放電ワイヤカットの
ワイヤ挙動に関する研究 (第1報)

— ワイヤ振動と放電現象 —

堀尾健一郎* 木下夏夫* 福井雅彦*

The Study of Wire Behaviour
in Wire EDM (1st report)

— Wire Vibration and Discharge Phenomena —

by Kenichiro HORIO, Natsuo KINOSHITA
and Masahiko FUKUI

For improving the performance of wire-EDM, the behaviour of wire electrode in working gap have to be investigated. But there have not been any paper dealing with its dynamic behaviour. The existence of electrical or optical noise in working gap have disturbed direct measurement of wire behaviour.

The authors have succeeded to measure the wire behaviour directly and taken notice of the relationship between wire vibration and discharge phenomena by spectrum analysis of both wire vibration and smoothed discharge current.

In conclusion following things are found out. Wire vibration occurs when machining starts and is not affected by wire feeding and machining water supply. The amplitude of wire vibration along right-angled direction of machining is always bigger than that along machining direction. Wire

* 東京大学工学部

vibration has inherent component on wire feeding system and uninherent one. The frequency of inherent component is equal to twice of that of vibration of normal mode. Smaller the amplitude becomes, higher the frequency of uninherent component becomes. There is close relationship between the amplitude of wire vibration and the width of machining gap. There is also close relationship between uninherent component of wire vibration along machining direction and periodic discharge concentration.

1. ま え が き

放電ワイヤカット加工法を型彫りの放電加工と対比させた場合、最も特徴的なことは電極として柔軟な金属ワイヤを用いていることであり、極間における放電反発力等の作用による電極ワイヤの動きを無視することができず、加工性能向上や極間現象解明には電極ワイヤの挙動の把握が肝要である。

しかしながら、ワイヤ挙動に関する研究は少なく、^{1) 2)} それも静的な挙動に関する議論にとどまっている。なぜならば、ワイヤは細く、変位は小さく、加工中は加工溝の中に存在することや、加工中の電気的ノイズや、加工液による光学的ノイズなどのために直接測定が困難とされているからである。極間電圧波形の時系列特性に注目して加工中ワイヤの運動を間接的に推定する試みがなされたが、³⁾ 放電特性とワイヤ挙動との間の関係が必ずしも明確ではない。

しかるに筆者等は、加工液の供給に工夫をし、更に電気的ノイズに強い非接触電子光学式変位測定装置を用いて極間のごく近傍のワイヤ挙動の測定に成功した。本報では、極間における電極ワイヤの挙動の内の動的な部分のワイヤ振動について、その加工中の特徴を抽出するための振巾測定と周波数分析の結果を示す。更に、放電電流波形の周波数分析を行なってワイヤ振動と放電現象との関わりを求めた結果についても報告する。

ワイヤの挙動については、その静的な部分である“たわみ”も形状精度等については大変重要な要因であるが、本報告では加工溝巾等に影響を与え、極間の動的現象の解明に必要な振動についての解析にとどめ、たわみについては別の機会に報告する。

2. 実験装置及び方法

2.1 変位測定

ワイヤ振動の測定に利用した変位測定装置は、チショー社のOPTFOLLOW 500Mである。本測定器はローノイズ型のイメージディセクターチューブを内蔵した非接触電子光学式変位測定装置で、雑音に強く放電加工中でも変位測定に支障をきたさなかった。

図1は変位測定装置の視野の模式図である。外側の四角を視野とすると、移動する物体（本研究の場合

合は電極ワイヤ)の暗一明,あるいは明一暗のエッジの位置(E1, E2)を左端で-5V,中央で0V,右端で+5Vのように位置に対応する電圧を出力するようになっている。E1やE2を単独で出力させることも,両方同時に出力させたりE1とE2の差の変化(厚さの変化)を出力させたりすることも可能である。

本研究においては視野(図1の四角の幅)を1mmにして測定した。分解能は視野の0.1~0.01%である。照明は光を測定物のうしろから照らすバックライト法で行なった。

