

アルミハーネスの開発

山野 能章*・細川 武広・平井 宏樹
 小野 純一・大塚 拓次・田端 正明
 大塚 保之・西川 太一郎・北村 真一
 吉本 潤

Development of Aluminum Wiring Harness —— by Yoshiaki Yamano, Takehiro Hosokawa, Hiroki Hirai, Junichi Ono, Takuji Otsuka, Masaaki Tabata, Yasuyuki Otsuka, Taichiro Nishikawa, Shinichi Kitamura and Jun Yoshimoto —— In order to reduce the amount of CO₂ exhaust, we are required to develop light weight wiring harnesses. Aluminum wiring harness is one of the solutions for weight reduction of automobiles. However, we have to consider some negative points of Aluminum wire such as lower conductivity, lower strength, oxide layers on a wire surface and galvanic corrosion. To solve these problems, we have developed a special Al alloy conductor, terminal with unique serrations and anti-corrosion technology. In this paper, we explain each solution in detail.

Keywords: aluminum wire, terminal, wire harness, automobile, anti-corrosion

1. 緒 言

近年益々きび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。また資源価格も高騰してきたこともあり、軽量化と低価格化を狙ったワイヤーハーネスの開発を行うにあたり、銅をアルミニウムに置き換える検討を始めることとなった。

アルミニウムを使った電線は、架空送電線の他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。本論文では、ハーネスで多用される導体断面積2.5mm²以下領域までアルミ電線を使うことができる様、自動車搭載を実現した図1に示す、電線開発、端子開発、防食開発について報告する。

2. 自動車用アルミ電線の開発

2-1 導体用アルミ合金の開発

(1) 開発目標

自動車用電線に適用するためには、強度（引張強さ）と電気伝導性（導電率^{*1}）の両立が必要である。

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に置換可能な材料物性として、引張強さ110MPa、導電率58 % IACSを目標とすることとした。

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) 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⁽¹⁾ため、自動車用電線に適用するには合金化による強度の向上が必要である。

そこで、常温での最大固溶量と第一原理計算^{*2}により算出したミスフィットひずみ^{*3 (2)} (MS) を用いて、添加元素の選定を行った。

固溶^{*4}は強度の向上に有効だが著しく導電率が低下する、一方MSは強度向上効果の指標となり、MSが大きい程強度向上効果が大きくなる。

自動車用電線では、導電率低下を抑えて強度向上させる必要があり、固溶量が小さくMSが大きい元素が有効と考えられるため、各種元素のMSと固溶量を検討した結果、Feを添加元素として選定した（表1）。

そこで、Al-Fe合金のFe添加量と材料特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）。



図1 アルミ電線、端子、防食開発

表1 各種元素のミスフィットストレインと最大固溶量

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

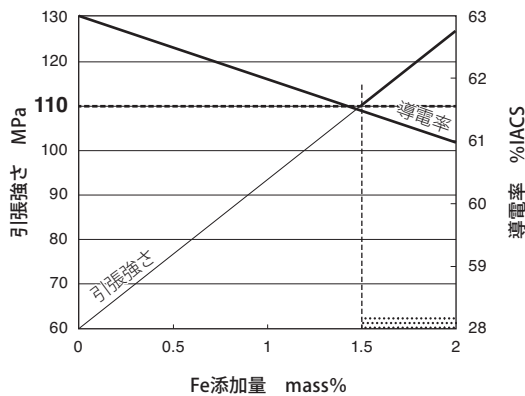


図2 Fe添加量と材料物性に関係

一般的な「ピレット鋳造＋押出し」法で製造した場合は、粗大なAl-Fe系化合物が析出し材料の靱性^{※5}が低く加工性に乏しいが、当社グループの富山住友電工(株)では、鋳造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、化合物を微細に析出させられる⁽³⁾ため、加工性に優れている。

とはいえ、自動車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を超えると伸線および撚線の加工性が悪化してしまうことが判明した。

そこで、Feの一部を置換する形で、加工性を阻害せず強度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強度向上に有効な固溶量の大きい元素を選定することとした。

