単発放電による電極点の分散

橋 口 清 人*

The dispersion of arc spots formed by an impulse
discharge in the EDM

Kiyohito Hashiguchi

This paper describes with the dispersion of arc spots caused by the material of the tool electrode. In the EDM, it is well known that only one crater of the arc spot at the surface of the electrode is formed due to a single impulse discharge. In this experiment, several arc spots are easily formed by using the electrode of the resistance material and conductive material with a special shape in view of the internal resistance. These unique phenomena are explained by means of the internal resistance of the tool electrode. Several arc column are formed in parallel at the electrode gap by the cause of the internal resistance. The feature of the streak camera photograph shows the observation of the parallel arc column. This paper introduces these phenomena into one method of improving the removal rate in the EDM.

1. ま え が き

放電加工のような液中微少放電ギャップにおける単発放電では、陰陽両電極面に、それぞれ1個の電極点形成されるのが普通である。放電加工速度を増すために放電ギャップ入力を増加すると、この電極点

* 米子工業高等専門学校

が大きくなって加工面が悪くなり、あまり加工速度をあげられない。

本論では電極材料や、電極形状によっては、液中単発放電で複数個の電極点を形成し得る事を示す。

1), 2), もしこのような電極点分散現象を放電加工に応用することができれば、加工速度と面アラサとの関係において興味ある現象と思われる。実用的な面では、電極材料の加工性、極性消耗等の点から大きな制約を受けるので容易ではないと思われるが、加工速度改善に対する一つの観点として、この電極点分散現象を提示するものである。

単発放電による電極点分散現象の要因は、陰極点現象、放電ギャップ状態、材料の物性的性質、電極の構造等が複雑にからみあっているのであろうが、本論では電極材料内部に等価抵抗を仮想し、その電位降下に起因して並列放電柱が形成される結果電極点が複数個形成されるのではないかと説明した。放電の発光状態を高速度カメラで観測してその妥当性を検討した。

尚高電圧の気中放電や、特殊な電極配置の単発放電による電極点分散については他にも報告されている。

3), 4)

2. 電極点の分散

単発放電によって放電痕が複数個形成されるということは、一つの放電ギャップ間に並列に複数個の放電柱が形成されるか、放電柱が何等かの条件で消弧に追い込まれ、再び別のところに再点弧する場合の2種類が考えられる。これ等については他に詳しく報告しているが、⁵⁾ 実験で得られる放電の発光状態との関連性が大きいので簡単に述べる。

2.1 並列放電の点弧

対向している電極面に同時に並列放電が発生するためには、数箇所絶縁破壊を起こすことが第1の条件として考えられる。その後放電の持続条件が満足されないことには並列放電柱の形成が有り得ないことは言うまでもない。

今簡略化のため2つの並列放電が発生する場合を考える。図1のように電極面の P_1 , P_2 点是对向電極との間の絶縁破壊電圧 V_{s1} , V_{s2} が比較的低いものとする。そして電極内部に電流の流入点 P_0 点から縦方向の等価抵抗 R_1 , R_2 P_1 P_2 間の横方向の等価抵抗 R_3 を想定する。 $V_{s1} < V_{s2}$ として電極を徐々に近づけて行くと先ず P_1 点で放電が開始し、それぞれの抵抗に図1のような電流 i_1 , i_2 が分流して流れたとすれば、 P_1 点の放電ギャップ電圧を e_g として

$$e_g + R_3 i_2 > V_{s2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

図1 電極内部の等価抵抗

$$\text{または } e_g + i_1 R_1 \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_2} > V_{s2} \quad \dots\dots\dots(1)'$$

であれば P_2 点でも絶縁が破壊し、アークの持続条件が満足されれば P_2 点でも放電柱が形成され並列放電が点弧されるであろう。もしこの考え方が正しければ電極材料の内部抵抗が高いほど、 R_1 、 R_2 、 R_3 等の抵抗値が確保しやすく電極点の分散が容易であろう。

ここで $V_{s1} < V_{s2}$ であれば(1)、(1)' の条件は得られないようにも思えるが、 P_1 点で放電が点弧するとガスの発生、急膨張、熔融蒸発金属の飛散等^{6), 7), 8)}、があつて放電ギャップは大変な擾乱状態にあり、 P_1 近傍の V_{s2} が時間とともに減少することは容易に推測されて、(1)式は充分可能な場合があるであろう。これより考えると電極点の分散は P_1 点の放電によりギャップの絶縁破壊電圧が影響をおよぼされる範囲に容易であると思われる。ただし V_{s1} や V_{s2} に対して充分大きな電圧を印加した場合には(1)式は問題なく満足され得るので、分散の範囲と数も多くなるであろう。放電加工ではギャップが非常に小さいのでこのような条件は容易に得られると思う。

