

軽量化アルミニウム合金ワイヤハーネス

環境・エネルギー研究所 篠田 辰規¹・市川 雅照²
自動車電装事業部 瀬下 裕也³・和田 政宗⁴・望月 淳⁵

Lightweight Wiring Harness made of Aluminum Alloy

T. Shinoda, M. Ichikawa, Y. Seshimo, M. Wada, and M. Mochizuki

近年の自動車軽量化の要求によりワイヤハーネスの軽量化が必要となっている。軽量化ワイヤハーネスとしてAl電線がひとつの候補となるが、強度不足、接続不良、異種金属接触腐食に対して課題がある。これらの課題を解決するため、ワイヤハーネスに適した高強度高導電Al合金電線および端子接続技術を開発した。開発したAl合金電線とCA線を組合わせて作製したワイヤハーネスは、従来のCuワイヤハーネスと比較して20%の軽量化を達成した。

Recently the demand for lightweight wiring harness is becoming higher in order to respond needs to reduce weight of automobiles. Applying aluminum instead of copper had been thought as one of solutions. However, improvements of tensile strength, reliability of connection, prevention for galvanic corrosion were required for applying this material. To meet these requirements, we have developed not only aluminum alloy with high strength, high conductivity, but also high reliability connecting technology. The wiring harness which is composed of developed aluminum alloy wires and copper-clad aluminum wires achieved 20% reducing of weight.

1. ま え が き

近年、省エネルギー、排出ガス低減など環境への負荷低減のため自動車の軽量化が要求されている。しかし、一方では自動車の電装化により使用される電線が増加し、ワイヤハーネスの重量が増大する傾向がある。また、Cuの価格高騰、供給不足などの問題もあり、ワイヤハーネス軽量化とCu代替の候補としてAlが注目されている。Alをワイヤハーネスとして用いる場合、細径電線での強度不足、強固な酸化膜による接続不良、端子接続部での異種金属接触による腐食が課題となる。本稿ではこれらの課題を解決するために行ったAl合金電線の開発について報告する。

2. アルミニウム合金電線の開発

2.1 開発目標

ワイヤハーネス用の電線としては引張強さと導電率の両立が必要である。本開発では、従来のCu電線0.5 mm²をAl合金電線0.75 mm²に置換するために必要な特性を目標とした。また、接続に従来のCu電線と

同じ圧着を用いるためには、圧着に耐える柔軟性が必要であるため、引張強さ・導電率に加えて伸びも開発目標に加えることにした。各特性の開発目標を表1に示す。

表1 開発目標
Table 1. Development target.

項目	引張強さ (MPa)	伸び (%)	導電率 (% IACS)
目標値	140 以上	10 以上	58 以上

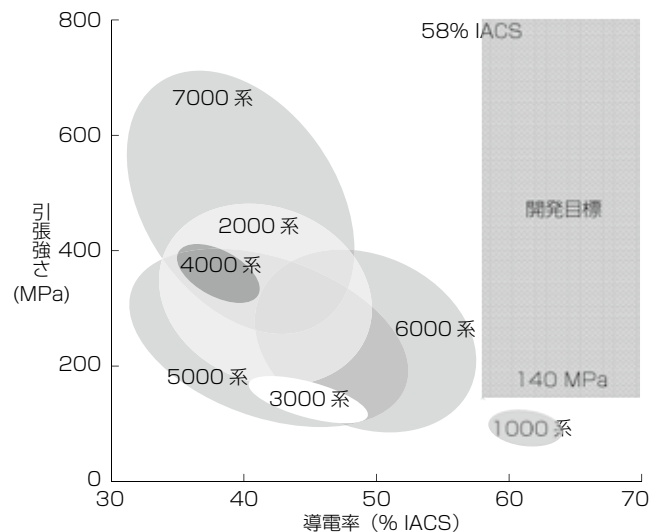


図1 JIS規格Al合金の特性¹⁾と開発目標
Fig. 1. Characteristic of JIS aluminum alloys and development target.

