



エンジンの振動屈曲に耐える高強度アルミワイヤーハーネス

High-Strength Aluminum Wires for Low-Voltage Automotive Engine Wiring Harnesses

田口 欣司*

Kinji Taguchi

嶋田 高信

Takanobu Shimada

吉本 潤

Jun Yoshimoto

桑原 鉄也

Tetsuya Kuwabara

赤祖父 保広

Yasuhiro Akasofu

自動車排出ガスによる環境への影響の懸念から、燃費向上のために自動車の軽量化が図られている。ワイヤーハーネスも軽量化のため、電線の導体を銅からアルミへの変更が進められている。しかし、従来のアルミ電線では導体強度が不足し、 0.35mm^2 や 0.5mm^2 といった細径サイズやエンジン領域での適用ができず、制約が出ている。そこで、我々は、銅と同等以上の強度を有する高強度アルミ合金電線の開発に、業界で初めて成功し、エンジンワイヤーハーネス用 0.35mm^2 電線を皮切りに2015年4月より生産を開始した。開発した電線用の高強度アルミ合金は、目標特性とした引張強さ220MPa、導電率50%IACSを見込んで6000系の時効析出型アルミ合金をベースに、添加成分量を整え、また合金中の Mg_2Si 化合物の析出状態を詳細に調査して、時効条件を選定し、目標を上回る引張強さ250MPaと導電率52%IACSを実現した。

The weight of wire harnesses has been increasing with the growing number of systems used in vehicles in recent years. For the purpose of reducing their weight, aluminum instead of the conventional copper is getting popular as a wire conductor. The conventional Al wires, however, cannot be used for small gauge wires, (0.35mm^2 and 0.5mm^2) or wires used in engine compartments due to their insufficient conductor strength. For this reason, we have developed an Al alloy that has a conductor strength equivalent to or stronger than that of copper, and successfully manufactured a high-strength Al alloy wire for the first time in the industry. Applying it to the 0.35mm^2 wire for engine wire harnesses, we began its mass production in April 2015. The target properties of Al alloy were a tensile strength of 220 MPa and IACS conductivity of 50%. Based on the age-precipitated 6000 series Al alloy, additive elements and their content were specified. The aging conditions were determined by examining the precipitation status of Mg_2Si intermetallic compounds. With this approach, we achieved a tensile strength of 250 MPa and IACS conductivity of 52%, both of which exceed the targets.

キーワード：アルミ電線、エンジンハーネス、高強度アルミ合金、 0.35mm^2

1. 緒言

自動車の安全性、快適性、の向上のために搭載されるシステムの回路数、即ち電線の本数は増加し続けており、ワイヤーハーネスの重量の増大が懸念される。

このため、ワイヤーハーネスの軽量化のために、電線の導体を銅から、比重の小さいアルミニウムに変更したアルミ電線の普及が進んでいる。

加えて、アルミ電線の適用は、近年の銅の原料価格の高騰に伴う銅電線のコスト増加の傾向の中、電線価格低減の効果が出ており、ワイヤーハーネスの軽量化と価格低減の2つのメリットにより、今後、ますます普及が期待される。

ところが、従来のアルミ電線は、導体強度の不足により、従来銅電線のような、 0.35mm^2 や 0.5mm^2 といった細径サイズや、振動が激しいエンジン領域での適用ができない状況にあり、ワイヤーハーネスの軽量化に制約が出ている。

そこで、当社は、銅と同等以上の強度を有する高強度アル

ミ合金を開発し、エンジン領域に適用でき、且つ 0.35mm^2 の細径サイズの自動車用高強度アルミ合金電線を実現した。

当社は、業界で初めて、アルミ電線のエンジンワイヤーハーネスへの適用に成功し、 0.35mm^2 を皮切りに2015年4月より、生産を開始した。

本論文では、主に、細径、エンジン領域に適用できる高強度アルミ合金の開発について報告する。

2. 高強度アルミ合金の開発

2-1 開発目標

本合金開発では、従来銅電線で用いられる最小サイズである 0.35mm^2 以上のサイズを、アルミ電線にて適用可能とすることを目標とした。

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。

従来銅電線同等の耐振動特性の確保と端子圧着強度実績

から、引張強さ220MPa、また、従来銅電線のISOラインナップの中で1サイズアップしてもヒューズマッチングが同等となるよう、導電率50%IACSを目標と定めた。

