

燃線加工を想定した極細銅合金線の形状凍結性評価試験法の提案

Proposal of Evaluating Method for Shape Fixability of Ultrafine Copper Alloy Wires for Twisted Wire Processing

窪田 紘明*
Hiroaki KUBOTA

矢野 来夢
Raimu YANO

坂 研二
Kenji SAKA

三上 拓徒
Takuto MIKAMI

吉田 一也
Kazunari YOSHIDA

本研究では、超細線の燃線加工後の形状固定熱処理を模擬するため、燃線加工時に付与されるひずみと同等のひずみを線材に付与した状態で加熱可能な試験方法を開発した。材料には直径 $d = 0.02$ mm の Cu-Ag 合金線 (Ag: 10 質量%) を用いた。試験治具はスプリングバック角の測定を容易にするため、直線部と曲線部からなる U 字型とした。加熱には内径 25 mm の管状炉を用い、加熱温度は 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C の 4 条件とした。加熱時間は約 30 ~ 180 s の範囲で変化させた。剛性パンチを用いた場合には、ワイヤが治具内で移動し安定して保持できないことが判明した。そこで、ステンレス鋼箔を用いた柔軟変形可能なパンチを考案し、このパンチによりワイヤを安定して保持できることを確認した。考案した治具を用いて試験を行った結果、以下の結論を得た。(1) 小型ダイスとステンレス鋼箔を用い、治具全体を加熱することにより、超微細線の形状保持性を評価可能であることが示された。(2) 本試験条件は燃線加工を想定しているため端子材料の応力緩和試験と比較して短時間・高温であるが、本試験範囲においてもラーソン・ミラーパラメータが結果の整理に有用であることが明らかとなった。

キーワード: 撚り線, サスペンションワイヤー, 超微細線, モバイルカメラ, 光学式手ぶれ補正, Cu-Ag 合金, スプリングバック, 形状固定性, ラーソン・ミラーパラメータ, 応力緩和

In this study, in order to simulate the shape fixing heat treatment after twisting of ultrafine wires, we developed a test method that enables heat to be applied to the wire with a strain equivalent to that applied during twisting. Cu-Ag alloy wire (Ag:10 mass%) with an diameter of $d=0.02$ mm was used as the material. The test jig was U-shaped, consisting of a straight part and a curved part, to facilitate the measurement of the spring-back angle. A tube furnace with an inner diameter of 25 mm was used for heating, and the heating temperature was set at four levels: 200°C, 300°C, 400°C and 500°C. The heating time was varied from about 30 s to 180 s. When a rigid punch was used, it was found that the wire moved in the jig and could not be held stably. Therefore, we devised a punch that can be flexibly deformed using stainless steel foil. We found that the punch could hold the wire stably. Following conclusions were obtained as a result of tests using the devised jig. (1) It was shown that it is possible to evaluate the shape fixability of ultrafine wires by small die and stainless steel foil and heating the entire jig. (2) The test conditions in this study are short and high temperature compared to the stress relaxation test of terminal materials, because the twisted wire processing is assumed. It was found that Larson-Miller parameter was also useful to summarize the results in this test range.

Keywords: twisted wire, suspension wire, ultrafine wire, mobile camera, optical image stabilization, Cu-Ag alloy, spring-back, shape fixability, Larson-Miller parameter, stress relaxation

1. 緒 言

光ピックアップやモバイルカメラの手振れ補正機構には銅合金製のサスペンションワイヤが用いられることがあり

疲労耐久性の向上が求められている。疲労耐久性向上の方策の一つは材料の高強度化であり、これに対する検討が進められている¹⁾。もう一つの方策として、サスペンション構造の改良があり、従来の単線構造から撚線構造へ変更することによるサスペンション動作時の発生応力の低減が検討されている^{2) 3)}。

* 東海大学 〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4-1-1
Tel : 0463-58-1211
E-mail : h.kubota@tsc.u-tokai.ac.jp

