強制放電分散型電解放電加工の加工特性(第2報)

—加工電流の観察—

古谷克司* 新谷啓行* 村瀬靖男* 荒川修一*

Performance of Electrochemical Discharge Machining
by Forced Discharge Dispersion (2nd Report)
Monitoring of Machining Current

Katsushi FURUTANI, Hiroyuki SHINTANI, Yasuo MURASE and Shuichi ARAKAWA

Abstract

This paper deals with the monitoring of the current during electrochemical discharge machining (ECDM) with multiple electrodes. A gravity-feed-type unit with six electrodes for ECDM was fabricated. The polarity of the electrodes was set to be negative. While some holes were machined by ECDM on glass, the discharge current was forced to disperse by switching the electrodes to decrease the number of cracks (divided power). The current in the divided power was observed during the machining process and compared with those in the cases of multiple electrodes connected electrically in parallel (equipotential) and of a single electrode. Bubbles were generated by current pulses with a duration of several milliseconds when the voltage was applied. However, they disappeared during pulse intervals. A current pulse with a duration of two to five milliseconds preceded a series of sharp pulses below 200 μ s in the single-electrode and divided-power methods. Long and low-peak-current pulses frequently occurred, and the current pulses were concentrated at the electrodes at the two ends with equipotential power.

Key words : multiple electrode, bubble, divided power, equi-potential power, discharge, electrolysis

1. 結 論

ガラス、圧電セラミックスなどの絶縁性ぜい性材料に対して、前後処理が少なく、柔軟性が高く、小規模で安価な装置で行える微細加工法が求められている。電解放電加工はその要求を満たす加工法の一つである¹⁾²⁾。

電解放電加工では、水酸化ナトリウム水溶液などの電解液を加工液とする。陰極である工具電極先端を絶縁性の工作物に軽く押し付けた状態で印加電圧を上昇させると、工具電極表面全体が気泡

に覆われ、工具電極と電解液間の電位差により放電が発生する¹⁾。この放電の熱もしくは泡の境界を電流が流れるときのジュール熱³⁾によって、工作物と電解液との化学反応が促進されることにより除去される。ナトリウムイオン(Na^+)を含む電解液を用いてガラスの電解放電加工時には式(1)の化学反応により、 Na^+ がO-Si-Oの結合を切り、水溶性のケイ酸ナトリウムが生成される⁴⁾。

そしてケイ酸ナトリウムが電解液中に溶解することで加工が進行する。絶縁物は熱伝導率が低いいため、熱膨張により加工部にクラックが発生するこ

* 豊田工業大学 (名古屋市天白区久方 2-12-1)

Fig. 1 Machining unit⁹⁾

とが多い。

著者らは旋盤型の電解放電加工機を試作し、放電点を移動させることで冷却時間を設け、クラックが少ない加工を実現した⁵⁾。また、ガラスの加工中の主分力を測定し、熱による昇華ではなく、生成されたケイ酸ナトリウムが加工液に溶解することが除去の主要因であることを明らかにした⁶⁾。

一方、6本の電極を独立して送ることで3次元形状を加工するドットマトリクス方式放電加工法では、各電極に独立に給電することで放電を強制的に分散させ、クラックが少ない加工を実現した^{7,8)}。これより、強制的な放電分散は、電解放電加工においてもクラックの低減に効果があることが期待できる。この考えに基づき、前報ではガラス板に対する電解放電加工において、6本の電極への給電を切り替えることで強制的に放電を分散した場合(分散給電)と、電氣的に並列に接続した場合(並列給電)および単電極の場合の加工特性について比較した⁹⁾。その結果、分散給電は並列給電よりも形状精度が高く、クラックが発生しにくいことが明らかになった。また、発生する泡が形状に影響を与えることも明らかになった。除去加工機構や泡の発生には加工電流が大きく影響を与え

