

自動車用亜鉛めっき鋼板とアルミニウム合金との補修溶接の検討

Study on repair welding of galvanized steel sheet and aluminum alloy.

林 孝一* 見山 克己** 前田 憲太郎*** 田沼 吉伸***
堀内 寿晃** 齋藤 茂** 吉田 協**

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

概要

近年、自動車は各国・地域で強化される燃費規制や衝突安全性能の向上などが求められてる。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ハイブリッド構造を検討しているが、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。ハイブリッド構造を促進には補修方法の確立が必要であり、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。電極先端形状を工夫することで、車体整備現場でも使用可能な通電電流でも、引張せん断強度 2kN/spot 程度、アルミニウム合金側でのプラグ破断となる接合を得ることが可能となった。

1. 緒言

近年、自動車では各国・地域の燃費規制への対応や衝突安全性能の向上などが求められている。燃費規制への対応は車体の軽量化が求められるが、衝突安全性能への対応は補強の追加などにより車体の重量は増加する。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)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適用は困難である。

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。

現在の自動車の車体は、鋼板をプレス成型したものを、4,000箇所以上にも及ぶ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(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⁽¹⁾。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冶金的な接合に劣るのが現状である。

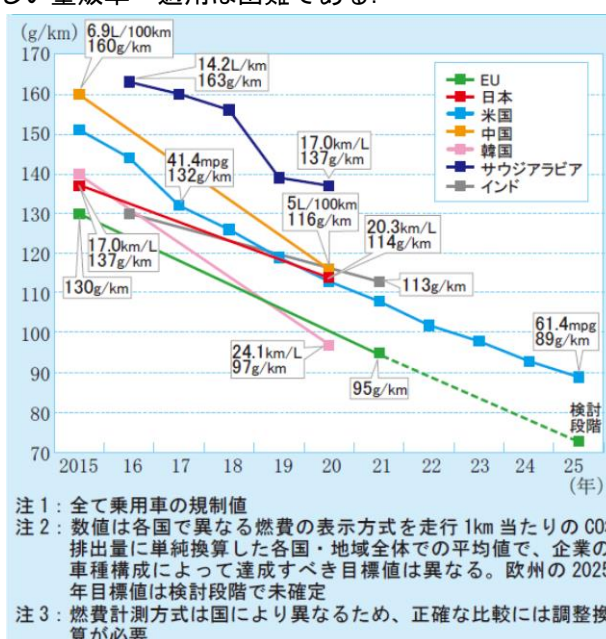


図1 各国・地域の燃費規制値(乗用車)推移
(出展:三井物産戦略研究所レポート)

* 北海道科学大学短期大学部自動車工学科
** 北海道科学大学工学部機械工学科
*** 北海道科学大学工学部建築学科

一方で、接合界面に生成する Fe-Al 金属間化合物層の厚さを約 $1\mu\text{m}$ 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⁽²⁾。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が 20~30kA での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、この界面反応生成物の制御を製造のみではなく、補修方法を同時に確立する必要がある。

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。

主な自動車用めっき鋼板に、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)がある。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を改善している。

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、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。(図 2)

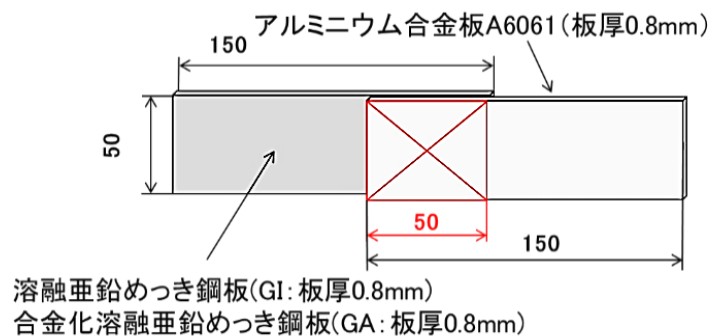


図 2 引張せん断試験片

供試材の化学成分を表 1, 2, 3 に示す。

表 1 GI 鋼板の化学成分 [mass%]

C	Si	Mn	P	S
0.036	0.01	0.21	0.02	0.01

表 2 GA 鋼板の化学成分 [mass%]

C	Si	Mn	P	S
0.05	—	0.20	0.012	0.008

表 3 アルミニウム合金板 (A6061) の化学成分 [mass%]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0.62	0.3	0.29	0.05	1.0	0.19	0.08	0.02

抵抗スポット溶接には、株式会社ヤシマの三相整流式抵抗スポット溶接機 (YSI-25EZ-P) を用いた。仕様は定格入力三相 200V, 定格容量 25kVA, 最大出力 12,500A, 最大加圧力 4.5kN である。電極 (キャップチップ 以後、電極) は、Cu-Cr 合金製を用いた。

