局所電界重畳による放電加工の放電位置制御*

小林正典** 太田敬士*** 吉野秀明† 嵯峨周二†† 国枝正典†††

Control of Discharge Location in EDM by Locally Superimposing High Electric Field

Masanori KOBAYASHI, Takashi OHTA, Hideaki YOSHINO, Syuji SAGA and Masanori KUNIEDA

This paper proposes a method to control the discharge location in the electrical discharge machining. The method is based on the fact that when a high-voltage is applied with a sufficiently short rise time at a certain point on the tool electrode the gap voltage close to the point is transiently greater than that of another location because a finite time is necessary for the potential to be transmitted through electrically conductive materials due to inductance. This principle was applied to the wire electrical discharge machining (WEDM) and the discharge location was controlled by superimposing a high-voltage on either the upper or lower feeding brush. Experimentally it was verified that the discharge location can be controlled using this method and that the material removal rate can be increased by dispersing the discharge location on purpose.

Key words: wire electrical discharge machining (WEDM), control of discharge location, superimposing high electric field, high speed switch, gap voltage, inductance

1. 緒 言

放電加工ではパルス状の放電を毎秒数千～数万回の頻度で生じさせる。1回の放電について放電点はただ1か所に限られるが、従来の放電加工では放電が生じる場所の決定は極間の状態に依存し、人為的に制御することはできない。つまり、ギャップ長と加工くず濃度などで決まる絶縁破壊強度の低い順に放電が生じている。

放電をパルス状に行い、パルス間に休止時間を設けることは本質的に重要なことである。休止時間中に放電点の電極表面温度が下がり、放電によって生じたプラズマ温度も下がる。それにともなって、プラズマの電離度が低下し極間の絶縁が回復するので、次のパルスで他の場所に放電点が移動できる。この休止時間の設定が短い場合はプラズマの消沈が十分でなく、やはり放電が集中する。集中箇所の温度上昇はプラズマの電離度を上昇させるのでさらに集中が助長され、悪循環により加工が安定しない。しかも、集中箇所の工作物表面は熱的に大きな損傷を受ける。また、ワイヤ放電加工の場合はワイヤ電極の一部に集中的な熱負荷が加わるのでワイヤの断線をもたらす。加工の効率や精度を低下させる。したがって、加工速度の低下を招くとしても、十分に長い休止時間を設けて、放電点を電極表面上に分散させることが必要である。したがって、放電点の分散を意図した放電位置制御が可能であれば、放電集中の抑制によって休止時間を大幅に短縮でき、加工速度の向上が図れる。

放電位置制御の試みとしては以下の報告例がある。まず、

* 原稿受付 平成 11 年 3 月 30 日

** 学生会員 東京農工大学工学部 (現, エスピー食品(株): 東京都中央区日本橋兜町 18-6)

*** 東京農工大学大学院 (現, (株)カンセイ: 大宮市日進町 2-1910)

† 東京農工大学大学院 (現, 三菱重工業(株): 千代田区丸ノ内)

†† 東京農工大学大学院 (現, 三菱自動車工業(株): 港区芝 5)

††† 正 会 員 東京農工大学工学部 (東京都小金井市中町 2-24-16)

西川ら¹⁾はシリコン粉末を混入した加工液を極間に導入することにより、放電点を分散できることを明らかにした。しかし、パルスごとに放電位置を制御することはできない。また、星ら²⁾は真空装置内で YAG レーザを加工面に照射し局所的なプラズマを発生させ、放電点を照射位置に誘導する方法を開発した。Kunieda ら³⁾はアーク柱に垂直な磁界を与えた場合に、ローレンツ力によってアーク柱が移動することを利用し、原山ら⁴⁾は極間に加工液を高速で流すことにより、アーク柱が加工液とともに移動する現象を利用して放電位置の制御を試みたが、両者とも絶縁破壊が生じる位置を制御できる方法ではない。一方、吉田ら⁵⁾は電氣的に絶縁した複数本のワイヤを束ねた電極に順次給電することにより、強制的に放電点を分散させている。この方法は電極を分割しなければならない問題があり、特にワイヤ放電加工に対する適用は困難である。それに対して、Luo ら⁶⁾は仕上げ面粗さの向上を目的として、図 1(a)に示すように絶縁体を介して工具電極に局所的に高電界をパルス状に印加した。高電界を印加した近傍の電極表面に一時的に誘導電荷が局在し、局所的な電界の増大によって放電が誘起される。Luo らは放電位置を制御できることを直接には証明していないが、この方法により仕上げ面粗さが向上した結果を報告している。

