研 究

ワイヤ放電加工のワイヤ温度分布計測の試み

—第2報 加工中のワイヤ平均温度—

小原治樹* 足立誠司* 大住 剛*

An Attempt to Measure a Wire Temperature Distribution on Wire EDM

—2nd Report : Averaged Wire Temperature during EDM—

Haruki OBARA, Seiji ADACHI and Tsuyoshi OHSUMI

Abstract

To prevent the wire breakage during Wire EDM there should be information of the wire temperature because it is said that the wire may be broken by increasing of wire temperature. In our previous report¹⁾ we tried to measure the wire temperature distribution from discharging currents and voltage between the upper and the lower contactors contacting to the wire and averaged wire temperatures of 100°C or less were obtained. But these data were not calibrated and were not precise enough.

In this report we retry to obtain precise averaged wire temperatures for two types of power supplying methods. In the first method the power is supplied from the lower contactor and in the 2nd the power is supplied simultaneously from the upper and the lower contactors. Also two types of workpiece materials, SUS304 and SKD11 are machined and results are compared. Wire temperatures are calibrated. It was found that during Wire EDM the wire resistance facing to the workpiece is greater than the static value and especially great in the case of ferromagnetic workpiece. Obtained averaged wire temperatures were almost 100°C at the maximum cutting speed for any cases.

1. はじめに

ワイヤ放電加工の加工速度はワイヤの断線により制限される。したがって加工中のワイヤ温度がどの程度でどのように分布しているかを知ることが、ワイヤ断線のメカニズムを解明し、加工速度を向上する上で重要と考えられる。

前報¹⁾ではワイヤの上下から同時に放電電流を

供給する場合において、上下放電回路の電流 I_u , I_d を測定するとともに、ワイヤ上下の2個の検出子間の電圧 ΔV を測定し演算することによりワイヤ温度分布を求める方式を提案し、計測の結果ワイヤの平均温度は100°C程度かそれ以下であり、ワイヤ温度-強度特性から推定されるワイヤ温度に比べて極めて低いことを示した。

しかしながら前報の測定ではデータ点数が少なく、バラツキが大きいため精度が不十分であり、

*富山大学工学部

及ぼす R_0 の値の影響が小さいことが前報で確かめられているのでこの方法を採用した。

3. 実験装置および実験方法

上下放電電流は前報で述べたように、放電路まわりに設置したログスキコイルの出力を積分して求めた。また上下検出子間の電圧は図1のように上下検出子間に抵抗 R_c を接続し、これに流れる電流を電流プローブで計測して求めた。波形はサンプリング間隔 $0.1\mu\text{s}$ でデジタルオシロスコープに取り込み、パソコンで演算処理した。波形のわずかな乱れは3点平均により平滑化した。

図2に温度校正方法を示す。ワーク周囲を水槽で囲み、ガス給湯器から注湯して加工領域の温度を変えた。構成上ワーク面をノズルに接近できなかったため加工速度は遅い。全体の温度が一樣となるよう15分程度注湯ののち校正を行った。校正時にはワイヤの温度上昇が問題ないように十分に

オフ時間を増して低速で加工を行った。

表1に実験条件を示す。ワークは板厚40mm, 80mmのSUS304と板厚80mmのSKD11を用いた。ワーク形状を図3に示す。右の3個の突起は放電位置検出精度と抵抗検出精度の検討のために設けた。ワイヤは古河電工製の 0.25ϕ のアルミ入り軟

図2 温度校正方法

図3 ワーク形状

表1 基準加工条件

No Load Voltage V_0 (volt)	100
Capacitance C (μF)	1.5
Wire Tension T (N)	9.8
Wire Feedrate (m/min)	6
Water Flow	6

Wire: Al Containing Soft Brass

0.25ϕ ($1.554\Omega/\text{m}$)