(a) Single electrode (b) Divided power (c) Equi-potential power

Fig. 2 Discharge circuit⁹⁾

ているはずであるが、給電方法による違いは明らかになっていない。電解放電加工においても、加工電流の観察は加工現象の解析に有効である¹⁰⁾。

そこで本論文では、電解放電加工で複数の電極を用いて放電を強制的に分散させた場合の加工電流について述べる。

2. 実験装置

実験装置の構造を Fig. 1 に示す⁹⁾。ピンバイスで保持した6本のタングステン電極を上側ホルダでは放射状に配置し、下側ガイドでは0.8[mm]ピッチで一列に並べた。ガイドではこれらをフッ素樹脂チューブ(外径0.62[mm], 内径0.32[mm])で絶縁し、電極が加工液に露出する長さを4[mm]とした。電極は、ピンバイスの質量により被加工物であるガラス板に押し付けられる。図中右から1から6の順で番号を付けた。

複数の電極に順次給電するため、パルス電源となる。パルス電源では、休止時間に被加工物が加工液により冷却されるため、熱影響層を低減するのに効果があると言われている⁹⁾。放電回路は Fig. 2 (a)の単電極、同図(b)の分散給電、同図(c)の並列給電の3通りとした⁹⁾。分散給電では、電極への給電を印加パルスと同期させて1パルスごとに切り替えた。NチャネルMOSFET(オン抵抗1[Ω])をフォトカップラを介してTTL ICで構成したリングカウンタで駆動して回路を切り替えた。そのため、パルスは常に電極1から6の順で印加され

Table 1 Machining conditions⁹⁾

Gap voltage	70 [V]
Pulse duration and interval	80 [ms], 20 [ms]
Tool electrode	φ0.3 [mm] tungsten (-)
Anode	Graphite
Resistor for current measurement	1 [Ω]
Electrolyte	10[wt%] NaCl
Mass of pin vise	19 [g]
Workpiece	t1.3 [mm] Soda lime glass
Machining time	0.5 - 40 [min]

る. 電極間の放電により電流が逆流することを防ぐために各電極にはファーストリカバリーダイオード(耐圧 200[V], 接合容量 40[pF]@50[V], 逆回復時間 100[ns])を, 電流を測定するために 1[Ω]の抵抗を直列に接続した. これらの電圧降下は, 電源電圧に比べて無視できると考えられる.

加工条件を **Table 1** に示す⁹⁾. 工具電極は 0.3[mm]のタングステン棒, 被加工物はソーダ石灰ガラスとした. 加工液には塩化ナトリウム水溶液を用い, 加工時間の合計が 60[min]を超えない範囲で交換した.

電圧および電流波形の記録には, チャンネル間が絶縁されている 12 ビット・デジタルオシロスコープ(最高速度 10[MS/s], アナログ帯域 3[MHz], 記録速度 2[MS/s])を用いた.

3. 加工実験

3.1 電流波形

加工開始後 40[min]経過後の電流波形を比較す

(a) Long period

(b) Expanded view

Fig. 3 Example of machining current for single electrode

る. 単電極給電の場合の電流波形を **Fig. 3** に示す. 縦軸の三角印はそれぞれのゼロレベルを示す. 同図(a)で, クロック信号がハイレベルの時に電圧が印加されている. 電圧印加直後の拡大図を同図(b)に示す. 両図における時間軸は一致している. 0.305[s]で電圧が印加されると, ほぼ同時に数[ms]間電流が流れ, その後, 100[μs]以下のスパイク状の電流が断続的に流れた. また, 電圧印加直後以外でも数[ms]のパルス幅を持つ電流が流れることがあった. これらの現象は, 電圧を印加するごとに繰り返された. 別途行ったハイスピードカメラによる観察結果では, 最初の電流で泡が発生, 成長し, その後放電が発生した. 電圧印加休止時には泡が消滅した. したがって, 最初の数[ms]のパルス幅を持つ電流で泡が発生し, 続く電流で放電していると言える. 放電の前後にも 0.3[A]程度の電流が流れていた.

