ワイヤ放電加工におけるワイヤ電極 の開発（第1報）*

福井雅彦** 木下夏夫**

Developement of the Wire Electrode under Wire EDM (1st Report)

by Masahiko FUKUI and Natsuo KINOSHITA

Of late years, the performance of Wire EDM has improvid and become almost equal to that of Grinding. In order to improve the performance of Wire EDM moreover, it is necessary to investigate the wire electrode throughly. There is no paper, however, which deals with the characteristics of the wire electrode in Wire EDM. This study is for the purpose of developing a new wire electrode which has good performance in Wire EDM. In this paper, the working characteristics of various ally wire electrodes were examined. And about the wire electrodes which have good performance, the cause of the superiority was searched.

1. 緒 言

近年ワイヤ放電加工は研削加工に匹敵する程、加工性能が向上しているが、さらに加工性能を向上させるには、ワイヤ電極についても十分に検討する必要がある。しかし、ワイヤ電極のワイヤ放電加工性能について論じた論文は未だない。

本研究はワイヤ放電加工性能のよいワイヤ電極を新たに開発することを目的にする。

* 昭和56年度精機学会秋季大会学術講演会にて発表

** 東京大学

本報告では、種々の特性を有する合金ワイヤ電極を中心に加工特性を調べるとともに、加工性能の優れたワイヤ電極については、加工性能向上の原因の探索も行った。

2. 各種ワイヤ電極の特性と特徴

最近、ワイヤ放電加工に用いられているワイヤ電極は大半が 65/35 黄銅ワイヤ電極である。

65/35 黄銅ワイヤ電極の機械的特性は、普通常温引張り強さ $40\sim 60\text{ kg/mm}^2$ 、導電率 26% IACS、伸び 25% 程度のものが多いが、高速加工を可能にするため大電流に耐え得る常温引張り強さ 80 kg/mm^2 なる 65/35 黄銅ワイヤ電極もある。

今回試作したワイヤ電極はユーザの使用状況の他、表 1 に示した放電特性、機械特性、表面特性などを十分考慮して、合金ワイヤ電極、複合ワイヤ電極、高強度ワイヤ電極、表面処理ワイヤ電極などである。表 2(1), (2), (3)に実験に用いた各種ワイヤ電極とその特性を示す。

表 1 ワイヤ電極の入手・試作にあたり考慮した事柄

放電特性 (電気特性)	熱電子放射(仕事函数など) 電気陰性度 熱伝導率 導電率(抵抗率) 融点
機械特性	常温強度(引張り強さ, 耐力など) 高温強度(400℃での引張り強さ) 伸び 断面収縮率 癖
表面特性	表面酸化処理 メッキ
価格特性	製造価格

表2 各種ワイヤ電極の特性(1)

主要材質	特性 ワイヤの種類	添加物 含有量 (%)	常 温 特 性				400℃ 引張り強さ (kg/mm ²)	特 徴 ・ そ の 他
			引張り強さ (kg/mm ²)	耐 力 (kg/mm ²)	伸 び (%)	導 電 率 (% IACS)		
銅系	銅 (O)		23~26	15.0	15.0	99以上	14	一般使用材
	銅 (H)		46~53		0.2~0.3	95~97		一般使用材
	Sn 入り銅 (O)	0.7	42.5		5.0		27	
	Ag 入り銅 (O)	2.0						放電特性
	0.3% Al 内部酸化品 + 銅		53	48	2.4		32	高温強度 高 価
8/2 丹銅系	8/2 丹銅 (O)		41.5	28.5	21.5	31		
	8/2 丹銅 (H)		91.5	87.5	0.8	27		
	Mn 入り 8/2 丹銅 (O)		49.9	30.9	28.3	18.3		放電特性
	Zr 入り 8/2 丹銅 (O)							放電特性 高温強度
	Al 入り 8/2 丹銅 (O)		44.6	28.4	30.0	28.7		高温強度
7/3 黄銅系	7/3 黄銅 (O)		48.0	28.0	29.5	28.0		一般使用材
	7/3 黄銅 (H)		96.0	90.5	1.0	24.0		一般使用材
	Al 入り 7/3 黄銅 (O)	0.84						

