研 究

ジャンプフラッシング放電加工の等価モデル (第2報)

—パルスデューティ比の影響*—

土屋政光** 金子 勉** 安部泰浩***

Equivalent Model of Jump-Flushing EDM (2nd Report)

—Influence of Duty Factor of Working Pulse—

Masamitsu TSUCHIYA, Tsutomu KANEKO and Yasuhiro ABE

Abstract

This study aims to represent the characteristics of the jump-flushing EDM by a simple mathematical model in order to realize suitable selections of jump parameters through computer simulations.

In the previous report, we proposed a basic model from a consideration of similarity between the increasing process of machining products in the working gap and the charging process of a capacitance in the DC electrical circuit. As a result, that model showed validities to represent a change in machining characteristics and jump parameters with progression of machining.

In the present report, we propose an expanded model in which influences of duty factor of working pulses are taken into consideration. Computer simulations based on the new model showed that suitable jump parameters and rest time of working pulse are able to be estimated. Further expansion of the model will be possible by considering influences of peak current or pulse duration in the similar way of the duty factor.

* 1991年, 第1回電気加工学会全国大会にて発表

** 山形大学工学部

*** (株)アドバンテスト

1. まえがき

本研究は、ジャンプフラッシング放電加工（以下ジャンプ加工という）に関するもので、極間における加工屑の増加プロセスおよびフラッシングプロセスを単純な数式モデルで表現し、モデルを用いたシミュレーションを通じて、最適なジャンプパラメータを設定することを目的としている。前報¹⁾においては、電気回路を用いた基本的な等価モデルを提案し、基本モデルによるシミュレーションの結果から、加工深さに応じた加工特性や最適ジャンプ量の変化を表現可能であることを示した。

基本モデルにおいては放電パルス条件を一定にしたが、実際の放電加工においては、加工目的によって適合したパルス条件が選択される。一般には、加工の各段階で加工面粗さと電極消耗率を考慮してパルス電流とパルス幅の値が設定され、さらに加工の進行に伴いパルス休止時間が調整される。ジャンプ加工においても、ジャンプパラメータの外にパルス休止時間の影響について検討する必要がある。

本報告においては、パルス休止時間の影響を加味したモデルパラメータの設定について検討し、拡張されたモデルを用いたシミュレーション結果について述べる。なお、シミュレーションは、ジャンプ動作のタイミングが異常放電予測システムによって与えられる場合²⁾（以下タイミング制御ジャンプという）とジャンプ周期をステップ的に調整する一般的な場合（以下定周期ジャンプという）とについて行った。

2. シミュレーションの方法

2.1 基本モデル

前報¹⁾で提案した基本モデルについて簡単に説明する。基本モデルでは、円筒形電極における加工屑のふるまいを、加工プロセスとフラッシングプロセスとに分けて記述した。

加工プロセスについては、電気回路を用いて極間の加工屑量の増加過程を表現した。すなわち、コンデンサ充電回路における電流源 I_0 、静電容量 C_1 , C_2 、電荷量 q_1 , q_2 、抵抗 r_1 , r_2 とジャンプ加工における諸量との関係を図1のように対応させ、電極底面部および側面部に蓄積される加工屑量 W_b および W_s と時間 t との関係を、式(1)および式(2)によって表現した。

$$W_b = A_b + B_b e^{-\kappa_1 t} + C_b e^{-\kappa_2 t} \quad (1)$$

$$W_s = A_s + B_s e^{-\kappa_1 t} + C_s e^{-\kappa_2 t} \quad (2)$$

ただし、式中の係数 A_b , B_b ・・・や時定数 κ_1 , κ_2 などは、加工プロセスに関するパラメータ（加工

図1 加工プロセスの等価回路表現

屑発生速度： M_0 、電極底面部、側面部の加工間隙： g_b 、 g_s および加工屑排出抵抗： r_b 、 r_s など）や加工深さ l を用いて算出される。

