡頻度

5. 1 測定方法

極間電圧の変動から, 短絡率の瞬時値が計算できる. ある特定のギャップでの瞬間において, しかも近づくときと遠ざかるときとを区別して, その瞬間の短絡率を求めることを試みた. そのために, ストレージスコープのトリガのかけ方を工夫し, 注目するある特定のギャップにおける放電波形のみを選択的に観察した. トリガ設定方法の説明のため, Fig.10 (a) に加振によるギャップ変動に伴う極間電流の変化を示す. CH1 および CH2 は圧電素子のドライバ出力, CH3 は圧電素子のドライバ出力に同期した方形波 (CH1 および CH2 の+ (プラス) スロープで High レベル, - (マイナス) スロープで Low レベルを出力), CH4 は放電電流である. CH1, CH2, CH3 および CH4 各々にトリガ条件を設定し, それぞれに設定したトリガ条件が全て成立したとき, トリガがかかるようにした. ここで例として, Fig.10 (b) の模式図に示すような圧電素子の変位が $8.4\mu\text{m}$ 付近であり, ギャップの減少時 (接近時) に

おける放電波形のみを検出するトリガを考える. 圧電素子変位 $8.4\mu\text{m}$ は圧電素子のドライバ出力に換算して $110\sim 120\text{V}$ である. そこでトリガ条件を CH1 は lower than 120V (120V 以下の領域でトリガ), CH2 は higher than 110V (110V 以上の領域でトリガ) とする. また, ギャップの減少時に限定するため, CH3 のトリガ条件は higher than 0.5V (0.5V 以上の領域でトリガ) とする. その上で CH4 は電流波形の立ち上がり (しきい値 2.5A) のエッジトリガとする.

以上のトリガ方法により, ワイヤが工作物に近づくときかあるいは遠ざかるときのどちらかで, しかも, ある特定のギャップ値の下での放電電流・電圧波形のみを抽出できる. さらにストレージスコープのアベレージング機能を使用し, 約 $25,600$ 回の放電電圧波形の平均を求め, Fig.11 に示すような放電電流が流れている区間での平均電圧を測定する. この平均値は, 正常放電時の電圧値と短絡時の電圧値を, 正常放電率 $(100 - x)\%$ と短絡率 $x\%$ とで重み付け平均した値であると考えることができる. それゆえ, この放電中の極間電圧の平均値 $\langle u_e \rangle$ は, 正常放電時の極間電圧を u_{normal} , 短絡時の極間電圧を u_{short} , 短絡率を x とすると以下のように表される.

$$\langle u_e \rangle = \frac{x \cdot u_{short} + (100 - x) \cdot u_{normal}}{100} \quad (9)$$

これを変形して短絡率は以下の式で求めることができる.

Fig. 11 Measuring section of discharge waveforms

Fig. 12 Percentage of short circuit

Fig. 14 Normal discharge frequency

Fig. 13 Short circuit frequency

Fig. 15 Material removal rate

$$x = 100 \cdot \frac{u_{normal} - \langle u_e \rangle}{u_{normal} - u_{short}} \quad (10)$$

ここで、 u_{normal} 、 u_{short} については4.2節で求めた極間電圧を用いる。すなわち、今回の実験条件において、正常放電時の極間電圧 u_{normal} は気中で14.2V、液中で22.8V、短絡時の極間電圧 u_{short} は共に1.0Vであった。短絡頻度は上記で求めた短絡率に、4.3節で求めた総放電頻度を乗することで求まる。

5.2 短絡率

Fig.12 に短絡率、Fig.13 に短絡頻度を示す。これより、短絡率、短絡頻度は気中と液中でのデータ間に不整合はなく、ギャップ値のみで整理できることがわかる。特に、気中と液中のギャップ値の遷移領域である9μm付近で、短絡頻度が急激に低下していることがわかる。気中と液中でギャップが異なるので、同じギャップでの短絡率、短絡頻度は比較できないが、両方のデータがギャップの関数として連続的につながるので、気中と液中での短絡の発生現象には本質的な違いはないと考えられる。また、短絡率、短絡頻度についても総

放電頻度と同様に、ヒステリシスループが存在している。気中ではギャップが0以下、つまりワイヤと工作物が接触している状態になっても、短絡率は必ずしも100%に達していないことがわかる。これは気中加工において、工作物表面に大気中の酸素との酸化反応により部分的に酸化物が生成され、

