

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)

A Resistance Spot Welding of the galvanized steel sheet and the aluminum alloy for automobile (II)

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***

Koichi Hayashi, Katsumi Miyama, Toshiaki Horiuchi, Shigeru Saito, Kanou Yoshida,
Kentaro Maeda and Yoshinobu Tanuma

概要

近年、自動車は環境対策の一環としての車体軽量化や衝突安全性能の向上などが求められている。この相反する課題への解決策として、鋼板の一部を軽量のアルミニウム合金に置換したマルチマテリアル化が検討されているが、鋼板とアルミニウム合金板を冶金的に接合すると接合界面に脆弱な金属間化合物が生成されて接合強度が劣化する。一方、この金属間化合物層の厚さを抑制できれば、引張せん断強度を増大することができる。マルチマテリアル化の促進には補修方法の確立も重要である。車体整備現場で使用されているスポット溶接機を用いた自動車用亜鉛めっき鋼板とアルミニウム合金板の溶接条件について検討した結果、通電方向により降伏挙動に違いが出ること、接合界面反応層の残存の Zn 量に差が生じることがわかった。

1. はじめに

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。

現在の自動車車体は、鋼板をプレス成型し、それを 3,000 から 5,000 箇所の電気抵抗スポット溶接 (以後、スポット溶接) によって接合した「モノコックボディ」が主流である。しかし、鋼板とアルミニウム合金板といった異種金属材料を冶金的に接合すると、接合界面に脆弱な金属間化合物 (Inter Metallic Compound 以後、IMC) が生成されるために、接合強度が劣化することが知られている⁽¹⁾。

このため現状では、それらの接合箇所には機械的接合や接着、またはその複合が用いられている。しかし、コストおよび時間的な面でスポット溶接には及ばないため、普及が進んでいない。

一方で、接合界面に生成する Fe-Al 系 IMC 層の厚さを $1\mu\text{m}$ 程度に抑制すると引張せん断強度が増大することが知られている^(2,3)。したがって、信頼性の高い溶接継手を得るためには界面反応生成物の制御が必要となる。

これまでも軟鋼板とアルミニウム合金板の接合事例はあるが、自動車車体で使用している溶融亜鉛めっき鋼板 (以後、GI 鋼板) および合金化溶融亜鉛めっき鋼板 (以後、GA 鋼板) とアルミニウム合金の接合事例は乏しい。さらに接合方法も FSW (摩擦攪拌溶接) やレーザ溶接、大電流によるスポット溶接など、特別な設備を有する自動車メーカーでの接合を目的としたものとなっている。車体構造に鋼板-アルミニウム合金板の組み合わせを進めるためには、この界面反応生成物の制御を製造のみではなく、補修においても確立する必要がある。

自動車用めっき鋼板は、主に GI 鋼板および GA 鋼板が使用されている。GI 鋼板は主に欧州自動車メーカーが使用しているが、亜鉛めっきにより成形時の摩擦抵抗が大きくなり、加工しにくいというデメリットがある。GA 鋼板は主に国内自動車メーカーが使用し

* 北海道科学大学寒地先端材料研究所 北海道科学大学短期大学部自動車工学科
** 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
*** 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建築学科

ているが、浸漬めっき後に再加熱することで母材側からめっき層へ Fe を拡散させて成形性、溶接性、塗装性を改善している。

本研究では、車体整備現場で使用されている三相整流式抵抗スポット溶接機を使用して、自動車用めっき鋼板とアルミニウム合金板との接合条件確立を目指している。これまでに、めっき層の違いや溶接条件が接合強度と界面反応生成物に及ぼす影響について報告した⁽⁴⁾。次章以降では、通電電流の方向が接合強度に与える影響について報告する。