そこで、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

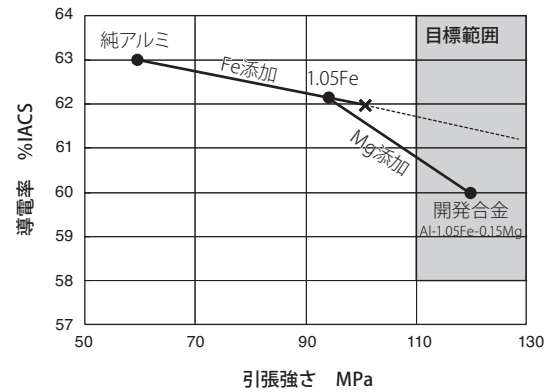


図3 開発合金の成分と性能

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)。

(3) 調質手法の確立

一般的に自動車用電線の導体材料には、ワイヤーハーネス加工性および自動車への組み付け性を考慮し、柔軟性が求められることから軟質材を用いている。

従来銅電線では、軟化処理^{※7}として、リール巻の状態では軟化炉に投入する「バッチ軟化」と、リールから繰り出しながら軟化炉を通過させる「連続軟化」の二方式が併用されているが、方式の違いによる材料特性の差異はない。

しかしながら、今回開発したAl-Fe-Mg合金を、それぞれの軟化方式で軟化処理を行い性能確認したところ、「バッチ軟化」では、所定の性能を発揮できるのに対し、「連続軟化」では、導電率が目標下限の58 % IACSまで低下した。

表2 軟化処理による条件の違い

	軟化温度	軟化時間	冷 却
バッチ軟化	350℃	4時間	徐冷(数時間)
連続軟化	500℃以上	1sec未満	急冷(瞬間)

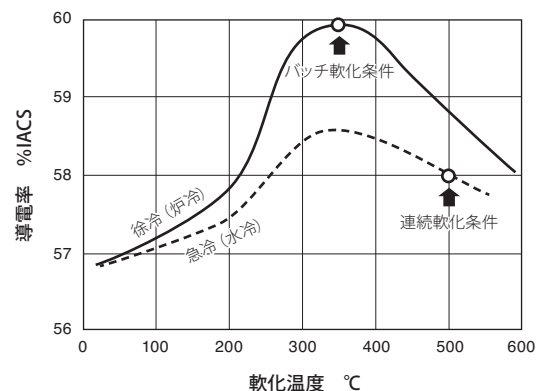


図4 軟化条件による導電率への影響

原因調査に当たって、「バッチ軟化」と「連続軟化」の軟化条件を表2のように整理し、各項目の影響を確認した結果、高温および急冷、によって導電率低下が引き起こされていることを見出した（図4）。

そこで、高温・急冷の熱履歴が金属組織に及ぼす影響を、透過電子顕微鏡（TEM）により確認したところ、Al-Fe系化合物の析出が、「バッチ軟化」後の材料には数多く観察されるのに対し、「連続軟化」後の材料ではほとんど観察されないことが判った（図5）。

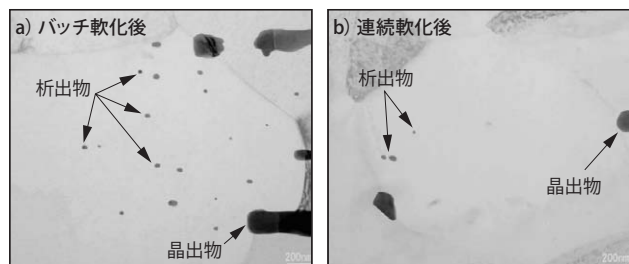


図5 軟化処理の違いによる析出状態の変化

すなわち、「バッチ軟化」であればAl-Fe系化合物が微細析出した状態であるのに対し、高温まで加熱した後に急冷する「連続軟化」では、Feが最大固溶量を超えて過飽和固溶してしまい、導電率が低下したものと考えられた。