また、フラッシングプロセスにおいては、電極にジャンプ動作を与えて極間の加工屑を清浄化（初期化）するが、ジャンプ動作終了時の底面部、側面部の加工屑量の初期値 W_{b0} 、 W_{s0} は、 V_b 、 V_s をそれぞれの部分の体積として、次式で与えられる。

$$W_{b0} = w_a V_b, W_{s0} = w_a V_s \quad (3)$$

ただし、 w_a はジャンプ動作終了時の極間の平均加工屑密度で、ジャンプ動作開始時の底面部、側面部の加工屑量を W_{bc} 、 W_{sc} とし、 R_E を電極半径、 h をジャンプ量として、次式で表される。

$$w_a = \frac{W_{bc} + W_{sc}}{\pi(R_E + g_s)^2(h + g_b)} \quad (4)$$

これらのプロセスは、まず、前回のフラッシングプロセスが終了し電極が所定の位置に復帰すると、加工プロセスに移り円筒形電極の場合には電極底部において放電を開始し、 W_b は式(1)に従って増加する。 W_b が臨界加工屑量 W_{bc} に到達すると異常放電を発生すると考え、この時間を臨界加工時間 T_c と定義する。タイミング制御ジャンプにおいては $W_b = W_{bc}$ になる直前の加工時間 $t = T_c$ で次のジャンププロセスに移行する。 W_b の初期値 W_{b0} は、式(3)によって与えられる。

2.2 パルスデューティ比とモデルパラメータ

放電パルスのパルス幅を τ_{on} 、休止時間を τ_{off} とすれば、パルスデューティ比 D は次式で表現される。

$$D = \frac{\tau_{on}}{\tau_{on} + \tau_{off}} \quad (5)$$

D を変数とした場合は、モデルに用いられる M_0 、 g_b 、 g_s などのパラメータに D の変化を加味する必要がある。例えば、前報¹⁾における M_0 の設定は、 $D=0.5$ における加工プロセス中の平均加工速度（電極送り速度） $F_w=0.17\text{mm/min}$ の測定結果から、

加工物の除去速度 1.75mg/s ($R_E=10\text{mm}$)を求め、その他の生成物を考慮して $M_0=2\text{mg/s}$ を推定している。この場合の F_w は D によって変化するから、 D と F_w との関係を把握する必要がある。

図2中の F_w は、その他の加工条件を一定にし D を変化させたときの測定結果であり、 F_w が D に対して飽和特性をもつことが示されている。これは、 D を過大にすると放電の不安定要因が発生し F_w の増加を妨げるものと考えられる。 F_w に対する加工屑の発生

図2 デューティ比 D とモデルパラメータ (F_w , M_0 , g_s)との関係

割合を $D=0.5$ の場合と同様に考えると、 D と M_0 との関係も図 2 に示すような飽和特性をもつことになる。また、 D の変化に対する電極底面部の加工間隙 g_b の変化は少なく 0.08mm 程度の値を示すが、側面部の平均加工間隙 g_s の値は図 2 のように変化する。

以下のシミュレーションにおいては、 D によるパラメータの変化を F_w 、 M_0 および g_s のみに限定して考え、図 2 の曲線を基にそれぞれの近似式を最小二乗法により求めた。また、加工屑の排出抵抗 r_b 、 r_s は、加工深さ l と異常放電が発生するまでの臨界加工時間 T_c との関係の測定結果をもとに式(1)を用いて算出する。前報¹⁾では、 T_c の測定を各加工プロセスにおける初期加工屑量 $W_{b0} = 0$ となる条件下で行ったが、本報告ではジャンプ量 h を 0.8mm に固定した加工実験を通じて T_c の変化を測定した。

これらのパラメータは、 D および l を変数として、式(6)および式(7)に示すようにいずれも 3 次の多項式で表現することにしたが、

$$F_w, M_0, g_s = a_0 + a_1 D + a_2 D^2 + a_3 D^3 \quad (6)$$

$$r_s = a_0 + a_1 l + a_2 l^2 + a_3 l^3 \quad (7)$$

式中の係数の値は、各パラメータに対して表 1 のように決定される。その他のパラメータは、表 2 のように一定値に設定した。

表 1 モデルパラメータの係数

パラメータ	a_0	a_1	a_2	a_3
F_w	0.0237	0.453	-0.357	0.0678
M_0	0.276	5.27	-4.08	0.771
g_s	0.104	0.00764	0.0720	-0.0118
r_s				
$l \leq 10\text{mm}$	2.65	6.27	-1.66	0.368
$l > 10\text{mm}$	-1060	2000	-114	2.16

