

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

Resistance Spot Welding of the galvanized steel sheet and the aluminum alloy for automobile

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**

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

Abstract

In recent years, automobiles are required to deal with the following two issues. One is compliance with fuel economy regulations which are tightened up in many countries and regions. The other one is improvement of collision safety performance. One solution to this conflicting problem is a hybrid body in which a part of the steel plate used for the vehicle body is replaced by an aluminum alloy. When the steel sheet and the aluminum alloy are metallurgically joined, brittle intermetallic compounds may be formed at the joining interface, so that caused the joining strength deterioration. Therefore, the thickness of the intermetallic compound should be adequately controlled to improve the joining strength. In order to make the hybrid body more popular, it is necessary to establish a repair procedure. For that purpose, we examined the welding conditions of the galvanized steel sheet and the aluminum alloy using a spot welding machine that is used for body repair. It became possible to obtain good joining performance by optimizing the joining conditions and the electrode shape.

1. 緒言

自動車は年々燃費規制が強化され、この対策の一つとして車体の軽量化が求められている。一方で、衝突安全性能の向上も求められている。衝突安全性能向上は補強の追加などが有効であり、車体重量は増加する傾向にある⁽¹⁾。この相反する課題への解決策として、多くの自動車メーカーが高張力鋼板(ハイテン)などを積極的に採用している。さらに一部の車両では、オールアルミニウムボディやCFRP(炭素繊維強化プラスチック)の採用例もあるが、コスト的にすべての車両、とくに価格競争が激しい量販車への適用は困難である⁽²⁾。

こうした中、コストを抑えながら軽量化と強度向上を両立させるために、車体に使用する鋼板の一部を、より軽量のアルミニウム合金に置換したハイブリッド構造が検討されている。

現在の自動車車体は、鋼板をプレス成型したものを、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、鋼とアルミニウム合金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、接合強度が劣化することが知られている⁽³⁾。

そのため、そのような接合箇所には、スポット溶接ではなく摩擦攪拌接合や機械的接合、接着などが用いられている。しかし、コスト面および時間的な面ではスポット溶接に劣るのが現状である。

一方で、接合界面に生成するFe-Al系IMC層の厚さを約1 μ m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^(4, 5)。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。これまでに通電電流を20~30kAとした事例は報告されているが、このような大電流を車体整備現場で使用することは困難である。車体構造のハイブリッド化を進めていくためには、この界

* 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

** 寒地先端材料研究所, 北海道科学大学工学部機械工学科

*** 寒地先端材料研究所, 北海道科学大学工学部建築学科

面反応生成物を制御した溶接条件を製造のみではなく、補修時にも確立する必要がある。

自動車用めっき鋼板は、主に溶融亜鉛めっき鋼板(以後、GI 鋼板) と合金化溶融亜鉛めっき鋼板(以後、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。

本報告では、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を接合し、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比較検討した。

2. 使用材料および実験方法

150×50 mmのGI 鋼板(板厚 0.8mm, 原材 冷間圧延鋼板: SGCC 材)および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板(板厚 0.8mm, 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。

抵抗スポット溶接には、株式会社ヤシマ製の三相整流式抵抗スポット溶接機(YSI-25EZ-P)とクロム

銅合金製の電極(キャップチップ 以後、電極)を用いた。表1にスポット溶接機の仕様を示す。

溶接部の強度を測定するために、中立電機株式会社製の簡易引張試験機(ST-40)を用いて、クロスヘッドスピード0.5mm/minで引張せん断試験を行った。

また、接合界面反応層に生成したIMC組織を観察するため、通電電流9.0kA、加圧力2.00kN、通電時間0.20sで溶接を行い、溶接部のほぼ中央部分を精密切断した後、日本電子株式会社製の走査型電子顕微鏡/エネルギー分散型X線分光器(SEM-EDS JSM-IT300LA 以後、SEM-EDS)を用いて界面反応層の厚さおよび各元素の定量分析を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 GI 鋼板およびGA 鋼板のめっき層

GI 鋼板とGA 鋼板をSEM-EDS および株式会社リガク製の全自動水平型多目的X線回析装置(SmartLab)を用いて、めっき層の同定と厚さを測定した。GI 鋼板のめっき層は、図2(a)に示すようにZnで構成されており、厚さは約13 μ mであった。GA 鋼板のめっき層は、図2(b)に示すように合金化されたFeZn₁₃(ζ 相)で構成され、厚さは約10 μ mであった。

