ワイヤ電極挙動のインプロセス測定による ワイヤ放電加工面形状の予測*

西 川 正 昭** 国 枝 正 典***

Prediction of Wire-EDMed Surface Shape by In-Process Measurement of Wire Electrode Behavior

Masaaki NISHIKAWA and Masanori KUNIEDA

In wire electrical discharge machining (WEDM), it is necessary to control the wire orientation accurately. However, the control is difficult because of the complex behavior of the wire during cutting caused by bubble expansion, electrostatic force and electromagnetic force. Therefore, it is important to measure the deflection and vibration of the wire in-process and to predict the machined surface shape. This paper describes the in-process measurement of the wire behavior using a sensor newly developed. The surface shape predicted from the wire behavior coincided well with the surface shape measured after machining.

Key words: wire-EDM, accuracy, optical sensor, wire vibration, in-process measurement

1. 結 言

ワイヤ放電加工中のワイヤ電極には放電反力、静電力、電磁力などが作用するため、その挙動は複雑でワイヤ姿勢を精度良く制御することは難しい。しかし、任意の形状を高精度に加工するためにはワイヤ挙動を正確に把握する必要がある。そこで、これまでに加工中のワイヤ挙動の観察が試みられている^{1)~6)}。しかし、工作物とワイヤガイドの間に大きな空間を設けてセンサを設置したり、工作物を板厚方向に2つに分割し、その間にセンサを設置して測定を行っている。したがって、実際の工作物のセッティングを変えることなくワイヤの挙動をインプロセスで測定した例は少ない。また、上ワイヤガイドと工作物の間でワイヤ変位を観測し、ワイヤガイド位置とワイヤの実際の位置との偏差を補正することによりコーナ加工精度を向上⁵⁾した例が報告されている。しかし、測定点でのワイヤ変位から加工中のワイヤ全体のたわみや振動を求める必要性は書かれているものの、その具体的方法についての記述がない。実加工中のワイヤ挙動から加工面形状の推定ができれば、加工精度のさらなる向上が可能になる。そこで本研究では新たに開発したワイヤ変位測定センサを用いて、加工を妨げることなく加工中のワイヤ挙動を観察し、加工形状を予測する方法について検討した。

2. ワイヤ挙動測定

2.1 ワイヤ変位センサ

2.1.1 測定原理

ワイヤ変位測定センサの概略図を図1に示す。ワイヤ変位センサは2本のプラスチック光ファイバ、He-Ne レーザ、光ファイバコリメータ、光量検出回路及びストレージスコープから構成される。2本の光ファイバの受光面はワイヤの変位方向と平行になるように隣接して設置する。He-Ne レーザは光ファイバコリメータによって導かれ平行光として受光面に照射される。

Fig.1 Principle of in-process measurement of wire electrode behavior

2本の光ファイバの受光量は別々のフォトトランジスタを介して電圧 V_1 及び V_2 に変換される。受光面とレーザの間をワイヤが通過すると受光面上にワイヤの影が投影される。また、ワイヤ位置によって投影面積が変化し、受光量が変化する。したがって、この受光量の変化からワイヤ位置を求めることができる。また、ワイヤ変位の測定には光源の光量変化の影響を避けるため、基格化した $(V_1 - V_2) / (V_1 + V_2)$ をセンサ出力 V として用いることにする。したがって、本センサの測定範囲はワイヤの影が2つの光ファイバの受光面上に投影されている範囲に限られ、

* 原稿受付 平成 20 年 8 月 20 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

ワイヤ径と等しくなる。なお、本センサは小型なので、ワイヤガイドの端面と、ワイヤガイドと同心軸上に取付けられた環状の噴流口を持つ加工液噴流ノズルの端面との間に挟まれた10mmあまりの空間の中に組み込むことができる。したがって、センサ内蔵型の噴流ノズルを製作すれば、噴流ノズルの端面は工作物の上面に従来どおり密着させることができるため、加工の妨げにならない。しかし、本研究では基礎研究を行うため、センサを噴流ノズルに組込む代わりに噴流ノズルの外側環状カバーを取外してセンサを設置した結果を述べる。それでも、清浄な加工液の噴流口の近くを光軸が通るため、加工屑や気泡の影響を受けずに測定が可能である。

