研究

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2報)*
— 直径 50 μ m コーティングワイヤの放電加工特性 —

岡田 晃**, 山内俊之†, 有園公彦**, 清水敏明†, 宇野義幸**

Development of Coat Wire Electrode for High Performance WEDM (2nd Report)
- Fundamental WEDM Characteristics of ϕ 50 μ m Coating Wire -Akira OKADA, Toshiyuki YAMAUCHI, Kimihiko ARIZONO,
Toshiaki SHIMIZU and Yoshiyuki UNO

Abstract

The purpose of this study is to develop a new type of coating wire electrode. Piano wire with a very high tensile strength is coated with an electrically conductive layer in order to achieve high-speed and high-precision wire EDM. In our previous paper, using a wire of 200 μ m diameter, the fundamental effects of the thickness of brass and zinc layers on the machining characteristics were clarified. In this paper, using a trial-made thin wire of 50 μ m diameter, the optimum thickness and quality of the brass layer were experimentally investigated for the realization of higher-performance fine wire EDM. Furthermore, the effect of the tensile strength of the piano wire used as the core wire was discussed. As a result, a brass coating with a copper content of 60-70% is shown to be effective, and the thickness of the brass coating must be more than about 1.5 μ m to achieve a high removal rate.

Key words: WEDM, coating wire, brass, tensile strength, piano wire

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、高精度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)}。加えて、超硬合金、PCD や SiC といった材料は従来の機械加工では微細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、引張強さが低いため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説明されておらず、コーティングワイヤの能力を十分に活かしているのか疑問である。またタングス

* 電気加工学会全国大会(2004), (2006)にて発表

** 岡山大学工学部 (岡山市津島中 3-1-1)

† トクセン工業(株) (兵庫県小野市住吉町南山 1081)

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、タングステンに匹敵する引張強さの極めて高い特殊な鋼線を芯材とし、従来の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。前報⁵⁾においては、直径 200 μm のワイヤを用い、黄銅および亜鉛コーティング厚さが加工速度や加工ギャップに及ぼす影響を明らかにした。

本報告では、直径 50 μm のワイヤを用い、表面の黄銅コーティング層の厚さ、銅と亜鉛の成分比、ならびに鋼芯線の引張り強度が加工特性に及ぼす影響について検討を行った。そしてタングステンワイヤを上回る高性能細線コーティングワイヤ電極の構造を明らかにした。

2. 実験方法

実験にはリニアモータ駆動ワイヤ放電加工機 (Sodick 社製 AQ550L, および AP200L) 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。ワイヤ放電加工では一般的に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の断線が起りやすい。そこで本報告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。

Fig.2 に試作した黄銅コーティング高張力ワイヤの構造を、Table 1 に実験に使用したワイヤの仕様を示す。黄銅コーティング層の成分比がワイヤ放電加工特性に及ぼす影響を検討する際には直径 200 μm のものを使用した。黄銅コーティング層

Fig.1 Machining shape

Fig.2 Wire structure

厚さの影響、芯線の引張り強さの影響について検討する場合には直径が 50 μm のものを使用した。TKC-Normal がタングステンに匹敵する芯線引張り強さを有するワイヤであり、TKC-LowTs は引張り強さの小さいもの、Wire-A は市販の黄銅コーティングワイヤである。

加工条件は、直径 50 μm のタングステンワイヤを用いる場合の加工機メーカー推奨条件を用いた。電極材質や放電状態によって若干異なるが、電流ピーク値は約 15A、パルス幅約 0.5 μs の放電が繰り返り発生する。また、本装置においては短絡や

Table 1 Specifications of wire electrodes

	Wire diameter d [μm]	Thickness of coated brass T_b [μm]	Copper content in coated brass [%]	Tensile strength T_s [MPa]
TKC	200	10.00	0-100	-
TKC-Normal	50	0.67-2.80	71	3138
TKC-LowTs		1.70	73	2195
Wire-A		3.00	66	2225
Tungsten		-	-	3411

集中放電が多く発生する場合にはそれを回避するために設定値よりも休止時間を一時的に長くする制御が行われている。加工中は高時間分解能オシロレコーダ（日置社製メモリハイコーダ 8860）により放電波形の観察を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 黄銅成分比の影響

まず、直径 200 μ m のワイヤを用いて黄銅コーティング層の成分比を変化させたときの加工速度について検討した。加工速度は Fig.1 に示す形状の加工に要する時間を計測し算出している。Fig.3 にその結果を示す。図より明らかなように、銅成分が大きくなるにつれて加工速度はわずかに上昇し、銅成分比約 65% で黄銅ワイヤの加工速度を上回る。しかしながら、銅成分比がそれ以上大きくなると加工速度は大きく減少していく。そして、銅成分比 100%、すなわち銅コーティングワイヤになると黄銅ワイヤの 4 割程度の加工速度しか得られない。