そこで、本研究ではこの Luo らの方法を基礎として、局所電界重畳による放電位置制御を試みる。ただし、本研究に

Fig.1 Methods of controlling discharge location by locally superimposing high electric field

おいては Luo らが絶縁体を介して電極に高電圧重畳を行っているのに対し、より簡単のために工具電極に直接高電圧を重畳する方法 (図 1 (b)) を用いる。その理由は、極間に同じ電界を誘起するのに必要な高電圧の値が、絶縁体を介さずに直接印加した方が小さくてすむためである。また、本研究では放電位置が上記原理により制御可能なことを放電位置の測定により実証するとともに、加工速度に及ぼす影響を調べた。

2. 局所電界重畳法

2.1 局所電界重畳法の原理

極間に局所的に立ち上がりの極めて速い高電圧をパルス状に印加すると、電極内に存在するインダクタンス成分により、導電体であっても過渡的に電位の不均一分布が生じる。これにより高電圧を印加した近傍のギャップ電圧が増大する。この現象を利用して、高電圧を重畳した近傍での放電発生確率を増大させることにより放電位置を制御する。

図 2 に本研究において構築した放電位置制御システムを示す。本システムは放電位置制御部、および分割給電法⁷⁾を用いた放電位置検出部、ならびにそれらを取り付ける市販のワイヤ放電加工機とその加工電源部より構成されている。

2.2 ギャップ電圧の理論解析

工具電極および工作物中にはインダクタンス L および抵抗 R が存在し、極間は加工液を介して対向しているためコンデンサ C を形成していると考えられる。よって放電位置制御部は図 3 に示すような等価回路で表現することができる。そこで、この等価回路を用いて、局所電界重畳を行うことによる重畳側と非重畳側のギャップ電圧 V_1 、 V_2 、つまり C_1 と C_2 各々に加えられる電圧の違いを解析する。

重畳電圧 V_s を立ち上がり速度 a を持つランプ入力 ($V_s = at$) と仮定し、重畳側ギャップ電圧 V_1 および非重畳側ギャップ電圧 V_2 の時間変化を計算した結果を図 4 に示す。ただし、 a を 50V/ns 、 L を $0.1\mu\text{H}$ として計算した。これより、重畳側と非重畳側のギャップ電圧の間に差が生じることが明らかである。また、この電圧差は時間とともに変動し、重畳直後は重畳側ギャップ電圧の方が大きい、ある時刻を境に非重畳側ギャップ電圧の方が大きくなり、その後は電圧の大小の逆転が繰り返されることがわかった。これは重畳した電圧の変動が非重畳側に伝播し、反射する現象を反映している。

ここで、高電圧の立ち上がり速度 a およびインダクタンス L の大きさが、ギャップ電圧差に与える影響を解析した。 a がギャップ電圧差 $\Delta V (=V_1 - V_2)$ に与える影響を解析した結果を図 5 に示す。また L がギャップ電圧差に及ぼす影響を図 6 に示す。結果より、 a が大きいほどギャップ電圧差が大きくなる。また、 L が大きいと、ギャップ電圧差が大きくなると同時に、ギャップ電圧の大小が最初に逆転するまでの時間が長くなる。ギャップ電圧差が大きいのほど、また重畳側ギャップ電圧が非重畳側に比べて大きい時間が長時間続くほど、制御性は向上すると考えられる。よって、重畳電圧の立ち上がり速度が大きいほど、また電極内部のインダクタンスが大きいほど放電位置の制御性が向上することが理論的に明らかになった。

