放電加工屑による加工特性の劣化とその防止に関する研究

後藤昭弘* 湯沢 隆* 真柄卓司* 小林和彦*

Study on Deterioration of Machining Performance by EDMed Sludge and its Prevention

Akihiro GOTO, Takashi YUZAWA, Takuji MAGARA
and Kazuhiko KOBAYASHI

Abstract

This paper describes the phenomena caused by the EDMed sludge. When the electrode comes in touch with the workpiece through the EDMed sludge, the current flows through the sludge and the bridge of sludge is made. When this bridge is made, it brings about the concentration of discharge pulses and damages the machined surface.

In order to improve the machining performance, the method to prevent the formation of the bridge of the sludge and the damage to the surface is discussed. It becomes clear that, when the electrode and the workpiece are shorted, interruption of current is effective to improve machining performance.

1. はじめに

放電加工の際に電極とワークが短絡すると放電が発生せず短絡電流が流れるが、短絡電流が加工面品質に及ぼす影響等についてはあまり関心がはられておらず、不明な点が多かった。この理由として、放電加工は放電の電流により加工を行う方法であり、短絡電流が実際の加工に寄与しないと考えられるために無視しても加工に影響はないと思われていたこと、また、短絡電流と加工特性との関係が明確化されていなかったことなどがあげられる。

しかし最近の加工事例によると、極間短絡時に以下のような問題が生じることが経験的に知られるようになってきた。

(1) 一度発生した短絡は長時間継続する傾向があるため、それだけ加工速度の低下につながる恐れがある。

(2) 電極に傷が付いたり、異常消耗が起きるとき、あるいは、ワークに傷が付くときには極間が短絡している場合が多い。

以上のような現象は、放電加工により生じる加工屑（スラッジ）の挙動が関わっていると考えられる。放電加工の際の加工屑の挙動について研究された例は多い^{1)~6)}が、極間短絡時の加工屑の挙動について研究された例はない。本稿では、上記の問題の原因を明らかにするとともに、良好な仕上加工を行うための方法について検討する。

2. 短絡電流の影響

2.1 短絡時の極間状態

* 三菱電機(株)

放電加工中に一端極間が短絡すると、数10ms～数100msという長時間にわたり継続する傾向がある。図1は放電加工中の極間電圧波形を示したものである。電極は10mm角の銅、ワーク材質はスチールであり、加工条件は、ピーク電流(I_p)5.5A、パルス幅(ON)64 μ s、休止時間(OFF)16 μ sである。図では100ms近い時間短絡が継続しているのが観察される。

図1 短絡時の極間電圧波形

放電加工では極間距離を制御するためのサーボにより、放電加工中に短絡が発生すると極間距離が広がり短絡が解消されるように作動する。例えば、通常100msの時間では数10 μ m極間距離が広がる。極間の短絡が単純に電極とワークの接触、あるいは、スラッジを介した電極とワークの接触だけであるならば、数 μ mも極間距離が広がれば解消されると考えられる。これは、短絡電流が流れる事により、電極間に存在するスラッジに何らかの作用が働くためであると考えられる。その作用について以下で説明する。

図2は、スラッジを介して短絡電流が流れている状態を、上からみた様子を示したものである。この場合、短絡電流の影響により磁界が生じる。磁界 B の値は次式のように表すことができる。

$$B = \mu I / (2 \pi a) \quad (2.1)$$

(a :短絡電流が流れる部分(円)の半径, I :短絡電流, μ :加工液の透磁率)

ただし、極間距離は a の値に比べて、十分に大きい場合で近似している。

2.2 スラッジに作用する力

前節で述べた磁界 B により、短絡電流が流れる領域の外周では、スラッジに対して電流領域の中心に向かう方向に力が作用する。任意のスラッジ1つが受ける力 F の値は、次式のようにになる。

$$F = B \cdot i \cdot 2r \quad (2.2)$$

(i :スラッジ1つを通して流れる電流, r :任意のスラッジ1つの半径)