現在放電加工において使われている Cu や、Al の導電材料では(1)式における R_3 が非常に小さな値になり第2項がほとんど零に近くなって(1)式は

$$e_g > V_{s2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

となり、これでは P_2 点の点弧はおぼつかないのではなかろうか。しかし R_3 を大きく取れる構造、例えば図2のように R_1 、 R_2 に相当する縦方向抵抗 R_t のみにすれば、 R_3 が充分大きくなり(1)' 式は

$$e_g + i_1 R_1 > V_{s2} \quad \dots\dots\dots(3)$$

となり結局電極部での電位降下が大きな要因となるようにすれば導電材料でも並列放電点弧は可能であろう。導電材料の場合 R_1 も非常に小さいので、(3)式は無理なように思えるが、コンデンサ放電等を利用すれば放電回路の抵抗値が R_1 と同程度であるから、 $i_1 R_1$ の電位降下としては比較的大きな値を取ることは容易であろう。

図2 電極内部の等価抵抗

一つの電源に対して放電路が複数個形成されている例としては、けい光灯、水銀灯等が最も身近なものであるが、これ等は各放電灯に対してバラストを設けているのであり、本論での並列放電も電極内部抵抗がその役目をしていると考えれば、上記の説明もある程度納得のいくところであろう。

2.2 再点弧放電

一点で放電していたアーク柱が急に消弧した場合、その時点における電極間の無負荷電圧が十分なものであればただちに再点弧されるであろう。この場合再点弧時間が非常に短かければ放電電流に段落がつくであろうがほとんど単発放電と見なして良いであろう。放電終了後には消イオン時間もあり極く短い時間で再点弧も考えられる。この場合再点弧する場所が必ずしも同じ場所とは限られず、結果的に電極

点が複数個形成されるであろう。

3. 実験方法

単発放電は、図3のように微少ギャップで対向した電極間にコンデンサ C_1 の電荷を放電させて行なった。電極材料として、陽極にSK-5鋼材、陰極に電気炉用発熱体であるSiC、木綿針、炭素系抵抗体等を使用し、SK-5材面の放電痕を観測し電極点とした。放電電流はコンデンサ C_1 を SR_1 でクランプしているので単極性となるが、⁹⁾ SiC電極の場合はSiC自身の抵抗値が高く（固有抵抗約 $0.5\Omega\text{cm}$ ）で、放電回路は非振動条件を満足し、放電電流 i は、

$$i = \frac{v_s - e_g}{\beta L_0} e^{-\alpha t} \sinh \beta t \dots\dots\dots(4)$$

ただし v_s : 放電開始電圧, e_g : 放電ギャップの等価逆起電力, $\alpha = \frac{R}{2L_0}$,
 $\beta = \frac{\sqrt{R^2 - \frac{4L_0^2}{C}}}{2L_0}$ $R = R_0 + R_s + R_e$, R_e : 電極の抵抗値

となり図4(a)のようになる。400V, 100 μF , 白灯油中のものであるが、波形に段落や折点が見えるのが特徴的である。波尾の最終時段落はアークの最小保持電流による裁断が現われているのであろう。⁹⁾ SCR_1 は、図4(a)の放電波形途中でターン・オンし、アーク電流を強制裁断するためのものである。その時の波形は(b)のようになる。 C_2 , および SCR_2 は C_1 による単発放電終了後、任意時間遅らせて2回目の単発放電を行なうものであり、放電電流は(c)のようになる。これらの波形測定には、同志社大学工学部元木研究室製円盤型分流器、東京変圧器製同軸分流器、岩崎通信機製シンクロスコープ(SS-5004), メモリスコープ(MS-5103B)等を使用した。

図5は、図4(a)のような単発放電により分散した電極点を示す。400V, 100 μF , SiCを陰極, SK-5材を陽極にして(a)は白灯油中で、(b)は気中で放電させた場合であるが、かなりの放電痕を数えることができる。このような分散数を調べる場合の電極SiCは、外径10mm ϕ , 内径4mm ϕ の中空棒を用い、その面のあらさは約40 $\mu\text{m}R_{max}$ であった。

図6は、単発放電により電極点が分散した時の放電初期におけるアーク発光状態を日立高速度カメラ16HDで流し取りしたものである。これ等の時間的変化、膨張等は、大沢商会フィルムモーション解析装置(F-107)で観測した。

