研 究

高性能微細ワイヤ放電加工実現のためのCu-Zr ワイヤ電極の開発

劉 世賢*, 三好 雅人*, 岡田 晃*, 村松 尚国**, 野村 和弘**

Development of Cu-Zr Wire Electrode for High-performance Fine Wire EDM

Shixian LIU, Masato MIYOSHI, Akira OKADA,
Naokuni MURAMATSU and Kazuhiro NOMURA

Abstract

A thin wire electrode of copper-zirconium (Cu-Zr) with high conductivity was proposed to obtain high cutting speed in fine wire electrical discharge machining (EDM). The wire EDM characteristics using the bare Cu-Zr wire and zinc- or brass-coated ones were experimentally investigated. The results showed that the cutting speed using the bare Cu-Zr wire was lower than that using the conventional-coated wires. However, the cutting speed could be significantly improved by coating a thin layer of brass or zinc around the Cu-Zr wire, and exceeded that using conventional wires, since the pulse frequency and peak discharge current increase with the brass or zinc coating.

Key words : Wire EDM, Cu-Zr wire, Cutting speed

1. 緒 言

近年、工業製品の小型化・軽量化に伴い、加工技術の微細化・高精度化が要求され¹⁾、ワイヤ放電加工においても放電パルスの微小化、極間制御の高精度化、およびワイヤ電極の細線化が進展している²⁾。³⁾ 直径 100 μm 以下の細線を使用する微細ワイヤ放電加工の場合、ワイヤ径が大きい場合に多用される黄銅ワイヤ電極はその引張強度の小ささから使用されない。そのため、引張強度の高いピアノ線を芯線にしたコーティングワイヤ電極やタングステンワイヤ電極が従来広く用いられている。直径 100 μm 以下の細線を使用する微細ワイヤ放電加工では、直径 200~300 μm のワイヤを使用する通常のワイヤ放電加工と比較すると大きな放電パルスエネルギーの加工条件を用いることが難しいため、加工速度が小さくなる。また、高いワイヤテンションも負荷できない。加えて、放電領域が小さく、極間も狭いた

め、放電集中も起こりやすい。従って従来は主に加工条件の最適化や極間制御の高応答化の検討が行われてきた。しかしながら、これらの最適化による加工速度、加工精度の向上には限界がある。従って、高性能微細ワイヤ放電加工実現のためには、従来市販され実用されているワイヤ電極よりも加工速度が大きく、より高精度に加工の行える高性能ワイヤ電極の開発が求められる⁴⁾。

そこで本研究では、十分な放電エネルギーを極間に供給するために従来の細線ワイヤと比べて高い導電率を有し、ある程度の引張強度を有する Cu-Zr ワイヤ⁵⁾を作製し、その可能性について実験的に検討を行った。

Cu-Zr ワイヤは α -Cu による導電層と Cu-Zr 化合物による強化層から成るワイヤであり⁵⁾、Zr 添加量によって導電率と引張強度を変化させることができる。また、この Cu-Zr ワイヤに黄銅をめっきした黄銅めっき Cu-Zr ワイヤ、亜鉛をめっきした亜鉛めっき Cu-Zr ワイヤも試作し、従来のワイヤ電極と

* 岡山大学大学院自然科学研究科 (岡山市北区津島中 3-1-1)

** 日本ガイシ株式会社 (愛知県半田市前潟町 1 番地)

加工性能を比較した。

さらに、電極消耗、加工中の放電電流ピーク値の分布や放電分散状態、さらにワイヤ挙動についても評価し、加工特性の違いの要因についても考察した。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験は精密ワイヤ放電加工機（Sodick 社製 AP200L）を用いて行った。加工液には油加工液（Sodick 社製 VITOL2）を、工作物には厚さ 1mm の合金工具鋼 SKD11 を使用した。ワイヤ放電加工条件については、当初放電パルスエネルギーの大きい条件での加工が可能であることを期待したが、そのような条件では後述のように Cu-Zr ワイヤの低い引張強度のため加工中ワイヤ電極が断線し、加工が不可能であった。そこで、市販の直径 70 μ m 黄銅めっきスチールワイヤ Steel(Bs)で鉄鋼材料を加工する場合の加工機メーカー推奨加工条件に準じた加工条件で統一して、直線加工を行った際の加工速度と加工溝幅を比較した。また、加工中の放電波形を解析するとともに、加工中のワイヤ挙動や放電発生位置を高速度カメラにより観察し、評価した。

