

特集：抵抗スポット溶接の最近の動向

固相抵抗スポット接合法の開発

株式会社ダイヘン
宮内 貴章

1. はじめに

脱炭素社会実現に向けて、輸送機器の電動化が進んでいる。これは、液体燃料を燃焼させると排出する CO₂ を減らすため、電気エネルギーを使用して輸送機器を動かす、いわゆる EV 化という動きである。実際に自動車業界において、2023 年時点での国内の PHEV も含めた EV 車の割合は約 14 万 300 台で国内市場に占める約 3.58%¹⁾ のシェアとなる。また、EV 先進国であるアメリカでの 2023 年 1~12 月の EV (BEV) 販売台数は、約 119 万台と市場における 7.6%²⁾、ヨーロッパでは約 154 万台と市場における 14.60%³⁾ であった。このように日本・中国・アメリカ・ヨーロッパなど各国で EV 車の割合が増加している⁴⁾。ただし、EV 化が進む一方で、課題となるのは、車体重量である。これは、輸送機器の EV 化によって、バッテリーと電動モータの搭載が必要となり、従来車体よりも重くなることが考えられるからである。そこで、近年では車体の軽量化を達成するため、大きく 2 つの動きがある。1 つ目は、超高張力鋼板の採用である。これは、現在使用されている鋼板を高強度化することで、薄肉化を実現したといったものである。また、2 つ目は材料のマルチマテリアル化の促進である。これは従来の部品を鋼などの単一素材だけでなく、アルミや樹脂との組み合わせに置き換えることで、車体の軽量化を実現するというものである。近年では特に鋼板とアルミニウム合金の組み合わせやアルミダイキャスト材の使用に注目が集まっている⁵⁾。

今後、EV 化とともに異種材料の組み合わせにおける接合技術が必要不可欠となっており、各社にて開発が進められている。

車体軽量化に向けたマルチマテリアル化の一例

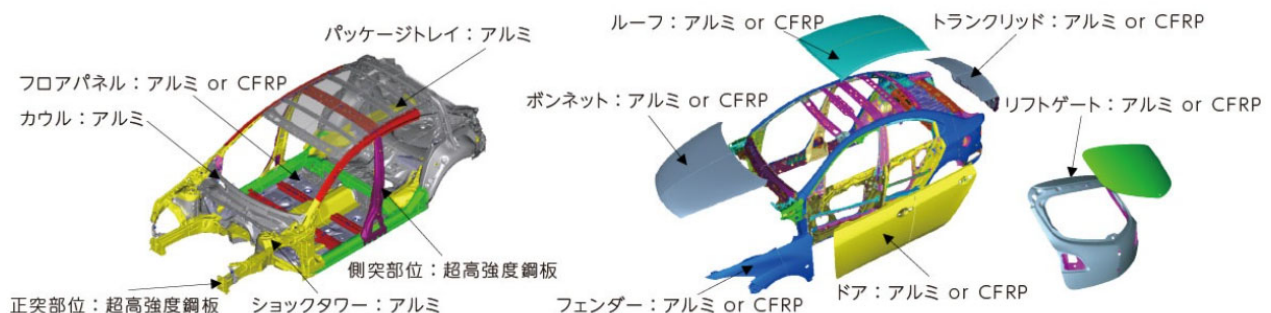


図 1 車体軽量化に向けたマルチマテリアル化の一例⁵⁾

2. 固相抵抗スポット接合法とは

大阪大学 藤井教授らによって発明された固相抵抗スポット接合法は、図 2 に示すように中央に配置された加圧軸と、それを取り囲む円筒型電極で構成された電極 ASSY (加圧軸や電極などが一つのブロックにまとまったもの) が上下についた接合装置において、電極及び加圧軸を別駆動で動かすことで成立する。接合原理は、第一に材料を挟み込み、加圧軸で材料の接合部に高い圧力を付与し、突起を形成する。次に突起を形成した状態で通電を行い、上下板の接触部にて抵抗発熱を促す。次に上下板の界面近傍が発熱し軟質化したところで、加圧軸を用いて外側から材料を押し込むことで界面近傍に高圧力を付与する。この時、接合界面近傍の材料を塑性変形させ、酸化被膜などの不純物を微細に分断し、さらに界面近傍の材料と共にこれらを外部に排出し、新生面を突き合わせることで固体での接合を実現するものである⁶⁾。



