

アルミ電線端子圧着部の冷熱衝撃劣化現象

The Gradation Phenomenon of the Aluminum Wire Crimp Terminal in the Thermal Shock Test

阿部久太郎*
Kyutaro Abe

須齋京太*²
Kyota Susai

概要 車載アルミ電線に関し、冷熱衝撃繰返しサイクル時のアルミ電線特有である、端子圧着部劣化現象の劣化メカニズムを解明することを目的とした。先ず劣化要因が電気接点の応力緩和と接点酸化によるものであるとの仮説を立て、次にその仮説に対し実験及び解析による検証をおこなった。その結果繰返しサイクルの初期では接点酸化により急激に劣化し、その後は応力緩和による接圧低下及び接圧が低下した接点の新たな酸化により緩やかに劣化すると結論を得た。また長期劣化予測をおこない、車載環境でも十分な接続信頼性が得られることを確認した。

1. はじめに

近年の地球環境意識の高まりから、自動車には車両軽量化による燃費向上が求められている。一方、電装品間を接続するワイヤーハーネスは、安全性、快適性、利便性の向上による多機能、高性能化により重量増加の一途を辿っている。そこでワイヤーハーネス総重量の約60%を占める銅電線を、軽量のアルミ電線へ置換える開発が進められているが、車載のアルミ電線化には機械強度、腐食性、接続信頼性などの課題が多く存在し、それらがアルミ電線化の障壁となっている。

そこで我々は車載の厳しい温度環境下での信頼性確保が重要であると考え、アルミ電線の接続信頼性に着目した。図1に端子圧着部抵抗値Rの測定方法と端子圧着部断面形状、図2に低温側-40℃、高温側120℃の繰返し冷熱衝撃中における銅電線及びアルミ電線の端子圧着部コンダクタンス値1/R(抵抗値Rの逆数)と繰返しサイクル数の関係を示す。なお、端子は共通で材質は銅合金、表面すずメッキである。

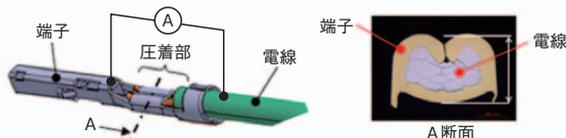


図1 端子圧着部抵抗値測定方法と圧着部断面図
The resistance measurement method and cross section of the crimp terminal.

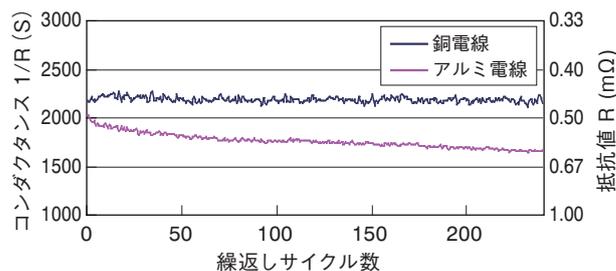


図2 冷熱衝撃中の端子圧着部コンダクタンス
Conductance of the crimp terminal in the thermal shock test.

図2より、銅電線とアルミ電線で繰返しサイクル数が増す毎に劣化様相が異なることが確認できた。銅線はコンダクタンス値の低下がほとんどなく安定しているが、アルミ電線はサイクル初期に急激に下がり、その後は徐々に劣化が進行する様子が見られる。この銅電線とは異なったアルミ電線特有である端子圧着部劣化現象メカニズムについて解明することを目的とした。

2. 微小抵抗値測定系の構築

端子圧着部抵抗値の微小な変化を測定するためには、高精度な抵抗値測定系の構築が必須である。表1に測定系に要求される仕様とその理由について示す。

* 研究開発本部 自動車電装技術研究所

*² 研究開発本部 メタル総合研究所

表1 測定器の要求仕様と理由
Requirements and reasons for the measuring equipment.