2.3 ギャップ電圧の測定結果

インダクタンスは導体の寸法が長く、導体の断面積が小さいほど大きい。そこで、直径 $100\mu\text{m}$ 、長さ 500mm の黄銅ワイヤを厚さ $100\mu\text{m}$ の絶縁体フィルムを介して炭素鋼の

Fig.2 System of controlling discharge position

Fig.3 Equivalent circuit

Fig.4 Calculated gap voltages

Fig.5 Influence of rise speed of high voltage on difference in gap voltage

Fig.6 Influence of inductance on difference in gap voltage

Fig.7 Measured gap voltage along wire electrode when high voltage is applied at $X=0$

Fig.8 Experimental setup to obtain relationship between gap voltage difference and controllability of discharge position

平板上に静置し、ワイヤの一端に高電圧を印加した瞬間のギャップ電圧の時間変化を調べた。図 7 に結果を示す。あらかじめ加工機の加工電源の開放電圧に相当する約 80V の電圧が印加されている状態で、時刻 0 の瞬間に高速スイッチをオンにし、400V の高電圧を印加した。使用した高速スイッチは高電圧電源の出力電圧の 10% から 90% まで 4.5ns で立ち上がる性能を持っている。図中の X は、高電圧を印加したワイヤの一端を原点とし、非重畳側へ向かうワイヤ上の位置を示す。また、横軸は高電圧重畳時からの時間、縦軸は測定点 X におけるギャップ電圧の時間変化を表している。

結果より、高電圧重畳点である $X=0\text{mm}$ からの距離が大きいほど重畳点とのギャップ電圧差 ΔV が大きいことがわかる。また、 $\Delta V=0$ 、つまり $X=0$ でのギャップ電圧波形と測定点 X でのギャップ電圧波形が最初に交差する点、までの時間も、 X とともに長くなることがわかる。

以上より、前節において理論的に導かれた、 L が大きいほど ΔV が大きく、最初にギャップ電圧の大小が逆転するまでの時間が長くなるという傾向が、実験によって確認された。

3. ギャップ電圧分布と放電位置制御性

3.1 実験装置

本章では実加工中におけるギャップ電圧分布を測定し、局所電界重畳条件が放電位置の制御性に及ぼす影響について調べる。図 8 に示すような一体型の工具電極で、2 つに分割した工作物を形彫り放電加工する場合について調べた。

放電位置とともに、絶縁破壊の瞬間のギャップ電圧も同時に測定し、絶縁破壊時のギャップ電圧差と放電位置制御性の関係について調べた。工具電極には幅 10mm、厚さ 3mm、長さ 100mm の銅板を用い、工作物には鋼を用いて突き合わせ加工を行った。分割した工作物を用いた理由の一つは、工作物に接続する GND 線に長さ 400mm の導線を用いること

Fig.9 Difference in gap voltage leading to breakdown

Fig.10 Relation between gap voltage ratio and retardation until breakdown

により、工作物側のインダクタンスを大きくすることで、ギャップ電圧差を大きくして制御性を高めるためである。また、各々の工作物の GND 線を流れる電流を測定することにより、重畳側と非重畳側のどちらの工作物に放電が生じたかを容易に測定できるためである。

3.2 絶縁破壊時のギャップ電圧波形

図 8 の実験装置を用いることにより、絶縁破壊時の重畳側ギャップ電圧 V_1 および非重畳側ギャップ電圧 V_2 を測定した一例を図 9 に示す。これは重畳側に放電が生じた例である。開放電圧 (100V) がかかっている状態で高電圧を重畳すると、その瞬間 (約 10ns の時点) からギャップ電圧が上昇する。図中に示すように、放電が生じた工作物の側のギャップ電圧が最大値を示す瞬間が絶縁破壊の瞬間と考えられる。重畳の瞬間から絶縁破壊が生じるまでの遅れ時間を ΔT_{sd} と定義し、 ΔT_{sd} と放電位置の制御性との関連を調べた。