式(2.2)に磁界 B の値を代入することで、 F は次式のように表される。

図2 スラッジの粒が受ける力

図3 スラッジに加わる力

$$\begin{aligned} F &= B \cdot i \cdot 2r \\ &= \pi \frac{I}{2 \pi a} \frac{I \pi r^2}{\pi a^2} 2r \\ &= \pi \frac{I}{2 \pi a} \frac{I \pi r^2}{\pi a^2} 2r \\ &= \pi \frac{I^2 \cdot r^3}{\pi a^3} \end{aligned} \quad (2.3)$$

図3 は平均電流とスラッジが受ける力との関係

を $a=1\text{mm}$ として計算し、グラフにしたものである。

さらに、スラッジ1つに与えられる加速度 a は、次式のように求められる。

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{F}{m} = \frac{F}{\frac{4}{3}\pi r^3 \rho} \\ &= \mu \frac{I^2 \cdot r^3}{\pi a^3} \frac{3}{4\pi r^3 \rho} \\ &= \frac{3\mu I^2}{4\pi^2 \rho a^3} \quad (2.4)\end{aligned}$$

(m : 任意のスラッジ1つの質量, ρ : スラッジ(鉄)の比重)

一例として, $I=5\text{A}$, $a=1\text{mm}$, $r=5\mu\text{m}$ を式(2.3), (2.4)に代入すると, F と α は以下のよう

$$F=1.25 \times 10^{-12}(\text{N})$$

$$\alpha=0.3(\text{m/s}^2)$$

この結果からも, 短絡電流が流れることにより, スラッジが集中するのに十分大きな力が, 極間に作用することがわかる。

このように短絡電流が流れているときは, 電流が流れている部分のスラッジが中心方向に引き寄せられるため, その間たとえ加工機のZ軸が上昇しても, スラッジが集中するだけで, 短絡は解消されにくい。この様子を示したのが図4である。

実際に, 以上のことについて確かめるため, スラッジを介して極間に短絡状態を発生させ, 短絡電流が流れた状態で, Z軸を1mm以上引き上げた。加工条件はピーク電流(I_p)5.5A, パルス幅(ON)16 μs , 休止時間(OFF)16 μs の条件を使用した。その時の状態を図5に示す。極間状態を観察するため, ワークをピーカに入れて背面から光を当てている。Z軸を上げ極間距離を広げても短絡状態が解消できず, スラッジによる橋絡(以後この橋絡を「短絡ブリッジ」と呼ぶ)が形成されていることが確認できる。しかし, その状態で電流を一旦止め, 再び電流をON状態にした場合, 極

間はオープン状態となり, 短絡を解消することができた。

以上より, 短絡電流が極間に流れている間は, スラッジが極間に引き寄せられているため, たとえZ軸を上げて極間を広げても, 短絡は容易に解消できないことが確認できた。さらに, 極間短絡時に電流を止めることにより, 橋絡の成長を防止できることが確認できた。

2.3 加工面品質への影響

短絡ブリッジが形成された場合の加工面品質への影響について考察する。極間が短絡した場合には極間が広がるので, 短絡ブリッジの長さが限界になった時点で短絡が解消される。しかし, 短絡が解消されても短絡ブリッジ部分のスラッジの濃

図4 短絡時の様子

図5 スラッジによる短絡状態

度は高いので、その部分に放電が集中しやすくなる。図6にその様子を示す。このように短絡ブリッジができた部分に放電が集中するので、加工面が荒れると考えられる。

2.4 ピーク電流(I_p)と短絡頻度

図7はピーク電流(I_p)と短絡頻度の関係について測定した結果を示したグラフである。□10mmの銅電極で加工を行い2mm毎に全印加パルス数に占める短絡パルス数の比率を測定した。ピーク電流(I_p)は3.5A, 5.5A, 10Aの3通り、パルス幅(ON)は64 μ s, 休止時間は16 μ sの条件で実験を行った。