表2 各種ワイヤ電極の特性(2)

主要材質	特性 ワイヤの種類	添加物 含有量 (%)	常 温 特 性				400℃ 引張り強さ (kg/mm ²)	特 徴 ・ そ の 他
			引張り強さ (kg/mm ²)	耐 力 (kg/mm ²)	伸 び (%)	導 電 率 (%IACS)		
65/35 黄銅系	65/35 黄銅 (O)		48.7	29.2	25.0	26.3	21	一般使用材 (基準材)
	65/35 黄銅 (H)		101.8	93.4	0.5	20.1	21~23	常温強度 改 善
	Zr 入 り 65/35 黄銅 (O)		49.9	31.2	27.4	27.5	34	高温強度 放電特性
	Fe 入 り 65/35 黄銅 (O)		49.3	29.8	26.8	24.5	27	高温強度
	P 入 り 65/35 黄銅 (O)		45.8	26.8	32.7	25.9	21	400℃ 付近 での断面収 縮率
	Al 入 り 65/35 黄銅 (O)	0.48	51.9	32.2	23.3	24.3	25	Al添加量小
	"	0.84	50.6	29.9	25.5	23.4	25	
	"	0.84	56.3	38.1	21.2	24.0	25	
	"	1.20	56.6	32.2	25.5	25.2	35	高温強度
	"	1.34	49.7	29.0	29.8	22.6		
	"	1.56	64.0	37.8	23.3	25.0		
	"	1.63	69.8	41.9	25.4			
	"	1.86	71.8	42.3	25.0			Al添加量大 常温強度

表2 各種ワイヤ電極の特性(3)

主要材質	特性 ワイヤの種類	添加物 含有量 (%)	常 温 特 性				400℃ 引張り強さ (kg/mm ²)	特 徴 ・ その他
			引張り強さ (kg/mm ²)	耐 力 (kg/mm ²)	伸び (%)	導 電 率 (% IACS)		
複 合 ・ そ の 他	65/35 黄銅 表面処理		48.7	29.2	25.0	26.3	21	表面処理の 効果
	Znメッキ銅 (H)	メッキ厚さ 1.6μm	50.1	47.9	1.8	93.0		低融点金属 メッキ心線銅
	Cuメッキ鉄 (O)		82.8	74.8	2.0	28.4		銅メッキ 心線鉄
	Bsメッキ鉄 (O)	ワイヤ直径 0.15mm	255.9	229.7	0.3	8.4		黄銅メッキ 心線鉄

3. 実験方法

一般使用の65/35黄銅ワイヤ電極の軟線(O)，硬線(H)を加工性能比較の基準ワイヤと考え，実験は①基準ワイヤより加工性能の優れたワイヤ電極を見つけること。②加工性能向上の要因を探索すること。等を目指に行った。具体的には，30種類のワイヤ電極について，表3に示す実験条件で，図1に示す様な加工を行ない，各種ワイヤ電極の加工速度限界と加工精度（加工溝幅，付着物）を調べた。

表3 実験条件と装置

実 験 条 件	
電 源 電 圧	$V = 120 \sim 270 \text{ v}$
コンデンサ容量	$C = 0.1, 0.2, 1, 2, 2.5 \mu\text{F}$
充 電 抵 抗	$R = 5 \sim 58.3 \Omega$
パルス条件	$\tau/T = 6/5 \mu\text{s}$
被 加 工 材	$Z = 30, 25, 16 \text{ mm (SKD-11)}$ $Z = 45 \text{ mm (S10C)}$
ワ イ ヤ 直 径	$\phi = 0.2 \text{ mm}$
ワ イ ヤ 材 質	各種ワイヤ
ワ イ ヤ 張 力	$T = 600 \sim 930 \text{ gf}$
加工液比抵抗	$\rho = 7 \times 10, 13 \times 10, 25 \times 10 \Omega \cdot \text{cm}$
加工液流量	上ノズル 2.8 l/min ，下ノズル 3.2 l/min
加 工 機 械	FANUC製 FAPT-CUT Cシリーズ