また、実際のワイヤは3次的に振動しているのですが、このセンサを直交する2方向に配置しなければならない。レーザ光を交互に照射すれば出力が干渉することはなく、また小型なのでセンサを2方向に設置することも不可能ではない。しかし、本報ではセカンドカット時の仕上げ面形状に及ぼすワイヤ振動の影響を調べたので、仕上げ面に垂直な1方向だけの変位を測定した。

2.1.2 較正曲線

ワイヤ変位を求めるためには、予めセンサ出力 V とワイヤ変位との関係を調べておく必要がある。そこで、ワイヤ変位とセンサ出力の関係を示す較正曲線の測定を行った。まずはセンサ治具上に受光部と投光部を取り付け、受光面とワイヤ変位方向が平行になるようにセンサ治具を加工機の加工テーブル上に固定する。そして、加工機に付属されている治具を用いてワイヤが加工機の xy 平面に対して垂直であることを確認し、ワイヤを走行させワイヤに張力を負荷した状態で、一定の送り速度でワイヤをセンサに対して移動させた。そして、所定の距離毎に加工液中においてセンサ出力の測定を行った。なお、ワイヤ電極径は $\phi 0.2\text{mm}$ 、プラスチック光ファイバ径は 0.25mm (コア径 $\phi 0.235\text{mm}$ 、クラッド厚さ $7.5\mu\text{m}$) を用いた。センサの較正曲線を図2に示す。横軸はワイヤ位置を、縦軸はセンサ出力 V を示している。図2から出力の両端部ほど、変位に対する出力感度が小さくなっており、非線形性を示す。したがって、センサ出力からワイヤ変位への変換の際は較正曲線の測定点間毎に線形近似を行うことにした。

Fig.2 Calibration curve

Fig.3 Repeatability

2.1.3 繰り返し精度

次にセンサの繰り返し精度の算出を行った。ワイヤ位置ごとに複数回測定したセンサ出力 V から図2で示した較正曲線を用いてワイヤ変位を求め、ワイヤ変位の標準偏差を求め繰り返し精度とした。図3に各ワイヤ位置での繰り返し精度を示す。これより、センサの繰り返し精度はワイヤ変位が $\pm 0.075\text{mm}$ の範囲で $1\mu\text{m}$ 以下であることがわかる。

2.2 ワイヤ振動測定

2.2.1 非加工時のワイヤ振動

新たに開発したワイヤ変位センサを用いてワイヤ振動変位の測定を試みた。図4に示すようにワイヤ変位センサを上ワイヤガイドの直下5mmの位置に取付けた。また、センサの向きはセンサの測定方向と加工機の x 軸方向が平行になるように設置し

Fig.4 Position of sensor

Fig.5 Change in vibration frequency with increasing wire tension

Fig.6 Analysis of wire vibration

た。そして、ワイヤを指で弾くことで強制的に振動を与え、加工液中でのワイヤ振動を測定した。さらに、ワイヤ張力の変化によるワイヤ振動周波数の変化を調べた。 $L = 50\text{mm}$ のときの測定結果を図 5 に示す。横軸は時間を、縦軸はワイヤが真直な状態である位置を基準とした振動波形を示している。これより、ワイヤ振動が徐々に減衰している様子が確認できる。さらに、この振動波形を周波数解析した結果を図 6 に示す。

張力の違いによりそれぞれ 2.2kHz, 2.5kHz, 2.8kHz 付近にピークを持つことがわかる。今回測定を行った条件におけるワイヤの一次固有振動数 f は ω を角速度、 T をワイヤ張力、 L を上下ワイヤガイド間距離、振動モード次数 $k = 1$ 、線密度 $\sigma = 2.64 \times 10^{-4} \text{kg/m}$ とすると、以下の式によりそれぞれ、2.28kHz, 2.58kHz, 2.86kHz と求まる。

$$\omega = \frac{k\pi}{L} \sqrt{\frac{T}{\sigma}} \quad (1)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2)$$

