ワイヤ放電加工の放電爆発力の解析*

中瀬正博**, 小原治樹**, 大住剛**, 羽多野正俊**

Analysis of Explosive Load on Wire Generated by Discharge of Wire EDM

Masahiro NAKASE, Haruki OBARA, Tsuyoshi OHSUMI, and Masatoshi HATANO

Abstract

In this study, the explosive load acting on the wire surface generated by discharge on the rough cut and the finish cut of wire EDM is investigated. The hydrodynamic explosion process in the water-filled gap is numerically analyzed using adiabatic bubble expansion model, and the impulsive load of each discharge acting on the wire surface is calculated. The distribution function of the discharge number on the wire surface is derived and the total load acting on the wire generated by continuous discharges is estimated. Wire deflection caused by the total load is compared with the experimentally obtained wire deflection and also with the wire deflection derived from the simple model, assuming that the impulsive load of each discharge is constant and acts normally on the wire surface. Results show that; 1) the impulsive load vector on the wire surface of each discharge is not normal to the wire surface, 2) the value of impulsive load by each discharge depends on the skimmed depth and the location on the wire surface and 3) the results of analysis are able to explain the influence of the skimmed depth on the wire deflection of the finish cut and the rough cut.

Key words: wire EDM, finish cut, hydro-dynamical explosion process, impulsive load, wire deflection

1. 結 言

高精度なワイヤ放電加工を実現するためには、予め加工中のワイヤ挙動を推定する必要がある。コーナー以外の荒加工については、加工中のワイヤたわみの計測や加工精度の推定はある程度可能になっている^{1), 2)}。一方荒加工のコーナーや、仕上げ加工においてはワイヤは加工進行の側面方向にたわむが、このたわみ量を推定することは現在も容易でない。我々はこれまで荒加工、仕上げ加工中のたわみ計測を行い、静電気力の影響が大きいこと、また仕上げ加工の爆発衝撃力が荒加工の場合と大きく異なることなどを見いだしている³⁾。

本報告においては荒・仕上加工の放電時の爆発現象を解析して各放電によりワイヤに作用する衝撃力を求め、衝撃力がワイヤ表面上の放電位置や加工代によってどのように変化するかを調べる。

またワイヤ表面上の放電頻度分布計算式を導出し、連続放電により全体としてワイヤに作用する力を求め、これによるワイヤのたわみを単純モデルや計測値と比較した結果について述べる。

2. 放電頻度分布の計算式と作用力の単純モデル

2.1 放電頻度分布計算式

ワイヤ表面上の繰り返し放電によってワイヤに作用する全体の力を求めるためには、ワイヤ表面上に発生する放電の頻度分布を知る必要がある。最初に簡単なモデルを用いて放電頻度分布の計算式を導出する。ここで各放電による加工量は放電位置や加工代に関わらず一定とする。

Fig. 1に円弧仕上げ加工のモデルを示す。a)は凸部の加工の場合、b)は凹部の加工の場合である。

ワイヤ中心の移動速度と軌跡半径を V_w , R_w とすれば、半径 R のワーク面の加工速度 V_R は

$$V_R = V_w \frac{R}{R_w} \quad (1)$$

* 電気加工学会全国大会(1998)にて一部発表

** 富山大学工学部 (富山市五福 3190)

Fig.1 Concave and convex finish cut model

である。一方図のBの微小角 $d\theta$ に挟まれた単位長さのワイヤ表面 $r d\theta$ の加工量は、単発放電加工量(体積)を ΔW 、その面に発生する放電頻度、即ち単位時間当たりの放電数を df とすると、

$$df \Delta W = V_r dR = V_w \frac{R}{R_w} dR \quad (2)$$

となる。 R は3角形OABについて3角公式から、

$$R = \sqrt{R_w^2 + r^2 + 2R_w r \sin \theta} \quad (3)$$

であるから、これを θ で微分すれば

$$\frac{dR}{d\theta} = \frac{R_w r \cos \theta}{R} \quad (4)$$

となる。上式の dR を(2)式に代入すれば

$$\frac{df}{d\theta} = \frac{V_w}{\Delta W} r \cos \theta \quad (5)$$

となる。(5)式からワイヤ円周上の放電頻度が円弧経路半径 R_w に依存せず、 $\cos \theta$ に比例した分布形になることが分かる。

(5)式では経路の加工速度 V_w を用いている。一般に仕上げ加工では平均加工電圧を一定にするサーボ送りが用いられており、 V_w は加工代や経路半径によって大きく変化する。単純に平均加工電圧が同じ場合は全放電頻度が同じであり、またその時のワーク単位厚さ当たりの放電頻度 f_T も同じであると、 f_T を用いて(5)式を書き換える。
b)の凹面加工の場合は(5)式から

$$f_T = \frac{V_w}{\Delta W} r \int_{\theta=\theta_e}^{\theta=0} \cos \theta d\theta = \frac{V_w}{\Delta W} r (1 - \sin \theta_e) \quad (6)$$