2.2 ワイヤ電極

本研究に用いた直径 70 μ m（真円度: 1 μ m）の 6 種類のワイヤ電極の断面構造を Fig. 1 に模式的に示す。(a)～(c)はすでに実用化されているワイヤで、(a)は引張強度の大きいピアノ線を芯線とし六四黄銅をめっきした Steel(Bs)ワイヤ、(b)は Steel(Bs)ワイヤにさらに亜鉛をめっきした Steel(Bs, Zn)ワイヤであり、めっき厚はどちらも 4 μ m である。(c)はタングステンワイヤである。

そして、(d)が今回開発した Cu-Zr ワイヤである。Fig. 2(a)にそのワイヤ断面組織と Fig. 2(b)にワイヤ長手方向断面組織の SEM 写真を示す。白く見える繊維状に伸びた共晶相と、黒く見える繊維状の Cu 相との二相組織が生成している。さらにこの共晶相内部は、ナノスケールの Cu 繊維と Zr 化合物繊維から成る二重構造となっている。前者の Cu 繊維は導電性を増大させ、一方後者の Zr 化合物相はナノ繊維強化すなわち、引張強度を向上させる。これらの亜共晶（hypoeutectic）組織の特徴によって Cu-Zr ワイヤの高強度と高導電率は変化する。Cu-Zr ワイ

ヤの大きな特徴は Table 1 に示す通り、従来ワイヤと比較すると、高い導電率とある程度の引張強度を有することである。Fig. 3 は主要な銅合金線材と Cu-Zr ワイヤの導電率と引張強度を比較している⁴⁾。銅合金線材の導電率と引張強度は一般に一方が高いともう一方が低いトレードオフの関係となっている。ただし、Cu-Zr ワイヤは他の銅合金線材が描く曲線よりも右上に位置する。つまり導電率と引張強度が共に高くある銅合金となっている。さらに Cu-Zr ワイヤは Zr の添加量によりその強度と導電率を容易に制御することが可能である。

Fig. 2 SEM images of sectional structure of Cu-Zr wire

Table 1 Tensile strength and electrical conductivity of wire electrodes

Wire	Tensile strength T_s [MPa]	Electrical conductivity λ [%IACS]
Steel (Bs)	2,323	15.6
Steel (Bs, Zn)	2,353	19.2
Tungsten	2,738	28.3
Cu-Zr	1,734	37.1
Cu-Zr (Bs)	1,435	41.5
Cu-Zr (Zn)	1,521	39.5

Fig. 3 Relations between tensile strength and electrical conductivity for copper alloy wires

Cu-Zr の中で最も導電率の高い、0.25at%の Zr を添加した Cu-0.25Zr は引張強度が通常のワイヤ放電加工で用いられる直径 200 μ m 程度の黄銅ワイヤ電極と同等であり、直径 100 μ m 以下のワイヤ電極を用いる微細ワイヤ放電加工ではワイヤ断線が容易に起きると予想されるため、本研究では 3.0at% の Zr を添加した Cu-3Zr をワイヤ電極として用いた。引張強度が高く、かつ導電率の高い Cu-3Zr のワイヤ電極を用いて十分な電流を極間に供給することで、大きい加工速度が得られると期待される。

また、更なる加工速度の向上を目指し、Cu-Zr ワイヤに黄銅、および亜鉛をめっきした(e)Cu-Zr(Bs)ワイヤ、および(f)Cu-Zr(Zn)ワイヤを作製した。なお、Cu-Zr の後にカッコで付記している(Bs)や(Zn)は、それぞれ黄銅、亜鉛をめっきしたワイヤ電極であることを表す。黄銅および亜鉛のめっき厚さはそれぞれ 4.2 μ m、1.3 μ m である。

3. Cu-Zr ワイヤ電極の加工性能評価

各ワイヤを用いて厚さ 1mm の SKD11 を直線加工した時の直線加工速度の比較を Fig. 4 に示す。図より、同じ設定加工条件にもかかわらず、従来の Steel(Bs)、Steel(Bs, Zn)、およびタングステンワイヤと比べて Cu-Zr ワイヤを用いた場合の加工速度は半分以下とかなり小さいことがわかる。

