ワイヤ放電加工におけるワイヤ振動を考慮した システム同定 (第1報)*

山田 久** 毛利尚武*** 古谷克司† 成清辰生† 武沢英樹††

First report of System Identification in Wire Electrical Discharge Machining

Hisashi YAMADA, Naotake MOHRI, Katsushi FURUTANI, Tatsuo NARIKIYO and Hideki TAKEZAWA

In this paper, the behavior of wire vibration in machining process is studied by using a system modeled on the basis of experimental results. For the purpose of examining the behavior of wire vibration, dynamical changes in the material removal process must be taken into account. Therefore, a machining system set up is modeled where the interference between the vibration system of the wire electrode and the material removal system are considered. In this system, the material removal rate and the external force output from the material removal system are the input of the vibration system; whereas, the gap distance output from the vibration system is the input source of the material removal system. In order to analyze the modeled system, some simulations of the machining process are carried out. In the analysis of these simulations, a statistical method is applied to the wire displacement. Furthermore, the mean value and the magnitude of a simulated wire displacement are quantitatively compared with the measured results. Using the modeled system, the relation between wire vibration and state variables in the system are clarified.

Key words: electrical discharge machining, wire electrode, vibration, system identification

1. 緒 言

ワイヤ放電加工機は、機械的な位置決め制御技術や加工条件の最適化技術などの進歩に支えられて高精度加工の一翼を担ってきた。一方最近の金型製作などに見られる高精度化の要求は、工具電極であるワイヤの振動が無視できなくなっていることを示している¹⁾。これまでのワイヤ放電加工機では、可能な限り大きな張力でワイヤ振動を押さえ、その上振動の影響が少ない加工条件が設定されてきた。したがって特に高い精度を実現するには作業者の経験によらざるを得なかった。

形彫放電加工においては、電極変位に対する平均加工電圧の伝達関数は一般に一次遅れ系となることが示されているが²⁾³⁾、ワイヤ放電加工においてもワイヤ電極の振動の影響が無視できないにもかかわらずこれまでは同様の伝達関数が用いられてきた⁴⁾⁵⁾。一方、ワイヤ電極の振動変位挙動および加工精度との関係などに関して、従来より多数の研究がなされてきた⁶⁾⁷⁾⁸⁾。また、ワイヤ振動と加工パラメータとの関係を明らかにするシミュレーションの研究も行われている⁹⁾が、ワイヤの振動現象と放電現象とを同時に扱ったシステム方程式を得るには至っていない。

筆者らはこれまでに、ワイヤに作用する力は加工時に瞬間的に変動する極間距離に強く依存することを示した¹⁾⁹⁾。したがってワイヤ振動の加工精度に及ぼす影響を論ずるには、ワイヤの瞬時変位と加工除去量に関する考察が必要である。

本論文は、各加工条件に対する加工除去量をワイヤ振動の影響を考慮して高精度に推定可能なシステムを得ることを目的としている。ワイヤ放電加工における加工システムを、ワイヤの振動と加工除去量とを同時に扱う数学的モデルとして表現する。さらに、実測データに基づくシステム同定を行うことにより、システム内部の状態量とワイヤ振動との関係を明らかにする。

2. ワイヤ振動を考慮したワイヤ放電加工システムのモデル化

2.1 ワイヤ電極振動系の測定方法と振動モデル

加工中のワイヤに作用する力の作用点は、放電点の分散と共に加工物の板厚方向に沿って移動する。筆者らは、加工中のワイヤ振動変位の実測値を用いて、放電によってワイヤに作用する力をモーダル解析することが可能であることを示している¹⁾が、ここでは放電点の位置の影響を無視できるように薄板を用いた解析を行う。

ワイヤ振動の測定に使用した実験装置の概略を図1に、実験条件を表1に示す。図1において、ワイヤ電極は、加工物の上下に位置する2つのワイヤガイドで支持され、一定張力のもとで上方から下方に走行する。さらに、加工の進行とともに、加工物に対してワイヤガイド位置を相対的に移動させることにより

Fig. 1 Measurement setup for wire displacement

Fig. 2 Wire vibration system model (1st mode)

