

【公開版】

令和元年度  
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業  
戦略的基盤技術高度化支援事業

「アルミ・銅バイメタル端子の製造に資する異形・異種金属の摩擦攪拌  
接合技術の開発」

研究開発成果等報告書

令和2年5月

担当局 近畿経済産業局  
補助事業者 富士端子工業株式会社  
地方独立行政法人大阪産業技術研究所

## 目 次

第1章 研究開発の概要	3
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2 研究体制	5
1-3 成果概要	6
1-4 当該研究開発の連絡窓口	6
第2章 本論	7
2-1 厚さ6 mm のアルミニウム板と銅板の摩擦攪拌接合	7
2-2 厚さ8 mm のアルミニウム板と銅板の摩擦攪拌接合	8
2-3 厚さ3 mm のアルミニウム板と銅板の摩擦攪拌接合	9
2-4 接合部の内部欠陥	10
2-5 接合部の電気抵抗値の測定	14
2-6 焼鈍による化合物相厚さの変化	15
2-7 塩水噴霧試験	16
2-8 バイメタル製品の試作	17
最終章 全体総括	19

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### 研究開発の背景

現代社会において電気エネルギーの供給は必要不可欠である。今後のIoT社会においてはあらゆるモノへの電気エネルギーの供給、有線・無線のネットワークの形成が求められる。電力の需要は極めて大きく、高層建築物や工場などの屋内配線、通信設備の配線等、非常に多くの配電線が必要とされる。また、電力供給だけでなく、ロボット内配線、自動車用ワイヤハーネスなどの信号伝達用の配電線の需要も非常に大きい。

従来の配電線は主に電気抵抗率が低く、可撓性（柔軟性）に優れる銅製電線（銅線）が用いられている。しかし、銅は比重が大きく建築物内の配電線の重量が非常に大きくなることから、近年では配電線の軽量化が求められている。特に、高層建築物、工場、通信設備の配線、ロボット内配線、自動車用ワイヤハーネスにおいては、配電線の軽量化が大きな課題となっている。

軽量で電気抵抗率の低い材料としてはアルミニウムが挙げられる。アルミニウム製電線（アルミ線）は従来、可撓性に問題があったが、2017年になり古河電気工業株式会社（本補助事業のアドバイザー）より可撓性に優れるアルミ線が発表され、屈曲部の多い建物内やロボット内でも使用可能となりつつある。しかしながら、従来のインフラは銅製設備であるため、銅線のアルミ化を進めるためにはアルミ線と銅製設備を繋ぐバイメタル端子が必要となる。

#### 研究目標

本研究開発では、異形・異種金属の摩擦攪拌接合（FSW）を開発し、アルミ・銅 FSW バイメタル端子の製造技術の確立を図る。高度化目標は以下のとおりである。

#### （五）接合・実装に係る技術に関する事項

##### 1 接合・実装に係る技術において達成すべき高度化目標

#### （3）川下分野横断的な共通の事項

#### ①川下製造業者等の共通の課題及びニーズ

##### イ 軽量化

キ 低コスト化

＜技術的目標値＞

【1. 狭小部の Al-Cu 接合のための高速回転 FSW 技術の開発】

【1-1】 Al パーツと Cu パーツの接合面構造の電気抵抗値への影響 （平成 29 年度実施）

接合部が Al 母材と同等の電気抵抗値を示すこと。接合部が Al 母材と同等の強度を有すること。

【1-2】 FSW 条件に及ぼす固定冶具の加熱の影響 （平成 29 年度実施）

500 mm/min 以上の送り速度で欠陥を生じることなく、50 cm 以上の距離を Al-Cu 接合でできること。

【1-3】 接合界面における化合物相の成長挙動の解明 （平成 29-30 年度実施）

接合界面における化合物相の厚さが 1  $\mu\text{m}$  以下となる条件を見出すこと

【2. 厚肉で幅が狭い Al-Cu 接合のための一体型ポピンツールを利用した高速回転 FSW 技術の開発】

【2-1】 一体型ポピンツールを用いたときの接合面構造の電気抵抗値への影響 （平成 29-30 年度実施）

接合部が Al 母材と同等の電気抵抗値を示すこと。接合部が Al 母材と同等の強度を有すること。

【2-2】 一体型ポピンツールを用いた FSW における固定冶具の加熱の影響 （平成 29-30 年度実施）

500 mm/min 以上の送り速度で欠陥を生じることなく、50 cm 以上の距離を Al-Cu 接合でできること。

【2-3】 FSW 条件に及ぼす一体型ポピンツールの形状の影響 （平成 30 年度実施）

上下面のツール痕の深さがそれぞれ 0.3 mm 以下であること。

【3. 薄肉で幅が狭い Al-Cu 接合のための分離型ポピンツールを利用した高速回転 FSW 技術の開発】

【3-1】 各ショルダの回転方向と回転数が電気抵抗値に及ぼす影響 （平成 29-31 年度実施）

接合部が Al 母材と同等の電気抵抗値を示すこと。接合部が Al 母材と同等の強度を有す

ること。

【3-2】 AI パーツの合金組成が及ぼす破壊挙動への影響 (平成 30-31 年度実施)

AI パーツを破壊することなく、50 cm 以上の距離を AI-Cu 接合できること。

【3-3】 FSW による薄肉パーツへの負荷荷重の測定と破壊挙動の解明 (平成 29-31 年度実施)

AI パーツを破壊することなく、50 cm 以上の距離を AI-Cu 接合できること。

【3-4】 FEM による応力解析と固定治具の改良 (平成 29-31 年度実施)