1 ケーブル技術研究部
2 ケーブル技術研究部グループ長
3 自動車電装開発部
4 電装品技術部
5 電装品技術部グループ長

略語・専門用語リスト		
略語・専門用語	正式表記	説明
IACS	International Annealed Copper Standard	国際軟銅線標準 固有抵抗が $1.7241 \times 10^{-4} \Omega \cdot m$ (20°C) の焼鈍した純Cuの導電率を100% IACSとして表した導電率の表示方法
固 溶	Solid solution	2種類以上の元素が互いに溶解し、全体が均一の固相となっている状態
析 出	Precipitation	均一な固相から溶質元素が分かれて新しい相を形成すること
晶 出	Crystallization	均一な液相から溶質元素が分かれて新しい相を形成すること

2. 2 合金設計

2. 2. 1 JIS規格Al合金と開発方針

一般的なAl合金としてJIS規格のAl合金がある。図1に各合金系で伸びが10%以上での特性¹⁾と開発目標の関係を示す。引張強さと導電率はトレードオフの関係にあり、2000～7000系のAl合金では開発目標の導電率を大きく下回っていた。そこで、1000系Al合金をベースに導電率を低下させずに引張強さの向上を目指すことにした。

2. 2. 2 金属の強化機構

表2に金属の合金化による強化機構とその特徴を示す。固溶による強化では引張強さの向上が大きいものの導電率の低下が大きい。析出による強化では導電率の低下は小さいものの溶体化処理が必要となりコストがかかる。それに対して、晶出による強化では分散状態が特性に影響を与えるが、低コストで引張強さと導電率を両立できる可能性がある。そこで、まず晶出による強化を、その次に固溶による強化を試みることにした。

2. 2. 3 添加元素の選定

一般に金属の合金化では添加する元素によって合金の特性が大きく異なる。Alについてもさまざまな元素を添加したときの導電率に及ぼす影響²⁾、引張強さに及ぼす影響^{3) 4)}が調査されている。元素を添加した際の状態は状態図⁵⁾から調べることができる。これらに汎用性やコストを加味し、晶出による強化の添加元素としてFeを、固溶による強化の添加元素としてMg, Cuおよび第5元素を選定した。ただし、Cuと第5元素は多量に添加すると断線時に断線が発生しやすくなるのがこれまでの検討でわかっていたため、添加量はできるだけ少量となるようにした。

素を選定した。ただし、Cuと第5元素は多量に添加すると断線時に断線が発生しやすくなるのがこれまでの検討でわかっていたため、添加量はできるだけ少量となるようにした。

2. 3 アルミニウム合金開発

2. 3. 1 晶出による合金の強化

晶出による強化では、晶出物の分散状態によって特性の異なることが推定される。そこで、Fe含有量を一定にして晶出物の分散状態と特性の関係を調査した。電線の晶出物分散状態を図2に、各分散状態における電線の特性評価結果を図3に示す。導電率は分散状態によらずほぼ一定であったが、引張強さと伸びは微細な晶出物が数多く分散しているほど向上していることがわかつ

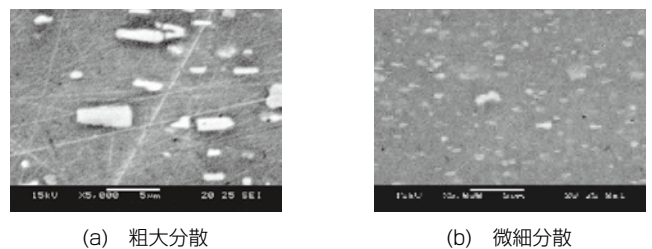


図2 電線中の晶出物分散状態
Fig. 2. Dispersed state of crystallized grains in wire.

表2 金属の強化機構と特徴
Table 2. Hardening mechanism and feature.

	メリット	デメリット
固 溶	引張強さの向上が大きい 铸造時に固溶 (低コスト)	導電率の低下が大きい
析 出	導電率の低下が小さい	溶体化処理が必要 (高コスト) 析出物の分散状態が特性に影響
晶 出	導電率の低下が小さい 铸造時に晶出 (低コスト)	晶出物の分散状態が特性に影響