図2はワイヤ支持系の模式図である。ワイヤガイドは弧状のV形溝になっており,ワイヤは下から上に走行する。

変位測定装置は本質的には光学式であるので,極間における加工液の存在は測定に対する光学的ノイズとなる。通常の加工時の加工液供給はワイヤを加工液で包みこむようにする同軸式であるが,本研究では下側ノズルからは同軸式で供給するが,上側ノズルからは極間から少し離れた位置からワーク上面を流して極間に供給する注ぎかけ式で加工液を供給した。そして,ワークの上面からの距離 h (図2)のところのワイヤの変位を測定した。ワイヤが下から上に走行している

ために,時々極間でワイヤに水滴が付着しそのまま走行して,見かけ上非常に大きな変位が生じたようになってしまいが,水滴が付着した場合にはE1とE2で変位の方向が逆向きになることを利用して,E1とE2の差の信号を使って水滴の影響を除去した。

変位測定装置の出力はデータレコーダに記録した後,ビジュグラフに出力して振巾測定を行なった。また,スペクトラムアナライザを用いて周波数分析を行なった。使用したスペクトラムアナライザはタケダ理研製のTR-9305である。

2.2 実験条件

実験に使用した放電ワイヤカット加工機は富士通FANUC製のFANUC TAPE CUT Bシリーズ及びCシリーズで主な加工条件を表1に示す。電気条件等については標準加工条件を示している。

3. ワイヤ振動の振巾測定と周波数分析

3.1 振動の方向

図3に示すように,ワイヤの振動については,加工方向と同じ方向(送り方向と呼ぶ)とそれに直角

図1 変位測定装置の視野の模式図

図2 ワイヤ支持系の模式図

表 1 加工条件

加工電源回路	TRC回路
電源電圧	$V_0 = 270 \text{ V}$
コンデンサ容量	$C = 50 \text{ nF}$
充電抵抗	$R = 70 \Omega$
ON タイム	$2 \mu\text{s}$
OFF タイム	$2 \mu\text{s}$
工作物板厚(材質)	$T_h = 5 \text{ mm (S10C)}$ $T_h = 20 \text{ mm (SKD11)}$
ワイヤ材質	0.196 mm ϕ Cu(軟)線
ワイヤ張力	$T = 340 \text{ gw}$
ワイヤ送り速度	$W_s = 27 \text{ mm/sec}$
スパン 上側	$S_1 = 3.7 \text{ cm}$
下側	$S_2 = 4.5 \text{ cm}$
加工液	水(比抵抗 $5 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$)
加工液流量 上側	7 cc/sec (注ぎかけ)
下側	24 cc/sec
テーブル送り速度	$T_s = 0.8 \text{ mm/min}$ 定速送り
測定点高さ	$h = 1 \text{ cm}$

な方向(直角方向と呼ぶ)の二者について測定した。

図4はワイヤ振動のシンクロスコープ出力例である。図5はビジグラフに出力した例である。共に(a)が直角方向、(b)が送り方向の振動を示す。直角方向の振動の方が送り方向よりも振巾が大きいことがわかる。また、図4においても図5においても、送り方向の振動には、時々下向きに若干大きな変位がある。この方向は図3の加工方向と逆の方向に対応し、加工間隙においてその方向にだけ拘束がないために、時々大きな変位をもたらすと考えられる。図5(b)に示すように、この量を振れと呼び振巾とは区別することにする。振れが生ずる時間間隔は一定ではないが、大体数十～百数十msに1回である。

図6はワイヤ振動の周波数分析結果の一例である。前図と同様に、(a)が直角方向、(b)が送り方向の振動の周波数分析結果である。周波数の低い方から2番目のピーク及びそれ以上のところでは、両方向の分析結果がほぼ同じであるが、1番目のピー