要求仕様1	測定電流は1 mA 以下であること
要求理由1	測定電流が10 mA 以上の場合、端子圧着部に存在する酸化膜が破壊され、その存在による影響が見られなくなるため
要求仕様2	抵抗測定精度は0.01 mΩ以下であること
要求理由2	端子圧着部の抵抗値変化は0.1 mΩ程度であり、その挙動を観察するため
要求仕様3	複数サンプルの抵抗値を長期間連続サンプリングすることが可能なこと
要求理由3	繰り返し冷熱衝撃試験を長期間実施するため

1 mAにて0.01 mΩの測定精度を得るためには10 nVの測定ができる電圧計を必要とする。また通電時に発生する熱起電力を排除するため電源はパルス電流式を用い、測定方式は四端子法とした。複数サンプルの長期連続モニタリングについては、チャンネル切替器を用いて、連続測定できるようにプログラムを組むことにした。以上から測定系の構成を図3に示す。

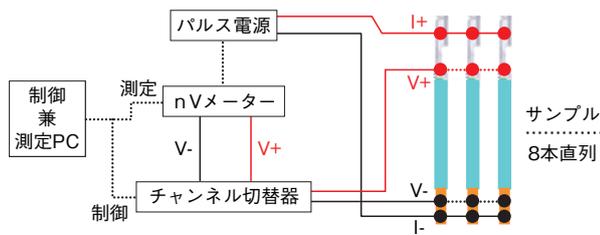


図3 微小抵抗値測定器の構成
The small resistance measuring instrument.

以上の測定器構成にて、1 mAのパルス電流を流したときの抵抗値の結果を図4に示す。図4より、最大誤差が±0.007 mΩであり、測定器に求められる±0.01 mΩ以下の測定精度にて計測が可能となった。また、8サンプルについて、チャンネル切替器にて3ヶ月の連続運転を確認した。

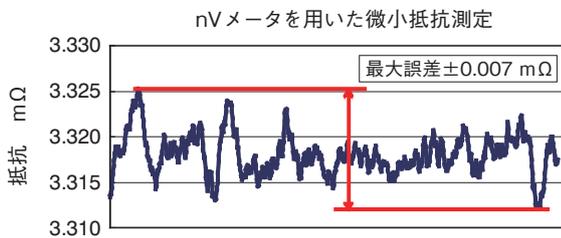


図4 抵抗測定値
The resistance measurement result.

3. 劣化要因の推定と検証

図2に示した繰り返し冷熱衝撃中におけるアルミ電線特有の劣化現象について、劣化を引き起こす要因の推定をおこなった結果を表2に示す。

表2 劣化要因の推定
The estimated degradation factors.

劣化要因	推定
塑性ひずみ疲労	端子とアルミ電線の接点が塑性ひずみの蓄積による疲労破壊で劣化する
応力緩和	高温放置時のアルミ電線の応力緩和による接圧低下で劣化する
接点酸化	端子とアルミ電線の線膨張差により接点が露出し、絶縁酸化膜が形成されることで接点導通がなくなり劣化する

3.1 塑性ひずみ疲労による劣化の検証

端子と電線の接点について、一般に金属同士の接触は互いの突起した部分が点で接触する。繰り返し冷熱衝撃中の接点の様子をモデル化したものを図5に示す。接点では膨張収縮により低温側では接圧が低下し、高温側では接圧が上昇する繰り返しの力を受けることで、塑性ひずみが蓄積して接点が破壊に至ると推定した。

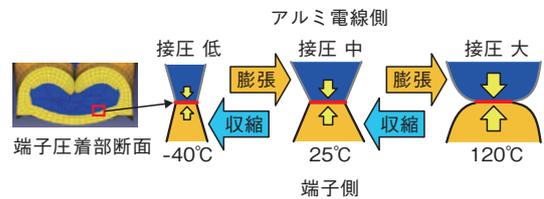


図5 冷熱衝撃中の接点
The metal contact in the thermal shock test.

冷熱衝撃中のアルミ電線塑性ひずみの状態を、FEM解析を用いて求めた。端子圧着部のアルミ電線3次元モデルと塑性ひずみ計算ポイントを図6に、常温25°Cにおける塑性ひずみ分布を図7に、各計算ポイントの塑性ひずみと温度の関係を図8に示す。

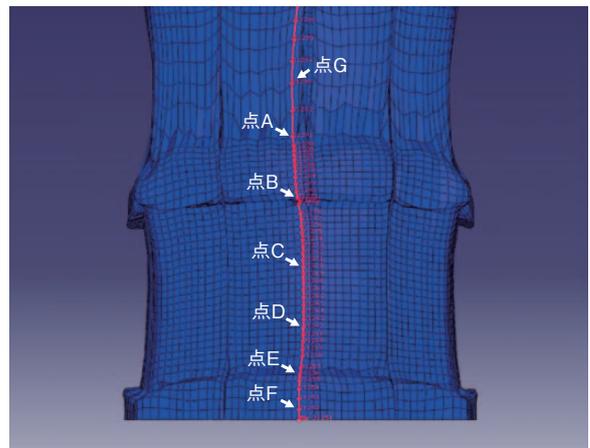


図6 アルミ電線の3次元モデル
The 3D model of the aluminum wire.

