

# HEV/EV用高柔軟耐熱アルミケーブルと接続技術

自動車電装カンパニー 齊田博之<sup>1</sup>・西村稔<sup>3</sup>・蔵楽貞敏<sup>4</sup>・望月淳<sup>5</sup>  
先端技術総合研究所 渡部亮<sup>2</sup>

## Highly Flexible Heat-resistant Aluminum Cable and Connection Technology for HEV/EV

H. Saita, R. Watanabe, M. Nishimura, S. Zouraku, and M. Mochizuki

近年、環境保護への関心の高まりと各国の規制強化の潮流から、ハイブリッド電気自動車（HEV）や電気自動車（EV）の市場拡大がみこまれている。それらに用いられる電源システムは高出力化の傾向にあり、使用するケーブルは大電流化に対応するため大サイズ化し、重くかつ曲げにくくなる傾向がある。このような背景から、ケーブルの軽量化と柔軟性向上のニーズが高まっており、これにこたえるためわれわれはアルミ導体を採用することにより軽量化を行いつつ、従来の銅ケーブルよりも曲げやすいケーブルを開発した。加えて、アルミ導体と端子の接続を確かなものとするため、従来の圧着に代わる接続方式もあわせて開発した。

The hybrid electric vehicle (HEV) and electric vehicle (EV) market is expected to expand as a result of the recent growing interest in environmental protection and tighter environmental regulations in each country. The newer the power supply systems of these vehicles are, the higher their output power becomes. To carry high current, the cables of the power supply systems also tend to be larger in size and weight and less flexible. Against this background, there are growing demands for weight reduction and more flexibility of the cables. To respond to this requirement, we have developed a more flexible cable. This cable is also lighter in weight than a conventional copper cable by the use of an aluminum conductor. In addition, we also have developed a connection method that replaced the conventional crimp method to secure the connection between the aluminum conductor and the copper terminal.

### 1. ま え が き

近年の燃費向上やCO<sub>2</sub>排出量低減等の環境規制に対応するため、HEV/EVに代表される電動車両の市場拡大が加速している。電動車両の電源システムは高電圧化および大電流化が進み、接続に用いられるケーブルも大サイズ化の傾向にある（図1）。

ケーブルの大サイズ化は重量の増加をまねき燃費に悪影響をおよぼすことから、軽量化策として導体のアルミ化が進んでいる。しかしアルミは従来の導体材料である銅と比べ導体抵抗が高く、同じ導体抵抗にするには導体断面積を大きくする必要がある。そのため、さらなる導体の大サイズ化とケーブルの柔軟性低下が進み、狭い車

体スペースへのレイアウトおよび組み付け作業が困難になるという問題が顕在化している。

加えてHEVを例にとると、ケーブルはエンジンルーム

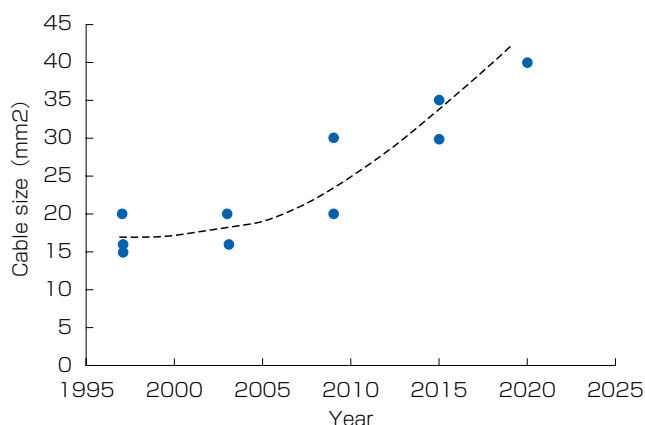


図1 ケーブルサイズの傾向  
Fig. 1. Cable size trend.

