高温熱履歴を受けた ACSR 電線の軟化特性（実験検証）

正員 土師 弘 敬 （東京電力株式会社）
 正員 森 川 均 （住友電気工業株式会社）
 非会員 大 橋 資 夫 （古河電気工業株式会社）
 正員 長 野 宏 治 （日立電線株式会社）
 非会員 吉 川 達 治 （株式会社フジクラ）
 非会員 伊 藤 剛 （昭和電線電纜株式会社）
 非会員 片岡 謙太郎 （三菱電線工業株式会社）

Annealing Characteristics of ACSR Subjected to High-temperature Heating (Experimental Demonstration)

Haji Hirotaka, Member (Tokyo Electric Power Co., Inc.)
 Morikawa Hitoshi, Member (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)
 Ohashi Yoshio, Non-member (Furukawa Electric Co., Ltd.)
 Nagano Kouji, Member (Hitachi Cable, Ltd.)
 Yoshikawa Tatsuji, Non-member (Fujikura Ltd.)
 Ito Takeshi, Non-member (Showa Electric Wire & Cable Co., Ltd.)
 Kataoka Kentaro, Non-member (Mitsubishi Cable Industries, Ltd.)

The annealing characteristics plays a central role in studies on improvement of the operating ratio of transmission line. We rigorously evaluated and verified the annealing characteristics of new and aged ACSR. In particular, a method was identified for the accurate estimation of the annealing characteristics of the entire ACSR from the annealing characteristics of the aluminum strands. The results can be summarized as follows.

- (1) When evaluating the annealing characteristics of aged conductor using aluminum strands, it is better for tensile strength measurement to untwist the strand after heating than untwist before heating.
- (2) The annealing characteristics of aluminum strands vary greatly depending on manufacturing method (WB method, CC method).
- (3) If manufacturing method of the aluminum strands is the same, the annealing characteristics of new and aged ACSR as a whole can be estimated accurately from the tensile strengths of new aluminum strands (prior to heating) and aluminum strands sampled from the conductor after heating.
- (4) The tensile strength of annealed aluminum strand depends on the sum total of heating (temperature $\times$ time). The order of heating has no relation to the final tensile strength.

キーワード：送電線，ACSR，軟化特性，熱劣化，熱履歴

1. まえがき

本論文は、送電線の稼働率向上研究のなかで中心的な役割を担う電線の軟化特性、すなわち通電電流による電線温度の上昇が電線の引張強さを低下させる現象を厳密に評価検証したものである。

これまで、アルミ線材の熱履歴（加熱温度ならびに加熱

時間）と引張強さの関係については、アレニウスプロットとして内外に豊富なデータが蓄積されている¹⁾²⁾。しかし、これまでのデータは通電熱履歴を受けていないアルミ線材（アルミ素線）を加熱し、その温度と時間によるアルミ素線の引張強さの低下を確認あるいは定式化したものである。

本論文に述べる内容は、ACSRの各電線サイズを対象に、以下の①～④に挙げる諸特性を現行電線の使用温度より高

い領域にまで踏み込んで検証した結果の詳細である。

- ①通電熱履歴を受けていないアルミ素線の軟化特性
- ②通電熱履歴を受けた経年アルミ素線の軟化特性
- ③通電熱履歴を受けていない新しい ACSR と通電熱履歴を受けた経年 ACSR の、鋼線まで含めた電線全体に通電加熱しての軟化特性比較
- ④上記熱履歴の加法性検証（異なる温度履歴を受けた電線の軟化特性評価）

ACSR 電線の軟化特性を180℃の高温領域まで検証することはもとより、上記②～④については、内外でも初めての検証となる。この結果、新たな事実を明らかにするとともに、軟化特性の確認に時間を要する100℃未満のいわゆる低温軟化特性についても、10年計画で H11年度より検証に着手している。また本論文では実験による軟化特性の検証結果に限定するものとし、検証結果の合理的な定式化の方法については別の論文にて論ずる。

なお、TACSR 電線の軟化特性については、製造メーカーにより添加物が異なる点もあり、一本化して論じられない部分があるので、本論文では、ACSR 電線の軟化特性に限定して述べる。

