

(解説)

溶融アルミめっき鋼板を用いたアルミニウム合金と鋼材との異種金属接合

Dissimilar Metal Joining for Aluminum Alloys and Hot-dip Aluminized Steel Sheet



岩瀬 哲*
Tetsu Iwase



笹部誠二*
Seiji Sasabe



松本 剛*
Tsuyoshi Matsumoto



谷川正樹**
Masaki Tanigawa



俵 真**
Makoto Tawara



服部保徳***
Yasunori Hattori

Characteristics for joining of dissimilar metals, in this case aluminum alloys and a newly developed Hot-dip Aluminized Steel Sheet, were evaluated through experiments using resistance spot welding, MIG welding and laser welding. The joint mechanisms of dissimilar metal joints were also studied from the perspective of the interface structures between aluminum alloys and steel. Special attention was paid to the formation of intermetallic compounds, to be able to devise a method for controlling such compounds. This article also includes evaluation results for joint corrosion resistance in corrosive environments.

まえがき = 各種材料には固有の特性がある。構造設計面からはそれらを考慮して、各材料の特長を活かした材料選定を行うことが重要である。しかし、鋼とアルミニウム合金（以下アルミ合金）との組合せの場合には、通常の溶接方法では脆弱な金属間化合物が生成してしまい、その継手強度の低さや不安定さゆえに、機械的締結や接着接合といったコストのかかる方法に頼らざるをえないのが現実である。

当社では、ごく通常の溶接装置を用いながらも、異材接合用途に新開発された溶融アルミめっき鋼板（以下本鋼板）を用いて、接合条件を最適化することにより、鋼とアルミ合金との組合せでもアルミ合金同士並の良好な継手強度が得られる接合法を開発した。その接合方法は、鋼用溶接機でも適用可能となる抵抗スポット溶接機を用いる方法（以下抵抗スポット接合）ならびに線接合としてのミグブレイジングならびにレーザブレイジングであり、ここではそれぞれの技術を解説する。

1. 点接合（抵抗スポット接合）^{1)~4)}

アルミ合金と本鋼板、合金化溶融亜鉛めっき鋼板（以下 GA 鋼板）あるいは冷延鋼板（SPCC）との組合せの継手強度を、JIS Z3136 規定の引張せん断試験方法ならびに JIS Z3137 規定の引張試験方法により評価した。図 1 に接合条件とともに試験結果を示した。

アルミ合金と GA 鋼板あるいは SPCC とをスポット溶接機にて接合した場合、継手の引張せん断強度はアルミ合金同士並の値が得られても界面破断（シェア破断）になりやすく、十字引張では低い継手強度しか得られない。一方、本鋼板を用いて、アルミ合金の 6K21(当社名, AA6022 相当) または 5182 とを接合すると、引張せん断

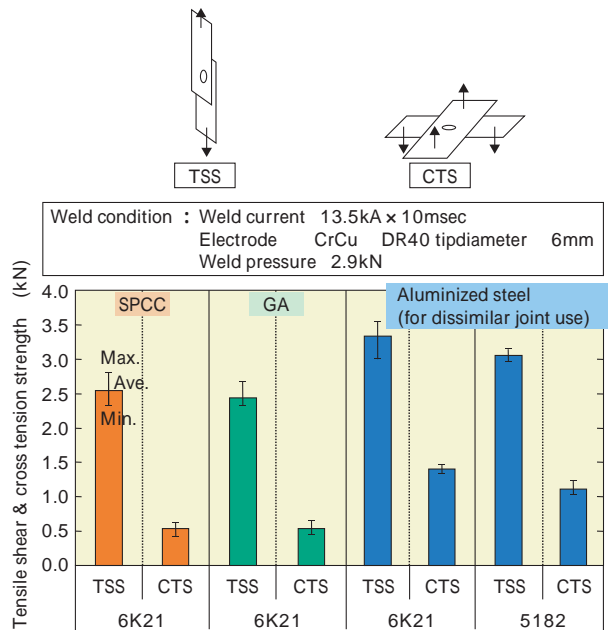


図 1 抵抗スポット接合継手の引張せん断強度(TSS), 十字引張強度(CTS)のSPCCと本鋼板との比較

Fig. 1 Tensile shear strength and cross tension strength of resistance spot joints

