ワイヤ放電加工用高性能ワイヤ電極の開発に関する研究 (第1報)* —コーティングワイヤの基礎的加工特性—

山内俊之**, 岡田 晃***, 森田真人***, 清水敏明**, 宇野義幸***

Development of Coating Wire Electrode for High Performance WEDM (1st Report) — Fundamental WEDM Characteristics of Coating Wire—

Toshiyuki YAMAUCHI, Akira OKADA, Masato MORITA,
Toshiaki SHIMIZU and Yoshiyuki UNO

Abstract

In this study, we aim to develop a new coating wire electrode for a high-performance wire EDM instead of conventional wires. The effects of coating materials on the fundamental machining characteristics are investigated to obtain the optimum structure, using a high-tensile steel wire coated with brass and zinc whose diameter is 200 μ m. The experimental results showed that the removal rate increased with the thickness of the coated brass on the steel wire in WEDM with the brass and zinc coated steel wire. The SEM observation and the element analysis of wires after machining clearly showed that the coated brass layer was easily removed when the thickness was small, and a high tension could be loaded during machining when the thickness of the coated brass was sufficiently large to maintain a stable machining performance. Furthermore, the effect of zinc coating on the removal rate was marked when the thickness of the coated brass was relatively small.

Key words: WEDM, coating wire, tensile strength, removal rate, brass, zinc

1. はじめに

近年、工業製品の小型化・微細化にともない、加工技術の更なる微細化が強く要求されている。このため、精密金型等の加工に広く利用されているワイヤ放電加工においてもより細いワイヤ電極を用いた微細加工の需要が増加している^{1), 2)}。この場合、超硬合金、PCDやSiCといった材料は従来の機械加工では加工が困難なものも多く、その点でもワイヤ放電加工の需要が今後急増することが予測される。

従来ワイヤ放電加工用の電極線には、黄銅やタ

ングステンが一般的に用いられる。黄銅は安価で放電性能が良いため、ワイヤ径が0.1mm以上の加工で多用されるが、引張強さが低いとさらに細いワイヤ径での精密加工には不適である。その場合には、引張強さが高いタングステンワイヤが用いられるが、タングstenは高価であり製造コスト低減の障害となっている。

一方、比較的低コストでの高精度加工の要望に応えるため、最近では各種コーティングワイヤも広く使用されている³⁾。代表的なものに、鋼線に黄銅あるいは亜鉛をコーティングしたものや、黄銅線に亜鉛をコーティングしたものがある⁴⁾。しかしながら、この場合、黄銅や亜鉛のコーティング厚さや性質が加工特性に及ぼす影響は詳しく解明されておらず、コーティングワイヤの能力を十

* 電気加工学会全国大会(2003)にて発表

** トクセン工業(株)(兵庫県小野市住吉町南山 1081)

*** 岡山大学工学部(岡山市津島中 3-1-1)

分に活かしているのか疑問な点が多い。またタングステンワイヤに匹敵するほどの引張り強さはなく、鋼芯線の引張り強さについても改善の余地があると考えられる。

そこで本研究では、従来のコーティングワイヤよりも引張り強さが高い特殊な鋼線を芯材とし、従来のコーティングワイヤやタングステンワイヤを上回る高性能細線ワイヤ電極を開発することを目的としている。本報告では、その第一段階として黄銅および亜鉛コーティングがワイヤ放電加工特性に及ぼす基礎的な影響について考察を行った。

2. 実験方法

実験にはリニアモータ駆動ワイヤ放電加工装置（Sodick 社製 AQ550L）を使用した。工作物には厚さ 10mm の冷間金型鋼 SKD11 を用い、加工形状は Fig.1 に示すような矩形形状とした。一般的に、ワイヤ放電加工では角のある形状を加工する際に放電状態が不安定になりワイヤ断線が起こりやすい。そこで、本研究では矩形形状を断線せず加工できれば、加工可能と判断した。

加工条件は加工機メーカ推奨のコーティングワイヤ 1st カット用の条件を用いた。この条件では、放電状態が不安定になると、主に休止時間を延ばすことと電流ピーク値を減少させるという方法で加工を安定させる制御が行われている。放電回路はトランジスタ回路であり、コンデンサ放電を重量できるようにもなっている。電極材質や放電状態によって異なるが、今回の 1st カット用の条件では電流ピーク値が約 300A、パルス幅約 1 μ s の放電が繰り返し発生する。加工中はオシロスコープにより放電波形を計測するとともに、パルスカウンタを用いて放電回数の計測を行った。Fig.2 に単発の電流波形の一例を示す。