2. 軟化特性の評価方法

今回の検証実験では、経年電線の軟化特性を明らかにするため使用年数が14～34年の実線路からの撤去電線8種類（電線サイズは240～610mm²）をサンプルとして用いる。

軟化特性は、アルミ素線については空気対流式の恒温槽において、また ACSR 電線は電流通電により所定温度で一定時間加熱した後、これらのサンプルを取り出し常温になるまで自然冷却後引張強さを測定する。なお、恒温槽の加熱時間内の温度変動は連続記録値による確認の結果、最大で-2～+2℃の範囲内にあった。一方、通電加熱による温度変動は電線サンプルの中央部に装着した熱電対による

監視制御により加熱時間内の温度変動は、最大で-6～+3℃の範囲であったが、加熱時間中のほとんどは±2℃の変動に収まっている。経年電線の軟化特性は、アルミ素線の評価と電線全体の評価に分けられるが、取扱い易さの面からは前者による実験が望ましい。この場合、経年電線から抜き取ったアルミ素線をより戻して（引き伸ばして）加熱した場合と、加熱後により戻した場合で軟化特性が異なることがわかった。図1は、13年間実線路で使用した経年電線（ACSR330mm²）のアルミ素線の軟化特性を上記2種類の方法で比較した結果の一例である。

ここに強度低下率は、便宜上、(1)式により定義しているが、この定義方法については6節にて詳しく論ずる。

(アルミ素線の強度低下率)=

$$\left[1 - \frac{(\text{アルミ素線の加熱後引張強さ})}{(\text{アルミ素線の加熱前引張強さ})} \right] \times 100 (\%) \cdots \cdots (1)$$

加熱温度は強度低下率の差を顕著とするため、ACSR としては高温領域となる140℃一定であり、鋼線まで含めた ACSR 全体による引張強さの試験結果から6節の(5)式を用いて算出したアルミ素線の軟化特性と比較すると、加熱後により戻す方法が実態をよく反映できることがわかる。両者で差が生じる理由は、素線をより戻すことにより、わずかながら加工が加わるため格子欠陥（転位）が導入され、加熱前により戻しを行った場合、この新たに導入された転位が加熱後の引張強さに影響を及ぼすためと思われる。

したがって、本論文では ACSR 電線のアルミ素線に対する軟化特性評価は、全て加熱後により戻す方法により評価する。

3. 通電熱履歴を受けていないアルミ素線の軟化特性

図1. アルミ素線(4.0mmφ)のより戻し時期と軟化特性の関係

Fig. 1 Influence of timing of re-twisting on annealing characteristics of aluminum strand.

図2. 太径アルミ素線(4.0mmφ)の軟化特性(通電履歴なし)

Fig. 2 Annealing characteristics of large-diameter aluminum strand (4.0 mm dia, New)

図 3. 太径アルミ素線(4.0mmφ) 5本の軟化特性の分布
(通電履歴なし, 120°C)

Fig. 3 Annealing characteristic of five large-diameter aluminum strand (4.0 mm dia, New) at 120°C

図 4. 細径アルミ素線(2.6mmφ)の軟化特性
(通電履歴なし)

Fig. 4 Annealing characteristic of small-diameter aluminum strands (2.6 mm dia, New)

通電熱履歴を受けた、いわゆる経年電線から抜き取ったアルミ素線の軟化特性と対比するため、先ず通電熱履歴を受けていない新しいアルミ素線の軟化特性を再確認する。新しいアルミ素線は、電線としてより込み前のものが入手できるので、より込み前素線に対する軟化特性を再確認するが、比較のために通電熱履歴を受けていない新しい電線から抜き取った素線を加熱後により戻したものの特性も調べる。

図 2 は、素線径の大きい ACSR330mm² のアルミ素線(4.0 mmφ)を100~180°Cの一定温度で加熱した場合の加熱時間と強度低下率の関係を示している。ここに強度低下率は、(1)式で定義するが、通電熱履歴を受けた経年電線のアルミ素線と通電熱履歴を受けていない新しいアルミ素線で

図 5. アルミ素線(3.8mmφ)の軟化特性
(通電熱履歴有)

Fig. 5 Annealing characteristics of aluminum strand (3.8 mm dia, Aged)

