ワイヤ放電加工中に発生する電磁力に関する研究*

戸村 俊輔** 国枝 正典***

Study on Electromagnetic Force during Wire-EDM

Shunsuke TOMURA and Masanori KUNIEDA

This paper clarifies the mechanism of the electromagnetic force applied to the wire electrode in wire-EDM. The distribution of the magnetic flux density caused by the steady current was analyzed using finite element method (FEM) to calculate the electromagnetic force. The electromagnetic force theoretically obtained was used for analysis of the wire vibration under two kinds of current waveforms: single long current pulse and consecutive short current pulses. From the comparison of wire vibrations obtained from the experiment and analysis, it was found that the electromagnetic force is caused by both DC and AC components of the discharge current. When the workpiece is ferromagnetic, the electromagnetic force caused by DC component of the discharge current is dominant, and it is an attractive force. When the workpiece is paramagnetic, the electromagnetic force caused by DC component of the discharge current is insignificant compared with the force caused by AC components due to electromagnetic induction.

Key words: wire-EDM, electromagnetic force, electromagnetic field analysis, wire vibration

1. はじめに

ワイヤ放電加工中にワイヤに作用する力は、大別して4つの力がある¹⁾²⁾。放電持続時間中に気化する加工液の気泡膨張による加工反力、放電遅れ時間中に工作物・ワイヤ間に印加される開放電圧による静電力、放電持続時間中にアーク柱を介しワイヤ・工作物間を流れる電流による電磁力、加工液流れにより発生する力である。これらは加工中のワイヤの振動およびたわみの原因となり、加工精度、加工速度、加工安定性を悪化させる²⁾³⁾。一方、岩田ら⁴⁾⁵⁾および小原ら⁶⁾、Hanら⁷⁾、Tomuraら⁸⁾によりワイヤ放電加工の加工形状シミュレーションの開発が行われている。これらはワイヤに作用する外力を考慮してワイヤ振動解析を行い、同時に工作物とのギャップ長の分布から放電点を決定し、放電点において工作物の除去を行う一連のルーチンを繰り返すことで行っている。このシミュレーション精度をさらに向上させるためには、4つの力が既知である必要がある。

そこで、これら4つの力が生じるメカニズムとその影響を明らかにするため多くの研究がなされてきた。加工反力について、Obaraら⁹⁾は連続放電、山田ら¹⁰⁾¹¹⁾は単発放電と連続放電を用い、ワイヤ振動のシミュレーションと実験的に得たワイヤの挙動から逆問題法で単発放電当たりの加工反力を求めた。Hanら⁷⁾は流体理論から求められたギャップ長と液中単発放電での気泡膨張による加工反力の関係を示す近似式¹²⁾の関数形が、気泡が混在する連続放電中の極間隙でも有効であるとして、工作物の加工形状シミュレーション結果と実加工形状から逆問題法を用い関数中の未知定数を同定した。静電力について、小原ら⁶⁾は加工中のワイヤの変位からワイヤに加わる力の合成力を放電頻度ごとに求め、放電頻度をゼロに外挿した場合の合成力は静電力のみであるとして静電力を求めた。山田ら¹⁰⁾は平板端面とワイヤの間に電圧を印加した際の静電力によるワイヤ変位を解析し、観測結果と一致することを示した。Hanら⁷⁾は気泡膨張による加工反力

を求めた時と同様の手法を用い、連続放電中の気泡が混在した水加工液の比誘電率を未知定数と置き、シミュレーション結果と実験結果の比較から比誘電率を同定することによって気液が混在する連続放電中の静電力を求めた。また加工液の流れの影響について、小原¹³⁾は荒加工中の加工溝内部の流れ場を解析し、ワイヤ断線限界や加工速度との関係を明らかにした。

