

補助事業番号 2024M-442

補助事業名 2024年度 高張力鋼板とAl合金板の発熱分布制御型スポット溶接技術の開発
補助事業

補助事業者名 大阪大学接合科学研究所 池田倫正

1 研究の概要

鋼板とアルミニウム合金板の抵抗スポット溶接継手の強度向上には、ナゲット径の拡大と接合界面における金属間化合物(IMC)厚さの抑制が重要とされる。本研究では、Al合金板/鋼板/鋼板の三枚重ね板組み溶接、短時間・高電流通電条件に着目し、三枚重ね板組みの鋼板/鋼板間発熱を活用することによる継手強度向上に取り組んだ。特に、対象とした三枚重ね板組み特有のアルミニウム合金ナゲット形成および接合界面におけるIMC(Fe_2Al_5 および $FeAl_3$)形成機構について検討し、接合界面での温度履歴とともにアルミニウム合金ナゲット内の対流現象がIMC形成に大きく影響することを明らかにし、対流現象を含めた発熱分布制御が重要であることを示した。

2 研究の目的と背景

地球温暖化対策としてカーボンニュートラル化の取り組みが本格化する中、自動車業界では車両軽量化の重要性が益々増加している。自動車車体の軽量化技術の一つとして軽量素材を活用したマルチマテリアル構造が注目されており、異材接合技術の重要性が高まっている。中でも、軽量材料として適用が拡大しているアルミニウム合金板と現在の主要材料である鋼板との異種金属接合は、軽量化設計において最も重要といえる。一方で、自動車車体の溶接技術としては抵抗スポット溶接が最も広く適用されていることから、異種金属抵抗スポット溶接技術の適用に対する要望が非常に高い。しかし、アルミニウム合金板と鋼板の抵抗スポット溶接では、接合界面でのIMC形成による継手強度低下が指摘されており、異種金属抵抗スポット溶接技術の確立のためにはIMC形成に関する十分な理解が必要である。

本研究では、アルミニウム合金板と鋼板の異種金属抵抗スポット溶接において、特に、短時間・高電流の溶接条件によるアルミニウム合金板/鋼板/鋼板の三枚重ね溶接に着目した。高張力薄鋼板とアルミニウム合金板の溶接において、その中間に低強度かつ低固有抵抗の軟鋼薄板を挟んだ3枚重ね板組みとすることにより、初期加圧時の接触面積拡大、通電時の抵抗発熱量の低減などにより溶接部における発熱分布を制御し、FeとAlの接合界面での過剰な温度上昇の抑制、およびアルミニウム合金板と鋼板の接合界面でのIMC形成機構の明確化を目的に検討を行った。

3 研究内容

(1) Fe-Al異材抵抗スポット溶接の数値シミュレーション技術の確立

(http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/research/research04_4.html)

本事業で導入した抵抗溶接専用解析ソフトウェアSORPASを使用し、異材抵抗スポット溶接の

数値シミュレーションを実施した。二枚重ね板組みは、アルミニウム合金板A6022(板厚1.0 mm)および合金化溶融亜鉛めっき鋼板GA980(板厚1.6 mm)、三枚重ね板組みは、アルミニウム合金板A6022(板厚1.0 mm)と合金化溶融亜鉛めっき鋼板GA980(板厚1.6 mm)の間に中板として270MPa級冷延鋼板(板厚0.6 mm、1.0 mm、1.6 mm)、590MPa級冷延鋼板(板厚0.6 mm)および980MPa級冷延鋼板(板厚0.6mm)を用いて数値解析を行った。使用した溶接機特性を考慮した溶接電流波形および加圧特性を用い、さらに材料物性は温度依存性を考慮した。図1は解析に用いた計算モデルの一例を示す。図2はアルミニウム合金板A6022(板厚1.0 mm)、270MPa級冷延鋼板(板厚0.6 mm)、合金化溶融亜鉛めっき鋼板GA980(板厚1.6 mm)の三枚重ね板組みでの計算結果と実験結果の比較であるが、良好な一致を示すことが確認された。

