

亜鉛めっき鋼板とアルミニウムの抵抗スポット溶接における反応層形成挙動

Formation Behavior of Reacted Products in Resistance-spot Welding of Steel and Aluminum alloy

見山 克己*, 林 孝一*, 堀内 寿晃*, 前田 憲太郎*, 吉津 利洋*,
齋藤 繁*, 吉田 協*, 杉野 義都*, 水口 碧惟**, 橋本 晴人**

Katsumi Miyama, Koichi Hayashi, Toshiaki Horiuchi, Kentaro Maeda, Toshihiro Yoshizu,
Shigeru Saito, Kanou Yoshida, Yoshito Sugino, Aoi Mizuguchi, and Haruto Hashimoto

概要

自動車の製造工程では様々な溶接・接合技術が用いられており、その中でも生産性・信頼性の点から抵抗スポット溶接が多く用いられている。アルミニウム合金を車体構造に用いる場合、鋼板との接合が必要となるが、これらを冶金的に接合すると接合界面に Fe-Al 系金属間化合物層が生成されることが知られている。接合体の機械的特性を確保するためにはこの層の形成挙動や接合強度に与える影響を明らかにする必要がある。本研究では、抵抗スポット溶接の条件因子として通電時間に着目し、時間を種々変化させて亜鉛めっき鋼板とアルミニウム合金の接合を行った。せん断引張試験と接合界面断面観察の結果から、金属間化合物層の生成形態と接合強度に相関があることが示唆されるとともに、金属間化合物は $FeAl_3$ であると同定された。

1. 緒言

近年、自動車では環境対策の一環としての車体軽量化、衝突安全性能向上を目的とした補強が行われている。この相反する課題への解決策として、鋼板、アルミニウム合金、プラスチック、CFRP 等の複数素材を適材適所に使用するマルチマテリアル化が進んでいる。この中で、軽量化等の特性向上とコストおよび構造強度の両面から、鋼板とアルミニウム合金板を組み合わせることが多い。この接合には様々な溶接技術が用いられているが、本研究ではその中でも多く用いられている抵抗スポット溶接に着目した。過去の研究ではスポット溶接における引張強度が高強度になる条件が実験的に求められているが^{1), 2)}、その接合条件がどのように影響しているのか、そのメカニズムについては不明な部分が多い。

本研究では、熔融亜鉛めっき鋼板とアルミニウム合金のスポット溶接における通電時間を変化させた際の接合界面組織を観察し、接合強度と界面組織の関係についての検討を行った。

2. 実験方法

試料は、合金化熔融亜鉛めっき鋼板(板厚 0.8mm, 縦 50mm, 横 150mm: 以下 GA 材), 熔融亜鉛めっき鋼

板(板厚 0.8mm, 縦 50mm, 横 150mm: 以下 GI 材) アルミニウム合金板は A6062(板厚 0.8mm, 縦 50mm, 横 150mm)を用いた。試料はそれぞれアセトンを用い脱脂した。

スポット溶接には、三相系整流式スポット溶接機(YPI-25EZ-P, 株式会社ヤシマ)を用いて溶接を行った。条件は、電流値 10.5kA, 加圧力 1.5kN とし、通電時間を 0.10s~1.0s の範囲で変化させた。電極形状は JIS C9304 規定の DR 型(先端径 6mm, R40, クロム銅(Cu-Cr))を用いた。得られた接合体を、JIS 3136 規定の引張せん断試験により強度を測定した。この際の試験速度は 0.5mm/min とした。断面観察の試料は、接合した試料の溶接部中心を精密切断機にて接合界面に対して垂直に切断し、冷間埋込樹脂を用いて断面観察する試料を埋込した。その後エメリー研磨および鏡面研磨を施した。接合界面の Al-Fe 金属間化合物の生成挙動また Zn の挙動を明らかにする為、断面観察には、走査型電子顕微鏡(SEM-EDS, 日本電子 IT-300/JED-2300)を用い、界面反応層の観察と定量分析を行った。反応層の定量分析は 3箇所 の点分析を行い、その平均値を求めた。また、反応層をさらに詳細に分析するため、一部の試料について透過型電子顕微鏡(TEM, 日本電子製 JEM-2010)