Fig.4 に黄銅コーティング層の成分比による放電電流ピーク値の発生割合を示す。図より、銅 0%、すなわち亜鉛コーティングワイヤの場合、放電電流ピーク値は他の成分比のものとは比べ、かなり小さいことがわかる。また、銅が 52% 以上の成分比では、銅の成分比が大きいくほど高い放電電流ピーク値の発生割合が若干多くなっている。これは黄銅や銅に比べて亜鉛の導電率が低いためと考えられる。従って、黄銅コーティング層の銅成分比が小さい場合には放電電流ピーク値がやや小さくなり、結果として銅成分比が小さい場合には加工速度が低下したものと考えられる。

Fig.5 に黄銅コーティング層の成分比による放電周波数の変化を示す。銅成分比が小さいときは放電周波数に大きな変化はなく、黄銅ワイヤの放電周波数を若干上回っている。しかしながら、銅成分比が 80% 以上になると放電周波数が急激に減少することがわかる。これは、放電の分散の影響が考えられる。すなわち、亜鉛には放電を分散させる効果があり⁶⁾、亜鉛の比率が小さくなることにより放電集中が起りやすくなり、結果として放電回数が低下し、加工速度が低下したものと考えられる。

Fig.3 Variation of removal rate with copper content in coated brass

Fig.4 Distribution of discharge current with copper content of coated brass

Fig.5 Variation of pulse frequency with copper content in coated brass

以上の結果から、黄銅コーティング層の成分比には加工速度を最大にする最適値が存在し最も高い加工速度を得るためには銅組成比を 60~70% 程度にすると良いことが明らかとなった。

Fig.6 Variation of removal rate with thickness of coated brass

Fig.7 Variation of pulse frequency with thickness of coated brass

3.2 黄銅コーティング層厚さの影響

次に、直径 50 μm ワイヤにおける最適黄銅コーティング層厚さを検討した。Fig.6 は黄銅コーティング層厚さ T_b を 0.67~2.80 μm と変化させた場合の加工速度を示す。黄銅コーティング層厚さが大きくなるほど加工速度は大きくなることわかる。例えば $T_b=0.67\mu\text{m}$ では、 $T_b=2.80\mu\text{m}$ の 75% 程度の加工速度しか得られていない。しかしながら $T_b=1.45\mu\text{m}$ より黄銅コーティング層厚さが大きい場合には、加工速度に大きな変化は見られない。すなわち、加工中に放電によってワイヤ表面の黄銅コーティング層が消耗するが、1.5 μm 程度のコーティング層厚さがあれば、加工中に黄銅が存在しワイヤの導電率が保たれるものと推測される。

ここで、加工速度が変化する直接の要因として

は、放電電流値、放電周波数、および加工溝幅の変化が考えられる。そこで、それぞれの影響について調査した。電流値の分布については黄銅コーティング層厚さによる差異は認められなかった。

Fig.7 に黄銅コーティング層厚さによる放電周波数の違いを示す。図より明らかなように、黄銅コーティング層が厚くなるにつれて放電周波数は大きくなることわかる。黄銅コーティング層を厚くすることによって放電が安定して発生するようになったためと考えられる。この関係は加工速度の変化とほぼ一致しており、放電周波数の増加が加工速度を変化させる主要因であるといえる。

Fig.8 に各黄銅コーティング層厚さのワイヤを用いた場合の加工溝の写真を、Fig.9 に加工溝幅と黄銅コーティング層厚さの関係を示す。これらの

Fig.8 Micrographs of machined kerf

Fig.9 Variation of kerf width with thickness of coated brass

Fig.10 Quantitative analysis of machined

Fig.11 SEM micrographs of wire EDMed surface

図から明らかなように、黄銅コーティング層厚さに依らず加工溝幅はほぼ一定であることがわかる。

Fig.10 に各黄銅コーティング層厚さのワイヤを用いて加工を行ったときの工作物加工面の成分分析結果を示す。黄銅コーティング層厚さが小さい場合には黄銅コーティング層厚さが大きくなるほど工作物加工面に付着している銅および亜鉛の割合が比例的に増加している。しかしながら、黄銅コーティング層厚さ T_b が $1.45\mu\text{m}$ 以上では、加工面に付着している銅および亜鉛の量はほとんど変化していない。この傾向は加工速度の関係と一致しており、この結果からも最大加工速度を得るために最低限必要な黄銅コーティング層厚さは約 $1.5\mu\text{m}$ であることがわかる。