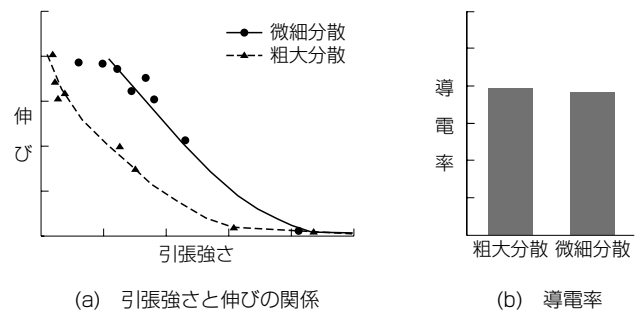
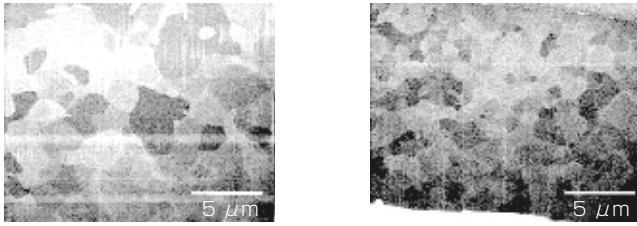


図3 晶出物分散状態が異なるAl合金電線の特性
Fig. 3. Characteristic of aluminum alloy wire of different dispersed state of crystallized grains.



(a) 粗大分散 (b) 微細分散

図4 晶出物分散状態が異なる Al 合金電線の組織と結晶粒径

Fig. 4. Structure and grain size of aluminum alloy wire of different dispersed state of crystallized grains.

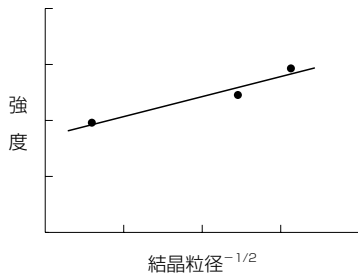


図5 晶出物分散状態の異なる Al 合金電線の結晶粒径と強度の関係

Fig. 5. Relation of grain size and strength of aluminum alloy wire of different dispersed state of crystallized grains.

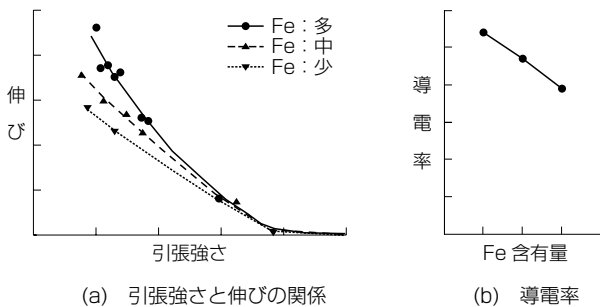


図6 Fe含有量が異なる Al 合金電線の特性

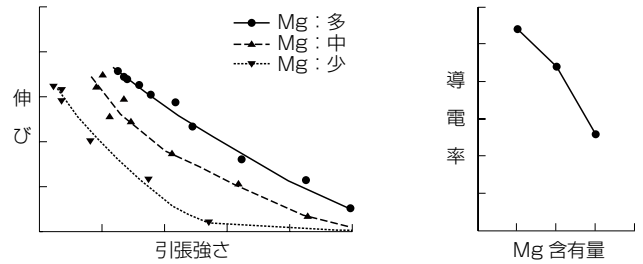
Fig. 6. Characteristic of aluminum alloy wire of different iron content.

た. 図4に晶出物分散状態が異なる電線の組織観察結果を示す. 晶出物が微細に分散している方が結晶粒は小さくなっており, 微細に分散した晶出物が再結晶の基点になったため結晶粒径が微細化したと考えられる.

一般に結晶粒径と強度の関係として, 式(1)に示すHall-Petchの式が知られている.

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで, σ_y は降伏応力, σ_0 は単結晶の降伏応力, k は材料ごとに異なる定数, d は結晶粒径である. 図5に晶出物分散状態の異なる Al 合金電線の結晶粒径と強度の関係を示す. Hall-Petchの式が成り立つことから, 結晶粒径の微細化が強度に影響を与えたと考えられる.



(a) 引張強さと伸びの関係 (b) 導電率

図7 Mg含有量が異なる Al 合金電線の特性

Fig. 7. Characteristic of aluminum alloy wire of different magnesium content.

表3 開発した Al 合金電線の特性
Table 3. Characteristic of developed aluminum alloy wire.