は、「アルミ素線の加熱前引張強さ」が同じでないことに注意しなければならない。

図 2 の各プロットは、それぞれ 5 本の素線の平均値であるが、どの程度、強度低下率がばらつくかを示すために図 3 に120°Cに対する 5 本の全データを参考に示す。図 2、図 3 の強度低下率を算出する際の基となる「アルミ素線の加熱前引張強さ」も、5 本の素線に対する平均値であるが、これらのばらつきも加熱後と同様である。

図 3 によれば、各素線のばらつきは少ない。したがって平均値により正確な軟化特性を評価できる。また、図 2 には、新しい電線から抜き取ったアルミ素線を加熱後により戻した場合の軟化特性も併記している。この結果によれば、より込み前の素線の特性とほとんど変わらないことから、新しい電線の軟化特性は、より込み前のアルミ素線を用いて評価できる。

図 4 は、素線径の小さい ACSR160mm² のアルミ素線(2.6 mmφ)を100°C~180°Cの一定温度で加熱した場合の加熱時間と強度低下率の関係を示す。図 2 と同様、5 本の素線に対する平均値であり、軟化特性のばらつきも図 3 と同様の傾向にある。図 2 と図 4 を比較すると熱履歴が同じでも細径素線の強度低下率の方が若干大きいことがわかる。この理由は従来から指摘されているように³⁾ ⁴⁾ 冷間加工による伸線工程が多くなるほど格子欠陥の発生が増大するためである。

4. 通電熱履歴を受けたアルミ素線の軟化特性

まず、図 5 に通電熱履歴を受けた経年電線から抜き取ったアルミ素線に対する軟化特性検証結果(120°C)を示す。素線径により軟化特性が異なるので、ここでは ACSR610mm² のアルミ素線(3.8mmφ)に対する軟化特性を使用年数30年の素線と25年の素線の両者を対比している。図 5 の

強度低下率は(1)式の定義に基づいているが、過去の熱履歴が不明のため、このままでは両者が同一の軟化特性に従うものであるか否かはわからない。

アルミ素線の軟化特性がアレニウスプロットにより统一的に論じられるならば、新しいアルミ素線と経年素線とは、何らかの操作によってその特性が一致する必要がある。図6には、熱履歴素線の熱履歴前の引張強さが新しいアルミ素線と同じであったと仮定して、経年素線の強度低下率を(2)式により算出し直して、新しいアルミ素線の軟化特性

$$\begin{aligned} & \text{(経年アルミ素線の強度低下率)} = \\ & \left[1 - \frac{\text{(経年アルミ素線の加熱後引張強さ)}}{\text{(新しいアルミ素線の加熱前引張強さ)}} \right] \times 100 (\%) \dots (2) \end{aligned}$$

とプロットの傾きが一致する等価的な加熱時間Hを(3)式により求めて対比したものである。

図6. 通電熱履歴の有無による軟化特性の比較
(3.8 mm φアルミ素線)

Fig. 6 Annealing characteristics of aged aluminum strand and new one (3.8 mm dia)

図7. 通電熱履歴の有無による軟化特性の比較
(4.0 mm φアルミ素線)

Fig. 7 Annealing characteristics of aged aluminum strand and new one (4.0 mm dia)

$$\begin{aligned} & \frac{\text{(新しいアルミ素線の強度低下率)}}{\log(\text{新しいアルミ素線の加熱時間})} = \\ & \frac{\text{(経年アルミ素線の強度低下率)}}{\log(H + \text{経年素線の加熱時間})} \dots (3) \end{aligned}$$

図6によれば、使用年数25年の素線は120℃における等価的な加熱時間Hを5時間とすると、ほぼ新しい素線の軟化特性に一致するが、使用年数30年の素線はHが正の実数の範囲で最も一致する場合(H=160時間)でも新しい素線の特性とは一致しないことが示される。

同様に、図7は、図1で示した比較的新しい経年素線(ACSR330mm² 使用年数13年)の軟化特性(120℃)に対して、図2で示した新しいアルミ素線の軟化特性から、(3)式により等価加熱時間(H=160時間)を求めて、重ね合わせたものである。図6で示した使用年数25年の素線と同様、新しい素線の軟化特性と概ね一致することから(3)式の考え方でほぼ説明できることを示している。