図3 加工方向と振動方向

クについては直角方向の方が低い周波数でピークを呈する。以後、周波数の低い方から1番目のピークを1次のピーク、2番目を2次のピークと呼ぶことにする。

3.2 無加工時の振動

図7(a)(b)は加工を行っていない時のワイヤ振動の測定結果である。(a)は加工液の供給のない場合、(b)は加工液の供給ある場合で、ワイヤは走行させている。

図5の加工中ワイヤの振巾の数十 μm と比較して振巾がかなり小さいことが分る。したがって加工中のワイヤの振動の大部分は、放電現象により生じたものと考えられる。

また、加工液の供給によりワイヤを揺らしているといったことはなく、加工液はワイヤ振動に影響を与えていないと言える。

更に、テーブルを送ってもワイヤ振動には差異を生じず、テーブルを送ることによる機械振動の影響もないことが分った。

3.3 加工条件の影響

図8はテーブル送り速度の変化によるワイヤ振動への影響を示す。図(a)は振巾測定の結果を、図(b)は周波数分析の結果を2次のピークまで示す。パラメータとしては加工方向をとった。X方向は図2の左右方向であり、Y方向は紙面に垂直な方向である。図(a)(b)より明らかなように、X方向加工とY方向加工ではワイヤ振動について差異がない。X方向加工とY方向加工では、V形溝の聞いている方向と加工方向との相対的な位置が異なっていることを考え合わせると、ワイヤ振動は支持形態の影響をうけていないことが分る。

図8(b)において図中一点鎖線で示したのは、両端固定の弦の基本振動数とその2倍の振動数である。すなわち、

$$f_n = \frac{n}{2S} \sqrt{\frac{T}{\sigma}} \quad (1)$$

$$\left(\begin{array}{ll} S : \text{スパン} & S = S_1 + S_2 + T_h \\ T : \text{ワイヤ張力} & \sigma : \text{線密度} \end{array} \right)$$

図4 ワイヤ振動波形

ワイヤ：銅線 $0.196 \text{ mm}\phi$, $V_0 = 270 \text{ V}$,
 $C = 50 \text{ nF}$, $R = 70 \Omega$, $T_h = 5 \text{ mm (S10C)}$,
 $T = 340 \text{ gw}$, $S_1 = 3.7 \text{ cm}$, $S_2 = 4.5 \text{ cm}$,
 $T_s = 0.8 \text{ mm/min}$, $h = 1 \text{ cm}$

(a) 直角方向

(b) 送り方向

ワイヤ：銅線 $0.196 \text{ mm } \phi$, $V_0 = 270 \text{ V}$,
 $C = 50 \text{ nF}$, $R = 77 \Omega$, $T_h = 20 \text{ mm (SKD11)}$,
 $S_1 = 3.7 \text{ cm}$, $S_2 = 2.5 \text{ cm}$, $T_s = 0.3 \text{ mm/min}$,
 $h = 1 \text{ cm}$

図5 ワイヤ振動の振幅（加工中）

に $n = 1$ 及び 2 を代入した値であり、それぞれ1次モード、2次モードの振動の振動数である。その大きさはワイヤ材質が一定の場合はスパンとワイヤ張力で決まってしまう値である。本条件の場合は銅の比重を 8.9 として $f_1 = 608 \text{ Hz}$ である。図(b)において2次のピーク周波数は、テーブル送り速度や振動方向が変わっても変化せず一定で、2次モードの振動数と一致している。したがって、ワイヤ振動についてはワイヤ支持系のパラメータ（スパンと張力）によって定まる固有の成分が含まれることになる。

図8における振巾と1次のピーク周波数は、テーブル送り速度や振動方向の影響を受ける。テーブル

(a) 直角方向

(b) 送り方向

ワイヤ：銅線 $0.196 \text{ mm } \phi$, $V_0 = 270 \text{ V}$,
 $C = 50 \text{ nF}$, $R = 70 \Omega$,
 $T_h = 5 \text{ mm (S10C)}$, $T = 400 \text{ gw}$,
 $S_1 = 3.7 \text{ cm}$, $S_2 = 2.5 \text{ cm}$,
 $T_s = 0.4 \text{ mm/min}$, $h = 1 \text{ cm}$

