

アルミハーネス

Aluminum Wiring Harness

西村 直也*

Naoya Nishimura

草刈 美里

Misato Kusakari

大塚 拓次

Takuji Otsuka

赤祖父 保広

Yasuhiro Akasofu

今里 文敏

Fumitoshi Imasato

佐々木 暁人

Akihito Sasaki

近年自動車のCO₂削減要求が益々厳しくなり、ワイヤーハーネスの軽量化が切望されている。通常の銅電線の代わりにアルミ電線を使うことで高い軽量化効果が得られるが、低い導電率と引張強さ、加工性、強固な絶縁性酸化被膜、電食腐食が懸念点としてあげられる。この懸念点を払拭するため、導電率、引張強さ、加工性を両立させたアルミ合金導体、強固な絶縁性酸化被膜があっても低い接触抵抗と電線保持力を維持できる端子のセレーション構造、端子の電線かしめ部をモールドすることで電食腐食を防ぐ（防食）技術を開発した。本稿では、これらの開発技術について報告する。

As the demand for the reduction of CO₂ emissions from vehicles is ever increasing, lightweight wiring harnesses have been in high demand. Effective weight reduction can be expected by replacing conventional copper electric wires with aluminum electric wires. However, aluminum wires have several drawbacks such as low electrical conductivity, low tensile strength, and poor workability, as well as the thick oxide film on the surface and galvanic corrosion. To solve these problems, we have developed an aluminum alloy conductor with improved electrical conductivity, tensile strength, and workability. We also developed a unique serration terminal structure that maintains low contact resistance and sufficient wire retention force even under a thick oxide layer. We also established an anti-corrosion technology that prevents galvanic corrosion by molding the crimped joint of the terminal. This paper explains respective solutions in detail.

キーワード：アルミ電線、圧着、ワイヤーハーネス、自動車、防食

1. 緒 言

近年益々厳しくなる自動車排出CO₂規制により、軽量化ニーズが更に高まってきた。また銅の価格が高騰してきたこともあり、軽量化と低価格化を狙い電線導体を銅からアルミに置き換えるアルミハーネスの検討を始めることとした⁽¹⁾。

アルミを使った電線は、架空送電線の他に自動車向けではバッテリーケーブルなどがあり、大電流に対応した導体断面積が大きい領域での使用が主であった。我々は、導体断面積2.5mm²以下領域で多く使用されるアルミハーネスを開発し、自動車搭載を実現した図1に示す、電線、端子、防食の開発技術について報告する。

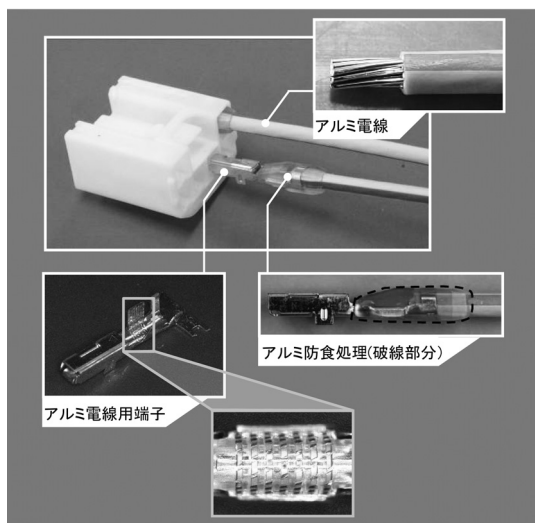


図1 アルミ電線、端子、防食開発

2. 自動車用アルミ電線

自動車用アルミ電線へ適用するアルミ材料には、高い引張強さと高い導電率*1を有することが求められる。

本開発では、従来銅電線で低圧電源線に多用される0.5mm²サイズを、アルミ電線で0.75mm²に置換可能とする材料物性として、引張強さ110MPa、導電率58% IACSを目標とすることとした^{(2)、(3)}。