溶接部の強度を測定するために、中立電機株式会社の簡易引張試験機(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9.00kA、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、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)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および全自動水平型多目的X線回析装置を用いて、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3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。

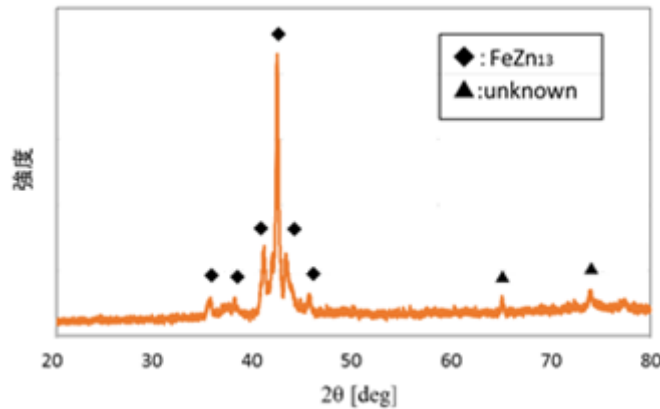


図3 GA鋼板めっき層のX線回析結果

図4にFe-Zn系状態図を示すが、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。

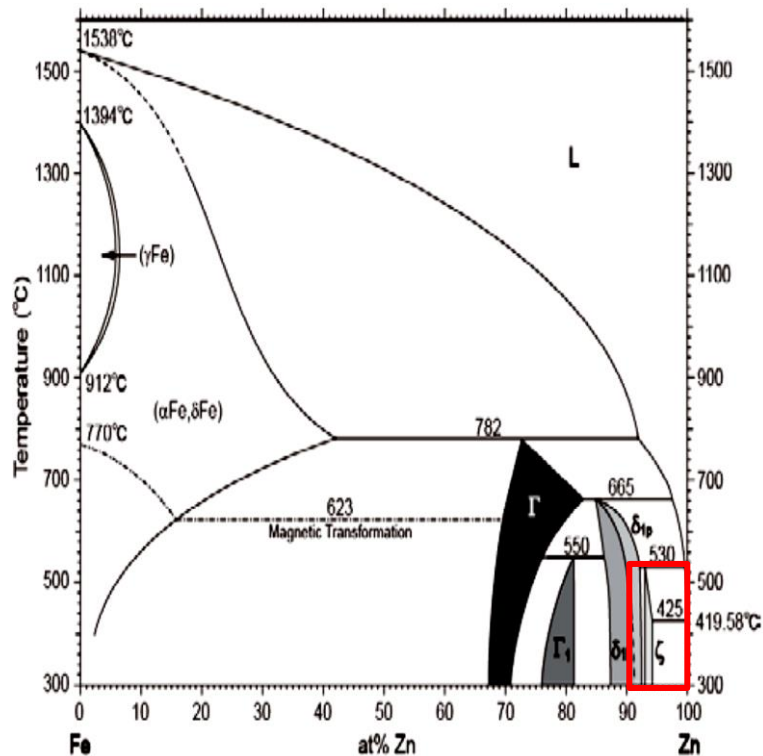


図4 Fe-Zn系状態図

3.2 電極形状の影響

通電時間を 0.20s 一定, 通電電流および加圧力を変化させてスポット溶接した。電極を図 5 の自動車車体用として一般的な DR 形電極(先端径φ6, R40)とした結果を表 4 および表 5 に示す。

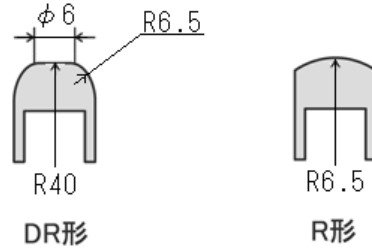


図 5 電極形状

表 4 GI 鋼板と A6061 の溶接 (t=0.20s 一定)

加圧力 [kN]		0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
電 流 値 [kA]	6.0	×	×	×	×	×
	8.0	×	×	×	×	×
	10.0	×	○	○	○	○

表 5 GA 鋼板と A6061 の溶接 (t=0.20s 一定)

加圧力 [kN]		0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
電 流 値 [kA]	6.0	×	×	×	×	×
	8.0	×	×	×	×	×
	10.0	電源容量エラー				

表中の×は溶着せず, または界面での剥離のため接合不可を示す。○はアルミニウム合金母材側のナゲット外周部で破断, いわゆるボタン破断を示す。電気容量エラーは, 溶接機が容量不足と判断して通電を中断したものである。