となる。(6)式の $r V_w / \Delta W$ を(5)式に代入し、

Fig.2 Straight finish cut model

$$\frac{df}{d\theta} = f_T \frac{\cos \theta}{1 - \sin \theta_e} \quad (7)$$

が得られる。同様に凸面加工の場合は、

$$\frac{df}{d\theta} = f_T \frac{\cos \theta}{1 + \sin \theta_e} \quad (8)$$

が得られる。なおここで加工代 e_{Δ} 、 $e_{\square}$ と θ_e の関係は図から次式で与えられる。

$$e_{\square} = R_w + r - \sqrt{R_w^2 + r^2 + 2R_w r \sin \theta_e} \quad (9)$$

$$e_{\Delta} = \sqrt{R_w^2 + r^2 + 2R_w r \sin \theta_e} - R_w + r \quad (10)$$

従って、ワイヤ表面上の各放電によってワイヤに作用する力の各軸方向成分に(7)式、または(8)式の df をかけてワイヤ円周上で積分すれば、繰返し放電によってワイヤに作用する力が計算できる。

Fig.2の直線加工の場合には、加工代 e が

$$e = r(1 + \sin \theta_e) \quad (11)$$

であることを考慮して(11)式の $(1 + \sin \theta_e)$ を(8)式に代入し、単発放電による力の時間積分値(以降単発放電衝撃力と呼ぶ)の X, Z 方向成分 $\Delta F_X(\theta)$ 、 $\Delta F_Z(\theta)$ をワイヤ円周上で積分し、繰返し放電による X, Z 軸方向の全放電衝撃力(力の時間積分値) F_X 、 F_Z を求め、これを f_T で割って表せば

$$\frac{F_X}{f_T} = \frac{r}{e} \int_{\theta=90}^{\theta=\theta_e} \Delta F_X(\theta) \cos \theta d\theta \quad (12)$$

$$\frac{F_Z}{f_T} = \frac{r}{e} \int_{\theta=90}^{\theta=\theta_e} \Delta F_Z(\theta) \cos \theta d\theta \quad (13)$$

となる。

2.2 作用力の単純モデル

ワイヤ表面上に放電が発生したとき、その作用力はワイヤ表面に垂直に作用し、その大きさは放電位置や加工代に関わらず常に一定であるという単純なモデルを考える。このときワイヤ表面上の角度 θ における、経路の半径方向、接線方向成分 $\Delta F_r(\theta)$ $\Delta F_t(\theta)$ は、単発放電衝撃力の大きさを ΔF とすれば

$$\Delta F_r = \Delta F \sin \theta \quad (14)$$

$$\Delta F_t = \Delta F \cos \theta$$

である。これに (7) 式や (8) 式の df をかけて放電面で積分すれば、繰返し放電による r , t 方向の全放電衝撃力 F_r , F_t が求められる。しかし後述のように (14) 式を用いたワイヤたわみの計算値は実際の計測値と大きく異なっていた。その原因を調べるため、次に爆発現象の解析を行った。

3. 単発放電衝撃力の解析

3.1 解析ソフト

水で満たされた加工間隙中に瞬間的に高圧の気体が発生したとして、その気泡の断熱膨張過程を解析し、圧力分布からワイヤに作用する力とその時間積分値（単発放電衝撃力）を求める。この爆発現象は移動境界問題であり、固定メッシュでは解析がやっかいである。そこで今回は市販ソフト（CHAM-JAPAN 社, PHOENIX）⁴⁾ を用いて解析した。このソフトは固定メッシュであるが格子内の各相の成分比を用いて境界移動問題を扱うように構成されている。