加圧軸
円筒型電極

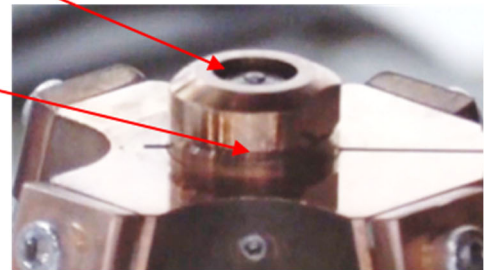


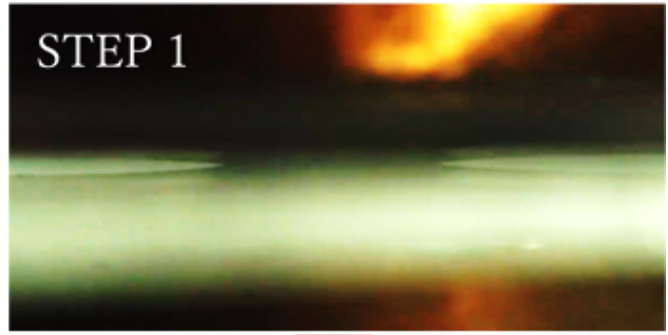
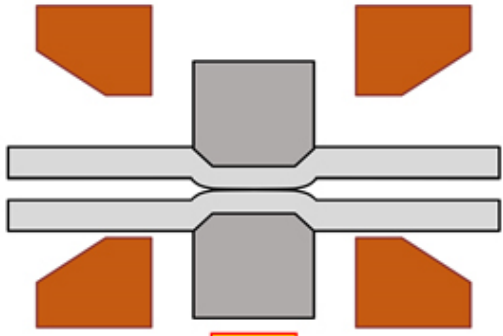
図 2 固相抵抗スポット接合システム

図 2 は、新たに開発された固相抵抗スポット接合システムを示したものである。本接合機は基本的にインバータ制御式直流電源・サーボプレス機構・電極 ASSY で構成されている。また、接合に関するデータのフィードバックとして、接合機の内部に搭載したロードセル及び、エンコーダによって、接合時の荷重データと位置データが収集される。もちろん、抵抗溶接用溶接電流および電圧計測器等を組み合わせることで、溶接電源などの出力データも収集可能である。

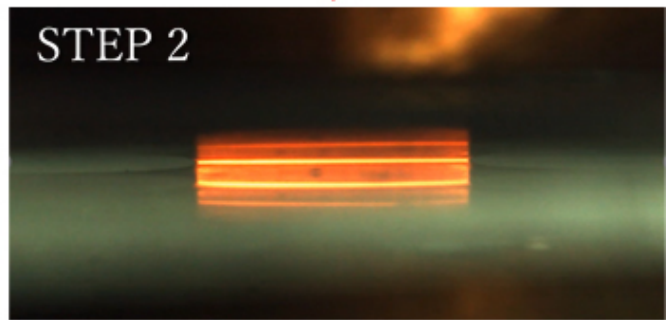
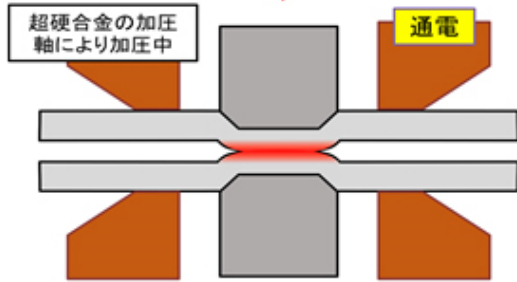
3. 接合プロセス及びシーケンス

接合プロセスおよびシーケンスについて説明する。始めに接合の流れを図 3 に示す。図 3 には左側にアニメーション、右側に実際の接合界面の様子を示す。まずは STEP1 に示すように上下から加圧軸で材料を挟み込み突起を形成する。次に STEP2 に示すように突起を形成した状態で材料に接触した電極で通電を行い、上下板の接触部にて抵抗発熱を促す。次に STEP3 に示すように上下板の界面近傍が発熱し軟質化したところで、加圧軸を用いて外側から材料を押し込むことで界面近傍に高圧力を付与し STEP4 に示すように接合が完了する。