図 6 ボタン破断したアルミニウム合金板 溶接条件 : 10.0kA, 1.00kN, 2.00s)

表 4 に示すように, GI 鋼板では通電電流 10.0kA の一部で接合が可能となった。加圧力 0.50kN では密着が不十分で十分な接触抵抗が生じなかったと推測される。また加圧力 1.00kN では溶融金属の飛散, いわゆる散りが多く発生している。(図 7)

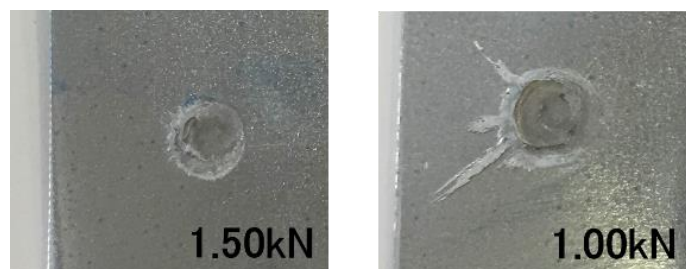


図 7 溶接部の散り (GI 鋼板側) (溶接条件 : 10.0kA, 2.00s)

表 5 に示すように、GA 鋼板では通電電流 10.0kA でも電源容量エラーとなったが、これは合金化によりめっき層の融点、電気抵抗が大きくなったためと推測される。

アルミニウム合金は、電気・熱の良導体であるので発熱を促進するためには大電流を流す必要があるが、車体整備現場で使用されているスポット溶接機という条件を満たすため、アルミニウム合金側のみ R 形電極（先端 R6.5）として、電極先端径を小さくし電流密度を上げることを試みた。その結果、9.00kA 以上でアルミニウム合金母材側のボタン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に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 9.00kA、加圧力 2.00kN、通電時間 0.20s で溶接した。図 8、9 に接合界面反応層（溶接部中央部分）の SEM-EDS 観察結果と元素マッピング結果を示す。