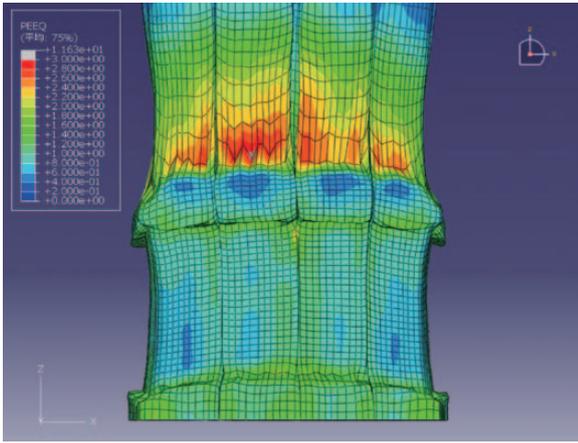


図7 塑性ひずみ分布図
The distribution diagram of the plastic strain.

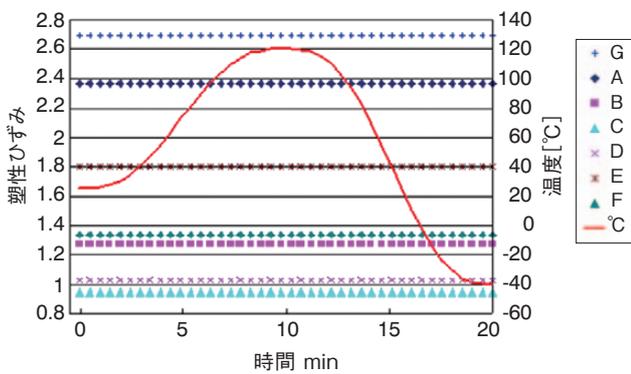


図8 塑性ひずみと温度の関係
The plastic strain vs. Temperature.

図6は7本の素線を束ねた電線モデルであり、点AB間、点EF間の節のような部分は、図9に示すように電線抜け防止のために設けられた端子側のセレーションにより、電線側に形成されたものである。

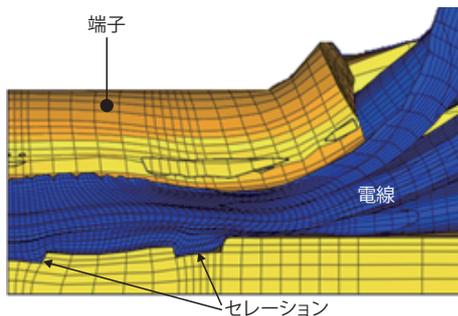


図9 セレーション
Serrations.

図7からアルミ電線の塑性ひずみはセレーション外側の点A, Gにて大きな値となっている。これは電線が圧着時に大きく外側に伸ばされるためであり、内側はセレーションが電線の伸びを抑制するためひずみが小さくなったと考えられる。また、図8に示すように常温25℃から、高温120℃、低温-40℃と変

化させたが、各計算ポイントの塑性ひずみに変化は見られなかった。更に温度変化を繰り返しておこなったが変化がなく、すべて弾性域内での変化のみであった。これより塑性ひずみの蓄積による接点の疲労破壊の可能性は低いといえる。

3.2 応力緩和による劣化の検証

端子と電線の接点には、常に接圧が働いていることで電気的な接続を得ているが、一般に高温にさらされるほど時間とともに応力の緩和が起こる。そこでアルミ電線の応力緩和について応力依存性の関係式であるNorton則を適用し、放置温度別に、経過時間と応力緩和率の関係を求めた。Norton則は次式で表され、結果を図10に示す。

$$\epsilon_c = A \cdot \sigma^n \quad (1)$$

ϵ_c : 相当クリープひずみ速度

A, n : 材料定数

σ : 相当応力

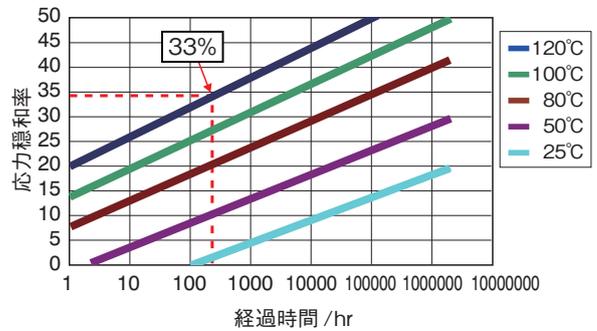


図10 応力緩和率
The stress-relaxation rate.

