ジャンプフラッシング放電加工の等価モデル (第1報)

— 電気回路によるモデル表現 —

土屋政光* 金子勉* 安部泰浩* 佐藤清侍**

Equivalent Model of Jump Flushing EDM (1st Report)

— Proposal of a Model Represented by Electric Circuit —

Masamitsu TSUCHIYA, Tsutomu KANEKO, Yasuhiro ABE and Seiji SATO

Abstract

In the diesinking EDM, the jump flushing is generally known to be useful to clean up the working gap. However, it is very difficult to adjust the jump parameters efficiently such as an amplitude and an execution timing of the jump motion with progress of machining. Because, in this process, optimal values of such parameters change widely with progress of machining and to adjust them an extensive expert knowledge about the jump control is required. Therefore, if a numerical equivalent model of the jump flushing EDM can be framed, it will be very useful for adaptive adjustment of the jump parameters.

This report describes a newly proposed equivalent model of the jump flushing EDM represented by an electrical way. Increasing process of the machining products in the working gap is converted to the charging process of a condenser in a DC electric circuit. Efficient jump timing is able to be computed from the rising time of the terminal voltage of the condenser to a threshold value which corresponds to critical density of the machining products for the safety sparking.

Results of computer simulations based on the proposed model show that the machining characteristics of the jump flushing EDM could be reproduced sufficiently except for the very early stage of machining. Besides, it was found that approximate optimal values of the jump parameters could be computed easily.

* 山形大学工学部

** 三菱電気(株)名古屋製作所

1. まえがき

形彫り放電加工においては、周期的なジャンプ（電極引き上げ）動作を付加することにより、極間の加工屑をフラッシング（排出）させている。この場合、ジャンプ動作のパラメータは、異常放電を回避すると同時に、与えられた加工条件のもとで最大の加工速度が得られるように設定する必要があるが、パラメータの最適値は加工の進行と共に変化する。このため、一般のNC放電加工においては、パラメータを加工プログラムで適応的に変更させているが、適切なパラメータの変更を行なわせるためには、あらかじめ膨大な加工データを採取しておく必要がある。このような場合、ジャンプフラッシング放電加工に関する数式モデルが作成されれば、オフラインでのシミュレーションも可能となり、最適パラメータ設定への対応が容易になると考えられる。

本研究においては、ジャンプ動作開始のタイミングを異常放電の前駆信号によって与える場合¹⁾を想定し、ジャンプフラッシング加工のモデル表現と定式化について検討した。極間における加工屑の発生および分布については、本来、確率現象として取り扱う必要があり、これに関する研究²⁾³⁾が報告されているが、本研究においてはモデルを単純化し、直感的な把握を容易にするために、電気的な等価回路を用いて表現することを試みた。

2. モデル化と等価表現

2.1 基礎的な加工特性

ジャンプフラッシング放電加工の動作は、電極がジャンプ動作を行い加工屑を排出するフラッシングプロセスと電極が所定の位置に復帰して実際に放電加工を行う加工プロセスとに大別される。また、ジャンプ量 h を固定して放電加工を行った場合の加工特性、すなわち加工深さ l と電極送り速度 F との関係は図1ようになる。この場合の加工条件を表1に示すが、ジャンプ動作のほかに放電状態に

図1 基本的な加工特性

表1 加工条件

工具電極	銅円筒（陽極） 直径10mm
加工物	S45C
放電パルス	パルス幅：200 μ s デューティ比：0.5 ピーク電流値：19.2A 無負荷電圧：300V
ジャンプ速度	2.46mm/s