Fig.3 に試作したコーティングワイヤの構造を、また Table 1 に、黄銅および亜鉛層の厚さを示す。今回の実験ではまずコーティングの基礎的特性を明確に把握するため、直径 $d=200\mu\text{m}$ の比較的大きい線径のワイヤを使用した。図に示すように、従来のコーティングワイヤよりも引張り強さの大きい特殊鋼線を芯材として使用し黄銅および亜鉛をメッキにより被覆したワイヤであり、最終的に

Fig.1 Machined shape

Fig.2 Typical electrical discharge current waveform

Fig.3 Wire structure

Table 1 Center material and coating thickness

Center material	Steel wire Brass wire
Thickness of brass T_b [μm]	0~10.0
Thickness of zinc T_z [μm]	0~5.0

Table 2 Mechanical properties of coating wire

Tensile strength@25°C (MPa)	1500~2000
Elongation(%)	1.5~3.0
Tensile strength@400°C(MPa)	1000~1500
Brass component (%Cu)	70 $\pm$ 1
Diameter (μm)	0.198~0.199

は、この構造に類似した直径 $50\mu\text{m}$ 以下のワイヤの開発を目指している。その諸特性を Table 2 に示す。このコーティングワイヤの黄銅層や亜鉛層の厚さを変化させて、それらが加工速度などの加工特性に及ぼす影響について検討した。なお比較に用いた黄銅ワイヤは銅 63% の硬線（ワイヤ径： 0.200mm ，引張り強さ 1016N/MPa ）である。

3. 実験結果および考察

3.1 黄銅コーティング厚さによる加工速度の変化

ワイヤ放電加工では、電極線の導電率が放電電流ピーク値や、その電流の立ち上がり速度に影響を与え、加工速度などの加工特性を変化させる重要な要素であると考えられる⁵⁾。従って、Fig. 3 の構造の線について、まず黄銅コーティング厚さが加工速度に及ぼす影響について検討した。

Fig. 4 は加工速度と黄銅コーティング厚さの関係を示す。このときワイヤ最表面の亜鉛コーティング厚さは全て $1.0\mu\text{m}$ としている。図より明らかに、黄銅コーティング厚さが大きくなるほど加工速度が大きくなっている。そして黄銅コーティング厚さが $10.0\mu\text{m}$ まで大きくなると、従来の黄銅ワイヤの加工速度をわずかながら上回ることが分かる。また、これ以上の黄銅コーティング厚さのワイヤについては、作製上コーティング層の均一性が著しく悪化するため正確なデータは得られていない。このように加工速度が変化する要因としては、加工溝幅、放電回数、放電電流値の変化が推測される。すなわち、加工溝幅が小さい、放電周波数が高い、あるいは放電電流値が増加したことによって加工速度が増加したこと等が考えられる。そこでそれぞれについて検証を行った。

はじめに、加工溝幅について検討した。工作物に数 mm 程度切り込みを入れ、切り込み先端付近の溝幅を測定した。その結果を Fig. 5 に示す。図よりコーティングワイヤの黄銅コーティング厚さ、および黄銅ワイヤによる違いは見られない。

次にパルスカウンタを用い、単位時間あたりの放電回数を計測した。放電回数と黄銅コーティング厚さの関係を Fig. 6 に示す。グラフより、黄銅コーティング厚さによらず、放電回数はほぼ一定であった。しかし、黄銅ワイヤと比較すると、コ

Fig. 4 Relationship between removal rate and thickness of coated brass

Fig. 5 Relationship between kerf width and thickness of coated brass

Fig. 6 Relationship between pulse frequency and thickness of coated brass

ーティングワイヤのほうが若干ではあるが放電回数は多くなる傾向が確認できる。

さらに、放電電流値について検討した。放電は 1 秒間に 2 万回以上起こっており、すべてが同じ

ピーク電流値ではないため、1つの波形からでは放電電流値を正確に把握することはできない。そこで、放電電流値の測定には、オシロスコープを用いて各ワイヤで電流波形を100個以上ランダムに測定し、そのピーク値の分布を求めた。Fig.7に黄銅コーティング厚さによる放電電流ピーク値の発生割合を示す。黄銅ワイヤの場合、約295Aの発生頻度が最も高くなり、±10A程度のばらつきがある。これに対し黄銅コーティング厚さが0.2 μm のワイヤの場合では、約280Aの発生頻度が最も高く、黄銅コーティング厚さが10.0 μm まで大きくなると約290Aの発生頻度が最も高くなっている。この結果は、黄銅コーティング厚さと加工速度の関係と一致していることが分かる。すなわち、放電電流の大きさは、黄銅コーティング厚さによって変化し、それが加工速度に違いをもたらす主な要因の一つであると考えられる。以上の結果から、加工速度の点においては、黄銅コーティング厚さをある程度まで厚くすることが有効であることが明らかとなった。