表1. JIS H 2110「電気用アルミニウム地金」の成分値
(重量比率%)

Table 1 Components of JIS H 2110 (electric-grade aluminum)(weight percents)

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Ti+V
99.65 以上	0.10 以下	0.25 以下	0.005 以下	0.005 以下	0.005 以下

5. 製造方式と軟化特性の関係

図6に示した通り、経年電線において軟化特性が異なる原因を論ずる。ACSRのアルミ素線の成分は1950年より表1に示すJIS H 2110にて定められており、同成分構成にこれまでほとんど変化がないことから、軟化特性の違いが成分構成によるものでないことは明らかである。

一方、アルミ素線の製造方式は、電線メーカーにより導入時期の違いはあるが、ほとんどのメーカーが昭和42年頃を境にワイヤーバー圧延方式(以下WB方式と呼ぶ)から現製法である連続鋳造圧延方式(以下CC方式と呼ぶ)に変わっている。旧製法であるWB方式は、アルミ溶湯を鋳造により所定の大きさのアルミビレット(ワイヤーバー)へと成型した後、これを熱間圧延することによりアルミ素線へと仕上げていくものである。

CC方式では、アルミニウム溶湯を直接小断面の鋳塊に連続鋳造し、鋳塊を冷却することなくそのまま連続圧延機にかけて熱間圧延することで、1工程でアルミ素線を製造する。図8に両者の製造工程を示す。

WB方式では、一旦、アルミビレット(鋳塊)を製造した後、圧延加工前に再加熱処理されるため、Feなどの不純物元素がAl-Feの金属間化合物相などとして、析出した状態となる。それに対してCC方式では、再加熱工程がなく、不純物元素が固溶した状態でそのまま熱間圧延されるため、金属間化合物の析出が抑制され、軟化が起こり難い

と推定される。

< WB 方式の製造方法 >

< CC 方式の製造方法 >

図 8. アルミ素線の製造工程比較

Fig. 8 Manufacturing process of aluminum strands (WB process and CC process)

製造方式による軟化特性の違いを明らかにするため、今回、WB 方式を再現したアルミ素線を試作し、CC 方式との軟化特性を対比した。

<5・1> WB 方式によるアルミ素線の軟化特性 図 9 は、WB 方式により製造した新しいアルミ素線の軟化特性 (120℃) を示している。これに図 5 に示した使用年数 30 年の経年素線の等価加熱時間 H を求め ($H=30$ 時間) 重ねるとほぼ一致することが示される。このことから図 6 における経年素線相互の軟化特性の違いは、アルミ素線の製造方式の違いに起因すると結論できる。

図 10 は、WB 方式と現行の CC 方式による新しいアルミ線の軟化特性 (120℃) をまとめたものであり、CC 方式の方が素線の軟化が進みにくく、かつ素線径による特性の違いも少ないことがわかる。

<5・2> 製造方法の判別方法 製造方式の違いによりアルミ素線の軟化特性が大きく異なることが判明した。このため、既設送電線の通電電流上げ検討にあたっては、当該電線の製造方法を簡易に判別する方法が必要となる。図 11 は、WB 方式と CC 方式で製造したより込み前の新しい

図 9. WB 方式による軟化特性比較 (3.8mm φ)

Fig. 9 Annealing characteristics of aluminum strand manufactured with WB process (3.8 mm dia)

アルミ素線 (3.2mm φ) の 1 時間軟化特性を示したものである。明らかに強度低下率、伸び性能とも両者で大きく異なっている。

同図に、製造時期などから WB 方式によって製造されたことが判明している撤去電線 (ACSR240mm²) のアルミ素線 (3.2mm φ) の 1 時間軟化特性を重ねると、この方法により撤去電線の製造方法の判別が可能であることがわかる。

6. ACSRとしての軟化特性

以上は、試験の容易なアルミ素線に対する軟化特性について述べてきたが、送電線に流すことのできる通電電流の上限値を論ずるためには、鋼線まで含めた ACSR 全体としての軟化特性を明らかにしなければならない。