Workpiece: SUS304 40mm, 80mm and

SKD11(not hardened) 80mm

表2 加工速度, およびワイヤ消耗率

Workpiece material, thickness	off time (μs)	Cutting speed (mm/min)	Worn wire resistance (Ω/m)	Wear rate (%)
SUS304 40mm	51.5	0.30	1.599	2.895
	20.5	0.85	1.636	5.277
	14	1.20	1.680	8.108
	8	1.58	1.724	10.94
SUS304 80mm	51.5	0.15	1.614	3.861
	20.5	0.42	1.655	6.499
	10	0.77	1.702	9.395
	6.5	1.00	1.734	11.75
SKD11 80mm	51.5	0.15	1.598	2.831
	32.5	0.25	1.631	4.955
	40.5	0.42	1.660	6.821
	15	0.60	1.662	6.950
	10	0.65	1.677	7.915
	6.5	0.75	1.698	9.266

黄銅線である。表2に加工速度と加工後の抵抗値から求めた消耗率を示す。

実験に用いたワイヤ放電加工機はFANUC(株)製FTC MODEL-SPプロトタイプ、オシロスコープは横河電気(株)製DL1200、上下検出子間電圧の計測に用いた電流プローブはSony Tektronix社製P6021 current probeである。

4. 抵抗検出精度の検討

上下放電電流の和 $I_T = I_u + I_d$ と差 $\Delta I = I_u - I_d$ 、および上下検出子間電圧 ΔV の波形例を図4に示す。図4に見られるように ΔI 波形と I_T 波形が異なるが、これは上下の放電電流に位相差があることを示す。したがって ΔV としてどの時点の値を用いるかによりワイヤインダクタンスの影響が残

図4 I_T , ΔI 電流波形および ΔV 電圧波形例 (SUS304, 80mm, $1 \mu s/div$)

図5 $R_d - \Delta I/I_T$ 関係 (3突起部)

る可能性がある。ここではもっともインダクタンスの影響が少ないと考えられる I_T 波形のピーク時点の値を用いて抵抗を計算した。 I_T のピーク時点において上下電流の電流微分成分は小さくほとんど計測結果に影響しないことを確認してある。

次に図3のワークの3突起部分で放電し、 R_d と $\Delta I/I_T$ の検出精度を調べた結果を図5に示す。 R_d , $\Delta I/I_T$ とも $\pm 1.5mm$ 程度のバラツキである。

5. ワークへの切り込み深さの影響

竹下ら²⁾はワークへの切り込み深さを増すと、ワイヤのインダクタンスの増加により放電位置検出感度が増すことを指摘している。図6, 図7に

図6 切り込み深さの影響 (SUS303, 80mm 両側給電)

図7 切り込み深さの影響 (SKD11, 80mm 両側給電)

切り込み深さを増した場合のワイヤ抵抗値を示す。この場合はワイヤ上下から給電している。 R_0 として静的な値を用いて計算したため、全体的に下方にシフトしており正確ではないが、3突起部分の抵抗に比べ、切り込み深さを増すと放電部分のワイヤ抵抗が増すことが分かる。またその増加の程度はSUS304では20%程度であるが、SKD11では80%以上増加している。

これらの結果は竹下らの記述と類似するが、本質的には異なる。すなわちこの計測では本来インダクタンスの影響が少ない電流ピーク時点の値を用いているので、図6、図7の抵抗増加は単純なインダクタンスの増加によるものとは考えられない。ワイヤに電流が流れるとワークにもそれと平行に反対方向に表皮電流が流れるが、この表皮電流とワイヤ内の電流の相互作用によってワイヤ内の電流分布が片寄り、抵抗値が高くなるためであると思われる。またSUS304とSKD11で異なるのは、SUS304は非磁性体であるがSKD11は強磁性体であり、ワイヤワーク間のギャップの磁界の強さが大きいので、これによってワイヤ中の電流分布も異なるためであると解される。すなわちワークの存在によってインダクタンスだけでなくワイヤ抵抗も増加する。したがって抵抗計算には静的な R_0 の値を用いることはできない。

