

技術紹介

9

EV 市場に向けた超音波接合による結線技術開発

The development of wire connection technology by ultrasonic welding for the EV market

亀田 健二	Kenji Kameda	コネクタ事業部要素技術開発部 主任
山崎 健二	Kenji Yamazaki	コネクタ事業部要素技術開発部 技術マネージャー
白鳥 雅之	Masayuki Shiratori	コネクタ事業部要素技術開発部 主任
中村 隼努	Hayato Nakamura	コネクタ事業部要素技術開発部 主任
乙戸 良介	Ryousuke Otsuto	コネクタ事業部要素技術開発部

キーワード：超音波接合、低抵抗化、銅ケーブル、アルミケーブル

Keywords: Ultrasonic welding, Low-resistance, Copper wire, Aluminum wire

要 旨

近年の環境意識の高まりにより、世界の電気自動車市場は益々拡大しつつあります。電気自動車の充電部や駆動部、インフラ側の充電器の接続では、通電時の発熱を抑制するためのケーブルの太径化や、それに伴うケーブル軽量化としてのアルミニウム線を使った結線が推進されています。超音波接合は、太径ケーブルやアルミニウムケーブルで低抵抗接続を実現するための結線手法として、その利用が拡大しています。本報告では、当社でこれまで行ってきた銅ケーブルやアルミニウムケーブルを用いた超音波接合による結線技術開発の取り組みについて、ご紹介します。

SUMMARY

The electric vehicle market has expanded worldwide due to rising environmental awareness recent year. In connecting the charging and driving parts of electric vehicles and EV chargers, large-diameter wires are being used to suppress heat generation during power supply, and aluminum wires are being used to reduce cable weight. The use of ultrasonic welding is expanding as a method for realizing low-resistance connection of large-diameter wires and aluminum wires in cable harnesses. We introduce the development of wire connection technology by ultrasonic welding using copper wires and aluminum wires that we have promoted.

1. はじめに

世界の電気自動車市場は、近年の環境意識の高まりにより益々拡大しつつあります。電気自動車の充電部や駆動部、インフラ側の充電器の接続では、数百 A という大きな電流が流れるため、使用されるコネクタハーネスでは通電時の発熱を抑制する必要があり、ケーブルの太線化が進んでいます。また、太線化に伴い重量が増加することから、ケーブル導体は銅からアルミニウムへの切り替えも進んでいます。ただし、銅線、アルミニウム線に関わらず、ケーブルが太くなることにより芯線数が増加し、結線時に芯線同士に生じる電気抵抗が増加するため、結線手法に対しても工夫が必要となります。

車載で使用される結線では主に圧着が使用されています。圧着の場合、端子が芯線をかきめていく際にかかる応力で芯線表面の皮膜が破壊されることにより、抵抗が安定していきます。また、端子内側にセレーションを設けることで端子と芯線間の抵抗をより効果的に下げる構造となっています。しかし、上記で使用される太線の芯線数では、セレーションに接しない芯線数が多く十分に酸化皮膜を破壊できないため、抵抗を下げるのが困難です。

この太線結線の低抵抗化を達成するために、昨今、超音波接合を使った結線の利用が拡大しています。超音波接合は、端子とケーブル導体に荷重を加えた状態で超音波を印加することで、芯線表面や端子表面の皮膜を破壊し新生面同士を固相拡散接合させる手法です。

当社においても、超音波接合による結線の技術開発を推進しており、電気自動車向けのパワー系コネクタの結線手法の主力となりつつあります。本報告では、これまで行ってきた銅ケーブルやアルミニウムケーブルを用いた結線に対する取り組みを紹介します。

2. 超音波接合

2.1. 超音波接合

超音波接合は金属接合の中の固相接合の一つになります(表 1)。端子とケーブルの接合では、概略図(図 1)に示しますように接合アンビル上に端子およびケーブル導体を設置し、これらの上部から接合チップで荷重を加えた状態で、超音波振動を印加します。金属接合の場合、一般的に超音波の周波数は 20 kHz、振動振幅は数十 μm 程度で行われます。この振動と荷重により、ケーブルの芯線同士は摩擦を繰り返し、表面の皮膜が除去された互いの新生面が接近し接合します。これを繰り返し、最終的にケーブル導体と端子界面の接合に至ります。