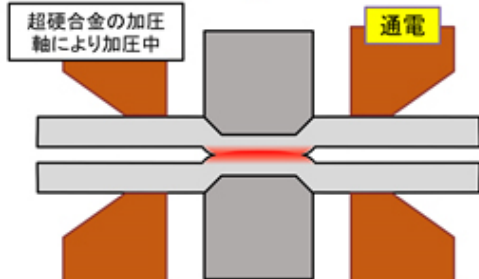
STEP 1



STEP 2



STEP 3



STEP 4

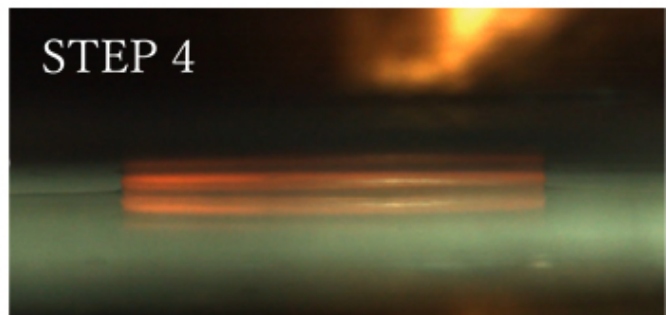
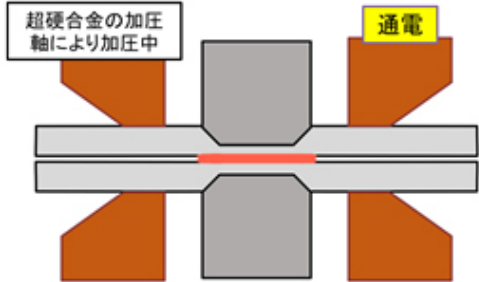
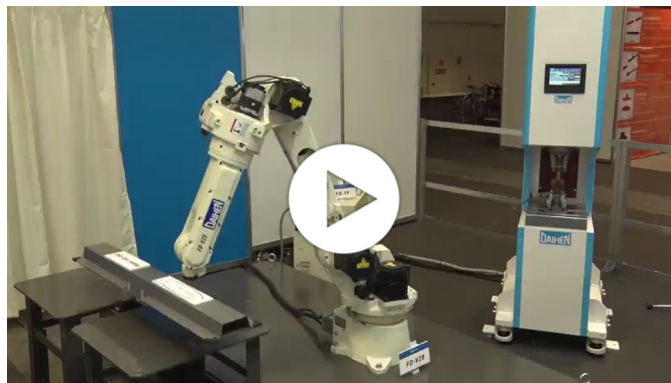


図3 接合の流れ（左側にアニメーション、右側に実際の接合界面の様子）

実際の接合の様子を示す。動画 1 からは赤熱した界面が押し広げられている様子が観察でき、動画 2 では低温での接合のため、散り（溶融し飛散した金属）の発生が抑制されている様子が観察できる。



動画 1 実際の接合界面の変化（超高張力鋼 SPFC980 同士の場合）



動画 2 実際の接合プロセス（超高張力鋼 SPFC980 同士の場合）

4. 接合の実施例

4.1 炭素鋼 (S45C) 同士の無変態接合

車体軽量化手段の実現に向けて、材料の炭素含有量を増加させ、材料強度を向上させる鋼板の高強度化がすすめられている。

現在では、1.8GPa や 2.0GPa 級の超高張力鋼板などの炭素含有量が多い鋼板が開発されている。ただし、これらを抵抗溶接すれば、溶融・凝固過程で形成される脆いマルテンサイト組織や、凝固欠陥により、健全な継手が得られにくいという課題がある。これら課題に対して市場では、テンパー通電や後通電処理などによって組織の焼きなましを行い、溶融部や熱影響部の割れを防止して高い継手強度が得られている。一方で、我々が提案する固相抵抗スポット接合法では低温で接合が可能のため、炭素含有量が多い鋼板でもこのような課題が生じにくいと考える。そこで、炭素含有量が多い、中炭素鋼 S45C との組み合わせにおいて低温で接合した場合の効果を確認する。

まずは、図 4 に S45C 材の引張強度の温度依存性を示す。図 4 から、S45C 材は約 700℃ の環境で、材料を引っ張ると約 250MPa（最大応力）にて材料が変形する（材料が伸び始める）。また、900℃ の環境では、約 100MPa（最大応力）にて材料が変形する（材料が伸び始める）ということが分かる。つまり、一定の温度環境下で材料に圧力を付与すれば材料は塑性流動するため、圧力で材料の温度を