図1 加工形状

4. 実験結果

(1) 加工速度限界

ワイヤ電極の加工速度限界はテーブル送り速度により調べた。

① ワイヤ張力930gfの場合

ワイヤ張力を930gfに設定し、各種ワイヤ電極の加工速度を調べた結果を図2に示す。

テーブル送り速度が最も大きく設定できるワイヤ電極は、Al入り65/35黄銅合金ワイヤ電極である。また、その他のワイヤ電極について加工特性を調べてみると、表面酸化処理65/35黄銅ワイヤ電極（軟線(O)）、リンを添加したP入り65/35黄銅合金ワイヤ電極（軟線(O)）（400℃での断面収縮率強化）とも加工速度限界が余り大きく設定できなかった。

図2 各種ワイヤの加工速度限界
(ワイヤ張力950gf)
(○：加工可，△：短絡，×：断線)

② ワイヤ張力が800gfの場合

ワイヤ張力を800gfに設定し、各種ワイヤ電極の加工速度限界を調べた結果を図3に示す。

ワイヤ張力が930gfの場合の加工速度限界は、ワイヤ断線により決まるが、ワイヤ張力が800gfになると、全てのワイヤ電極は短絡により加工速度限界が決まる。

各種のワイヤ電極の加工速度限界はAl入り65/35黄銅合金ワイヤ電極（Al添加量0.84%）が1.0mm/minで最もよく、P入り65/35黄銅合金ワイヤ電極、表面酸化処理65/35黄銅ワイヤ電極などは0.9mm/minであった。ところが、Sn入り銅電極、Ag入り銅電極などは加工速度限界が0.6mm/minであった。

③ ワイヤ張力が680gfの場合

ワイヤ張力を680gfに設定し、各種のワイヤ電極の加工速度限界を調べた結果を図4に示す。

図3 各種ワイヤの加工速度限界
(ワイヤ張力800gf)
(○：加工可，△：短絡)

図4 各種ワイヤの加工速度限界
(ワイヤ張力680gf)
(○:加工可, △:短絡)

ワイヤ張力が680gfになると、加工速度限界は65/35黄銅ワイヤ電極(軟線(O), 硬線(H)), P入り65/35黄銅ワイヤ電極, Al入り65/35黄銅ワイヤ電極とも差がない。

複合ワイヤ電極としてZnメッキ銅とCuメッキ鉄ワイヤを試作し、加工速度限界を調べた結果が、図5, 6である。

Znメッキ銅ワイヤ電極は電源電圧が270Vと高く、コンデンサ容量が200nFと小さい場合、加工速度限界が一般使用の65/35黄銅ワイヤ(O)より大きくできる。しかしCuメッキ鉄ワイヤは実験条件に無関係に加工速度が向上できない。

(2) 加工精度

① 加工溝幅

図7は3種類の代表的なワイヤ電極について、加工溝幅とテーブル送り速度の関係を調べた結果である。

Al入り65/35黄銅ワイヤ電極(O)と一般使用の65/35黄銅ワイヤ電極は、テーブル送り速度の増加にともない加工溝幅が小さくなるが、亜鉛メッキ銅ワイヤ電極はテーブル送り速度の増加にともない急激に加工溝幅が小さくなる。

図5 複合ワイヤの加工速度限界
(○:加工可, △:短絡)

図6 複合ワイヤの加工速度限界
(○:加工可, △:短絡, ×:断線)