FEM により AI パーツが破壊されない FSW 条件の指針を得ること。

### 1-2 研究体制

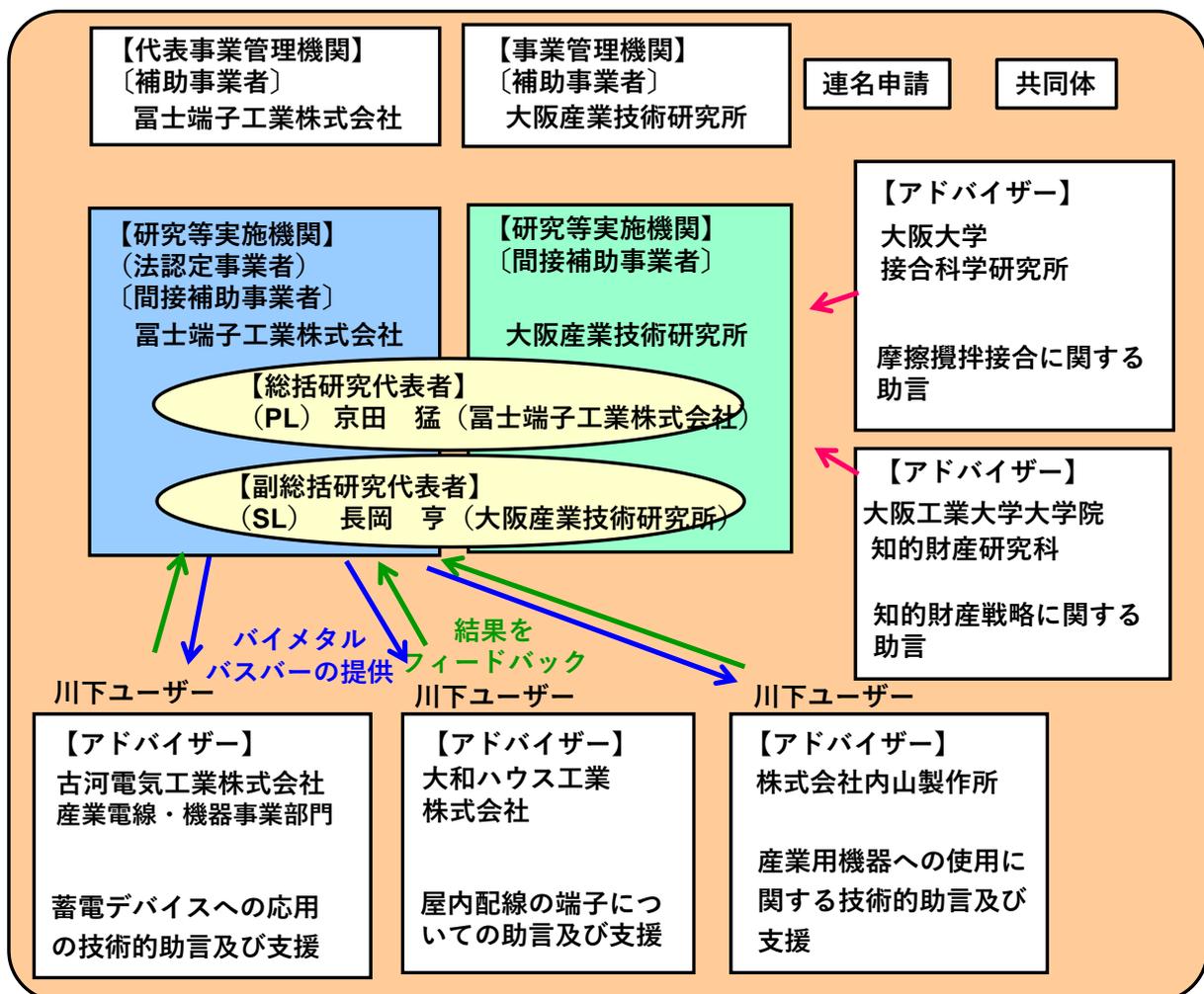


図 目標達成のための体制及び役割分担

PL 京田 猛 (富士端子工業株式会社)

AI パーツと Cu パーツの FSW 技術の確立、固定治具の改良、加熱の影響に関する検討、一体型ボビ

ソツールならびに分離型ポピンツールを用いた FSW 条件の検討

SL 長岡 亨（大阪産業技術研究所）

接合界面における金属間化合物相の成長挙動の解明、ポピンツール形状の検討、パーツの破壊挙動の解明、FEM による応力解析

### 1-3 成果概要

アルミニウムと銅の異種金属接合に摩擦攪拌接合を適用した。従来はアルミニウムと銅の混合が避けられなかったが、両者の混合を抑制した非混合 FSW を新規に開発することができた。非混合 FSW で得られるアルミ・銅接合界面は、接合界面近傍においてアルミニウムと銅の混合がないことから、安定した電気抵抗特性と安定した接合強度を兼ね備える。配電分野の川下ユーザーからの反響も大きく、アルミ・銅バイメタル端子、アルミ・銅バイメタルバスバーとして製造、販売の予定である。また、本技術について、日本電機工業会から、2020年度（第69回）電機工業技術優良賞をいただくことができた。

### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

富士端子工業株式会社 本社 技術部

技術部部長代理 京田 猛

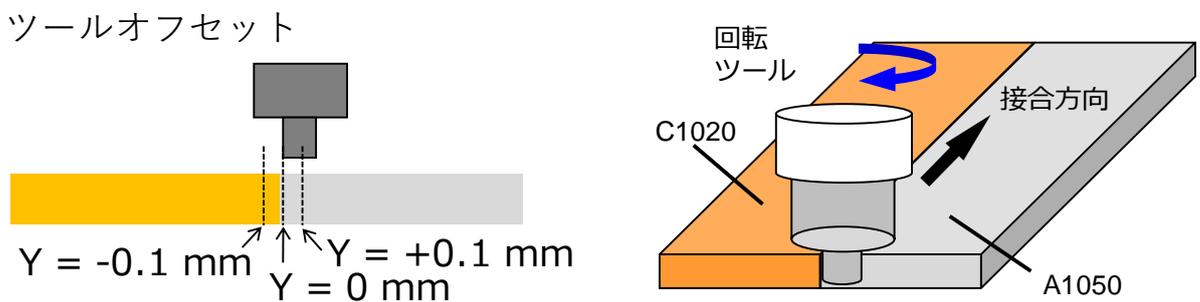
電話番号：06-4391-2771

メールアドレス：kyouda@fujiterminal.co.jp

第2章 本論

2-1 厚さ6 mmのアルミニウム板と銅板の摩擦攪拌接合

厚さ6 mmのアルミニウム板（A1050-H24）と銅板（C1020-1/4H）を突き合わせて摩擦攪拌接合を行った。接合材から引張試験片を切り出して引張試験を行ったときの結果を図に示す。ここで、Yはアルミニウム板と銅板の突合せ面からのプローブ側面の距離を表す。プローブは主にアルミニウム板側に圧入しており、0 mmはプローブ側面が銅板の接合面と接する位置、-0.1 mmはプローブ側面が銅板に0.1 mm入り込む位置、+0.1 mmはプローブ側面が銅板と接触しない位置となる。