制御できることとなる。この結果を踏まえ、本記事では、200MPa,280MPa,360MPa,450MPa の4条件で材料に圧力を付与した結果を示す。図5には、それぞれの圧力にて接合を実施した場合の接合継手断面、およびビッカース硬さ分析結果を示す。各継手の接合強度は、接合時の圧力が増加するにつれ接合強度が上昇する結果となった。これは圧力の増加に伴い、熱影響部の温度が低下したことで、組織のマルテンサイト変態を抑制できたからだと考える。

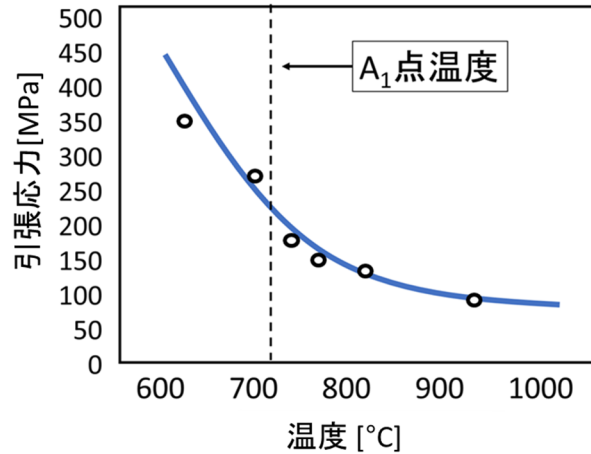


図4 引張強度の温度依存性 (中炭素鋼 S45C)

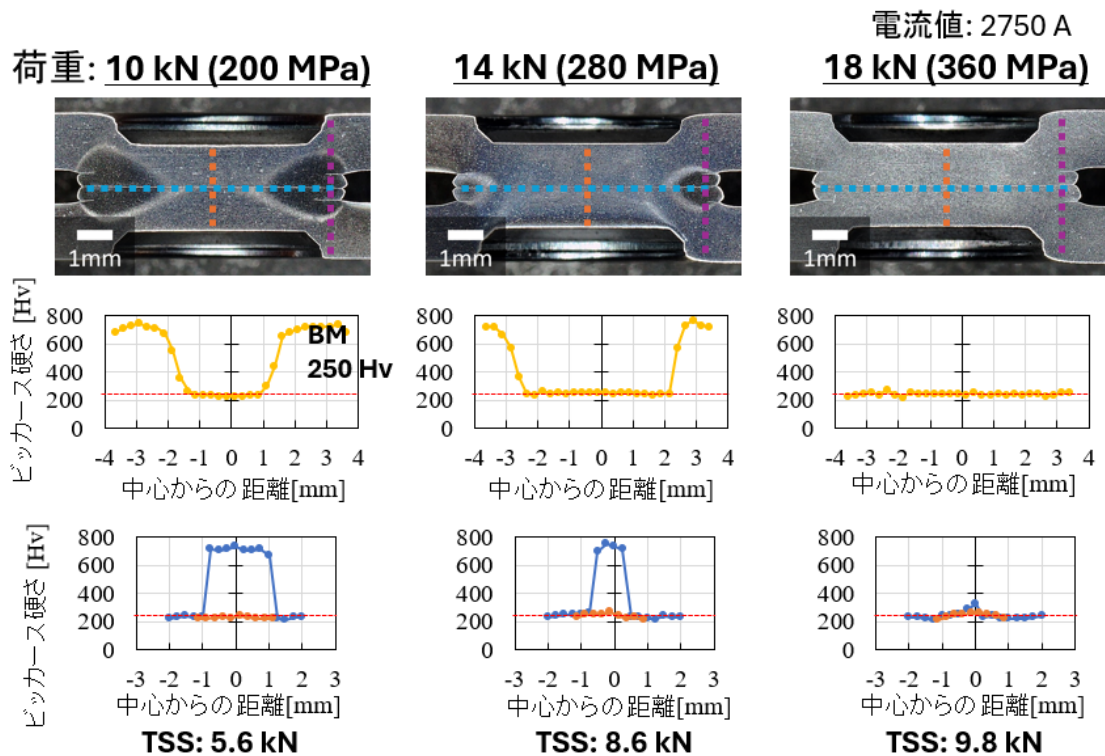


図5 各接合条件での継手断面およびビッカース硬さ

その後、熱量と圧力を最適化した結果、図6に示す電流値 3.5kA 圧力 450MPa の条件にて、TSS (せん断引張強度) が 15.9kN となり、プラグ破断 (JIS Z 3137 に準ずる、破断がナゲット内に入らず母材部で破断した場合の破断形態) が得られた。