*北海道科学大学 寒地先端材料研究所
**北海道科学大学 工学部 機械工学科

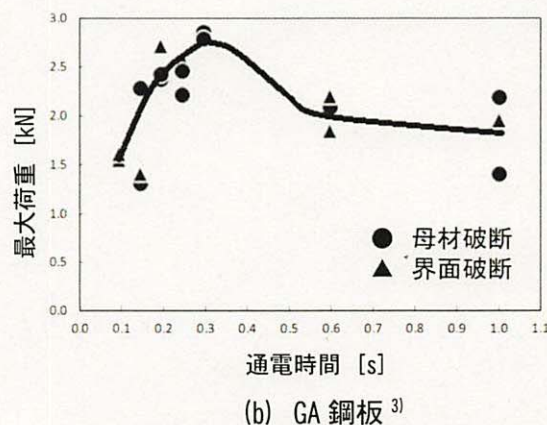
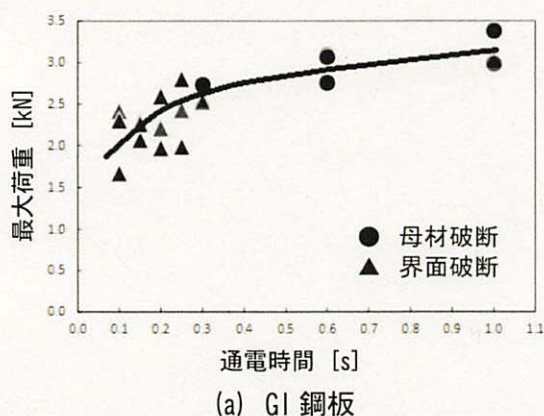


図1 せん断引張強度の通电時間依存性

による EDS 分析および電子線回折図形 (ディフラクションパターン) による解析を行った。

3. 結果と考察

3.1 引張試験における接合強度の測定

GI 材を用いて電流値 10.5kA、加圧力 1.50kN、通电時間を変化させ引張せん断試験を行った結果を図 1 (a) に示す。通电時間が長くなるに従って破断最大荷重が大きくなる傾向にあることがわかった。0.10s から 0.30s まではほとんどが界面破断であり 0.60s はすべてが母材破断であった。また 1.00s では、平均強度は 0.60s より向上したものの、一部界面破断が見られた。このことから 0.60s が最も安定した接合が得られる条件であると考ええる。

一方過去の研究における GA 材とアルミニウム合金 A6062 の接合体について通电時間を変化させ引張せん断試験機により強度を測定した結果を図 1 (b) に示す³⁾。通电時間 0.30s で最も破断最大荷重が高くなり、破断形態もすべて母材破断であった。以上の結果から、最適な通电時間は GA 材、GI 材それぞれ

れ異なり、本研究の範囲では強度や破断形態の観点から GI 材では 0.60s、GA 材では 0.30s が最も適切な条件であるという結果が得られた。

3.2 通电時間による界面組織の変化

前述した引張試験の結果と接合界面組織の比較を行うため、接合界面組織について SEM-EDS で観察した結果を図 2 に示す。各試料の接合界面組織を観察した結果、GA 材とアルミニウム合金の接合では通电時間 0.25s で 6 ~ 7 μm 程度の厚い反応層が接合界面に生成されていた。この反応層を EDS により点分析したところ、4~5at%程度の Zn 含有が認められたことから、亜鉛めっきの排出が遅れたために反応層が厚くなったものと思われる。0.30s の試料では Zn は検出されず、かつ反応層は薄くなっていた。0.30s ではめっき層の排出が進んで反応層が薄くなり、この結果接合強度がもっとも高くなったものと考えられる。また、GI 材とアルミニウム合金の接合では、通电時間を変化させても反応層の厚さはほとんど変わらず、亜鉛含有量も少ないことから、GI 材

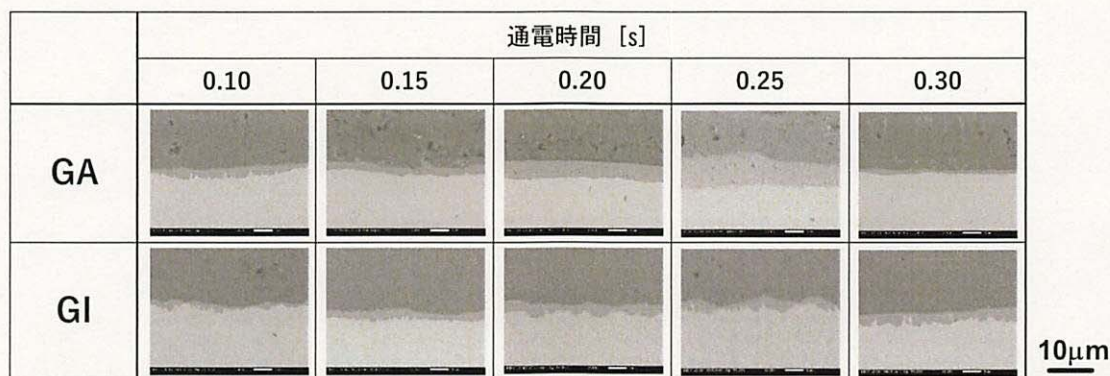
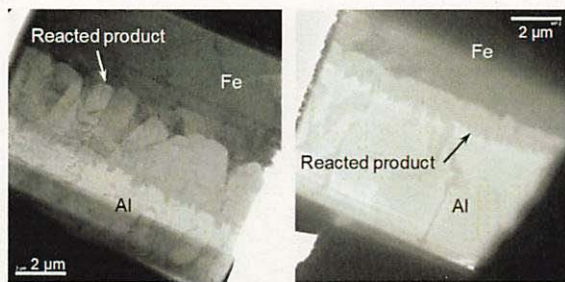