加工溝幅が最も小さくできるワイヤ電極はテーブル送り速度, ワイヤ張力が大きく設定できる Al 入り 65/35 黄銅ワイヤ電極である。

② 加工面の付着物

被加工材の加工面にワイヤ材の付着があるかないかを調べるため, X線を用いた分析装置で面分析を行った。なお, 1ヶ所の面分析方法は $400\mu\text{m}$ 角で, X線の被加工材への透過深さは $1\mu\text{m}$ である。

図8~10は3種類のワイヤ電極で加工した場合の被加工材加工面の面分析結果で, 図11は素材SKD-11の面分析結果である。

ワイヤ電極に一般使用の65/35黄銅ワイヤ電極(O)を用いて加工した加工面は, 被加工材の最下端部($l=0$)に40%程度の銅材と10%の亜鉛材が付着している。また, 65/35黄銅ワイヤ電極で加工した場合, 加工面の銅材の付着量は下端部より上部に向うに従いが減少するが, 下端部より2mm上部に入ると付着量の変化が少なくなる。亜鉛材の付着物量は最下端より内部へ入ると直ちに5%以下に減少する。

図7 各種ワイヤのテーブル送り速度と加工溝幅の関係

図8 65/35黄銅ワイヤで加工した場合の付着物量(被加工材SKD-11 30mm厚)

図9 Al入り65/35黄銅ワイヤで加工した場合の付着物量(被加工材SKD-11 30mm厚)

ワイヤ電極にAl入り 65/35 黄銅ワイヤ電極(O)を用いて加工した加工面は、銅材の付着量が10%に減少し、亜鉛材の付着量も5%以下になり黄銅ワイヤに比べ大幅に銅材、亜鉛材の付着量が減る。

ワイヤ電極に亜鉛メッキ銅ワイヤ電極(亜鉛メッキ厚さ1.6 μ m, 心線銅)を用いて加工した加工面は、銅材の付着量が被加工材の下端部で18%程度あるが、被加工材の内部に入っていくに従って銅材の付着量が増加している。

これに対して、亜鉛材の付着量は被加工材の下端部で5%あるが、下端部より1mm以上内部に入ると、亜鉛材の付着量が1%になる。

上述した亜鉛メッキ銅ワイヤ電極で加工した加工面に銅材が多く付着する原因は、メッキした亜鉛の厚さが1.6 μ mと薄いため心線に用いた銅材の影響が強く現れたためである。

図10 Znメッキ銅ワイヤで加工した場合の付着物量

図11 素材SKD-11に含まれる各種金属

5. 加工性能向上の要因探索

ここでは、ワイヤ電極の特性がワイヤ放電加工性能に及ぼす要因と加工性能の優れたワイヤ電極を開発する方向を探索する。

(1) 合金ワイヤ電極における母金属と添加元素

合金ワイヤは母金属として銅系、8/2 丹銅系、7/3 黄銅系、65/35 黄銅系のを考え、放電特性、機械特性を強化した。

銅系の合金ワイヤ電極はSn入り銅、Ag入り銅、0.3% Al 内部酸化銅であるが、いずれも加工速度が65/35 黄銅ワイヤ電極より悪い。

8/2 丹銅系の合金ワイヤ電極は8/2 丹銅(H), Mn入り8/2 丹銅, Zr入り8/2 丹銅, Al入り8/2 丹銅であるが、いずれも加工速度が65/35 黄銅ワイヤより悪い。結局、加工性能の優れたワイヤ電極として可能性があるものは65/35 黄銅系合金ワイヤ電極である。

65/35 黄銅系合金ワイヤ電極の内、Zr入り65/35 黄銅ワイヤ電極, Fe入り65/35 黄銅ワイヤ電極,

65/35 黄銅ワイヤ電極(H)は導電率、常温、高温引張り強さ及び放電特性などを強化したにも拘らず加工性能が向上できなかった。また、P入り65/35 黄銅ワイヤ電極の様に400℃での断面収縮率を強化したワイヤも加工性能を向上できなかった。