次に接点では接圧が増加すると接触面も増加し、この状態においてコンダクタンス値は、ポアソンの空間電荷を与える式の境界問題として解け、次式で表される。

$$C_c = 2r / \rho \quad (2)$$

C_c : 接点のコンダクタンス値

ρ : 接触部金属の抵抗率

r : 接点を真円とした場合の半径

ただし、これは接点が清浄面での接触であり、酸化皮膜を介している接点のコンダクタンス値は次式で表される。

$$C_f = \pi a^2 / \rho_f d \quad (3)$$

C_f : 酸化皮膜を介した接点のコンダクタンス値

ρ_f : 酸化皮膜の抵抗率

a : 酸化膜を介した接点を真円とした場合の半径

d : 酸化皮膜の厚さ

よって端子圧着部の総コンダクタンス値は式(2), (3)の総和になる¹⁾が、アルミニウムの酸化皮膜は絶縁性であり抵抗率が大きいため、酸化皮膜を介した接点のコンダクタンス値はほ

は0となる。よって清浄面での接点のみを考慮すればよい。また、一般的に接点は接圧が増加すると弾性変形から弾塑性変形、塑性変形と変化する。このとき接点の半径は次式で表される。²⁾

$$r = [F / (n \xi \pi H)]^{1/2} \quad (4)$$

F : 接点にかかる荷重

n : 接点の数

ξ : 係数, < 0.3 弾性, $0.3 \sim 0.75$ 弾塑性, $0.75 <$ 塑性

H : ビッカース硬度

式(2), (4)より接点のコンダクタンス値 C_c は接点にかかる荷重 F の平方根と比例関係にある。ここで120℃にて120時間放置した場合、図10より約33%の応力緩和があり、残存応力は初期の67%となる。コンダクタンス値については荷重の平方根に比例するため、67%の平方根である80%のコンダクタンス値の残存が予想される。これを確認するため120℃, 120時間放置にて初期と放置後のコンダクタンス値を測定した高温放置試験の結果を図11に示す。

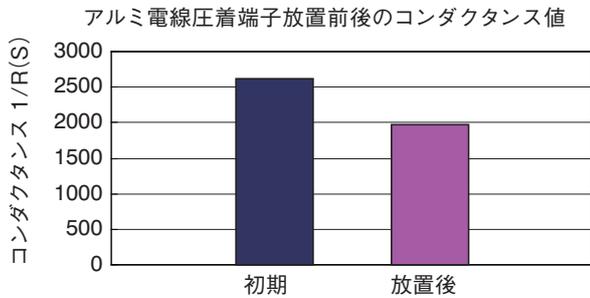


図11 高温放置試験結果
The heat exposure test result.

図11より初期コンダクタンス値2600 Sに対し放置後は2000 Sとなり、約77%のコンダクタンス値が残存している。これは前述の80%残存の予測値とほぼ合致する。したがって、高温放置によるアルミ電線の接圧の低下で劣化が起こり、それはNorton則の応力緩和に従うといえる。

3.3 接点酸化による劣化の検証

初期は清浄面で接触していても、繰返し冷熱衝撃時の膨張収縮により、図12に示すような挙動にて接点が酸化するケースが考えられる。

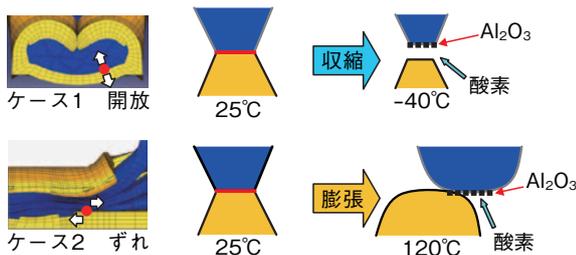


図12 接点酸化の挙動
Oxidation behavior of the contact.