Fig.11 は黄銅コーティング層厚さ $T_b=0.67\sim 2.80\mu\text{m}$ のワイヤで加工した際の加工面の SEM 写

真である。いずれの場合も加工面には多数の加工粉が付着しており、狭い極間で加工粉が排出されにくく加工面へ再付着している様子が見て取れる。また、コーティング層厚さが小さいほど、加工粉付着が多く加工面の凹凸がやや大きくなっているように見える。

Fig.12 は加工面粗さと黄銅コーティング層厚さの関係を示す。黄銅コーティング層が厚いほど加工面粗さは小さくなるが、ある程度厚くなると変化しないことが分かる。黄銅コーティング層厚さ T_b が $0.67\mu\text{m}$ で約 $12\mu\text{mRz}$ 、 $2.24\mu\text{m}$ と厚い場合には約 $9\mu\text{mRz}$ であり、25%程度加工面粗さが低減する。これは黄銅コーティング層が厚いほど放電状態が安定し、放電集中などの加工面粗さを大きくする現象が起こりにくくなったためと考えられる。そして前述の加工速度の変化とよく対応している。

3.3 ワイヤテンションと加工速度の関係

ワイヤ放電加工中にワイヤは放電爆発力、静電力等を受け振動している^{7), 8)}。そしてワイヤテンションを大きくすることによって振動をある程度抑制できるため、加工溝幅の減少、タイコ形状の防止につながる⁶⁾。また、加工体積自体も減少するため、結果として切断速度の向上につながる。ワイヤの引張り強さによるそれらの特性の違いを把握するために、加工中のワイヤテンションを変化させ加工特性を調査した。

ワイヤテンションによる加工速度の変化をFig.13に示す。図より明らかなように、いずれのワイヤにおいてもワイヤテンションが大きいほど加工速度は大きくなる傾向が確認できる。これは、ワイヤの振動が小さくなったために加工溝幅が減少し、加工速度が大きくなったといえる。また、ワイヤテンションの低い場合には、開発した黄銅コーティングワイヤを用いたほうがタングステンワイヤを用いるよりも加工速度が大きいことがわかる。従来の黄銅コーティングワイヤよりも引張り強さの高い鋼線を用い、かつ表面の黄銅コーティング層の性状を最適化することで、安定した加工状態を実現し従来のタングステンワイヤを上回る加工速度を得ることができた。

次に、加工可能なワイヤテンションに注目すると、タングステンワイヤを用いた場合にはコーティングワイヤに比べてより高いテンションで加工可能なことがわかる。タングステンは引張り強さが最も高いことに加え、融点が高いために放電によるワイヤのダメージが小さいためである。そして、黄銅コーティングワイヤにおいても引張り強さの順に高いワイヤテンションで加工が可能となっている。すなわち、当然のことながらワイヤの引張り強さを向上させることが高いテンションでの加工を可能とし、高精度加工につながることになる。さらに、それぞれのワイヤの加工速度の変化について比較すると、黄銅コーティングワイヤはいずれのワイヤにおいても断線するまで加工速度が増加しているのに対し、タングステンワイヤではあるテンションを境に加工速度が減少していくことが分かる。この原因を調べるため、ワイヤテンションによる加工溝幅の変化を測定した。

Fig.12 Variation of WEDMed surface roughness with thickness of coated brass

Fig.13 Variations of removal rate with wire tension

Fig.14 Variations of machined kerf width with wire tension using tungsten wire

Fig.14は、タングステンワイヤを使用した場合のワイヤテンションによる加工溝幅の変化である。ここでは、加工溝幅の平均値に加え、ばらつきも含めて検討した。図より、ワイヤテンションを大

Fig.15 Variations of machined kerf width with wire tension using brass coated wires

Table 2 Mechanical properties of wire electrode

	Before/After WEDM	Breaking load [N]	Elastic limit [N]	$\sigma_{0.2}$ [N]	Elongation [%]	Wire tension at wire breakage [N]
TKC-Normal	Before	5.81	2.7	3.6	2.16	2.1
	After	5.76	2.3	3.4	2.15	
TKC-LowTs	Before	4.26	2.3	2.6	1.97	1.9
	After	4.27	2.1	2.5	2.06	
Wire-A	Before	4.26	1.8	2.9	3.80	1.6
	After	4.23	1.7	2.7	3.86	
Tungsten	Before	6.67	3.2	3.9	2.30	5.0
	After	6.47	3.1	4.0	2.05	