表 2 モデルパラメータの設定値

電極半径	R_E	5 mm
電極昇降速度	u	2.46mm/s
底面部加工間隙	g_b	0.08mm
底面部排出抵抗	r_b	70 s/cm ³
保持時間	T_h	0.133s

2.3 シミュレーションの手順

シミュレーションは、まず、表 1、表 2 および式(6)、式(7)で与えられるパラメータを式(1)～(4)に代入し、時間 t と W_b との関係を算出させ、 $W_b = W_{bc}$ となる臨界加工時間 T_c を求め、 T_c およびジャンプ加工の加工速度 $F(\text{mm/min})$ に対する D の影響について検討する。

図 3 に、ジャンプ加工のタイムチャートを示す。図 3 (a)における T_w および T_f はそれぞれ加工プロセス WP、フラッシングプロセス FP の時間を示しており、ジャンプ周期 $T = T_w + T_f$ である。また、臨界加工時間 T_c の値は、ジャンプパラメータの設定値や加工深さ l などによって図 3 (b 1)～(b 3) のように変化する。このため、 F を求める場合には、これらの状態を判別し、有効な加工時間 T_{we} を基に算出する必要がある。

タイミング制御ジャンプの場合は、図3(b1)のように $T_{we}=T_w=T_c$ の条件が維持され、最も効率的な加工が持続される。これに対し、定周期ジャンプの場合はジャンプパラメータ(T, h)が設定されると T_w が従属的に定まるため、これらの関係で図3(b1)～(b3)のいずれかの状態となる。すなわち、ジャンプタイミングが異常放電の発生直前に設定された場合は図3(b1)の状態、タイミング制御と同様 $T_{we}=T_w < T_c$ となる。図3(b2)は、 T_c に対し T_w が小さ過ぎる場合であり、 $T_{we}=T_w < T_c$ となり有効な加工が中断されることになる。 T_c に対して T_w が大き過ぎる場合は、図3(b3)のように $T_{we}=T_c < T_w$ となり、 $T_w > T_c$ の加工プロセス時間においては有効な加工が行われないだけでなく、異常放電を発生することになる。

加工速度 F はこれらのことを考慮して算出させる。すなわち、ジャンプ加工における有効加工時間 T_{we} のデューティ比 η_o は次式で示され、

$$\eta_o = \frac{T_{we}}{T} = \frac{T_{we}}{T_w + T_f} \quad (8)$$

加工速度 F は式(9)で与えられるものとする。

$$F = \eta_o F_w \quad (9)$$

ただし、フラッシングプロセス時間 T_f は、ジャンプ量を h 、平均の電極昇降速度を u とし、電極が最上部に到達し下降動作に移るまでの保持時間 T_h を考慮して、次式で与えられる。

$$T_f = \frac{2h}{u} + T_h \quad (10)$$

式(10)における u および T_h の値は、 F の計算値に影響を及ぼす。以下のシミュレーションにおいては、モデルパラメータ設定のための基礎実験に用いた放電加工装置の値を参照して、 $u=2.46\text{mm/s}$ 、 $T_h=0.133\text{s}$ に設定した。

3. 基本特性の計算結果

図4(a), (b)は、ジャンプ量 h を 0.1mm および 0.6mm とした場合について、加工深さ l 一定における加工時間 t と電極底面部の加工屑量 W_b との関係の計算結果で、パルスデューティ比 D を変数(0.25, 0.5, 0.75)としている。図4の結果は、 W_b が臨界加工屑量 W_{bc} に到達するまでの時間 T_c が、加工深さ l 、ジャンプ量 h に影響され、さらに、 D を大きく設定すると W_b の増加が急になり、 T_c が短くなることを示している。この場合、初期加工屑量 W_{b0} も h , l , D に影響されている。 W_{b0} が h の増加に