ケース1では低温時の収縮により接点が開放され、アルミ電線側の清浄面が直ちに酸化、絶縁されると考えられる。ケース2では銅合金端子とアルミ電線の高温時の線膨張係数差により、伸びに差が生じて、ずれることで接点が露出して酸化、絶縁されると考えられる。そこで酸素が存在しなければ接点が酸化されることがなく劣化が起きないと推定される。酸化による影響を確認するために10 Pa程度の低真空状態にて繰返し冷熱衝撃を与えることが可能な低真空チャンバーを製作した。低真空チャンバーの外観を図13に、配管系統図を図14に示す。

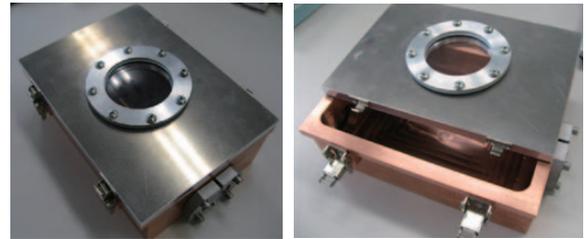


図13 低真空チャンバー
The low vacuum chamber.

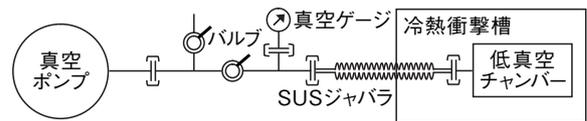


図14 配管系統図
The piping system diagram.

図13の低真空チャンバー内部にサンプルを入れ、真空ポンプで常時排気にて繰返し冷熱衝撃を与えて試験をおこなった。比較のために通常大気状態での評価もおこなった。また、3,2項の高温放置と酸素有無の影響を確認するために、120℃, 120時間放置もおこなった。結果を図15に示す。なおチャンバー内部の真空度は1~100 Paであり、酸素濃度は大気の1/100000~1/1000となるため、酸素の有無の影響を確認するのに十分である。

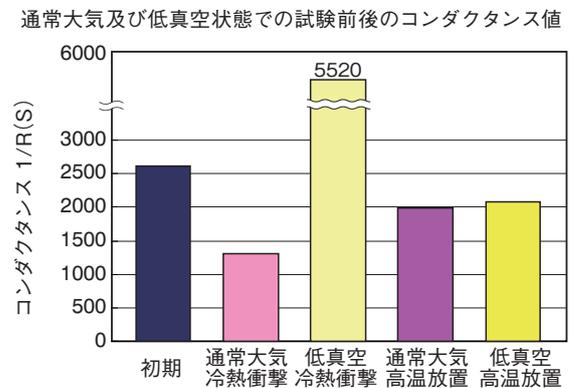


図15 冷熱衝撃, 高温放置試験結果
The thermal shock test and the heat exposure test results.

図15より冷熱衝撃において、通常大気と低真空中で大きな差があり、酸化の有無による影響が明確に見られた。ただし低真空中では初期よりもコンダクタンス値が上昇している。これは膨張収縮の繰返しで酸化膜が磨耗することで破壊され、清浄な接点が生じたと考えられる。通常大気でもこの現象はおきているが、直ちに酸化されるためコンダクタンス値の上昇はなく、低真空という特殊な環境下でのみの現象と考えられる。一方、高温放置においては、通常大気と低真空の差はほとんど見られなかった。これは高温放置試験が定温試験であり、線膨張収縮による接点の開放、ずれがないことから、酸化による影響がないことによる。

接点の開放及びずれは、すべての接点で起こるわけではなく、十分に接圧が大きい接点であれば開放、ずれが生じることなく接続を維持できる。そこで開放、ずれが発生する接点の条件について検証をおこなった。図16に端子接続部の横方向と長手方向の断面モデルを示す。

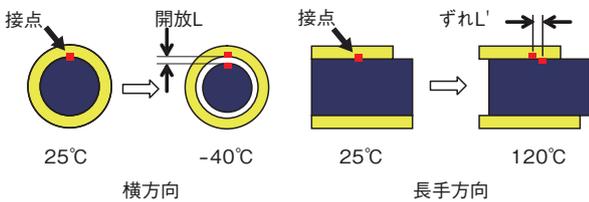


図16 断面モデル
The cross sectional models.