そこで、当社エレクトロニクス・材料研究所および当社グループの(株)オートネットワーク技術研究所は、自動車電線用アルミ合金の新規開発を行った。

2-1 合金設計

一般的な工業用純アルミ（1060：純度99.6%）は、導電率は62% IACSと高いものの、軟化後の引張強さが70MPaと低い⁽⁴⁾ため、自動車用電線に適用するには合金化による引張強さの向上が必要である。

金属の強化方法の一つである固溶^{*2}は引張強さの向上に有効だが、導電率が著しく低下する。また、ミスフィットひずみ (MS) ^{*3 (5)} が大きい程、引張強さの向上効果が期待できる。

自動車用電線では、導電率の低下を抑えて引張強さを向上させる必要があり、添加元素には固溶量が小さく、MSが大きい元素が有効と考えられる。そこで、第一原理計算^{*4}により算出された、アルミに各種元素を添加した際のMSの値と、常温での最大固溶量について検討した結果より、Feを添加元素として選定した (表1)。

Al-Fe合金について、さらにFe添加量と材料物性の関係を調査した結果、目標性能を満足するには1.5mass%以上のFe添加が必要であることが判った (図2)。

一般的な「ピレット製造+押し出し」法で製造したワイヤーロッドは、粗大なAl-Fe系化合物が晶出^{*5}し、靱性が

表1 アルミに各種元素を添加した際のMSと最大固溶量

元素	MS	最大固溶量 mass%	元素	MS	最大固溶量 mass%
Fe	3.9	0.03	Cu	1.6	2.48
Mn	3.5	0.62	Ti	1.0	0.70
Cr	3.2	0.37	Mg	1.0	18.60
Ni	2.9	0.11	Li	0.7	14.00
Sn	2.2	0.00	Si	0.6	1.50
W	2.0	0.05	Zn	0.4	67.00
Mo	2.0	0.06	Au	0.3	0.60
Pt	1.8	0.00	Ag	0.2	23.50

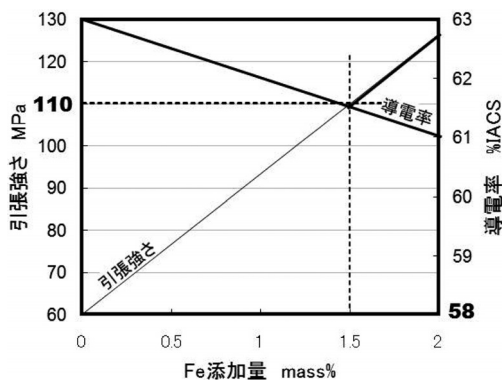


図2 Fe添加量と材料物性の関係



写真1 アルミ素線の断線

低く加工性に乏しい。しかし、当社グループ会社の富山住友電工(株)で製造したワイヤーロッドは、 casting時の冷却速度が高く、再加熱なく圧延を実施するプロペルチ法^{*6}を用いており、化合物を微細な状態に制御でき、合金材料の靱性を高く保つ⁽⁶⁾ため、加工性に優れている。

とはいえ、自動車用電線で用いる素線径は0.15~0.5mmとアルミ線としては非常に細いため、1.2mass%Feを超えると加工性が悪化し、写真1に示すような加工限界による断線が、伸線および撚線にて発生した。

そこで、Feの一部を置換する形で、加工性を阻害せず引張強さを向上できる第二添加元素の探索を行った。

導電率は目標に対して比較的マージンがあるため、ある程度の導電率の低下は許容できることから、第二添加元素としては、加工性低下に影響するMSは小さく、導電率は低下するが、固溶量の大きい元素を選定することとした。

再び表1より各種元素を比較し、Mgが適当であると考え、添加量の最適化を行った。

その結果、Al-1.05mass%Fe-0.15mass%Mgの組成とすることで、加工性と性能を両立でき、目標を上回る引張強さ120MPa、導電率60%IACSの性能を実現した (図3)。