その他、具体的な材料物性としては、ISO等の公的規格を満足することを目指した。

2-2 合金設計

一般的な工業用純アルミ材(1060:純度99.6%)は、導電率は62%IACSと高いものの、引張強さが70MPa⁽¹⁾と低いため、自動車用電線に適用するには強度を向上させることが必要である。

従来のアルミ電線に用いられるアルミ材は、強度向上のために、強化元素を添加して合金化させているが、それでも強度が120MPa程度と、従来銅電線に用いられる軟銅の半分程度であり、0.75mm²までの細いサイズの電線への適用に留まっている^{(2)~(4)}。

本合金開発では、各種アルミ合金材の特性(図1)から、最も目標特性に近い6000系を選定し、アルミに添加する元素は、マグネシウム(Mg)とシリコン(Si)とした。

MgとSiの添加量は、原理試作にて合金材を鋳造し、合金材強度、導電率の他、伸線加工性や取り扱い性に影響する伸び特性で、範囲の絞り込みを試みた。

その結果、図2のように目標特性でNGとならない範囲を絞り込み、引張強さ220MPa、導電率50%IACSを満足する添加量を見出した。

この中で、後述する調質手法の検討結果も含め、製造管

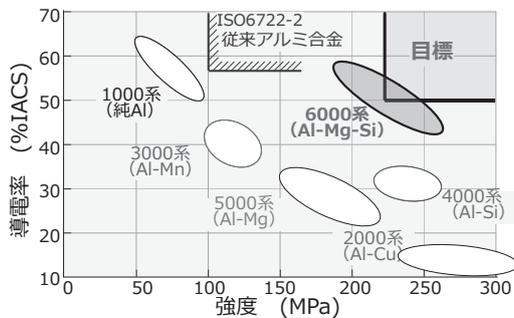


図1 各種アルミ合金の特性

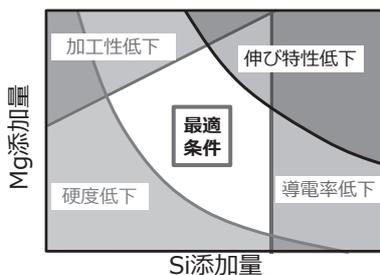


図2 Mg、Si添加量検討結果

理しやすい添加量の最適範囲を絞り込み、Al-0.6mass% Mg-0.5mass%Siを、合金設計値として選定した。

今回選定した成分範囲において、目標を上回る引張強さ250MPa、導電率52%IACSの性能を実現した。

2-3 調質手法の確立

本合金開発で選定した6000系アルミ合金材は、MgとSiの添加元素をアルミ材に溶け込ませる溶体化処理^{*2}と、添加元素の化合物Mg₂Siをアルミ材から析出させる時効処理^{*3}により、強い合金に仕上げる熱処理型合金である。

本開発では、電線製造工程において、アルミ合金の溶体化と時効の処理を行う必要があり、当社は、効率的に電線製造できる工程として、図3に示す工程を採用した。

添加元素を含む母材を鋳造、圧延した後、溶体化処理工程で添加元素を溶け込ませたまま、伸線工程、撚線工程の後、時効処理工程で添加元素を化合物として析出させ導体を仕上げ、押出工程で被覆し、電線化する工程である。