3.2 加工後のワイヤ観察・分析

黄銅コーティング厚さが加工に及ぼす影響をさらに検討するために加工後のワイヤおよび加工面の観察・分析を行った。Fig.8は、加工後のワイヤのSEM像およびEDXによる分析結果である。ワ

Fig.7 Distributions of discharge current for various thickness of coated brass

イヤおよび工作物の主成分であるFe, Cu, Znについてその分布を示している。また、写真上部が加工中のワイヤの進行方向（加工方向）に相当する。黄銅ワイヤにおいては、黄銅の主成分であるCuとZnが主に見られる。ここで確認できるFeは工作物が付着したものであるが、その量は極めてわずかであることがわかる。いっぽう、コーティングワイヤを観察すると、表面に放電痕が形成されている部分においては、CuとZnが減少し、代わりにFeが検出されている。これは、コーティング層が除去され、ワイヤ芯材の鋼線が露出しているものと考えられる。さらに、黄銅コーティン

Fig.8 SEM and EDX images of wire after WEDM

グ厚さ T_b が $5.0\mu\text{m}$ のワイヤでは、 T_b が $0.7\mu\text{m}$ のワイヤと比較すると放電痕部分で黄銅コーティング層が多く残っていることも分かる。従って、加工速度が小さいコーティングワイヤにおいては、黄銅コーティング層の大部分が加工中に除去されてしまっていることになる。これが、黄銅コーティング厚さが小さいワイヤの加工速度減少につながっているものと考えられる。

そこで、今回の 1st カット用加工条件下でワイヤ表面でどれほどの黄銅コーティング厚さが必要であるかを考察した。まずワイヤ表面上に形成される放電痕形状を把握するために、型彫り放電加工機の単発放電回路を用い、ワイヤ加工条件とほぼ放電エネルギーが等しい条件で黄銅上にスチール電極を用いて単発放電痕を形成した (Fig.9a)。その直径 D と最大深さ H_{max} を計測したところ、それぞれ、約 $90\mu\text{m}$ 、約 $9\mu\text{m}$ であった。

ここで加工中のワイヤの走行速度を W_s とすると、単位時間当たりに新たに加工に用いられるワイヤの進行方向のみの (加工面と対向する) 表面積 ΔS は (Fig.9b),

$$\Delta S = \pi \cdot d \cdot W_s / 2 \quad (1)$$

となる (d はワイヤ直径)。放電痕の面積 S_c は、

$$S_c = \pi \cdot D^2 / 4 \quad (2)$$

となるので、ワイヤ表面において放電痕の重なる割合 χ は放電周波数を F_p とすると、

$$\chi = S_c \cdot F_p / \Delta S \quad (3)$$

となる。放電痕の形状を逆円錐形と仮定すると放電痕の平均の除去深さ H_{ave} は、

Fig.9 Necessary thickness of coated brass

$$H_{\text{ave}} = H_{\text{max}} / 3 \quad (4)$$

であり、これに χ を乗じた値が今回の加工条件で加工中に放電によって除去されないために必要な黄銅コーティング厚さ $T_{b\text{min}}$ に相当する。

$$T_{b\text{min}} = H_{\text{ave}} \cdot \chi \quad (5)$$

ここで、 $d=0.2\text{mm}$ 、 $W_s=10\text{m/min}$ 、 $D=90\mu\text{m}$ 、 $F_p=2.2 \times 10^4 \text{ times/s}$ 、および $H_{\text{max}}=9\mu\text{m}$ を代入すると $\chi=2.673$ 、 $T_{b\text{min}}=8.02\mu\text{m}$ となる。前述の加工速度と黄銅コーティング厚さの関係において黄銅コーティング厚さが約 $8\mu\text{m}$ 以上で黄銅ワイヤと同等の加工速度が得られており、この検証が妥当であることを示唆している。また、放電痕形状を把握できれば、加工条件からコーティングワイヤに必要な黄銅コーティング厚さがある程度予測できることになる。