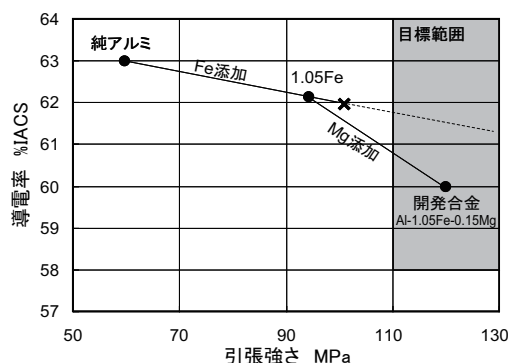


図3 開発合金の成分と性能

2-2 アルミ電線ラインナップ

現状製造可能なアルミ電線のラインナップおよび従来銅電線からの置換え効果を表2に示す。従来銅電線からは、1サイズアップでの置換えが可能となっている。

表2 アルミ電線ラインナップ

銅電線			アルミ電線			
種類	サイズ (mm ²)	単位質量 (g/m)	種類	サイズ (mm ²)	単位質量 (g/m)	軽量効果 (g/m)
CIVUS	0.5	5.4	ALVUS	0.75	3.1	▲2.3
	0.75	7.6		1.25	5.0	▲2.6
AVSS	0.85	10		1.5	5.8	▲4.2
CIVUS	1.25	13.1	ALVSS	2	9.1	▲4.0
AVSS	2	22		2.5	11.7	▲10.3

3. アルミ電線用端子

自動車用ワイヤーハーネスの接続部は、図4に示すように圧着^{*7}により端子と電線を接続した圧着電線を挿入したコネクタにて嵌合する構造が一般的に用いられている。

当社はアルミハーネスを広く展開するために、アルミ電線を圧着で接続できる専用端子を開発した⁽⁷⁾。

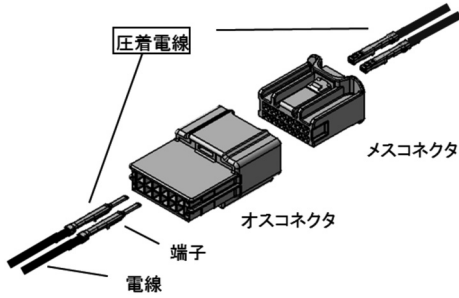


図4 コネクタと圧着電線

3-1 開発課題

圧着とは、図5に示すように被覆を剥いた電線を端子のワイヤバレルと呼ばれるU字型の部位でかしめて接続し、電気接続と電線保持力を確保する工法である。

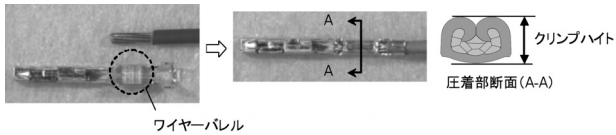


図5 圧着工法

従来の銅電線用端子を用いた銅電線およびアルミ電線の圧着特性を図6に示す。横軸は圧着条件で左側ほど強くかした状態（高圧縮）となる。一般に電気接続性能は高圧縮ほど安定するが、電線保持力は高圧縮すぎると低下する。ハーネス製造時の圧着条件は、両特性が目標値を満足する範囲で設定される。

アルミは銅と異なり表面を強固な絶縁性酸化被膜で覆われているため、銅より強くか締めなければ接続抵抗が安定しない。その結果、電線保持力が低下し両特性を確保できる圧着条件が銅より狭くなる。従って、圧着でアルミ電線の接続を成立させるためには、低圧縮域における接続抵抗または高圧縮域における電線保持力を改善する必要がある。

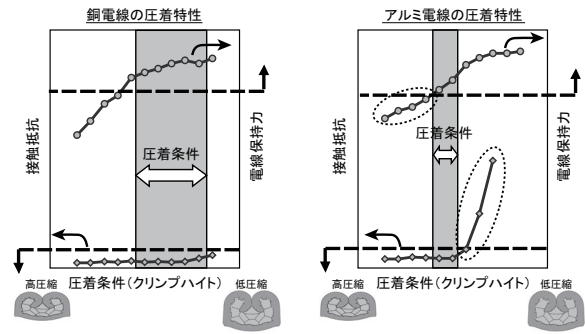


図6 かしめ強さと接続部抵抗、電線保持力

3-2 圧着性能の改善

(1) 電気接続性能の改善

アルミ電線圧着の電気接続性能向上のために、特性要因図から要因を絞り込み、端子のセレーション^{*8}に着目した。セレーションとは端子のワイヤバレルに形成した凹凸で、銅電線用端子では3本の溝形状が一般的である。セレーションがない端子の圧着特性は図7に示すとおり、圧着条件によらず接続抵抗^{*9}が安定しないことから、その効果が確認できた。