6. ワイヤ消耗の影響の補正

加工によりワイヤは図8のように消耗し、そのため抵抗値が増加する。前報ではワイヤの送り長さに比例して消耗が増加すると仮定して各温度で

図8 ワイヤ消耗モデル

図9 消耗率とワイヤ抵抗の関係(SUS304, 80mm 片側給電)

の $R_d - \Delta I / I_T$ 理論曲線を求め、これと比較して温度を推定したが、ここでは竹下らの方法³⁾と同様にワイヤの走行速度を変えることにより消耗率を変化させ、消耗率と抵抗値の関係を求めて消耗率0のときの抵抗値を外挿し補正して温度推定に用いた。

図9に片側給電の場合の消耗率と抵抗の関係例を示す。抵抗の最大値はワーク上端、最小値はワーク下端に対応する。図9は低速加工の場合であるが、上下端間の抵抗値について、各消耗率における抵抗の増加割合を求め、この増加割合が高速加工でも同じであると仮定して、各実験の加工後の消耗率から消耗0の場合の抵抗値を計算した。

なお図8のようにワイヤが送り方向に線形に消耗が増加すると仮定すれば、ワーク下端と上端の補正後の抵抗 $R_{d/D}^*$ 、 $R_{d/U}^*$ を次式で求めることもできる。

$$R_{d/D}^* = \frac{R_{d/D}}{1 + \alpha} \quad (4)$$

$$R_{d/U}^* = \frac{R_{d/D}}{1 + \alpha} + \frac{R_{d/U} - R_{d/D}}{1 + \alpha/2} \quad (5)$$

$R_{d/D}$ 、 $R_{d/U}$ は消耗補正前の下検出子からワーク下端までの抵抗値、および上端までの抵抗値、 α はワークを出た後のワイヤの消耗率である。(5)

図10 温度較正(SUS304, 80mm片側給電)

図11 温度較正結果(SUS304, 80mm片側給電)

式の右辺第1項は下検出子からワーク下端までのワイヤの抵抗であり、第2項はワーク中にあるワイヤの抵抗である。

7. 片側給電の場合の温度計測

片側給電の場合の温度較正例を図10に示す。実線は静的な抵抗値を用いた場合の理論予想値である。各上下端の右の△印は図9の実験をもとに消耗補正した結果、●印は(4)、(5)式を用いた消耗補正結果である。上下端の抵抗の差がワーク中にあるワイヤの抵抗値であり、これをワーク長さで割って単位長さ当たりの抵抗を求めると、図11の温度較正曲線が得られる。

図12 加工速度とワイヤ抵抗の関係(SUS304, 80mm片側給電)

図13 加工速度と温度の関係(SUS304, 80mm片側給電)

また加工速度を変えた場合の抵抗の計測結果を図12に示す。消耗を補正すると上下端の値がかなり低下する。実験から求めた△印の消耗補正結果と●印の理論補正結果はよく一致しており、いずれの補正方法でも良いことが分かる。

図12から求めた単位長さ当たりのワイヤ抵抗を図11の較正結果と比較して、加工速度とワイヤ温度の関係を求めた。一例を図13に示す。この結果からこの場合の最大加工速度におけるワイヤの平均温度は100℃と求められる。

他の加工条件の場合とあわせて、最大加工速度のときのワイヤ平均温度を表3に示す。材質、板厚に関係なく100℃前後の値となった。なお断線

表3 片側給電の場合の平均ワイヤ温度測定結果

Workpiece material		SUS304		SKD11
Thickness(mm)		40	80	80
Average Temp. (°C)	max.speed	110	100	105
	wire break	150	125	147

表4 両側給電の場合の平均ワイヤ温度測定結果

Workpiece material		SUS304		SKD11
Thickness(mm)		40	80	80
Average Temp. (°C)	max.speed	90	95	90
	wire break	140	87	81

直前のデータから求めたワイヤ平均温度も参考として並記した。装置の都合で断線前 5 ms の間の少ないデータから求めたもので、信頼できる値ではないが 100°C よりも大きくなる傾向が見られる。