2. 使用材料および実験方法

GA 鋼板 (板厚 0.8mm, 原材 冷間圧延鋼板 (SGCC 材)) とアルミニウム合金 A6061 板 (板厚 0.8mm : 以後, A6061) を用いて、図 1 に示す ISO 14273 「抵抗溶接—溶接の破壊試験—試験片の寸法と引張せん断試験 抵抗スポットおよびプロジェクション溶接の手順」に規定される引張せん断試験片を作製した。なお、それぞれ接合前にアセトンを用い脱脂洗浄をした。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) とクロム銅合金製の電極 (キャップチップ 以後, 電極) を用いて溶接を行った。溶接条件は、過去の研究と比較するため通電時間、電流値、加圧力は先行研究と同条件で行い⁽⁴⁾、溶接部に流れる直流電流の向きを変更した。具体的には、A6061 側を正極とした溶接 (以下, A6061 正極) と、A6061 側を負極とした溶接 (以下, A6061 負極) について比較検討を行った。表 1 に、溶接条件を示す。電極形状は GA 側に JIS C9304 規定の DR 型 (先端径 $\phi 6\text{mm}$, R40, クロム銅 (Cu-Cr)), アルミニウム合金板側に R 型 (R40, クロム銅 (Cu-Cr)) を用いた。

得られた接合体は、JIS Z3136 : 1999 規定の引張せん断試験により、強度を評価した。

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、断面観察する試料を埋め込みした。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亜鉛の挙動を明らかにするため、断面観察には走査型電子顕微鏡/エネルギー分散型 X 線分光器 (SEM-EDS JSM-IT300LA, 日本電子株式会社 以後, SEM-EDS) を用い、界面反応層の厚さ、定量分析を行った。

接合部の仕上がり径 (ナゲット径) の測定は、

A6061 側試料の試料長手方向および直行方向の 2 方向をノギスにより測定し、数値を平均化した。

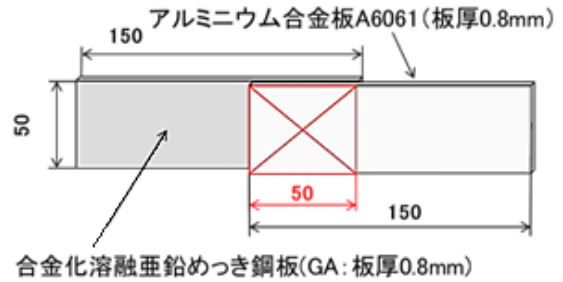


図 1 引張せん断試験片

表 1 溶接条件

溶接電流 [kA]	8, 9, 10
通電時間 [s]	0.1, 0.15, 0.2
加圧力 [kN]	1.00

3. 実験結果

3-1 接合条件による接合強度

表 1 の溶接条件で引張せん断試験を行った。電流値 9.0kA および 8.0kA ではほぼ図 2 (a) に示すような接合界面での破断であるシャー破断を、10.0kA では図 2 (b) に示すような A6061 母材側のナゲット外周部での破断であるプラグ破断となった。



(a) シャー破断



(b) プラグ破断

図 2 スポット溶接部の破断形態

破断形態がシャー破断であった溶接条件 (通電時間 0.20s, 電流値 8.0kA, 加圧力 1.0kN) における荷重-変位曲線を図 3 に示す。A6061 正極を実線, A6061 負極を破線で示す。A6061 正極での最大荷重は 1.90kN, A6061 負極での最大荷重は 1.57kN と差が生

じた。また、A6061 正極では降伏から大きな伸びを示して破断したのに対して、A6061 負極では降伏からの伸びは小さかった。他のシャー破断した接合条件でも同様の傾向が見られた。