短絡の頻度はピーク電流(I_p)が小さい仕上条件ほど多くなることがわかる。ピーク電流(I_p)が大きいほど極間短絡した場合にスラッジを引き寄せ、力が大きくなるにもかかわらずピーク電流(I_p)が小さい方が短絡頻度が多いのは以下の2つの理由によると推察している。第1に、ピーク電流(I_p)が大きい条件では、クリアランスが大きくな

図6 放電の集中

図7 短絡頻度

るためスラッジのはけがよくなり短絡の頻度が下がると考えられる。第2に、短絡電流はスラッジを集中させて「短絡ブリッジ」を作る働きをする一方で、熱により「短絡ブリッジ」を破壊する働きをするため、ピーク電流(I_p)が大きい条件で短絡した場合にはスラッジを引き寄せる力も大きくなるが、それ以上に「短絡ブリッジ」を破壊する力が大きくなり短絡頻度が減ると考えられる。加工深さが浅い場合には第1の理由が支配的で、加工深さが深くなるに従い第2の理由の影響が大きくなると考えられる。以上より短絡電流による加工特性への影響は仕上加工条件において顕著になると考えられる。

3. 短絡電流防止回路

3.1 極間短絡の検出原理

以上考察したように放電加工の際、短絡時に電流をそのまま流すと、短絡が長時間継続し、電極の傷や異常消耗を引き起こす恐れがある。したがって、短絡電流によりスラッジが集められないようにするためには、極間が短絡したときに電流を流さないようにすることが必要になる。そこで、放電休止中に短絡状態かどうかを判定し、短絡時には電流を流さない方法について検討を行った。この短絡時に電流を流さないための回路を、以下では「短絡電流防止回路」と呼ぶ。図8に短絡電流防止回路の原理を示す。図に示すように休止時間中に極間が短絡かどうかを判定し、極間が短絡していない場合は次のパルスを印加し、短絡時には

図8 短絡検出の方法

次のパルスを印加しないという制御を行った。

3.2 短絡電流防止回路の効果

短絡電流防止回路において、その効果を調べるための実験を行った。以下に本報で行った実験の実験条件を示す。放電加工機は三菱電機株式会社製放電加工機V35Fを使用した。加工条件は、トランジスタ回路による矩形波の電流パルスと電流の立ち上がりにスロープのある電流パルスを用いた。詳細を表1に示す。

実験内容は、実際の加工事例における、短絡電流によるさまざまな諸問題を具体的に選定したものである。それぞれ通常回路と短絡電流制御回路との比較を行い、その効果の検討を行った。

表1 加工条件

電源電圧	80V
ピーク電流値	3.5~15A
ONタイム	16 μ s~256 μ s
極性	逆極性
電極	銅, Poco製グラファイト電極(EDM3)
ワーク	スチール

3.2.1 Gr電極への付着物

(1) 加工内容および実験条件

短絡電流防止回路は、スラッジを介した極間の短絡に起因する問題を改善することを目的としている。そのため、短絡電流防止回路の効果が顕著な加工例は、電極形状が複雑な場合などのようにスラッジの排出が困難な場合が多い。

例として、図9に示すようなテーパ形状のグラファイト電極によりスチール材(SKD11)を加工する場合がある。このようなテーパのある形状の場合、電極のジャンプ動作を行ってもスラッジが排出されにくいという問題がある。以下に加工条件等を示す。

- ・ワーク：SKD11 (Steel)
- ・電 極：テーパ形状グラファイト電極 (図9)
- ・加工条件：
 - I_p 15A, ON48 μ s, OFF64 μ s
 - I_p 10A, ON32 μ s, OFF16 μ s
 - I_p 5.5A, ON16 μ s, OFF16 μ s