超音波接合は、金属の接合に対し次のようなメリットが挙げられ、前述したコネクタハーネスの用途に非常に適した接合手法であると言えます。

- ・ 非鉄金属や異種金属の接合が容易である。
- ・ 接合部以外への熱の影響が小さい。
- ・ 電気的な性能が優れている。

表 1. 金属接合の種類

溶接	レーザー溶接
	抵抗溶接
	ガス溶接
固相接合	超音波接合
	拡散接合
ろう付け	銅ろう付け
	銀ろう付け
	はんだ

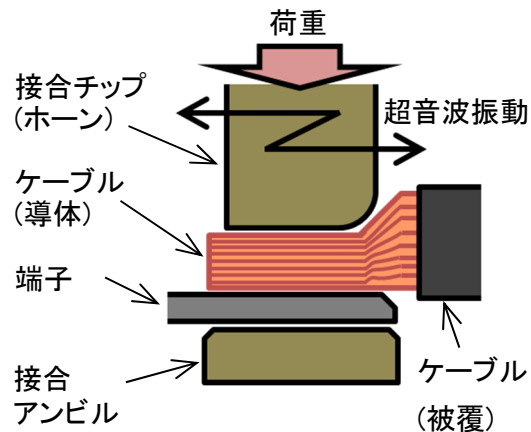


図 1. 超音波接合概略図

2.2. 超音波接合の性能評価

2.2.1. 接合強度の測定方法

超音波接合を行った接合部材の接合強度測定方法の概略図を図 2 に示します。接合部の上下を挟むように、端子先端部と逆端の導体部を引張圧縮試験機に固定した状態で、速度 100 mm/min でケーブル長手方向に引っ張った時の引張せん断荷重の最大値を測定しました。

2.2.2. 接合部の電気抵抗測定

超音波接合を行った接合部の抵抗測定の方法を概略図(図 3)に示します。まず、端子とケーブル逆端の導体部を図のように配線し、四端子法にて 1 A 通電時の電圧降下 V から接合部材全体の抵抗を算出します。同様に 1 A 通電時の電圧降下 V_0 から接合部材と同等長さのケーブル導体抵抗を算出し、全体の抵抗値から差し引いた値を接合部の抵抗とします。