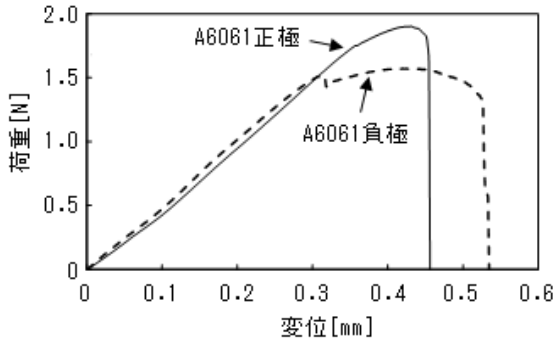


図3 荷重-変位曲線（シャー破断）

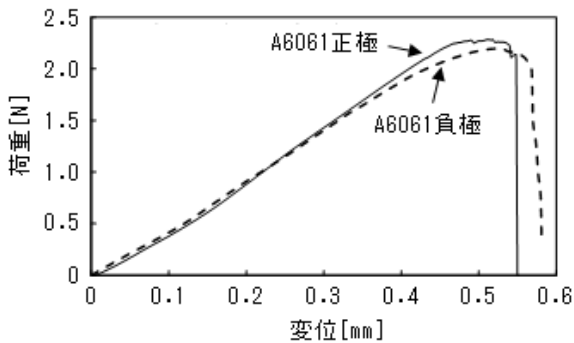


図4 荷重-変位曲線（プラグ破断）

一方、破断形態がプラグ破断であった溶接条件（通電時間 0.20s、電流値 10.0kA、加圧力 1.0kN）における A6061 正極の場合（実線）と、A6061 負極側（破線）の引張り試験結果を図 4 に示す。A6061 正極での最大荷重は 2.28kN、A6061 負極での最大荷重は 2.20kN と大きな差は無く、どちらも降伏からの伸びは小さく破断した。他のプラグ破断した接合条件でも同様の傾向が見られた。

3-2 接合部板厚とナゲット径

GA 鋼板と A6061 の接合界面反応層（溶接部中央部分）の SEM-EDS 観察結果を図 5 に示す。スポット溶接の加熱、加圧により A6061 が薄く塑性変形しているが、(a) A6061 正極に比べ (b) A6061 負極の方が、薄く変形していることがわかる。このことから A6061 負極の場合の方がより多く発熱し、より大きい変形量を生じたと推測される。

発熱量に差があれば、接合部のナゲット径にも同様の傾向が見られると推測した。接合部 A6061 側の手方向および直行方向の 2 方向をノギスにより測定し、数値を平均化したナゲット径の測定結果を表 2

に示す。いずれの溶接条件でも A6061 負極とした場合のナゲット径が大きくなっていた。



(a) A6061 正極



(b) A6061 負極

図5 接合界面反応層の SEM-EDS 像

表2 ナゲット径 [mm]

電流値 [kA]	8.00	9.00	9.00	8.00	8.00
通電時間 [s]	0.20	0.20	0.10	0.10	0.15
A6061 正極	4.4	5.3	4.9	4.6	4.5
A6061 負極	5.3	5.6	5.2	5.0	5.2

異種金属を接合し通電すると、その接合部でジュール熱ではない熱発生あるいは吸収が起こるペルチェ効果が知られている。このときの単位時間当たりの発熱（吸熱）量 Q [J] と電流 I [A] との関係は、次の(1)式のように表すことができる。

$$Q = \pi_{AB} \cdot I \quad (1)$$

ここで、 π_{AB} はペルチェ係数である。

溶接では、電流方向によって温度分布や発熱量等、溶接性に影響することが知られており、それらは極性効果と呼ばれている^(5,6)。

スポット溶接は、2つの金属の接合部の電気抵抗によるジュール熱で金属を溶融接合している。主な発熱はこのジュール熱であるが、極性効果により発熱量に多少の増減が発生する。今回使用した三相系整流式スポット溶接機は、制御された溶接電流を溶接トランス二次側で直流に変換している。直流は極性が反転しないため、極性効果が相殺されずに接合部の最高到達温度に差が生じたと考えられる。

A6061 負極の場合は、極性効果により A6061 正極に比べ発熱量が大きくなり、A6061 が塑性変形しやすい状態となり、A6061 板厚に差が生じたものと考えられる。

図 3 に示したシャー破断をした場合の荷重-変位曲線において、塑性からの伸びに違いが見られた原因を検討した。A6061 正極の場合は A6061 の変形量が小さく A6061 の板厚が十分にあり材料強度を確保できたため、降伏からの伸びは小さく破断したと推測できる。一方、A6061 負極の場合は A6061 の変形量が大きく A6061 の板厚が薄くなっているため、シャー破断より先に塑性変形が生じ降伏から大きな伸びを示して破断したと推測できる。