きくすると加工溝幅の平均値は小さくなることがわかる。しかしながら、加工速度が減少し始める $W_t=3.0\text{N}$ 付近から、加工溝幅のばらつきが大きくなっていくことが確認できる。従って高いワイヤテンションの条件では、何らかの原因でワイヤの挙動が不安定になるために加工速度が低下したものと推測できる。

黄銅コーティングワイヤ TKC-Normal および Wire-A を使用したときのワイヤテンションと加工溝幅の関係を Fig.15 に示す。図よりワイヤテンションが大きいほど加工溝幅の平均値は小さくなるという傾向はタングステンワイヤと同様であり、この関係は加工速度の関係とほぼ一致する。従って、ワイヤテンションを大きくすると加工速度が大きくなる主要因は、加工溝幅の減少であるといえる。しかしながら、黄銅コーティングワイヤではタングステンワイヤの場合に見られた加工溝幅

のばらつきは確認できず、加工速度が低下するワイヤテンションに到達する前に断線してしまっているものと考えられる。また、タングステンワイヤと溝幅の最小値を比較すると黄銅コーティングワイヤ TKC-Normal を用いたほうが若干小さく、ばらつきも小さい。すなわち、タングステンワイヤよりも高精度な加工が可能となる。

Table 2 は放電加工前と放電加工使用後のワイヤの強度を示す。従来ワイヤの強度を示す代表値としては常温強度や高温強度が用いられ、これらの値を用いて加工中のワイヤ挙動が研究されている。しかしながら、前述のタングステンワイヤにおいて挙動が不安定となる領域はワイヤが断線するテンションよりも小さいワイヤテンションでの現象であるため、断線するときの強度である常温強度や高温強度で議論するべきではないと考えられる。すなわち、ワイヤが弾性域から塑性域に変わ

る強度、つまり 0.2%耐力や弾性限度に注目して考察を行った。Fig.13 とこれらの値を詳細に照合すると、放電加工使用後のワイヤの弾性限度 (Elastic limit) とワイヤ断線時のワイヤテンション (Wire tension at wire breakage) や加工速度が低下したときのワイヤテンションはほぼ一致していることが分かる。すなわち、ワイヤ断線は弾性限度を超えるテンションのもとで局所的に伸びが発生し、それが不安定なワイヤの挙動や放電状態を生じて断線が起こるのではないかと推測される。タングステンの場合はその高融点と高破断強度によって断線には至らないものの、加工状態が不安定となり、加工速度の低下を招くものと考えられる。従って、ワイヤの弾性限度の向上も高性能加工を実現する上で重要な因子であると考えられる。

4. 結 言

本研究では、直径 50 μ m のワイヤを用い、表面の黄銅コーティング層の厚さ、銅と亜鉛の成分比、ならびに鋼芯線の引張り強度が加工特性に及ぼす影響について検討を行った。得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) 直径 50 μ m の黄銅コーティングワイヤにおいては、高い加工速度を得るためには最低 1.5 μ m 程度の黄銅コーティング層厚さが必要である。
- (2) 黄銅コーティングワイヤにおいて黄銅コーティング層の銅成分比が 60~70%程度の場合に加工速度は最大となる。
- (3) 引張り強さの高い鋼線を芯線として用い、かつ表面の黄銅コーティング層の性状を最適化することで、安定した加工状態を実現し従来のタングステンワイヤを上回る加工速度を得ることができる。

- (4) 加工中のワイヤテンションを高くすることで加工溝幅は小さくなり、加工速度、加工精度ともに向上する。
- (5) タングステンワイヤにおいては、ワイヤテンションを高くしすぎると、ワイヤの挙動が不安定になるためにかえって加工速度が低下する。

今後、これからの結果をもとに、ワイヤの最表面性状の最適化を行い、より高性能な細線ワイヤを開発する予定である。

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) 安達章人ら：超精密微細金型におけるワイヤ放電加工機の最新制御技術と加工事例、型技術, 20, 8 (2005) 134.
- 2) 荒井祥次：リニアモータ駆動放電加工機による超高速加工, 超精密加工, 超微細加工, 型技術, 20, 8 (2005) 130.
- 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 (2002) 35.
- 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 (2001) 47.
- 5) 山内俊之ら：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), 電気加工学会誌, 39, 92 (2005) 28-35.
- 6) 斉藤長男ら：放電加工技術, 日刊工業新聞社, (1997)138-139.
- 7) 岩田康ら：ワイヤ放電加工の加工シミュレーション, 電気加工学会誌, 30, 64 (1996) 2-10.
- 8) 小原治樹ら：ワイヤ放電加工の加工精度に関する基礎的研究, 電気加工学会誌, 32, 70 (1998) 16-23.

(2007 年 7 月 10 日受付)