一方、ワイヤ放電加工中にワイヤに加わる電磁力は、放電反力および静電力に比べて非常に小さいと考えられてきた。例えば、Panschow¹⁴⁾はパルス状の連続した加工電流による電磁力は、電流波形をフーリエ級数展開して求められる直流成分と交流成分それぞれの電磁力の寄与を重ね合わせて求められるとした。そして、工作物が鋼の場合の直流成分による電磁力の寄与は計算で求めた。ここでは鋼の比透磁率が非常に大きいことを利用し、鏡像の原理が用いられている。しかし、比透磁率の小さいオーステナイト系ステンレス鋼SUS304などが工作物の場合、鏡像の原理は適用できない。交流成分については工作物が鋼あるいは黄銅の場合について、各周波数のパルス電流をワイヤに流した際のワイヤのたわみを実験より求めた。その結果、工作物が鋼の場合は平均的な力が引力であり、周波数が高くなるにつれ斥力に近づくこと、工作物が黄銅の場合は周波数にかかわらず斥力であり、周波数が高くなるにつれ斥力が大きくなることを示した。また、小原ら⁶⁾は実験により、常磁性体である銅を工作物に用いた場合は小さな斥力、強磁性体である鉄系金属を工作物に用いた場合は引力が働くという同様の結果を示した。

そこで本報では、ワイヤ放電加工中の電流パルスによる電磁力のうち、まずは放電電流の直流成分の寄与のみを有限要素法(FEM)を用いた電磁場解析を用い算出し、得られた電磁力を基にワイヤの挙動を解析した。そして、実験により得られたワイヤ挙動と比較し、ワイヤ放電加工中に作用する電磁力の発生メカニズムについて考察した。

2. 電磁力に起因するワイヤ挙動の測定

2.1 実験装置

電磁力が発生するのは放電持続時間中である。しかし、放電

* 原稿受付 平成19年6月8日

** 学生会員 東京農工大学 (東京都小金井市中町2-24-16)

*** 正会員 東京農工大学

Fig. 1 Experimental setup

Fig. 2 Current waveform in EDM

Fig. 3 Image taken by high-speed video camera

持続時間中は気泡膨張による加工反力も同時に発生する。気泡膨張による加工反力は非常に大きいため、実際のワイヤ放電加工中の電磁力を分離して測定することは困難である。そこで、Panschow¹⁾が電磁力測定に用いた装置と同様の、図1に示す実験装置を作製した。放電を生じさせることなく加工中と同じ電流パルスを提供するために、張力をかけたワイヤと工作物の間は厚さ100 μm の銅箔を介して導通状態に保たれている。導通状態のため、ワイヤと工作物間に静電力が作用することもない。また、この銅箔はワイヤと工作物のギャップ長を100 μm に保つ役目も果たしている。放電加工中の電流は、図2に模式的に示すようなパルス状電流の連続である。従って、電流の立ち上がり時、立ち下がり時のような直流成分と交流成分をともに含む非定常電流による電磁力と、直流成分のみの定常電流による電磁力の2種類に分けて検討する必要がある。そこで、電源にはワイヤ放電加工機と形彫り放電加工機の加工電源を用いた。形彫り放電加工機の加工電源は定常電流による電磁力が支配的な場合を調べるときに用いた。実験装置を放電加工機の加工テーブル上に置き、図1中A部と加工機の工具電極の間で放電を発生させ実験装置に電流を流した。

ワイヤには直径200 μm の黄銅ワイヤを用いた。工作物としては比透磁率の違いを考慮し、強磁性体の冷間工具鋼SKD11と常磁性体の銅を用いた。また、電磁力によるワイヤの変位は高速度ビデオカメラで撮影した。高速度カメラで撮影されたワイヤの画像の例を図3に示す。図中の帯状のシルエットがワイヤであり、画像の下部に工作物がある。高速度ビデオカメラの撮影条件は撮影間隔が62.5 μs 、シャッター開放時間が7.8 μs である。