こうして、今回開発したアルミ合金は、自動車用電線に適した特性を得るために、軟化処理は「バッチ軟化」に限定することとした。

2-2 アルミ電線製造技術確立

(1) アルミ電線製造の課題と対策

アルミ電線製造の工程および各工程における製造課題を図6に示す。

工 程	不具合	取組み内容
 鋳造・圧延	—	・異物混入対策 ・全長探傷除去
 伸 線	断 線	・潤滑液粘度の最適化 ・減面率の最適化 ・専用伸線装置開発
 撚 線	表面傷 断 線	・低張力制御装置開発 ・ガイド表面処理開発
 軟 化	—	—
 絶縁被覆	断 線	・低樹脂圧治具開発 ・低摩擦送線装置開発

図6 製造課題と対策取組み

検討開始当初は、各工程で断線が多発し、生産性が低い状態であったが、当社グループの富山住友電工㈱、住友電装㈱において、各工程で改善策を講じ、断線率を飛躍的に低減することができ、従来銅電線と同等の生産性を実現した。

(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3に示す。

従来銅電線から1サイズアップでの置換えが可能となっている。

表3 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)
CHFUS	0.5	5.4	ALUS	0.75	3.1	▲2.3
	0.75	7.6		1.25	5	▲2.6
		1.25	13.1	ALSS	2	9.1
HFSS	2	21.2	2.5		11.7	▲9.5

3. アルミ電線用端子の開発

自動車用ワイヤーハーネスの接続部の大半は、図7に示すように圧着※8と呼ばれる工法で電線と接続した端子を挿入したコネクタを嵌合する構造となっている。

アルミハーネスを広く展開するためには、アルミ電線と端子の接続部はハーネス製造における汎用工法である圧着で成立させる必要がある。

圧着とは、図8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する工法で、電気接続と電線保持力を確保するものである

これらの特性は圧着条件（かしめる強さ）によって変化することが知られており、電気接続性能と電線保持力が両

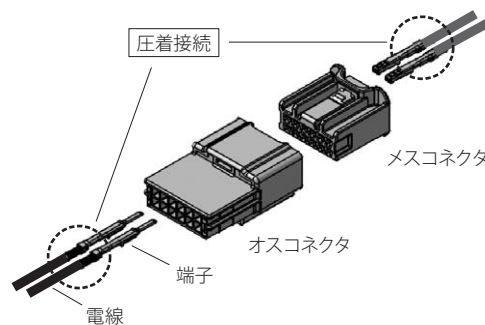


図7 コネクタと圧着電線

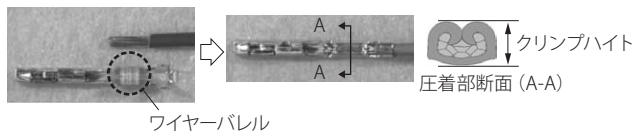


図8 圧着工法

立する範囲がハーネス製造時の圧着条件となる。当社はアルミ電線を自動車用ワイヤーハーネスに適用するために圧着によるアルミ電線と端子の接続技術を開発した。

3-1 開発課題 銅とアルミの特性とアルミ電線の圧着接続に及ぼす影響を表4に示す。

表4 銅とアルミ特性比較と圧着への影響

	銅	アルミ	圧着への影響
表面酸化膜	Cu ₂ O 導電率 10 S/cm	Al ₂ O ₃ 導電率 10 ⁻⁷ S/cm ⇒絶縁性	絶縁性酸化膜 ⇒接触抵抗増加
導電率 (母材)	100 % IACS	60 % IACS	集中抵抗成分の増加
熱膨張率	17.7 × 10 ⁻⁶ /℃	23.6 × 10 ⁻⁶ /℃	温度変化に対する 接触荷重変化大 ⇒特に低温側で接 触荷重低下

このなかで最も大きな影響を及ぼすと考えられる特性は表面酸化膜で、アルミの表面が強固な絶縁性酸化膜で覆われていることである。従って、電気接続を確保するためには、圧着過程でこの強固な絶縁性酸化膜を破壊することが最大の課題となると考えた。

まず、基礎評価として端子材に電線導体を押しつけ、接続部抵抗を測定しながら荷重をかける実験を行った。接続部抵抗を安定させるためには、アルミは銅より大きな荷重が必要であることが確認できた。