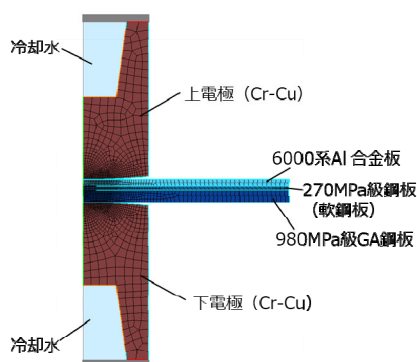


図1 解析に用いた計算モデル例

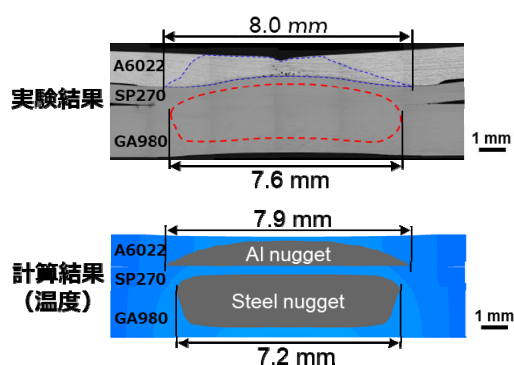


図2 三枚重ね板組みにおける実験と計算の比較

三枚重ね板組みと二枚重ね板組みの数値解析から、二枚重ね板組みと比較すると、三枚重ね板組みではアルミニウム合金板のナゲット径が増加するとともに、通電終了後の冷却過程において接合界面がアルミニウム融点以上に維持される時間が増加することが推定された。さらに、中板の引張強度および板厚を変化させた数値解析から、中板に270MPaクラスの板厚1.0 mm程度以下の薄鋼板を選定することが接合界面温度上昇の抑制に有効であることが推定された。

(2) Fe-Al異材抵抗スポット溶接におけるIMC形成機構に関する評価

(http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/research/research04_4.html)

数値解析結果より、本研究の検討対象板組みをアルミニウム合金板/270 MPa級冷延鋼板/980 MPa級合金化溶融亜鉛めっき鋼板の三枚重ね板組みとし、短時間(100~300 ms)・高電流条件(19 kA)における抵抗スポット溶接部特性について検討した。図3に溶接部の断面マクロ写真とアルミニウム合金ナゲットと冷延鋼板の界面におけるIMC厚さ分布を示す。アルミニウム合金板ナゲット径は通電時間100 msにおいて最も小さいが、接合界面中央部のIMC厚さは通電時間100 msにおいて約4 μmと最も厚くなり、通電時間の長い300 msの場合の約2倍になることが明らかとなった。従来は、溶接入熱の増加とともにIMC厚さは増加すると考えられているが、本研究の板組みおよび溶接条件においては温度履歴以外にも支配因子が存在することが示唆された。また、図4にはアルミニウム合金ナゲットの中央での接合界面のSEMおよびEBSDの結果であるが、通電時間100 msでは接合界面に厚いIMC層が形成され、IMCはFe₂Al₅相が主体であることが確認され

た。

さらに、溶接部をEPMAにより元素分布を測定した結果、アルミニウム合金ナゲットの全領域でFeが検出され、通電時間の増加に伴いFe濃度は増加する傾向にあることが確認された。接合界面からFe原子が溶融アルミニウム合金内に拡散し、ナゲット内対流により移動したと推察された。従来知見によると、アルミニウム合金ナゲットの接合界面ではFe原子の拡散速度が速いことから、まずFe原子濃度が高くなりFeAl₃が核形成され、その後、形成されたFeAl₃はFe原子のバリアとなるためFe原子が粒界に集積するようになり、Fe₂Al₅が厚く形成されるとされている。しかし、本研究における高溶接電流条件では、通電時間の増加とともにナゲット内での対流速度が速くなるため、接合界面でのFe原子濃度の増加が生じ難くなりIMC形成によるFe原子の拡散防止効果が発現されず、ナゲット内への拡散が継続することが考えられる。そのため、通電時間300 msでは対流の加速により、ナゲット内のFe濃度は増加するものの接合界面でのIMCの形成は生じ難くなり、IMC厚さは抑制されたと推察された。一方で、通電時間100 msでは通電時間が極端に短いため接合界面近傍で対流は発生するものの加速されず、Fe原子の拡散にともなう接合界面でのIMC形成が生じ易くなり、結果としてIMC厚さが厚くなったと推察された。なお、通電時間100 msのIMC厚さは数値シミュレーションの熱履歴から計算されるIMC厚さとほぼ一致することも確認している。