図3にFe-Zn系二元状態図⁶⁾を示すが、FeZn₁₃(ζ 相)の融点は約530 $^{\circ}$ CとZnの融点(約420 $^{\circ}$ C)よりも高くなっている。

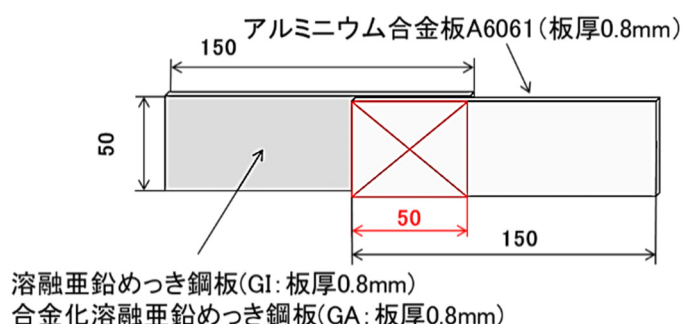


図1 引張せん断試験片

表1 三相整流式抵抗スポット溶接機の仕様

型 式	最大出力	定格入力電圧	定格容量	最大加圧力	冷却方式
YSI-25EZ-P	12,500A	三相 200V	25kA	4.5kN	内部循環式水冷

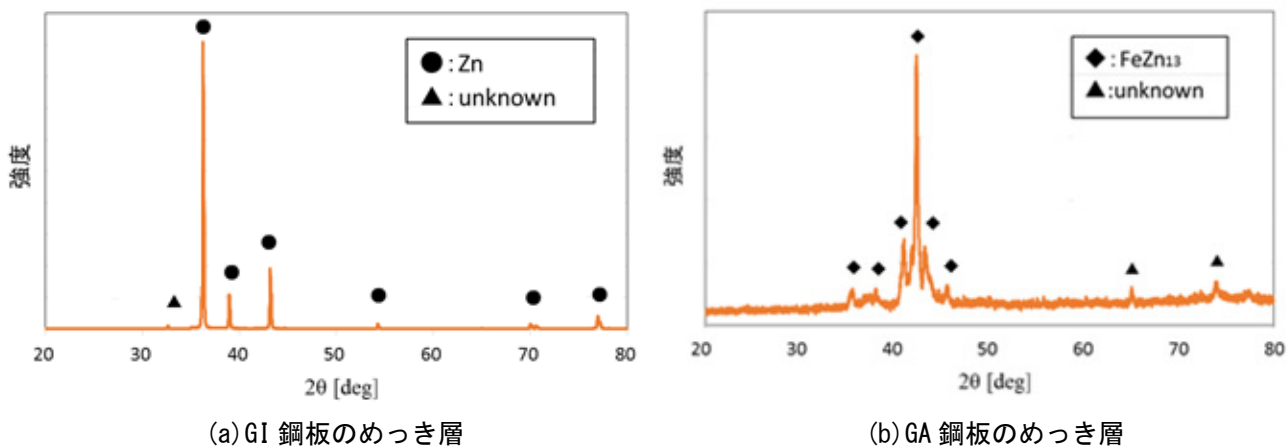
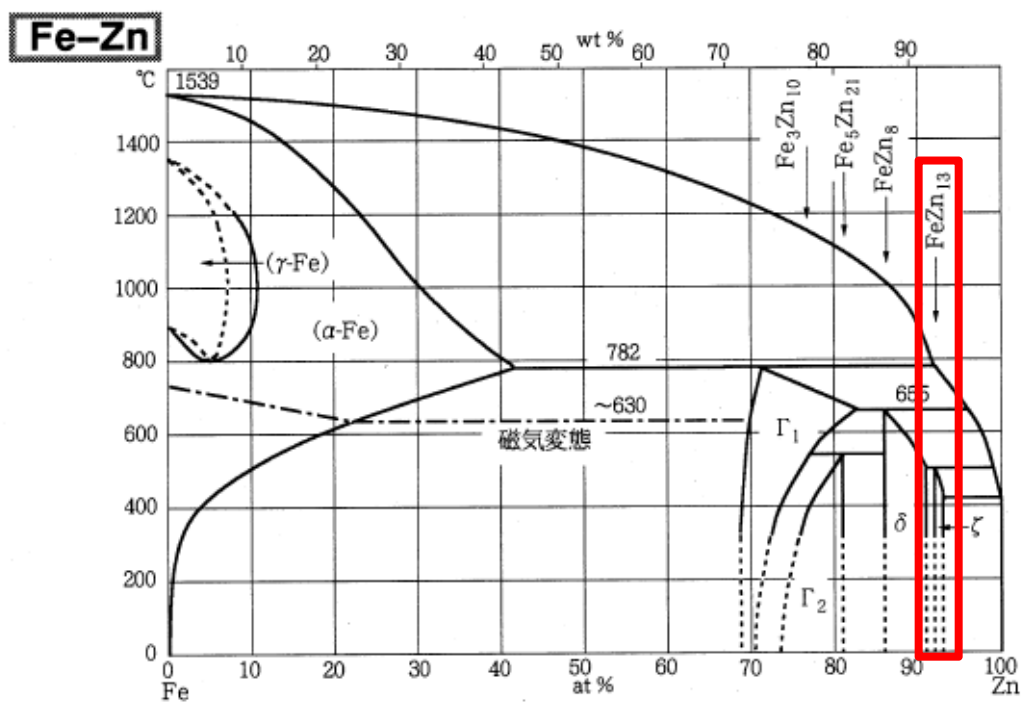
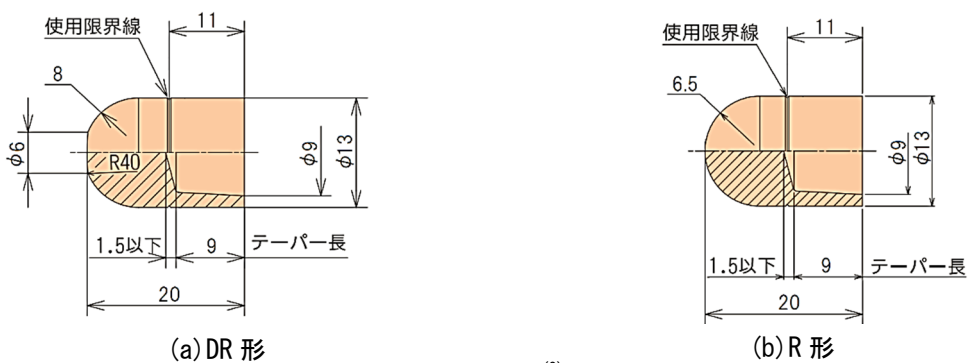