その酸化皮膜にワイヤが接触しながら別の箇所でも放電が生じているためであると考えられる。

6. 正常放電頻度

正常放電頻度は $(1 - \text{短絡率}/100) \times \text{総放電頻度}$ によって求まる。Fig.14 に正常放電頻度を示す。気中ではギャップが狭い区間において液中より総放電頻度が高いにも関わらず、ギャップが狭いので短絡率が非常に高く、結局、正常放電頻度は液中の約1/3にまで低下している。そして、正常放電頻度をギャップの関数としてみた場合、気中と液中では大きなデータの不連続性が存在する。この理由として、気中の絶縁破壊強度が液中よりもかなり大きいことが考えられる。また、正常放電頻度についてもヒステリシスループが存在する。しかし、ギャップが0となる箇所では、ヒステリシスループが崩れている。これはワイヤが工作物に近づく状態から離れる状態に遷移する際、ギャップ長の時間変化は正弦波状の振動波形の極小値付近なので、時間軸で見ると2つの点の間にはかなりの時間の経過があると言える。したがって、総放電頻度及び短絡率が急激に変化することによる測定誤差と考えられる。

7. 加工速度

体積加工速度の比較結果を Fig.15 に示す。液中と気中の正常放電頻度の大小を反映して、気中加工の加工速度は液中加工より小さいことがわかる。しかし、加工速度の比 (1:10) は正常放電頻度 (1:3) の比と異なる。この理由として、吉田ら⁸⁾ が明らかにしているように、特にパルス幅が短い場合には、放電一回あたりの除去量が気中の方が液中より少ないことが考えられる。また、気中加工では加工屑が再付着している可能性が考えられる。吉田ら⁸⁾ によると、液中加工の場合、加工屑は加工液により冷却され球状となり加工液中に存在するのにに対し、気中加工では生じた加工屑の大半が工作物に再付着してしまうことが観察されている。

これらの原因のために、気中の正常放電頻度が液中の約 1/3 であるのに対し、実際の加工速度は約 1/10 に低下してしまうものと考えられる。従って、何らかの方法により気中加工の短絡率を液中加工の短絡率まで下げることが可能になれば、まずは加工速度を液中の 3/10 に向上できる可能性がある。さらに、再付着を防止した上で、アシストガスとして酸素ガスを供給することによって放電 1 回あたりの除去量を増加させれば、気中の加工速度を液中よりも大きくすることも可能であると考えられる。

8. まとめ

気中ワイヤ放電加工のギャップにおける放電現象の解明を目的として、圧電アクチュエータを用いてギャップ長を周期的に変動させた。ギャップ長の変動に伴う放電現象の変化より、以下のことが明らかになった。

- (1) 気中のギャップは液中より狭く、ギャップ変動に対する総放電頻度の変動が液中と比べて大きい。
- (2) 総放電頻度、短絡率、短絡頻度、正常放電頻度において、ギャップの減少時と増加時でヒステリシスが存在する。
- (3) 放電加工のシミュレーションにおいて重要なデータベースである放電遅れ時間とギャップ長との関係が得られることが分かった。
- (4) 気中加工では同じギャップ長の変動幅に対して、放電遅れ時間の変動の幅が液中加工より大きい。
- (5) 短絡の発生現象には、気中と液中とで本質的な違いはないと考えられる。
- (6) 気中加工は短絡率が高いため正常放電頻度が液中の 1/3 である。従って、極間隙の制御により短絡率を減少させれば加工速度が現状の 3 倍に向上できる可能性がある。
- (7) 液中と気中の正常放電頻度の比 (1:3) が加工速度の比 (1:10) より小さい理由として、気中での放電一回あたりの除去量が液中より小さいこと、気中では加工屑の再付着が発生していることなどが考えられる。

参考文献

- 1) P. K. Eckman and E. M. Williams : Plasma Dynamics in an Arc Formed by Low-Voltage Sparkover of a Liquid Dielectric, Appl. Sci. Res. (1960) Section B, 8, pp.299-320.
- 2) Willem L. Dekeyser and R. Snoeys : Geometrical Accuracy of Wire-EDM, Proc. ISEM 9 (1989) pp.226-232.
- 3) 小原治樹, 石津稔之, 河合保, 大住剛, 林卓郎 : ワイヤ放電加工の加工シミュレーション (第 3 報), 電氣加工学会誌, Vol.34, No.75 (2000) pp.30-37.
- 4) 古館周, 国枝正典 : 気中ワイヤ放電加工に関する基礎的研究, 精密工学会誌, Vol.67, No.7 (2001) pp.1180-1184.
- 5) 土肥麻里子, 小松利直, 国枝正典 : ホブキンソン棒法を用いた放電加工反力の測定, 精密工学会誌, Vol.68, No.6 (2002) pp.822-826.
- 6) 岩田康, 小原治樹, 大住剛, 松田裕二 : ワイヤ放電加工の加工シミュレーション (第 1 報 解析方法と解析例), 電氣加工学会誌, Vol.29, No. 62 (1995) pp.40-48.
- 7) F. Han, M. Kunieda, T. Sendai and Y. Imai : High Precision Simulation of WEDM Using Parametric Programming, Annals of the CIRP, Vol.51, No.1 (2002) pp.165-168.
- 8) 吉田政弘, 国枝正典 : 単發放電における加工屑の飛散の観察, 電氣加工学会誌, Vol.30, No.64 (1996) pp.27-36.

(2004 年 3 月 8 日受付)