項目	引張強さ (MPa)	伸び (%)	導電率 (% IACS)
目標値	140 以上	10 以上	58 以上
開発電線	145.9	13.0	59.4

次に, Fe含有量と特性の関係を調査した. なお, サンプル作製は最も微細な晶出物が分散する条件で行った. 図6にFe含有量が異なる電線の特性評価結果を示す. Fe含有量が多いほど導電率は低下しているが, 引張強さと伸びが向上していることがわかる. Fe含有量の増加により晶出物の個数が増加し, 結晶粒径が微細になったためであると考えられる.

また, 作製した Al 合金電線の特性を調査したところ, 目標値は満足しているものの引張強さ・伸びは目標値下限であり, 導電率は十分に余裕があることがわかった. そこで, 他の強化方法との組み合わせでの強化を行うことにした.

2. 3. 2 晶出との組み合わせによる合金の強化

晶出による強化と合わせて固溶による強化を試みることにした. 固溶元素としてMgを選択し, 含有量と特性の関係を調査した. 図7にMg含有量が異なる電線の特性評価結果を示す. Mg含有量が多いほど導電率は大きく低下したが, 引張強さと伸びが向上した.

Mgの添加により伸びの特性は改善されたが, 引張強さが目標値下限であることがわかった. そこでFe, Mgに加えてCuおよび第5元素を添加した. それぞれの含有量を最適化することによって, 引張強さ・伸び・導電率すべての目標値を満足する Al 合金電線を開発することができた. 表3に開発した Al 合金電線の特性を示す.

3. アルミニウム合金の接続性評価

3. 1 課題と目標

ワイヤハーネスの接続部は大半が圧着によって電線と端子が接続されている. 表4に示すようにCuとAl合金ではさまざまな特性が異なっている. そのため, Al合金電線で懸念される接続部の課題としては, 強度低下に

表4 Al合金とCuの特性
Table 4. Characteristic of aluminum alloy and copper.

種類	Al合金	Cu
表面酸化膜	Al ₂ O ₃ : 絶縁体	Cu ₂ O: 半導体
線膨張係数 (1/°C)	23.6 × 10 ⁻⁶	17.7 × 10 ⁻⁶
引張強さ (MPa)	145.9	206 ~ 235

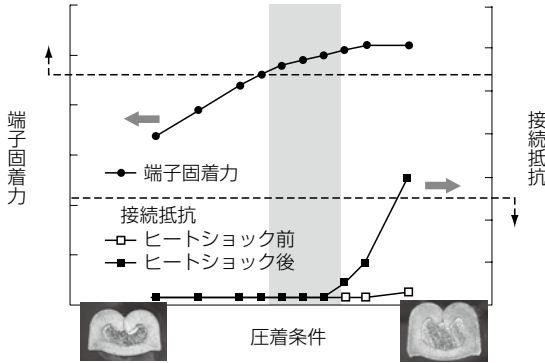


図8 圧着特性
Fig. 8. Characteristic of crimping connection.

よる端子固着力不足、強固な酸化膜による接続抵抗の上昇、線膨張係数の違いによる接続信頼性不足および異種金属接触による腐食が考えられる。そこで、Al合金電線の端子固着力、接続抵抗および接続信頼性の目標を1サイズ小さなCu電線と同等であることとし、接続部の開発を行った。

3. 2 評価結果

3. 2. 1 端子固着力と接続抵抗

一般に、圧着において接続抵抗は強く圧着するほど低下し安定するが、端子固着力は強く圧着しすぎると低下する傾向にある。Cu電線と同様の圧着を行った場合、Al合金電線は強固な絶縁性酸化膜のためCu電線より接続抵抗が高く不安定な接続になりやすい。そこで、端子に種々の独自の工夫を織り込み端子固着力と接続抵抗を評価した。接続抵抗の測定はヒートショック試験前後に行い、接続信頼性も併せて評価した。評価結果を図8に示す。横軸が圧着条件で左側ほど強く圧着した状態である(挿入図参照)。圧着条件を最適化することによって端子固着力・接続抵抗・接続信頼性を満足することができた。