図3 ジャンプフラッシング加工のタイムチャート

図4 加工屑 W_b の増加過程に及ぼすデューティ比 D の影響

よって低下するのは、式(4)より明らかであり、 W_{b0} が l 、 D によって変化するの、式(4)における W_{bc} が l 、 D に依存するからである。

図5は、 l と T_c の関係の計算結果であり、いずれの場合も l の増加と共に T_c が急減するが、 h が小さく D の大きい場合に T_c が小さく、 $T_c \approx 0$ となる臨界的な加工深さ l_c が小さくなることが示されている。これは、 h が小さく D が大きい場合には W_{b0} が大きくなり、さらに、 D が大きい場合には M_0 が大きくなり、 T_c を減少させるからである。

図5 臨界加工時間 T_c に及ぼすデューティ比 D の影響

このような T_c の計算結果と式(8)、(9)とから、

タイミング制御ジャンプと定周期的ジャンプの場合の加工速度 F を求めることができる。

図6(a)は、タイミング制御(h は0.1および0.6mm一定)の場合の F の計算結果で、 F が D の影響を受け、特に l の小さい範囲および大きい範囲(l_c 付近)において D の影響が大きいことが示されている。図6(b)は、同じ加工条件における F の実測例であるが、放電が不安定な加工の初期や小変動部を除いては、図6(a)によってその定性的な傾向が表現されていると判断される。

これらの基本特性の計算結果は、ジャンプ加工の基本特性に関する経験的な知識¹⁾²⁾を表現しており、シミュレーションを通じて最適パラメータの値を選択可能であることを示している。また、定周期ジャンプの場合についても、 T_c の算出結果を図3の(b1)～(b3)に対応させて T_{we} を求め、同様にして F を算出させることができるが、これについては次章で述べる。

図6 加工速度 F に及ぼすデューティ比 D の影響

4. 最適パラメータの選択

前述のモデル式を用いて、タイミング制御および定周期ジャンプ加工における最適パラメータ (D , h , T) の選択を試みる。この場合の計算における各パラメータの変化ステップ ΔD , Δh , ΔT は、それぞれ 0.05, 0.05mm, 0.1s に設定した。

4.1 タイミング制御ジャンプ

この場合は、 $T_{we} = T_c = T_w$ を前提に F を算出させた。

図7は、 D 一定 (0.25, 0.5, 0.75, 0.9) の条件で、 l の増加に応じて最大加工速度 F が得られるように h を選択させた場合の計算結果である。最適な h が選択された結果、加工初期 ($l < 1.5\text{mm}$) および D を特に小さく ($D=0.25$) あるいは大きく ($D=0.9$) 設定した場合を除き、 F に対する D の影響は少ないことが分かる。ただし、同じ l に対し D が大きいほど大きな h が選択されている。一方、 $D=0.5$ で $l < 1.5\text{mm}$ の場合および $D=0.25$ で $l < 5\text{mm}$ の場合は、いずれも $h=0$ が選択されている。これは、このような条件においては加工屑の発生量よりも排出量が多いため $T_c = \infty$ となり、ジャンプ動作を付加する必要がないことを示している。

図8は、 h と D を適応的に選択させた場合の計算結果であるが、 l の小さい範囲においては $h=0$ で $T_c = \infty$ となる D が大きい方から順に選択されており ($D: 0.7 \sim 0.25$)、 $l=5\text{mm}$ 付近からジャンプ動

図7 最適ジャンプ量 h と加工速度 F との関係におけるデューティ比 D の影響

作が開始され、以降 h , D の適応的な選択が行われている。この場合の h , D の 選択範囲は、 h については $0 \sim 1.2 \text{ mm}$ であり、 D については $0.25 \sim 0.7$ であるが、 $l > 5 \text{ mm}$ における D の変化範囲は $0.6 \sim 0.45$ と比較的狭いことが示されている。

図 7, 図 8 の結果から、タイミング制御の場合は D を 0.5 程度に固定し、 h のみを適応制御することによっても F の低下を軽減した加工を維持できることが分かる。

4.2 定周期ジャンプ

定周期ジャンプにおいては、図 3 (b1) ~ (b3) の場合を判別して F を算出させる。また、この場合の最大加工速度を得るためには、 h , D の外に周期 T を適応的に調整する必要がある。