Fig. 3 Cross section in the gap between the workpiece and the wire electrode

* 原稿受付 平成17年8月16日

** 正会員 三菱電機(株)名古屋製作所(名古屋市東区矢田南5-1-14)

*** 正会員 東京大学大学院工学系研究科(東京都文京区本郷7-3-1)

† 正会員 豊田工業大学(名古屋市天白区久方2-12-1)

†† 正会員 工学院大学(八王子市中野町2665-1)

Wire electrode	φ 0.200mm, brass
Wire guide	Internal diameter: φ0.205mm
Workpiece	Stainless steel 1mm in thickness
Pulse setting	Open-circuit voltage u_i : 80V Peak current of discharge i_e : 145A Discharge duration t_e : 0.7μs
Distance between two support guides L	76mm
Tension of wire T	9.5, 13.6, 17.5N
Wire winding rate	145mm/s
Working fluid	Deionized water (Conductivity: 15μS) Flow rate: upper 1.0l/min, lower 1l/min

Fig. 4 Displacement of wire electrode in real machining process

加工を継続することができる。加工中のワイヤの振動変位とは、2つのワイヤガイドの中心軸を基準にして、光学式の変位測定装置（オプトフォロー 7100C, (株) ヤーマン）を使用して測定した。使用した変位測定装置は、周波数特性500kHz, 測定精度0.2μmの精度を有する。

次に、ワイヤ振動系を考察する。特に、薄板をワイヤガイド間の中央に配置した場合には、加工中のワイヤ振動の1次モードの振幅が他のモードに比較して卓越していることがわかっている¹⁾。そこで、図2に示すようなワイヤ振動の1次モードに着目した振動モデルを考えた。ワイヤガイド間の中央におけるワイヤの変位を静止系に対して x_E 、ワイヤガイドの変位を x_G と表記すると、ガイドに対するワイヤ振動変位は両者の相対変位 $x_E - x_G$ で表される。また、加工物は加工の進行によって除去されるから、ワイヤ電極に対向する加工物表面は後退する。これを加工面変位として x_W と定義する。これらの位置関係を図3に示す。したがって、ワイヤ電極振動系に関する運動方程式および極間距離 l (進行方向のワイヤ前面と対向する加工面との距離) は以下のようになる。

$$m\ddot{x}_E + c\dot{x}_E + k(x_E - x_G) = F \quad (1)$$

$$l = x_E - x_W \quad (2)$$

ここで、 c は減衰係数、 F はワイヤに作用する外力、 k はワイヤ電極の等価ばね定数 ($= 4T/L$)、 T はワイヤ張力、 L はガイド間距離、 m はワイヤ電極の等価質量 ($= k/\omega_{01}^2$)、 ω_{01} は一次固有角振動数 ($= (\pi/L)\sqrt{T/\gamma}$)、 γ はワイヤの線密度である。

2.2 加工除去系のモデル

加工除去系においては、放電の発生によって加工物が除去されるときにワイヤには圧力が作用する。一方、単位時間当たりにワイヤに働く衝撃回数、すなわち放電頻度 f_e はワイヤの瞬間的な変位に依存することがわかっている¹⁾。そこで、極間距離 l 、外力 F 、加工面変位 x_W の3つの状態変数によってワイヤ振動系と加工除去系の2つの系の間で信号が伝達されるような加工システムをモデル化する。これらの状態変数はそれぞれ放電頻度の関数であるとする。以後、加工除去系をモデル化するにあたり、実験結果を基に関係式を導出する。

Fig. 5 Probability for each state of discharge

Fig. 6 Relation between gap distance and discharge frequency

2.2.1 放電頻度と極間距離

これまで、放電が発生した際のワイヤと加工物の位置関係について観察した報告¹⁰⁾がある。それに対してここでは、放電または短絡が発生した際のワイヤ振動変位を定量的に確率分布として求める。図4に0.1秒間の実加工におけるワイヤ変位 $x_M - x_G$ の実測結果を示す。これは、実加工領域における変位に変換したものではなく測定位置におけるデータそのものである。図4のグラフは、表1においてワイヤ張力 $T=17.5$ N, 加工送り速度を 3.0mm/min としている。解析を行う際には、ローパスフィルタ (カットオフ周波数 2.7kHz) を用いて観測位置 M における変位波形から1次モード (2.36kHz) のみを抽出して解析した。