図2 接合界面反応生成物の SEM 観察



(a) GA 0.10s (b) GA 0.30s

図3 界面反応層のTEM観察

とアルミニウム合金の接合では早い段階で亜鉛めっきの排出がなされていると推測される。GA材とGI材で排出速度が異なる主な原因として、GA材のめっき層は鋼母材表面と合金化されているが、GI材のめっき層は亜鉛の単層であるためGA材の方がめっき層の融点が高いことが挙げられる。

3.3 TEMによる接合界面組織の観察

SEM-EDSで得られた結果を元に、GA材の通電時間0.10s、0.25s、0.30sとGI材の通電時間0.25sの試料について反応層のTEM観察およびEDS分析を行った。TEM画像の代表例として、GA材0.10sとGA材0.30sの反応層観察結果を図3に示す。図3(a)に示した0.10sでは、反応層はAl側から柱状に析出し不均一な状態を呈しているが、(b)に示した0.30sでは薄く均一な反応層を形成している。これは、0.10sでは反応層形成の過渡的状態であることを示していると思われる。通電時間0.30sではZnの排出と均一な反応層形成が進み、高い接合強度と母材破断につながったものと考えられる。

反応層の組成をTEM-EDSで分析した結果を表1に示す。ひとつの試料について3箇所の特分析を行い、その平均値を示した。前節SEM-EDSの分析同様、GA材0.25sでは3at%程度のZn含有が認められた。他の試料では反応層においてZnは微量であり、AlとFeの組成比はおおよそ(4~5):1の比でほぼ一定であったので、Alリッチ側化合物であると推測された。この化合形態を同定するため、GA材0.30sの試料

表1 TEM-EDSによる反応層定量分析 (at%)

	通電時間 [s]	Al	Fe	Zn
GI	0.25	83.57	16.30	0.07
	0.10	83.42	16.50	0.04
GA	0.25	78.40	18.63	3.00
	0.30	82.83	17.00	0.13

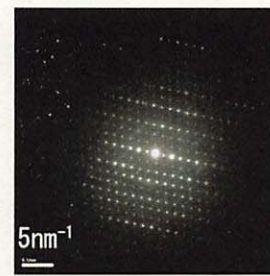


図4 GA材0.30sの反応層から得られたディフラクションパターン

について得たディフラクションパターンを図4に示す。回折図形より求めた結晶の格子面間隔は $d_1 \approx 6.756$, $d_2 \approx 3.891$, $d_3 \approx 2.886$ ($\times 10^{-10} \text{m}$)であった。これらを既知のデータと参照した結果、反応層は FeAl_3 であると推測された⁴⁾。

4. 結言

亜鉛めっき鋼板とアルミニウム合金の抵抗スポット溶接において、下記の知見が得られた。

- 1) GI材とGA材では破断強度の通電時間依存性が異なることがわかった。
- 2) 通電が短時間ではめっき層のZn排出や接合反応層形成が過渡的状態であり、本研究の範囲ではGA材では0.30s、GI材では0.60sの通電時間がもっとも適切であることがわかった。
- 3) TEMを用いた分析結果から、界面に形成される反応層は金属間化合物 FeAl_3 である可能性が高いことがわかった。

参考文献

- 1) 林 孝一, 見山 克己, 前田 憲太郎, 田沼 吉伸, 堀内 寿晃, 齋藤 繁, 吉田 協, 自動車用亜鉛めっき鋼板とアルミニウム合金板材の抵抗スポット溶接, 北海道科学大学研究紀要, 45, pp. 99-106 (2018) .
- 2) 林 孝一, 見山 克己, 堀内 寿晃, 齋藤 繁, 吉田 協, 前田 憲太郎, 田沼 吉伸, 自動車用亜鉛めっき鋼板とアルミニウム合金板材の抵抗スポット溶接 (第2報), 北海道科学大学研究紀要, 47, pp. 39-43 (2019) .
- 3) 河井 航平, 日本機械学会北海道学生会第48回学生員卒業研究発表講演会概要論文集, pp. 87-88, (2019) .
- 4) P. J. BLACK, The Structure of FeAl_3 . I, Acta Cryst. (1955).