8. 両側給電の場合の温度計測

両側給電の場合は R_0 の値が必要である。ここではこの値を片側給電のデータから算出する。同一条件で加工すると、片側給電でも両側給電でも消耗率がほとんど同じであったので、ここでは次式により R_0 を求めた。

上式の右辺第 1 項 $R_{d/U}$ は同じ加工条件下の片側給電で求められた下検出子からワーク上端までの抵抗を表す。また第 2 項はワーク上端から上検

$$R_0 = R_{d/U} + \frac{l_u}{l_d} \frac{R_{d/D}}{1 + \alpha} \quad (6)$$

出子までの抵抗であり、ここではその部分のワイヤの比抵抗が、ワーク下端から下給電子までの部分の比抵抗と同じであると仮定し、片側給電の場合の下給電子からワーク下端までの部分の単位長さ当たりの抵抗 $R_{d/D}/l_d$ を、消耗ナシの値にするため $1 + \alpha$ で割ったのち、ワーク上端から上検出子までの長さ l_u を掛けて求めている。

片側給電の場合と同様に温度較正、および消耗補正を行った後、加工速度と平均温度の関係を求めた。SKD11 の結果を図 14 に示す。また他の加工条件の場合とあわせて最大加工速度のときのワイヤの平均気温を表 4 に示す。最大加工速度にお

図14 加工速度と温度の関係(SKD11, 80mm両側給電)

ける温度は 90～95°C であった。なお表 4 の断線時の温度には温度が低下しているものが多いが、データ点数が少ないためである。

9. 結論と考察

片側給電、両側給電の場合について、前報の方式で上下放電電流およびワイヤ上下検出子間の電圧からワイヤ抵抗を求め、温度較正を行ったのち、ワイヤの平均温度を求め、以下の結果を得た。

- 1) 片側給電、両側給電とも、また SUS304, SKD11 のいずれの場合にもワイヤの平均温度は最大加工速度において 100°C 前後であった。これは黄銅線の場合の推定断線温度 450°C に比べかなり小さい値である。このことから平均的温度上昇よりも局部的温度上昇が断線原因として問題になると考えられる。
- 2) 加工中のワイヤ抵抗は表皮効果によって静的な値よりも高くなり、その程度は強磁性体の方が大きい。したがって温度計測する場合はその点の配慮が必要である。またこれは放電回路の特性計算などにおいても問題となる事項であり、注意が必要である。

なお今回は実験装置の都合上、データ点数が少なく正確ではなかったが、断線直前の平均温度上昇の兆候が見られた。本方式の活用により、断線前駆現象をとらえる可能性が残されている。

断線原因としてランダムな放電によって局部的

温度上昇が発生し、これが直接ワイヤ断線に結びつく可能性もあるが、平均温度が上記のように低いということは、集中放電、あるいは局部的冷却不足による局部的な温度上昇が断線の原因となっている可能性が高い。その場合は何らかの放電制御による加工速度向上の可能性が考えられる。本方式は本来温度分布を求めることができる。今回はデータのバラツキが大きく温度分布を求めるにはいたらなかったが、いずれにせよ局部的温度分布が重要であり、今後この方面の研究がさらに必要である。本実験はその足掛かりとなる。

参考文献

- 1) 小原, 岩田, 大住, 安田: ワイヤ放電加工のワイヤ温度分布計測の試み, 電気加工学会誌, Vol.28, No.57, 1994, pp. 21-31
- 2) 竹下, 屋宮, 國枝: ワイヤ放電加工におけるワイヤ温度測定, 1995年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp.331-332
- 3) 竹下, 國枝: 放電点検出の感度変化を利用したワイヤ放電加工のワイヤ温度測定, 1996年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp.201-202
- 4) 小原, 奥山, 米屋, 井岡: 放電加工の放電位置検出に関する研究, 第2報, 電気加工学会誌, Vol.24, No.47, 1990, 11, pp.12-22

(1997年4月29日 受付)