この中で、溶体化処理工程では、図4の状態図のように、母材を500℃以上の高温でMgとSiの添加元素をアルミ材

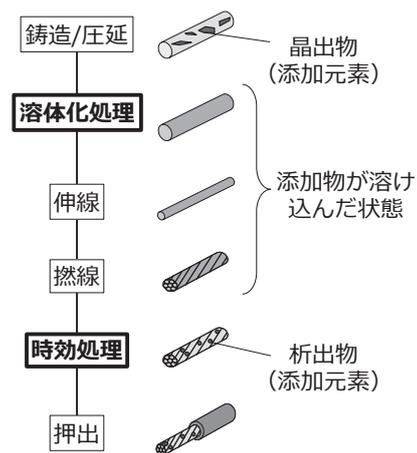


図3 アルミ電線製造工程

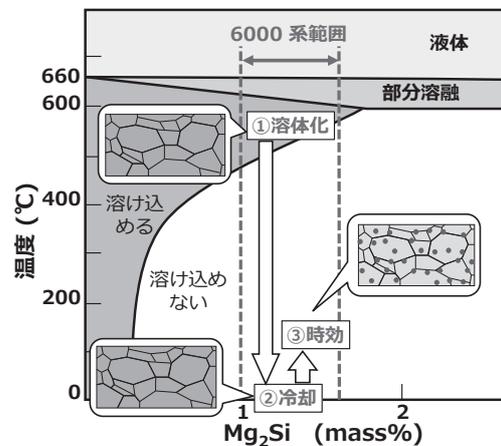


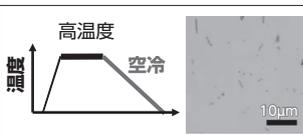
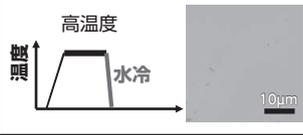
図4 Al-Mg₂Si擬二元系状態図

に溶け込ますことができるが、課題として添加元素が溶け込めない常温に冷やした後でも、添加元素を溶けたままの状態にする必要がある。

冷却方法は、冷却速度の低い空冷と、冷却速度の高い加熱状態の母材を水槽にそのまま沈めた急冷とを比較調査した。

その結果、急冷したサンプルにて、表1のように添加元素を溶け込ませ、その後の撚線工程まで状態を維持することができた。

表1 溶体化処理工程条件比較

溶体化処理工程後	撚線工程後	判定
 <p>高温度 空冷</p>		<p>NG 溶け残りあり、撚線工程までに成長</p>
 <p>高温度 水冷</p>		<p>良好 溶体化され、状態が維持されている</p>

また、時効処理工程では、200℃以下の低温で保持することで、写真1のように、微細に析出、分散したMg₂Si化合物を得ることができた。

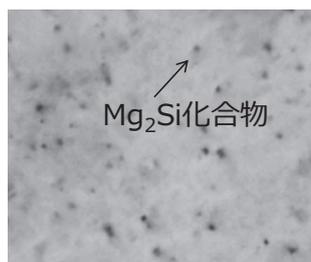


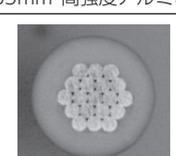
写真1 微細に分散したMg₂Si化合物

その結果、電線状態において、目標特性を満足する高強度アルミ電線を実現することができた。

2-4 高強度アルミ電線の構造

今回開発した0.35mm²高強度アルミ電線の緒元を表2に示す。φ0.155mmの素線を、19本撚りあわせた導体で、エンジン振動に有利な柔軟構成としている。同一サイズの従来銅電線対比で重量53%の低減を可能とした。

表2 高強度アルミ電線

項目	0.35mm ² 高強度アルミ電線
断面	
導体素材	Al-Mg-Si
素線径	0.155mm
素線本数	19
絶縁材	PVC
絶縁厚	0.25mm
仕上外径	1.3mm
導体破断荷重	87N
伸び	11%
導体抵抗値	100mΩ/m

2-5 電線特性の確認

高強度アルミ合金のS-N特性を図5に示す。S-NのSはひずみ振幅、Nは屈曲回数を示し、ひずみ振幅は屈曲中の導体表面の長さ変化の割合の変動幅である。

従来アルミ合金に比べ、高強度アルミ合金は低ひずみにおいて寿命が大幅に向上し、優れることが判る。

今回、ターゲットとしたエンジン振動のひずみ領域において、従来銅電線よりも優れることが判り、低ひずみ領域では、強度が高いほど寿命が延びることから、今回、軟銅より高い強度まで引き上げた効果が表れていると言える。