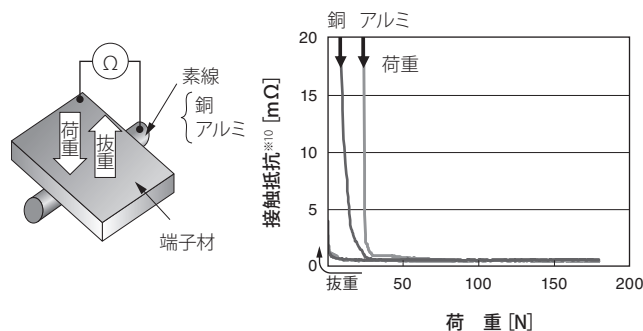


図9 荷重と接続部抵抗

そこで実際に銅電線用の端子で銅電線およびアルミ電線を圧着した圧着特性を検証した。その結果を図10に示す。横軸は圧着条件で左側ほど強くかした状態を表している。一般に電気接続性能は強くかしたほど安定する一方、電線保持力は強くかしたすぎると低下する傾向がある。ハーネス製造時の圧着条件は両特性が規格値を満足する範囲で設定される。

アルミ電線を圧着した場合、図10に示すとおり銅より強くかしなければ接続抵抗が安定しないため、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せまくなる。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あるいは高圧縮域における電線保持力を改善する必要がある。

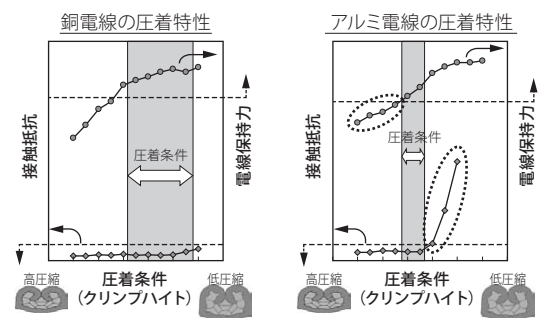


図10 かしめ強さと接続部抵抗、電線保持力

3-2 圧着性能の改善

(1) 電気接続性能の改善

圧着でアルミ電線の接続を成立させるために、特性要因図から寄与する要因を絞り込み、端子のセレーション※9に着目した（図11）。セレーションとは端子のワイヤーバレルに形成した凹凸で、既存の銅電線用端子のセレーションは3本の溝形状が一般的である。

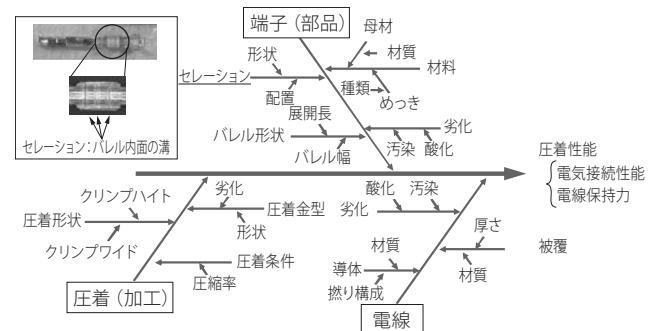


図11 圧着特性に関する特性要因図

実際にセレーションのある端子とない端子の圧着特性を評価した結果、図12に示すとおりセレーションがない場合、圧着条件によらず接続抵抗が安定しないことからセレーションが電気接続性能に大きく寄与していることがわかった。

そこで、セレーション付近の接続メカニズムを検証することとした。まず、粘土による模擬実験を行い観察が困難なアルミの酸化被膜の見える化を試みた。図13のように酸化膜を模擬したペンキを塗った粘土を電線にみたて、模擬端子で押しつぶすとセレーション付近で粘土が大きく変形し塗膜が破れることが確認できた。このセレーション付近の大変形が酸化膜破壊に寄与していると推定した。

一方、圧着CAE※11により圧着時に電線が受ける荷重を解析した結果、図14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が破壊されやすいと考えた。