これより、センサによって測定されたワイヤ振動波形は上下ワイヤガイドを固定端とするワイヤの一次固有振動数と一致することがわかる。

2. 2. 2 加工時のワイヤ振動

加工中に発生する気泡や加工屑の影響を受けずに測定が可能であるか調べるために加工時のワイヤ挙動の測定を行った。まずはワイヤ変位センサを図 4 に示すようにワイヤガイド近傍に固定し、セカンドカットにおけるワイヤ送り方向を y 方向とし、その方向に垂直な x 方向のワイヤ変位の測定を行った。加工条件を表 1 に示す。また、ワイヤ変位センサから得られた振動の FFT 解析結果を図 7 に示す。これより、約 1.7kHz 毎にピークが確認できる。今回の条件におけるワイヤの一次の固有振動数は(1)及び(2)式から 1.6kHz と求まる。これは、上下ワイヤガイド部を固定端とするワイヤの一次固有振動数と一致する。したがって、新たに開発したワイヤ変位センサを用いて、インプロセスでワイヤ変位の測定が可能であることがわかった。また、表 1 の加工条件ではワイヤガイドを固定端とする固有振動が励起されて加工が行なわれていることが分かった。

3. ワイヤ挙動の再生

次に新たに開発したワイヤ変位センサを用いて、加工中のワイヤ姿勢の算出を行う。加工中に働く力の平均的な作用によって

Table 1 Machining conditions

Wire electrode	φ0.2mm, brass
Workpiece	SKD11, t50mm
Discharge current A	12
Pulse duration μs	0.7
Pulse interval μs	5.5
Open voltage V	80
Wire tension N	15.7
Wire feeding speed mm/min	0.5

Fig.7 Analysis of wire vibration during machining

(a) Regeneration of wire vibration

(b) Regeneration of wire behavior

Fig.8 Regeneration of wire behavior

Table 2 Machining conditions

Wire electrode	φ0.2mm, brass
Workpiece	SKD11, t50mm
Discharge current A	12
Pulse duration μs	0.7
Pulse interval μs	5.5
Open voltage V	80
Wire tension N	11.8, 15.7, 19.6
Wire feeding speed mm/min	0.5

Fig.9 Displacement and amplitude of wire vibration measured with different wire tension

ワイヤがたわみ、さらに力の変動によってワイヤは振動する。そこで、ワイヤ挙動の再生は図 8 に示すように、先ず直流成分からワイヤの振動中心の変位を求め、ワイヤのたわみ形状を算出する。さらに交流成分からワイヤ振動を検出し、たわみ形状に足し合わせることで加工中のワイヤ挙動の再生を行う。さらに、各瞬間毎のワイヤ挙動を書き重ねることでワイヤの包絡面を求め、加工形状との比較を行う。

3. 1 ワイヤ挙動測定

ワイヤ変位センサを図 4 に示すようにワイヤガイド近傍に固定し、セカンドカットにおけるワイヤ送り方向を y 方向とし、その方向に垂直な x 方向のワイヤ変位の測定を行った。加工条件を表 2 に示す。工作物には板厚 50mm の SKD11 を使用し、切り込み量 0.03mm とした。