また、高強度アルミ合金は、ドア開閉部の渡りの屈曲領域においても、軟銅よりも優れており、耐屈曲、耐振動に最適な導体と言える。

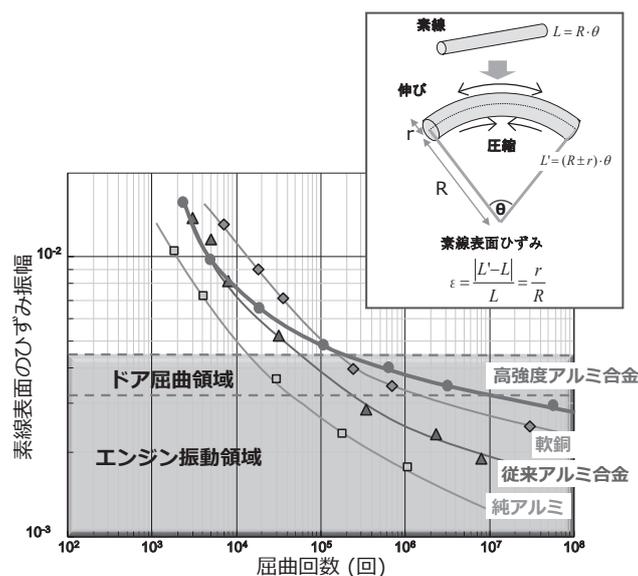


図5 各種導体のS-N特性

高強度アルミ電線を用いたハーネス形態(写真2)において、エンジン振動模擬試験を行った。

その結果、図6に示すように、従来アルミ電線よりも大きく向上し、また、従来銅電線を上回る回数まで断線なく、良好な特性が得られた。

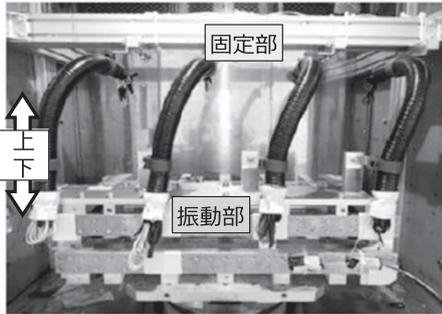


写真2 エンジン振動模擬試験様子

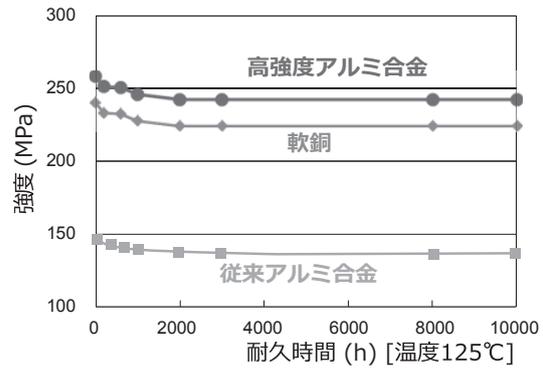


図8 高温放置後の強度

当然ながら従来アルミ合金よりも、高強度アルミ合金の強度は高く、高温程、強度は低下するものの軟銅の強度を下回ることがなく、125℃の高温においても軟銅よりも高い強度であった。また、125℃の温度履歴によって、常温時の強度は低下するものの、軟銅よりも高い強度を維持することが判る。