3.3 制御性との関連

前述のように、高電圧重畳の瞬間から重畳側ギャップ電圧 V_1 と非重畳側ギャップ電圧 V_2 の大小関係は刻々と変化している。そこで、70 回分の放電を任意にサンプルし、各放電について ΔT_{sd} と、絶縁破壊時の重畳側ギャップ電圧と非重畳側ギャップ電圧の比率 V_1/V_2 との関係について調べ、図 10 のように表示した。図中で●印は絶縁破壊が生じた時点で $V_1 > V_2$ であり、しかも重畳側で放電が生じた場合を表す。また、○印は $V_1 > V_2$ であるにもかかわらず、非重畳側で生じた場合を示す。そして■印は $V_1 < V_2$ である間に放電が生じ、非重畳側で放電した場合を示す。この結果より、 $V_1 > V_2$ の条件が成立している間に放電すれば重畳側に放電が生じる確率が高いことが分かる。しかし、放電の発生が遅れギャップ電圧の比率が 1 付近で放電が生じた場合は、必ずしも重畳側の工作物で放電が生じるわけではないことが分かる。さらに放

Fig.11 Relation between gap voltage ratio and controllability

電の発生が遅れ、ギャップ電圧の大小が逆転した状態で放電が生じると、ギャップ電圧の大きな非重畳側の工作物で放電することが分かる。

次に、図 10 の測定結果をギャップ電圧の比率と制御性の関係に整理し、図 11 に示す結果を得た。その方法は、まず図 10 の測定結果を含めて合計 250 回分の放電について、比率 V_1/V_2 の最小値と最大値の間を 21 の区間に分ける。そして各区間に含まれたサンプルを母集団として、重畳側で生じた放電と非重畳側で生じた放電の割合を求める。こうして求めた割合を各区間の中心にそれぞれプロットしている。重畳側であろうと非重畳側であろうと、ギャップ電圧が大きい側で放電が生じた場合を制御成功と考えれば、ギャップ電圧の比率が 1.05 以上もしくは 0.95 以下であれば、制御が可能であることが明らかになった。開放電圧 100V を用いた本実験において、放電位置制御が可能なギャップ電圧差の最小値はおよそ 20V であった。そこで、前出の図 7 を改めて検討すると、約 300mm 以上のワイヤ電極であれば放電位置の制御が可能であることが分かる。

ところで、上ではギャップ電圧が大きい側で放電が生じた場合を制御成功と考えたが、本来の放電位置制御は高電圧重畳側のギャップ電圧が大きい間に、高電圧重畳側で放電が生じる必要がある。なぜならば、重畳側と非重畳側のギャップ電圧の大小が逆転してから絶縁破壊が生じた場合は、非重畳側に放電位置が制御されるからである。よって放電位置制御を実加工において確実に行うためには、重畳側ギャップ電圧が大きい間に絶縁破壊が生じない場合には、加工機の加工電源のトランジスタを一度オフにし、次のオン状態で再度高電圧重畳を試みるなどの工夫を行う必要があると言える。

4. 実加工における放電位置制御

4.1 放電位置分布の測定

前章では局所電界重畳法を用いて放電位置制御を行うための条件を検討し、ワイヤ放電加工に適用した場合に実現性が高いことを明らかにした。そこで、ワイヤ放電加工の実加工中における放電位置制御を試みる。

ところで、実加工中の放電位置制御性を評価するためには、インプロセスで放電位置を測定する必要がある。これまでに、Kunieda ら⁷⁾や小原ら⁸⁾は、故意に分割した給電線を工具電極の互いに最も離れた地点に接続し、それらを通る電流の分布から放電位置を検出する方法を提案している。これは、加工電源からの総電流が各給電線の接続点から放電点までの距離、したがって電極内部の抵抗値に応じて各給電線に配分