図3 実験回路

図4 各種電流波形

図5 SK-5材面の電極点分散状況

図6 アーク発光

4. 実験結果および検討

4.1 電極点の分散

図7に、図3の C_1 ($10\mu F$) のみによる単発放電で、放電開始電圧を変化させた場合の電極点分散数を示す。この場合電流の最大値が約10~95Aと変化する。図にはSiCが陰極、陽極と、極性を変えた場合も記されているが、ほとんど分散数に差が見られない。このことはアークを定義づけている陰極点現象が、この分散現象に対してあまり大きな要素になっていないことを示しているのではないと思われる。

図8は、放電開始電圧400V一定で、コンデンサ C_1 の容

図7 電極点の分散数

量を変化した場合で電流最大値が約40～90A、放電時間が約100 μ s～1msと容量増加につれて大きくなる。図7,8ともにSiCの中空棒とSK-5材との組合せであるが、いずれも放電エネルギーの増加とともに電極点分散数が増える。図7,8については炭素のセラミック抵抗体（固有抵抗値約0.8 Ω cm）、炭素の樹脂系抵抗体（固有抵抗値約0.2 Ω cm）でも同様な分散現象があることを確認している。

図9は、 C_1 （400V, 100 μ F）の放電を図4(b)のように裁断して、その裁断時間の変化に対する分散数を調べたものである。放電初期の約50 μ sですでにかなりの電極点数が読み取れる。すなわち比較的放電初期においてアーク柱が並列に形成されているのではないと思われる。このことは図6の発光状態写真において約20 μ sで放電発光が分割して見られることからもうなづけるであろう。その後電極点数が時間とともに減少気味に現われているのは、時間とともに大きくなる電極点が近隣の電極点と重なり合ってしまう、最後に大きな放電痕として数えられるので数的には減少気味となるものと思われる。

図7,8,9を合わせて考えると、図8のエネルギー増加につれて電極点が多く見られるのは、電流値の増加によるものが大きく影響していることが推測される。この電極点現象を放電加工に応用する場合には同一放電ギャップ入力で考えると、パルス幅が短く電流値が高い放電波形の方が電極点を分散させるのに有利であることがいえるであろう。

図10は、図3の C_1 （3 μ F, 400V）と C_2 （10 μ F, 400V）の放電をSCR₂で時間制御して、初回の C_1 放電により発生する電極間の擾乱状態の影響が、第2回目の C_2 による単発放電痕におよぼ

図8 電極点の分散数

図9 放電の持続時間と電極点分散数

図10 放電電流間隔の影響

す度合いを調べたものである。図5に液中・気中の電極点分散状況を示しているが、気中の方がはるかに多くなっており、単発放電のくり返しである放電加工では、前の放電によって生成されたガスの影響が、後の放電の電極点分散に関係してくることも考えられる。そこで図3の C_1 をほとんど分散しない $3\mu\text{F}$ として次に C_2 ($10\mu\text{F}$)の放電開始時間を変えて見たが、さほど大きな影響が現われていないように思える。ただし、この場合は分散がはっきりしており非常に数えやすい。すなわち電極点間隔が比較的大きい。また、バラツキが大きい数値を平均しても意味がないかとも思えるが、図10の各時間の平均値を出して見ると約 $80\mu\text{s}$ で3.6個、 $150\mu\text{s}$ で4.3個、 $200\mu\text{s}$ で5.2個、 $300\mu\text{s}$ で3.6個、 $400\mu\text{s}$ で2.6個、 $500\mu\text{s}$ で3.2個となり最も分散の多い時間が存在しうるのである。以上2点から何等かの形で前の放電の影響が、後の放電の電極点分散に現われるようである。

4.2 並列アーク柱

図11は、SiCとSK-5の組合わせで 400V $100\mu\text{F}$ の C_1 のみにより、白灯油中で単発放電を点弧した場合の発光状態(a)、それをフィルム解析装置にかけて得られたデーターより、発光の時間方向のみに注目して書きだしたものを(b)に、その時の発光間隔を放電痕の分布状態(c)と対応させ、放電電流(d)も示している。(a)(c)(d)は同時観測したものであってこれ等よりアーク柱の確認を行なう。

図11の(a)は感光が弱く見苦しいが、飛散する溶融、蒸発金属による発光が感光しないようにあえて感光が弱いものを取り出したがほぼ放電痕と電流波形と対応させることができた。