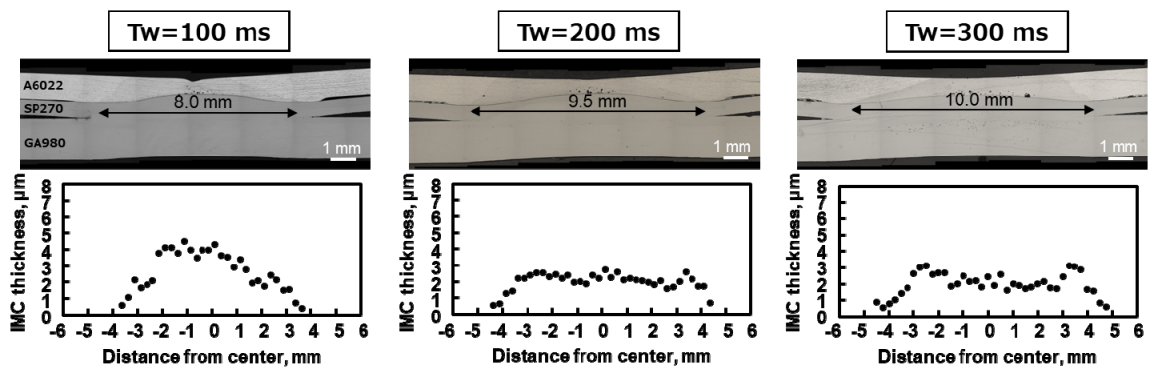


図3 抵抗スポット溶接部の断面マクロおよびAl-Fe接合界面におけるIMC厚さ分布

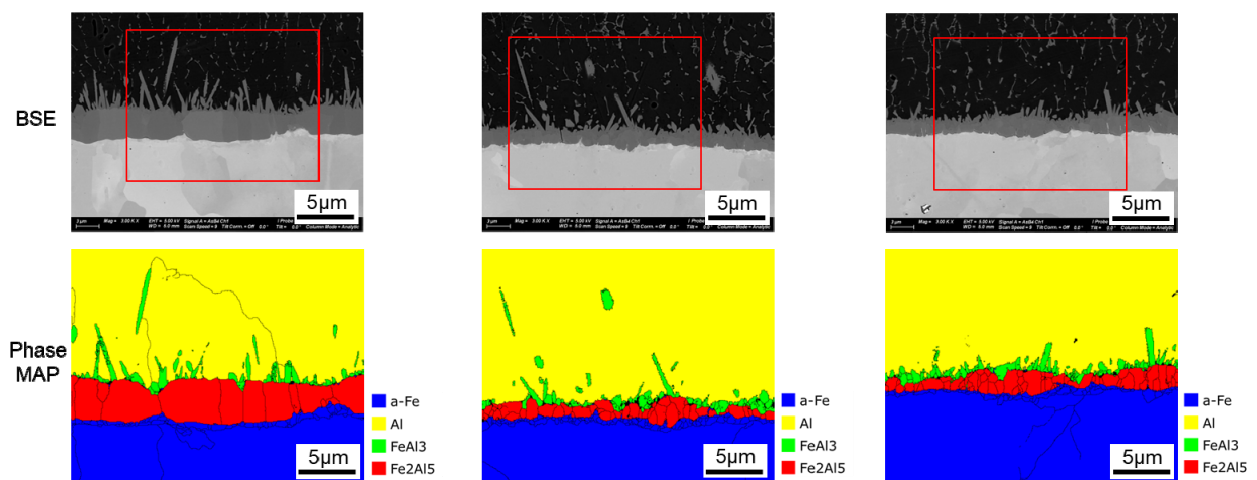


図4 抵抗スポット溶接部のAl-Fe接合界面のSEM画像およびEBSD解析結果

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

高張力薄鋼板とアルミニウム合金板の異種金属溶接として、他の溶接・接合方法よりも量産製造時の施工性に優れる抵抗スポット溶接の適用が可能になることにより、副資材が必要とされるSPRなどの機械的締結法などと比較して部材の溶接組立コストは低減することから、異種金属溶接によるマルチマテリアル構造の適用範囲はさらに拡大すると予想される。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまでは自動車車体に用いられる主要な材料である薄鋼板の抵抗スポット溶接に関する研究、特に、超高強度鋼板の適用拡大を推進するための溶接プロセス開発、材料開発を行ってきたが、今回の研究は、マルチマテリアル化による車体軽量化を実現する際に最も重要とされるアルミニウム合金板と鋼板の異材抵抗スポット溶接に対する最初の取り組みである。今後は、今回得られた知見をもとに異材接合界面を制御可能な新たな溶接プロセス研究を推進する予定である。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

・潘、池田、成田、佐橋、川松、“鋼板／Al合金板の異材抵抗スポット溶接におけるIMC形成に関する検討”、軽金属溶接、Vol.63、No.2(2025)p.64

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

該当なし

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

該当なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 大阪大学大学接合科学研究所
(オオサカダイガクセツゴウカガクケンキュウシヨ)

住 所： 〒567-0047
大阪府茨木市美穂ヶ丘11-1

担 当 者： 教授・池田倫正(イケダリンセイ)

担 当 部 署： 接合評価研究部門接合組織評価学分野
(セツゴウヒョウカケンキュウブモンセツゴウソシキヒョウカガクブンヤ)

E - m a i l : ikeda.rinsei.jwri@osaka-u.ac.jp

U R L : <https://www.jwri.osaka-u.ac.jp/index.html>