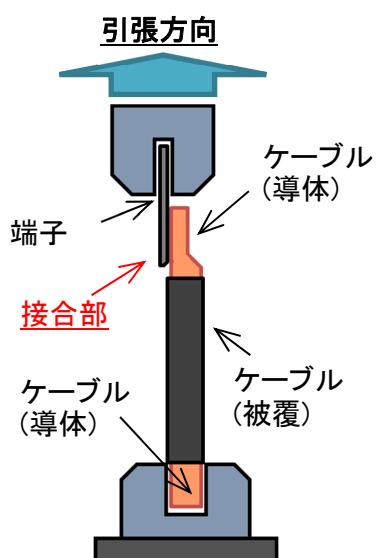


図 2. 引張せん断試験

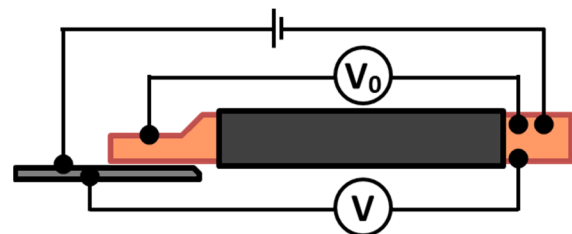


図 3. 電気抵抗測定

3. 超音波接合結線の接続信頼性

3.1. 銅線結線：異種金属(めっき)による影響

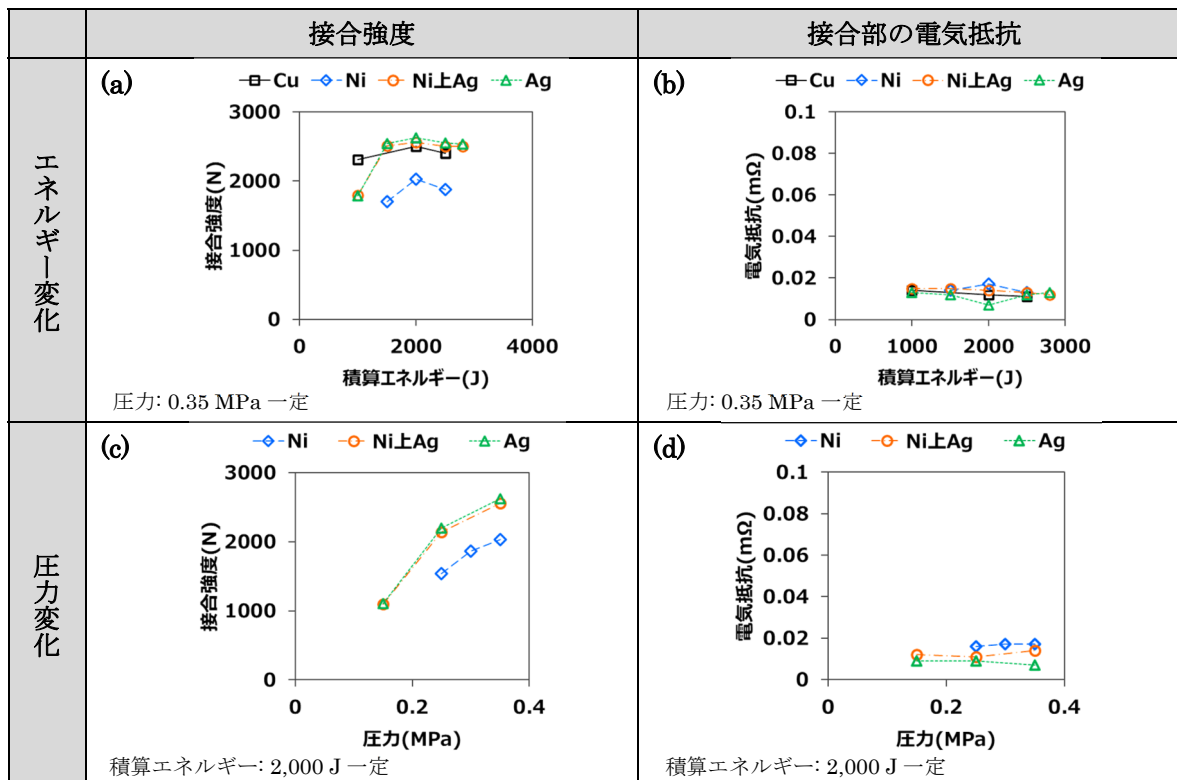
超音波接合のメリットとして、異種金属接合が容易であることが挙げられます。ここでは、端子表面のめっき処理条件の異なる端子(表 2)を使用し、銅線結線時の異種金属接合の影響を確認しました。

表 3(a)、(b)に接合部材に印加する積算エネルギーをパラメータとした場合の接合強度と接合部の電気抵抗、(c)、(d)に部材にかかる圧力をパラメータとした場合の接合強度と電気抵抗を示します。銀めっき及びニッケル上銀めっきについては、同種金属の接合となるめっき無しの条件とほぼ同等の接合強度が得られております。ニッケルめっきは、積算エネルギー変化、圧力変化とともに同条件の他のめっきに比べ接合強度が低く、めっきの表面硬度や再結晶温度の高さが影響した結果と考えられます。電気抵抗については、どのめっき種についても条件による強い依存性は見られず、非常に良好な特性が得られており、電気接点の接合として有効な手法と言えます。