一方、Cu-Zr ワイヤにめっきをした Cu-Zr(Bs)ワイヤと Cu-Zr(Zn)ワイヤを用いた場合の加工速度はかなり大きい。特に、亜鉛めっき Cu-Zr ワイヤにおいては、従来の細線ワイヤ電極で最も加工速度の大きい Steel(Bs, Zn)ワイヤを用いた場合よりも、約 1.5 倍も大きい加工速度を得ることができた。この

結果より、導電率の高い Cu-Zr ワイヤを芯線とし、その周りに黄銅や亜鉛をめっきすることによって加工速度を向上できることが明らかとなった。

Fig. 4 Difference in cutting speed with wire type

この加工での加工溝の平均溝幅を Fig. 5 に示す。従来ワイヤ電極の場合は加工溝幅が約 90 μ m~92 μ m、すなわち片側クリアランスが約 10~11 μ m であるのに対し、Cu-Zr 系のワイヤは約 96 μ m 付近と加工溝幅がやや大きい結果となった。すなわち、めっき Cu-Zr ワイヤの場合、溝幅が大きく、除去体積が大きくなるにもかかわらず、直線加工速度が大きくなることが分かった。

Fig. 5 Difference in kerf width with wire type

4. めっき Cu-Zr ワイヤの加工速度向上の考察

4.1 放電電流値と放電回数の測定

加工速度向上の要因として、単発放電の除去体積、および単位時間当たりの放電回数、すなわち放電周

波数の増大がまず考えられる．そこで，各ワイヤ電極を用いて加工を行った際の極間電圧，および放電電流波形をデジタルオシロレコーダによりサンプリング周期 20MHz で計測した．Fig. 6 は一発の放電が発生した際の測定例である．電流波形にはばらつきがあり，毎秒数万回の電流波形のピーク値を求めるため，次の手法により電流ピーク値とそのばらつきを算出した．

まず，任意に設定した放電開始・終了判定閾値①より電流値が大きくなる直前の時刻②を放電開始時刻とする．閾値はノイズを検知しない程度に小さく設定した．その後放電電流値が①より小さくなる時刻③を放電終了時刻と定義する．灰色でハッチングした②－③間で放電が発生していると判断できる．また，この②－③間に検出される最も高い電流値をその放電の放電電流ピーク値 I_p と定義する．

Fig. 6 Analysis method of discharge waveforms

以上の放電電流波形の解析により得られた単位時間当たりの総放電回数，すなわち放電周波数を使用したワイヤ電極毎に Fig. 7 に示す．また，発生した放電の各電流ピーク値の割合を 2.5A 毎に分けて示す．さらに，各コラムの上に 15A 以上の大きい電流ピーク値における放電発生割合を示す．図より明らかなように，同じ設定加工条件であるが，放電周波数や電流ピーク値の割合は異なる．そして，Cu-Zr ワイヤやタングステンワイヤを用いた場合は放電周波数が比較的低く，めっき Steel ワイヤやめっき Cu-Zr ワイヤを用いると放電周波数が高いことがわかる．また，それらの電流ピーク値に注目すると，めっき Steel ワイヤと比較してめっき Cu-Zr ワイヤの場合は，電流ピーク値が 15A 以上の大きい電流ピーク値での放電割合が多いことがわかる．

また，融点の低い亜鉛をワイヤ表面にめっきすることにより，放電爆圧を増加させ単発での除去体積増加の効果も報告されている⁶⁾．従って，従来ワイヤ電極と同じ加工条件を用いて加工を行ったにも関わらず，ワイヤ表面にめっきを施すことにより単位時間当たりの放電回数が増加し，また芯線に電気伝導度の高い Cu-Zr を用いることで，大きな電流ピーク値が極間に供給でき，単発放電エネルギーの大きい放電の回数が増加し，結果的に加工速度の向上につながったと推測される．

Fig. 7 Difference in discharge frequency and distribution of current peak value

4.2 放電発生位置相対評価

Cu-Zr ワイヤ表面にめっきした亜鉛は融点・沸点が銅やタングステンと比較して低い．このことから蒸発による放電点近傍の冷却が促進され，絶縁の回復が良好となることが報告されている⁷⁾．これによって Fig. 7 に見られたように，めっき Cu-Zr ワイヤの放電周波数が増加したのではないかと考えられる．亜鉛による放電安定化効果を確かめるために，めっきを施していない Cu-Zr ワイヤと亜鉛めっきを施した Cu-Zr(Zn)ワイヤの放電の発光位置を高速カメラで観察し，放電分散状態を比較した．

