

## 微細ワイヤ放電加工におけるワイヤ振幅包絡形状に関する研究

## Study on Amplitude Envelope of Wire Electrode in Fine Wire EDM

渡邊直紀・岡山大学大学院  
Naoki WATANABE, Okayama University岡田晃・岡山大学大学院  
Akira OKADA, Okayama University岡本康寛・岡山大学大学院  
Yasuhiro OKAMOTO, Okayama Universityサマハシャウキーハビブ・ベンハ大学  
Sameh Shawky Habib, Benha University

In this study, the movement of tungsten wire electrode during fine wire EDM was investigated by the direct observation using a high-speed video camera. Then, a high-speed observation model consisting of a running tungsten wire of 50 $\mu$ m in diameter, metal mold steel workpiece of 1mm in thickness and an acrylic small tank was built. The wire movements were observed from the rear and the side of the wire by the camera. The analyzed results showed that the amplitude and the frequency spectrum of wire vibration during wire EDM varied significantly with the machining position of workpiece between the upper and lower wire guides. Also, the amplitude envelope of wire electrode during the process was clarified.

**Key Words:** Wire EDM, Tungsten Wire, High-speed Observation, Wire Movement, Wire Deflection, Amplitude Envelope

## 1. 緒言

近年、工業製品の小型化、軽量化に伴い、高精度微細加工の需要は高まっている。ワイヤ放電加工においても細線ワイヤを用いる微細ワイヤ放電加工技術の向上が求められている。ワイヤ放電加工では、ワイヤの振動およびたわみの低減は、高精度かつ高能率加工実現のために不可欠である。加工中のワイヤ振動が大きい場合やワイヤ挙動が不安定であるとワイヤが断線しやすくなり、また加工溝の形状精度や表面粗さなどを悪化させる。

直径数 100 $\mu$ m のワイヤを用いるマクロなワイヤ放電加工を対象とした従来の研究報告においては、加工中のワイヤ振動モデルは、上下ワイヤガイドを節とする 1 次モードの振動を主とした複数の振動モードの重ね合わせとして提案されている<sup>(1)(2)</sup>。しかしながら、細線ワイヤを用いた微細ワイヤ放電加工におけるワイヤ挙動については、明らかになっていない。

本研究では、微細ワイヤ放電加工中のワイヤを直接高速度観察することによって、加工中のワイヤ挙動を解明し、加工精度向上を目指している。本報告では、加工中のワイヤの振動周波数の分析、および振幅包絡形状の検討を行った。

## 2. 実験方法

## 2-1 高速度観察システム

加工中のワイヤを撮影し、ワイヤ挙動を分析するための観察モデルは、アクリル製の小型加工槽、厚さ 1.0mm の工作物および直径 50 $\mu$ m のタングステンワイヤから構成されている。本研究では工作物に金型として広く使用されている SKD11 を使用した。図 1 のように、高速度ビデオカメラを用いて加工中のワイヤを加工進行方向の後方と側面から撮影し、ワイヤ挙動を解析した。撮影にはデジタル高速度ビデオカメラシステム (Keyence 社製 VW-6000) を使用した。撮影視野は 0.4 $\times$ 0.2mm であり、撮影箇所は、基本的に工作物上部直上とした。撮影速度は主に 8000fps とし、ワイヤ振動モードの詳細な検討の場合には 24000fps で撮影を行った。また、露光時間は 1/40000sec である。ワイヤ放電加工条件は、タングステンワイヤを使用して鋼板を加工する場合の加工機メーカー推奨の 1st カット条件である。

## 2-2 ワイヤ振動の解析

運動解析ソフトウェア(DIRECT 社製 DIPP-Motion Pro)を使用し、加工中のワイヤ振動解析を行った。ワイヤエッジを強

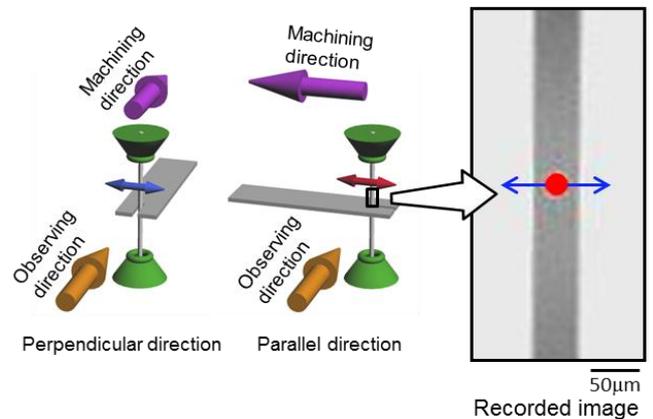


Fig. 1 High speed observation system for fine wire EDM

調するため、高速度ビデオカメラ側に対してワイヤの後方から照明を用いて撮影を行った。そして、撮影された動画中の任意の高さにおけるワイヤのエッジ部分を 1 コマ毎に画像処理によって自動検出、追尾し、ワイヤの水平方向の時間的変位を計測することでワイヤ振動の振幅、周波数を評価した。