(b)図に示すように発光はまず一本で始まり、約 $200\mu\text{s}$ で第2の発光が見られる。(c)の放電痕もこの位置に対応して確認できる。すなわち、2.1で述べたように(1)式が満足されて図1の P_1 、 P_2 点に相当する場所で並列アーク柱が形成されたのであろう。その後すぐに約 $240\mu\text{s}$ で第3の発光が見られこれも(c)図の放電痕が確認され合計3本のアーク柱が同時に持続されている。この時の電流波形は約 $150\sim 300\mu\text{s}$ で少しみだれている程度である。一本から3本への増加であれば、その都度電流に大きな変化があって良いように思うが、この時点で第一の発光は

図11 単発放電の時間的経過

次第に弱くなり衰微して約 $340\mu\text{s}$ で消弧しており、本数そのものが電流値に大きく影響するとはかぎらないようである。要するに回路定数により定まる電流が合計として流れる。その後第4の発光が比較的強く始まっている。この時は放電々流に段落が現われている。この時点では第1の発光が消弧して第4の発光が点弧するという2.2節で述べた再点弧現象が見られる。しかし他の2本は持続されているので電流波形としては完全な再点弧の形にはならない。そして第2, 第3の発光は約 $550\mu\text{s}$ を前後して消弧する。この時点でも電流波形には明確にみだれが見られる。そして第4の発光は最小アーク保持電流を維持できる時点まで続いて消えている。結局、完全とは言えないまでも発光の本数と電極点の数と対応できて、しかも位置的にもほぼ説明ができ、発光の消滅、再発光が放電電流のみだれや段落の時間に合っていることから、電極点の分散現象は、2.1 2.2節で述べた並列放電や再点弧が入りみだれて発生する結果であると言えるであろう。

図12は木綿針を数本たばねた電極で C_1 ($400\text{V}, 100\mu\text{F}$)のみで放電させた時の電極点(a)と、そのアーク発光状態(b)を示している。一般に導電材料電極では並列アーク柱の形成は困難であるが、図12の場合は、図2に示したように図

図12 針状電極による電極点の分散

1の R_3 を極端に大きくした場合になるので2個の電極点をはっきり確認できる。発光状態(b)を見ても発光が分離しているのがわかり、条件さえ満足されれば導電材料電極でも電極点の分散はあり得るのである。

図11, 12の結果より、並列アーク柱の点弧は、電極内部抵抗に起因しているという説明が、放電分散の第1条件である数箇所での絶縁破壊ということのみからすれば、ある程度妥当なものではなかろうか。

5. 結 論

液体中の微小ギャップでコンデンサ電荷を単発放電させ、その時の電極点個数、電流波形、アーク発光を観測し、実験的に検討した結果、次のような事が明らかになった。

1. 導電材料と抵抗材料との電極組みあわせで容易に電極を分散できる。
2. 電極点分散現象は電極の内部抵抗が大きな要因の一つであると思われる。
3. 内部抵抗を考慮して特殊な構造にすれば導電材料でも電極点を分散できる。
4. 放電電流の増加とともに分散数が増える。
5. 電流値にもよるが、比較的放電初期に大部分の電極点が形成される。
6. 電極点分散は、並列アーク柱が点弧されたり、再点弧現象が入りみだれて発生する結果として生じ

ている。

7. 電極材料の極性を変えても分散数はほとんど影響されない。このことから陰極点現象が分散現象の大きな要因にならないと思われる。

8. くり返し放電の場合にはパルス間隔が分布状態に影響するようである。

以上電極点分散現象の提示と要因について述べたが、今後放電加工への応用を目標にして実験、検討をして行く予定である。

なお本研究をおこなうにあたり本校山本武久、林貞男両教官にいろいろ助言をいただきました。また実験には和田技官、装置については福島技官に援助を受けました。附記してお礼申し上げます。

(1974. 12. 29 受付)

参 考 文 献

- 1) 橋口：昭49年，精機学会秋季大会 237
- 2) 橋口：昭49年，中国支部電気四連大 10206
- 3) 橋口・山本：電気加工学会放電成形委員会資料 №24-1 (昭46)
- 4) 増山他：昭44年中国支部電気四連大 1103
- 5) 橋口：精機学会誌投稿中 (昭49)
- 6) 橋口・山本：電気学会雑誌 Vol.89-5, №968 P931 等
- 7) 池田：電気加工学会誌 Vol.6 №11 P12
- 8) 藤本・戸嶋：電気加工学会誌 Vol.6 №11 P48
- 9) 元木・李・谷村：電気学会雑誌 Vol.87-4 №943 P793