また、アルミ電線を圧着した端子を分解し圧着部のアルミ電線を取り出し表面分析を実施したところ、粘土実験で酸化膜にみたてた塗膜が破壊された部分と同様に、セレー

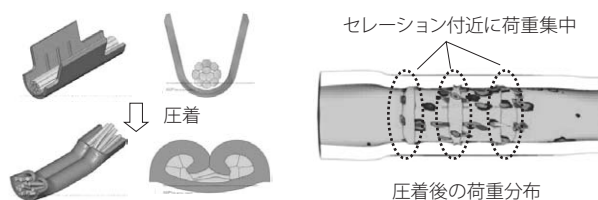


図14 CAEによる圧着シミュレーション

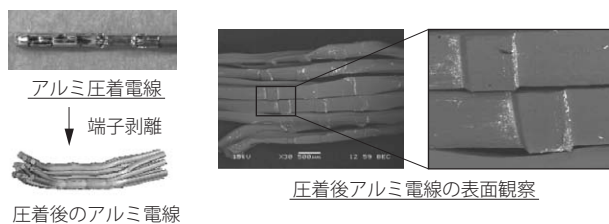


図15 圧着後の電線表面観察

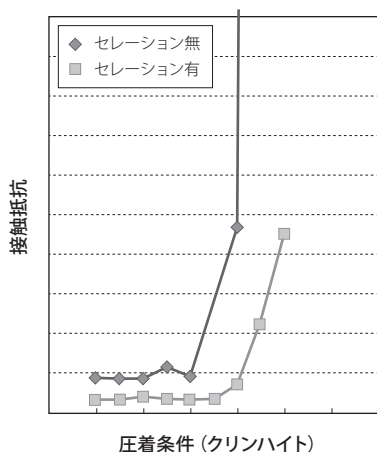


図12 セレーションなし端子の圧着特性

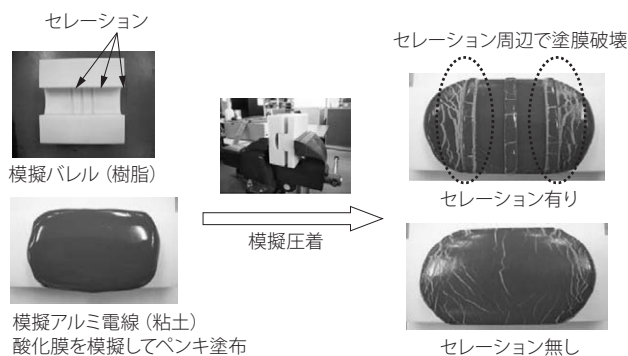


図13 粘土による模擬実験

ションのエッジ部分に端子のめっき材であるスズが凝着していることが確認できた(図15)。

以上よりアルミ圧着の接続メカニズムは次のように考えられる。アルミ表面の強固な絶縁性酸化被膜は、圧着過程において端子のセレーション部分で電線が大きな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ることによ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エッジ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10に示す圧着特性のなかで強くかした場合の電線保持力を改善することも有効である。

電気接続性能の改善と同様に特性要因図をもとにして検討した結果、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16に開発したアルミ電線用圧着端子を示す。セレーションの変更のみにより接続性能確保を実現したもので、①電気接続性能改善のため

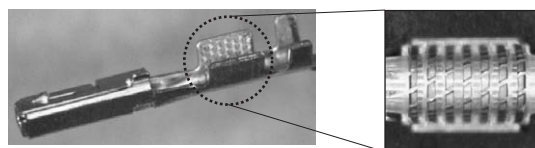


図16 アルミ電線用圧着端子

のセレーションエッジ量確保 ②電線保持力改善のために細かな凹凸を高範囲に形状配置すること、を設計要件として、端子製造上の制約や性能マージンを見込んで、実験による評価とCAE解析により形状を最適化したものである。

その圧着特性を図17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ることができた。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できている。