## 3. 実験結果および考察

## 3-1 工作物位置の影響

細線ワイヤを用いる微細ワイヤ放電加工では、工作物厚さは数 mm 以下であることが多い。また、一般にワイヤを支持するワイヤガイドは、噴流ノズルの内部に位置し、噴流ノズルの端部から数 mm 内側にあるため、噴流ノズルと工作物を最接近させても工作物の表面からワイヤガイドまでの距離は数 mm 以上残る。

図 2(a)のように、厚さ 1mm の工作物の位置が上下ワイヤガイドの中央位置にある場合の加工中のワイヤ挙動の周波数解析結果を図 3 (a) に示す。その振動モードをより顕著に得るため、ここではガイド間距離を 31mm と少し長くとしている。図中の破線は弦振動の n 次モードの理論周波数を示している。n 次モードの理論周波数  $f_{nh}$  (Hz) は式 (1) で与えられる。

$$f_{nh} = \frac{n}{2L} \times \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad (1)$$

ここで、 $L$  は上下ガイド間距離 (m) であり、 $T$  はワイヤテンション (N)、 $\rho$  はワイヤ線密度 (kg/m) である。

図 3(a)より、1次と3次モードの周波数割合は高く、2次と4次の周波数のピークはほとんど現れていない。すなわち、図 2(a)に示すように、奇数モードの弦振動のみが主に現れ、常に大きな振幅の腹は工作物のある位置に発生していることがわかる。すなわち、1次と3次モードの弦振動の腹が重畳する位置で加工が行なわれていると言える。したがって、図 2(b)に示すように、工作物の位置を3次モードの弦振動の節の位置にすることによってワイヤ振幅をいくらか減少させることができるのではないかと考えた。

図 3(b)は、図 2(b)に示すように、3次モードの弦振動の節に工作物を位置決めし、加工した場合のワイヤ挙動の周波数スペクトルである。図 3(b)より、1次と3次モードの周波数割合は減少し、2次と4次モードの周波数割合はかなり増加していることがわかる。さらに、高次モードの周波数が新たに現れている。

表 1は、工作物位置を変化させたときの工作物の位置でのワイヤの最大振幅  $A_z$  の比較である。ガイド間距離が 31mm、46mm のいずれの場合においても、工作物を3次モードの節の位置にすることで加工中のワイヤ振幅は、減少することがわかる。すなわち、安定した1次、3次モードのワイヤ振動を乱すことで、ワイヤ振幅を減少させることが可能である。したがって、ノズルを密着させない加工の場合には、工作物位置を適宜変化させるだけでワイヤ振幅を減少できる。