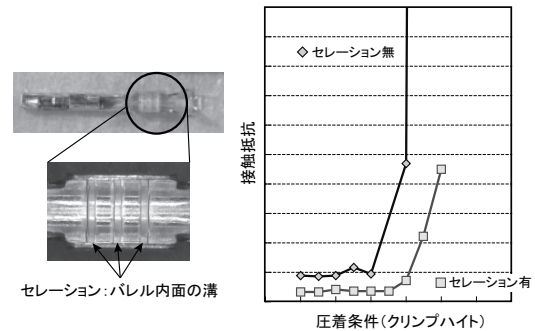


図7 電気接続性能に及ぼすセレーションの効果

また、端子と電線の接続状態を観察するために圧着端子からアルミ電線を取り出し表面を観察したところ、図8に示すとおりセレーションのエッジ部分に端子のめっき材で

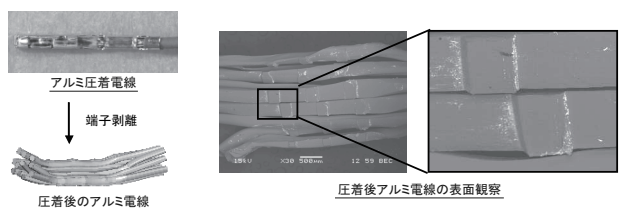


図8 圧着後の電線表面観察

あるスズが凝着していることが確認できた。

さらに、CAEを用いて圧着時に電線が受ける荷重を解析した結果、図9に示すとおりセレーション付近の荷重が特に大きくなることがわかった。このことからセレーション近傍で電線の酸化被膜破壊が促進されると考えた。

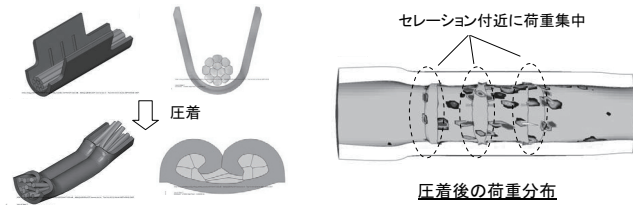


図9 CAEによる圧着シミュレーション

以上より、アルミ電線圧着の接続メカニズムを次のように考えた。アルミ表面の絶縁性酸化被膜は、圧着過程において端子のセレーション部分で電線が大変形を受けることにより破壊される。この部分にさらに荷重がかかり、電線と端子の新生面が結合（アルミ電線にスズが凝着）し電気接続が確保される。従って、この端子と電線の凝着箇所であるセレーションを増やすことを端子開発の指針とした。

(2) 電線保持力の改善

一方、アルミ電線の接続を圧着で成立させるためには、図6に示す圧着特性のなかで高圧縮域での電線保持力を改善することも有効である。

電気接続と同様に特性要因図から検討した結果、電線保持力に関してもセレーションによる改善が可能で、細かな凹凸を広範囲に配置することが有効であることがわかった。

3-3 アルミ電線用圧着端子

図10に開発したアルミ電線用圧着端子を示す。セレーション変更のみで接続性能を確保したもので、①電気接続性能改善のためにセレーション量確保、②電線保持力改善のために細かな凹凸を高範囲に配置を設計要件とし、端子製造や性能マージンを見込んで形状を最適化した。

その圧着特性を図11に示す。電気接続性能と電線保持力が向上し、従来の銅と同等の圧着条件幅が確保できた。また、車載環境を想定した各種耐久評価においても銅と同等の接続信頼性を確保できていることを確認している。