表 2. 接合部材

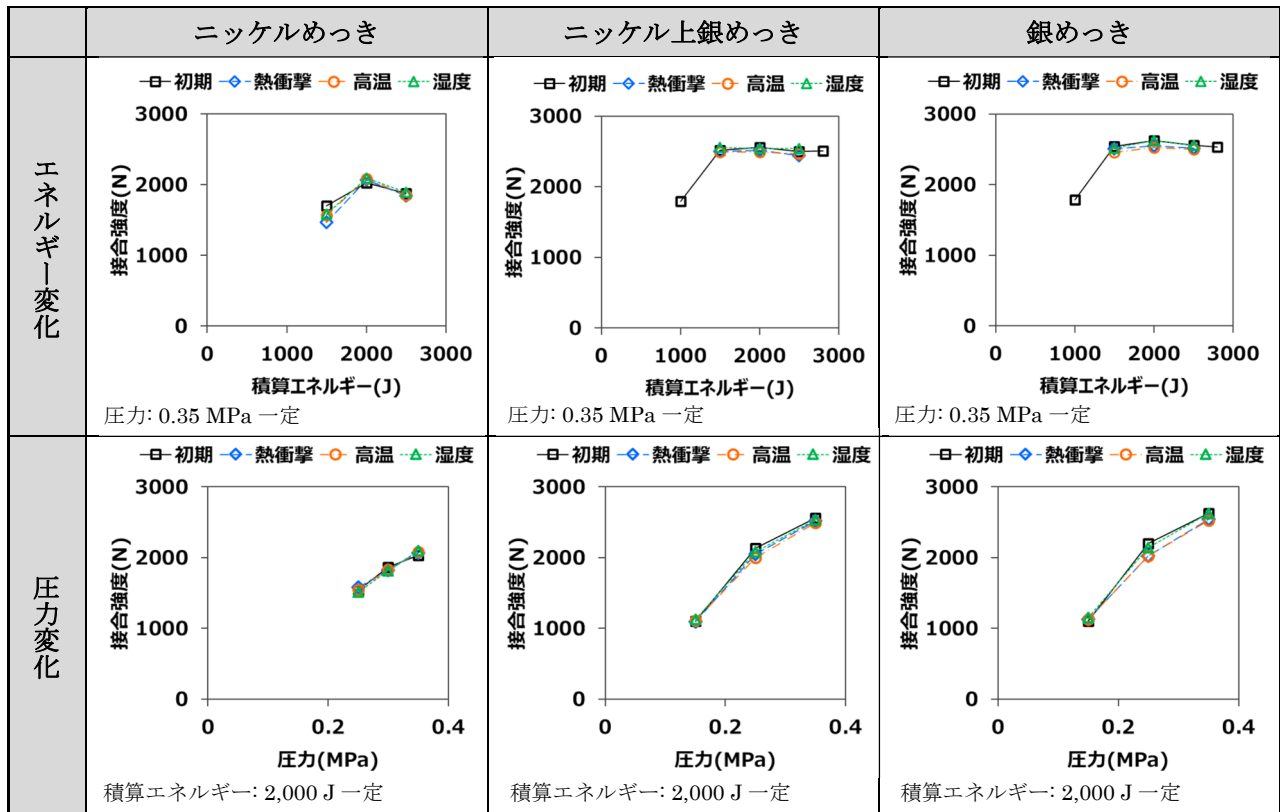
ケーブル	端子
電線種: 14 sq 二重複合銅より線	母材: C1020-1/2H t0.8
線構成: 7/7/25/0.12	めっき: めっき無(銅)、ニッケル、ニッケル上銀、銀

表 3. 14 sq 銅ケーブル接合時の端子めっき種による性能変化



次に、異種金属接合での環境試験の結果を示します。前述した接合条件に対し、熱衝撃試験、高温試験、湿度試験を行い、それぞれの試験前後の接合強度の変化を表 4 に、接合部の電気抵抗の変化を表 5 に示します。表からわかるように低エネルギー、低圧力の初期強度の低い条件においても、接合強度、電気抵抗ともに大きな変化が見られず、超音波接合が耐環境性能においても優れた手法であることが確認できます。