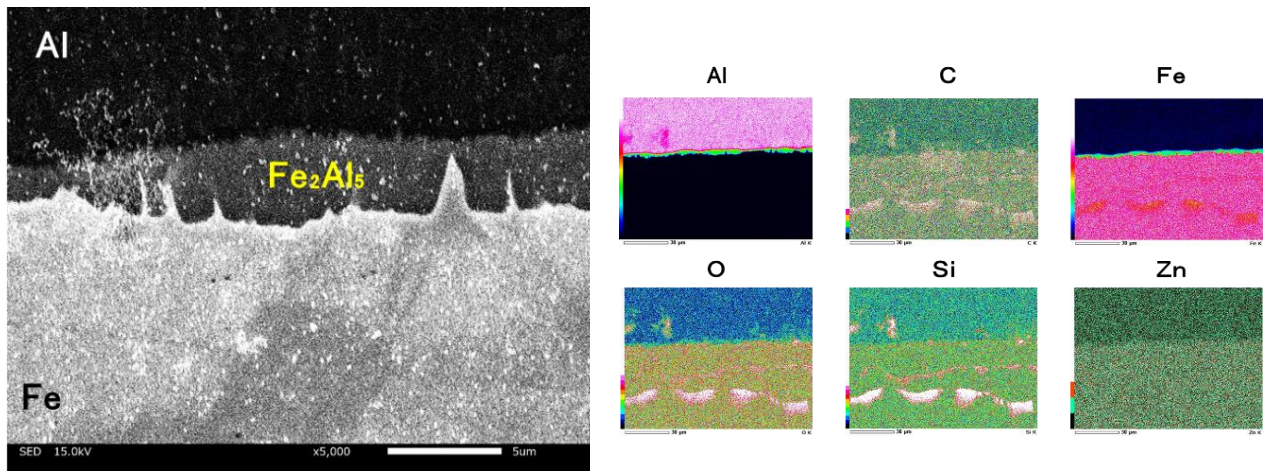


図 8 GI 鋼板と A6061 の接合界面の SEM-EDS 観察結果と元素マッピング結果

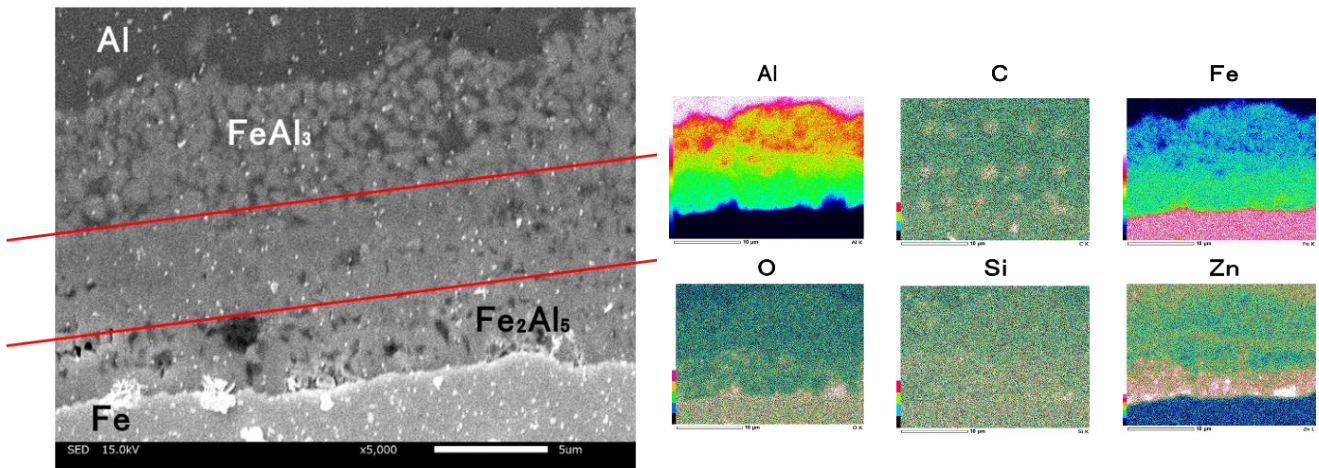


図 9 GA 鋼板と A6061 接合界面の SEM-EDS 観察結果と元素マッピング結果

図 9 GA 鋼板と A6061 接合界面

GI 鋼板とアルミニウム合金板の溶接では、厚さ約 $3\mu\text{m}$ 、 Fe_2Al_5 単一の IMC 層が生成され、界面反応層に Zn が残存していない。一方の GA 鋼板とアルミニウム合金板の溶接では、厚さ約 $10\mu\text{m}$ の反応層が生成され、アルミニウム合金側に FeAl_3 、GA 鋼板側に Fe_2Al_5 の IMC が生成され、図 9 の元素マッピングのように界面反応層に Zn が残存している。

これは合金化によりめっき層 FeZn_{13} （ ζ 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 の溶融・排出が十分に行われなかったと推測される。

3.4 加圧力の影響

図 10 に加圧力の変化による IMC の厚さ (溶接中央部) を示す。溶接条件は、電流値 11.0kA、通電時間 0.20s とした。

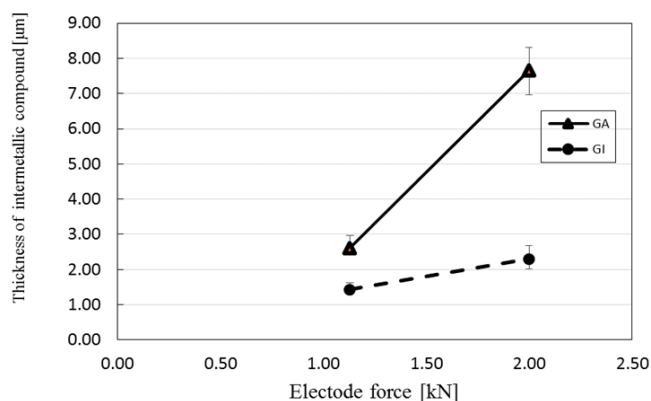


図 10 加圧力と界面反応層 (IMC) の厚み

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 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 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 μm 程度の薄くて均一な IMC 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 鋼板のものよりも厚い 3~8 μm の IMC が生成されている。

図 11 に GA 鋼板とアルミニウム合金板の加圧力の変化による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、Zn の残存が確認できなかった。

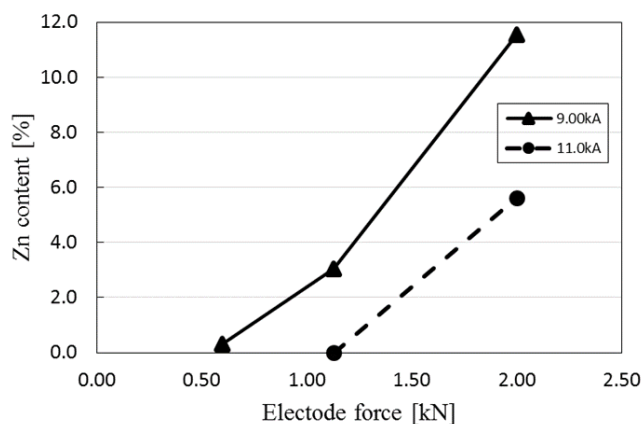


図 11 加圧力と界面反応層 Zn 残存量 (%)