電極材質：Gr
液処理：無噴流

テーパの面に
粒粒が付着する

図9 Grテーパ電極

I_p 5.5A, ON4 μ s, OFF8s μ

の多段加工

・液処理：無噴流

(2) 実験結果

上記の条件により加工した結果、電極のテーパ部分に油（加工液）の分解物と考えられるカーボンの付着現象が発生した(図9)。電極にこの付着物が付くためワークに転写された凹みができる。この付着物は瘡蓋状のものであり、引っかくと容易に剥がれてしまう。このような付着現象は、休止時間やジャンプの条件等の実験パラメータを変更しても、なくすことができない。これはこの付着物が通常アークと呼ばれる集中放電によりできたものとは異なり、スラッジあるいは油（加工液）の分解物が集中したことによりできたものと考えられる。加工中には短絡が頻繁に発生している。本例は短絡電流防止回路を用いることで、電極に付着物が付かないようにすることができた。

図10に加工結果の写真を示す。短絡電流防止回路を使用した場合は傷の無いきれいな面に仕上がっているが、短絡電流防止回路を使用しない場合は、加工面に凹みができているのが観察される。この凹みは荒加工の段階でできたので、仕上加工は行っていない。

3.2.2 電極・ワークの傷

(1) 加工内容および実験条件

つぎに、電極・ワークの傷を減らす効果について検討した。図11に示すような電極において、あらかじめ荒加工を行い、その後、荒加工電極より少し大きい仕上電極で仕上加工を行う。液処理として、加工液を電極の側面より噴射する。仕上加工電極は荒加工電極より少し大きいので、仕上加工

短絡電流防止回路なし

短絡電流防止回路あり

図10 Grチーバ電極による加工結果

図11 半円筒銅電極

図12 半円筒電極での加工

工の始めは電極の側面で放電する。以下に加工条件等を示す。

- ・ワーク：SKD-61 (Steel)
- ・電極：半円筒銅電極 (図11)
- ・加工条件： I_p 9A, ON96 μ s
- ・電極本数：2本 (荒加工用, 仕上げ加工用)
- ・液処理：無噴流

(2) 実験結果

本加工では、図12に示すように、特に加工液の出口側になる位置において加工屑が停滞し、電極に傷が付き、ワークに転写されてしまう。加工状態を観察していると、スラッジによるとと思われる短絡が頻繁に発生する。短絡電流防止回路を適用

した場合と適用しない場合のワーク加工面の拡大写真を図13に示す。短絡電流防止回路を使用しない場合ワークに小さな傷ができていますが、短絡電流防止回路を使用した場合は傷がなく、短絡電流防止回路の効果が確認できた。

短絡電流防止回路なし

短絡電流防止回路あり

倍率×50

倍率×50

図13 銅半円筒電極による加工結果

4. 極間短絡の解消 短絡ブリッジ除去回路

前節において、短絡電流

に起因する問題点を解決するため極間短絡時に加工電流を停止する「短絡電流防止回路」を試作しその効果について確認した。本節では、前節での結果をふまえて、短絡電流を停止する場合の効果を保ちつつ、さらに極間短絡状態を積極的に解消し加工速度を向上する方法について検討を行う。

前節において報告した短絡電流防止回路は、極間短絡を休止期間中に検出し短絡電流を流さないという受動的な方法である。つまり、短絡電流を流さないにはするが、積極的に短絡を解消する方法はとっていないため、短絡に起因する加工速度の低下にはほとんど効果がない。これは極間が短絡して短絡電流が流れると短絡ブリッジを成長させて極間短絡時間が長くなるために加工速度が低下するということがある一方で、スラッジが極間にわずかに触れた程度の軽い短絡状態の場合には、短絡電流が流れることによる熱エネルギーにより短絡が解消してしまうため短絡電流を停止する場合より早く回復する場合があるためであると考えている。ここではこのような観点から、短絡ブリッジの成長を防止すると同時に、高速加工を実現するため、短絡現象を積極的に取り除く方法について検討を行う。

4.1 短絡ブリッジ除去の原理

短絡状態の原因は、多くの場合電極とワークとの間に存在するスラッジを介した短絡であると考えている。そのため短絡状態がしばらく続くと、極間距離が広がり、図14のように、短絡ブリッジの径は小さくなると考えられる。