加工面の SEM 観察像を Fig.10 に示す。ワイヤの違いによる加工面の違いはほとんど確認できな

Fig.10 SEM micrographs of machined surfaces

いが、黄銅コーティング厚さ T_b の小さい $0.7\mu\text{m}$ のワイヤでは、若干大きくぼみが形成されてる箇所があり、不均一な放電面になっているように見える。加工面粗さと黄銅コーティング厚さの関係を Fig.11 に示す。図より明らかなように、黄銅コーティング厚さの増加にともない加工面粗さが減少する傾向にある。黄銅コーティング厚さが比較的小さい場合は、ワイヤ表面の黄銅がすぐに除去され芯線の鋼部分での放電が多く発生し、不安定な放電の割合が増加することが予測される。そしてこれらの傾向は前述の放電電流の分布、加工後のワイヤの様子、および加工面観察の結果とよく対応している。

電極材の工作物への付着現象は、ワイヤ材料の消耗と相関があり、最適な黄銅めつき厚さを検証する上で重要であると考えられる。そこで、EDX による加工面の定量分析を行った。Fig.12 に各黄銅コーティング厚さでの加工面の成分を示す。コーティングワイヤで加工を行った場合では、工作物に付着している Cu および Zn の量は黄銅ワイヤで加工したときの付着量を下回っている。また黄銅コーティング厚さが大きくなるほど、工作物加工表面に付着している Cu および Zn の量が増加していることが分かる。従って、コーティングワイヤにおいては表面の黄銅コーティング厚さが小さいほど、黄銅コーティング層は、加工の際に溶融除去されやすいといえる。また、今回試作したワイヤ芯線の鋼材には Cr はほとんど含まれていないため、分析で検出された Cr は工作物の SKD11 に含まれるものである。そして黄銅コーティング厚さによらず Cr の量がほぼ一定であることを考慮すると、Fe の割合の変化は、ワイヤ芯線材料の付着量を示しているといえる。すなわち、黄銅コーティング厚さが小さいほど芯線の鋼材も工作物加工表面に多く付着することを表しており、これまでの推測と定性的に一致しているといえる。

3.4 最大負荷テンション

加工中に高いワイヤテンションを負荷できれば、ワイヤの振動幅が減少し、より高精度な加工が実現できると考えられる。そこで、各コーティングワイヤと黄銅ワイヤについて、加工可能な最大負荷ワイヤテンションについて検討した。その結果

Fig.11 Relationship between surface roughness and thickness of coated brass

Fig.12 Quantitative analysis of machined surface

Fig.13 Relationship between loadable wire tension and thickness of coated brass

を Fig.13 に示す。このとき、図の Max. tension は、使用したワイヤ放電加工機の最大負荷テンションを示している。棒グラフの黒い部分は何度加工を

行っても加工ができるテンションを示している。また、白い部分は断線することもあるが加工可能であったテンションを示す。これは、ワイヤ径のばらつきや加工状態などにより、同一の加工条件でも加工可能な場合と、断線した場合が生じたためである。図より、黄銅コーティング厚さが十分にあれば、黄銅ワイヤで加工を行う場合より、高いテンションを負荷できることが分かる。黄銅コーティング厚さが大きくなるほど芯線の高張力鋼線の直径は減少するため、ワイヤ自体の引張り強度は低下するが、今回の加工条件下では、加工の安定性のほうが大きく影響していると考えられる。以上の結果から、黄銅コーティングワイヤでは黄銅コーティング厚さが十分なワイヤを用いれば、高いテンションを負荷でき、形状精度の高い加工が可能になると考えられる。

3.5 亜鉛めっきの影響

これまでの検討から、黄銅コーティング厚さが大きければ加工速度も大きくなることが分かった。しかし、これまでは最外層の亜鉛コーティング厚さは $1.0\mu\text{m}$ で一定としており、その効果については未だ不明である。そこで、黄銅コーティング厚さが $0.2\sim 10.0\mu\text{m}$ のコーティングワイヤを用い、亜鉛コーティング厚さを変化させたときの加工速度の変化を検討した。このとき、比較用として黄銅ワイヤに亜鉛をコーティングしたものも用いた。その結果を Fig.14 に示す。図より、黄銅ワイヤに亜鉛をコーティングした場合では、亜鉛コーティング厚さによらず加工速度は一定である。これに対し、黄銅コーティングワイヤの場合、亜鉛コーティング厚さが大きくなるほど加工速度が大きくなる傾向がある。そして黄銅コーティング厚さが小さいほうが亜鉛コーティングの効果が大きいことがわかる。例えば黄銅コーティング厚さ $T_b=0.2\mu\text{m}$ の場合、亜鉛コーティングを行わない場合と比較すると、亜鉛コーティング厚さ T_z わずか $1.0\mu\text{m}$ でも倍以上に、亜鉛コーティング厚さ $T_z=5.0\mu\text{m}$ の場合には 3 倍近く加工速度が増加する。すなわち黄銅コーティング厚さが小さいほど亜鉛コーティングの加工速度増大に対する効果が大きいことが分かる。これは、亜鉛コーティングに放電分散の効果があるためと考えられる。ただ