サスペンションに高強度材を用い、かつ撚線構造を適用するときの課題の一つに撚線加工後のスプリングバックがある。即ち、サスペンションワイヤは撚線加工後に短尺に切断されるため撚った形状が直線状に戻って分解する可能性がある²⁾。一般的にスプリングバックは高強度材ほど大きくなる。本検討で対象とする銀入り銅線材は高い強度と導電率を両立した材料であり引張強さが1000 MPaを超えることもある⁴⁾。これはスプリングバックが課題となる自動車用高張力鋼板の強度⁵⁾に匹敵する。そのため撚線加工時のスプリングバックの発生が課題になることが容易に想定できる。

スプリングバックの防止については自動車用鋼板のプレス成形分野で多くの研究がなされている^{6)~10)}。その中で、熱間加工におけるスプリングバックの防止機構が明らかにされている^{11) 12)}。

本研究の銅合金極細線の撚線加工後のスプリングバックの防止に関しては、撚線加工後に熱処理を行い形状凍結させる方法²⁾を用いる。しかし、開発段階において種々の素線や熱処理条件に対して実際の撚線の試作を行うことは大きな時間とコストを伴うため簡便な評価試験法の確立が求められる。

銅薄板材の応力緩和を評価する簡便な試験法として日本伸銅協会技術標準の応力緩和試験法 (JCBA-T309-2004) がある。しかし、加える曲げひずみを大きく変化させることができない、ハンドリングしにくい極細線は固定が難しい、ジグの熱容量が大きく撚線加工後の短時間の熱処理の評価には不向きであるという課題があった。

そこで本研究では極細線の撚線加工後の熱処理を模擬するために、撚線加工時に付与されるひずみと同等のひずみを線材に付与した状態で熱を加えることが可能な試験法を検討した。

2. 実験方法

供試材として外径 $d=0.02$ mm の銀入り銅合金線材 (Ag

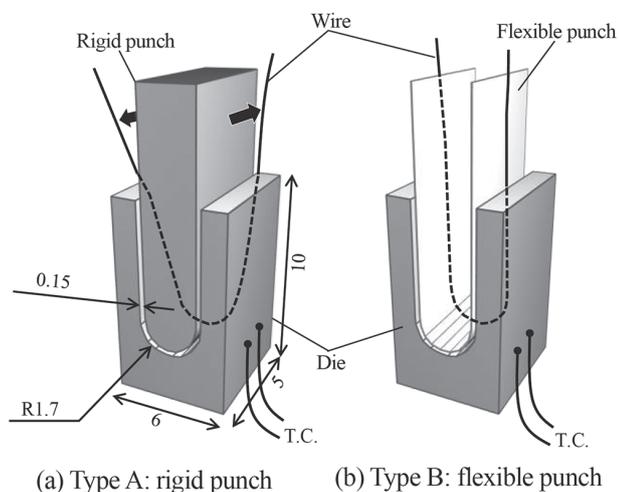


Fig. 1 Shape fixability evaluation jig for ultrafine wire (unit : mm).

含有量 10 mass%) を用いた。

Fig.1 に考案した試験治具を示す。スプリングバック角度を計測しやすいように直線部と曲線部からなる U 字形とした。曲線部は単一半径とした。本試験では半径 R は 1.7 mm (外 R) とした。これは、外径 $d=0.02$ mm の線材 4 本を 1 mm ピッチで撚り合わせた場合の曲率半径に相当する。本検討では素線に撚り変形が加わらない¹³⁾ チューブラー撚りを模擬した。したがって撚りを加えずに単純な曲げ変形を行える治具としている。

また、2 種類の固定方法を検討した。Fig.1 (a) は剛体のパンチを用いて曲げ変形を与える治具である。ダイとパンチは材料としてステンレス鋼 SUS304 を用いてワイヤ放電加工により作成した。Fig.1 (b) は柔軟に変形するステンレス箔 (板厚 0.05 mm) のパンチを用いて曲げ変形を与える治具である。

加熱には内径 25 mm の管状電気炉を用い、手動で治具を入り出すことで加熱時間を変更した。加熱温度は 200 °C、300 °C、400 °C、500 °C の 4 水準とし、加熱時間は約 30 s から約 180 s の範囲で変更した。温度はダイに溶接した熱電対 (T.C.) により計測した。