2.2 長いパルス幅の電流によるワイヤの変位

まず定常電流による電磁力について調べた。ワイヤ放電加工の電流パルスは定常電流の期間が非常に短いため、直流成分による電磁力を分離して検討することは難しい。そこで、直流成分による電磁力を支配的にするため、形彫り放電加工機の加工電源を用いて長いパルス幅の電流を与えた。パルス幅は50ms、ピーク電流は16A、ワイヤの張力は5Nに設定した。工作物がSKD11の場合のワイヤの変位を図4、工作物が銅の場合のワイヤの変位を図5に示す。図の横軸は電流を流し始めてからの経過時間、縦軸はワイヤに電流が流れる前の位置をゼロとした時の変位であり、-100 μm の位置で工作物と接触する。

工作物をSKD11とした場合、ワイヤは工作物側に引き寄せら

Fig. 4 Movement of wire when long single pulse current is supplied to steel workpiece

Fig. 5 Movement of wire when long single pulse current is supplied to copper workpiece

れ、引き寄せられたままおよそ-8 μm の位置を中心に振動を続けた。また、このワイヤ振動の振動数1070Hzは、実験装置のワイヤの支点間距離（図1のB点から銅箔までの距離）と張力を元に算出したワイヤの1次固有振動数1140Hzとほぼ一致した。以上から、工作物がSKD11のような強磁性体の場合、ワイヤに定常電流が流れている間、ワイヤには常に引力が作用していることがわかった。

一方、工作物を銅とした場合、ワイヤの変位は小さいことがわかった。しかし、電流を流し始めてから15msの間に周期が短い振動（振幅数 μm 程度）が見られ、この振動数は、SKD11の場合と同様1次固有振動数と一致した。また、電流が流れ始める瞬間に必ず斥力方向へのワイヤ変位から振動が始まることがわかった。従って、ワイヤに微小ではあるが電流の立ち上がり時に斥力が加わり、その後は電磁力がほとんど加わっていないため、自由振動をしていると考えられる。

2.3 連続した短いパルス幅の電流によるワイヤの変位

次に交流成分に起因する電磁力を調べるため、短いパルス幅の電流を連続的に与えた。連続的に与えた理由は、高速度ビデオカメラで観察可能な振幅までワイヤを励振させる必要があるが、パルス幅が短い場合は電流パルス1回当たりの電磁力がワイヤに与える力積は小さいからである。そこで、電源としてワイヤ放電加工機を用い、図1のA部付近で実際にワイヤ放電加工を行い、実加工に近い波形の電流を実験装置に流した。パルス幅は3.5 μs 、ピーク電流は12A、ワイヤの張力は2.5Nに設定した。工作物をSKD11とした場合の電流波形を図6、その際のワイヤの挙動を図7、工作物を銅とした場合の電流波形を図8、その際のワイヤの挙動を図9に示す。図6～図9の横軸は最初の電流パルスが実験装置に流れてからの経過時間である。また図6と図8の縦軸は電流値、図7と図9の縦軸は初期位置からのワイヤ変位である。

図のように、工作物にSKD11および銅のどちらを用いた場合も、電流パルスの発生頻度が高くなると徐々にワイヤの振動が大きくなった。また、前節同様ワイヤの振動数は計算上の1次固有振動数と一致した。短いパルス幅の電流を連続して実験装置に流した場合、個々の電流パルスによりワイヤに与えられる電磁力の力積は、たとえ工作物が強磁性体であっても非常に小さいと考えられる。しかし、短いパルス幅の電流を連続して実験装置に流した場合、連続的に力積が与えられることでワイヤは

Fig. 6 Consecutive short current pulse supplied to steel workpiece

Fig. 7 Movement of wire when consecutive short current pulse is supplied to steel workpiece

Fig. 8 Consecutive short current pulse supplied to copper workpiece

Fig. 9 Movement of wire when consecutive short current pulse is supplied to copper workpiece