Fig.10 Machined workpiece shapes

Fig.11 Analysis of wire vibration during machining with different wire tension

3.1.1 ワイヤのたわみと振幅

加工中のセンサ取付位置におけるワイヤ振動中心のガイド位置を基準とした変位と、ワイヤ振動振幅を図9に示す。第一軸にはワイヤ振動中心のガイド位置からの変位を示し、工作物側に近づく方向を負方向、工作物から遠ざかる方向を正方向として示している。第二軸はワイヤ振動振幅の大きさを示す。これより、張力の増加により振動振幅と、ワイヤの振動中心の変位がともに減少し、真直な場合の位置に近づくことが分かる。今回の加工条件ではワイヤ送り速度が実用的な値より遅く放電頻度が低いため、放電反力よりも静電力が支配的となり、ワイヤが工作物側に引き寄せられたと考えられる。ここで加工面形状を図10に示す。横軸は前加工面を基準とした位置を、縦軸は板厚方向の位置を示している。加工面形状は凹形状であり、張力が小さいほど切り込みが大きいことがわかる。これはセンサによるワイヤ挙動の測定結果の傾向と等しい。なお、形状が上下で非対称である理由は図4に示すように工作物に対して上下のワイヤガイドの位置が異なるからである。

3.1.2 振動モード解析

センサ出力を基にワイヤ張力を変えて加工したときのワイヤの振動モード解析を行った。結果を図11に示す。図11(a)~(c)のそれぞれについて2.0kHz, 1.7kHz, 1.5kHz 間隔でピークが確認できる。各条件における一次固有振動数 f は (1) 及び (2) 式によりそれぞれ、1.8kHz, 1.6kHz, 1.4kHz と求まり、ワイヤの振動モードは上下のワイヤガイド位置で両端固定の場合の固有振動数と一致する。

Fig.12 Model for calculating wire deflection

Fig.13 Distributed force a

3.2 ワイヤ挙動の再生

測定した振動中心位置から平均的な加工反力によるワイヤのたわみ形状を算出し、さらにワイヤ振動によるワイヤ形状を足し合わせることで加工中のワイヤ挙動の再生を行った。

3.2.1 ワイヤのたわみ

ワイヤのたわみ形状の算出方法を図12を用いて説明する。ワイヤは上下のワイヤガイドに支持されており、軸方向に張力 T が負荷されている。さらにワイヤと工作物の極間には均一な分布荷重 a が定常的に作用すると仮定する。下ワイヤガイドからの工作物下面までの距離を z_1 、工作物上面までの距離を z_2 、上下ワイヤガイド間距離を L とすると、 x 方向のワイヤのたわみ量 x_c は以下の式で表すことができる。

$$x_c(z) = \begin{cases} \frac{\alpha(z_2 - z_1)}{2LT} \{2L - (z_1 + z_2)\} \cdot z & (0 \leq z \leq z_1) \\ -\frac{\alpha(z - z_1)^2}{2T} + \frac{\alpha(z_2 - z_1)}{2LT} \{2L - (z_1 + z_2)\} \cdot z & (z_1 \leq z \leq z_2) \\ -\frac{\alpha(z_2 - z_1)(z - z_1)}{2T} + \frac{\alpha(z_2 - z_1)}{2LT} \{2L - (z_1 + z_2)\} \cdot z & (z_2 \leq z \leq L) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、分布荷重 a はセンサ設置位置 z_s におけるワイヤ振動中心の変位 x_c から求まる。求めた分布荷重 a の結果を図13に示す。極間に働く力は引力であり、張力が小さいほど引力が大きいことがわかった。これは、次のように説明できる。今回得られた図10に示す加工形状から張力が小さいと切り込み量が大きく、今回の加工条件においてワイヤ送り速度が一定であることから放電頻度は張力が小さいほど大きい。また、一般に工作物とワイヤとのギャップ長が小さいほど放電頻度が大きくなることから、張力が小さいほどギャップ長が小さいと考えられる。また、小原⁹⁾によるとギャップ長が小さいほど静電力による引力が強くなる。したがって、図13の結果は張力による放電頻度の違いからギャップ長が変化し、ワイヤに作用する静電

Fig.14 Calculated result of wire deflection

力の大きさが変化した結果であると考えられる。以上から求めたワイヤのたわみ形状を図14に示す。ワイヤは負方向にたわみ、張力が小さいほどたわみが大きいことがわかる。

3.2.2 ワイヤ振動

ワイヤ振動を再生する方法について説明をする。一般に n 次のワイヤ振動は次式で表される。

$$x_n(z, t) = A_n \sin \omega_n t \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L} \cdot z\right) \quad (n=1, 2, 3 \dots) \quad (4)$$