この時、接合界面を観察すると界面近傍での再結晶が観察され、上下が一体となり接合されていた。

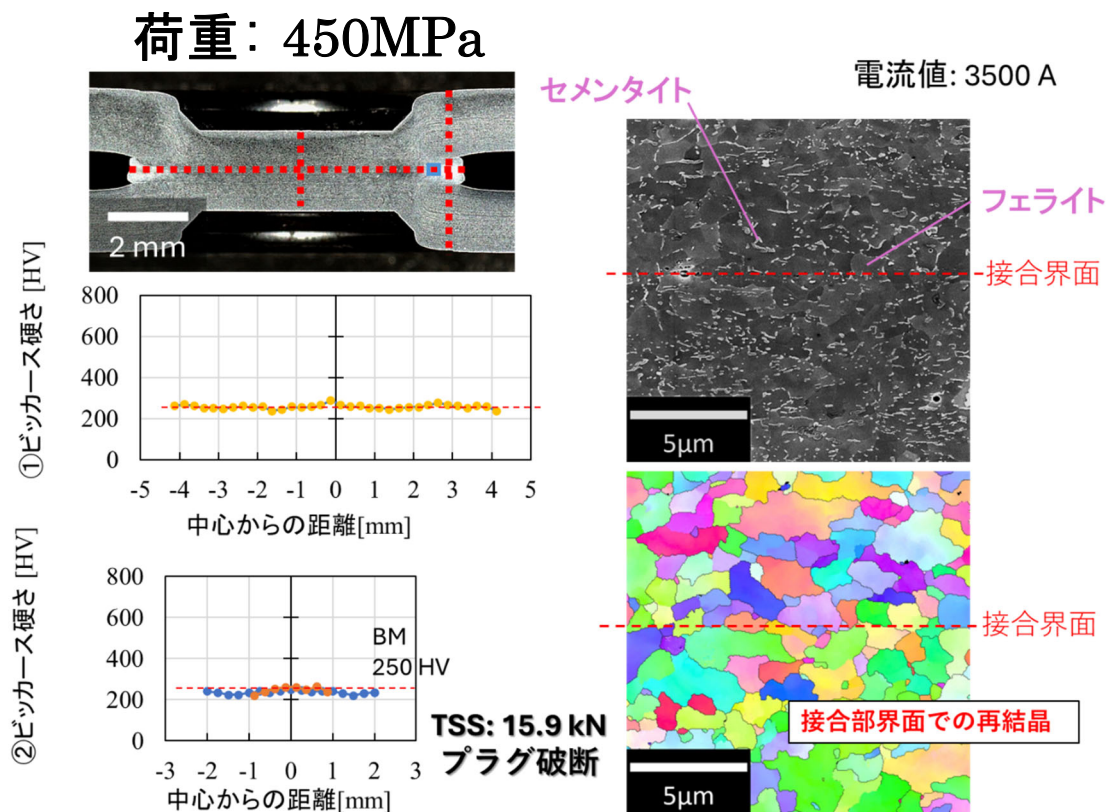


図 6 接合条件である熱量と圧力を最適化した結果

4.2 超高張力鋼板 (JSC980) 同士の接合

超高張力鋼板とは、添加元素の追加、金属組織の制御などを行って、材料強度を向上させた 980MPa 以上の高強度材のことである。

超高張力鋼は材料の高強度化を実現するため、従来の材料の炭素含有量を増やしたり、添加元素を付与したりしているため、材料としての固有抵抗値も高く、従来の抵抗溶接法では非常に散り（溶融し飛散した金属）が発生しやすいため接合品質の安定性に課題がある。そこで、低温で接合が実現できる固相接合スポット接合法と組み合わせれば、散りや溶融による継手欠陥の発生を防止することができると考えた。