図 10 と図 11 の結果から、IMC の厚さと Zn の含有量には相関が認められる。これは加圧力増加により軟らかいアルミニウム合金が凹み、電極との接触面積が増大し、R 形電極による電流密度向上の効果が相殺されてしまうこと、通電電流が低いと接合界面で十分な発熱が得られないことから、特に合金化により融点が高くなった GA 鋼板とアルミニウム合金板の溶接で影響が大きく現れたと推測される。

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スポット溶接した際の引張せん断強度を測定した。図 12, 13, 14 に電流値加圧力 1.00kN 一定とし、通電電流および通電時間を変化させた場合の引張せん断試験の結果を示す。

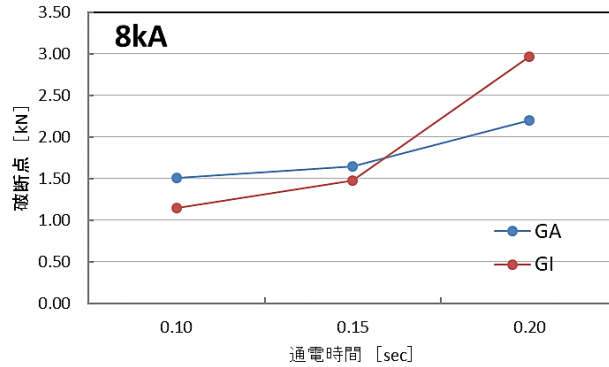


図 12 通电時間と引張せん断強度 (8kA)

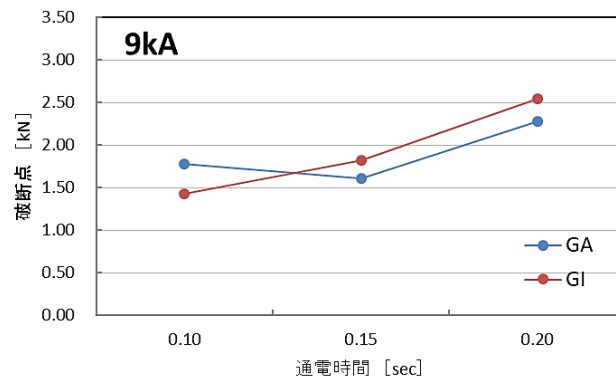


図 13 通电時間と引張せん断強度 (9kA)

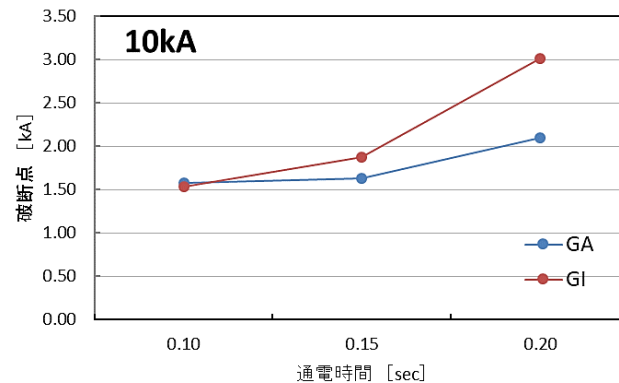


図 14 通电時間と引張せん断強度 (10kA)

いずれの通电電流でも、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。GA 鋼板とアルミニウム合金板の場合は、通电電流による引張せん断強度の変化がほぼ見られない。一方、GI 鋼板とアルミニウム合金板の場合は、通电時間の短い領域では通电電流の増加に伴い強度が増大している。また、いずれにおいても通电時間の増加に伴い強度が増大している。これは通电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 Zn の溶融・排出が促進され、IMC の厚さを抑制できたことが要因であると考えられる。

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た自動車用垂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。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- 1) めっき層の融点の違いにより，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 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，界面反応層の Zn 残存が IMC の厚さに影響する。
- 3) 通電時間，加圧力を適切に選択すると，Zn の熔融・排出が促進されることで，IMC の厚さが抑制され，接合強度を増大することができる。
- 4) アルミニウム合金側の電極を R 形とすることで，自動車車体整備現場でも使用可能なスポット溶接機でも，引張せん断強度 2kN/spot 程度，アルミニウム合金側でのプラグ破断となる接合を得ることができた。
- 5) 鋼板同士のスポット溶接の引張せん断強度が約 7kN/spot 程度であることから，さらなる接合強度の向上を図る必要がある。
- 6) 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，十字引張試験も行う必要がある。

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)。