前節において考察したように、極間短絡時には短絡電流が流れることにより、次の2つの作用が働くと考えられる。

- (1) 短絡電流により発生する電磁力によりスラッジが集中する力
- (2) 短絡電流のエネルギーにより短絡ブリッジを破壊する力

スラッジが集まり短絡ブリッジが成長するというのは、(2)の作用より(1)の作用による影響が大きい状態であると考えられる。

一方、短絡ブリッジが細い状態で電流をながせ

図14 短絡ブリッジ

ば、(2)の影響が(1)の作用を上回り、電流のエネルギーにより短絡ブリッジを破壊できると考えられる。

スラッジを集中させず短絡ブリッジを成長させないためには、短絡電流を停止することが必要であるが、短絡ブリッジを成長させないようなタイミングで電流を流せば短絡解消に効果があると考えられる。

4.2 短絡ブリッジ除去回路の構成

短絡ブリッジ除去回路は前報で述べた短絡電流防止回路に、短絡ブリッジ除去のためのパルスの発生機能を付け加えたものである。以後、両者の機能を併せて短絡電流制御回路と呼ぶ。

短絡していた場合にパルスの印加を停止するとともに、短絡の継続時間をカウントし、カウンタが設定値に達したときに、極間に電流パルスを印加するという構成である(図15、図16)。de Bruyn⁷⁾により高ピークでパルス幅の短い電流パルスを印加することにより加工の安定化を実現できるという報告があるが、極間短絡時に電流を流すことは短絡ブリッジの成長につながるため、短絡ブリッジ除去のためのパルスは、極間短絡が十分長い期間継続した後で破壊しやすくなった短絡ブリッジに対して印加するのがより効果的である。

図15 短絡パルスのカウント

図16 短絡ブリッジ除去パルス

図17 短絡解消率 (I_p = 15A)

4.3 短絡ブリッジ除去回路の効果

4.3.1 短絡解消率

つぎに短絡ブリッジ除去パルスによる短絡状態の解消の効果について示す。

(1) 実験条件

極間短絡時に短絡ブリッジ除去パルスを印加し、その直後に短絡が解消されているかどうかの頻度を調べた。なお、計測は加工深さが2mm毎に行った。以下に加工条件等を示す。

- ・工 作 物 : SK3 (Steel)
- ・電 極 : □10mm銅電極
- ・加工条件(設定ノッチ) : I_p 15A, ON256μs, OFF48μs

- ・加工深さ : 10mm
- ・液 処 理 : 無噴流

(2) 実験結果

短絡ブリッジ除去パルスが、継続状態にある短絡の解消に、どの程度効果があるのかを調べるため、加工深さごとに短絡解消率を測定した。短絡解消率の推移を図17に示す。

短絡ブリッジ除去パルスにより、短絡状態をほぼ100%解消することができた。これにより短絡状態が継続することを防止でき、加工速度が向上できると考えられる。

4.3.2 短絡頻度

(1) 実験条件

短絡ブリッジ除去パルスにより、短絡頻度がどの程度変化するかを調べるため、短絡電流防止回路のみの場合と、さらに短絡ブリッジ除去回路を付加した場合において、その比較を行った。全パルス信号と短絡パルスをカウンタにより計測する。なお、計測は加工深さが2mm毎に行った。全パルス数と短絡パルス数との比により、短絡頻度が求められる。

短絡頻度(%) = 短絡パルス数 / 全パルス数 × 100
である。以下に加工条件等を示す。

- ・工 作 物 : SK3 (Steel)
- ・電 極 : □10mm銅電極
- ・加工条件(設定ノッチ) : I_p 10A, ON128μs, OFF16μs

- ・加工深さ : 8mm
- ・液 処 理 : 無噴流

(2) 実験結果

短絡電流防止回路のみを用いた場合と、短絡電流防止回路と短絡ブリッジ除去回路を併用した場合において、短絡発生頻度を測定した結果を図18に示す。短絡ブリッジ除去パルスを適用することにより、短絡発生が減少することがわかる。