実際の撮影動画の 1 画像と撮影範囲の模式図を Fig. 8 に示す．放電プラズマは白い点として録画され，画像解析によって放電光の座標を求めた．そして，放電集中状況を評価するために前の放電発生位置に対する放電発生位置 D_R を求めた⁸⁾． n 番目の放電発生位置の Z 座標を Z_n とすると，その時の放電発生位置 D_R は次式で表される．

$$D_R = Z_n - Z_{n-1} \quad (1)$$

Cu-Zr ワイヤと Cu-Zr(Zn)ワイヤにおける、それぞれの相対放電発生位置 D_R を Fig. 9(a), Fig. 9(b)に示す。図中の点線は乱数を用いてランダムな位置に放電が発生した場合の理想的な分布を示しており、Cu-Zr ワイヤの場合は理想的分布と比較すると、変位量が $\pm 1.0\text{mm}$ の放電が顕著に多く発生している。プラズマが完全に消沈する前に次の放電が発生する場合、放電はその近傍で発生しやすい。従って、Cu-Zr ワイヤの場合、放電がかなり集中していると判断できる。

Fig. 8 High-speed observation of spark location

(a) Cu-Zr wire

(b) Cu-Zr(Zn) wire

Fig. 9 Histograms of relative displacement of spark generation

一方、亜鉛をめっきすることで放電発生位置が分散し(b)のように放電集中が低減した分布となる。このことより Cu-Zr ワイヤはめっきを施すことで放電集中が減少し、加工が安定することを確認できた。

4.3 電極消耗率

極間に与えられる放電エネルギーが工作物とワイヤ電極にどのように配分されるのかを考察するため、電極消耗率の算出を試みた。厚さ 10mm の SKD11 を一定時間加工し、加工前後の工作物の質量をデジタルスケールにより測定した。一方、ワイヤ電極についてはワイヤ径と走行した長さから加工前の重量を算出し、加工後は相当長さのワイヤ重量を実測した。そして、ワイヤ電極と工作物の除去体積 V_E , V_W を算出した。求めた除去体積を Fig. 10 に示す。電極の消耗体積に対して工作物の除去体積が大きいほど、放電エネルギーが工作物除去に相対的に多く費やされることを示す。逆の場合は電極消耗が相対的に多くワイヤ断線の可能性も高いことになる。めっきを施していない Cu-Zr ワイヤ電極の消耗量が他ワイヤに比べて顕著に大きく、めっきを施すことでワイヤの消耗量が低減されている。めっき Cu-Zr ワイヤでは、前述のように Cu-Zr ワイヤより単位時間当たりの工作物加工量が増加したとことと良く対応している。

次に、 V_E と V_W から、次式により電極消耗率 v を求めた。

$$v = \frac{V_E}{V_W} \times 100 \quad (2)$$

Fig. 10 Removal volumes of wire and workpiece with different wire

Fig. 11 に各ワイヤを用いた際の電極消耗率 v を示す。図より、Cu-Zr ワイヤは他のワイヤと比較して電極消耗率が顕著に大きな値を示すことがわかる。これは早川らが指摘しているように Cu-Zr の高い熱伝導率によって、ワイヤ電極側にエネルギー配分が多くなるためである⁹⁾。よって Cu-Zr ワイヤは放電エネルギーが工作物よりもワイヤ電極の除去に多く費やされていることから、Fig. 7 に示されたように放電電流値が大きいにもかかわらず Fig. 3 のように加工速度が小さくなったと考えられる。一方、この Cu-Zr ワイヤに亜鉛や黄銅をめっき施すことによりワイヤ電極側へのエネルギー配分が減少し、かつ放電電圧も大きくなるため、工作物除去も効率に行われる⁹⁾。よって、電極よりも工作物の除去にエネルギーが費やされることで、電極消耗率はかなり小さくなる。従ってめっき Cu-Zr ワイヤの加工速度はめっきを施していない Cu-Zr ワイヤの加工速度の2倍から3倍まで増加したと言える。