ワイヤガイドに対するワイヤの相対変位を $x_{M/G} (= x_M - x_G)$ として、図5(a)にワイヤ変位 $x_{M/G}$ の確率密度、図5(b)にワイヤ変位に対する放電発生の確率 $N_d(x_{M/G})/N$ 、図5(c)に短絡の確率 $N_s(x_{M/G})/N$ を示す。これらも図4と同様に測定位置でのデータである。 x_M および x_G の位置関係は図3に定義した通りであり、 N_d , N_s の測定においては、加工電流をトリガとして検出した際の1サンプリング分をカウントした。ここで、 N はサンプル数、 $N_d(x_{M/G})$ はワイヤ変位 $x_{M/G}$ に対する放電発生数、 $N_s(x_{M/G})$ はワイヤ変位 $x_{M/G}$ に対する短絡発生数である。図5(b)より極間距離が狭ければ放電の発生確率は高く、変位が $-10\mu\text{m}$ から $15\mu\text{m}$ の範囲では極間距離の増大とともに放電発生確率はほぼ直線的に減少している。一方 $15\mu\text{m}$ 以上の変位に対しては放電発生確率が非常に小さい。すなわちこの間では事実上放電が発生しない、電気回路的には極間の開放状態を示す。したがって、放電が発生する極間距離には適当な範囲が存在

Fig. 7 Relation between machining feed rate and discharge frequency

Fig. 8 Block diagram of wire-EDM system

するとしてもよい。

以上の実験結果を基に、放電発生条件は極間距離によって短絡状態(S_s)、放電可能状態(S_d)および開放状態(S_o)に分類される。そこで、図6に示すように放電頻度の期待値を極間距離 l に対して直線近似的に表現した。 S_s は極間距離 $l=0$ の状態、つまりワイヤと加工物が接触している状態であり、極間には電圧が現れず短絡電流が流れる。この状態では放電は発生しないため、ワイヤには圧力が作用しない。放電可能状態 S_d では、極間電圧や加工液の絶縁破壊特性等によって決まる距離以内で放電が発生する。一般にワイヤ放電加工では、放電パルス幅を t_p 、休止時間を t_o として $t_p \ll t_o$ であるから、放電頻度の期待値は無負荷時間を t_d として、 $f_E = 1/(t_d + t_o)$ で表される。逆に、極間距離 l が短絡直前まで小さくなると無負荷時間 t_d が0に近づくため $f_E = 1/t_o$ に近づく。つまりワイヤに作用する単位時間あたりの衝撃回数の期待値が減少する。

これに対して、極間距離が大きくなると無負荷時間 t_d が大きくなり、放電頻度は低下する。極間距離が放電限界距離 l_m を越えて大きくなると放電が発生しないため $f_E = 0$ となり、ワイヤには力が作用しない(S_o)。以上をまとめると式(3)を得る。

$$f_E = \begin{cases} 0 & (l = 0: S_s) \\ f_0 \left(1 - \frac{l}{l_m}\right) & (0 < l \leq l_m: S_d) \\ 0 & (l > l_m: S_o) \end{cases} \quad (3)$$

2.2.2 放電頻度と加工除去速度との関係

次に加工速度と放電頻度の関係をモデル化する。加工送り速度 $\dot{x}_G$ を一定に指定した場合の、加工送り速度に対する平均放電頻度 f_E の関係を調べた。結果を図7に示す。図より、加工送り速度と平均放電頻度 f_E とはほぼ比例する関係にあることがわかる。また、極間距離が極めて小さい範囲を除けば放電痕の大きさは極間距離によらず一定であることが示されている¹¹⁾。よって、放電加工における加工速度は、放電痕除去量が一定であると仮定すれば、放電痕除去量と放電頻度の積で見積もることができる。これより板厚が一定であり、放電が継続する範囲であれば、加工送り速度 $\dot{x}_G$ と除去速度 $\dot{x}_w$ とは等しいと考えられるから、上記考えより除去速度 $\dot{x}_w$ は放電頻度 f_E に比例する。そこで、 α を単発放電除去量とすると除去速度 $\dot{x}_w$ は $\dot{x}_w = \alpha f_E$ で与えられる。