図6 ワイヤ振動の周波数分析

送り速度が大きくなるにつれて、振巾は小さくなりピーク周波数は大きくなる。また直角方向の方が送り方向より常に振巾が大きくピーク周波数が小さい。この直角方向の振動と送り方向の振動の相対的な関係は、加工条件が変化しても常に成立つ関係である。

図9は黄銅線を使って、他の加工条件は固定したまま張力だけを変化させていったときのワイヤ振動の測定結果である。前図と同様に、図(a)が振巾測定、図(b)が周波数分析の結果である。図(b)の中の実線は、弦の1次2次モードの振動数である。図(a)には無加工時(ワイヤ走行、加工液供給あり)の振巾も示す。図(b)よりワイヤ張力が変化しても、直角方向の振動も送り方向の振動も2次のピーク周波数は2次モードの弦の振動数に一致し、先程と同じ結果が得られる。また、無加工時の振動の振巾は加工時よりずっと小さく、加工時の振動と同様に張力が増加するにつれて振巾が減少する。

図10は加工条件を変化させたときの直角方向と送り方向の振巾の関係を示したものである。ワイヤは銅線の場合である。プロットした各点は両者の振巾の関係を示し、送り方向のひげの部分は振れを示す。表1の加工条件における結果が図中の標準条件の点である。各印の付いた点はそれぞれのパラメータを変化させた結果である。標準条件から変化させ

た条件としては、 $V_0 = 375 \text{ V}$ 及び 165 V 、 $C = 100 \text{ nF}$ 及び 150 nF 、 $T = 260 \text{ gw}$ 及び 400 gw 、 $T_s = 0.4 \text{ mm/min}$ 及び 1.2 mm/min 、 $S_1 = 2.7 \text{ cm}$ 及び 4.7 cm 及び 5.7 cm である。加工条件が変化しても、直角方向の振巾の方が送り方向の振巾よりも大きいという関係は維持される。振れまで考慮に入れば両者はほぼ同じ大きさになる。また、1次のピーク周波数については直角方向の方が送り方向より小さい。

また、ワイヤ送り速度がワイヤの振動に対してどのような影響を与えるのかについて実験したが、ワイヤ送り速度の変化は、ワイヤ振動の振巾や周波数に全く影響を及ぼさないことが分った。

3.4 ワイヤ振動と加工構巾

(a) 加工液供給なし

(b) 加工液供給あり

ワイヤ走行, $S = 10.2 \text{ cm}$, $T = 400 \text{ gw}$

図7 ワイヤ振動の振幅(無加工時)

(a) 振幅測定

(b) 周波数分析

ワイヤ：銅線 $0.196 \text{ mm } \phi$, $V_0 = 270 \text{ V}$, $C = 50 \text{ nF}$, $R = 70 \Omega$,
 $T_h = 5 \text{ mm (S10C)}$, $T = 340 \text{ gw}$, $S_1 = 3.7 \text{ cm}$, $S_2 = 4.5 \text{ cm}$,
 $h = 1 \text{ cm}$

図8 テーブル送り速度とワイヤ振動（パラメータ：加工方向）

(a) 振幅測定

(b) 周波数分析

ワイヤ：黄銅線 $0.197 \text{ mm } \phi$, $V_0 = 270 \text{ V}$, $C = 50 \text{ nF}$, $R = 70 \Omega$,
 $T_h = 5 \text{ mm (S10C)}$, $S_1 = 3.7 \text{ cm}$, $S_2 = 4.5 \text{ cm}$, $T_s = 0.8 \text{ mm/min}$, $h = 1 \text{ cm}$