強度ならびに十字引張強度とともに、別途得られているアルミ合金同士の継手並（各々概略 3.2kN, 1.5kN）の高い値が得られるとともに、破断モードもアルミ合金母材側のナゲット外周部で破断するいわゆるボタン破断となる。十字引張後の破断状態を写真 1 に示した。

すなわち GA 鋼板ならびに SPCC においてはアルミ合金との接合時に、接合界面全面にわたって Fe-Al 系金属間化合物層が形成される。これに対して、本鋼板とアルミ合金との組合せでは写真 2 に示すような金属間化合物

*アルミ・鋼カンパニー 技術部 **アルミ・鋼カンパニー 真岡製造所 アルミ板研究部 ***日新製鋼 技術研究所 表面処理研究部

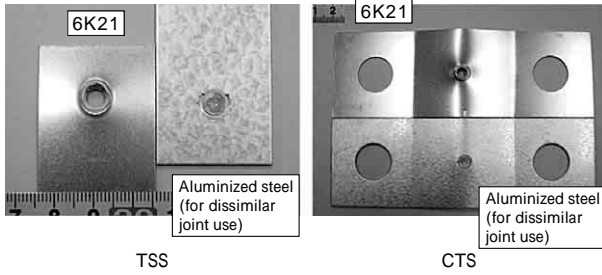


写真1 抵抗スポット接合継手の引張せん断/十字引張試験後の破断状況(本鋼板)

Photo 1 Fracture appearance after tensile shear and cross tension tests

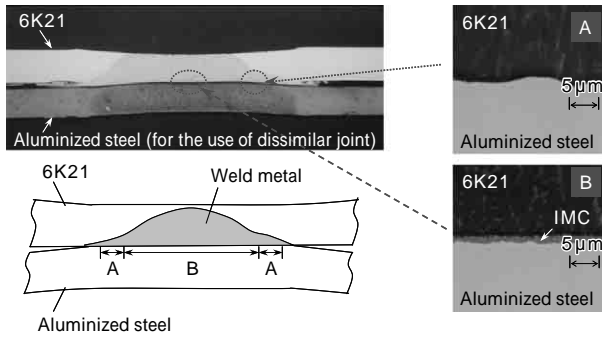


写真2 抵抗スポット接合断面写真ならびに概略接合界面構造 (A: IMC 未形成域, B: IMC 形成域)

Photo 2 Cross section and interface structure between aluminized steel (for dissimilar joint use) and 6K21

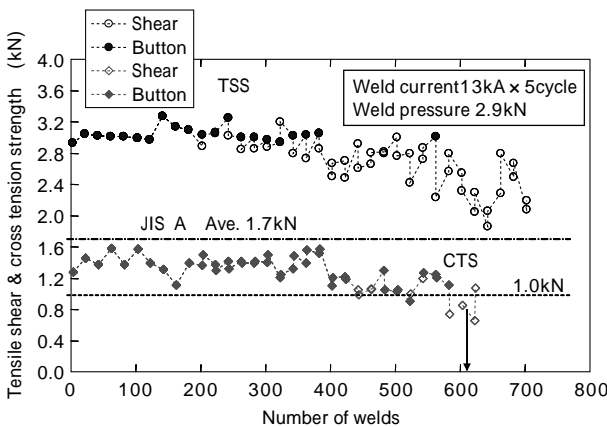


図2 抵抗スポット接合継手の連続打点時の継手性能(塗油あり)
Fig. 2 Results of electrode life test of resistance spot dissimilar joints (oiled)

の未形成域がナゲット外周部に存在し、強固な接合強度を発揮することで接合界面方向へのき裂伝播を防ぎ、アルミ側母材板厚方向にき裂が伝播し、ボタン破断となる。この異材接合用である本鋼板を用いた場合のみ Fe-Al 系金属間化合物未形成域が生成する理由は、本鋼板には鋼素地とめっき層界面に拡散障壁として機能すべく窒素(N)濃縮層を形成させており、接合の過程でこのN濃縮層が Fe-Al の相互拡散を抑制すると推定している⁴⁾。