このように高強度アルミ電線は、エンジン部において、従来銅電線と同等以上の強度を確保できることが判る。

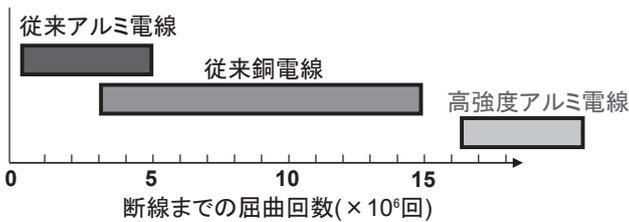


図6 エンジン振動模擬試験結果

また、エンジン部周辺の温度環境を想定し、125℃の高温時の導体強度、125℃の高温履歴後の導体強度を調査した結果を図7、図8に示す。

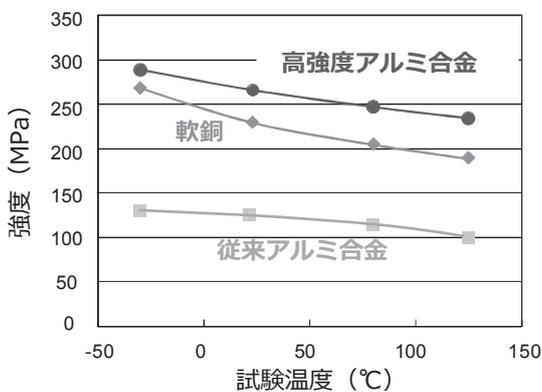


図7 強度の温度特性

3. 高強度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は、図9に示すようにに圧着^{*4}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が一般的に用いられている^{(3),(4)}。

当社はアルミハーネスを広く展開するために、ハーネス製造の汎用工法である圧着で接続できる、従来アルミ電線専用の端子を用いている。今回、開発した高強度アルミ電線と端子との接続技術を開発した。

圧着とは、図10に示すように被覆を剥いた電線を端子のワイヤーバレルと呼ばれるU字型の部位でかして接続する工法で、接触抵抗と電線保持力を確保する。

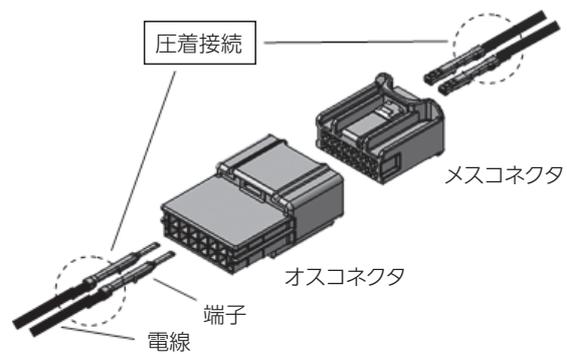


図9 コネクタと圧着電線

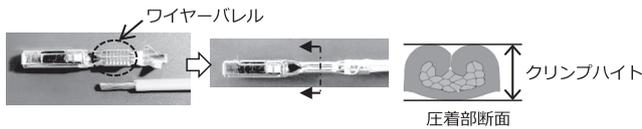


図10 圧着工法

アルミは表面を強固な絶縁性酸化膜で覆われているため、銅より強くかきめなければ接触抵抗が安定しない。そこで、接続性能にかかわる高強度アルミ電線導体の物性を調査し、従来アルミ電線と同様の圧着手法を用いることができるか検証を行った。結果を表3に示す。

表3 電線導体物性

項目		高強度アルミ電線	従来アルミ電線
強度		250MPa	130MPa
表面酸化膜	体積抵抗率	$10^{13} \Omega \cdot m$	$10^{13} \Omega \cdot m$
	厚さ	約50nm	約50nm

調査の結果、高強度アルミ電線導体の酸化膜物性は、従来アルミ電線導体と同程度であることがわかった。従来圧着手法での成立見込みが得られたことから、実際に圧着特性評価を行った。結果を図11に示す。