3.2 円盤隙間内の爆発問題の解析

計算精度を調べるため最初に Fig. 3 のように 2 つの円盤に挟まれ、水で満たされた隙間で瞬間的に高圧の気泡が発生した場合の爆発現象を解析した。液の粘性がなく、慣性力のみを考慮した場合の理論解は既知であり、安達ら⁵⁾ によって解析されている。その理論は省略するが、ここではその理論解と数値解を比較した。気泡は断熱膨張するものとし、円盤外部は大気圧とした。水の物性値は後述の Table. 1 と同じであるが、この場合の気泡は空気物性値を用いている。

Fig. 4 にこのときの気泡の膨張収縮過程を示す。また Fig. 5 に気泡圧力の時間変化を示す。図では

Fig.3 Analyzed model of explosion in the gap between circular plates

Fig.4 Analyzed bubble expansion and collapse process

Fig.5 Analyzed bubble pressure associated with bubble expansion and collapse

Fig.6 Influence of gap width on bubble expansion process and bubble pressure

水の粘性を省略した場合の数値解と、粘性を考慮した場合の数値解、および理論解を比較した。図において爆発直後の1回目の気泡膨張収縮過程は3者ともほぼ同じであるが、2回目以降の気泡膨張収縮過程は数値解の気泡半径が小さくなっており、これに対応して気泡つぶれ時の気泡圧力変化はなだらかで小さくなっている。本来一致すべき粘性なしの数値解と理論解が一致していないが、気泡つぶれ時の気泡半径が小さいため、成分比を用いた解析方法の精度の影響があるのかもしれない。

最初の気泡膨張過程で数値解の粘性ありとなしにほとんど違いが見られないが、これは設定した間隙 0.02mm では慣性力の影響が大きく、粘性が重要な働きをしていないためと思われる。

Fig. 6 に間隙を変えた場合の気泡膨張と気泡圧力の時間変化を示す。理論以外は粘性を考慮している。間隙が小さいと粘性の影響が大きくなり、気泡膨張が遅く、これに伴って気泡圧力の減衰が緩やかになることがわかる。

Fig. 4 と Fig. 5 から初期気泡膨張過程については数値解と理論解がほぼ一致したが、気泡つぶれ過程については信頼できる解析結果が得られなかった。本来ワイヤには気泡膨張時とともに気泡収縮時にも圧力が作用すると考えられる。しかし従来の山田の研究⁶⁾ではワイヤ放電加工の場合のワイヤに作用する力の持続時間は 10 μ s 以下であるとされており、このことから気泡つぶれ時の力は無視できるものと思われる。それ故以下においては気泡膨張過程の作用力についてのみ議論する。

3.3 荒加工と仕上げ加工の単発放電衝撃力

Fig. 7 に荒加工と仕上げ加工の解析領域の例を示す。ワイヤ軸方向長さは、軸方向に圧力が緩やかに減少するように十分長く定めた。また解析に用いた物性値を Table 1 に示す。この場合の気泡は

Table 1 Constants used in analysis

Constants	Fluid : Water	Bubble : Steam (0.1MPa, 100℃)
Density ρ (kg/m ³)	998	0.586
Kinematic coefficient of viscosity (m ² /s)	1.004×10^{-6} (is set constant)	20.638×10^{-6} (is set constant)
Compressibility	$\kappa = (\Delta V/V)/p = 0.45$ (1/GPa)	$p/\rho \gamma = \text{constant}$ $\gamma = 1.33$
Initial bubble pressure (Pa)	10×10^6	
Outer pressure (Pa)	0.1×10^6

Fig.7 Analyzed region of rough and finish cut

Fig.8 Pressure distribution in case of rough cut discharged on front of wire

Fig.9 Pressure distribution in case of rough cut discharged on side of wire

水蒸気とした。液体と気体の動粘性係数は温度・圧力に依存しないとした。荒加工と仕上げ加工の加工条件は充電電圧 100V, コンデンサ容量 0.05 μ F の仕上げ加工を想定し, 初期気泡直径は計測した放電痕直径と等しく, 0.078mm とした。

荒加工でワイヤ正面で放電した場合と側面で放電した場合の 0.3 μ s 後の圧力分布例と, この圧力をワイヤ表面で積分して求めた作用力ベクトルを Fig. 8 と Fig. 9 に示す。また仕上げ加工の場合を Fig. 10 に示す。正面で放電した場合の作用力は放電面に垂直に作用しているが, 側面で放電した場合は放電面に垂直に作用せず, X 方向に傾いている。また作用力が小さい。このことから前述の単純モデルで, ワイヤ表面に常に垂直に放電衝撃力が作用するとした仮定の正しくないことが分かる。これらの結果は間隙が狭い部分では圧力が高く, 間隙が広いほど急激に圧力が減少するためであると解される。