(2) 65/35 黄銅へのAl元素の添加量

65/35 黄銅にAl元素を添加した場合のAl元素の添加量と加工速度の関係を調べた結果を図12～13に示す。

図12 65/35 黄銅(O)にAl元素を添加した場合のAl元素の添加量と加工速度限界
(○：加工可，△：短絡，×：断線)

図13 65/35 黄銅にAl元素を添加した場合のAl元素の添加量と加工速度限界
(○：加工可，△：短絡)

ワイヤ張力が930gfの場合には、Al元素の添加量により加工速度限界が顕著に変わり、Al元素の添加量が1.34%で加工速度が最大になる。これに対して、ワイヤ張力が800gfの場合には、ワイヤ張力が930gfの場合に比べAl元素の添加量の影響を余り受けないが、Al元素の添加量が1.34%以上になると加工速度が向上する。

以上の結果、各種のワイヤ電極の内、加工速度の最も大きくなるAl入り65/35 黄銅ワイヤ電極はAl元素の添加量が1.34%以上になるとよいことが分った。

(3) Al入り65/35 黄銅ワイヤ電極の金属組織

図14は6種類のワイヤ電極について金属のマイクロ組織を電子顕微鏡で調べた結果である。

Al入り65/35 黄銅ワイヤ電極のマイクロ組織は、65/35 黄銅にAl元素を添加することにより、金属組織内に β 相が生成され、4/6 黄銅ワイヤのマイクロ組織によく似た金属組織になることが分る。

ところが、8/2 丹銅にAl元素3.04%、2.04%添加したAl入り8/2 丹銅ワイヤ電極のマイクロ組織は、65/35 黄銅にAl元素を添加した場合と違うマイクロ組織になる。また、2.01% Zr入り8/2 丹銅ワイヤ電極のマイクロ組織はAl入り65/35 黄銅ワイヤ電極のマイクロ組織と違い添加したZrが析出したマイクロ組

6/4 黄銅

2.04% Al 入 8/2 丹銅

65/35 黄銅

3.64% Al 入 8/2 丹銅

1.2% Al 入 65/35 黄銅

2.01% Zr 入 8/2 丹銅

図14 各種のワイヤ電極のマイクロ組織（焼鈍材のマイクロ組織 倍率200倍）

織になっている。

以上各種ワイヤ電極のマイクロ組織を観察して分ったことは、65/35黄銅にAl元素を添加すると、金属組織内に β 相ができ、この β 相に添加したAl元素が集まる。つまり、 β 相に集まったAl元素が放

電特性に有効に機能する他、高温引張り強さの強化にも役立つためである。また、この傾向が顕著に現れるのは、 β 相に集まる Al 元素の量がある程度以上多い場合である。

6. 結 論

ワイヤ放電加工性能を向上できるワイヤ電極を新たに開発する目的で、本報告では主に合金ワイヤ電極の加工性能を調べ、加工性能向上の要因を探索した。この結果、以下の事が分った。

- (1) Al 元素を添加した 65/35 黄銅ワイヤ電極は一般使用の 65/35 黄銅ワイヤ電極の硬線 (H)、軟線 (O) より加工性能が優れたワイヤである。
- (2) Al 入り 65/35 黄銅ワイヤ電極が加工性能がよい原因は、65/35 黄銅に Al 元素を添加することにより金属組織内に β 相が生成され、この β 相が放電特性と高温引張り強さに有効に機能するためである。
- (3) Al 入り 65/35 黄銅ワイヤ電極は一般使用の 65/35 黄銅ワイヤ電極より加工面への銅材の付着が少ない上、加工溝幅も小さくできる。
- (4) 複合ワイヤ電極は Zr メッキ銅ワイヤ電極が電源電圧の高い加工条件で有効である。

(1983. 1. 6 受付)