抵抗スポット溶接法と本接合法を比較した結果を示す。まずは図 7 にそれぞれの接合法で接合した際に発生する散りの様子を示す。低温で接合が可能のため、抵抗スポット溶接に比べ、散りの発生量が少ないことが分かる。次に図 8 には設定電流を変更した場合の継手強度の推移を示す。抵抗スポット溶接と比べると、5kA や 6kA などの電流でも、JIS Z 3140 A 級 平均値を満たす高い接合強度が得られ、適正電流範囲を向上させることができる。また、各接合法で作製した継手断面を比較した様子を図 9 に示す。図 7 と図 9 より固相接合スポット接合法では同条件であっても散りが抑制できるため、継手内部に溶融による継手欠陥が見受けられない結果となった。

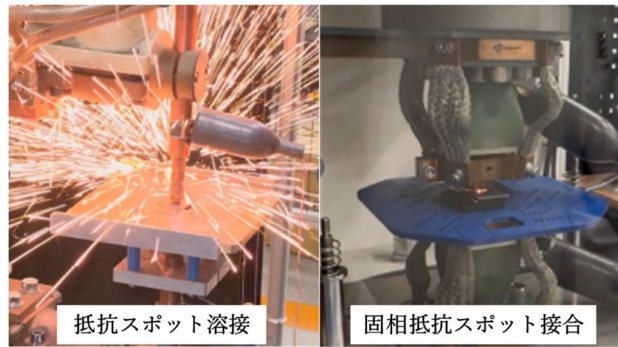


図7 8kAで接合した時の散り発生の様子

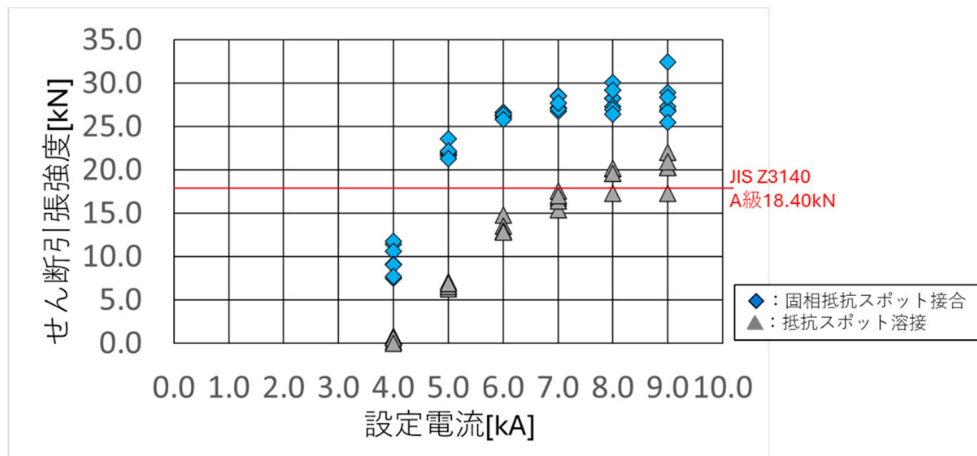
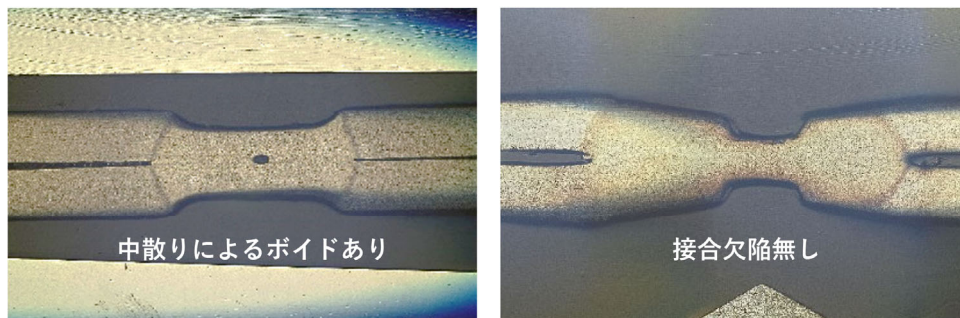


図8 抵抗スポット溶接法と固相抵抗スポット接合法のせん断引張強度比較



抵抗スポット溶接の継手断面

固相抵抗スポット接合の継手断面

図9 8kAでの抵抗スポット溶接と固相抵抗スポット接合の継手断面

4.3 合金化溶融亜鉛メッキ鋼板とアルミニウム合金の異材接合

マルチマテリアル化の観点で鋼板とアルミニウム合金の異材接合が注目されている。ただし、合金化溶融亜鉛メッキ鋼板とアルミニウム合金という異種材料の接合は抵抗スポット溶接法でも難しく、接合過程で形成される金属間化合物(IMC)が入熱とともに成長し、厚く脆い組織となるため、割れの起点となり継手強度が低くなることが知られている。また、接合中、銅電極にメッキ鋼板の亜鉛メッキ材が溶融・付着することで、電極が消耗しやすくなるという課題がある。そこで、固相抵抗スポット接合法であれば、高圧力を付与することでIMCを薄肉化できると考えた。また、低温で接合ができるため、電極へのめっき付着を抑制できると考えた。