接触抵抗と電線保持力共に規格を満足する圧着条件幅を確保することができた。

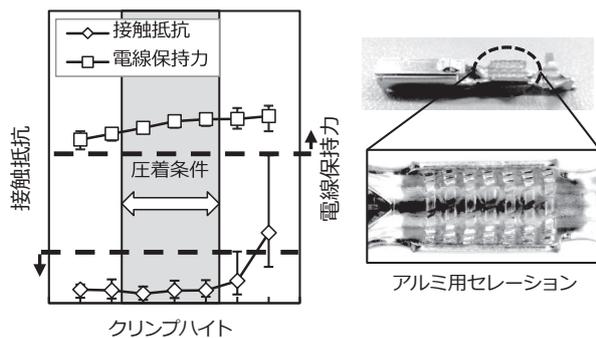


図11 高強度アルミ電線用端子の圧着特性

4. アルミ電線を用いたエンジンワイヤーハーネスと今後のラインナップ

2015年4月より0.35mm²皮切りに高強度アルミ電線を製造開始しており、製造した電線と、現状、製品化したエンジンワイヤーハーネスを写真3、写真4に示す。

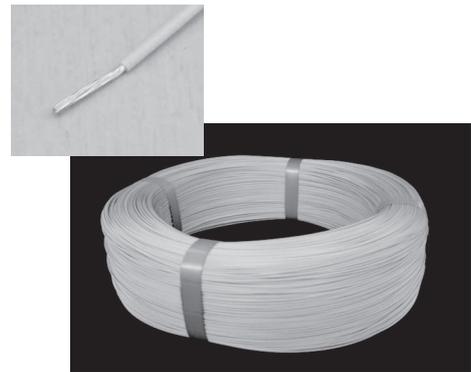


写真3 量産開始した0.35mm²高強度アルミ電線



写真4 高強度アルミ電線を使用したエンジンワイヤーハーネス

このハーネスの中で、高強度アルミ電線を用いた回路は全体の約20%を占めている。

今後予定している高強度アルミ電線のラインナップを表4に示す。既に量産開始した100℃耐熱グレードの柔軟燃り導体構成の0.35fのタイプその他、銅電線のラインナップと同様にエンジンハーネス用(100℃耐熱グレード)と室内ハーネス用(80℃耐熱グレード)を整備するつもりである。

表4 高強度アルミ電線ラインナップ

耐熱グレード	導体				絶縁		仕上外径 (mm)	電線重量 (g/m)
	導体構成	サイズ	撚り構成 (本/mm)	外径 (mm)	材料	絶縁厚 (mm)		
80℃	圧縮	0.35	7/SB	0.70	PVC	0.20	1.10	1.8
		0.50	7/SB	0.85		0.20	1.25	2.3
100℃	一般燃	0.35	7/0.250	0.75	PVC	0.25	1.25	2.1
		0.50	7/0.300	0.90		0.28	1.46	2.9
100℃	柔軟燃	0.35f	19/0.155	0.80	PVC	0.25	1.30	2.2
		0.5f	19/0.185	0.95		0.28	1.51	3.0
		0.75f	19/0.225	1.15		0.30	1.75	4.2
		1.25f	37/0.210	1.50		0.30	2.10	6.2
		2.0f	37/0.260	1.85		0.35	2.55	9.3
		2.5f	37/0.285	2.05		0.375	2.80	11.1

5. 結 言

- ・ワイヤーハーネスの軽量化と価格低減を目的に、銅と同等以上の強度の高強度アルミ合金導体を有する、自

動車用高強度アルミ電線を開発した。

- ・これにより、エンジン領域に適用でき、且つ0.35 mm²の細径サイズが可能となった。
- ・高強度のアルミ合金Al-0.6mass%Mg-0.5mass%Siを選定し、有効な調質処理条件を確認の上、電線製造工程に組み込んだ。
- ・エンジン領域の振動特性は従来銅電線よりも優れ、同一サイズの従来銅電線対比で53%の重量低減を実現した。
- ・2015年4月より0.35mm²皮切りに高強度アルミ電線を製造開始した。

今後は、アルミのサイズバリエーションの拡大展開を行っていきと共に、アルミ編組やシールド線など、アルミ未適用の領域への拡大を進めていく。

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 溶体化処理

比較的高い温度で加熱保持し、その後、急冷させて、アルミ合金中に添加元素を均一に溶け込ませる熱処理。

※3 時効処理

比較的低い温度で加熱保持し、時間の経過とともに徐々に溶け込んでいた添加元素を化合物として析出させる熱処理。

※4 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。

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) Yasuyuki Otsuka etc., Development of Aluminum Wire for Low-Voltage Automotive Wiring Harnesses (SAE International) (2012)
- (3) 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、p81-88 (July 2011)
- (4) 西村直也、「アルミハーネス」、SEIテクニカルレビュー第185号、p4-9 (July 2014)

執筆者

田口 欣司* : (株)オートネットワーク技術研究所
電線・材料研究部 グループ長



嶋田 高信 : (株)オートネットワーク技術研究所
接続部品研究部



吉本 潤 : 住友電装(株) 電線・第1事業部
グループ長



桑原 鉄也 : エネルギー・電子材料研究所
グループ長



赤祖父保広 : 富山住友電工(株) 技術部 主査



*主執筆者