表面塗油状態の 6K21 と本鋼板との組合せを一例として、連続打点試験を実施した結果を図 2 に示すが、アルミ合金同士の組合せ時と同等の連続打点寿命を示した。この他、軸方向引張(R=0.1)の疲労試験の結果、アルミ合金同士よりも高い特性が得られており、また、本鋼

板の外側に鋼板を追加した、多数枚重ね接合(三、四枚重ね)も可能であることなどが明らかになっている。

以上本接合法による特長を以下にまとめる。

接合界面において Fe-Al 系の脆弱な金属間化合物の生成が抑制可能となり、特に十字引張強度ではアルミ合金同士並みの継手強度が得られ、かつボタン破断を呈する。

板組みにもよるが、鋼材の抵抗発熱・蓄熱効果により、接合に必要な電流値が低減でき、鋼用スポット溶接機で接合が可能である。

継手の連続打点寿命や疲労特性は、アルミ合金同士の継手に比べて同等以上である。

三枚重ねなど多数枚重ねも同時に接合が可能である。

2. 線接合

2.1 ミグブレイジング^{5)~8)}

板厚が 1.0mm の 6K21 と本鋼板との組合せにおいて四種類の溶加材〔4047(Al-12Si), 4043(Al-5Si), 5554(Al-2.7Mg), 5356(Al-5Mg)〕を用い、アルミ材を上側に配置する重ねすみ肉継手を作製した。溶接電源は、鋼板への溶け込みを抑制するためにアルミ薄板分野で多用される交流ミグ電源を使用し、溶接電流 50A、溶接電圧 7V、接合速度 50cm/min の低入熱条件を用いた。このとき、アルミ合金は溶加材と溶融接合しているが、鋼材は溶融しないいわゆるミグブレイジングとなっている。

この重ねすみ肉継手の強度を、図 3 に示す引張せん断試験、ならびにルート側ビード端部から 10mm の位置で L 字状にあらかじめ折り曲げて引張り、接合部を引剥がすピール試験にて評価した。単位接合長あたりの強度(N/mm)を図 4 に示す。4047, 4043 および 5554 の溶加材を用いた場合は、引張せん断試験では 6K21 の溶接熱影響部で、ピール試験では溶接金属部で破断し、その継手強度はほぼ同程度であった。一方、5356 の溶加材を用いた場合のみ、引張せん断試験では溶接金属部で破断する場合も見られ、ピール試験では鋼との接合界面で全て破断した。その場合の継手強度は、引張せん断では他の溶加材の場合とほぼ同等であったが、ピール強度は低い値となった。

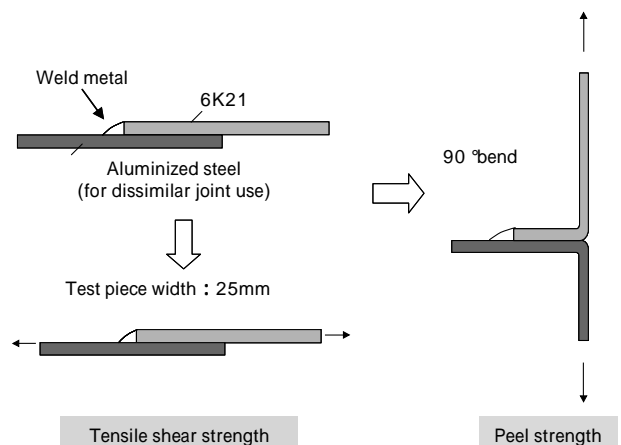


図3 評価試験方法(引張せん断試験とピール試験)
Fig. 3 Evaluation method (tensile shear & peel)