まずは、**図 10** に継手の強度を示す。TSS（せん断引張強度）と CTS（十字引張強度）ともに JIS Z 3140 A 級平均値を超える高い接合強度が得られた。また、**図 11** には各押し込み過程での IMC の厚みを示す。加圧軸による押し込み量の増加に伴い、界面近傍の IMC の厚みが薄くなっている様子が観察できた。**図 12** には作製した継手の断面観察結果を示す。接合界面の IMC を観察すると約 $1.88\mu\text{m}$ 程度の厚みに薄くなっている様子がわかる。また、端部では表面のメッキをしっかりと排出できている様子がわかる。

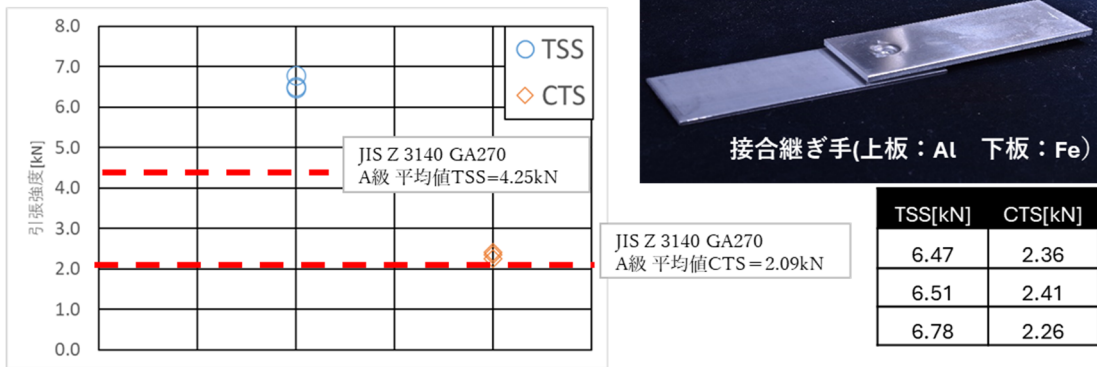


図 10 異材継手の接合強度

押し込み前(0.3sec 通電) → 押し込み途中 (押し込75%) → 押し込み完了(押し込100%)