4.3.3 仕上加工速度および電極消耗比

表2 加工速度・電極消耗比の比較

加工条件	短絡電流制御回路なし		短絡電流制御回路あり	
	電極消耗比 (%)	加工速度 (mg/min)	電極消耗比 (%)	加工速度 (mg/min)
$I_p 3.5A, ON16\mu s, OFF16\mu s$	4.0	10.7	4.3	17.1
$I_p 5.5A, ON32\mu s, OFF32\mu s$	2.0	24.9	2.4	38.2
$I_p 15A, ON256\mu s, OFF256\mu s$	0.30	175	0.38	234

(1) 実験条件

仕上加工条件により、短絡電流防止回路、短絡ブリッジ除去回路を搭載した電源と搭載しない電源において加工を行い、加工速度(mg/min)と電極消耗比(%)を求め、その比較を行った。以下に加工条件等を示す。

- ・工 作 物 : SK3 (Steel)
- ・電 極 : 中空円筒銅電極(図19, 外径 $\phi 10mm$, 内径 $\phi 5mm$)
- ・加工条件 : 表2に示す。
- ・加工時間 : 1時間
- ・液 処 理 : 噴出加工(噴出圧0.98kPa)

(2) 実験結果

短絡電流防止回路、短絡ブリッジ除去回路を付加した電源と付加しない電源において、測定した加工速度と電極消耗比の結果を表2に示す。短絡電流防止回路、短絡ブリッジ除去回路を付加した場合は、付加しない場合と比較して、仕上げ加工速度が大幅に向上し、電極消耗はほとんど変化がなかった。

4. 結 論

放電加工の仕上加工特性に顕著な影響を与える短絡電流に関して実験および考察を行った結果以下の結論を得た。

- (1) 短絡電流により加工屑(スラッジ)が集まり短絡ブリッジを形成する。そのため短絡が長時間継続し、加工速度の低下・電極の異常消耗などを引き起こす。
- (2) 短絡電流防止回路により、加工屑(スラッジ)の排出不良による極間短絡に起因する電極の異常消耗、および工作物へのダメージ(ピンボール、ピット)の発生を防止することが確

図18 短絡頻度

電極 : Cu $\phi 10mm$ 液穴あり
ワーク : SK-3

図19 加工速度比較テスト電極

認できた。

- (3) 短絡ブリッジ除去パルスにより、極間短絡現象を解消できることが確認できた。
- (4) 短絡ブリッジ除去パルスにより、極間短絡の頻度を減らすことができた。
- (5) 短絡ブリッジ除去回路により短絡を回避することで、仕上げ加工が安定し、加工速度が大幅に向上した。

参考文献

- 1) 須田, 佐田 : 放電加工の極間における導体粒子の挙動, 電気加工学会誌, Vol.7, No.14, 19-28, 1974

- 2) 元木, 小野, 上出: 放電加工のギャップ現象, 電気加工学会誌, Vol.8, No.15, 44-53, 1974
- 3) 平, 向山: 不燃性加工液における放電除去機構の解明(第2報) - 極間現象の観察 -, 第1回電気加工学会全国大会講演論文集, 57-58, 1991
- 4) 平, 向山: 不燃性加工液における放電除去機構の解明(第3報) - 加工液特性の影響について -, 第2回電気加工学会全国大会講演論文集, 13-14, 1992
- 5) 国枝, 森: 放電加工における加工精度のシミュレーション, 電気加工技術, Vol.17, No.56, 11-23, 1993
- 6) 土屋, 金子, 安部: 放電加工における加工屑の挙動(第1報) - 側面間隙の観察 -, 第3回電気加工学会全国大会講演論文集, 35-38, 1993
- 7) H.E.de Bruyn: A stable process with trapezoidal pulses, Proceeding of the 7th International Symposium for Electromachining, 77-86, 1983

(1995年10月19日受付)