銅板にプローブ側面が接触するY = -0.1 mmの条件では、接合界面からの破断が多く、アルミニウム母材で破断する試験片を安定して得ることができなかった。これは、プローブと銅が接触することで、銅がアルミニウム内に攪拌され、アルミニウムと銅が混在することで材料流動が不安定になるためと考えられた。これに対し、Y = 0 mm、+0.1 mmとツールをオフセットしていくことで、アルミニウム母材で破断する接合条件が高回転側において広がることが分かった。

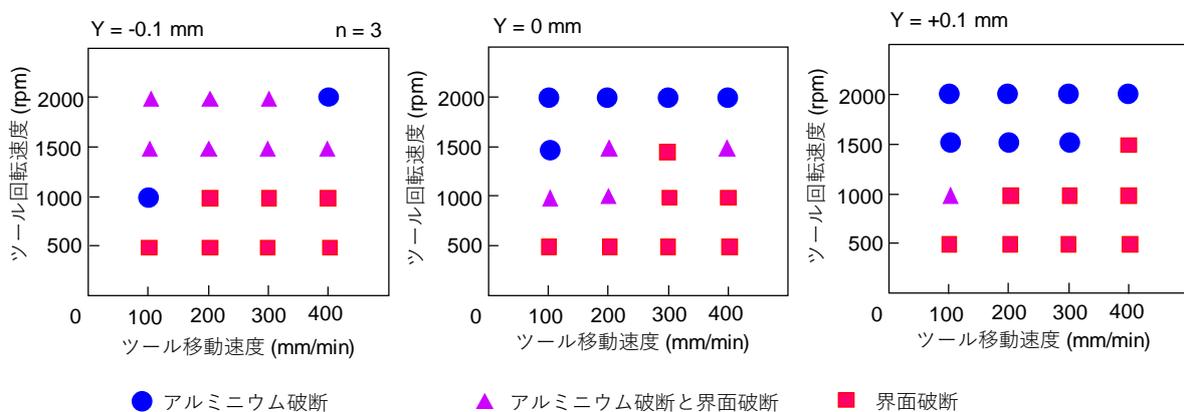


図 FSW後の引張試験結果（厚さ6 mm）

## 【公開版】

引張試験後の試験片の外観、ならびに破断面を示す。接合界面で破断した場合には、接合面の下部に未接合部が観察された。これは、FSW 時に下部において材料流動が不十分となるためと考えられた。ツール回転数を高くすることで、下部においても材料流動が生じ、未接合部が残存しないものと考えられる。

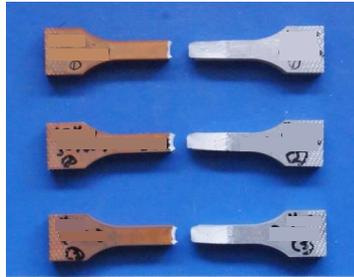
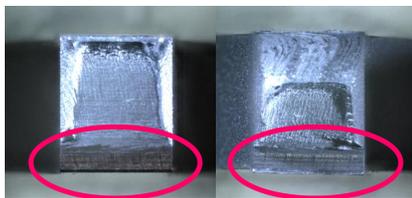


図 引張試験後の試験片外観



図 引張試験後の試験片外観



銅側

アルミ側

図 引張試験後の破断面



銅側

アルミ側

図 引張試験後の破断面

### 2-2 厚さ 8 mm のアルミニウム板と銅板の摩擦攪拌接合

厚さ 8 mm のアルミニウム板 (A1050-H24) と銅板 (C1020-1/2H) を突き合わせて摩擦攪拌接合を行った。接合材から引張試験片を切り出して引張試験を行ったときの結果を図に示す。Y = 0 mm においては、1000 ~ 1500 rpm, 200 ~ 300 mm/min 等の接合条件でアルミニウム母材破断した。また、Y = +0.1 mm の場合は 500 ~ 2000 rpm, 100 mm/min の接合条件でアルミニウム母材破断した。厚さが 6 mm の場合と比較すると、安定した接合強度を得ることができる接合条件範囲が狭くなった。これは、接合する板材の厚さが厚くなることで、回転ツールが大きくなり、銅とアルミニウムの混合が生じやすくなり、材料流動が不安定になるためと考えられた。