横方向では常温25°Cから低温-40°Cになるときに最も開放が大きくなる。開放Lは以下の式で計算され、0.17 μmとなる。

$$L = (\alpha_0 - \alpha_1) \cdot \varphi \cdot \Delta T / 2 = 0.17 \mu\text{m} \quad (5)$$

α_0 : アルミの線膨張係数 $23 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
 α_1 : 銅の線膨張係数 $17.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
 φ : アルミ線直径 1 mm
 ΔT : 温度変化 25 - (-40) = 65°C

ここで接点は様々な接圧(応力)とひずみがかかった状態で存在しており、常温25°Cで接点に働いている接圧による弾性ひずみ分が、線膨張係数差から生じる開放Lより小さいときに接点は開放される。図17にアルミの応力-ひずみ線図と常温での様々な接点状態の例を示す。図17の赤帯領域内で接圧13 MPa以下の2つの接点は、弾性ひずみが0.17 μmより小さいので開放されることになる。

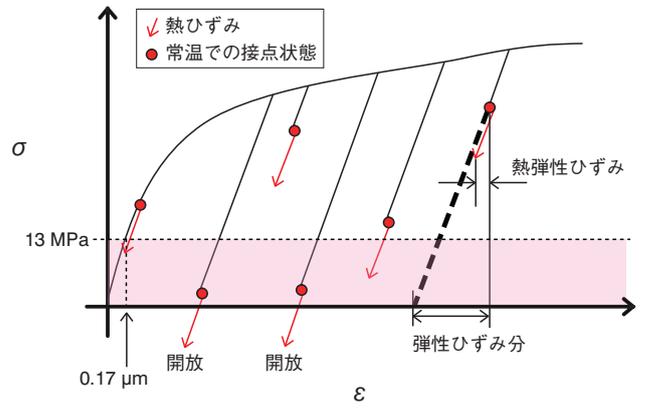


図17 アルミの応力-ひずみ線図
The stress-strain diagram of the aluminum.

次に長手方向においては、高温120°Cで最もずれが大きくなる。高温120°C時の長手方向位置と端子と電線のずれ量についてFEM解析をおこなった結果を図18に示す。

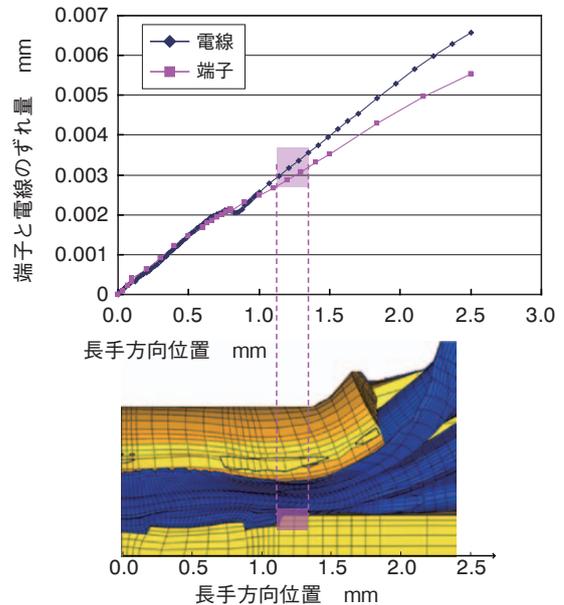


図18 端子と電線のずれ
The slide in the contact surface between the terminal and the wire.

図18の桃色の部分は接点が集まっている箇所であり、ここでは平均0.3 μmのずれが生じている。ここで接点には

$$\tau = G \cdot \gamma = 8.1 \text{ MPa} \quad (6)$$

G : アルミの弾性係数 27 GPa
 γ : せん断ひずみ 0.3 μ

のせん断応力が働いており、接点に働いている接圧を σ とした場合、端子と電線間の摩擦係数を0.3と仮定すると

$$\sigma \times 0.3 < \tau \quad (7)$$

$$\sigma < 27 \text{ MPa}$$

となり、接点に働く接圧が27 MPa以下の場合、高温時の線膨張差によるずれにより、接点が露出されることになる。

以上より、常温25℃にて接点の接圧が13 MPa以下の接点は開放により、27 MPa以下の接点はズレにより露出、酸化されることで劣化が起これるといえる。

4. 考察

前項の仮説と検証の結果から、アルミ電線圧着部の冷熱衝撃劣化現象は塑性ひずみ疲労によるものではなく、応力緩和による接点にかかる接圧の低下と、繰返し熱衝撃による接点酸化によるものであるということが導き出された。