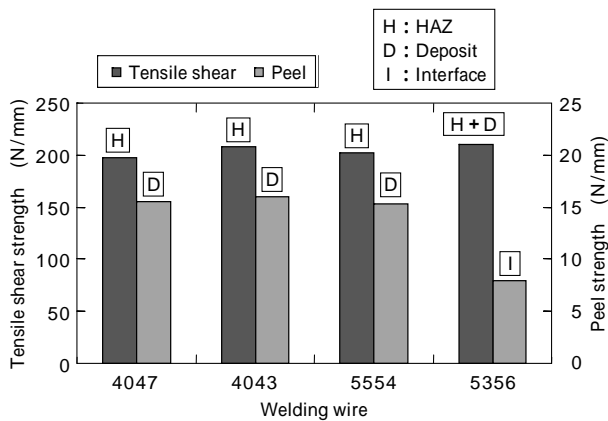


図4 溶加材の種類と継手強度（破断位置 H：熱影響部破断，D：溶接金属部破断，I：接合界面破断）
 Fig. 4 Relation between welding wire materials and joints strength (H：Heat affected zone, D：Deposit, I：Interface)

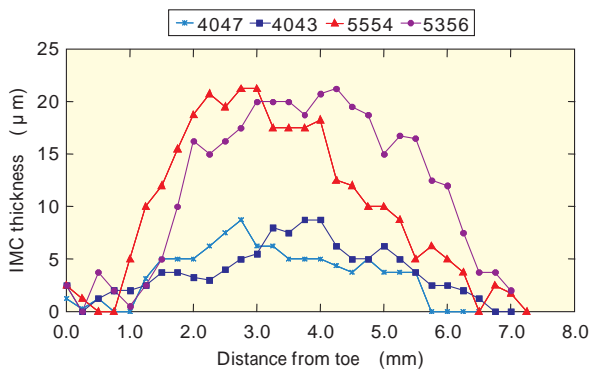


図5 各種溶加材による継手接合界面の金属間化合物の脚長方向の厚さ分布
 Fig. 5 Distribution of IMC thickness (MIG brazing)

このように継手性能は、溶加材の種類の影響を受けるとともに、その継手強度の差は引張せん断強度よりもピール強度に反映されやすいことがわかる。この原因の一つとして接合界面に生成する Fe-Al 系金属間化合物層の差異が考えられる。図5は6K21と本鋼板の組合せで、各種溶加材を用いた場合の接合界面に生成した Fe-Al 系金属間化合物層の厚さ分布を示したものである。いずれの溶加材においても脚長中央部が厚く両端部は薄くなるという分布傾向があるものの、中央部の厚さは5554、5356のAl-Mg系溶加材の方が4043、4047のAl-Si系溶加材よりも厚くなる。さらに端部に着目すると、溶加材に4047、4043や5554を用いた場合は、金属間化合物未形成域が認められるのに対して、5356の場合にはそのような領域は観察されなかった。

ミグブレイジングで得られたアルミ合金と本鋼板との接合体の断面構造の一例を写真3に示す(溶加材4047)。

一方、通常アルミめっき鋼板(以下、通常材と称す)を用いて同様に金属間化合物の厚さ分布を調査した結果、いずれの溶加材の場合にも金属間化合物未形成域は観察されず、ピール試験でも全ての組合せにおいて接合界面で破断することを確認している⁵⁾。き裂はいずれもルート部から発生し、接合界面方向に進展するが、本鋼板を用いた場合は金属間化合物未形成域が存在するためにその部位で溶接金属部側にき裂が進展し破断に至る。このことからミグブレイジングにおいても金属間化

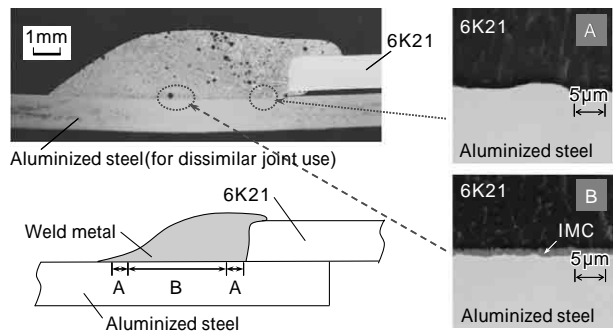


写真3 ミグブレイジング断面写真ならびに概略接合界面構造 (A：IMC未形成域，B：IMC形成域)
 Photo 3 Cross section and interface structure between aluminized steel (for dissimilar joint use) and 6K21 of MIG brazing (A：IMC controlled area, B：IMC formed area)