3. 実験結果

3.1 線材の固定方法

実験の結果 TypeA (Fig.1 (a)) の方法はパンチが剛体であるため線材径に対して大きなクリアランス (0.15 mm) を設ける必要があった。そのため、Fig.1 (a) 中の太い矢印のように線材が治具の中で動いてしまい安定して保持できないことが判明した。そこで、TypeB (Fig.1 (b)) の方法を考案した。その結果、本方法により線材を安定して固定出来ることが分かった。極細線を保持するためには柔軟に変形するパンチを用いることが有効であると言える。また、剛体のパンチが不要となったことで熱容量も低減することが出来た。以降は TypeB の治具を用いた結果である。

3.2 加熱温度・保持時間・スプリングバック量の関係

Fig.2 に温度測定結果の一例 (加熱温度 400°C の場合) を示す。 T_{max} は最高到達温度、 t_h は保持時間である。ここで

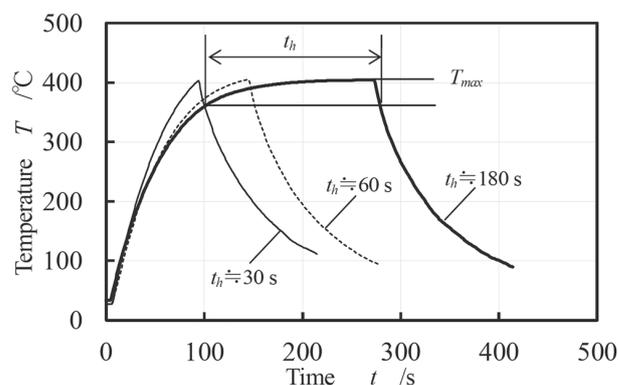


Fig. 2 Temperature history example in 400°C heating.

保持時間 t_h は便宜的に最高到達温度から 40°C 低い温度以上に保持した時間とした。小型の治具を用いたが昇温に約 100 s を要した。また、製品使用時を想定した応力緩和試験と異なり短時間の試験であるため温度を一定に保つことが難しいことも確認できた。

Fig.3 にスプリングバック量 α の計測方法を示す。加熱後に放冷して室温となった治具からピンセットを用いてステンレス箔のパンチと線材を取り出し、画像計測によって非接触で角度 α を計測した。また、形状凍結性 $SF\%$ は式 (1) により求めた。SF は完全にスプリングバックして直線状に形状が戻った場合に 0% 、完全に形状凍結して U 字形状になった場合に 100% の値となる。

$$SF = 100 \times \left(\frac{180 - \alpha}{180} \right) \quad (1)$$

Fig.4 に **Fig.2** に示した加熱温度 T_{\max} 、保持時間 t_h とスプリングバック量 α 、形状凍結性 SF の関係を示す。加熱温度が上昇するほどスプリングバック量が低下して形状凍結が進むことが見て取れる。また、保持時間が長くなるとスプリングバック量が低減する傾向が認められた。加熱温度が 500°C の場合には保持時間によらずスプリングバックはほぼ 0 となった。

4. 考 察

4.1 応力-ひずみ曲線との対応

ここでは曲げ変形によって導入されるひずみと引張り試験結果を比較することで変形挙動を考察する。**Fig.5** に素線が治具の中で保持されているときの曲げ部の模式図を示す。 $\epsilon_b\%$ は曲げひずみであり R および d から式 (2) を用いて算出することができる。

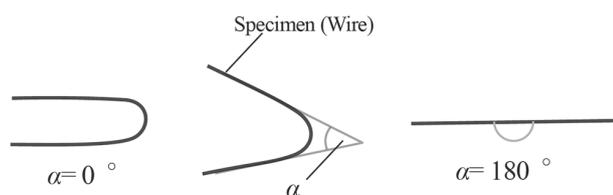


Fig. 3 Schematic illustration of formed specimen.