図9 ワイヤ張力のワイヤ振動への影響

図11は、図10と同様に、加工条件が変化するときの直角方向の振巾と加工溝巾の関係を示したものである。横軸には（ワイヤ径+振巾）をとってある。加工溝巾と振動の振巾との間には密接な関係があるといえる。すなわち、ワイヤ振動の振巾は加工条件の変化に対して加工溝巾と同じ傾向の影響をうけることになる。図11の中の直線の傾きは大体2位であり、振巾の増加に対し加工溝巾はその約2倍

ワイヤ：銅線 $0.196 \text{ mm } \phi$, $T_h = 5 \text{ mm (S10C)}$,
 $h = 1 \text{ cm}$

図 10 直角方向振幅と送り方向振幅

ワイヤ：銅線 $0.196 \text{ mm } \phi$, $T_h = 5 \text{ mm}$
 (S10C) , $h = 1 \text{ cm}$

図 11 加工溝幅と振幅(直角方向)の関係

で増加することになる。

4. 放電の時間集中とワイヤ振動

4.1 平滑電流波形の周波数分析

ワイヤ振動と放電現象の関わりを調べるために放電電流波形の周波数分析を行なった。しかし、放電のくり返しは本研究の条件では $10 \sim 60 \text{ kHz}$ 位でワイヤ振動の振動数のオーダよりずっと大きい。RC回路であるためくり返しの時間間隔が

図 12 放電電流波形と平滑化波形

ワイヤ：銅線 $0.196 \text{ mm } \phi$, $V_0 = 270 \text{ V}$,
 $C = 50 \text{ nF}$, $R = 70 \Omega$, $T_h = 5 \text{ mm (S10C)}$,
 $T = 400 \text{ gw}$, $S_1 = 3.7 \text{ cm}$, $S_2 = 2.5 \text{ cm}$,
 $T_s = 0.4 \text{ mm/min}$

図 13 平滑電流波形の周波数分析

一定でないこともあって、周波数分析の結果は2 kHz 辺りより下にピークをもつことがわかった。そこで、ワイヤ振動と同じオーダでの分析を行なうために、電流波形を平滑化してその信号について周波数分析を行った。平滑化した電流波形は放電の時間集中を示すようになっている(図12)。平滑化には5 kHz のローパスフィルタを用いた。

図13は図6と同じ条件における平滑電流波形の周波数分析結果である。板厚は5 mm である。かなりはっきりしたピークが見られ、1 番目のピーク周波数は図6の送り方向振動の1 次のピーク周波数と一致していることが分る。

図14はテーブル送り速度を変化させて、ワイヤ振動と平滑電流波形の周波数分析を行ない、2 番目までのピークを示したものである。テーブル送り速度が変化しても、送り方向振動と平滑電流波形の1 次のピーク

周波数は一致しており、送り方向のワイヤ振動は放電の時間集中と密接な関係があることが分る。すなわち、ワイヤがワークに近付くことにより放電が集中し、放電が集中したことによりワイヤが逆向きに動かされるといったことが極間でくり返されていると考えられる。また2 次のピークについては、直角方向振動と送り方向振動の二者が2 次モードの弦の振動数に一致しているのに対し、平滑電流波形のピーク周波数はそれより高いところにあり、ワイヤ振動との直接的な関係はみられなかった。

4.2 ワイヤ振動と平滑電流波形の相互相関

図15は板厚が20 mm の場合のワイヤ振動と平滑電流波形の周波数分析結果である。図(c)を図13と比べて明らかなように、板厚が20 mm と厚くなるのに伴ない電流波形のピークが顕著でなくなりワイヤ振動との周波数の一致が明らかでなくなった。これは板厚が増加することにより放電が集中しにくくなったものと考えられる。

周波数分析の結果からは、ワイヤ振動と放電の集中との関係がはっきりしないので、ワイヤ振動と平滑電流波形の相互関係を求めた。図16はその結果である。相互相関を求めるのには、日本科学工業製の相関確率分析器SAI-42Aを用いた。図16から分るように、直角方向振動と平滑電流波形には相関があまりみられないが、送り方向振動との間には相関があり、ワイヤ振動と放電現象との間には密接な関係があることが分る。なお、相互相関における時間遅れには、放電の集中と平滑化波形のピークの間の時間遅れ等が含まれており、電流波形が遅れているかどうかは定かでない。