さらに仕上げ加工の作用力は荒加工正面放電の場合の 2 分の 1 程度になった。これも Fig. 10 の仕上げ加工では間隙が広い部分で圧力が急激に減少しているためであり, ここでも単純モデルで加工代に関わらず放電衝撃力を同じとした仮定の正しくないことが分かる。

Fig. 11 に経路半径 0.15mm の円弧荒加工の場合の圧力分布と作用力ベクトルを示す。放電はワーク正面とした。経路外側の圧力が高いため,

Fig.10 Pressure distribution in case of finish cut

Fig.11 Pressure distribution in case of rough corner R cut

Fig.12 Time variation of force acting on wire in case of rough cut discharged on front of wire

全体として経路の内側に向かう作用力成分が発生する。(8)式と単純理論の(14)式の ΔF_r を組合せ、荒加工(すなわち(8)式で $\theta e=90^\circ$)についてワイヤ表面で積分してワイヤ全体に作用する力を求めると、経路半径方向成分は、被積分関数が θ の奇関数となるので経路半径に関係なく0となるはずであるが、Fig. 11に見られる半径方向成分のために、全体として経路内側に向かう力の発生することが予想される。

Fig. 12 に荒加工でワークとの正面で放電した場合の作用力の時間変化を示す。側面方向即ちZ方向の作用力は0である。X方向の作用力は気泡の膨張に伴いほぼ指数関数的に減少する。力の作用時間はせいぜい数 μs であり、一方ワイヤの基本振動周期は0.1–1msのオーダーであるから、ワイヤ挙動を論ずるには作用力の時間変化は重要でなく、作用力の時間積分値のみが問題になることがわかる。

Fig. 13 にワイヤ表面上の放電位置を変えたときの各軸方向作用力の時間積分値(単発放電衝撃力の各軸成分)を示す。また各軸の成分を合成した単発放電衝撃力をFig. 14に示す。側面の放電になるほど単発放電衝撃力は減少する。また加工代が小さいほど単発放電衝撃力が減少することが分かる。

以上の解析では気泡初期圧力は10MPaとした。解析は100V,0.05 μF のコンデンサ放電加工を

Fig.13 Influence of skimmed depth and discharge location on each axes component of impulse

Fig.14 Influence of skimmed depth and discharge location on composition of impulse

対象としたが、この場合の荒加工の放電衝撃力は実験⁷⁾によると $1.37 \mu N \cdot s$ である。Fig. 14の解析値はこの半分以下にすぎない。

荒加工で気泡初期圧力を変えたときの単発放電衝撃力をFig. 15に示す。爆発初期の作用力は気泡の初期圧力に比例するが、気泡の初期圧力が高いほど気泡の膨張速度が速く、気泡初期圧力を高めると作用力の減衰は早くなる。そのため単発放電衝撃力は気泡初期圧力に比例するのではなく、ほぼ気泡初期圧力の0.63乗に比例して増加しており、これから実験の単発放電衝撃力にあわせるには気泡初期圧力を34MPa程度にする必要のあることが分かる。しかしながら本解析では荒加工

Fig.15 Influence of initial bubble pressure on impulse

以外のほとんどの場合、10MPa 以上では解析が不安定で解が得られなかった。荒加工の場合も30MPa が限界であった。従って前出の解はまだ実際と異なるが、加工代や放電位置の影響については十分理解できる結果であると考えられる。

4. 実験結果との比較

上記の結果の妥当性を実験結果と比較し検討する。各放電ごとの単発放電衝撃力を直接測定し比較することが難しいため、ここではワイヤたわみと比較する。ワイヤはワイヤ円周上の全放電の結果としてたわむので、Fig. 13 の解析値を用い、(12)、(13)式を数値積分してワイヤに作用する全衝撃力を求める。

気泡初期圧力が低いため、解析した全衝撃力をもとにたわみ値を求めて直接比較しても、本来一致するはずがなく意味がないが、全衝撃力とたわみは比例するから、ここでは仕上げ加工代の影響を調べるため、荒加工の場合のたわみベクトルと全衝撃力ベクトルの大きさが一致するようにして、仕上げしろによってたわみベクトルと全衝撃力のベクトルがどのように変化するかを比較した。