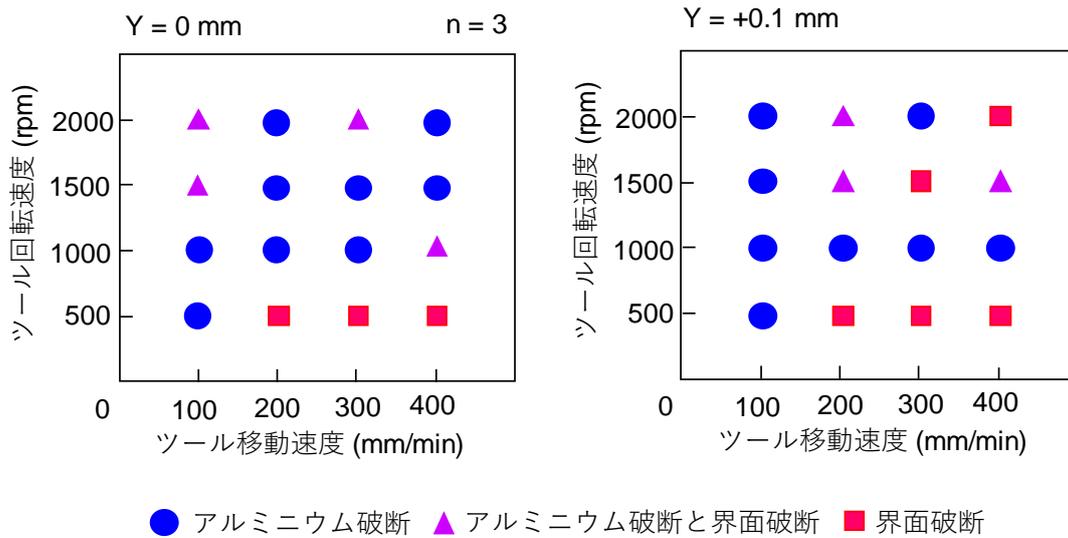


図 FSW後の引張試験結果（厚さ8 mm）

### 2-3 厚さ3 mm のアルミニウム板と銅板の摩擦攪拌接合

厚さ3 mm のアルミニウム板（A1050-H24）と銅板（C1020-1/2H）を突き合わせて摩擦攪拌接合を行った。接合材から引張試験片を切り出して引張試験を行ったときの結果を図に示す。Y = 0 mm, +0.1 mm において、2000 rpm の回転数の場合にアルミニウム母材で破断する接合条件範囲が得られた。厚さ3 mm の場合には高回転が有効であることが分かった。

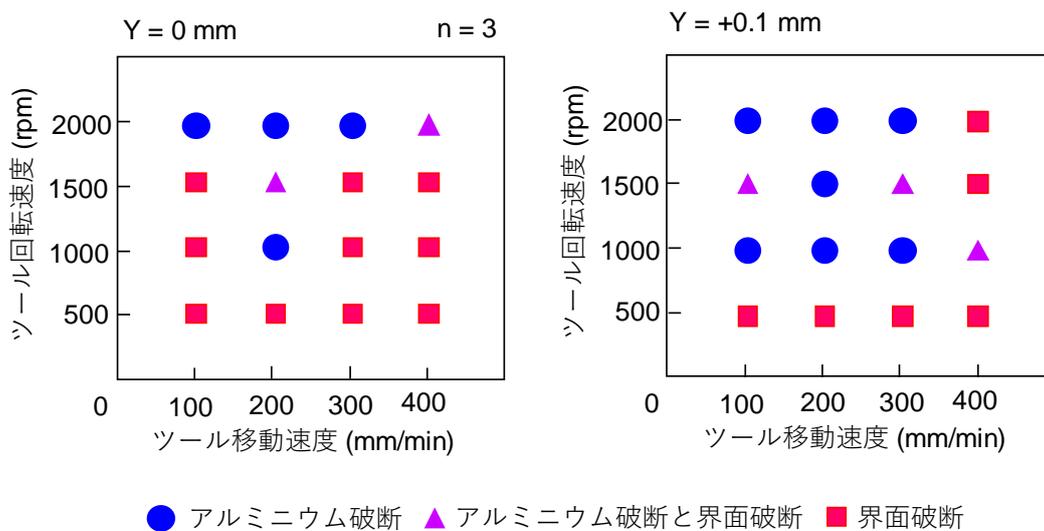


図 FSW後の引張試験結果（厚さ3 mm）

## 2-4 接合部の内部欠陥

アルミニウムと銅が回転ツールによって混合されると、アルミニウム内に銅が分散するとともに、空隙が残存し易く、安定して高い接合強度を得ることが難しくなる。また、超音波探傷による内部検査において、分散した銅によって反射エコーが発生し、空洞や亀裂による反射エコーとの識別が困難となる。そこで、ツール形状、板材の配置を変更し、非混合FSWを行った。改良を行うことにより、アルミニウム内に銅が分散することなく、接合することができることが明らかとなった。

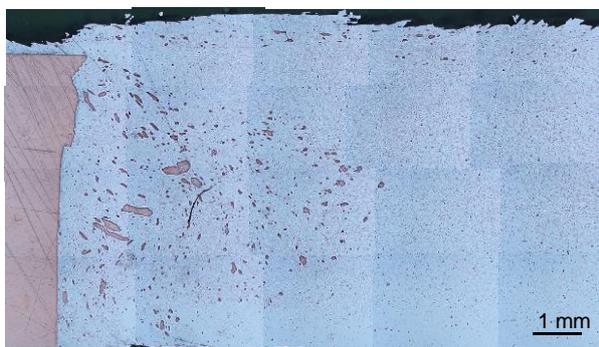


図 従来型のFSWによる接合部断面

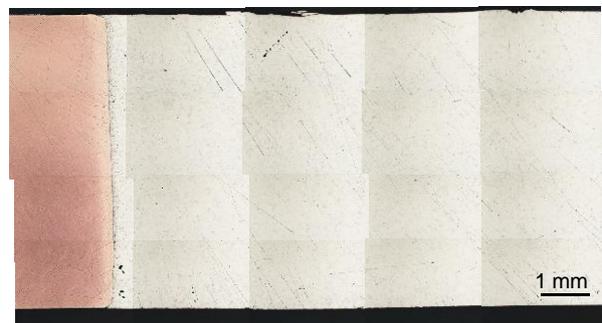


図 新規FSW（非混合FSW）による接合部断面

接合材から模擬的なバスバー部品を製作し、接合部の状態について X 線を用いて調査した。X 線観察により、新しい接合法では回転ツールが銅に接触せず、アルミニウム内への銅の分散全く発生しないことが確認された。