図 2 X線回折結果

図 3 Fe-Zn 系二元状態図⁽⁶⁾図 4 電極形状⁽⁸⁾

3.2 電極形状の影響

通電時間を 0.20s 一定として、通電電流および加

圧力を変化させて溶接した。電極を図 4(a)に示す自動車車体用として一般的な DR 形電極(先端径φ6、

R40) を使用して溶接した結果を表 2 および表 3 に

表 2 GI 鋼板と A6061 の溶接結果

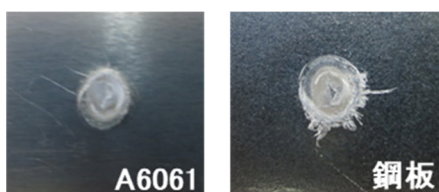
(GI 鋼板, A6061 とともに DR 形電極使用)

加圧力 [kN]	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	
電流値	6.0	E	剥離	剥離	剥離	剥離
	8.0	E	剥離	剥離	剥離	剥離
[kA]	10.0	E	P	P	P	P

表 4 GI 鋼板と A6061 の溶接結果

(GI 鋼板に DR 形, A6061 に R 形電極使用)

加圧力 [kN]	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	
電流値	6.0	E	剥離	剥離	剥離	剥離
	8.0	E	P	S	P	S
[kA]	10.0	E	P	P	P	S



(a) シャー破断

示す。

表 3 GA 鋼板と A6061 の溶接結果

(GA 鋼板, A6061 とともに DR 形電極使用)