1 電装品開発部 主席研究員  
2 材料研究部 主席研究員  
3 電装品技術部 グループ長  
4 電装品技術部 主席技師  
5 電装品開発部 グループ長

やエキゾーストパイプ近傍にレイアウトされるため耐熱性も要求されることから、従来のポリエチレン絶縁体を用いたケーブルは、絶縁体に架橋と呼ばれる処理をほどこすことで耐熱性を向上させている。しかし、架橋は絶縁体を硬くするため、さらなる柔軟性低下に拍車をかけてしまう。

一方アルミ導体の採用においては、従来の圧着方式を用いるとアルミ表面の強固な酸化皮膜の影響で、圧着部の接触抵抗が増加してしまうという問題が知られている。

本稿では、これらの問題を解決するために行った、高柔軟耐熱アルミケーブルの開発と、アルミ導体と端子の接続技術の開発について報告する。

## 2. 高柔軟耐熱アルミケーブルの開発

柔軟成分と耐熱成分のバランスを取った熱可塑性エラストマー (TPE: Thermoplastic Elastomer) を用いることにより、従来品と同等以上の柔軟性と耐熱性を有するアルミケーブルを開発した (表 1, 図 2)。

### 2.1 ケーブル柔軟性への寄与度

ケーブルの柔軟性は、大きく導体の柔軟性と絶縁体の柔軟性の合算として考えられる。その割合は、導体の寄与度は小さく絶縁体の寄与度が支配的であり、その傾向は导体サイズが大きくなるとより顕著となる。架橋ポリエチレン電線で見ると、导体単体の曲げ反力は、全体のおよそ 15%にしかならない (図 3)。よって、ケーブルの柔軟性向上には、絶縁体の柔軟性向上が重要なポイントとなる。

表 1 従来品と開発品の仕様比較

Table 1. Comparison of specifications of conventional products and developed products.

	単位	従来品	開発品
ケーブルサイズ	mm <sup>2</sup>	20	35
导体材料	-	Cu	Al
撚構成	本/本/素線径 (mm)	19 / 13 / 0.32	19 / 24 / 0.32
导体外径	mm	6.5	8.7
导体抵抗	mΩ / m	0.98	0.88
絶縁体材料	-	XLPE	TPE
絶縁体厚	mm	1.1	1.4
仕上外径	mm	8.7	11.5
柔軟性 (曲げ反力)	N	34	28
耐熱性	℃	125	150
重量	g/m	215	155

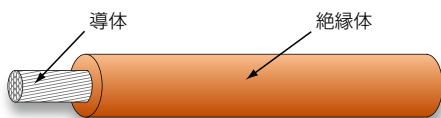


図 2 ケーブル構造  
Fig. 2. Cable structure.

### 2.2 絶縁体の材料選定

絶縁体の柔軟性を向上させるためのベース材料として、TPEを選定した。TPEは、従来の絶縁体材料である架橋ポリエチレン (XLPE) より柔らかく、シリコンゴムより硬い材料である。これは柔軟性の高い材料ほど小さな値を示すショア硬度からわかる (表 2)。シリコンゴムは、今回の開発目標である高柔軟性・高耐熱性に優れた材料であるが、ケーブルにする際は、材料が高価であることに加え、加硫などの専用設備が必要なためケーブルコストを押し上げてしまう。また特性においても引き裂き性や引張強度が低い。

### 2.3 TPEの配合

TPEは柔軟成分と耐熱成分の2成分系の組成よりなる材料である。柔軟性と150℃耐熱性の特性を有する絶縁体材料を目標として、組成材料、組成比の異なるA~DのTPEを検討した。今回、バランスの優れた絶縁体材料としてタイプCを選定した (表 3)。

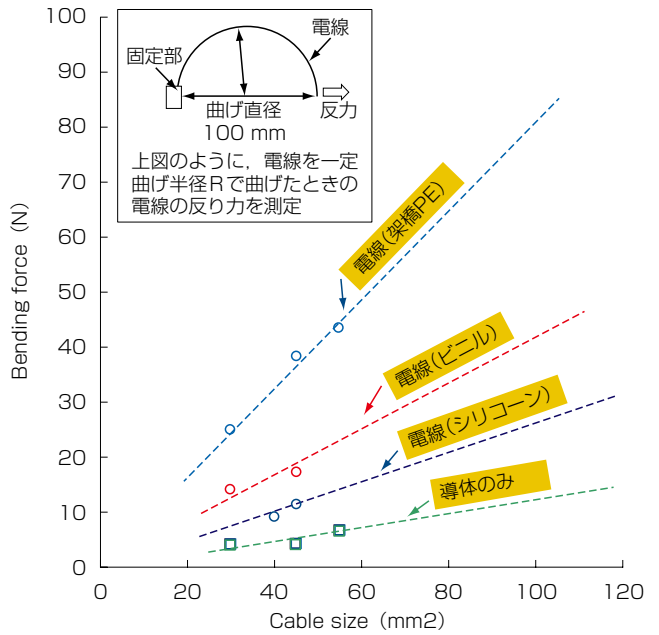


図 3 ケーブルの柔軟性  
Fig. 3. Cable flexibility.