4.1 劣化現象のメカニズム

図2のアルミ電線端子圧着部劣化現象のメカニズムについて、次のように説明できる。繰返しサイクル初期においては、銅合金端子とアルミ電線の線膨張収縮差により、接圧の小さい接点に開放及びずれが生じ接点が露出する。アルミは易酸化性で直ちに酸化され、その酸化物は絶縁性であるため劣化が急激に起こる。その後は応力緩和による接圧の減少が主であり、図10に示すように応力緩和率は時間と対数関係にあるため、高温に曝露される時間経過とともに劣化は緩やかに進行する。

一方、銅電線は酸化膜が非絶縁性であり応力緩和率も小さいため酸化による急激な劣化は無く、長期間安定した接点を保持する。

4.2 長期劣化予測

アルミ電線長期劣化について、これまでの検証結果を参考に予測をおこなった。条件としては10年後を想定し、80℃、10000時間放置、初期コンダクタンス値2500 Sとした。結果を図19に示す。

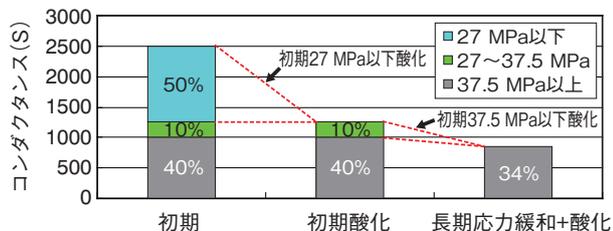


図19 長期劣化予測
The estimated long-term degradation.

まず応力緩和率について、図10より28% (残存72%)となる。また、10000時間後に応力緩和にて27 MPa以下となる初期応力は37.5 MPa (= 27 MPa ÷ 72%)となる。初期応力が37.5 MPa以下の接点は、10000時間後には酸化により劣化する。次にアルミ電線の初期応力分布図を図20に示す。

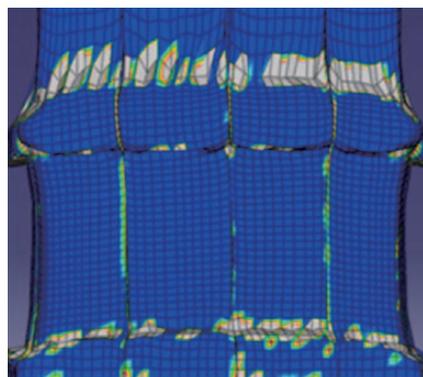


図20 初期応力分布
The initial stress distribution.

図20より、37.5 MPa以下 (灰色以外)の接点の面積は全接点の約60%を占めるため、10000時間後に残存する接点の面積は約40%となる。以上より、コンダクタンス値は応力の平方根及び接点の面積に比例するため10年後相当において、850 S (= 2500 S × 40% × 72^{1/2}%)のコンダクタンス値残存が予測され、十分な接続性を維持していることを確認できた。

5. おわりに

車載へのアルミ電線化に対しての懸念点を払拭するために、これまで体系だてて解明されていなかったアルミ電線端子圧着部の劣化メカニズムの解明をおこなった。

接圧の低い接点は温度変化にともなう膨張収縮と、端子と電線の線膨張係数差から生じる開放、ずれにより、その清浄面が酸化され、その酸化膜が絶縁性であるため直ちに劣化が進行する。接圧の高い接点は開放、ずれが生じないので酸化されないが、高温時における応力緩和により接圧が下がることで、同様に開放、ずれが生じて直ちに酸化されて劣化する。またコンダクタンス値は接圧の平方根に比例するため、高温時における応力緩和による接圧低下自体でも、徐々にではあるが劣化が進行することが判明した。

なお、本論文は2011年電子情報通信学会総合大会において発表した内容³⁾を含む。

参考文献

- 1) R.Holm: "Electrical contacts theory and application", Springer Verlag, Berlin, (1967).
- 2) 玉井輝雄: "電気接点表面と接触のメカニズム", 表面技術, 表面技術協会, 55-12 (2004), 852.
- 3) 阿部久太郎, 須齋京太: "アルミ電線圧着端子部の冷熱衝撃劣化現象", 2011 総合大会講演論文集, 電子情報通信学会, (2011), C-5-2.