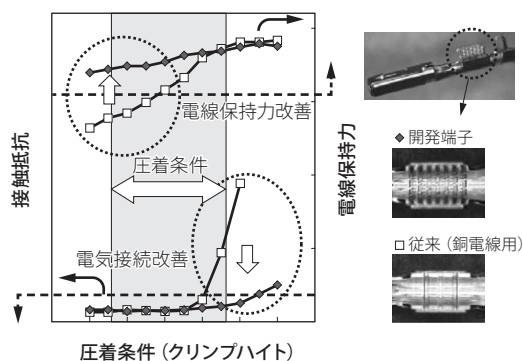


図17 アルミ電線用端子の圧着特性

3-4 まとめ アルミハーネス開発に向けて、ワイヤーハーネス製造の汎用工法である圧着による電線と端子の接続技術を開発した。これは銅と同等のハーネス製造工程で実現できるもので、今後のアルミハーネスの展開が期待される。

また本技術は銅電線の圧着にも適用可能で、その接続信頼をさらに向上できる見込みがある。車の高機能化電子化に伴い、ワイヤーハーネスはさらなる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ます。

4. アルミ防食技術開発

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、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18）。この異種金属接触腐食は、アルミハーネスの車載化にあたって解決しなくてはならない重要な課題である。

そこで、経年車両ワイヤーハーネスにおいて、特に異種金属接触部となる端子圧着部を中心に、上述の腐食が発生する環境があるのかどうかを調査することとした。

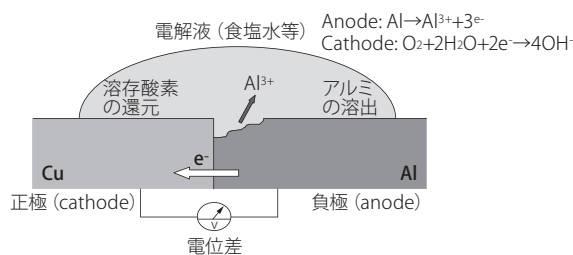


図18 銅とアルミの異種金属接触腐食

4-2 経年車両の調査 腐食環境として最も懸念されるのは、塩水などの電解液の付着であるため、電解液の付着しやすい地域の経年車両入手を進めた。具体的には、ラジエーターへの塩化物付着や水質調査から塩化物付着が多いことが知られている中東地域⁽⁴⁾、融雪塩の付着で車両の腐食問題が顕著化した実績のある北米⁽⁵⁾、さらにはスコールなどで車両の浸水が起こり易い東南アジア等の地域である。

入手したワイヤーハーネスの状態を確認した結果、海岸砂漠の高温高湿地域では、塩を含む砂埃が車両室内にも多く入り込んでいることがわかった。さらに酷いものは、銅ハーネスであるにもかかわらず、図19のように端子が腐食したものも見つかった。

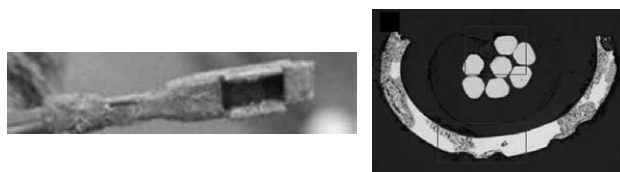


図19 経年車の端子腐食状態

この調査の結果、端子かしめ部が腐食する可能性があることが分かり、アルミ電線の端子圧着部に向け、防食技術を開発することとした。

4-3 防食技術の開発 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。

かしめ部に5%塩水を付着させ、高温高温放置した後の状態を図20に示す。アルミ導体は完全に溶出しており、

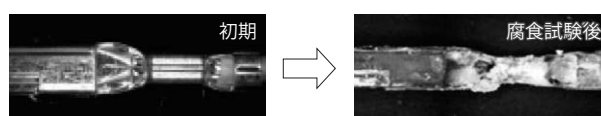


図20 アルミ電線かしめ部の腐食の様子

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、つまり圧着部への水分侵入を防ぐことで防食が可能になると考えた。

水分の浸入経路は図21に示すとおりで、アルミ導体が端子から露出している経路①（ワイヤバレル先端）や経路②（バレル間）だけでなく、電線と端子の隙間から浸入してくる経路③がある。