Table 2 Controllability and observability of each status

		k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	Controllability	Observability
S_s	Short circuit state	$\frac{k}{m}$	$\frac{c}{m}$	0	0	$\frac{V_0}{l_m}$	×	○
S_d	Discharge state	$\frac{k}{m}$	$\frac{c}{m}$	$\frac{\beta f_0}{ml_m}$	$\frac{\alpha f_0}{l_m}$	$\frac{V_0}{l_m}$	○	○
S_o	Open circuit state	$\frac{k}{m}$	$\frac{c}{m}$	0	0	0	×	×

2.2.3 放電頻度とワイヤに作用する外力の関係

放電加工中にワイヤに作用する力は、放電発生による加工液の気化爆発力、電圧印加時の静電力、加工液の流れによる圧力が考えられる⁷⁾。ここでは静電力が無視できる薄板加工を仮定し、かつ加工液の流れはほとんどないものとして放電発生による加工液の気化爆発力のみを考える。また、休止時間が短くなると放電一発当たりにワイヤに作用する圧力が単発放電圧力より小さくなるが¹²⁾、ここでは休止時間の十分に大きい範囲($t_o > 20 \mu s$)を扱うことにする。以上の仮定の基では、ワイヤに作用する外力 F は放電頻度 f_E に比例し、単発衝撃力積 β を用いて表すことができる。

2.3 システムモデル

これまでに述べたワイヤ電極振動系および放電除去系における仮定を基にして、加工システム全体をブロック線図で記述すると図8を得る。システム全体への入力ワイヤガイド変位 x_G であり、極間距離 l の関数である極間の平均電圧 $\bar{V}_E(l)$ と開放電圧 V_0 との差 $\bar{V}(l) = \bar{V}_E(l) - V_0$ が出力となる。以後、 $\bar{V}(l)$ をワイヤガイド変位 x_G に対する平均加工電圧と定義する。一般の極間制御においては、 $\bar{V}(l)$ をフィードバックする系が構成される。

加工システム全体は、ワイヤ振動系と放電除去系との2つのサブシステムからなる。これらの中で放電除去系から出力される加工除去速度 $\dot{x}_w$ および外力 F がワイヤ振動系の入力となり、ワイヤ振動系から出力される極間距離 $l = x_E - x_w$ が放電除去系の入力となる。ここで、ワイヤ振動系の伝達関数 $G_E(s)$ は次式で表される。

$$x_E = G_E \begin{bmatrix} F \\ x_G \end{bmatrix}, \quad G_E(s) = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \begin{bmatrix} l \\ k \end{bmatrix} \quad (4)$$

放電除去系では極間状態の切換えに、スイッチ要素を用いた。このスイッチ要素によって、放電頻度 f_E は放電可能状態 $0 < l < l_m$ において極間距離 l の関数として出力される。さらに、加工除去速度 $\dot{x}_w$ および外力 F が放電頻度 f_E に比例した量として出力される。また、放電可能状態および短絡状態では、加工電圧 $V(l)$ は極間距離に比例する関数となり、 $l > l_m$ のときは加工電圧 $V(l) = 0$ となる。

2.4 システム状態方程式とシステムの可制御性・可観測性

システムの状態方程式は次式で表される。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} \end{aligned} \quad (5)$$

システムの入力 $\mathbf{u}$ 、出力 $\mathbf{y}$ および状態変数 $\mathbf{x}$ を次式で定義する。

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [x_1, x_2, x_3]^T = [x_E, \dot{x}_E, l_m - l]^T \\ \mathbf{u} &= x_G, \quad \mathbf{y} = \bar{V}_E - V_0 \end{aligned} \quad (6)$$