励振されたため、最終的に高速度ビデオカメラで観察可能な大きさのワイヤの振動になったと考えられる。

3. 電磁場解析による電磁力の解析

前章の結果が電磁力に起因することを確かめるため、電磁場解析を行いワイヤに加わる電磁力を求めた。さらに、実験装置に合わせてワイヤ変位の解析モデルを作成し、計算で求められた電磁力を代入することで、ワイヤのたわみおよび振動を解析した。本報では簡単のために電流の直流成分に起因する電磁力だけを解析した。そして、交流成分に起因する電磁力を無視してワイヤ変位を解析した。また、有限要素法 (FEM) に基づく2次元電磁場解析¹⁴⁾を行うためプログラムを自作した。本プログラムはワイヤと工作物が無限に長いとした場合のワイヤに垂直な平面内における2次元静磁場のポアソン方程式

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_0$$

(μ : 透磁率, A : 磁場ベクトルポテンシャル, J_0 : 電流密度) をガラーキン法により離散化し解いたものである。

3.1 定常電流によるワイヤの変位

電磁場解析の解析領域を図10に示す。ワイヤは黄銅、工作物は銅または鋼、ギャップなどのワイヤ周辺の領域は空気とし、分割された要素ごとに透磁率 μ を設定した。黄銅と銅と空気の比

Fig. 10 Model for electromagnetic analysis

Fig. 11 Distribution of magnetic flux density analyzed when workpiece is steel

Fig. 12 Distribution of magnetic flux density analyzed when workpiece is copper

透磁率はほぼ1、鋼の比透磁率は強磁性体であるため磁束密度 B の絶対値に依存するが約1000である。電流は2.2節の実験条件に合わせ、ワイヤに16Aの定常電流が流れるとし、ワイヤ内部の電流密度分布は均一、工作物内部の電流密度分布はゼロに設定した。境界条件については、ワイヤと工作物よりも大きく取った解析領域全体の外周の磁場ベクトルポテンシャルをゼロに固定し、それ以外は自由境界条件に設定した。この解析で求めた磁束密度分布を、工作物を鋼にした場合を図11、工作物を銅にした場合を図12に示す。図中でワイヤに流れる電流は紙面に対し垂直かつ手前向きである。また、色の濃い部分ほど磁束密度が大きいことを表している。

図11のように工作物を鋼にした場合は、ワイヤ内部の磁束密度分布はワイヤ軸に対して軸対称ではないことがわかった。単位長さあたりのワイヤに加わる電磁力はフレミング左手の法則により、ワイヤ内部について電流密度と磁束密度の外積を面積分することで得られる。よって、ワイヤ上部の磁束密度が大きい部分では工作物方向の引力が発生し、ワイヤ下部では斥力が発生する。定常電流の場合ワイヤ内部の電流密度は一定であるから、個々の位置でワイヤに作用する電磁力の大きさは磁束密度の大きさで決定される。すなわち、ワイヤ内部の磁束密度分

Fig. 13 Dependence of electromagnetic force on gap width between wire and workpiece

Fig. 14 Dependence of electromagnetic force on relative permeability obtained by FEM analysis

布が上下で非対称であるため、引力と斥力が相殺されず、ワイヤ全体では工作物に対し引力になると考えられる。実際にワイヤの単位長さ当たりに加わる電磁力を上記に従い計算したところ、工作物の法線方向に0.126N/mの引力が作用するとの結果を得た。一方、図12のように工作物を銅にした場合は、ワイヤ内部の磁束密度分布はほぼ軸対称となった。従って、工作物の法線方向に作用する電磁力の計算値は小さく、0.0025N/mの引力が作用するとの結果を得た。さらに、本報のFEM解析を用いて求めた、工作物とワイヤのギャップ長に対する直流成分による電磁力の関係を図13に示す。図のように、工作物が銅の場合の電磁力はギャップ長によらずほぼゼロであるが、工作物が鋼の場合の電磁力はギャップが小さいほど大きくなることがわかった。