3-3 接合断面の観察

引張試験によって、シャー破断した溶接条件(通電時間 0.20s, 電流値 8.0kA, 加圧力 1.0kN)における接合部断面の Zn に関して EDS による定量分析を行った。接合界面反応層(溶接部中央部分)の SEM-EDS 像および GA 側, A6061 側, その中間近傍と分けた測定箇所を図 6 に示す。表 3 に A6061 正極と A6061 負極での Zn を定量分析結果の平均値を示す。

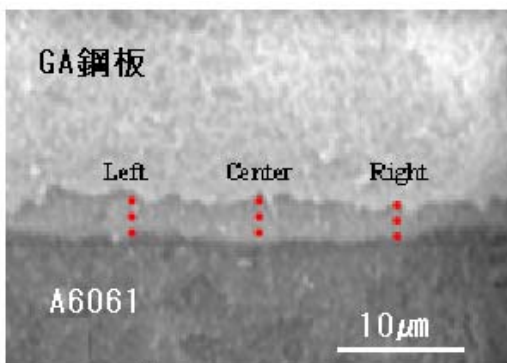


図 6 SEM-EDS 像

表 3 接合界面反応層の Zn 定量分析結果

	EDS による定量分析 (at%)	
	A6061 正極	A6061 負極
GA 鋼板側	2.78	0.49
中間近傍	1.55	0.34
A6061 側	0.93	0.38

GA 鋼板のめっき層は、合金化された $FeZn_{13}$ (ζ相) で構成され、厚さは約 $10\mu m$ であった⁽⁴⁾。

Zn の定量分析結果から、残存する Zn は GA 鋼板側から A6061 側に濃度勾配をもって分布していると推測される。GA 鋼板側, 中間近傍, A6061 側のいずれ

においても、A6061 正極に比べ A6061 負極の方が接合界面反応層の Zn の残存が少ない。これも極性効果により A6061 負極の方が A6061 正極に比べ発熱量が大きくなり、Zn の排出が進んだものと推測する。

4. まとめ

車体整備現場で使用されているスポット溶接機を用いて、GA 鋼板と A6061 板を接合した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- 1) 溶接電流 10.0kA 以上でプラグ破断となる接合強度を得ることができた。
- 2) 溶接部がシャー破断した場合、溶接電流方向の違いにより、荷重-変位曲線における降伏挙動に違いがある。
- 3) A6061 を負極とした電流方向の場合、A6061 が薄く変形しており、これが降伏挙動に影響すると推測される。
- 4) 接合部断面の定量分析の結果から、A6061 を負極とすると、接合界面反応層の Zn の量が少なくなる。
- 5) 上記の 2), 3)の結果は、極性効果による温度上昇の違いに起因すると推測される。

現在、さらに接合強度を向上するためナゲット径の拡大が期待できる GA 鋼板側, A6061 側ともに DR 型電極を使用した溶接条件を探っている。また、引張せん断試験だけではなく、実際の事故などを想定した十字引張試験や寒冷地での事故を想定した冷間引張試験の検証も行っている。

参考文献

- (1) 渡辺健彦ほか：軟鋼と Al-Mg 合金の抵抗スポット溶接，溶接学会論文集，Vol. 23, No. 3, pp. 491-495, 2005.
- (2) 武田実佳子ほか：抵抗スポット溶接法による Fe-Al 異材接合技術の開発，神戸製鋼技報，Vol. 57, No. 2, pp. 69-73, 2007.
- (3) 曲田喜彦ほか：異種金属反応界面に形成する Fe-Al 系金属間化合物薄膜の破壊靱性評価，日本金属学会誌，Vol. 76, No. 4, pp. 272-277, 2012.
- (4) 林孝一ほか：自動車用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，北海道科学大学研究紀要，(45), pp. 99-106, 2018
- (5) 松山欽一，高橋靖雄，長谷川和芳：抵抗溶接の基礎と実際，産報出版，2011.

- (6) 仲田周次ほか：溶接学会論文集 Vol. 2, No. 2,
pp. 264-269, 1984.