A_n は n 次振動のワイヤ振幅である。ワイヤの振幅 A_n はセンサ設置位置 z_s におけるワイヤ振動 $x_n(z_s, t)$ をバンドパスフィルタにより抽出し、(4)式を用いて求めた。これより、 n 次振動におけるワイヤ振動 $x_n(z, t)$ が求まる。ワイヤは様々な振動モードで振動しているので、振動によるワイヤ振動 $x_v(z, t)$ は以下の式で表すことできる。

$$x_v(z, t) = \sum_{n=1}^m x_n(z, t) \quad (5)$$

なお、高次のワイヤ振動におけるワイヤ振動振幅がワイヤ振動 $x_v(z, t)$ に与える影響は小さいため、(5)式において $m=6$ としてワイヤ振動 $x_v(z, t)$ の算出を行った。

3.2.3 ワイヤ挙動と加工形状

以上の方法よりワイヤ挙動の再現を行った。ワイヤのたわみと振動により、加工中のワイヤ変位は次式で求められる。

$$x(z, t) = x_c(z) + x_v(z, t) \quad (6)$$

加工形状を評価するにあたりワイヤの包絡面形状が重要である。そこで各瞬間毎のワイヤ中心軸の変位を重ね書きしたものを図15に示す。また、図10に示した加工面形状を同じ図中に示した。一点鎖線はワイヤ半径分だけ工作物側にオフセットしたワイヤ包絡面を示している。横軸は上下のワイヤガイドを結ぶ中心軸からの距離を、縦軸は下ワイヤガイドからの高さを示している。これより、ワイヤの包絡面の曲率半径は張力の減少と共に小さくなり、また加工面と包絡面とのギャップ長は小さくなっていることがわかる。また、実際の切込み量は包絡面の位置に対応して張力が小さいほど大きい。そして、包絡面の曲率の変化は図10を見ると明らかに加工面形状に反映されている。

Fig.15 Relationship between wire behavior and machined surface shape with different wire tension

4. 結 言

光ファイバを用いてインプロセスでワイヤ変位を測定できるセンサを開発した。このセンサは加工を妨げることなく、加工屑や気泡の発生の影響を受けずにインプロセスでワイヤ変位が測定できる。

また本センサを用いて測定したワイヤ変位の直流成分と交流成分から、加工中のワイヤ挙動を再生する方法を見出した。

再生したワイヤ挙動から求められるワイヤの包絡面形状が加工された工作物形状と一致した。従って、本センサを用いてインプロセスでワイヤ変位を測定することによって加工結果を予測できることが分かった。

本研究を用いた加工条件下では、ワイヤ張力が小さいほどワイヤ振動振幅が大きく、静電力によるたわみも大きい。従って、工作物の切込み量が大きく加工面の凹形状の曲率は大きくなる。また、放電ギャップ長は小さくなることが分かった。

謝 辞

センサの製作に協力いただいた中国清華大学韓福柱助教授に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) T. Magara, T. Yatomi, H. Yamada, K. Kobayashi : Study on machining accuracy in Wire-EDM -Improvement of machining accuracy of corner parts in rough-cutting-, Journal of The Japan Society of Electrical Machining Engineers, **25**, 49 (1991) 23. (in Japanese)
- 3) H. Yamada, N. Mohri, N. Saito, T. Magara, K. Furutani : Modal Analysis of Wire Electrode Vibration in Wire-EDM, International Journal of Electrical Machining, **2** (1997) 19.
- 4) H. Obara, Y. Makino, T. Ohsumi : Single Discharging Force and Single Machining Volume of Wire EDM, Proceedings of ISEM, **11** (1995) 85.
- 5) Dauw D. F. : High-Precision Wire-EDM by Online Wire Positioning Control, Annals of the CIRP, **43**, 1 (1994) 193.
- 6) H. Obara, T. Ishizu, T. Ohsumi, Y. Iwata : Simulation of Wire EDM, Proceedings of ISEM, **12** (1998) 99.