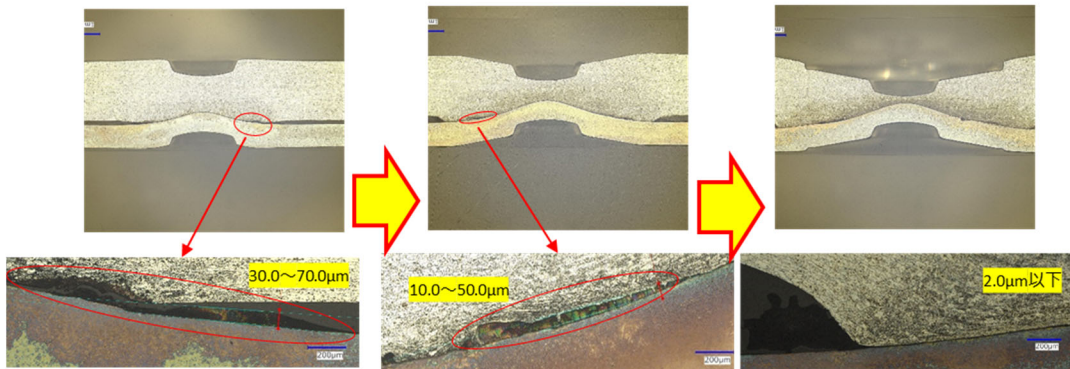


図 11 各押し込み過程での IMC の厚み

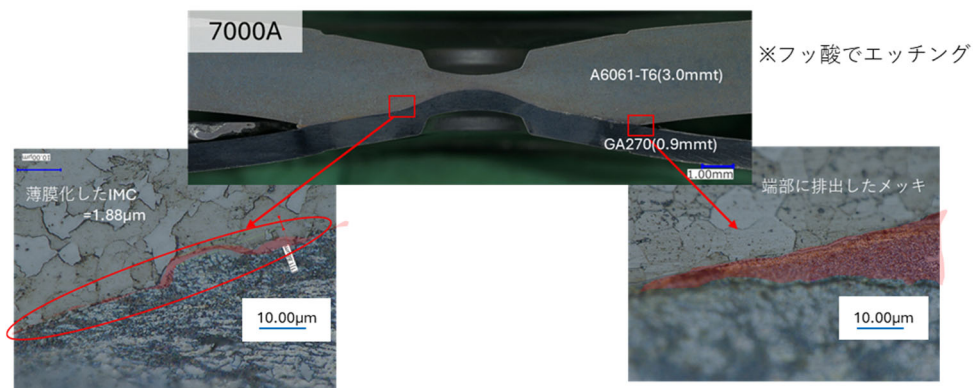


図 12 継手の断面観察

最後に図 13 には 200 回の連続接合を実施した電極の表面状態の観察結果を示す。本実験で実施した板組は上板側にアルミニウム合金、下板側に合金化亜鉛メッキ鋼板を配置して接合している。図 13 の結果から、上側電極には一部アルミニウムが付着している様子が見られるが、下側電極は接合時に発生するスマット（煤）が少し残るだけで、メッキが銅電極に蒸着している様子は見られなかったため、低温での接合により電極へのメッキ付着の抑制にも効果があることがわかった。

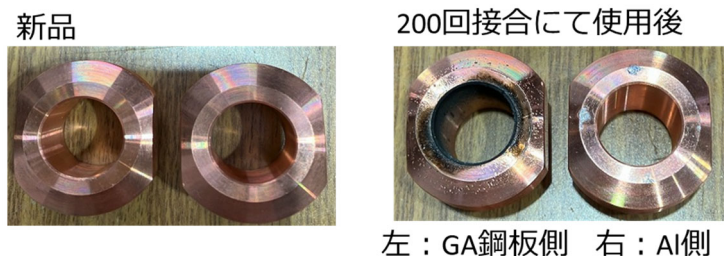


図 13 使用前後での電極の表面状態

5. まとめ

本記事では、固相抵抗スポット接合法の開発動向として、S45C 同士の無変態接合、および超高張力鋼板同士の接合並びに、合金化溶融亜鉛メッキ鋼板とアルミニウム合金の異材接合の結果について示した。

本接合法であれば、低温で接合が可能であるため、従来の抵抗スポット溶接・溶融溶接ならではの課題や今後、車体での使用割合が増え、抵抗スポット溶接法との組み合わせが難しいとされる 1.5GPa 以上の超高力鋼板やアルミダイキャスト材などとの組み合わせにおいても、利点が多いと考える。

引き続き、様々な材料との組み合わせにおいて確認を進め、多くのニーズを満たす接合法として、価値を高めてゆこうと考える。

参考文献

- 1) 日本自動車販売協会連合会「燃料別販売台数（乗用車）」 <https://www.jada.or.jp/pages/342/>
- 2) COX AUTOMOTIVE「A Record 1.2 Million EVs Were Sold in the U.S. in 2023, According to Estimates from Kelley Blue Book」 <https://www.coxautoinc.com/market-insights/q4-2023-ev-sales/>
- 3) 日本貿易振興機構(ジェトロ)HP「EU の 2023 年乗用車新車登録台数 BEV がディーゼル超え」 <https://www.jetro.go.jp/biznews/2024/01/07b5ab41aec7bd9f.html>
- 4) EV DAYS「電気自動車の普及率は何%?」 <https://evdays.tepco.co.jp/entry/2021/09/28/000020>
- 5) 事業概要 | 新構造材料技術研究組合 ISMA HP <https://isma.jp/works/>
- 6) 2021 年度春季溶接学会全国大会講演概要、P154-155 相原巧、釜井正善、藤井英俊：中炭素鋼の無変態固相抵抗スポット接合

<略歴>

宮内 貴章 (みやうち たかあき)

2018 年 株式会社ダイヘン 入社 溶接機事業部 トーチ技術部

2021 年 技術開発本部 接合技術開発部

2024 年 溶接・接合事業部 新接合・加工技術開発部

現在に至る