Fig.12 Result of controlling discharge position

Fig.13 Relation between delay of superposition and controllability

されることを利用している。そこで、本研究においてもこの分割給電法を用いて放電位置の測定を行う。

図 2 で示した放電位置制御システムを用いて、実加工中の放電位置制御と放電位置検出を行った。厚さ 400mm の鋼材に対して $\phi 200 \mu\text{m}$ のワイヤ電極を約 5mm 切り込んだ状態で加工し、550V の高電圧を上下給電子に対して印加することによって放電位置制御を行った。放電ごとに、1) 上給電子に重畳、2) 重畳なし、3) 下給電子に重畳、4) 重畳なし、の順番に重畳条件を切り換えるサイクルを繰り返して加工を行った。高速スイッチには、高電圧電源の出力電圧値の 10% から 90% への立ち上げに必要な時間が 3ns の性能を持つものを使用した。放電位置分布の測定結果を図 12 に示す。横軸は放電位置の加工テーブルからの高さ、縦軸はその高さにおける放電度数を表している。放電位置分布が高電圧を重畳した給電子方向へ移動していることが分かる。

4.2 高電圧重畳のタイミングと制御性

放電加工においては加工電源の開放電圧が印加され、統計的にばらつく放電遅れ時間の後、絶縁破壊が生じ放電が発生する。局所電界重畳法においては、絶縁破壊が生じてしまった後に高電圧を重畳しても意味がない。逆に、放電遅れ時間より早過ぎるタイミングで重畳したとしても、極間が絶縁破壊が生じる状態に至っていないため、制御が成功する確率は低いと考えられる。したがって、高電圧重畳を行うタイミングには制御確率を最大にする最適値が存在するはずである。

そこで、加工機が開放電圧を印加してから高電圧重畳を行うまでの時間を遅延時間と定義し、その最適値について調べた。この遅延時間は 3 章で定義した開放電圧が印加された状態から絶縁破壊が起こるまでの遅れ時間 ΔT_{sd} とは区別される。

放電 10 回ごとに上部給電子のみに高電圧重畳を行う放電を 1 回生じさせ、加工機の開放電圧が印加されてから高電圧重畳を行うまでの遅延時間と放電位置制御性を調べる実験を

Table 1 Effect of discharge position control on material removal rate

	No control	Control to disperse	Control to concentrate
Relative material removal rate	1	1.11	1.04

行った。工作物には厚さ 400mm の鋼材を用い、重畳電圧は 550V とした。また、このときの放電位置制御を行わない状態での平均放電遅れ時間は $5.0\mu\text{s}$ であった。実験結果を図 13 に示す。横軸は遅延時間の設定値、縦軸は以下に定義する制御性である。工作物下端を原点とし、ワイヤに沿って工作物の板厚の中央部の座標を X_c とする。また、高電圧を重畳したパルス 4000 回分の平均放電位置を $\langle X_g \rangle$ 、重畳しないパルス 4000 回分の平均放電位置を $\langle X_n \rangle$ とする。このとき制御性を $(\langle X_g \rangle - \langle X_n \rangle) / X_c$ と定義する。

これより、放電位置制御を効果的に行うために最適なタイミングは、平均放電遅れ時間よりも少し短い約 $3\mu\text{s}$ 付近であることが明らかになった。

4.3 加工速度の向上

放電位置制御を行うことが加工特性に与える影響を調べるため、制御を行わない場合、および制御を行った場合の加工速度の比較実験を行った。実験条件は前節と同じである。放電位置を分散させるためには放電ごとに、1) 上給電子へ重畳、2) 重畳なし、3) 下給電子へ重畳、4) 重畳なし、の順番に重畳条件を切り換えるサイクルを繰り返した。また、放電位置の集中を意図する場合は、上給電子へ重畳するパルスと重畳なしのパルスを交互に繰り返すことによって、放電点が上部に集中しやすい状態を生じさせた。実験結果を表 1 に示す。加工速度は放電位置制御を行わない場合の加工速度を 1 とし、比率で表示した。この結果から、分散を意図した制御を行うことにより、制御を行わない場合および集中を意図した制御を行った場合に比べ、加工速度が向上することがわかる。