行列 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ は、

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -k_1 & -k_2 & k_3 \\ 0 & -1 & -k_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ k_1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} &= [0 \quad 0 \quad -k_5] \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、

$$k_1 = \frac{k}{m}, k_2 = \frac{c}{m}, k_3 = \frac{\beta f_0}{ml_m}, k_4 = \frac{\alpha f_0}{l_m}, k_5 = \frac{V_0}{l_m} \quad (8)$$

次に、システムの可制御性および可観測性を検討する。式(7)において、短絡状態(S_s)、放電可能状態(S_d)および開放状態(S_o)

Fig. 9 Frequency modulation of displacement

Fig. 10 Flow Chart in Simulation

の3つの状態でそれぞれ $k_1 \sim k_3$ が異なる値を持つ。したがって、状態 S_1 , S_2 , S_3 によってそれぞれまったく内部状態の異なるシステムとなる。それぞれの状態における $k_1 \sim k_3$ の値および可観測性、可制御性を検討した結果を表2にまとめる。

ワイヤガイド変位 x_G に対する平均加工電圧 $\bar{V}(l)$ をフィードバックしてワイヤ送りを制御する方法では、放電可能状態(S_2)においてであり、可制御可観測性が保証される。一方、上記の開放状態(S_3)が存在すると、極間距離の観測が不可能な状態に陥る。また、短絡状態(S_1)および開放状態(S_3)が存在すると、ワイヤ送りによって目標の極間距離に制御することが不可能となり、システムの最適化を系統的に議論することはできない。

3. 極間モデルによるシミュレーション

前述で示したように、モデル化したシステム全体を評価するためには、現段階では内部の非線形性を考慮したシミュレーション以外にない。そこで、ワイヤ振動や加工送りおよび加工除去量を考慮してモデル化したシステムを評価するために、実加工結果と比較する。

3.1 シミュレーション方法

本シミュレーションには、市販のソフトウェア Simulink(The MathWorks, Inc.)を用いた。ここで、現実の放電加工現象を表現するため、以下の事項を仮定した。

(1) システムに対する入力、出力およびシステムの状態変数

シミュレーションにおいては、ワイヤ送り速度(ワイヤガイド速度) $\dot{x}_G$ を一定値として与え、入力であるワイヤガイド位置

Fig. 11 Simulated displacement (High machining feed rate $\dot{x}_G = 4.0 \text{ mm/min}$, $T = 17.5 \text{ N}$, $l_m = 30 \mu\text{m}$)

Fig. 12 Probability density of wire displacement

Table 3 Conditions for simulation

Tension of wire T [N]	9.5	13.2	17.5
Mass m [kg]	8.38×10^{-6}		
Spring constant k [N/m]	500	695	921
Natural frequency ω [rad/s]	7.73×10^3	9.11×10^3	1.05×10^4
Damping coefficient c [Ns/m]	1.96×10^2		
Maximum frequency $f_0 (= 1/t_0)$ [Hz]	3.33×10^4		
Maximum gap for discharge l_m [m]	3.0×10^{-5}		
α [m]	9.0×10^{-9}		
β [Ns]	1.41×10^{-6}		
Open circuit voltage V_0 [V]	80		

と加工物位置との相対変位を変化させる。ガイド変位 x_G に伴うワイヤ電極変位 x_E および加工面変位 x_W をシミュレーション結果として出力する。

(2) 放電頻度

システムのモデル化の際には放電頻度 f_E を期待値として取り扱った。シミュレーションでは、極間現象をモデル化したサブシステム (EDM system) において放電頻度を力積値 ($\beta = F_0 \tau$) として一定のパルス列であたえて現実の放電加工に近いシミュレーションとした。ここで τ は、力の作用時間 (パルス幅相当) を意味する。放電頻度は、極間距離の増加とともに直線的に減少するようにするため図9に示すようなPWM (Pulse Width Modulation) を用いて上記のパルス列の単位時間当たりの発生個数を図5にしたがって極間距離に応じて変化させる。なお、最小パルス間隔は設定休止時間 t_0 とした。

以上に述べた方法により、表3に示した条件に対するシミュレーションを実施した。シミュレーションのアルゴリズムを図10にまとめる。評価に当たっては、実測したワイヤ振動変位をその平均値が外力の方向に偏移する直流成分 (ワイヤ偏移) と、そのワイヤ偏移の周りで変動する成分とに分離して振動系に関する議論を行う。