応じた極間の自動制御が行われている。

図1の加工特性における F の変化は、それぞれの h に対して F の極大値と加工限界深さが存在することを示している。これらの加工特性について、以下のように考察する。まず、 l の小さい範囲において F が低い値を示す原因としては、加工初期における放電の不安定さがあげられる。すなわち、 l が小さい場合は、加工屑の排出が容易で極間の加工屑量が少なく、放電を継続させるために極間隙が小さくなるように制御される。このため、極間の直接的な短絡や短時間の異常放電の発生を伴い、放電が不安定になり F が低い値を示す。 h を大きく設定した場合には、加工初期の不安定性が l の大きい範囲まで持続されるものと考えられる。一方、極間の加工屑の排出は l の増加と共に制限されるようになり、一時的には放電が安定化し F の増加がみられる。 l がさらに大きくなると加工屑の排出が困難になり、加工屑量の増加を原因とした異常放電を発生し、 F が急激に低下することになる。 h を増加すると、加工屑の排出効果が増して加工限界深さは大きくなるが、ジャンプ時間が大きくなるため F の極大値は低下する。

モデルの作成はこれらの加工特性を参考にして行うが、ジャンプフラッシングの目的を考慮して、基本モデルでは加工初期の放電不安定性は考慮しないことにする。以下に、円筒形電極を用いた場合を想定して、それぞれのプロセスにおける加工屑の挙動を考察し、モデル化と数式表現を行う。

2.2 フラッシングプロセス

この場合の加工屑の挙動を次のように単純化して考える。すなわち、ジャンプ動作が開始され電極が上昇すると、電極底部および側面の間隙には極間外部から加工液が流入する。次に、電極が降下し所定の位置に復帰する過程で、極間の加工屑の分布は平均化され、フラッシングプロセスが終了する。

電極が所定の位置に復帰したとき、電極底部、側面部に含まれる初期的な加工屑量 W_{b0} 、 W_{s0} は、復帰時のそれぞれの部分の体積を V_b 、 V_s とすれば、

$$W_{b0} = w_a V_b, \quad W_{s0} = w_a V_s \quad (1)$$

と表される。ここで、 w_a は平均加工屑密度で、ジャンプ動作開始時における電極底部および側面部の加工屑量をそれぞれ W_{bc} 、 W_{sc} とし、極間外部における加工液中の加工屑量を無視すれば、 w_a は次式で示される。ただし、 g_b 、 g_s は電極底部、側面部の平均加工間隙で、 R_E は電極半径である。

$$w_a = \frac{W_{bc} + W_{sc}}{\pi (R_E + g_s)^2 (h + g_b)} \quad (2)$$

W_{b0} 、 W_{s0} すなわち w_a が小さいほど、異常放電に移行する直前までの臨界的な加工プロセス時間(以下、臨界加工時間という) T_c が大きくなるものと考えられる。式(2)によれば、 w_a の値は h を増加することにより小さくできるが、 h の増加は加工にはむだ時間であるジャンプ時間 $T_j = 2h/u$ の増加を伴うことになり、次式で示されるジャンプフラッシング加工のデューティ比 η を考慮して、 h を

設定する必要がある。ただし、 u はジャンプ動作における平均の電極昇降速度で、 T_w は放電開始からジャンプ動作が開始されるまでの加工プロセス時間である。ジャンプ動作開始のタイミングが適切に与えられた場合は、 $T_w = T_c$ となる。

$$\eta = \frac{T_w}{T_w + T_j} = \frac{T_w}{T_w + \frac{2h}{u}} \quad (3)$$

また、 T_w 中の平均の電極送り速度を F_w とすると、ジャンプフラッシング加工における実際の電極送り速度 F は、次式で表される。

$$F = \eta F_w \quad (4)$$

2.3 加工プロセス

電極が所定の位置に復帰すると電極底面部において放電を開始し、同時に加工屑と気泡を発生する。発生した加工屑は、気泡の浮上⁴⁾や電極間隙の微量制御に伴う液流によって、一部は電極の側面間隙を通過して極間外部に排出され⁶⁾、他は電極底面部や側面部の極間に蓄積される。

極間に蓄積された加工屑量が増加し、加工屑密度が臨界値を越えると放電が集中して異常放電に移行するものと考えられる。加工が進行し加工深さ l が増大すると、極間外部への加工屑の排出が困難になり、電極底面部、側面部に蓄積される加工屑量 W_b 、 W_s の増加が急激になる。したがって、 T_w 中の加工屑の発生速度 M_0 が一定の場合は、 l の増大と共に臨界加工時間 T_c が減少することになる。