分散給電の場合の電流波形を **Fig. 4** に示す. 電極 1 から電極 6 の順で, スイッチング素子である MOSFET ヘゲート信号を与えた. それに応じて電圧が印加される. 同図(a)では, ゲート信号は電極 1 のみ示している. 電圧を印加したチャンネルでは **Fig. 3** と同様の電流が観察された. 電極 1 の電流波形も電極 2 から 6 までと同様の電流波形であったため, それぞれの電極は隣の電極で発生した泡の影響を受けていないと考えられる. 分散給電では巡回するように給電するため, 500[ms]間は放電が起きず冷却が促進されることが考えられる. 拡大した同図(b)からも **Fig. 3** と同様の傾向であると言える.

(a) Long period

(b) Expanded view

Fig. 4 Example of machining current by divided power

(a) Long period

(b) Expanded view

Fig. 5 Example of machining current by equi-potential power

並列給電の場合の電流波形を **Fig. 5** に示す。同図(a)に示すように、パルス幅が長く、ピーク値が小さい電流パルスが多く観察された。放電が発生するためにはすべての電極が絶縁状態を形成する必要があるためであると考えられる。絶縁を形成するための電流は、複数の電極で同時に流れた。これらのパルスと、その後発生した短いパルス状の加工電流とともに同図(b)に示す。放電と見られ

る電流の数は少なく、ピーク電流も小さかった。また、同時にはいずれか1本の電極でしか放電が発生しなかった。

いずれの給電方式でも、短いパルスが約 20[μs]であったので、サンプリング速度は 2[MS/s]で適切である。

3.2 各電極における電流パルス数

デジタルオシロスコープで取得した電流波形

Fig. 6 Pulse distribution 20 min later

を処理するためのプログラムをC言語により記述した。Figs. 3 から 5 で示した結果では、定常的に流れる電流は約 0.3[A]で、他チャンネルに電圧を印加したときに発生するノイズは 0.2[A]相当以下であった。立ち上がりのしきい値を 0.5[A]、立下りのしきい値を 0.3[A]とするヒステリシスを持たせて、重畳されたノイズの影響を除去した。本プログラムでは、電流値とパルス幅の階級ごとにパルス进行分类して計数する。そのため、放電であるか、電解による気泡発生を主とするパルスであるかを区別していない。

各給電方式の加工時間 20[min]後の 5[s]間の電流パルス数の測定結果を Fig. 6 に示す。単電極給電では電流パルス数は約 3700 であった。分散給電では各電極での電流パルス数は 890 から 950 で均一であった。並列給電では、図示した例では電極 6 だけの電流パルス数が他の電極より特に多かったが、電極 1 でも電極 2 および 3 より多く発生した。並列給電では同時にすべての電極で電気分解が起こる。そして放電は加工物に対してだけでなく、電解液に対しても起こる。電極 1 と 6 は並びの両端であるため、電解液に対しての放電が頻繁に起こり、電流パルス数が増加したと考えられる。同じ端に位置する電極 1 と電極 6 で差が出たのは、電極保持具の下面が完全に左右対称でないために泡の蓄積のされやすさなどに差が生じ、放電の起こりやすさに差が出たためと考えられる。

分散給電では各電極の電流パルス数の変化が加工時間に対して少なかったのに対し、並列給電では電極 1 と 6 の電流パルス数が変化した。このことから、並列給電方式は分散給電方式より周辺の

Fig. 7 Definition of number of current pulses at other electrodes

泡などによる影響を受けやすいと考えられる。

3.3 他電極パルス数

測定した電流パルスにより、各電極における電流パルスの頻度を計算した。文献 8) で定義した他電極放電数にならない、ある電極で電流パルスが発生してから次に電流パルスが発生するまでにほかの電極で発生した電流パルス数を他電極パルス数と定義する。Fig. 7 を用いて電極 1 に対する他電極パルス数の数え方を説明する。同図(a)では電極 1 で電流パルスが発生した後、電極 2 で 1 回、電極 6 で 2 回電流パルスが発生し、再び電極 1 で発生している。この場合には他電極パルス数は 3 である。同図(b)では電極 1 で電流パルスが 2 回連続で発生するうちにほかの電極では発生していない。したがって他電極パルス数は 0 である。同図(c)でも同図(b)と同様に電極 1 で電流パルスが 2 回連続で発生している。ただし、2 回目の電流パルスと同時に電極 4 でも電流パルスが発生しているが、同時に発生する場合には数えないことにする。したがって、この場合も他電極パルス数は 0 であるとする。このような状態は、並列給電で数[ms]程度の電流が流れる場合に生じる。他電極パルス数が 0 の状態は、同一電極で連続して電流パルスが発生したことを表している。