Fig.14 Relationship between removal rate and thickness of coated zinc

Fig.15 Effect of zinc coating on removal rate

し黄銅コーティング厚さが十分でない場合には、亜鉛コーティング厚さを大きくしても黄銅ワイヤの加工速度に及ばないため、ある程度の黄銅コーティング厚さが必要であり、亜鉛コーティングによってさらに加工速度を増大できる可能性がある。

亜鉛コーティングの放電分散効果を検証するため、放電の集中が起こりやすいように⁶⁾、工作物厚さをこれまでの 10mm から 2mm に変えて比較を行った。その結果を Fig.15 に示す。工作物厚さが 10mm の場合には、Fig. 14 に示すようにこの三者の加工速度はほぼ同じであったが、放電集中が起こりやすい状況下では、亜鉛コーティングをわずか $1.0\mu\text{m}$ 行っただけでも加工速度が 15% 程度増大しており、放電分散の効果を確認できる。

Fig.16 は亜鉛コーティング厚さによる加工面粗さの変化を示す。黄銅コーティング厚さは最も薄い $T_b=0.2\mu\text{m}$ の場合を示している。図より亜鉛コ

ーティング厚さが大きくなるほど、加工面粗さが黄銅ワイヤで加工した加工面粗さに近づいていくことが分かる。黄銅コーティング厚さが薄い場合には前述のように亜鉛コーティングによる加工速度向上の効果が大きく現れるが、これと対応して放電分散の効果が向上し、加工状態が安定することで加工面の均一性が増し、面粗さが向上したものと考えられる。

4. 結 言

本研究では、引張強さの高い鋼線を芯材とし黄銅および亜鉛をコーティングしたワイヤを用いて黄銅および亜鉛コーティングがワイヤ放電加工特性に及ぼす基礎的な影響について考察を行った。得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) 黄銅コーティング厚さが大きいほど、加工速度は大きくなる。これは、黄銅コーティング厚さを大きくすることによって放電電流値が大きくなることが主要因である。
- (2) 黄銅コーティング厚さの小さいワイヤでは、加工中に黄銅コーティング層が溶融除去されやすい。また、放電痕形状を把握できれば、加工条件からコーティングワイヤに必要な黄銅コーティング厚さが予測できる。
- (3) 安定した放電状態での加工が可能な黄銅コーティング厚さのワイヤでは、芯材用鋼線の高い引張強さによって、黄銅ワイヤより大きなテンションで加工可能である。
- (4) 亜鉛コーティングは黄銅コーティング厚さが小さいほど加工速度増大に対する効果が大きい。

今後、これからの結果をもとに、直径 $50\mu\text{m}$ 程度の細線ワイヤの放電加工特性について解明していく予定である。

Fig.16 Effect of zinc coating on surface roughness

謝 辞

本研究の遂行にご協力をいただきました(株)ソディックに謝意を表します。

参考文献

- 1) 安田 治ら：高精度ワイヤ放電加工機の技術革新，高付加価値金型への応用事例，型技術者会議 2004 講演論文集，P.172(2004)
- 2) 南條重之：ワイヤ放電加工機の最新微細加工技術，型技術者会議 2003 講演論文集，P.194(2003)
- 3) 北里敬輔ら：放電加工用被覆型電極線の開発，電気加工学会誌，Vol.36, No.83, P.35(2002)
- 4) 青山正義：放電加工電極線の技術動向と開発，電気加工学会誌，Vol.35, No.79, P.47(2001)
- 5) 井上 潔：ワイヤカット放電加工，未踏加工技術協会，P.90(1982)
- 6) 齋藤長男ら：放電加工技術—基礎から将来展望まで，日刊工業新聞社，P.120(1997)

(2005 年 2 月 25 日受付)