一方、Panschowが用いた鏡像原理は工作物の透磁率が非常に大きい場合に適用できる。この場合、ギャップ長が100 μ m、ワイヤを流れる電流が16Aの場合の電磁力を求めると0.128N/mであり、本研究で得られた工作物が鋼の場合の電磁力との誤差は小さかった。しかし、工作物が銅の場合、銅の比透磁率がほぼ1のため鏡像の原理が適用できない。そこで、図14にギャップ長が100 μ m、ワイヤを流れる電流が16Aの場合において、工作物の比透磁率に対する電磁力の変化をFEM解析により求めた結果を示す。鏡像原理による電磁力は0.128N/mであり、工作物の比透磁率が100以上ならば鏡像原理を用いて電磁力を求めても誤差は小さい。しかし、10以下では鏡像原理とFEMの差が大きくなることがわかった。またFEMであれば、工作物中の分割された要素ごとに異なる透磁率を与えることができるため、要素ごとに透磁率を更新しながら繰り返し磁束密度分布を求めることで、強磁性体の透磁率 μ が磁束密度 B の絶対値に依存する現象を考慮して解析を行うことができる。本報で示した工作物が鋼の場合の単位長さ当たりの電磁力はこの依存性を考慮した結果である。

計算から求めた電流の直流成分による電磁力が、定常的にワイヤに加わっていると仮定して、ワイヤのたわみを求めた。解析モデルは図1の銅箔とB点を支点とした固定端の弦モデルであり、弦（ワイヤ）の張力は重錘の重さに等しい。このとき、ワイヤに加わる外力としてワイヤと工作物が対向している部分全体に均一に電磁力が作用するとし、弦の釣り合いの式を立てて解いた。ワイヤの剛性は考慮していない。その結果、工作物が鋼である場合は引力方向に9.2 μ mたわみ、工作物が銅である場合は引力方向に0.18 μ mたわむと算出された。2.2節の鋼の実験結果

Fig. 15 Wire vibration caused by electromagnetic force due to current pulses in Fig. 6 calculated ignoring electromagnetic induction when workpiece is steel

Fig. 16 Wire vibration caused by electromagnetic force due to current pulses in Fig. 8 calculated ignoring electromagnetic induction when workpiece is copper

ではワイヤの周辺が空気であるため振動の減衰が小さいが、50ms以降も定常電流が流れ続ければワイヤの振動は減衰し、最終的に振動振幅の中心に収束し、その変位は定常的な電磁力によるたわみと等しいと考えられる。よって、工作物が鋼の場合その振動の上下ピークの中心位置が8 μ m程度であることから、解析で得られたたわみの値と近いことが分かった。対して工作物が銅の場合は、解析で得られたたわみの値は高速ビデオカメラの解像度以下であることが分かった。

3.2 連続した短いパルス幅の電流によるワイヤ変位の計算

2.3節で実験から得られた電流波形と同じタイミングで、電流が流れている期間に前節で求めた定常電流による電磁力のみが断続的に加わっていると仮定し、解析的にワイヤの振動を求めた。2.3節の実験では非定常電流による電磁力も作用していると考えられるため、実験結果とワイヤ振動解析結果を比較することで非定常電流による電磁力の影響を知ることができる。その結果を、工作物が鋼である場合を図15、工作物が銅である場合を図16に示す。図15は図6の電流パルス列を用いて計算した結果であり、実験結果である図7と似た結果となった。また、図16は図8の電流パルス列に基づき計算した結果であり、図9の実験結果に反してほとんど振動しなかった。

3.3 考 察

工作物をSKD11のような強磁性体とし、定常電流をワイヤおよび工作物に流した場合、実験ではワイヤの振動振幅の中心が初期位置から工作物方向へ8 μ m程度引き寄せられ、解析でも同様にワイヤが工作物方向へ9.2 μ mたわむ結果となった。また、短いパルス幅の電流を連続して流した場合は、時間とともに準静的に変化する直流電流によって生じる電磁力が、電流値の時間変化とともに変動しながらワイヤに作用すると仮定してワイヤ変位を解析した。そして、その解析結果が実験で求めたワイヤ変位とほぼ一致した。それに対して、工作物を銅のような常磁性体とし、定常電流をワイヤおよび工作物に流した場合、実験、解析ともワイヤはほとんど変位しなかった。また、短いパルス幅の電流を連続して流した場合は、実験ではワイヤが励振されたが、解析ではほとんど励振されなかった。