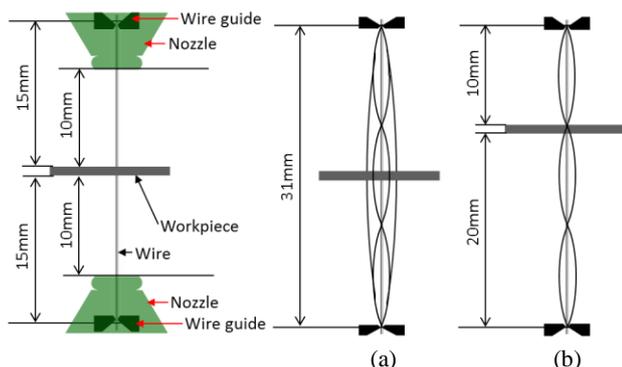


Fig. 2 Schematic diagram of workpiece positions

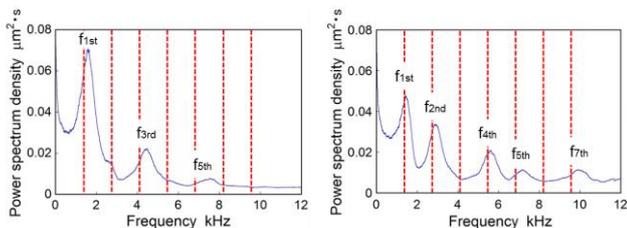


Fig. 3 Frequency spectrum of wire movements

Table 1 Comparison of wire vibration amplitude

| Workpiece position |      | Midway             |                    | 3rd order node     |
|--------------------|------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Measuring position |      | Midway             | 3rd order node     |                    |
| Guide distance     | 31mm | 6.05 $\mu\text{m}$ | 5.24 $\mu\text{m}$ | 5.14 $\mu\text{m}$ |
|                    | 46mm | 6.46 $\mu\text{m}$ | 5.59 $\mu\text{m}$ | 5.64 $\mu\text{m}$ |

### 3-2 加工中のワイヤ振幅包絡形状

加工中のワイヤ状態をさらに詳しく説明することを目的

とし、加工中のワイヤ振幅包絡形状についての検討を行った。図 4は、上下ノズル間各位置でのワイヤ最大振幅を測定することによって求めたワイヤ振幅包絡形状を示している。図 4(a)は加工方向に対して垂直な方向の場合、図 4(b)は平行な方向の場合を示している。なお、噴流ノズルの影響で噴流ノズル内部およびその付近の領域では測定が困難だったため、中抜きのプロットで予想される包絡形状を示している。加工方向に対して平行な方向のワイヤ振動は、加工方向に対して前方と後方で対称な振動にならない。そこで、加工中とワイヤ走行のみのワイヤ振幅を合わせて撮影し、ワイヤ走行のみのワイヤの平均位置を基準とし、加工中のワイヤ平均位置が基準より前後どちらにたわんでいるかを各高さで測定することによって包絡形状を求めている。

図 4(a)より、加工方向に対して垂直な方向では、工作物がある中央の位置で振幅は小さくなっている。これは、加工点では加工溝によって振幅が制限されているためと考えられる。また、点線で示す3次モードの節の位置付近でワイヤ振幅が小さくなっていることがわかる。一方、図 4(b)に示す加工方向の場合、加工方向に対して前方では工作物によって振幅が小さくなっていることがわかる。それに対してワイヤ後方では、加工溝による制限が無いため、加工点で振幅が最も大きくなっている。また、◇印で示す加工中のワイヤの平均たわみは、加工点で最大となっている。垂直方向の場合と比較すると、加工方向に対して前方では、大きさ、形状ともにほぼ同じだが、後方では、加工溝による振動の制限が無いため振幅の大きさも形状も異なっていることがわかる。

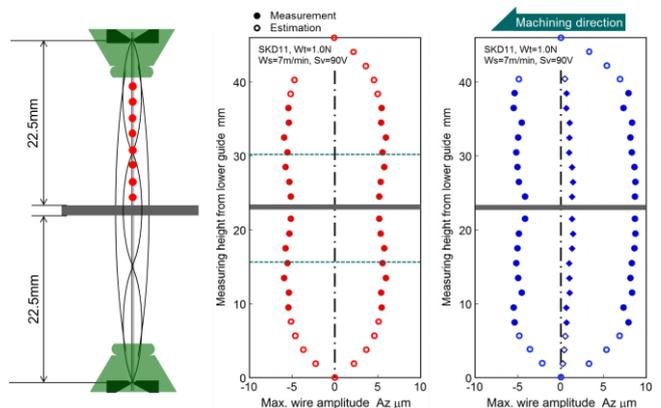


Fig. 4 Amplitude envelope of wire electrode

### 4. 結 言

- (1) 細線ワイヤを用いて薄い工作物を加工する場合、ワイヤ振動は1次、および3次モードの弦振動が支配的となる。
- (2) 工作物の加工位置をワイヤ弦振動の3次モードの節の位置とすることで加工中のワイヤ振幅を減少させることができる。
- (3) 加工中のワイヤ振幅包絡形状は工作物の存在によって特異な形状を示す。

### 参考文献

- (1) Yamada, H., Mohri, N., Saito, N., Magara, T., 1997, Modal Analysis of Wire Electrode Vibration in Wire-EDM, International J. of Electrical Machining, pp.19-24.
- (2) Han, F., Kunieda, M., Sendai, T., Imai, Y., 2002, High Precision Simulation of WEDM Using Parametric Programming, CIRP Annals, 51 (1), pp.165-168.