モデルの定式化に当たっては、極間における加工屑量の増加過程と RC 回路においてコンデンサ C に充電される電荷量の増加過程との間に類似性があることから、図 2 の等価回路を想定して数式表現する。この場合、幾つかの仮定を設け、電気量とジャンプフラッシング加工の諸量との間には次のような対応をもたせた。

(i) 円筒形電極を用いた場合の放電すなわち加工屑の発生は、電極底面部においてのみ行われ、底面部の平均の加工屑密度 w_b が臨界値 w_{bc} ($w_{bc} = W_{bc}/V_b$) に到達した時点で異常放電を発生するものとする。

(ii) ジャンプ動作開始のタイミングは、 w_b が w_{bc} に到達する直前 ($T_w = T_c$) の時点で与えられるものとする。

(iii) パルス条件が一定の場合は加工屑の発生速度 M_0 は一定で、電流源 I_0 に対応させる。

(iv) 底面部および側面部間隙の体積 V_b 、 V_s を静電容量 C_1 、 C_2 にそれぞれ対応させる。

(v) V_b 、 V_s に蓄積される加工屑量 W_b 、 W_s を C_1 、 C_2 に蓄積される電荷量 q_1 、 q_2 に対応させる。

(vi) 加工屑排出の難易を抵抗 r_b 、 r_{s1} 、 r_{s2} で表現する。 r_b は底面部から側面部への排出抵抗で、 r_{s1} 、 r_{s2} は側面部の排出抵抗を表すものとする。

図2 加工プロセスの等価回路表現

(vii) 加工間隙 g_b, g_s は一定とする。

以上の仮定に従えば、図2の等価回路における加工屑量 W_b, W_s と時間 t との関係は、 $r_1 = r_b + r_{s1}$, $r_2 = r_{s2}$ として次の微分方程式で示され、

$$\frac{dW_b}{dt} + \frac{dW_s}{dt} + \frac{W_s}{r_2 V_s} = M_0 \quad (5)$$

$$-\frac{W_b}{V_b} + \frac{dW_s}{r_1 dt} + \frac{W_s}{V_s} \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right) = 0 \quad (6)$$

$t = 0$ で $W_b = W_{b0}$, $W_s = W_{s0}$ とすれば、その解は次式によって与えられる。

$$W_b = A_b + B_b e^{-\kappa_1 t} + C_b e^{-\kappa_2 t} \quad (7)$$

$$W_s = A_s + B_s e^{-\kappa_1 t} + C_s e^{-\kappa_2 t} \quad (8)$$

ただし、 κ_1 および κ_2 は時定数 ($\kappa_1, \kappa_2 > 0$) であり、これらを、

$$\kappa_1 = p_1 - p_2, \quad \kappa_2 = p_1 + p_2 \quad (9)$$

とすれば、 p_1, p_2 は以下のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= \frac{V_b(r_1 + r_2) + V_s r_2}{2V_b V_s r_1 r_2} \\ p_2 &= \frac{1}{2} \sqrt{(2p_1)^2 - \frac{4}{V_b V_s r_1 r_2}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式(7), (8)の各係数は以下の式で示される。