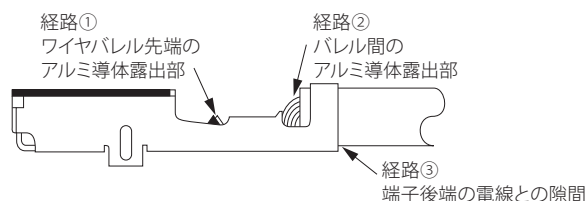


図21 アルミ電線圧着部への水分進入経路

このため、防食のためにはアルミ導体露出部に加えて端子後端部も隙間無く保護することが必要であると考え、かしめ部を含め端子後端部まで全体を樹脂でモールドする防食手法を開発することとした。

モールド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るとともに、車載化に向けた耐久評価、意地悪評価を実施した。最終的に図22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。

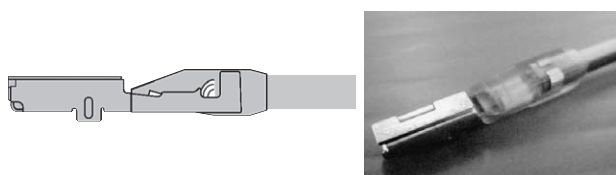


図22 アルミ電線圧着部のモールド構造

5. 結 言

アルミ電線を車両に搭載するために、3つの新技術を開発し、トヨタラクティスに量産搭載することができた。

今後のワイヤーハーネスにも、銅価格の上昇高止まりの状況が続くことが予想され、益々アルミ電線を用いたワイヤーハーネスの需要が高くなると思われる。

6. 謝 辞

今回のアルミハーネス開発に関しては、住友電装㈱内でアルミプロジェクトを量産に向けて推進された、西部事業部第1事業部、生技開発本部、品質管理本部の多くの方の御協力を頂き、本技術を搭載する事ができた。

また、トヨタ自動車㈱殿より車種開発のプロジェクト表彰も受賞し、関係者一同今後の開発に向け大きな励みとなった。

ここに、アルミプロジェクト関係各位に対して、感謝の意を表する。

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 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に導く計算手法。

※3 ミスフィットひずみ

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指標。

※4 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状態。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。

※5 韌 性

材料の粘り強さ。（⇔脆性：もろさ）

※6 プロペルチ法

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

※7 軟化処理

加工によって硬化した金属材料を加熱処理して軟質な状態にする処理を言う。強度が低下し、伸びと導電率が上昇する。

※8 圧 着

端子と電線を物理的圧力でかしめることにより電氣的、機械的に接続する方法。圧着には様々な形態があるが、自動車用ハーネスではF型圧着（Fクリンプ）が汎用的に用いられる。

※9 セレーション

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の破壊するとともに、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。

※10 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。

※11 圧着CAE (Computer Aided Engineering)

圧着工程のコンピューターシミュレーション。圧着過程における荷重の大きさや分布の解析が可能で圧着条件に対する接続性能の予測に寄与する。

参 考 文 献 -----

- (1) 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)
 - (2) 上杉徳照、東健司、軽金属、54、82-89 (2004)
 - (3) 松田好夫、軽金属、22、484 (1972)
 - (4) アルミニウム技術便覧、1065 (1996)
 - (5) JFE 技法No.4、p.8-14 (2005年4月)
-

執 筆 者 -----

山野 能章*：(株)オートネットワーク技術研究所
E&E 研究部 主任研究員
ワイヤーハーネスの先行開発業務に従事



細川 武広：(株)オートネットワーク技術研究所 電線・材料研究部
室長

平井 宏樹：(株)オートネットワーク技術研究所 回路接続研究部
室長

小野 純一：(株)オートネットワーク技術研究所 回路接続研究部
主任研究員

大塚 拓次：(株)オートネットワーク技術研究所 回路接続研究部

田端 正明：住友電装(株) 部品事業本部 グループ長

大塚 保之：(株)オートネットワーク技術研究所 電線・材料研究部
主任研究員

西川太一郎：エレクトロニクス・材料研究所 グループ長

北村 真一：富山住友電工(株) 技術部 課長

吉本 潤：住友電装(株) 電線事業本部 担当課長

*主執筆者