このため、電線全体としてのサンプルを加熱し、その軟化特性を検証しているが、電線全体に対する検証実験は数量的に限界があるのでアルミ素線の軟化特性から ACSR としての軟化特性を導くことを主眼とする。

<6・1> アルミ素線と ACSR の強度に関する関係 従来、ACSR の引張強度は、アルミ素線の引張強さと鋼素線の引張強さの総和として評価している。すなわち、ACSR の規格強度 F は次式により求めている^{5) 6)}。

$$F = 0.9(f_a \cdot n_a + f_s \cdot n_s) \quad (4)$$

ここに、 f_a , f_s はそれぞれアルミ素線、鋼素線の最小引張強さであり、 n_a , n_s は ACSR 電線におけるアルミ素線、鋼素線の本数である。

鋼素線は ACSR の運用温度の上限と目される 200℃ 前後までは軟化しないので⁷⁾、アルミ素線のみが軟化するとして ACSR としての強度低下率を求めれば、 F , f_a を軟化後の ACSR ならびにアルミ素線の引張強さとして次式が

図 10. WB 方式と CC 方式の軟化特性の比較

Fig. 10 Annealing characteristics of aluminium strand manufactured with WB process and CC process

図 1.1. WB方式の違いによる1時間軟化特性

Fig. 1.1 One-hour annealing characteristics of aluminium strand manufactured with WB process and CC process

得られる。

$$1 - F'/F = \frac{(f_a - f_a') \cdot n_a}{f_a \cdot n_a + f_s \cdot n_s}$$

$$= \frac{f_a \cdot n_a}{f_a \cdot n_a + f_s \cdot n_s} (1 - f_a'/f_a) \dots\dots\dots (5)$$

すなわち ACSR の強度低下率はアルミ素線の強度低下率 $(1 - f_a'/f_a)$ がわかれば、それにアルミ部分の強度分担率 $f_a \cdot n_a / (f_a \cdot n_a + f_s \cdot n_s)$ を乗ずることによって算出できる。

〈6.2〉ACSRの軟化特性検証結果 図12は、ACSR330mm²全体の軟化特性検証結果と図2、図7に基づくアルミ素線の軟化特性から(5)式により算出した結果を対比したものである。図12では、実用上の観点から ACSR 全体としての強度低下率を(4)式の定義を用いて $1 - F'/F$ として算出した結果も示してあるが、加熱前の新しい ACSR は規格強度 F より10%前後引張強さが上回るのが普通であるため、 F としてこの加熱前の引張強さ(実力値)を用いる方が実態を正しく把握できる。このため図12では、 F として加熱前の新しい ACSR の引張強さ(実力値)を用いた結果を併記している。この結果によれば実力値を基準とした ACSR 全体としての強度低下率とアルミ素線の強度低下率 $1 - f_a'/f_a$ から(5)式により算出した強度低下率はよく一致することが示される。ただし、ここでの f_a も、アルミ素線の規格強度ではなく、新しいアルミ素線の加熱前の引張強さ(実力値)を用いている。

すなわち、これまで(1)式においてアルミ素線の強度低下率を定義したが、実用的な強度低下率は、図12の結果から

$$(\text{当該アルミ素線の強度低下率}) = \frac{(\text{当該アルミ素線の加熱後引張強さ})}{(\text{新しいアルミ素線の加熱前引張強さ})} \dots\dots\dots (6)$$

図 1.2. ACSR 全体としての軟化特性 (ACSR330mm²)

Fig. 1.2 Annealing characteristics of ACSR (ACSR 330mm²)

図 1.3. 軟化の加法性の検証結果

Fig. 1.3 Correlation between order of heating and final tensile strength

を用いることが推奨される。このとき、ACSR 全体としての強度低下率は(6)式を用いて

$$(\text{ACSR の強度低下率}) = \frac{f_a \cdot n_a}{f_a \cdot n_a + f_s \cdot n_s} (\text{当該アルミ素線の強度低下率}) \dots\dots\dots (7)$$

により評価できる。なお、(7)式が係数 $f_a \cdot n_a / (f_a \cdot n_a + f_s \cdot n_s)$ により結びつけられるということは、右辺の当該アルミ素線の強度低下率として図1以降で取扱ったように試験サンプルの平均値を採用すべきことを示している。