$$\begin{aligned}
 A_b &= \frac{\alpha_b}{\kappa_1 \kappa_2} \\
 B_b &= \frac{1}{\kappa_1 - \kappa_2} \left(\frac{\alpha_b}{\kappa_1} - \beta_b + \gamma_b \kappa_1 \right) \\
 C_b &= -\frac{1}{\kappa_1 - \kappa_2} \left(\frac{\alpha_b}{\kappa_2} - \beta_b + \gamma_b \kappa_2 \right) \\
 \alpha_b &= \frac{M_0 (r_1 + r_2)}{V_s r_1 r_2} \\
 \beta_b &= M_0 + \frac{W_{b0} (r_1 + r_2) + W_{s0} r_2}{V_s r_1 r_2} \\
 \gamma_b &= W_{b0} \\
 A_s &= \frac{\alpha_s}{\kappa_1 \kappa_2} \\
 B_s &= \frac{1}{\kappa_1 - \kappa_2} \left(\frac{\alpha_s}{\kappa_1} - \beta_s + \gamma_s \kappa_1 \right) \\
 C_s &= -\frac{1}{\kappa_1 - \kappa_2} \left(\frac{\alpha_s}{\kappa_2} - \beta_s + \gamma_s \kappa_2 \right) \\
 \alpha_s &= \frac{M_0}{V_b r_1} \\
 \beta_s &= \frac{W_{b0} + W_{s0}}{V_b r_1} \\
 \gamma_s &= W_{s0}
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 A_s &= \frac{\alpha_s}{\kappa_1 \kappa_2} \\
 B_s &= \frac{1}{\kappa_1 - \kappa_2} \left(\frac{\alpha_s}{\kappa_1} - \beta_s + \gamma_s \kappa_1 \right) \\
 C_s &= -\frac{1}{\kappa_1 - \kappa_2} \left(\frac{\alpha_s}{\kappa_2} - \beta_s + \gamma_s \kappa_2 \right) \\
 \alpha_s &= \frac{M_0}{V_b r_1} \\
 \beta_s &= \frac{W_{b0} + W_{s0}}{V_b r_1} \\
 \gamma_s &= W_{s0}
 \end{aligned} \tag{12}$$

なお、初期の加工屑量 W_{b0} , W_{s0} は式(1),(2)で与えられる。

3. シミュレーションの方法

3.1 基本パラメータ量の設定

モデルに使用されるパラメータの値は、パルス条件などによって変化する。ここでは、表1の条件で行なった実験結果に基づいて、基本パラメータの設定を試みる。

(1) 加工屑発生速度 M_0

放電加工の際に発生する加工屑は、電極および被加工物から除去される導電性粒子や加工液の熱変質物などによるものと考えられるが、加工条件とこれらの生成物との定量的な関係は明らかにされていない。そこで、加工プロセス時間 T_W 中の電極送り速度 F_W を、 $h=0$ における F の極大値を参照して、 $F_W=0.17\text{mm}/\text{min}$ と想定する。この値は、加工速度 $1.75\text{mg}/\text{s}$ に相当するから、その他の生成物を考慮して $M_0=2\text{mg}/\text{s}$ と設定することにする。

(2) 臨界加工屑量 W_{bc} , 加工屑排出抵抗 r_b , r_{s1} , r_{s2}

W_{bc} および r_b , r_{s1} , r_{s2} の値を推定するために以下の実験を行なった。すなわち、実際のジャンプ・フラッシング加工を行い、電極がある深さ l まで進入した時点で加工を停止し、 h を l に対して十分大きく設定してフラッシングさせる。このとき、 $W_{b0}=W_{s0}=0$ と見なすことができる。次に、再び放電パルス印加して放電加工を開始させ、放電が開始された時点をも $t=0$ とし、異常放電が発生するまでの時間 T_c を計測する。図3は、表1の加工条件に対する T_c の測定結果と後述する r_s の計算結果である。放電が安定化する $l>2\text{mm}$ の範囲に着目すると、 T_c の値は l の増加と共に急激に低下し、 $l>15\text{mm}$ ではほぼ一定値 ($T_c \approx 0.6\text{s}$) を示している。このことから、 l の増加と共に r_s が急増し、 $l>15\text{mm}$ においては極間外部への加工屑の排出が極めて少なくなるものと推察される。いま、 $T_c=0.6\text{s}$ の間に発生する加工屑量 $M_0 T_c$ の大半 (たとえば80%) が底面部の極間に蓄積されると仮定すると、 $W_{bc}=0.8 M_0 T_c=0.96\text{mg}$ と推定される。

加工屑に対する排出抵抗は、加工深さの外に電極半径や加工間隙、さらに、気泡の発生量、加工屑の大きさや重量など多くのパラメータに関係して定まるものと考えられるが、これらの関係を定量的に表現することは困難である。そこで、円筒形電極の半径 R_E が一定の場合は r_b は一定と仮定し、 $r_{s1}=r_{s2}=r_s/2$ で r_s は l のみの関数で表現できるものとした。