表 4. 14sq ケーブル接合時の端子めっき種による耐環境性能の変化 ①接合強度

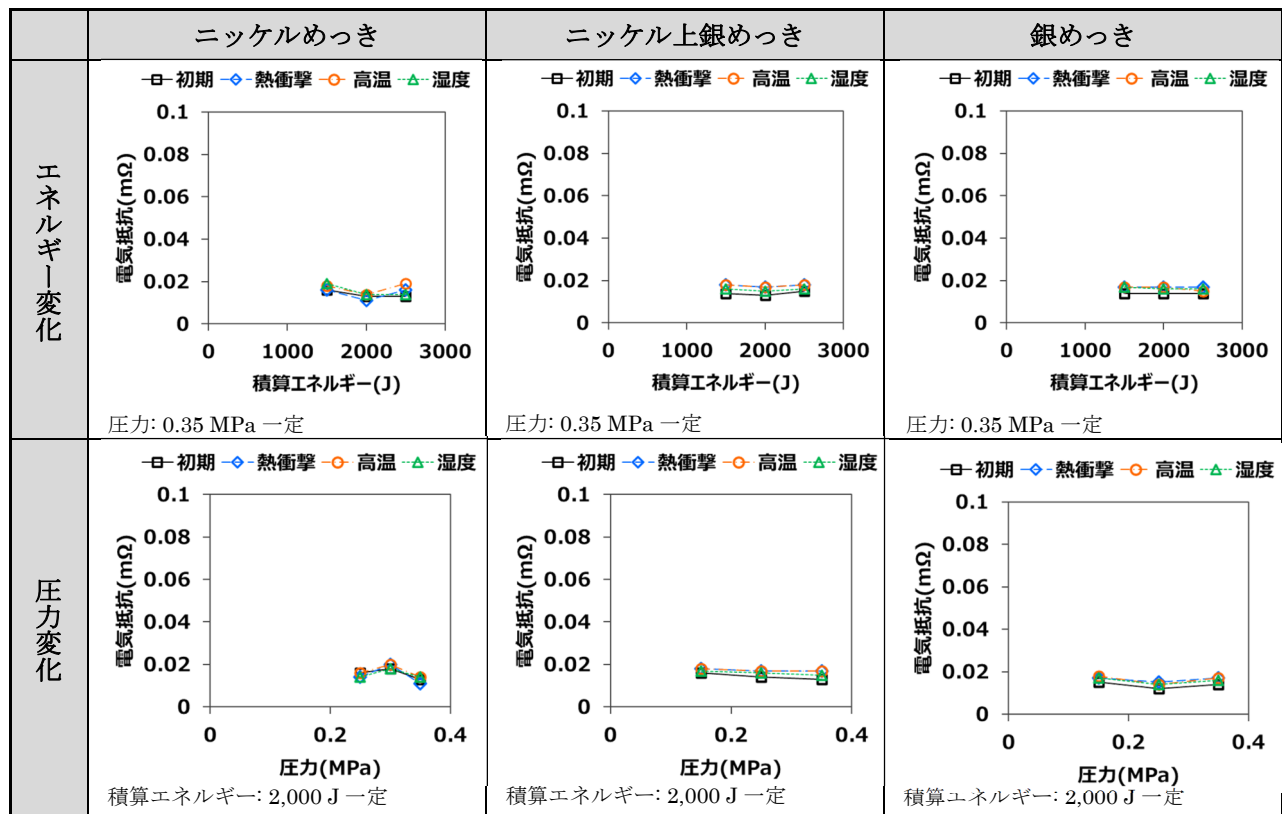


熱衝撃試験: -40°C/150°C、30 min/30 min、1000 cycle

高温試験: 150°C、1000 h

湿度試験: 60°C、95 %RH、1000 h

表 5. 14 sq ケーブル接合時の端子めっき種による耐環境性能の変化 ②電気抵抗



熱衝撃試験: -40°C/150°C、30 min/30 min、1000 cycle

高温試験: 150°C、1000 h

湿度試験: 60°C、95 %RH、1000 h

3.2. 銅線結線：太線結線での接合性能

ここでは、前述の評価結果に対し、ケーブルサイズが大きく芯線数が増加した場合(表 6)の接合性能を確認しました。今回接合を行った 50 sq 接合部材(図 4)の接合強度と接合部の電気抵抗を表 7 に示します。ケーブルサイズが大きくなると接合部の高さが高くなる、あるいは接合部の面積が広くなるため、接合部に投入するエネルギーを大きくする必要があります。前述した 14 sq ケーブルでは積算エネルギー 2,000 J で 2,500 N 程度の接合強度が得られていましたが、同レベルの接合強度を得るためには 6,000 J を超えるエネルギーが必要になることがわかります。また、端子・芯線間の接合界面に十分なエネルギーを投入するためには、芯線同士がより密着した状態で接合されている必要があります。USCAR38-1^{*}によれば、式 1 の電線断面の圧縮率が銅線の場合で 95~120 %の間(typical 107 %)で許容されています。¹⁾ 今回の接合条件では、6,500 J と 8,000 J の境界となる 100 %付近で接合強度が大きく変わることが確認できます(図 5)。これに対し、接合部の電気抵抗は 14 sq ケーブルの結果と同様に低く安定しており、太線結線においても超音波接合が有効であると言えます。