表 2 ショア硬度

Table 2. Shore hardness.

シリコンゴム	TPE	架橋ポリエチレン
A 50 ~ 70	A 75 ~ 90	A 95 以上

表 3 配合タイプ

Table 3. Formulation type.

タイプ	A	B	C	D
架橋	無	有	有	有
柔軟性	◎	◎	○	×
加熱変形性	×	△	○	◎

2. 4 評価結果

開発品の評価結果を示す (表 4).

柔軟性の指標として曲げ反力を用い、図 4 に示す方法で測定を行った。その結果、従来の銅導体架橋ポリエチレンケーブルと同等以上の柔軟性を有することも確認できた。そのほか、自動車用規格に基づいた評価試験も合格しており、HEV/EV用ケーブルとしての要件を満足することができた。

3. アルミ導体とすずめっき端子の接続技術

高いエネルギーを効率的に接合部に与えることにより、これまで困難とされていたすずめっき端子への超音波接合技術を開発した。接合部の引張強度は規格を満たし、サーマルショック試験による耐久試験後の接合部接触抵抗も規格を十分に満足することを確認した (表 5)。

表4 開発品 35sq アルミケーブルの試験結果 (一部)  
Table 4. Test result of prototype cable (A part of all the tests).

項目	規格	要求特性	結果
柔軟性 (曲げ反力)	自社規格 <sup>1)</sup>	34 N以下 (銅導体架橋ポリエチレンケーブル)	合格 28 N
長期耐熱性	ISO 6722	絶縁体破壊なし (150℃ x 3000 時間)	合格
加熱変形性	JASO D 624	絶縁体破壊なし (150℃ x 4 時間)	合格
耐薬品性		絶縁体破壊なし	合格
難燃性		水平燃焼試験にて 30 秒以内に消炎	合格

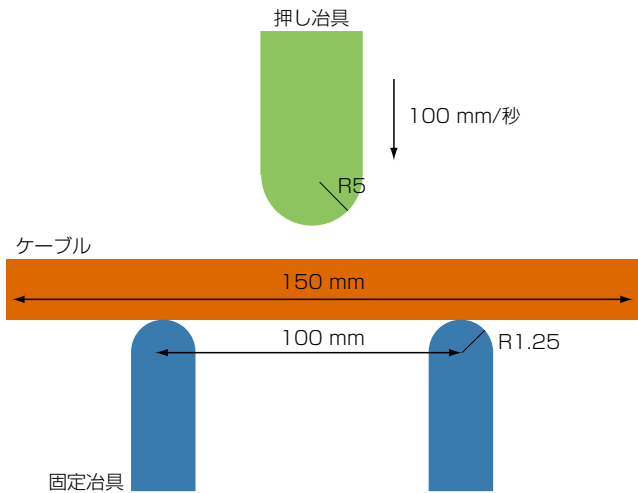


図4 柔軟性試験方法  
Fig. 4. Test method of flexibility.

表5 試験結果  
Table 5. Test result.

項目	規格	試験方法	結果
引張強度	500 N以上	速度 100 mm/min	542 N
接触抵抗	0.3 mΩ以下	初期	0.05 mΩ
		サーマルショック試験後 (-40℃~150℃ X 3000 回)	0.06 mΩ

3. 1 接続方式の選定

ケーブル導体と端子の接続方式として 3 つの代表的方式を示す (表 6)。

アルミ導体と端子を圧着方式で接続する場合、アルミ表面の酸化皮膜の破壊が課題となる。小サイズアルミ電線 (0.35 mm<sup>2</sup>~1.5 mm<sup>2</sup>) の場合は、端子の圧着パレル内側のセレーション形状を工夫することで解決が図られている。しかし、大サイズアルミ電線の場合は小サイズ電線に比べ素線数が多くなり、セレーションに接触せず酸化皮膜が破壊されない素線数が増える。端子圧着部の断面写真の薄青及び濃青の素線がこれにあたり、導体の大径化につれ、増えていくことがわかる (図 5)。薄青及び濃青の素線と端子間の接触抵抗は、端子に接触している灰色の素線の接触抵抗に比べ大きな値を示している。これにより全体の接触抵抗値が上昇してしまう (表 7)。