加圧力 [kN]	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	
電流値	6.0	E	剥離	剥離	剥離	剥離
	8.0	E	剥離	剥離	剥離	剥離
[kA]	10.0	電源容量エラー				

表 5 GA 鋼板と A6061 の溶接結果

(GA 鋼板に DR 形, A6061 に R 形電極使用)

加圧力 [kN]	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	
電流値	6.0	E	剥離	剥離	剥離	剥離
	8.0	E	S	P	S	剥離
[kA]	10.0	E	P	P	P	P



(b) プラグ破断

図 5 スポット溶接部の破断形態

表中の S は図 5(a) に示すような接合界面での破断であるシャー破断を, P は図 5(b) に示すようなアルミニウム合金母材側のナゲット外周部での破断であるプラグ破断を示す。剥離は溶着せず接合不可となったもの, E および電気容量エラーは溶接機が接合不可と判断して通電を中断したものを示す。

表 2 および表 3 から通電電流 10.0kA では, GI 鋼板の一部で接合が可能となったが, GA 鋼板では電源容量エラーとなり, いずれも接合できなかった。

アルミニウム合金は, 電気・熱の良導体であるから接合界面での発熱を促進するためには大電流を流す必要がある。

本研究では, 車体整備現場で使用されているスポット溶接機を使用するという条件を満たすため, アルミニウム合金側のみ図 4(b) に示す R 形電極(先端 R6.5)とした。電極先端径を小さくし電極部での電圧降下を抑えることで, 接合界面での発熱を促すことを試みた。その結果, 表 4 および表 5 に示すように GA 鋼板でも 8.0kA 以上でアルミニウム合金母材側のプラグ破断となる接合結果を得ることができ

た。

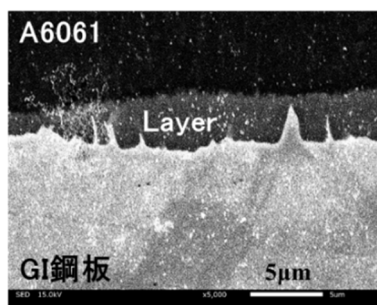
3.3 めっき層の違いによる界面反応層の影響

GI 鋼板とアルミニウム合金板, および GA 鋼板とアルミニウム合金板をスポット溶接した際の接合界面反応層に生成する IMC 組織を比較するため, 通電電流 9.0kA, 加圧力 2.00kN, 通電時間 0.20s で試験片を作製した。図 6(a) および図 7(a) に GI 鋼板または GA 鋼板とアルミニウム合金板の接合界面反応層(溶接部中央部分)の SEM-EDS 観察結果および EDS による定量分析結果を示す。また接合界面反応層(溶接部中央部分)の元素マッピング結果を図 6 および図 7 の (b) (c) (d) に示す。元素マッピング画像の色は, 左下端のカラーバー(X 線の計数)に従っており, 黒から青, 緑, 黄, 赤, 白へと計数が増加することを意味する。

GI 鋼板とアルミニウム合金板の溶接では, 図 6(a) に示す EDS による定量分析と図 8 に示す Al-Fe 系二元状態図⁽⁷⁾から Fe₂Al₅と推定される単一の IMC 層が厚さ約 2~3 μm 生成されている。また図 6(d) の Zn マッピングのように界面反応層に Zn は残存

していない。一方、GA 鋼板とアルミニウム合金板の溶接では、図 7(a)に示す EDS による定量分析と図 8 に示す Al-Fe 系二元状態図⁽⁷⁾からアルミニウム合金側に FeAl_3 、GA 鋼板側に Fe_2Al_5 と推測される IMC 層が厚さ約 $10\ \mu\text{m}$ 生成されている。また図 7(d)の Zn マッピングのように界面反応層の GA 鋼

板側に Zn が多く残存している。これは合金化によりめっき層 FeZn_{13} (と相)の融点が約 530°C と Zn の融点(約 420°C)よりも高くなったため、Zn の溶解・排出が十分に行われずに Zn が界面反応層に残存したと推測される。