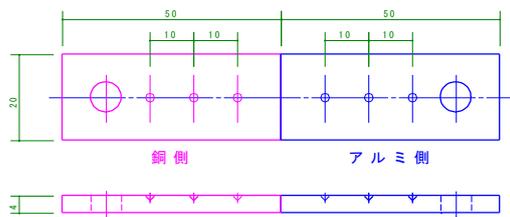
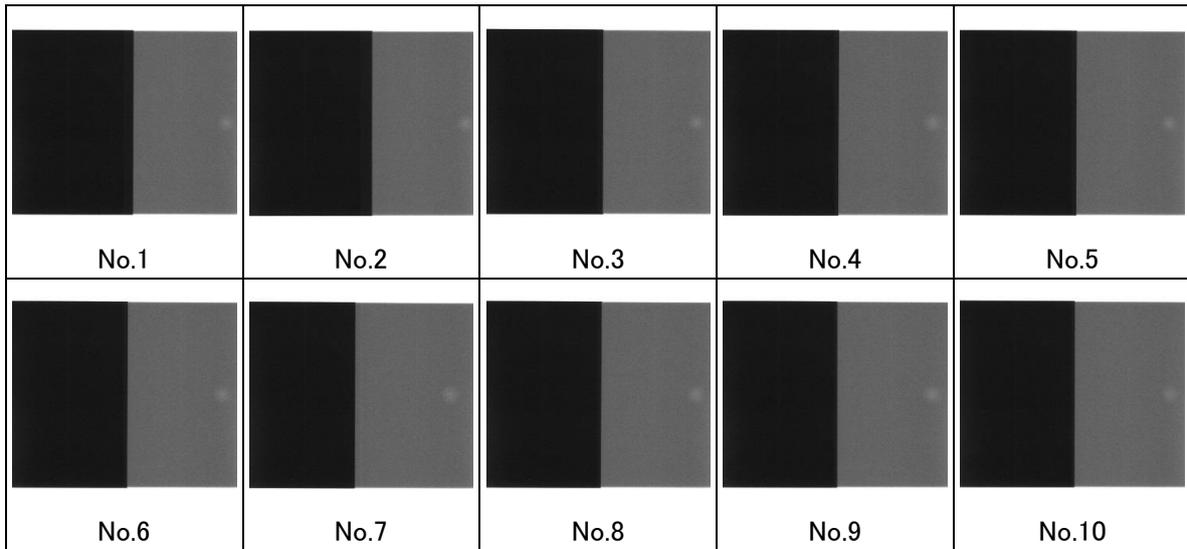


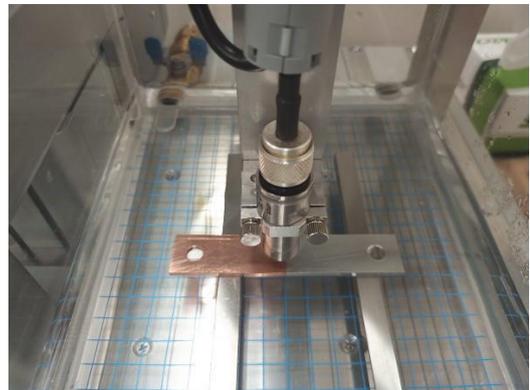
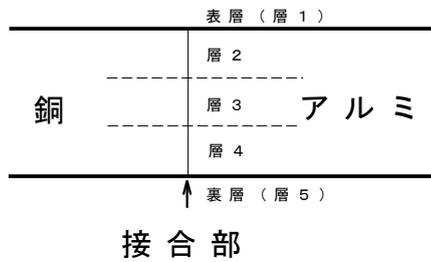
表 X線による観察



同様の接合品について超音波探傷によって内部を検査した。探傷条件は次のとおりである。

超音波周波数： 25 MHz(PRF=40 kHz)

探傷領域： 材料を表層、中間3領域、裏層の順に探傷(下図)



探傷の結果を表に示す。右に示した従来接合法による超音波探傷画像に比べ、新しい接合法による接合品は反射エコーがほとんど検出されず欠陥がかなり減少しており、非混合 FSW の効果が確認できた。

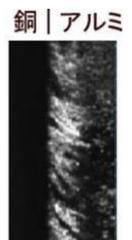


表 超音波探傷画像

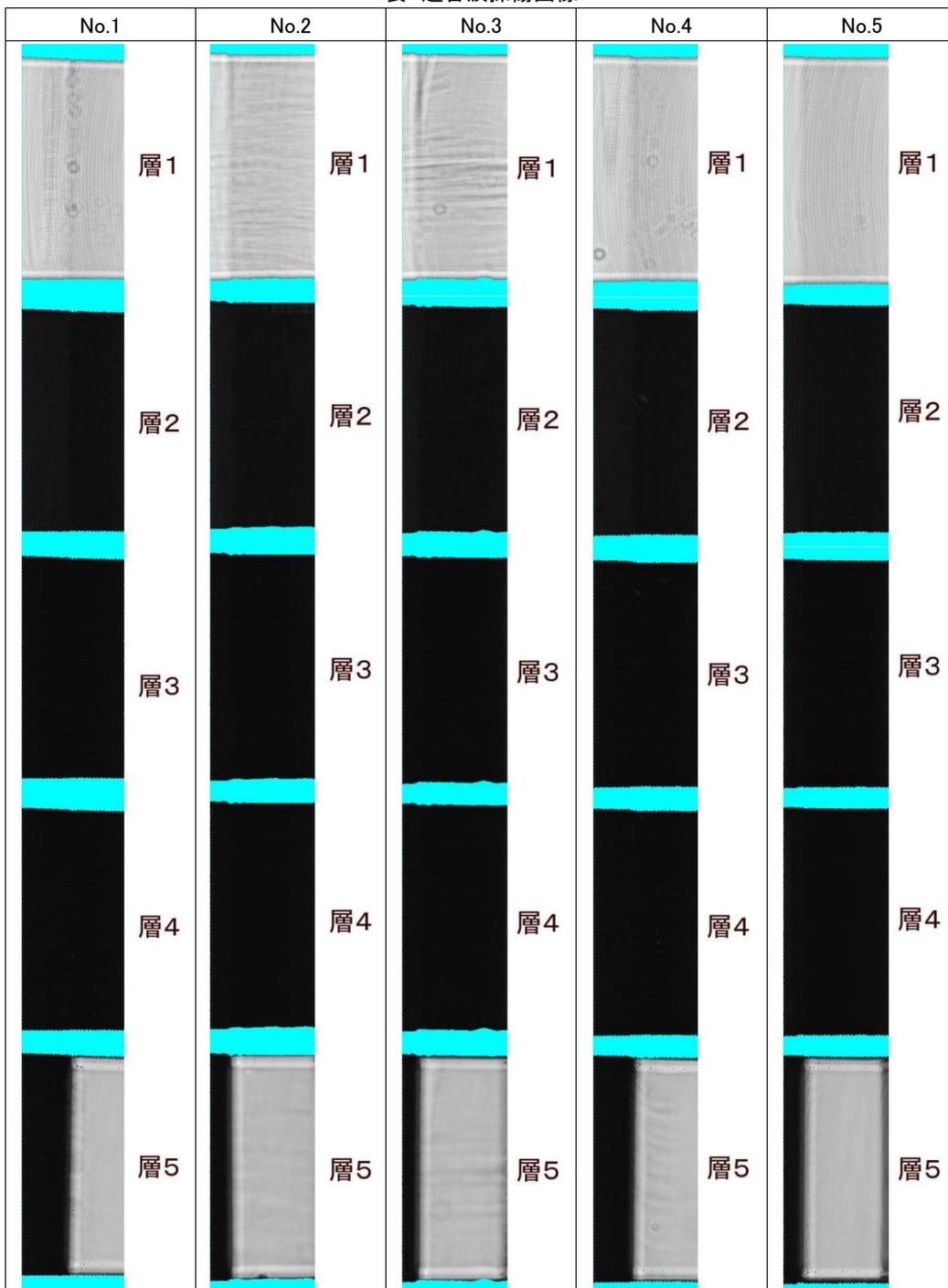
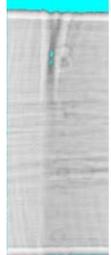
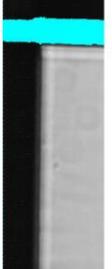