次に、抵抗溶接方式はアルミ素線同士の溶融接合ができるため、圧着でみられるような酸化皮膜による接触抵抗の上昇はない。しかし、銅とアルミの融点の差が大きく接合する前にアルミ導体が溶融してしまうため、銅端子とアルミ導体の接続には適さない。

融点：銅=1083℃ アルミ=660℃

これらに対し、超音波接合はアルミ導体素線の酸化皮

表6 接続方式  
Table 6. Connection method.

項目	圧着	抵抗溶接	超音波接合
アルミ素線同士の接続	×	◎	◎
アルミ導体と裸銅端子の接続	△	×	◎
電気特性	○	△	◎
機械特性	◎	△	○
総評価	×	×	○

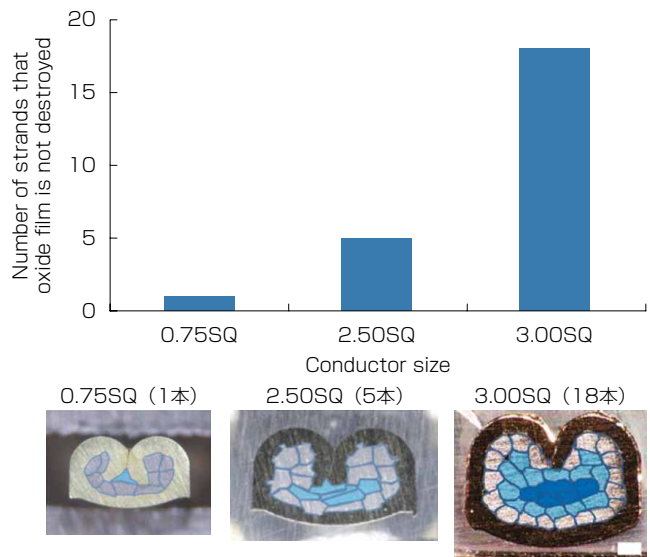


図5 酸化皮膜が破壊されない素線数  
Fig. 5. Number of strands that oxide film is not destroyed.

膜除去効果が高く、さらに材料の融点に影響されないためこの方式を選択した。

表7 接触抵抗 端子-導体層

Table 7. Contact resistance Terminal-Conductor layer.

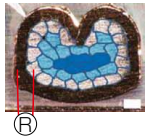
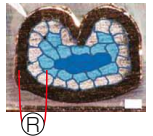
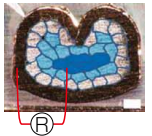




端子-第1層間	端子-第2層間	端子-第3層間	
5	30~60	500~1000	
3.00SQ	3.00SQ	3.00SQ	
			
⑧	⑧	⑧	
層色	灰	薄青	濃青

表8 超音波接合試験結果

Table 8. Ultrasonic bonding test result.

端子	投入エネルギー (J)	写真	結果
	8500		接合しない
	23000		接合した (端子割れ発生)

### 3.2 すずめっき端子への超音波接合

自動車用ワイヤーハーネスに用いられる端子は良好な接続を確保するため、通常すずめっきがほどこされている。しかし、すずの融点が低く、超音波接合時にすずめっきの液相化がおこることから、一般にすずとアルミの超音波接合は難しいとされている。

融点：銅=1083℃。アルミ=660℃。すず=232℃

そこで、端子側から投入エネルギーを段階的に加え、アルミ導体とすずめっき端子が接合できる条件を調査した。その結果、低いエネルギー領域では接合せず、高いエネルギー領域では接合するものの端子割れの問題が発生した(表8)。

これは、端子側から投入したエネルギーが接合部から端子全体に広がり、幅が狭く強度の弱い箇所では割れを生じさせたものである。

エネルギーの投入方向を端子側から導体側に変更したとしても、導体素線にエネルギーが加わり素線切れが発生する(図6)。

1方向からの高いエネルギーの投入は、導体と端子にかかる負担が高い。そこで投入方向を上下に分割し、導体と端子に与えるエネルギーを調整することに加え、そのエネルギーが接合部に効率的に加わるよう固定治具を工夫した結果、端子割れおよび素線切れなく接合することができた(図7)。