Fig. 8 に他電極パルス数の計数結果を示す。他の電極で発生した電流パルス数を横軸に、電極の番号を奥行の軸に取った。10 以上は非常に少なかったため省略した。同図(a)に示した分散給電では、

(a) Divided power

(b) Equi-potential power

Fig. 8 Number of current pulses at other electrodes

電圧が印加される電極が特定されるため、その電極でしか放電しない。したがって、どの電極でも他電極パルス数は0のみとなった。頻度はほぼ一定であり、Fig. 6で示した各電極におけるパルス数がほぼ一定であることと一致する。同図(b)に示した並列給電では、電極1と6で0の頻度が高かった。しかし他電極パルス数が1以上の状態も発生しており、1回の電圧印加時間である80[ms]の間でも分散していた。

前報⁹⁾の結果では、加工時間が20～40[min]の範囲では分散給電の方が並列給電より平均の加工量が大きかった。また、加工量のばらつきは並列給電では非常に大きく、電極6では加工量が非常に大きかった。それに対して、分散給電では加工量のばらつきが小さかった。Fig. 6の結果と合わせると、電流パルス数が多く、他電極パルス数0

の頻度が高いほど加工が進行したと言える。また、分散給電で加工量のばらつきが小さかったことは、電流パルス数のばらつきが小さいことと一致した。

3.4 電流のパルス幅とピーク値

測定した電流パルスを、パルス幅とピーク値によりさらに細かく分類した。ピーク値は電流パルスとして検出された範囲の最大値、パルス幅は電流値がピーク値と定常的に流れている電流0.3[A]の中間値以上となる時間とした。パルス幅は20[μs]ごと、ピーク値は0.25[A]ごとの階級として、パルスを計数した。

分散給電の電極2における加工開始後30[min]後から5[s]間のパルス分布をFig. 9に示す。電流パルス検出のための立ち上がり時のしきい値を0.5[A]としたため、0.5[A]未満の階級のパルスはない。いずれの給電方式でも、時間経過による分布の変化はなかった。同図(a)の単電極では、他の給電方式の結果と比べて、パルス幅とピーク値は広い範囲で分布した。その中でも0.5[A]以上1.0[A]未満で40[μs]未満の範囲のパルス数が多かった。同図(b)の分散給電では、0.5[A]以上0.75[A]未満で20[μs]未満のパルス数が最も多かった。全パルス数が単電極よりも少ないため、その周辺の範囲のパルス数が少なかったが、比率は単電極と同程度であった。1[A]以上のパルスは100～200[μs]のものが多かった。電極間の差は見られなかった。同図(c)の並列給電では、電流値とパルス幅の範囲は同様であったが、絶対数が少ないため、分布の傾向が見られなかった。並列給電の電極6の分布をFig. 10に示す。単電極や分散給電方式と似た分布となった。この傾向は電極1でも同様であった。内側の電極に面していない部分では泡の流れがほかの給電方式と同様に放射状に広がるため⁹⁾、電流パルスの分布も同様であったと考えられる。

泡の発生過程と放電位置の模式図をFig. 11に示す。同図(a)は泡の発生の初期過程で、電圧印加と同時に工具電極の表面から電解により複数の泡が発生し始める。時間が経つと同図(b)のように工具電極表面全体が泡で覆われる。さらに時間が経つと同図(c)のように泡が合体し、膜が形成されて工具電極が電解液から絶縁される¹²⁾。電解液の方

(a) Single electrode

(b) Divided power

(c) Equi-potential power

Fig. 9 Distributions of peak and duration
(Electrode 2)

が純水や油より表面張力が大きいので、合体しやすい。電流が 0[A] になるときがある場合には¹²⁾,

Fig. 10 Distributions of peak and duration at
electrode 6 by equi-potential power