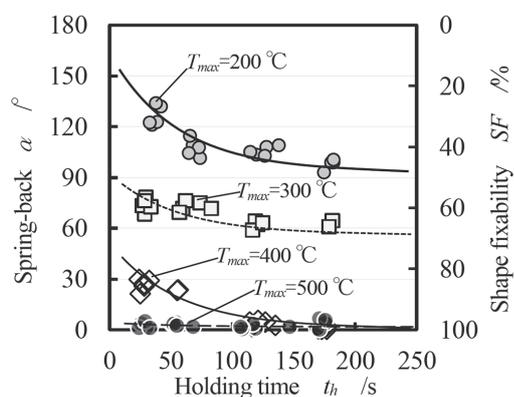


Fig. 4 Relationship between t_h and spring-back α .

$$\epsilon_b = 100 \times \left(\frac{d}{2} \right) / \left(R - \frac{d}{2} \right) \quad (2)$$

Fig.6 に素線の高温引張り試験結果を示す。標点間距離 100 mm 、チャック間距離 150 mm 、試験速度 8.4 mm/min で試験を行った。標点間距離は非接触ビデオ伸び計を用いて逐一計測した。**Fig.6** 中に示す曲げひずみ $\epsilon_b=0.59\%$ は $R=1.7\text{ mm}$ に素線を曲げたさいの計算値である。

引張り試験では応力緩和の影響を小さくするためにひずみが 0.59% 加わるまでの時間を約 8 s として **Fig.4** の試験時間に対して短時間の試験とした。

その結果、**Fig.6** に示すように治具で与えた曲げひずみは 0.2% 耐力 $\sigma_{0.2}$ 以下であり、単に曲げひずみによる塑性変形による加工であると考えた場合にはほとんど変形が残留しないことになる。したがって、応力ひずみ曲線では **Fig.4** の結果を説明し得ないことが分かった。

4.2 積算 Larson-Miller パラメータを用いた整理

以上の検討から応力緩和を主体とした加工であると考え Larson-Miller パラメータによる整理を試みる。Larson-Miller パラメータは温度-時間換算パラメータの一つであり、クリープ寿命や応力緩和の予測に用いられる場合がある¹⁴⁾。本試験は短時間の加熱を対象とした試験であるため **Fig.2** に示したように温度を一定に保持することが困難であった。そこで、予ら¹⁵⁾ の計算法を用いて温度が変動する場合に対する評価を行う。ここでは、本計算によって求める値を積算 Larson-Miller パラメータ (ILMP) と呼ぶ。

Fig.7 に温度データの模式図を示す。本試験において温

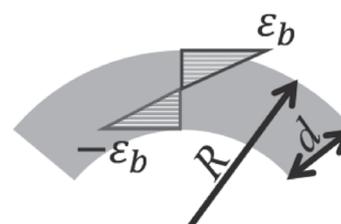


Fig. 5 Schematic illustration of bending state of wire in die.

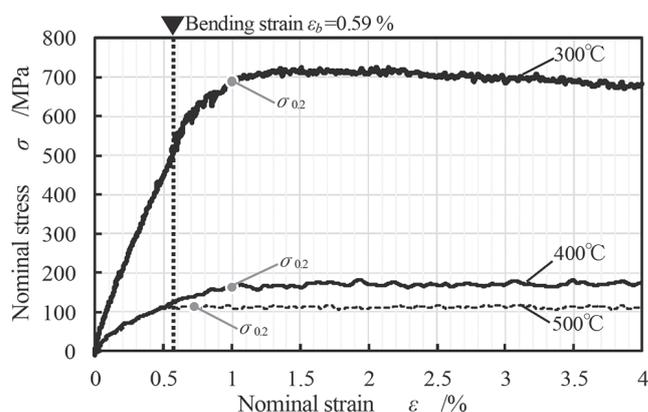


Fig. 6 Result of elevated temperature tensile test.

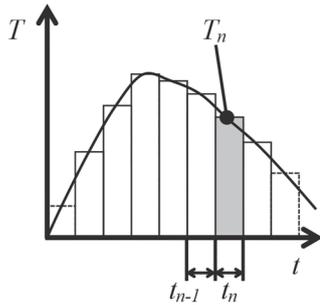


Fig. 7 Schematic illustration of temperature data.