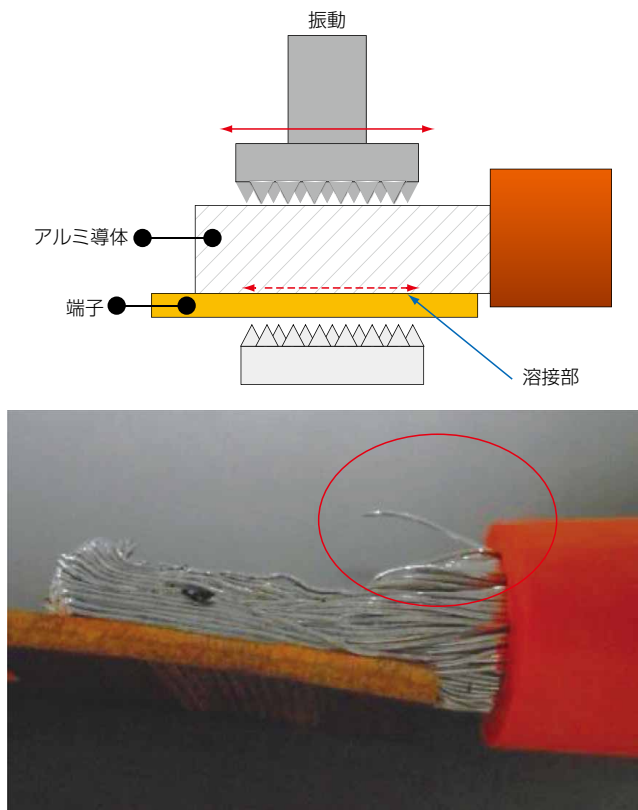


図6 導体側からエネルギー投入  
Fig. 6. Energy input from conductor side.

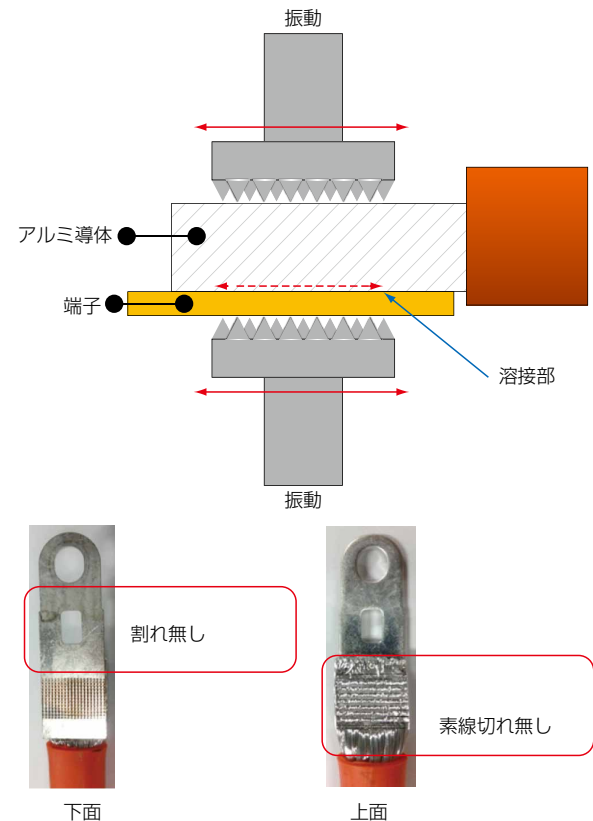


図7 上下同時にエネルギー投入  
Fig. 7. Energy input from top and bottom.