3.2 シミュレーション結果

(1) 変位分布

表3に示すシミュレーション条件における $T = 17.5 \text{ N}$ の場合のシミュレーション結果を図11に示す。図11は、0.2s間の結果を、ワイヤ変位 x_E の時間推移をワイヤガイド変位 x_G 、加工面変位 x_W

Fig. 13 Comparison of peak position in power spectrum (a) (b) with frequency response (c) ($T=17.5\text{N}$, $L=76\text{mm}$)

と共に示している。ワイヤ送り速度を $v_g=4\text{mm/min}$ とした場合のワイヤガイド位置 x_g の変化に連れて加工物が除去される様子が示されている。

ワイヤ変位 x_E は、図4に示した実測結果と同様に、非常にランダムに振動する挙動を示している。この場合のワイヤガイド変位 x_g に対するワイヤ振動変位 ($x_E - x_g$) の分布を確率密度関数として図12に示す。図12に示すように、ワイヤ振動変位の確率分布は正規分布に近くなり、図5に示した実測結果の確率分布と傾向が一致する。

ワイヤ送り速度が遅い場合 ($v_g=2\text{mm/min}$ 以下) は、加工量が送り量を上回るため、放電が長時間停止する間欠放電となり、実加工と一致する。また、ワイヤ送り速度を大きくして $v_g=4\text{mm/min}$ を上回ると短絡状態が継続する。シミュレーションによって得られる繰返し放電が継続するワイヤ送り速度の範囲は、実測結果の送り速度の範囲 ($2.5 \sim 5.0\text{mm/min}$) にほぼ一致した。ただし、シミュレーションでは、特にワイヤ送り速度の大きい範囲で短絡が発生しやすく、加工可能なワイヤ送り速度の範囲が実加工に比べて狭い。これは、実加工においては加工粉の影響などで放電が生じ易くなった結果、極間距離が広がり、実加工における加工可能な範囲が本システムに基づくシミュレーション結果より広がっていることが理由と考えられる。

(2) 変位のスペクトル解析

加工時のワイヤ変位のスペクトルピークは、自由振動のスペク

Table 4 Comparison of peak position in power spectrum with frequency response

	$T=9.5\text{N}$	$T=17.5\text{N}$
Obtained from measured displacement	1.49kHz (1.2)	2.00kHz (1.6)
Obtained from simulated displacement (non-linear model)	2.00kHz (1.6)	2.36kHz (1.4)
Calculated from frequency response in system S_d (linear model)	2.50kHz (2.0)	2.73kHz (1.6)
Calculated from frequency response in free vibration	1.23kHz (1.0)	1.67kHz (1.0)

Fig. 14 Comparison between simulated and experimented displacement

トルピークから周波数の高いほうにずれる¹⁾。そこで、シミュレーション結果の変位に対する1次のスペクトルのシフト量に着目して、システムの非線形性を考慮したモデルの評価を行う。以下では、短絡 (S_s) や開放 (S_o) を含まない放電可能 (S_d) のみの状態は可観測性であり可制御性であるため線形システム、 S_s , S_d , S_o 全ての状態を含むシステムを非線形システムと定義する。

ワイヤ振動変位のスペクトル分布について、実測結果およびシミュレーション結果 (ワイヤ張力 $T=17.5\text{N}$ 、ワイヤ送り速度 4mm/min) をそれぞれ図13(a)(b)に示す。さらに線形システムとして表現され放電可能状態 S_d に対する変位の周波数応答を、 $T=17.5\text{N}$ について同図(c)に示した。その周波数応答は、ワイヤガイド変位 x_g に対する平均加工電圧 $\bar{V}(f) = \bar{V}_E(f) - V_0$ の伝達関数から求めた。式(6)より、伝達関数 $G_{s2}(s)$ は、次式に示す3次の式で記述される。

$$\begin{aligned}
 G_{s2}(s) &= C(sI - A)^{-1}B \\
 &= \frac{k_1 k_3 s}{s^3 + (k_2 + k_4)s^2 + (k_1 + k_2 k_4 + k_3)s + k_1 k_4} \\
 &= \frac{\frac{kV_0}{ml} s}{s^3 + (\zeta + \frac{f_0}{l_m} \alpha)s^2 + (\frac{k}{m} + \frac{f_0}{l_m} \alpha \zeta + \frac{f_0 \beta}{ml_m})s + \frac{kf_0 \alpha}{ml_m}} \quad (9)
 \end{aligned}$$