	EDS による定量分析 (at%)			推定される組成
	Al	Fe	Zn	
Layer 平均	71.75	28.25	—	Fe_2Al_5

(a) SEM-EDS 像と EDS による定量分析結果

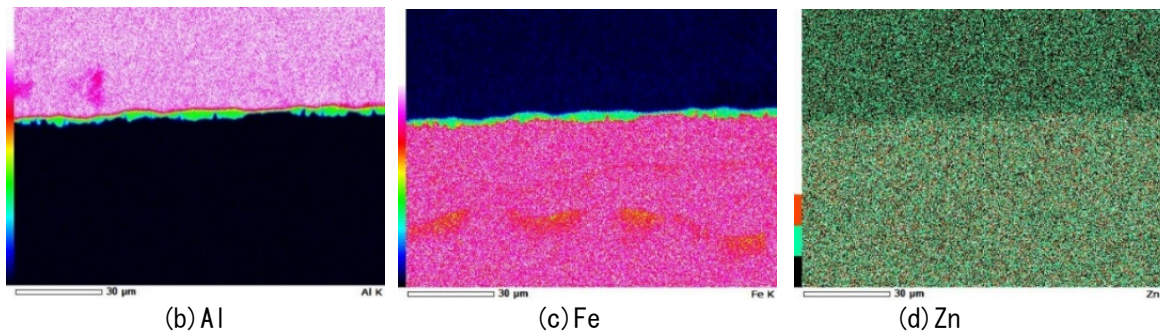
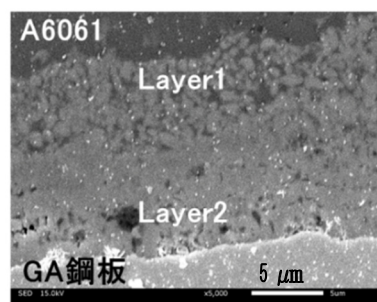


図 6 GI 鋼板と A6061 接合界面反応層の SEM-EDS 像と EDS による定量分析と元素マッピング結果



	EDS による定量分析 (at%)			推定される組成
	Al	Fe	Zn	
Layer1 平均	81.07	16.79	2.14	FeAl_3
Layer2 平均	71.66	21.29	7.05	Fe_2Al_5