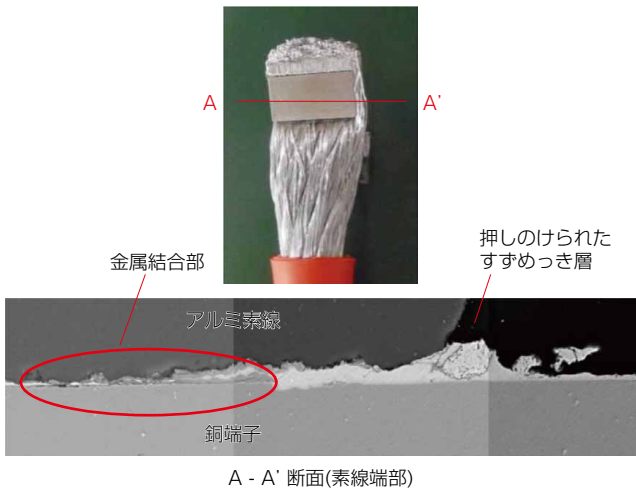
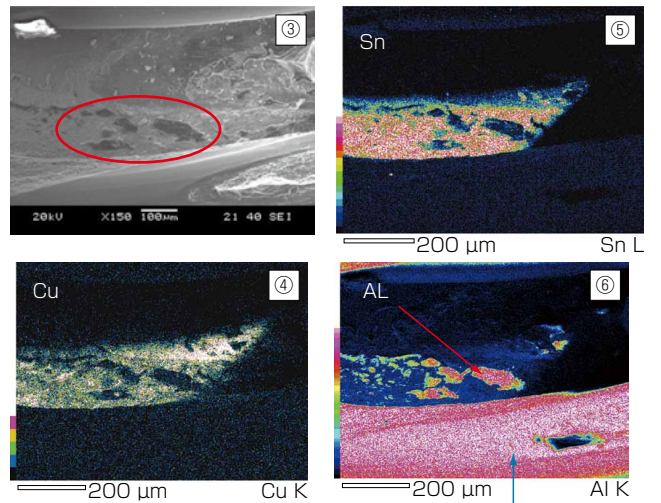


図8 接合部 断面写真  
Fig. 8. Cross section photo of connection.



注. このピンク部は、アルミ素線がそのまま残ってしまっているだけであり、アルミ残留部ではない

図10 接合部拡大写真EDS  
Fig. 10. Magnified photo and EDS.

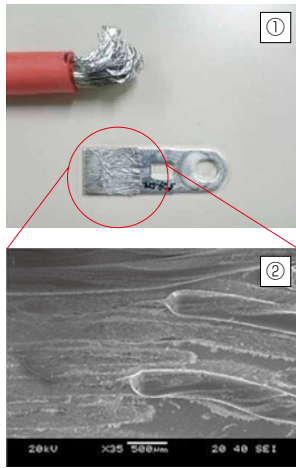


図9 接合部写真  
Fig. 9. Photo of Bonding area.

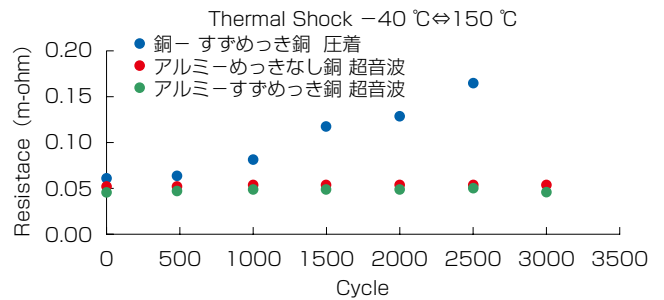


図11 サーマルショック試験結果  
Fig. 11. Thermal shock test result.

### 3. 3 開発品の評価結果

開発品の接合部断面写真を示す (図 8)。

高いエネルギーの投入により溶融したすずめっきを押しつけ、アルミ導体と銅端子が直接接触し金属結合ができていたことが確認できた。

続いて、開発品のピール試験後の接合面分析結果を示す (図 9, 図 10)。写真③の濃灰に見える部分は、EDS分析画像⑥におけるピンクの部分でアルミの凝集破壊がみられ、アルミとすずめっき銅端子が強固に接合していることが確認できた。また、サーマルショック試験結果から、従来の銅ケーブル圧着品よりも接触抵抗が安定していることがわかる (図 11)。

### 4. む す び

HEV/EVに用いられるケーブルとして、新配合TPEを絶縁体に用いて、高耐熱性と柔軟性をあわせ持つアルミケーブルを開発した。また、上下2方向からの超音波振動付与技術により、信頼性の高い接続方式を開発した。さらなる大径化ケーブルに対応可能な技術開発を進め、自動車の進化に貢献していく。

### 参 考 文 献

- 1) 電気協同研究会 第47巻 第3号