度は1秒毎に測定した。測定したデータを用いてILMPは以下の手順¹⁵⁾で算出した。

応力緩和の過程のある温度における保持時間を、次の区間の温度における等価保持時間に順次換算して足し合わせて行くことを考える。

第1区間の温度 T_1 Kにおける保持時間 t_1 hのLarson-Millerパラメータ P_1 を、次の区間の温度 T_2 における等価保持時間 $t_{1,2}$ への変換は次の式(3)、式(4)、式(5)のように行う。

$$P_1 = T_1(20 + \log t_1) = T_2(20 + \log t_{1,2}) \quad (3)$$

$$\log t_{1,2} = \frac{T_1}{T_2}(20 + \log t_1) - 20 \quad (4)$$

$$t_{1,2} = 10^{\frac{T_1}{T_2}(20 + \log t_1) - 20} \quad (5)$$

以上で求めた等価保持時間 $t_{1,2}$ を第2区間の保持時間 t_2 に足し合わせることで、第2区間終了時点におけるLarson-Millerパラメータ P_2 は式(6)のように求める。

$$P_2 = T_2[20 + \log(t_{1,2} + t_2)] \quad (6)$$

同様に、 P_2 を次の区間の温度 T_3 における等価保持時間 $t_{2,3}$ に変換する。

$$P_2 = T_2[20 + \log(t_{1,2} + t_2)] = T_3[20 + \log t_{2,3}] \quad (7)$$

$$\log t_{2,3} = \frac{T_2}{T_3}[20 + \log(t_{1,2} + t_2)] - 20 \quad (8)$$

$$t_{2,3} = 10^{\frac{T_2}{T_3}[20 + \log(t_{1,2} + t_2)] - 20} \quad (9)$$

式(7)、式(8)、式(9)により求めた等価保持時間 $t_{2,3}$ を第3区間の保持時間 t_3 に加えることで第3区間終了時点におけるLarson-Millerパラメータ P_3 が式(10)のように求まる。

$$P_3 = T_3[20 + \log(t_{2,3} + t_3)] \quad (10)$$

以降は同様に計算を繰り返すことにより第1区間から第 n 区間までの積算Larson-MillerパラメータILMPを式(11)のように求めることができる。

$$P_n = T_n[20 + \log(t_{n-1,n} + t_n)] = ILMP \quad (11)$$

本計算を加熱開始から冷却終了時までの温度測定データに対して行った。

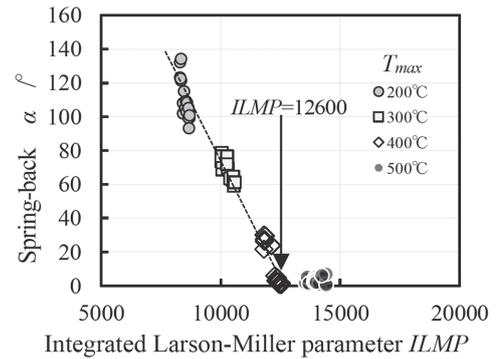


Fig. 8 Relationship between ILMP and spring-back α .

積算Larson-MillerパラメータILMPとスプリングバック量 α の関係をFig.8に示す。本実験の範囲ではスプリングバック量 α が 140° から 0° の区間において直線的に整理が可能であった。また、本材料ではスプリングバック量がほぼ0になり、完全に形状凍結するILMPは12600であることが分かった。

本試験は撚線加工後の熱処理を想定しており、端子用材料等の応力緩和試験よりも短時間かつ高温である。しかし本試験範囲においてもLarson-Millerパラメータを用いた結果の整理が有効であることが明確になった。

以上の検討より、考案した試験法とILMPを組み合わせることにより撚線加工後の形状凍結工程における熱処理条件の検討が可能であると言える。即ち、許容されるスプリングバック量の範囲において工程設計上最適な加熱温度と保持時間の組合わせを選択することが可能である。