合物未形成域の存在が継手特性の向上に寄与していることがわかった。なお、5356の溶加材を用いた場合、本鋼板を使用しても接合界面で破断したのは、その脚長端部に金属間化合物未形成域が十分に生成していなかったためと考えられる。したがって、良好な継手性能を発揮するには、金属間化合物の生成を抑制する本鋼板を適用し、さらにその効果を有効活用する溶加材の選択が重要となる。

以上のことから、アルミ合金と本鋼板との組合せは、適切な溶接条件、溶加材などを選択することで良好な継手性能が得られることが確認された。

本法の特長を以下にまとめる。

アルミ材の溶接に通常用いられる溶接機にて接合可能である。

抵抗スポット接合同様、接合界面においてFe-Al系の脆弱な金属間化合物の生成が抑制可能となり、特にピールでは通常材の界面破断とは異なり、溶接金属部で破断する。

溶加材の適正な選定により優れた継手特性を発揮する。

2.2 レーザブレイジング^{5),10)}

5182はアルミ同士のレーザー溶接では溶加剤添加が不要となることが特長であるが、これと同様に、溶加剤を使用せずに5182(板厚1.0mm)を本鋼板の上に重ね、レーザー熱源を用いてアルミ合金側を溶融させて接合する重ねすみ肉継手を作製した。

ランプ励起のYAGレーザーを用い、出力4kW(デフォーカスビーム)、接合速度80~160cm/minの範囲で接合したときの継手強度を、前項と同様に引張せん断強度およびピール強度にて評価した。

図6に示すように、引張せん断強度は低速度側施工条件80cm/minでやや低いものの、破断はいずれも溶接金属部である。一方、ピール強度は高速度側160cm/minで最も高く、この条件の場合のみ他条件での接合界面破断とは異なり、写真4のように溶接金属部で破断する。金属間化合物層の厚さ分布は接合界面の脚長方向で図7のようになり、脚長両端部に抵抗スポット溶接、ミグブレイジングと同様に、金属間化合物未形成域が生成していること、そして高速度施工(小入熱条件)条件になるほ

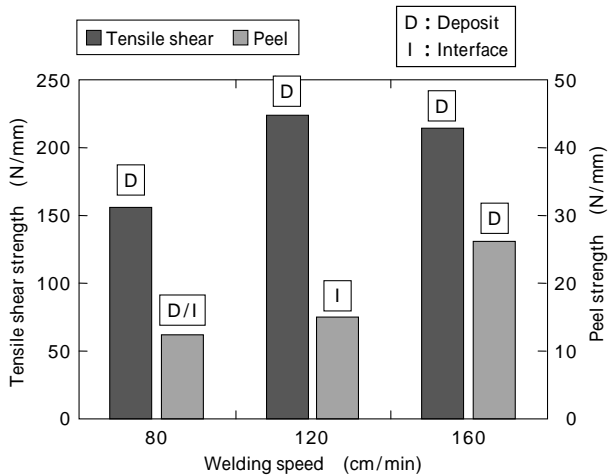


図6 接合速度と継手強度との関係

Fig. 6 Relation between welding speed and joints strength



写真4 ピール試験における破断位置 (溶接速度 160cm/min)

Photo 4 Cross section after peel fracture (welding speed : 160 cm/min)