まず、 r_b の推定法について述べる。 l が小さく ($2\sim 3\text{mm}$)、短時間の異常放電が発生するような場合には、 $t=\infty$ における W_b が W_{bc} にほぼ等しいと考えられる。式(7)において $t=\infty$ とすると $W_b=A_b=V_b M_0 (r_b+r_{s1}+r_{s2})$ となり、 $V_b M_0 (r_b+r_s)=W_{bc}$ の関係が得られる。 $V_b=\pi R_E^2 g_b$ において、電極半径 $R_E=5\text{mm}$ 、底面部の間隙 $g_b=0.08\text{mm}$ とし、前述の M_0 , W_{bc} の値を代入

図3 加工深さ l に対する臨界加工時間 T_c の測定値と排出抵抗 r_s の計算値

すると $(r_b + r_s) = 72.7 \text{ s/cm}^3$ となる。

この程度の加工深さにおいては、 r_b に対する r_s の割合が小さいと考え、 r_b の値を 65 s/cm^3 と設定することにした。

次に、 r_s の推定法について述べる。式(7)の右辺に M_0 、 r_b および任意の加工深さ l 、さらに図3の曲線から求めた l に対する T_c を代入する。このときの左辺は仮定(1)より W_{bc} に等しいから、等号が成立するように r_s の値を決定することができる。 l を変え同様の計算を

繰り返すことにより、図3に示す l と r_s との関係を求め、最小二乗法を用いて r_s の近似値を求めた。

以上のようにして設定したパラメータの値および実測値を参照した平均の電極昇降速度 u 、加工間隙 g_b 、 g_s の設定値および r_s の近似式の係数を表2に示す。なお、 r_s の近似式の適用範囲は $l \leq 15 \text{ mm}$ であり、 $l > 15 \text{ mm}$ に対しては $r_s = 225 \text{ s/cm}^3$ 一定とした。

3.2 シミュレーションの手順

式(1)～(2)および r_s の近似式に、表2のパラメータ値を与えてシミュレーションを行うことにより、加工深さ l と臨界加工時間 T_c 、デューティ比 η および最適ジャンプ量 h_e などの関係を求めることができる。

まず、 T_c 値は加工時間 t と W_b との関係の計算において、 $W_b = W_{bc}$ となる加工時間から求める。この場合、 h を固定し、 $l=0$ から適当なステップで l を増加させ計算を進めて行くが、初期値 W_{b0} 、 W_{s0} の計算における w_a の値は、 $l=0$ では $w_a=0$ とし、以降のステップでは直前のステップにおける W_{sc} ($t=T_c$ における W_s) の値と式(2)から求めている。次に η の値は、式(3)において $T_w = T_c$ とし求めた。また、 h_e の値は、 h をステップ的に変化してそれぞれ h に対する l と η との関係を求め、ある l に対し最大の η を示す h を出力させた。

4. シミュレーション結果

前述の手順に従いシミュレーションを行った。この場合、作成したモデルには加工初期の不安定性が考慮されていないので、シミュレーション結果は不安定性が回避された場合の加工特性に対応するものと考えられる。

図4は、 $h=0.4 \text{ mm}$ にしたときの t と W_b との関係のシミュレーション結果である。加工深さ l が大きくなると W_b の初期値 W_{b0} が増加し、 $W_b = W_{bc}$ となる時間 T_c が減少することを示している。図5は、

表2 パラメータの設定値

加工屑発生速度	M_0	2 mg/s
臨界加工屑量	W_{bc}	0.96 mg
底面部加工間隙	g_b	0.08 mm
側面部加工間隙	g_s	0.125 mm
底面部排出抵抗	r_b	65 s/cm^3
側面部排出抵抗	r_s	$\alpha_0 + \alpha_1 l + \alpha_2 l^2 + \alpha_3 l^3 \text{ (s/cm}^3\text{)}$
$(l \leq 15 \text{ mm})$		$\alpha_0 = 2.01, \alpha_1 = -3.86$
		$\alpha_2 = 2.96, \alpha_3 = -0.107$
		l : 加工深さ mm
$(l > 15 \text{ mm})$		255 s/cm^3