Fig. 11 Difference in electrode wear ratio with wire type

5. 加工中のワイヤ振幅評価

Cu-Zr ワイヤは Table 1 に示したように従来のワイヤと比較して高い導電率を有するものの、引張強度は比較的小さい。そのため、加工中のワイヤ振動振幅が大きくなり¹⁰⁾、Fig. 4 のように加工溝幅が大きくなった可能性がある。そこで、Fig. 12 に示すように高速度カメラを用いて Cu-Zr ワイヤと従来のワイヤとの加工中におけるワイヤの振動振幅を比較した。Fig. 12 に示すように、加工方向後方からその様子を撮影した。視野のサイズは $0.4 \times 0.2\text{mm}$ と

し、工作物として厚さ 1mm の SKD11 を用いた。撮影箇所は工作物上端から 1mm の位置である。Fig. 13 に各ワイヤ電極における加工中のワイヤ最大振幅を示す。図より各ワイヤ電極の最大振幅に極端な差は見られずワイヤ直径 $70\mu\text{m}$ に対し、振幅の差は $2\mu\text{m}$ 以内である。そして、加工溝幅の広がっためっき Cu-Zr ワイヤの方がむしろ加工中のワイヤ電極の振動振幅は小さいことが分かる。従って Cu-Zr ワイヤやめっき Cu-Zr ワイヤの加工溝幅が大きい要因は加工中のワイヤ振動振幅によるものではなく、前述のように、より大きなエネルギーの放電が加工進行方向だけでなく加工溝方向の工作物除去にも作用していると考えられる。

Fig. 12 High-speed observation area of wire during wire EDM

Fig. 13 Difference in wire vibration amplitude with wire type

6. 結論

本研究では、高性能なワイヤ電極の開発を目的として Cu-Zr ワイヤ電極を試作し、その加工特性について実験的検討を行った。本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) Cu-Zr ワイヤ電極はめっきの有無に関わらず、放電電流ピーク値が従来ワイヤ電極を用いた場合と比べて大きい。
- (2) Cu-Zr ワイヤ電極に黄銅や亜鉛めっきを施すことで放電周波数が高くなる。
- (3) Cu-Zr ワイヤ電極にめっきを施すことによって、工作物に配分される放電エネルギーが増大し、従来ワイヤ電極と比較し 1.5 倍以上加工速度が増大する。
- (4) Cu-Zr ワイヤ電極を用いた場合、加工中のワイヤの振動振幅は従来ワイヤ電極とほぼ同等である。

参考文献

- 1) 片平敬子：最新の微細加工技術，型技術，Vol.32, No.8 (2017) pp.14-15.
- 2) 東脇正明，片田佳子：新型制御装置「D-CUBES」搭載新型ワイヤ放電加工機，型技術，Vol.32, No.8 (2017) pp.20-21.
- 3) J. Wu, M. Zhou, X. Xu, J. Yang, Z. Zeng and D. Xu: Fast and stable electrical discharge machining (EDM), Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.72-73 (2016) pp.420-431.
- 4) I. Maher, A. A. D. Sarhan, and M. Hambi: Review of improvements in wire electrode properties for longer working time and utilization in wire EDM machining, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.76 (2015) pp.329-351.
- 5) 村松尚国，木村久道，井上明久：最大で 2.2GPa の引張強度を持つ Cu-Zr 合金線の開発とそのマイクロ組織，日本金属学会誌，Vol.75, No.3 (2011) pp.159-165.
- 6) X. Yue, X. Yang and M. Kunieda: Influence of metal vapor jets from tool electrode on material removal of workpiece in EDM, Precision Engineering, Vol.53 (2018) pp.278-288.
- 7) I. Cabanes, E. Portillo, M. Marcos, and J. Sanchez: An industrial application for on-line detection of instability and wire breakage in wire EDM, Journal of Materials Processing Technology, Vol.195, No.1-3 (2008) pp.101-109.
- 8) A. Okada, Y. Uno, and M. Nakazawa: Evaluations of spark distribution and wire vibration in wire EDM by high-speed observation, CIRP Annals, Vol.59 (2010) pp.231-234.
- 9) 早川伸哉，国枝正典，西脇信彦：放電加工における電極材料がエネルギー配分に及ぼす影響，電気加工学会全国大会講演論文集，(1996) pp.21-24.
- 10) A. Okada, S. Ichii, and Y. Okamoto: Investigation of Wire Movement in Fine Wire EDM by High-speed Observation, International Journal of Electrical Machining, No.18 (2013) pp.43-48.

(2020年7月22日受付)