(a) SEM-EDS 像と EDS による定量分析結果

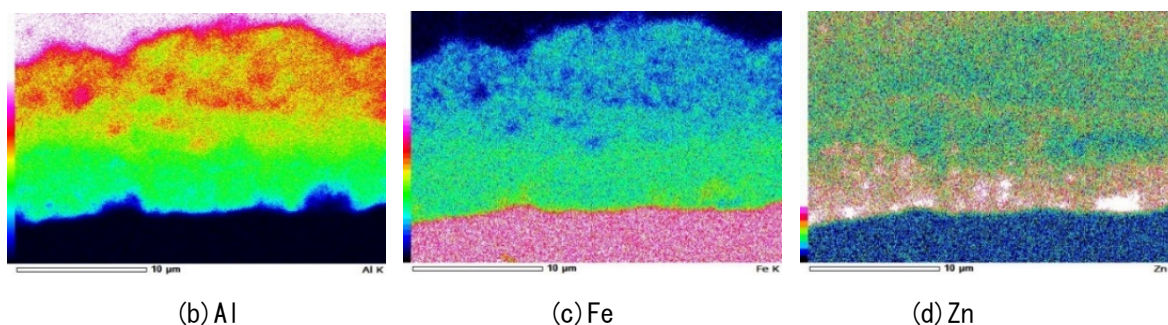


図 7 GA 鋼板と A6061 接合界面反応層の SEM-EDS 像と EDS による定量分析と元素マッピング結果

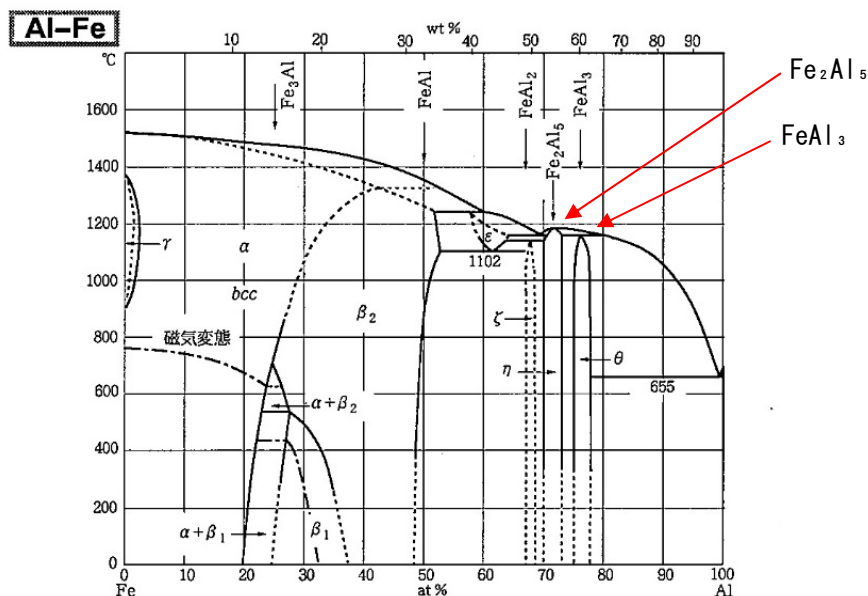


図8 Al-Fe系二元状態図⁽⁷⁾

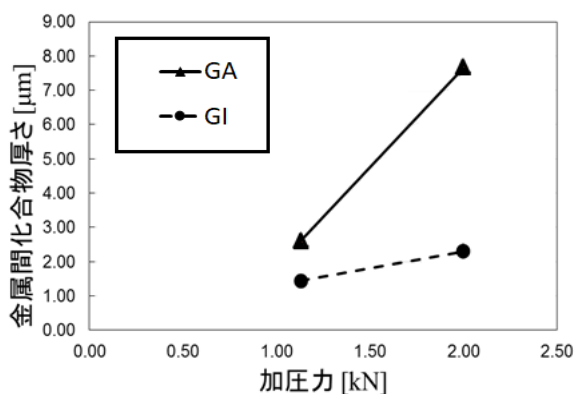


図9 加圧力と界面反応層 (IMC 層) の厚み
(溶接条件 : 9.0kA, 2.00s)

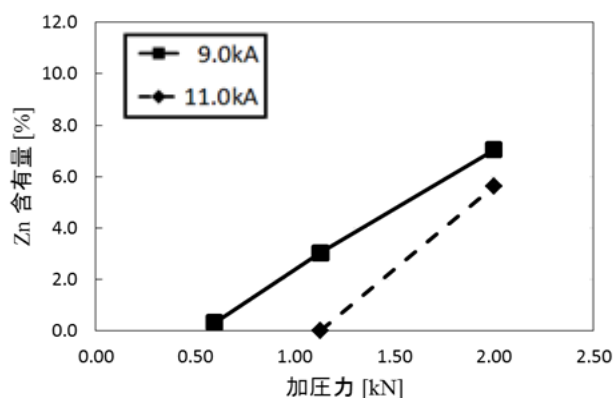


図10 加圧力と界面反応層 Zn 残存量 (%)
(溶接条件 : 2.00s)

3.4 加圧力の影響

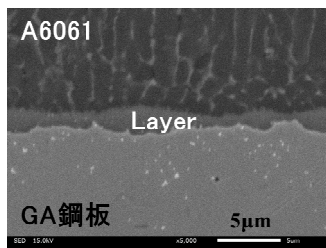
図9に加圧力変化によるIMC層の厚さ変化(溶接中央部)を示す。溶接条件は、電流値9.0kA、通電時間0.20sとした。

GI鋼板とアルミニウム合金板、およびGA鋼板とアルミニウム合金板のいずれにおいても、加圧力増加に伴いIMC層の厚さが増大している。しかし、GI鋼板とアルミニウム合金板の場合は、加圧力を増大してもIMC層厚さの変化はわずかであり、かつ界面反応層全域にわたって厚さが $2\mu\text{m}$ 程度の薄くて均一なIMC層が生成されている。これに対して、GA鋼板とアルミニウム合金板の場合は、加圧力増加に伴いGI鋼板よりも厚い $3\sim 8\mu\text{m}$ のIMC層が生成されている。

図10にGA鋼板とアルミニウム合金板で通電時間

を一定として加圧力を変化させた場合の界面反応層に残留するZn含有量(%)を示す。溶接電流が低い、または加圧力が高いほどZnの含有量が増加している。通電電流11.0kA、加圧力1.13kN、通電時間0.20sの溶接条件では、図11に示すようにEDSによる定量分析の結果、界面反応層にZnの残存が確認できず薄いIMC層となっている。