図4 加工屑量 W_b の増加過程に及ぼす加工深さ l の影響

図5 初期加工屑量 W_{b0} , 臨界加工時間 T_c と加工深さ l との関係 (h : ジャンプ量)

図6 電極送り速度 F と加工深さ l との関係

l と T_c および W_{b0} の関係における h の影響を示したものである。 h を大きくすると同一の l に対する W_{b0} の値が低下しており、その結果 T_c が増加するものと考えられる。また、 $W_{b0} \geq W_{bc}$ の場合は、 l が限界深さに到達したことを示している。図6は、 h をパラメータとしたときの l と F との関係であり、図1の加工特性に対応する。この場合の F の値は、 η の計算結果と式(4)とから求めている。 h を一定にした場合は、 l が

図7 適応的に選択されたジャンプ量 h_e と電極送り速度 F_e

ある値に達すると F が急激に低下し、 h を増加するとこの限界的な加工深さが深くなることが示されている。

図6において、それぞれの l に対し F が最大となる部分を連結した包絡曲線が、 l の増加に対し h を適応的に制御したときの加工速度 F_0 の変化であり、対応する h が最適ジャンプ量 h_0 を示すことになる。このようにして求めた l と h_0 および F_0 との関係を図7に示す。

以上のシミュレーション結果は、提案した数式モデルがジャンプ・フラッシング加工の定性的特定を、表現可能であることを示している。今後、パラメータ設定方法の一般化、電極形状に応じた加工屑発生源の配置などについて検討することにより、より広範囲な加工条件に対するモデルの適用が可能になるものと考えられる。

5. むすび

ジャンプ・フラッシング放電加工のモデルを単純な数式で記述するために、電気的な等価回路を用いたモデル表現を試みた。この場合のモデルは、フラッシングプロセスと加工プロセスとに分けて表現したが、作成したモデルとそのシミュレーション結果は、次のように要約される。

- (1) フラッシングプロセスについては、ジャンプ動作に伴い極間外部から吸引された加工液により、極間に蓄積された加工屑が平均化されることで表現できる。
- (2) 加工プロセスについては、極間に蓄積される加工屑とコンデンサの充電電荷との間に対応をもたせ、加工屑排出の難易を抵抗の概念で表現することにより、モデル化が可能である。
- (3) 作成したモデルを用いたシミュレーション結果は、比較的大まかなパラメータの設定にもかかわらず、加工深さの増加に伴う特性の変化を表現できることを示している。

今後は、実際の加工現象との対応からより適確なパラメータの設定を図り、モデルの妥当性を向上させると共に、より広範囲な条件に対するモデルの適用を可能にしたい。

参考文献

- 1) 土屋政光, 金子 勉, 佐藤清侍: ジャンプフラッシング放電加工に関する研究(第1報) — ジャンプ動作の適応制御 —, 精密工学会誌, 56, 5(1990) 849-854.
- 2) 増沢隆久, 佐田登志雄, 木下夏夫: 放電加工における加工くずの役割, 精密機械, 37, 9(1971) 52-58.
- 3) 真柄秀樹, 国枝正典, 新井 進: 放電加工における放電分散のシミュレーション, 昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, E39(1987) 483-484.
- 4) 橋口清人, 山本武久: 液中過度アーク放電に伴う気泡の運動と衝撃力, 電気加工研究会資料, 52-

1(1968) 15-28.

- 5) 宮島譲治, 国枝正典, 増沢隆久: 放電加工における気泡挙動の観察, 昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, D62 (1987) 723-724.
- 6) 国枝正典, 増沢隆久: 放電加工における加工閑隙の直接観察, 昭和61年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, 941 (1986) 989-992.

(1991.12.6 受付)