(a) Nucleation (b) Bubble layer (c) Gas film

Fig. 11 Progress of bubble layer and gas film
formation, and discharge path

この状態でも放電していると考えられる。一方、Figs. 3 から 5 に示した電流の観察結果では、いずれの給電方式でも常に 0.3[A] 程度の電流が流れていた。したがって、Fig. 11(c) のように電極が完全に電解液から絶縁され、膜内で放電が発生するとは考えにくい。一方、同図(b)の段階で泡の境界を電流が流れるというモデルが提案されている³⁾。これに基づいた電流経路を **Fig. 12** に示す。ピーク値とパルス幅は以下のように考えることができる。重力により電極が送られるため、電極底面は工作物と接触している。したがって、その近傍では間隙が小さいので泡の量が少ない。さらに、電解液中の泡がない領域までの泡の境界が長い。そのためピーク値が小さくなる。そして、電流が流れることで境界が消滅すると電流が流れなくなるためパルス幅が短くなる。また、電極側面は泡が

Fig. 12 Discharge paths during machining

覆う面積が広く、工具電極から電解液までの距離が短いので抵抗が小さくなる。その結果、ピーク値が大きくなるとともに、一部の泡の境界が消滅しても他の境界を流れることができる。

3.5 考察

加工形状と測定された電流パルスの関係について考える。

泡の発生と消滅の現象は、程度の違いはあるが、すべての給電方式で共通である。工具電極に電圧を印加すると電気分解が起こり、泡が電極を覆う。さらに、電気分解が起こると泡の数が増え、泡は層を成すように電極の周りに集まる。泡はいくつか集まると、ひとつの大きな泡になる。それと同時に、泡は大きくなると割れて消滅する。

単電極給電では、目視では常に泡が発生し続けるように見えるが、泡の層の厚さは以下のように変化すると考えられる。電圧を印加すると電気分解によって発生した泡が工具電極を覆う。しかし、最初はその層が薄いため抵抗値は小さく、泡の境界付近をピーク値の高い電流が流れると考えられる。電圧印加をオフにしても20[ms]間では完全に泡が消滅しないため、泡は常に電極の周りに存在する。この状態で再び電圧を印加すると、電極周辺に何も無い状態から電気分解を行ったときよりも泡の量は多くなり、層が厚くなる。その結果、抵抗値が増加し電流は流れにくくなり、流れたとしてもピーク値は低くなると考えられる。電流が流れにくくなると、電気分解により発生する泡の量が減少する。これが繰り返されるため、Fig. 9(a)に示すようにさまざまなパルス幅やピーク値を持つ電流パルスが流れたと考えられる。泡が消滅す

るときには新しい加工液が流入するので、化学反応に必要な Na^+ イオンが供給される。そこに放電が発生すると、その熱により化学反応が促進されてケイ酸ナトリウムの生成量が増加する、これが電解液に溶解することで加工が進んだと考えられる。

分散給電では、目視では各電極における泡の発生量が単電極給電よりも少なかった。これは休止時間が他の給電方式より長く、泡はその間に消滅したことが原因であると考えられる。この場合には、泡の層が厚くなることは少なく、抵抗値が低いので、Fig 9(b)に示すようにピーク値の高い電流が流れたと考えられる。すべての電極で、周りに泡が少ない状態から電気分解が開始され、隣り合う電極の影響を受けにくい。各電極どうしで比較した場合の加工深さや長径、短径など加工穴の形状のばらつきが小さかったのは⁹⁾、これが原因であると考えられる。

並列給電方式では、目視では泡の発生量が最も多かった。6本の電極が並列に接続されているため、印加電圧の休止時間は単電極給電と同じである。かつ、ほかの方式よりも電極の表面積合計が大きい。したがって、電極と電解液を隔てている泡の数が多く、抵抗値は最も低い。大量に発生した泡は合体し、大きくなると割れて消滅する。その結果、すべての電極を泡で覆うために、電解作用を起こすパルス幅の長い電流が頻繁に流れたが、放電と考えられる短いパルス幅の電流が発生しにくかったと考えられる。電極2から電極5までは泡が滞留するが、電流パルスは少なく、ピーク値が低かった。しかし、電極の並びの両端であるため電極1と電極6の加工穴では他の加工穴に比べて、新しい加工液が流入しやすく、化学反応が起こりやすい。そのため、電極1と電極6で加工が進んだ⁹⁾と考えられる。