図9と図10の結果から、IMC層の厚さとZnの含有量には相関が認められる。加圧力増加により、軟らかいアルミニウム合金は電極との接触面積が増大し、電極部での電圧降下が抑えられず、接合界面で十分な発熱が得られなかったと推測される。このため、特に合金化により融点が高くなったGA鋼板では、加圧力の増加に伴いIMC層が厚くなる傾向が大きく現れたと推測される。



	EDSによる定量分析 (at%)			推定される組成
	Al	Fe	Zn	
Layer 平均	77.86	22.14	—	FeAl ₃

図 11 GA 鋼板と A6061 接合界面反応層の SEM-EDS 像と EDS による定量分析結果
(溶接条件：通電電流 11.0kA, 加圧力 1.13kN, 通電時間 0.20s)

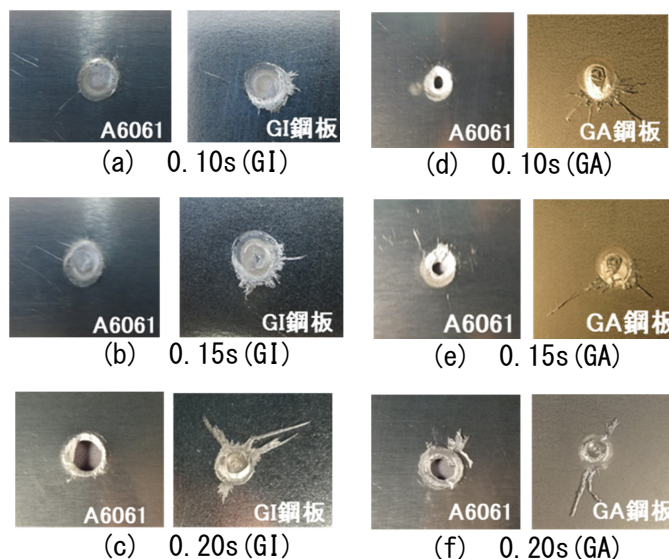
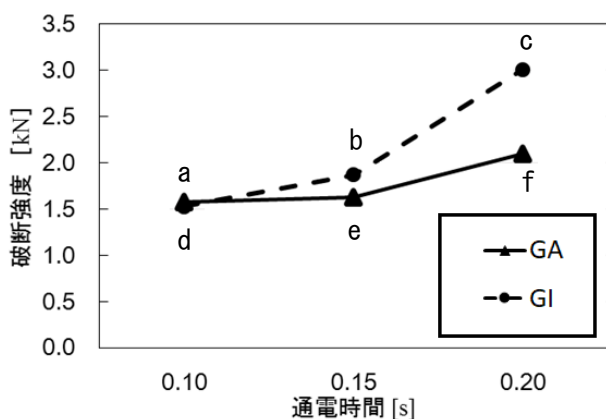


図 12 通电時間と破断強度と破断面 (溶接条件：10.0kA, 1.00kN)

3.5 溶接条件と引張せん断強度

GI 鋼板とアルミニウム合金板、および GA 鋼板とアルミニウム合金板を溶接した際の引張せん断強度を測定した。図 12 に通電電流 10.0kA, 加圧力 1.00kN 一定とし、通电時間を変化させた場合の破断強度と破断部の写真を示す。

引張せん断強度 (Tensile Shear Strength: TSS) の推定式は次のように表すことができる⁽⁹⁾。

プラグ破断の場合は下記の (1) 式で表される。

$$TSS = F \cdot t \cdot d \cdot TS \quad (1)$$

シャープ破断の場合は下記の (2) 式で表される。

$$TSS = (\pi d^2 / 4) \cdot \tau n \\ = (\pi d^2 / 4) \cdot (TSn) / \sqrt{3} \quad (2)$$

ここで、F:係数、t:板厚、d:ナゲット径、TS:母材の引張強さ、 τn :ナゲットのせん断強さ、TSn:ナゲットの引張強さである。ナゲット径とは、接合部に生じる溶融部分の接合界面での大きさを示す。ナゲット径が小さい場合、破断はプラグ破断からシャープ破断に移行する⁽¹⁰⁾。引張せん断強度を向上させるためには、ナゲット径を確保したプラグ破断となる溶接条件の選定が必要となる。