以上より、Panschowが指摘するように、ワイヤ放電加工中に発生する電磁力には、本報の非定常項を無視した電磁場解析により求められる定常電流による電磁力以外に、電流の立ち上が

Fig. 17 Mechanism of generation of repulsive electromagnetic force due to electromagnetic induction when current is increasing

りおよび立ち下がり時の非定常電流による電磁力が存在すると考えられる。工作物が強磁性体であれば、定常電流による電磁力が非定常電流による電磁力に対して支配的であるため、定常電流による電磁力を考慮するだけで実験と解析をほぼ一致させることができた。対して工作物が常磁性体であると定常電流による電磁力が微弱なため、非定常電流による電磁力が支配的になると考えられる。また、この非定常電流による電磁力は、電流立ち上がり時については2.2節の銅の実験結果より、Panschow¹⁾、小原ら⁹⁾の観察した平均値と同様に斥力であると考えられる。

また、ワイヤを黄銅、加工液を水、工作物を鋼、ワイヤと工作物のギャップ長を100 μ mとした場合の電磁力について、静電力および加工反力と比較する。一般的な荒加工の電気条件として、ワイヤ-工作物間の電位差を100V、放電時のピーク電流を150Aと仮定する。FEMにより、ワイヤに作用する静電力を求めると引力方向に0.074N/m、電磁力は定常電流が150Aであれば引力方向に11.2N/mとの結果を得た。ここで電磁力が1 μ s程度の放電持続時間、静電力が50 μ s程度の放電遅れ時間に発生すると仮定し力積を比較する。一般にワイヤ放電加工の放電電流は山形パルスであること、電磁力はワイヤの電流値の2乗におよそ比例することを考慮すると、単位長さあたりの電磁力の力積は 3.73×10^{-6} Ns/m、静電力の力積は 3.7×10^{-6} Ns/mであり、同程度であることがわかった。一方、Tomura⁸⁾がHanら⁷⁾の手法を用い、板厚40mmのSKD11の工作物において、ワイヤ放電加工の荒加工中の加工反力を同定した結果、放電1回当たりの力積が 2×10^{-6} Nsであった。このとき放電持続時間が1 μ s、ピーク電流値が150Aであったため、板厚を考慮してワイヤ全体に作用する電磁力の力積を求めると 1.49×10^{-7} Nsである。よって、ワイヤ放電加工の荒加工において電磁力の力積は加工反力の力積と比べても1/13程度と、無視できない程度に大きいことが分かった。

最後に、非定常電流により電磁力が発生するメカニズムについて、考えられる原理を図17に示す。紙面に垂直で手前に向かう電流の向きであれば、磁束密度はワイヤを中心に左回りのベクトルで分布する。電流の立ち上がり時であれば、この磁束密度は徐々に大きくなる。このとき工作物中に電磁誘導により磁束と鎖交して渦電流が発生する。個々の磁束線による渦電流は右ねじの法則に従って発生する。よって、隣接する磁束線に挟まれた領域での渦電流は相殺し合うため、ワイヤの直下の工作物内には、ワイヤ内を流れる電流と反対の向きの電流が誘導されると考えられる。互いに平行で反対の向きの電流間では斥力が発生するため、非定常電流による電磁誘導でワイヤに作用する力は斥力である。同様に電流の立ち下がり時については、工作物にはワイヤと同じ向きに流れる電流が誘導されるこ