^{*}米国自動車評議会の超音波溶接されたワイヤ終端の性能仕様

表 6. 接合部材

ケーブル	端子
電線種: 50 sq Cu 集合より線	母材: C1100-1/2H t 2.0
線構成 1,600/0.21	めっき: ニッケル上銀



図 4. 接合部材の外観

表 7. 50 sq ケーブル接合時の接合性能

接合強度	接合部の電気抵抗
<p>圧力: 0.55 MPa 一定</p>	<p>圧力: 0.55 MPa 一定</p>

$$C(\%) = \frac{F}{A} \times 100 \quad \dots \text{式 1}^{1)}$$

C: 圧縮率

F: 接合後の電線断面積

A: 接合前の電線断面積

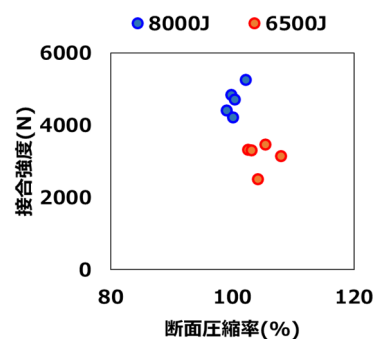


図 5. 電線圧縮率と接合強度の関係

3.3. アルミニウム線結線

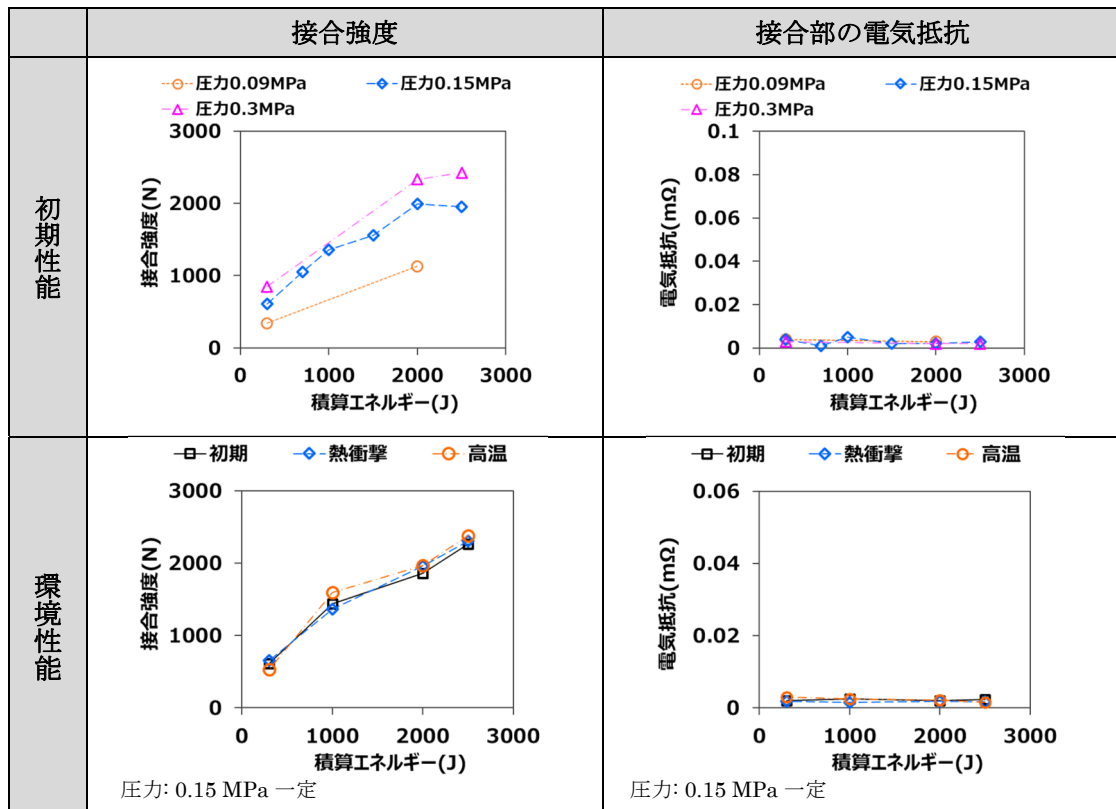
アルミニウムは他の金属と比べ酸化皮膜の成長が早く、大気中ではバイヤライトなどの化合物層もできるため、厚い皮膜となり抵抗が高くなります。²⁾また Holm の行った荷重-抵抗特性の評価³⁾によれば 1,000 N の荷重に対して新生面の状態で 0.004 mΩ 程度、そこから皮膜の状態により 0.1 mΩ 程度まで抵抗が増加するとあります。このようなアルミニウム線に対し表 8 に示す部材を用いて超音波接合を行った結果を表 9 に示します。