3. 2. 2 異種金属接触腐食

異種の金属が水溶液中で接触することによって局部電池が形成され、卑な金属が腐食する現象が発生する。今回のようなAl電線とCu端子では接続部に水溶液が接触すると卑な金属であるAlが溶解してしまう。そこで、端子固着力・接続抵抗・接続信頼性を満足する条件で圧着した接続部に独自の防水処理を施し、JIS Z 2371 に準じた塩水噴霧試験を行った。図9に塩水噴霧試験後の接続抵抗の防水による変化を示す。防水を行った端子の圧着部に腐食は見られず、塩水噴霧試験後の接続抵抗も十分に目標を満足することができた。

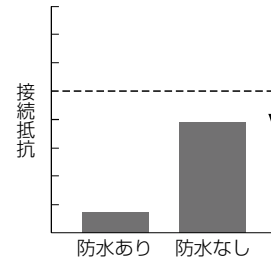


図9 塩水噴霧試験後の接続抵抗
Fig. 9. Contact resistance after salt spray test.

表5 ワイヤハーネス使用電線
Table 5. Electric wire used for wiring harness.

軽量化ワイヤハーネス		従来ワイヤハーネス	
種類	サイズ (mm ²)	種類	サイズ (mm ²)
Al合金電線	0.75	Cu電線	0.5
	1.25		0.85
	2		1.25
CA線	3		2
	5		3
	8	5	



図10 軽量化ワイヤハーネス外観
Fig. 10. Lightweight wiring harness.

4. 軽量化ワイヤハーネスの作製

開発したAl合金電線とCu被覆Al電線(CA線)を用いて軽量化ワイヤハーネスを作製した。2.5 mm²以下は開発したAl合金電線、3 mm²以上はCA線を使用した。表5にワイヤハーネスに使用した軽量化電線と対応する従来のCu電線を示す。作製したワイヤハーネス外観を図10に、Cuワイヤハーネスとの重量比較を図11に示す。開発したAl合金電線と接続技術およびCA線を用いた軽量化ワイヤハーネスでは従来のCuワイヤハーネスと比較して20%の軽量化を達成することができた。作製したワイヤハーネスを試験車に搭載して接続抵抗の変化を調査した。図12に接続抵抗の経時変化を示す。車載期間2500時間後では接続抵抗に変化は見られなかった。

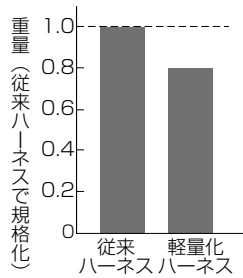


図 11 ワイヤハーネスの重量比較
Fig. 11. Comparison of weight of wiring harness.

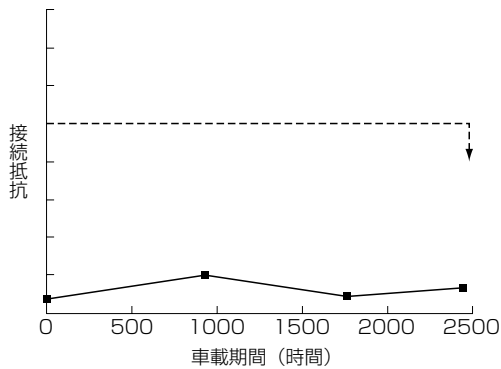


図 12 車載軽量化ワイヤハーネスの接続抵抗
Fig. 12. Contact resistance of lightweight wiring harness.

5. む す び

軽量化ワイヤハーネス用の電線導体としてAlにFe, Mg, Cuおよび第 5 元素を添加することで高強度高導電Al合金電線を開発し、接続に問題がないことを確認した。開発したAl合金電線とCA線を組合わせて作製したワイヤハーネスは、従来のCuワイヤハーネスと比較して 20%の軽量化を達成した。今後のさまざまな自動車への搭載および他分野への用途拡大を期待する。

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，pp.37-41，2007
- 2) 日本金属学会編：金属データブック，改訂3版，丸善，p.180，1993
- 3) 40周年記念事業実行委員会記念出版部編：アルミニウムの組織と性質，軽金属学会，p.160，1991
- 4) 上杉ほか：「第一原理シミュレーションによる添加元素の最適化設計」，軽金属，Vol.54，No.2，pp.82-89，2004
- 5) T. B. Massalski: "Binary Alloy Phase Diagrams Volume 1", American Society for Metals, pp. 3-4, 88-188, 1986