本来は、放電位置制御を行うことにより休止時間の短縮が可能とし、それによって加工速度を向上することが目的であった。しかし、本実験においては休止時間を変化させることなく、放電位置制御を行うだけで加工速度に変化が生じた。その理由は以下のように考えられる。放電点が分散した状態では多くの放電が加工液で満たされた液中放電であると考えられる。このため、加工液の気化・解離による気泡の爆発的な膨張が生じるため、各放電の除去効率が高いと考えられる。逆に放電が集中した状態では、2 回目以降の放電は加工液の存在しない気中放電であるので、気泡の爆発的な膨張が生じない。このため、放電 1 回あたりの除去量が小さくなるので加工速度が小さく考えられる。ただし、今回の実験においては集中を意図した制御を行ったにもかかわらず、制御をしない場合に比べて加工速度がわずかに向上している。この理由は、高電圧重畳を行うことによりギャップが大きい場所でも放電が生じやすくなるため、放電頻度が増加する効果が生じたためであると考えられる。

5. 結 論

放電加工における放電位置の制御を行うための局所電界重畳法を提案した。基礎実験から以下のことが明らかになった。

- (1) 工具電極の一端に極めて立ち上がり速度の速いパルス状の高電圧を印加すると、重畳側と非重畳側でギャップ電圧の不均一分布が生じる。
 - (2) 重畳電圧の立ち上がり速度が大きいほど、ギャップ電圧差は大きい。
 - (3) 工具電極内や工作物内のインダクタンスが大きいほど、ギャップ電圧差は大きい。
 - (4) 実験に用いた高速スイッチの立ち上がり速度の下では、重畳側と非重畳側のギャップ電圧の比率が 1.05 以上である重畳条件下において放電位置制御が可能である。
 - (5) 約 300mm 以上の長さのワイヤ電極を用いれば、ワイヤ放電加工の放電位置制御が可能である。
- そこで、ワイヤ放電加工に本方法を適用し、実加工中に放電位置制御と放電位置検出が可能なシステムを構築した。その結果、以下のことが明らかとなった。
- (6) 開放電圧が印加されてから高電圧重畳を行うまでの遅延時間には最適値が存在し、それは平均放電遅れ時間よりも短い時間である。
 - (7) ワイヤ放電加工の実加工中に放電位置制御を行い、放電位置が高電圧重畳側へ移動することを確認した。
 - (8) 加工中に分散を意図した放電位置制御を行うことにより、制御を行わない場合、および集中を意図した制御を行った場合と比べ加工速度が向上した。

謝 辞

本研究は科学技術振興事業団からの受託研究費のご援助により行われました。記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 西川克巳, 毛利尚武, 齋藤長男, 古谷克司, 小島弘之, 国枝正典: 粉末混入放電加工における放電加工現象 (第 2 報), 1993 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1993) 247.
- 2) 星 佳伸, 甲田壽男, 吉田博夫, 山中一司: YAG レーザ誘導による低圧下での放電制御, 第 2 回電気加工学会全国大会講演論文集, (1992) 7.
- 3) M. Kunieda, H. Xia and N. Nishiwaki: Observation of Arc Column Movement during Monopulse Discharge in EDM, Ann. CIRP, 41, 1 (1992) 281.
- 4) 原山敬一, 夏 恒, 吉田政弘, 国枝正典: 極間における加工液流が放電加工特性および放電柱に与える影響, 1992 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1992) 281.
- 5) 吉田隆夫, 毛利尚武, 齋藤長男, 鈴木政幸, 古谷克司: 多分割電極による加工現象の観察, 1994 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1994) 905.
- 6) Y. F. Luo, Z. Y. Zhang and Y. Yu: Mirror Surface EDM by Electric Field Partially Induced, Ann. CIRP, 37, 1 (1988) 179.
- 7) M. Kunieda and H. Kojima: On-Line Detection of EDM Spark Locations by Multiple Connection of Branched Electric Wires, Ann. CIRP, 39, 1 (1990) 177.
- 8) 小原治樹, 奥山祐二, 米屋政友, 井岡忠昭: 放電加工の放電位置に関する研究 (第 2 報), 電気加工学会誌, 24, 47 (1990) 12.