なお、本実験での曲げ変形はFig.6に示した通り0.2%耐力以下の加工であるためILMPでの整理が可能であったと考えられる。素線径が大きい場合や撚りピッチが短く曲げ曲率半径が小さい条件では曲げひずみが大きくなるため、塑性ひずみが時間に依存することなく昇温と同時に進展すると考えられる。この場合にはLarson-Millerパラメータのみでの整理が出来ない可能性があり、昇温と同時に生じる塑性ひずみとその後の応力緩和の両者を考慮した形状凍結性の評価指標を検討する必要がある。

5. まとめ

極細銅合金線の撚線加工後の熱処理条件を決定するための簡易試験法を検討し以下の結論を得た。

- (1) 微小なダイとステンレス箔を用いて極細線を固定して治具ごと加熱することで、形状凍結性を評価可能であることを示した。
- (2) 本試験は撚線加工を想定しており、端子用材料等の応力緩和試験に対して短時間かつ高温である。本試験範囲においてもLarson-Millerパラメータを用いた結果の整理が有効であった。
- (3) 曲げひずみがより大きい加工条件では昇温と同時に塑性ひずみが進展すると考えられLarson-Millerパラメ

ータのみでの整理が出来ない可能性があり、今後評価指標の検討が必要である。

<転載元>

本稿は、日本銅学会誌 銅と銅合金、第61巻1号(2022)に掲載された同名論文を、日本銅学会の許諾を得て転載したものである。

参考文献

- 1) 千星聡, 正橋直哉, 金野泰幸: 2021年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2021), 23-24.
- 2) 岡田洋一, 原田秀則, 興水幸比古: 特開 2004-39038.
- 3) 坂研二, 山越光: 特許 6982147.
- 4) 坂井義和, 井上廉, 浅野稔久, 前田弘: 日本金属学会誌, 55 (1991), 1382-1391.
- 5) 樋渡俊二: 日本機械学会誌, 125 (2022), 24-27.
- 6) 飛田隼佑, 新宮豊久, 山崎雄司, 平本治郎: 塑性と加工, 60 (2019), 155-160.
- 7) 新宮豊久, 山崎雄司, 三宅弘人, 平本治郎: 塑性と加工, 60 (2019), 161-166.
- 8) 田中康治, 宮崎隆司, 小川操, 名取純希, 菅原稔: 塑性と加工, 60 (2019), 283-288.
- 9) 澄川智史, 石渡亮伸, 卜部正樹, 玉井良清: 塑性と加工, 61 (2020), 57-62.
- 10) 三宅弘人, 新宮豊久, 山崎雄司, 平本治郎, 玉井良清: 塑性と加工, 62 (2021), 48-53.
- 11) 楠見和久, 山本修治, 潮田浩作: 塑性と加工, 60 (2019), 45-50.
- 12) H. Kubota, A. Tomizawa, K. Yamamoto, N. Okada, T. Hama and H. Takuda: ISIJ International, 54 (2014), 1856-1865.
- 13) 西村隆一, 藤田崇史, 加田修, 成宮洋輝, 山下朋広: 新日鉄住金技報, 406 (2016), 24-30.
- 14) 木村宏: 改訂材料強度の考え方, アグネ技術センター, (2010), 422.
- 15) 于麗娜, 仲林佑馬, 才田一幸, 望月正人, 西本和俊, 亀山雅司, 平野伸朗, 千種直樹: 溶接学会論文集, 29 (2002), 2, 107-113.

東海大学
窪田 紘明 (くぼた ひろあき)
工学部 精密工学科
講師・博士 (エネルギー科学)

東海大学
矢野 来夢 (やの らいむ)
工学部 精密工学科
学部生

(株)TOTOKU*
坂 研二 (さか けんじ)
研究開発部
課長

東海大学
三上 拓徒 (みかみ たくと)
工学部 精密工学科
大学院生

東海大学
吉田 一也 (よしだ かずなり)
工学部 精密工学科
教授・工学博士

※東京特殊電線は2023年にTOTOKUに社名変更しています。