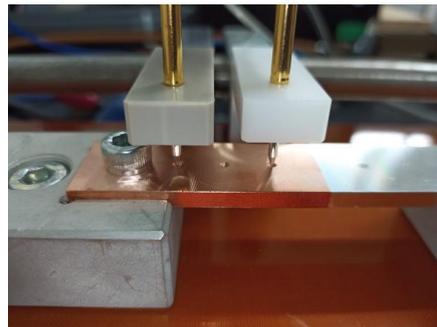
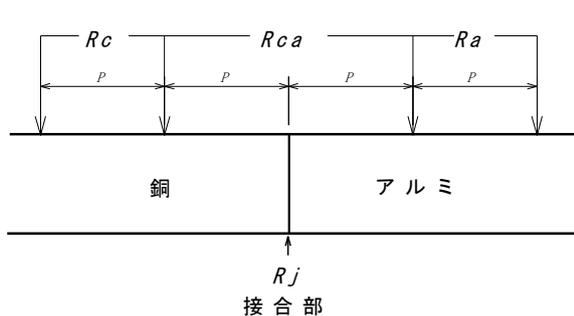
表 超音波探傷画像 続き

No.6	No.7	No.8	No.9	No.10
 層1	 層1	 層1	 層1	 層1
 層2	 層2	 層2	 層2	 層2
 層3	 層3	 層3	 層3	 層3
 層4	 層4	 層4	 層4	 層4
 層5	 層5	 層5	 層5	 層5

2-5 接合部の電気抵抗の測定

接合品における接合層の電気抵抗を電圧降下法によって測定を試みた。試料に一定の電流を通じ、下図のように電圧測定用プローブを一定の間隔で接触させ、銅材、アルミ材、そして接合部を跨いだ電気抵抗  $R_c$ ,  $R_a$ ,  $R_{ca}$  を各々測定し、接合層の電気抵抗  $R_j$  を次式で求めた。

$$R_j = R_{ca} - (R_c + R_a)$$



得られたデータを基に各導体部ならびに接合部の抵抗値を下表に示す。接合部における電気抵抗値の上昇 ( $R_j$ ) は約  $0.1 \mu\Omega$  であり、実用上問題のないレベルであることが明らかとなった。

表 接合部の電気抵抗

試料番号	銅部抵抗値 $R_c$	アルミ部抵抗値 $R_a$	銅アルミ部抵抗値 $R_{ca}$	接合部抵抗値 $R_j$
No.E1	4.44	7.50	12.01	0.07
No.E2	4.43	7.50	11.92	-0.01
No.E3	4.40	7.52	11.94	0.02
No.E4	4.27	7.37	11.74	0.11
No.E5	4.29	7.38	11.83	0.16
No.E6	4.29	7.43	12.00	0.28
No.E7	4.42	7.48	11.97	0.07
No.E8	4.40	7.35	11.84	0.09
No.E9	4.28	7.44	11.77	0.04
No.E10	4.38	7.42	11.88	0.09
平均値	4.359	7.438	11.89	0.105

単位: [ $\mu\Omega$ ]

- ・導体部は20mmあたりの抵抗値
- ・平均値は試料 No.E2 を除く
- ・室温23°C

## 2-6 焼鈍による化合物相厚さの変化

FSW 後の接合界面断面を示す。銅とアルミニウムの接合界面には少なくとも2種類の化合物相  $\text{Al}_4\text{Cu}_9$ ,  $\text{Al}_2\text{Cu}$  がフィルム状に形成されている。その厚さは両方を足しても  $1\ \mu\text{m}$  未満であり、機械的性質には悪影響を及ぼさないことが窺えた。