以上のことより、電解放電加工を用いて絶縁体の3次元微細形状を創成するときに加工性能をより改善するためには、加工穴内部でのみ放電が発生するように分散給電により泡の発生位置を制御することや、だれや突起、加工穴の断面形状が膨らむことのないように泡の発生量を制御する必要があると考えられる。

4. 結 論

本論文では電解放電加工において複数の電極を用いて放電を分散させて、電流波形を測定した。結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 単電極給電方式と分散給電方式とでは、電圧を印加した電極の周りに泡が十分に発生してから放電が発生するため、電流パルスの分布が類似していた。
- (2) 並列給電方式では、中央の電極周辺で泡が滞り抵抗が高くなるため、両端の電極で放電が連続して発生した。
- (3) 加工に寄与する放電電流と考えられるパルスは、パルス幅 40[μ s]未満でピーク値 1[A]以下の範囲で多く発生していた。

謝 辞

研究の遂行にあたり豊田工業大学・松原弘明氏にご協力いただきました。

本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(C)(18560118)、基盤研究(C)(21560134)および文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成事業「難環境作業スマート機械システム技術研究センター」補助金によるものです。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) H. Kurafuji, K. Suda: Electrical Discharge Drilling of Glass I, Ann. CIRP, Vol. 16, (1968), pp. 415-419.
- 2) R. Wüthrich, V. Fascio: Machining of Non-conducting Materials Using Electrochemical Discharge Phenomenon – An Overview, Int. J. Mach. Tool. Manuf., Vol. 45, No. 9, (2005), pp. 1095-1108.
- 3) I. Basak, A. Ghosh: Mechanism of spark generation during electrochemical discharge machining: a theoretical model and experimental verification, J. Mater. Process. Technol., Vol. 62, No. 1-3, (1996), pp. 46-53.
- 4) A. Paul: Chemistry of Glasses, Chapman and Hall, London, UK, (1982), pp. 109-111.
- 5) K. Furutani, H. Maeda: Machining glass rod with lathe type electro-chemical discharge machine, J. Micromech. Microeng., Vol. 18, No. 6, 065006, (2008), pp. 1-8.
- 6) K. Furutani, K. Arai: Measurement of Machining Force in Lathe Type Electro-chemical Discharge Machine, Proc. 11th Int. Conf. euspen, Como, Italy, (2011), pp. 220-223.
- 7) K. Furutani, T. Enami, N. Mohri: Three-dimensional Shaping by Dot-matrix Electrical Discharge Machining, Precis. Eng., Vol. 21, No. 2/3, (1997), pp. 65-71.
- 8) N. Mohri, K. Furutani, K. Shirai, T. Enami: Forced Discharge Dispersion by Dot-Matrix Method, Ann. CIRP, Vol. 46, No. 1, (1997), pp. 139-142.
- 9) 古谷克司, 新谷啓行, 村瀬靖男, 荒川修一: 強制放電分散型電解放電加工の加工特性, 電気加工学会誌, 47, 116 (2013), pp. 169-176.
- 10) W. Y. Peng, Y. S. Liao: Study of electrochemical discharge machining technology for slicing non-conductive brittle materials, J. Mater. Process. Technol., Vol. 149, No. 1-3, (2004), pp. 363-369.
- 11) D. J. Kim, Y. Ahn, S. H. Lee, Y. K. Kim: Voltage pulse frequency and duty ratio effects in an electrochemical discharge microdrilling process of Pyrex glass, Int. J. Mach. Tool. Manuf., Vol. 46, No. 10, (2006), pp. 1064-1067.
- 12) A. Kulkarni, R. Sharan, G.K. Lal: An experimental study of discharge mechanism in electrochemical discharge machining, Int. J. Mach. Tool. Manuf., Vol. 42, No. 10, (2002), pp. 1121-1127.

(2013年8月21日受付)