7. 熱履歴の加法性検証

通電加熱に伴う ACSR の強度低下率を評価する場合、加熱温度とその継続時間の任意の組合せに対して軟化特性が一意に決定されないと、通電電流の上限値を決定することはできない。例えば、100℃で400時間加熱後に 140℃で400時間加熱を受けた場合と、140℃400時間加熱後に 100℃で400時間の加熱を受けた場合の ACSR の強度低下率は一致するかという問題である。

図13は、新しい ACSR410mm²のアルミ素線 (4.5mmφ) を100℃で400時間加熱した後、140℃で400時間加熱した場合、および、その逆の順序で加熱した場合の強度低下率の変化を示している。

どちらの順序で加熱した場合も、最終的には、ほぼ同一の強度低下率に到達しており、熱履歴を与える順序によらず、強度低下率は一意に決定されることがわかる。

8. まとめ

送電線の稼働率向上研究の中で中心的な役割を担う ACSR 電線の軟化特性について、経年電線を含めて厳密に評価検証した。とくに、ACSR 電線全体の軟化特性をアルミ素線の軟化特性から正確に推定する方法を明らかにした。結果を以下に要約する。

(1) 経年電線の軟化特性を同電線から抜き取ったアルミ素線を用いて評価する場合、同素線をより戻して加熱するのではなく、加熱後により戻して評価 (引張強さの測定) しなければならない。

(2) ACSR 用のアルミ素線は、製造方式 (WB 方式、CC 方式) の違いにより軟化特性が大きく異なる。

(3) ACSR 電線全体の軟化特性は、アルミ素線の製造方式が同じであれば、経年電線を含めて、新しいアルミ素線 (加熱前) の引張強さと当該電線から抜き取ったアルミ素線の加熱後の引張強さのデータから、ほぼ正確に推定できる。

(4) アルミ素線に複数の熱履歴を与えた際の最終引張強さは、与える順序によらず同じ値となる。

(平成 12 年 8 月 16 日受付, 平成 13 年 7 月 2 日再受付)

参 考 文 献

- (1) 「架空送電線の電流容量」, 電気学会技術第660号 (1997-12)
- (2) 「送電機能向上に関する研究報告 その1 架空送電」, 送電機能研究委員会, 電力中央研究所 (1965)
- (3) 「アルミニウム加工技術便覧」, 日刊工業新聞社 (1970)
- (4) 「アルミニウム技術便覧」, アルミニウム技術便覧編集委員会, 軽金属出版 (1985)
- (5) 「裸線特性値の計算基準」, 日本電線工業会規格 (JCS), 第251号D (1995)
- (6) 「鋼心アルミニウムより線」, 日本工業規格, JISC 31 10 (1994)
- (7) 「大容量電線」, 電気協同研究, 32, No. 1 (1976)

土師 弘敬 (正員) 昭和41年6月17日生。平成2年3月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。同年4月東京電力(株)入社。以降送電設備の建設、保守業務に従事。現在、電力技術研究所 送変電グループ主任。

森川 均 (正員) 昭和39年2月16日生。昭和57年3月三浦高等学校卒業。昭和63年4月住友電気工業(株)入社。以降架空送電の設計に従事。

大橋 資夫 (非会員) 昭和43年6月14日生。平成6年3月東海大学大学院電子工学専攻修了。同年4月古河電気工業(株)入社。以降架空送電線の設計に従事。

長野 宏治 (正員) 昭和38年2月8日生。昭和61年3月千葉大学工学部機械工学科卒業。同年4月日立電線(株)入社。以降架空送電線の設計・開発に従事。

吉川 達治 (非会員) 昭和46年7月15日生。平成6年3月九州工業大学工学部電気工学科卒業。同年4月(株)フジクラ入社。以降架空送電線の設計に従事。

伊藤 剛 (非会員) 昭和44年1月28日生。平成5年3月佐賀大学大学院電気工学専攻修了。同年4月昭和電線電纜(株)入社。以降架空送電の設計に従事。

片岡謙太郎 (非会員) 昭和49年2月9日生。平成9年3月千葉工業大学工学部金属工学科卒業。同年4月(株)三菱電線工業(株)入社。以降架空送電線の設計に従事。