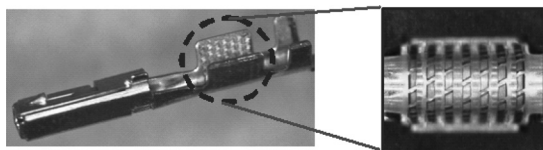


図10 アルミ電線用圧着端子

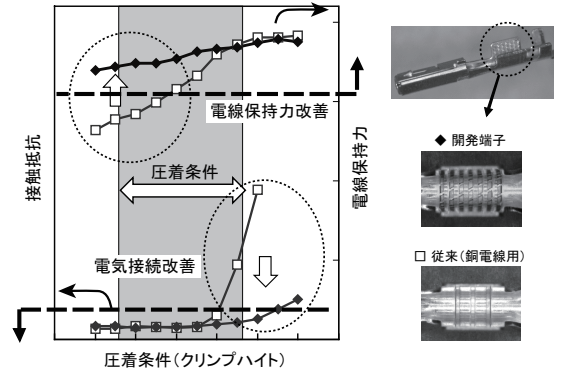


図11 アルミ電線用端子の圧着特性

3-4 まとめ

アルミハーネス開発に向けて、アルミ電線をハーネス製造の汎用工法である圧着で接続できる専用端子を開発した。これは既存の銅と同じハーネス製造工程に適用できる。

また、本端子は銅電線にも適用可能で、銅の接続信頼を向上できる見込みがある。車の高機能化電子化に伴い、接続部品は過酷環境下におかれる場面が想定され、本技術はこれに対応する信頼性向上技術としても有効であると考えられる。

4. 防食技術

4-1 アルミの異種金属接触腐食

自然電極電位が高い銅と低いアルミが接触した部分に食塩水等の電解液が付着した場合に、銅がカソード、アルミがアノードとなる局部電池を形成することで、いわゆる異種金属接触腐食（ガルバニ腐食）が発生し、アルミが激しく溶出することになる（図12）。

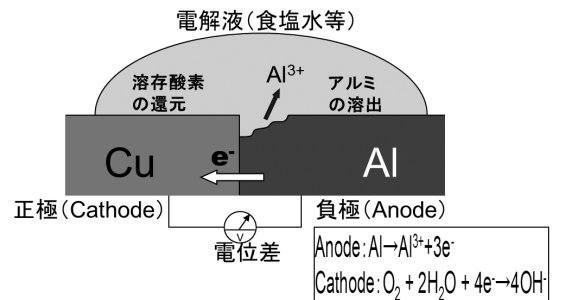


図12 銅とアルミの異種金属接触腐食

4-2 アルミの防食技術

まず、アルミ電線の端子かしめ部に電解液が付着した場合、どのように腐食が進行するのかを確認した。

圧着部に5%塩水を付着させ、高湿高温放置した後の状態を図13に示す。

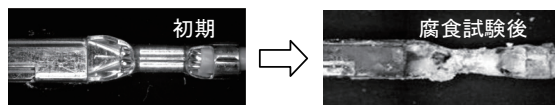


図13 アルミ電線かしめ部の腐食の様子

アルミ導体は完全に溶出しており、僅かな電解液の付着でも容易に腐食が進行することが確認された。

従い、かしめ部には電解液を付着させないことで防食が可能になると考えた。

水分の浸入は、図14に示す経路がある。まずアルミ導体が端子から露出している、経路①ワイヤパレル先端のアルミ導体露出部と経路②パレル間のアルミ導体露出部、次に電線と端子の隙間から浸入してくる経路③がある。