ワイヤ：銅線 0.196 mm ϕ , $V_0 = 270$ V,
 $C = 50$ nF, $R = 77$ Ω , $T_h = 5$ mm (S
 10 C), $T = 400$ gw, $S_1 = 3.7$ cm,
 $S_2 = 2.5$ cm, $h = 1$ cm

図14 ワイヤ振動と平滑電流波形の周波数分析

(a) 直角方向の振動

(b) 送り方向の振動

(c) 平滑電流波形
周波数 (kHz)

ワイヤ：銅線 $0.196 \text{ mm } \phi$, $V_0 = 270 \text{ V}$,
 $C = 50 \text{ nF}$, $R = 77 \Omega$, $T_h = 20 \text{ mm}$
 (SKD 11), $T = 400 \text{ gw}$, $S_1 = 3.7 \text{ cm}$,
 $S_2 = 2.5 \text{ cm}$, $T_s = 0.3 \text{ mm/min}$, $h = 0.5 \text{ cm}$

図 15 ワイヤ振動と平滑電流波形の周波数分析

5. 結 論

放電ワイヤカット加工法において、電極ワイヤの挙動を直接測定することにより、加工中のワイヤ振動の特徴及び放電現象との関係を求め次の結論を得た。

(a) 送り方向振動と平滑電流波形の相互相関

(b) 直角方向振動と平滑電流波形の相互相関

(+方向は電流波形の遅れ, -方向は振動波形の遅れ)

ワイヤ：銅線 $0.196 \text{ mm } \phi$, $V_0 = 270 \text{ V}$,
 $C = 50 \text{ nF}$, $R = 77 \Omega$, $T_h = 20 \text{ mm}$ (SKD
 11), $T = 400 \text{ gw}$, $S_1 = 3.7 \text{ cm}$, $S_2 = 2.5 \text{ cm}$
 $T_s = 0.2 \text{ mm/min}$, $h = 0.5 \text{ cm}$

図 16 ワイヤ振動と平滑電流波形の相互相関

- 1) ワイヤ振動は加工開始による放電エネルギーの機械的作用により生ずる。加工液流やワイヤ送り速度、支持形態の相違の影響はうけない。
- 2) 振動の振巾は直角方向の方が送り方向よりも大きい。
- 3) ワイヤ振動の周波数成分は、加工条件により変化する成分と変化しない成分があり、変化しない成分は弦の2次モードの振動数に等しい。
- 4) 加工条件により変化する成分は、振巾が減少すれば周波数が高くなる傾向がある。
- 5) 加工溝巾とワイヤ振動の振巾には直線関係がある。
- 6) 放電の時間集中とワイヤの送り方向振動の間では、板厚が薄い場合は周波数の一致がある。板厚が厚い場合でも相関がある。放電現象とワイヤ振動が相互に影響し合っていることが推察される。

(1980. 12. 26 受付)

参 考 文 献

- 1) N. Schmiat-Ott : Technik des funkenerosiven Drahtschneidens, Fertigung, 4/70
- 2) Von. F. Balleys : Materialabtrag und Genauigkeit beim Drahterodieren, Fertigung, 5/77, 131~134
- 3) 福井, 木下, 新名 : 放電ワイヤカットに関する研究 (第3報) — 電極ワイヤの運動と放電特性 — 電気加工学会誌 14 巻 27 号 (1980)
- 4) 堀尾, 木下, 福井 : 放電ワイヤカットに関する研究 — 電極の振動について —, 第96回電気加工研究会資料, No. 96-104 (1980)
- 5) 堀尾, 木下, 福井 : 放電ワイヤカットに関する研究 — 放電と電極振動の相互作用 —, 昭和55年度精機学会秋季大会講演論文集 308