とにより、引力が作用することが予想される。この電磁力は非定常項を考慮した電磁場解析により求められると考えられる。

4. 結 論

ワイヤ放電加工中に発生する電磁力を調べるため、静電力や放電反力の影響を受けずに電磁力だけをワイヤに作用させることができる実験装置を作成し、ワイヤの挙動を観察した。また、定常電流が作る磁場と定常電流との相互作用により発生する電磁力を計算するため、FEMを用いた電磁場解析シミュレーションを作成した。そして、計算で求めた電磁力を基にワイヤの振動を解析し、実験結果と比較、考察を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) ワイヤ放電加工中に発生する電磁力は、定常電流が作る静磁場と電流との相互作用によって生まれる電磁力と、ワイヤ内の非定常電流による電磁誘導で生じる工作物中の渦電流とワイヤ内の非定常電流の相互作用によって生じる電磁力の2種類に分類できることがわかった。
- (2) 工作物が強磁性体の場合は定常電流による電磁力が支配的であり、それは引力である。対して、工作物が常磁性体の場合は定常電流による電磁力は無視できるほど小さいため、非定常電流による電磁力が支配的になる。そして、電流の時間微分値が正の場合は斥力、負の場合は引力となると考えられる。
- (3) 荒加工中において工作物を鋼とし、定常電流による電磁力を静電力および加工反力と比較した。その結果、電磁力の力積は静電力の力積に対し同程度であり、また加工反力の力積と比べても無視できない程度に大きいことがわかった。

参 考 文 献

- 1) Rudolf Panschow: Über die Kräfte und ihre Wirkungen beim electroerosiven Schneiden mit Drahtelektrode, Dissertation, T. U. Hannover, (1974).
- 2) Willem L. Dekeyser, R. Snoeys: Geometrical Accuracy of Wire-EDM, Proc. of ISEM, 9 (1989) 226.
- 3) N. Kinoshita, M. Fukui, Y. Kimura: Study on Wire-EDM: Inprocess Measurement of Mechanical Behaviour of Electrode-Wire, Annals of the CIRP, 33, 1 (1984) 89.
- 4) 岩田康, 小原治樹, 大住剛, 松田裕二: ワイヤ放電加工の加工シミュレーション - 第1報 解析方法と解析例 -, 電気加工学会誌, 29, 62 (1995) 40.
- 5) 岩田康, 小原治樹, 大住剛, 松田裕二, 石津稔之: ワイヤ放電加工の加工シミュレーション - 第2報 直線荒加工の加工精度について -, 電気加工学会誌, 30, 64 (1996) 2.
- 6) 小原治樹, 石津稔之, 河合保, 大住剛, 林卓郎: ワイヤ放電加工の加工シミュレーション (第3報) - 仕上げ加工の加工精度の検討 -, 電気加工学会誌, 34, 75 (2000) 30.
- 7) F. Han, M. Kunieda, T. Sendai, Y. Imai: High Precision Simulation of WEDM Using Parametric Programming, Annals of the CIRP, 51, 1 (2002) 165.
- 8) S. Tomura, M. Kunieda, K. Nakamura, Y. Ukai: Simulation of Wire EDM under Rough Cutting Conditions, 3rd International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, (2005), 767.
- 9) H. Obara, Y. Makino, T. Ohsumi: Single Discharging Force and Single Machining Volume of Wire EDM, Proc. of ISEM, 11 (1995) 85.
- 10) 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.
- 11) 山田久, 毛利尚武, 武沢英樹, 古谷克司, 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.
- 12) M. Kunieda, Y. Adachi, M. Yoshida: Study on Process Reaction Force Generated by Discharge in EDM, Proc. of MMSS '2000 (2000) 313.
- 13) 小原治樹: ワイヤ放電加工のワイヤ断線限界の解析 - 第1報 加工液の流れの解析 -, 電気加工学会誌, 22, 44 (1989) 10.
- 14) 中田高義, 高橋則雄: 電気工学の有限要素法 (第2版), 森北出版, (1986) .