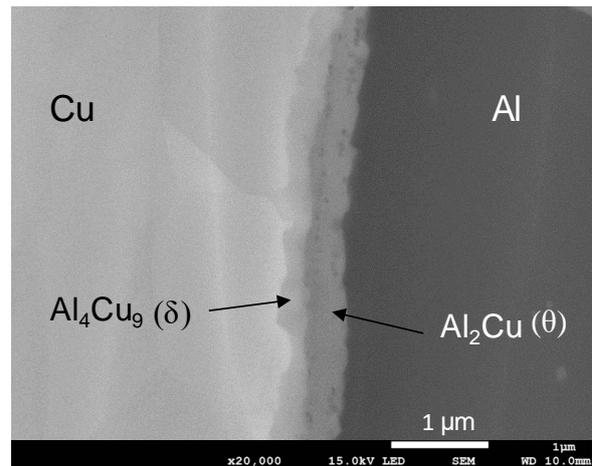
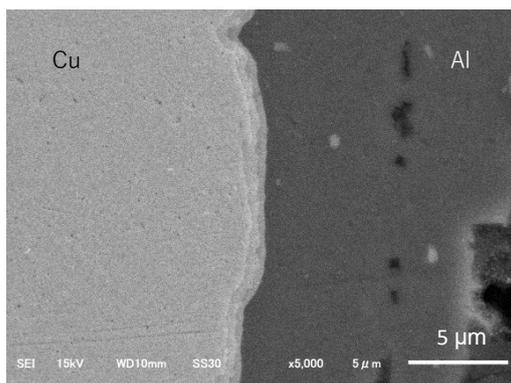
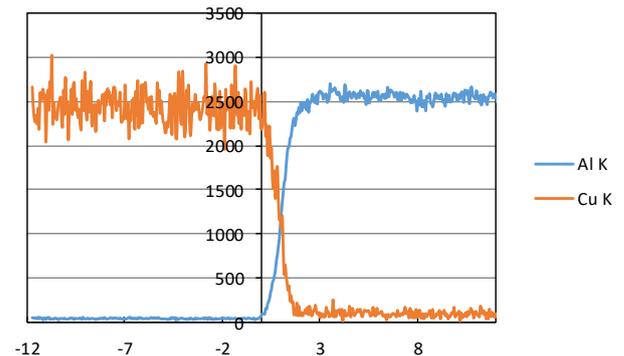


図 FSW後の接合界面断面

FSW 後に  $200^\circ\text{C}$ での5時間の加熱処理を行った後の接合界面の断面観察結果を示す。FSW 後では、厚さ  $1\ \mu\text{m}$  程度の化合物相が観察されたが、 $200^\circ\text{C}$ で5時間の加熱処理を行っても、FSW 後と同様の化合物相が観察され、その厚さはほとんど変化していなかった。 $200^\circ\text{C}$ 5時間保持後の接合界面について、走査電子顕微鏡のEDX線分析を行った結果、銅とアルミニウムの反応層の厚さは約  $2\ \mu\text{m}$ であった。EDX分析のスポット径が  $1\ \mu\text{m} \sim 2\ \mu\text{m}$  程度であることを考慮すると、線分析の結果は実際の厚さよりも厚く現れる傾向にあるため、観察画像と線分析の結果はほぼ対応するものと考えられる。

図 FSW +  $200^\circ\text{C}$ , 5h 熱処理後の接合界面断面図 FSW +  $200^\circ\text{C}$ , 5h 熱処理後の接合界面EDX線分析結果

FSW 後に焼鈍処理を行った時の化合物相の厚さの時間変化を示す。横軸は加熱保持時間の平方根( $\text{s}^{1/2}$ )である。 $200^\circ\text{C}$ では、界面化合物相の厚さは加熱保持時間によってほとんど変化せず、化合物相は成長していないことが分かる。アルミ・銅バイメタル材が端子とし

## 【公開版】

て使用される場合、通電によって瞬間的に 200℃に達することはあっても長時間保持されることはないため、実用上は問題ないと考えられる。300℃の焼鈍処理では、界面化合物相の厚さは加熱保持時間が増加するにつれて成長した。加熱保持時間の平方根と厚さの関係がほぼ直線状になることから、拡散律速による反応が生じていると考えられる。しかしながら、300℃5 時間の保持によっても化合物相の厚さは約 3  $\mu\text{m}$  であり、実用上は問題のないレベルと考えられる。

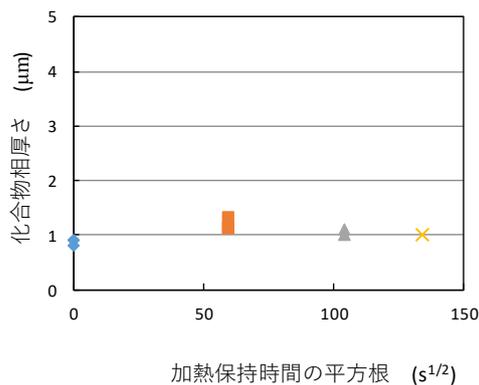


図 FSW後の200℃保持時間の平方根と化合物相厚さの関係

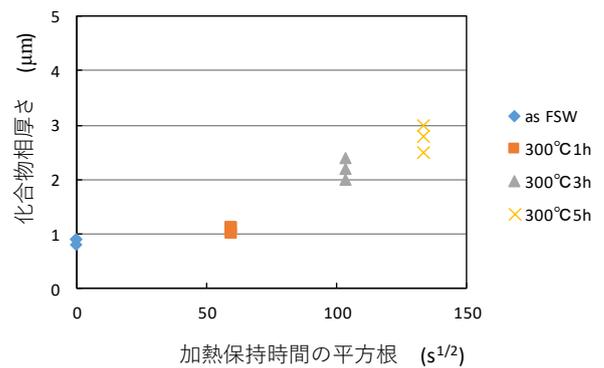


図 FSW後の300℃保持時間の平方根と化合物相厚さの関係

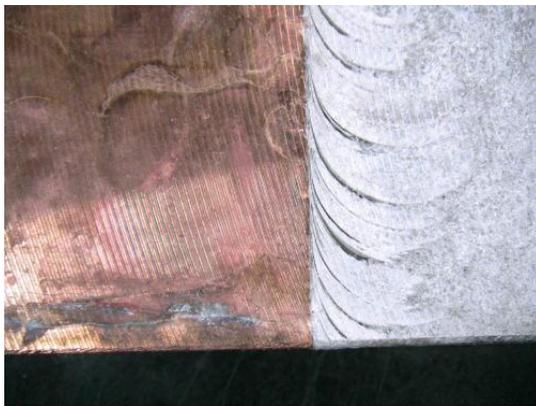
### 2-7 塩水噴霧試験

接合材について塩水噴霧試験を行い、電解腐食の発生状況を確認した。噴霧条件は、圧着端子の規格である JIS C2805, また塩水噴霧規格 JIS Z2371 で規定されている条件を参考にした。