図13(a)～(c)に示されるそれぞれのピーク周波数について、ワイヤ張力 $T=9.7\text{N}$ および 17.5N とした場合の結果を表4に示す。表中の括弧中の数値は、自由振動を1として計算した値である。 $T=17.5\text{N}$ の場合、自由振動の共振周波数 (1.67kHz) に対し、実測結果で20%、シミュレーション結果で40%程度ピーク周波数が高いほうにシフトしている。これに対し、放電状態 S_d のみの線形システムの共振点は2.73kHzとなり、63%程度周波数が高いほうにシフトしている。したがって、短絡状態 S_s および開放状態 S_o を考慮したシミュレーションによって実測変位に近いスペクトル分布を得ることができていることがわかった。ただし、シミュレーション結果のピーク周波数が、実測結果のピーク周波数よりさらに20%程度高く現れている。これはシミュレーショ

ンにおいては、ワイヤ振動系を1自由度でモデル化したために、短絡の際のワイヤの慣性力の影響が省略されている。しかしながら実際にはワイヤは連続系であるので、ほとんどの質量が衝突点以外のところに分布する。したがって、実際の系では、慣性力の影響で1自由度モデルよりスペクトルピークの周波数が低くなっているものと考えられる。

(3) ワイヤ偏移および振動振幅

シミュレーション結果におけるワイヤ偏移を、ワイヤ振動変位 x_E-x_G の平均値によって表し、振幅の大きさを x_E-x_G の標準偏差で表す。図14に、張力 $T=9.5, 13.2, 17.5\text{N}$ に対するシミュレーション変位および実測変位から求めた放電頻度 f_E に対するワイヤ偏移を示す。ワイヤ偏移は、加工条件を一定とした実加工において測定した値であり、加工送り速度から決まる放電頻度 f_E に対応させている。ここで、それぞれの放電頻度 f_E は、ワイヤ送り速度 v_G を $-2, -3, -4\text{mm/min}$ とした際の単位時間あたりの実際の放電回数から求めた。なお、シミュレーション結果から求めたワイヤ偏移は実測値と同じ観測点における偏移に換算して示している。さらに単発放電力積の繰り返しから計算される平均値を用いて推定される静的変位 x_s を図中に破線で示す。図に示す静的変位 x_s は、張力が小さくなるほど実測のワイヤ偏移との誤差が大きくなった。これに対し、シミュレーションによって得られたワイヤ偏移は実測結果と定量的に良い一致を得ている。このことから、構築した加工システムモデルを用いて精度の高いワイヤ偏移の推定が可能と考えられる。

ただし、変位のスペクトルおよび偏移において、張力 $T=9.5\text{N}$ では特に放電頻度の低い領域で加工システムモデルによるシミュレーション値と実測値との誤差が大きくなっている。この範囲においては、先に述べた短絡の影響等、ワイヤ振動系を1自由度系としてモデル化した影響が表れているものと考えられる。

以上の評価結果より、モデル化したワイヤ放電加工システムは現実の系を非常によく表現していると考えられる。ただし、フィードバックされる平均加工電圧 $\bar{V}(t)$ は極間距離に対して強い非線形な量となるので、線形なシステムをモデル化してコントローラを設計した場合、極間距離を一定にする制御が保証されない。この原因は先に述べたように、放電可能状態 S_d の状態でシステムをモデル化して制御系を設計した場合には、共振周波数が2倍程度高い側にシフトすることによる。この場合、制御系のパフォーマンスに現実の系とのモデル化誤差が大きく影響してくると思われる。このように構造の異なるいくつかのシステムがある条件によって切り換わるような場合、そのシステムの制御系設計は極めて困難であり、ハイブリッド制御の設計が難しいこともあり現在までその設計法は確立されていない¹³⁾。そのため、現状では高精度な加工を行うためには極間距離を一定に保つために、熟練作業者の加工ノウハウが必要となっている。今後、極間制御による加工精度の向上を図る上で上記問題点を解決するための制御理論の確立が必要となると考えられる。