図 12 に示すように、GI 鋼板とアルミニウム合金板では通电時間 (a) 0.10s と (b) 0.15s ではシャープ破断に、(c) 0.20s ではプラグ破断となり破断強度が向上している。一方、GA 鋼板とアルミニウム合金板ではいずれもプラグ破断となっているが、通电時間 (d) 0.10s と (e) 0.15s はナゲット径が小さく、大きさもほぼ同様となっている。通电時間が (f) 0.20s になると、ナゲット径が大きくなり破断強度が向上している。

全般に GA 鋼板とアルミニウム合金板を溶接したものよりも、GI 鋼板とアルミニウム合金板を溶接したものの方が高い強度が得られている。また GI 鋼板とアルミニウム合金板、および GA 鋼板とアルミニウム合金板のいずれにおいても通电時間の増加に伴い破断強度が増大している。

これは通電電流や通电時間の増加に伴い、界面反応層で十分な発熱が得られることで、ナゲット径が増大したことに加え、Zn の溶融・排出が促進され IMC 層の厚さを抑制できたことが要因であると考えられる。

通電電流 10.0kA, 加圧力 1.00kN, 通电時間 0.20s

において、GI 鋼板で約 3kN、GA 鋼板でも約 2kN のアルミニウム合金側でのプラグ破断となる接合強度を得ることができた。

4. 結言

本稿では、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、自動車用亜鉛めっき鋼板とアルミニウム合金板を接合した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- 1) めっき層の組成による融点の違いから、GA 鋼板とアルミニウム合金板の溶接は、GI 鋼板とアルミニウム合金板の溶接に比べて、接合界面に生成する IMC 層が厚く不均一となる。
- 2) GA 鋼板とアルミニウム合金板を溶接する場合は、界面反応層に残存する Zn が IMC 層の厚さに影響する。
- 3) 通電電流、加圧力、通電時間を適切に選択すると Zn の溶融・排出が促進される。これにより IMC 層の厚さが抑制され、接合強度を増大することができる。
- 4) 引張せん断強度を向上させるためには、ナゲット径を確保したプラグ破断となる溶接条件の選定が必要となる。
- 5) アルミニウム合金側電極のみを R 形とすることで、自動車車体整備現場で使用しているスポット溶接機を用いて、GI 鋼板で約 3kN、GA 鋼板でも約 2kN のアルミニウム合金側でのプラグ破断となる接合強度を得ることができた。

今後は、GA 鋼板同士をスポット溶接した際の破壊強度が約 7kN 程度であったことから、さらに接合強度を向上できる溶接条件を探っていく。また、実際の事故などを想定して、引張せん断試験だけではなく、十字引張試験の検証も行う予定である。

参考文献

- (1) 保田芳輝：サステイナブルな自動車材料に開発動向，自動車技術，Vol. 64, No. 11, pp. 4-9 (2010)。
- (2) 大楠恵美：自動車構造材の軽量化と多様化，三井物産戦略研究所レポート，2014. 7. 28 (2014)。
- (3) 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)。
- (4) 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)。

- (5) 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)。
- (6) 長崎誠三ほか：二元合金状態図集，アグネ技術センター，p. 160 (2001)。
- (7) 長崎誠三ほか：二元合金状態図集，アグネ技術センター，p. 28 (2001)。
- (8) 新光機器株式会社：キャップチップ，2017 年 12 月 12 日，<http://shinkokiki.co.jp/welding/spot/256.html>。
- (9) 笹部誠二：アルミニウムのスポット溶接性，溶接学会 平成 28 年度溶接工学専門講座 ものづくり力伝承講座～抵抗溶接と FSW(摩擦攪拌接合)を深める～，pp. 2-1-2-13 (2016)。
- (10) 日本溶接協会 溶接情報センター：自動車ボディ用高張力鋼板の抵抗スポット溶接技術～継手強度特性と最新溶接技術開発の動向～，2017 年 12 月 12 日，http://www-it.jwes.or.jp/we-com/bn/vol_15/sec_2/2-3.jsp。