アルミニウム線は潰れやすいため接合条件は銅線に対し比較的低エネルギー、低圧力となり、2,000 J を超えるエネルギー条件で電線強度の 9 割近い接合強度となり良好な結果が得られております。前述した圧縮率では、アルミニウム線の場合で 60~116 %の間(typical 88 %)で許容されているのに対し¹⁾、図 6 に示す今回の接合結果においても 110 %付近から接合強度が安定傾向になることが確認できます(図 7)。電気抵抗については、銅線同様低く安定しており超音波によりアルミニウムの強固な皮膜がしっかり破壊されていることが確認できます。

表 8. 接合部材

ケーブル	端子
35 sq アルミニウム集合より線	C1100-1/2H t 2.0
線構成 172/0.491	めっき: ニッケル上銀

表 9. 35 sq アルミニウムケーブル接合時の接合性能



熱衝撃試験: -40°C/150°C、30 min/30 min、500 cycle

高温試験: 150°C、500 h



図 6. 接合部の外観

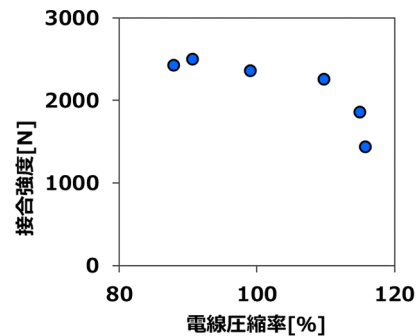


図 7. 電線圧縮率と接合強度の関係

4. まとめ

今回、超音波接合を使用した銅線結線、アルミニウム線結線技術の開発を行い、接続部の低抵抗化、環境負荷に対する電氣的な安定性が確認できました。今後はアルミニウムケーブルの結線を中心とした超音波接合プロセスの現象に対し、接合ツールや接合部材にかかる振動、接合部材に生じる温度といった多方向からの視点で開発を推進し、技術力向上とともに市場ニーズに応える製品開発に努めてまいります。

【参考文献】

- 1) SAE/USCAR38-1, Performance Specification for Ultrasonically Welded Wire Terminations, 4.3.5 Acceptance Criteria Equation 4.3.5 Table 4.3.5, p.14
- 2) アルミニウムハンドブック第7版（日本アルミニウム協会, 2007）, 6.化学的性質, p.58
- 3) R.HOLM, *Electric Contacts Theory and Applications 4th Ed* (SPRINGER, 2000), §8Fig.(8.01), p.41