4. 結 言

ワイヤ振動挙動を検討する際に実加工中の極間の動的な変動

を考慮するために、加工システムをワイヤ電極の振動系と放電除去過程がお互いに干渉する系としてモデル化を行った。このモデル化したシステムによってシステム内部の状態量とワイヤ振動との関係を考察し、以下の結論を得た。

- (1) ワイヤガイド変位を入力とし、平均加工電圧を出力とした加工システムおよび内部の状態量に関して以下のことがわかった。
 - (a) ワイヤ振動を考慮した場合には少なくとも3次のシステムとなる。
 - (b) ワイヤ振動に伴う極間距離の変化に応じて短絡・放電・開放の異なった状態のシステムが構成される。したがって、システム全体は強い非線形性を示す。
 - (c) 短絡・開放状態においてはシステムの可観測性または可制御性が保証されない。
- (2) ワイヤ電極変位、ワイヤガイド変位および加工面変位の関係に関して、モデル化したシステムによってシミュレーションした結果、薄板加工における実測結果を良く表現していることを確認した。
- (3) 構築したシステムのモデル化を用いることにより、今後のワイヤ放電加工機における極間制御系の設計では、加工システムのモデル化と設計されたシステムを計算機上でシミュレーション評価を繰り返すことで、より高精度な制御系となりうる指針を得た。

参 考 文 献

- 1) H. Yamada, N. Mohri, N. Saito, T. Magara and K. Furutani: Modal Analysis of Wire Electrode Vibration in Wire-EDM, Int. J. Electr. Mach., 2 (1997) 19.
- 2) 山田久, 毛利尚武, 古谷克司, 齋藤長男, 真柄卓司: ワイヤ放電加工におけるワイヤ電極振動系の過渡応答, 精密工学会誌, **63**, 11 (1997) 1548.
- 3) 鳳誠三郎, 倉藤尚雄: 改定放電加工 (1961) 144.
- 4) 黒川一夫: 放電加工の伝達関数, 電気学会雑誌, **80**, 860 (1960) 571.
- 5) K. P. Rajurkar, W. M. Wang: On-Line Monitor and Control for Wire Breakage in WEDM, Annals of the CIRP, **43**, 1 (1994) 197.
- 6) F. Han, M. Kunieda, T. Sendai, Y. Imai: High Precision Simulation of WEDM Using Parametric Programming, Annals of the CIRP, **51**, 5 (2002) 165.
- 7) 堀尾健一郎, 木下夏夫, 福井雅彦: 放電ワイヤカットのワイヤ電極振動に関する研究 (第2報) ワイヤ電極振動の解明, 電気加工学会誌, **16**, 31 (1982) 1.
- 8) 小原治樹, 林卓郎, 大住剛: ワイヤ放電加工の静電気力と電磁力, 1997年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1997) 194.
- 9) 山田久, 毛利尚武, 古谷克司, 武沢英樹, 真柄卓司: ワイヤ電極振動に及ぼす単発放電衝撃力の影響, 精密工学会誌, **64**, 2 (1998) 297.
- 10) 平晋一郎, 向山芳世, 植松司: ワイヤ放電加工における電極の挙動と放電除去現象に関する研究 (第2報) -加工条件と電極振動の関係-, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1990) 1023.
- 11) 齋藤長男: 金属の放電加工における加工現象の基礎的研究, 大阪大学学位論文, (1962) 25.
- 12) K. P. Rajurkar, W. M. Wang, W. S. Zhao: WEDM-Adaptive Control with a Multiple Input Model for Identification of Workpiece Height, Annals of the CIRP, **46**, 1 (1997) 147.
- 13) B. Nennartson, M. Tittus, B. Egardt, S. Petterson: Hybrid System in Process Control, IEEE Control System, (1996) 45.