塩水濃度：50 g/L  
噴霧時間：8 時間、休止時間 16 時間  
空気飽和器内の水温：47℃  
噴霧室温度：35℃



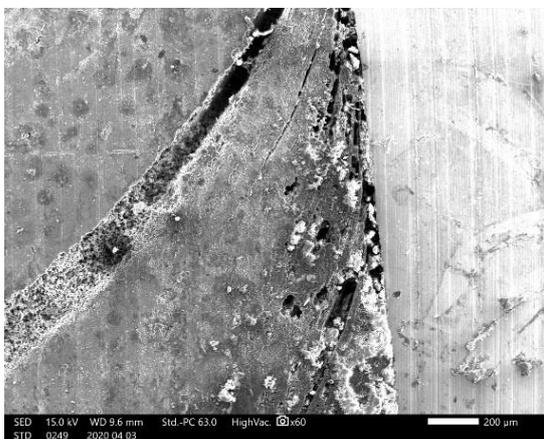
塩水噴霧試験後の接合界面近傍は図のとおりである。このようにアルミ側が激しく溶解・腐食していることが確認できた。今後、適切な防食方法の確立を目指す。



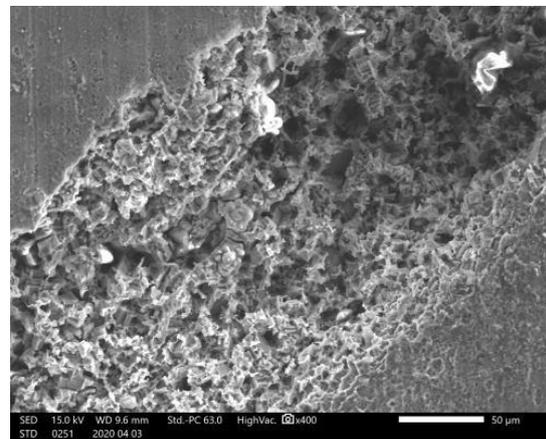
光学顕微鏡像



光学顕微鏡像（拡大）



電子顕微鏡像



電子顕微鏡像（拡大）

図 塩水噴霧試験後の接合界面近傍

## 2-8 バイメタル製品の試作

非混合 FSW を利用してアルミ・銅バイメタル端子、アルミ・銅バイメタルバスバーを試作した。また、接合材に圧延を施すことで、バイメタルシートも試作した。ネプコンジャパン、ならびに新機能性材料展に出展したところ、多くのメーカーから興味を持っていただくことができた。



図 アルミ・銅バイメタル端子

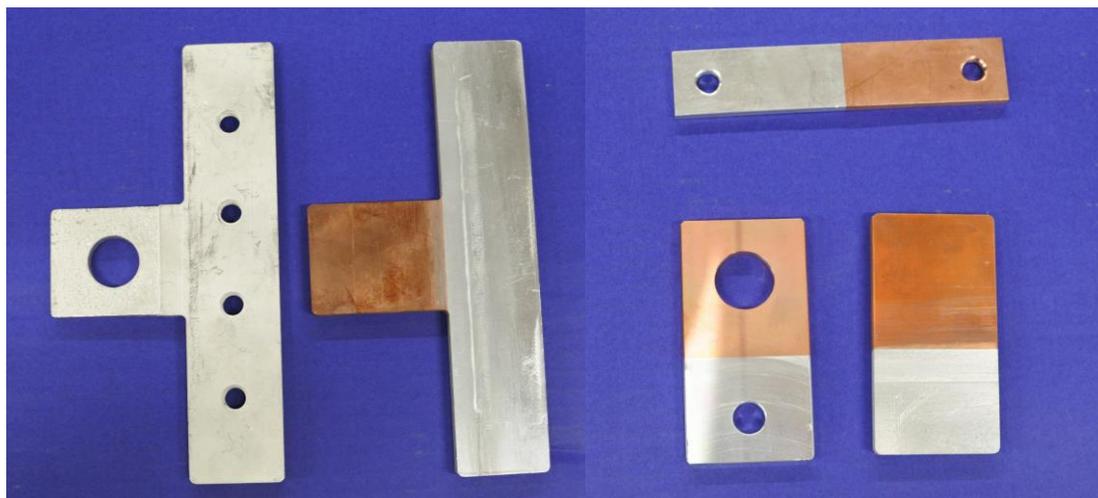


図 アルミ・銅バイメタルバスバー

厚さ 0.8 mm, 長さ 600 mm以上



図 非混合FSW+圧延により作成したバイメタルシート

### 最終章 全体総括

アルミニウムと銅の異種金属接合に摩擦攪拌接合を適用した。従来はアルミニウムと銅の混合が避けられなかったが、本補助事業を行った結果、両者の混合を抑制した非混合FSWを新規に開発することができた。本接合技術については、富士端子工業株式会社と大阪産業技術研究所の共同で特許出願2件を行った。非混合FSWで得られるアルミ・銅接合界面は、接合界面近傍においてアルミニウムと銅の混合がないことから、安定した電気抵抗特性と安定した接合強度を兼ね備える。

配電分野の川下ユーザーからの反響も大きく、アルミ・銅バイメタル端子、アルミ・銅バイメタルバスバーとして製造、販売の予定である。本技術について、日本電機工業会から、2020年度（第69回）電機工業技術優良賞をいただくことができた。

非混合FSWで得られるアルミ・銅接合体は加工性にも優れる。そのため、接合後の冷間圧延が可能となり、従来のFSWでは作製困難であった薄板のバイメタルシートを作製することができる。薄板のバイメタルシートは自動車分野のアルミニウムワイヤーハーネスにおける、アルミ・銅変換パーツとして応用可能である。また、電池分野ではリチウムイオン二次電池の正極端子（アルミ）と負極端子（銅）を接続するパーツとしても利用できる。今後は薄板のバイメタルシートの作製技術を確立することで、これらの分野にも応用展開を図りたい。