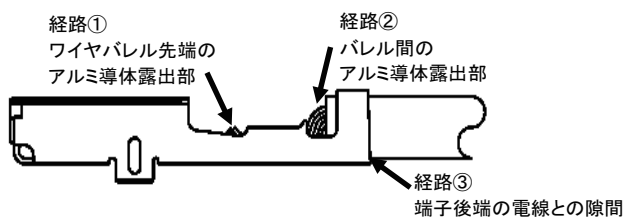


図14 アルミ電線圧着部への水分浸入経路

このため、アルミ導体露出部に加えて端子後端部も隙間なく保護することが必要であると考えた。

このことから、かしめ部を含め端子後端部まで全体を樹脂で覆う防食手法とした。

樹脂材料に関しては、端子との密着性、充填性、耐熱性等の観点から最適化を図り、実際の車載化に向けた耐久試験評価、過酷試験評価を実施。

最終的に図15のようなモールド構造を考案し、アルミの防食技術を確立することができた。



図15 アルミ電線圧着部のモールド構造

5. 結 言

アルミハーネスを車両に搭載するために、電線、端子、防食の技術を開発した。

今後も、銅価格の上昇高止まりの状況が続くと予想され、また、すべての銅電線をアルミ電線にすることで、ワイヤーハーネスは約25%軽量化できることから、益々アルミハーネスの需要が高くなると思われる。

*本論文は、SEIテクニカルレビュー179号 (pp.81-88) 「アルミハーネスの開発」を改訂したものです。

用語集

※1 導電率

電気の流れやすさを示す指標。軟銅（万国軟銅標準：International Annealed Copper Standard）を100とした時の比率で示され、単位は%IACS。

※2 固 溶

母相金属中に添加元素が原子状態で溶け込んでいる現象。ここでは、アルミ母相中に、FeあるいはMgが原子状態で溶け込んでいること。

※3 ミスフィットひずみ (MS)

元素が固溶することにより、母相の原子の並びを歪ませる度合いを定量的に示した値であり、引張強さ向上効果の指標となる。

※4 第一原理計算

経験則に依らず、量子力学などの基本法則や基本物理量から物性を直接導く計算手法。

※5 晶 出

結晶性の物質を溶解している溶液から、溶媒の温度を下げたて結晶を析出させること。

※6 プロペルチ法

イタリアのCONTINUUS-PROPERZI社製の連続铸造圧延システム。ベルト-ホイール式の連続铸造機と3軸多段圧延機をタンデムに備える。

※7 圧 着

端子と電線をかしめることにより、電氣的、機械的に接続する方法。

※8 セレクション

圧着用端子の電線接続部に形成した溝。この部分で電線の表面酸化膜を破壊するとともに、圧着後の電線抜けに対する引っ掛かりとなることにより、端子と電線の電氣的、機械的接続安定性に寄与する。

※9 接触抵抗

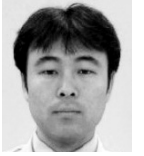
2つの導体が接触した時にその界面に生じる電気抵抗。自動車用ハーネスの電気接続部については、厳しい車載環境においても接触抵抗を安定的に維持できる信頼性が要求される。

参 考 文 献

- (1) 山野能章、「アルミハーネスの開発」、SEIテクニカルレビュー第179号、pp81-88 (July 2011)
- (2) Y. Otsuka, "Development of Aluminum Wire for Low-Voltage Automotive Wiring Harnesses", Society of Automotive Engineers (SAE) 2012 World Congress (April 2012)
- (3) 今里文敏、「自動車用アルミ電線の開発」、アルミニウム、第20巻第87号、pp23 (2013)
- (4) 日本アルミニウム協会編、アルミニウムハンドブック、第7版(2007)
- (5) 上杉徳照、東健司、「軽金属」、54号、pp82-89 (2004)
- (6) 松田好夫、「軽金属」、22号、pp484 (1972)
- (7) T.Otsuka, "Crimping Technology of Aluminum Wire for Automotive Wire Harness", Society of Automotive Engineers (SAE) 2012 World Congress (April 2012)

執 筆 者

西村 直也* : (株)オートネットワーク技術研究所
E&E 研究部 グループ長



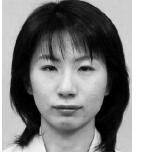
大塚 拓次 : (株)オートネットワーク技術研究所
接続部品研究部 グループ長



今里 文敏 : (株)オートネットワーク技術研究所
電線・材料研究部



草刈 美里 : エレクトロニクス・材料研究所
金属無機材料技術研究部 主査



赤祖父保広 : 富山住友電工(株) 技術部 技師



佐々木 暁人 : 住友電装(株) 第1事業部



*主執筆者