Fig. 16 に比較結果を示す。図には(14)式の単純モデルの計算結果も示した。図のたわみ計測値は既報⁶⁾に述べた光ファイバーとスリットから成る計測装置で仕上げ加工中に測定した。単純モデルの場合の全衝撃力の大きさは加工代に関わらずほぼ一定であり、計測結果に比べて大きい。これに

Fig.16 Comparison of analyzed load, load by simple model and measured wire deflection

対し加工代を変えたとき、解析結果をもとにした全衝撃力の変化は計測値のたわみの変化に近い。十分に一致するとはいえないが、これはむしろ計測したたわみ値が爆発力だけでなく、静電気力の影響を含んでいるためと思われる。

なおそのほか、本解析は単純仮定の下で計算している。解析と実際との違いとして、以下の点が挙げられる。

- (1) 繰返し放電により間隙には多数の気泡が存在する。それらの気泡は爆発初期に収縮するため爆発気泡の圧力を低下させる。また放電がそれらの気泡中で発生する可能性がある。
- (2) この条件の放電時間は $1\mu\text{s}$ 程度であるから、気泡膨張中も放電は持続し、気泡にエネルギーが供給されている。その場合の初期気泡圧力は推定値 34MPa よりも低いであろう。
- (3) 放電衝撃力によってワイヤは後退するから爆発時の加工間隙は一定ではない。
- (4) 今回間隙距離は 0.25mm としたが、放電時にはこの距離は変動する。平均的にはもっと狭

い距離で放電すると思われる。

しかし以上の相違にも関わらず、本解析結果は仕上げ加工における単発放電衝撃力が、放電位置や加工代によってどのように変化するかを、十分説明していると考えられる。

5. 結 論

仕上げ加工の放電時の流体力学的爆発過程を数値解析し、単発放電によりワイヤに作用する力を求め、さらにワイヤ表面上の放電頻度分布を求めて、これらの放電がワイヤ表面に分散して発生する場合にワイヤに全体として作用する力を求めた。この力を単純理論及び計測結果と比較し、以下の知見を得た。

- (1) 解析に用いた程度のギャップ距離では粘性はほとんど重要な働きをしない。
- (2) 放電周囲の圧力は、間隙が狭い部分では高く、間隙が広がる部分では低下する。
- (3) 単純理論の「放電衝撃力はワイヤ表面に垂直に作用し、加工代や放電位置に関わらず一定である」という仮定は正しくない。
- (4) (2) の理由により、単発放電衝撃力は加工代が小さいほど小さくなる。またワイヤ側面に行くほど小さくなる。
- (5) 円弧荒加工で、ワーク正面で放電する場合に単発放電衝撃力は経路内側に向かう成分を持つ。
- (6) 解析した単発放電衝撃力を用い、ワイヤ表

面の放電頻度分布を考慮して得られた全衝撃力は、加工代を変えたときの変化の様相が実際のワイヤたわみの変化とほぼ対応している。

- (7) 以上のことから、仕上げ加工におけるワイヤたわみが単純理論と異なった主な原因は、加工代によって加工間隙の幾何学的形状が異なるためであると考えられる。

参考文献

- 1) 真柄, 弥富, 山田, 小林: ワイヤ放電加工における形状精度に関する研究 (第1報), 電気加工学会誌, Vol.25, No.49 (1992), pp.23
- 2) 小原, 河合, 大住: ワイヤ放電加工の加工精度に関する基礎的研究 (第2報), 電気加工学会誌, Vol.33, No.72 (1999), pp.20
- 3) 小原, 石津, 河合, 大住, 林: ワイヤ放電加工の加工シミュレーション (第3報), 電気加工学会誌, Vol.34, No.75 (2000), pp.30
- 4) PHOENICS-2 日本語総合マニュアル: Concentration, Heat & Momentum Limited, 1998
- 5) 安達, 吉田, 国枝, 単発放電における気泡の挙動と加工反力, 電気加工学会誌, Vol.31, No.67 (1997), pp.23
- 6) 山田久: ワイヤ放電加工におけるワイヤ振動挙動に関する研究, 豊田工業大学博士課程論文, 1998
- 7) 牧野, 小原, 大住, 丹羽: ワイヤ放電加工の単発放電衝撃力と単発放電加工量, 電気加工学会誌, Vol.30, No.63 (1996), pp.1

(2000年4月13日受付)