図 9 (a), (b) は、 $D = 0.25 \sim 0.75$ について T をそれぞれ 1.0 s , 1.6 s に固定し、 l の増加に応じて F が最大になるように h を選択させた場合の結果である。

T を固定した定周期ジャンプにおいては、 $T_w = T - T_f$ であり、 h の選択により T_w が従属的に決定されるため、 h の変化範囲は T によって制限される。この場合、 h を一定 (T_w を一定) として l を増加させると、 l の増加と共に T_c が低下し、 $T_w > T_c$ となる時点から F が急激に低下する。このため、図 9 においては、各 l に対して $T_w \approx T_c$ で h が最小、すなわち T_w が最大となる条件が

図 8 デューティ比 D 及びジャンプ量 h の最適調整結果と加工速度 F の変化

図 9 ジャンプ量 h の最適調整結果と加工速度 F との関係におけるデューティ比 D の影響

選択されている。また、 T を1.0sに設定した図9(a)の場合は h が小さ目に、 $T=1.6$ sに設定した図9(b)の場合は h が大き目に選択されており、 D の大きいほど h が大きき選択されている。

図10は、 h 、 D と T を適応的に選択した結果であり、タイミング制御の場合(図8)と同様の傾向が示され、 l の増加に伴う F の変化にも大差はない。パラメータの選択も、加工屑の排出が比較的容易な l の小さい範囲においては、 $h=0$ で $W_b(\infty) < W_{b0}$ となる D が大きい方から順に選択され、 $l=5$ mm付近から h 、

D および T の適応的な選択が行われている。この場合の T の選択は、 $T = T_w + T_f$ (T_f は h に依存)において $T_w = T_c$ となるように行われる。図10における T の変化は、 $l < 5$ mmにおいては $T = \infty$ であるのが $l=5$ mm付近において $T=0.8$ sに低下し、以降 h と共に T が増加している。これは、 l が大きくなると T_w 中の加工屑の排出が困難になるため、最適条件を保つために W_{b0} を小さく、すなわち h を大きく(T_f を大きく)選択する必要があるからで、 l の増加と共に T が大きき選択されるものと考えられる。

以上、タイミング制御ジャンプ及び定周期ジャンプの場合について、提案モデルを用いたシミュレーションを行い、シミュレーションを通じて最適なジャンプパラメータやデューティ比 D の選択が可能であることを示した。放電パルスの電流値 I やパルス幅 τ についても、モデルパラメータにこれらの影響を加味することにより、同様の取り扱いが可能と考えられる。また、円筒形以外の電極形状に関しても、加工屑排出抵抗などのモデルパラメータおよびフラッシング効率に電極形状の影響を加味することで対応が可能である⁹⁾。

5. 結 論

本報告は、前報⁹⁾で提案したジャンプフラッシング放電加工の基本モデルの拡張に関するもので、拡張モデルを用いたシミュレーションを試み、以下の結論を得た。

- (1) 放電パルス条件、例えばデューティ比の影響をモデルパラメータに加味することにより、基本モデルを拡張することができる。
- (2) 拡張モデルを用いたシミュレーションを通じて、加工進展に伴う最適なジャンプパラメータやデューティ比の変化傾向を予知することができる。

図10 デューティ比 D 、ジャンプ量 h 及びジャンプ周期 T の最適調整結果と加工速度 F

- (3) シミュレーションは、タイミング制御ジャンプと同様に、定周期ジャンプについても行うことができる。
- (4) ジャンプパラメータを適応的に制御した場合には、加工速度に対するデューティ比の影響はそれほど大きくない。

参考文献

- 1) 土屋政光, 金子 勉, 安部泰浩, 佐藤清侍: 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 -, 電気加工学会誌, 26, 51 (1992) 39.
- 2) 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.
- 3) 安部泰浩, 土屋政光, 金子 勉: 放電加工における適応制御 (第 5 報), - テーパー付き電極によるジャンプフラッシング加工の定性的モデル -, 1990年度精密工学会秋季大会講演会論文集, 1021.

(93. 4. 24 受付)