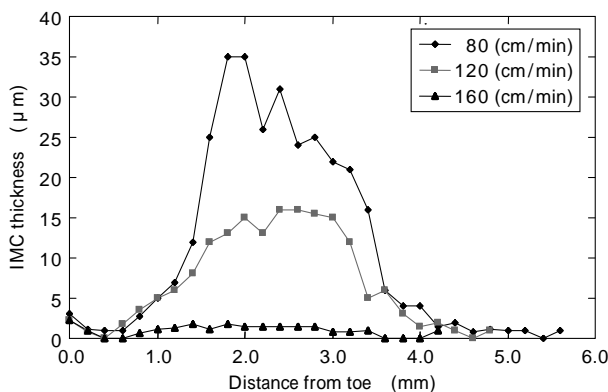


図7 接合速度と接合界面の金属間化合物の厚さ分布との関係

Fig. 7 Relation between welding speed and IMC distribution at joining interface

ど脚長端部での金属間化合物未形成領域が拡がり、かつ中央部の金属間化合物の厚さも薄くなる。

ルート部に入ったき裂は、そのルート部およびその中央寄りの接合界面の性状により、つまり金属間化合物層が薄くて強固に接合された状態となる高速度施工の場合ほど、より高い強度を保持した後、溶接金属部に伝播移行し、そのまま溶接金属部破断に至るものと理解される。

以上のことから、新開発の溶融アルミめっき鋼板を用いれば、アルミ合金同士の継手並の高い引張せん断強度が得られると同時に、接合条件を最適化することで接合界面の健全性を増すことが可能で、高いピール強度も得られることがわかる。

以上本法の特長を以下にまとめる。

高速度溶接域に金属間化合物の生成を低減する接合最適点があり生産性の高い加工が可能。

アルミ同士の溶接と同様に、材料の組合せによっては溶加材を用いる必要がない。

3. 腐食環境下での接合継手の耐食性

アルミ合金板と本鋼板の組合せについて、前述のミグブレージング接合継手の耐食性を調査するため、自動車規格の腐食試験を実施し、腐食試験後の引張せん断強度の測定、重なり内部の腐食調査を行った。試験片は接合後、自動車用塗装下地であるリン酸亜鉛処理を行い、電着塗装し腐食試験に供試した。腐食試験法としては、自動車用材料の一般的な試験方法である JASO M609-91 にて腐食試験を行い、200 サイクルまで試験を繰り返した。

なお、腐食試験は重なり内部に電解質液が溜まった厳しい場合を想定し、試験片の接合ビード部(デポ)を裏面とし、デポの無い鋼板端部を塩水噴霧面(評価面)とし、塩水が重なり内部に入りやすいように開口部を上向きにして試験片を設置し腐食試験を実施した。

3.1 引張せん断強度

腐食環境下での接合継手の強度変化を調査するため、初期(0 サイクル)と200 サイクル時の引張せん断強度を測定した。初期強度を100%とした場合の腐食試験後の強度保持率を図8に示した。6K21 / 本鋼板, GA / GA, 6K21 / 6K21 のいずれの組合せについても、引張せん断強度に変化は認められなかった。また、写真5に示すように、いずれの組合せにおいても、外面および重なり内部に著しい腐食は認められなかった。

3.2 重なり内部の腐食状況

重なり内部の腐食状況を調査するため、引張試験後の重なり内部の観察を行った。写真6に示すように、GA / GA では赤さびの発生が認められたが、6K21 / 本鋼板では、6K21 / 6K21 と同様に、白さびの発生は認められたものの、赤さびの発生は認められなかった。

また、写真7に示すように GA / GA では、重なり内部のめっき皮膜が消失しているのに対し、6K21 / 本鋼板では、本鋼板のアルミめっき皮膜が腐食試験後もまだ残存しており、6K21 と鋼の接触腐食は生じていないものと考えられる。

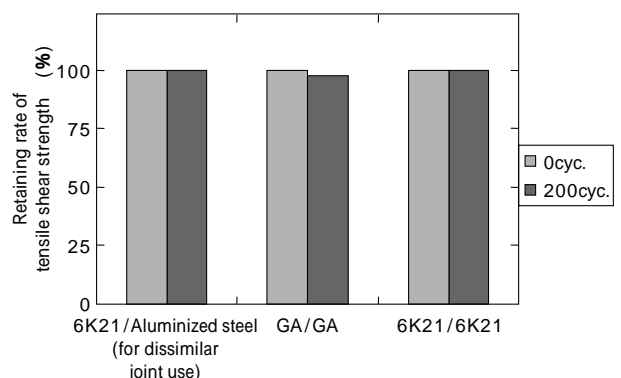


図8 腐食試験後の引張せん断強度保持率

Fig. 8 Retaining rate of tensile shear strength after corrosion test

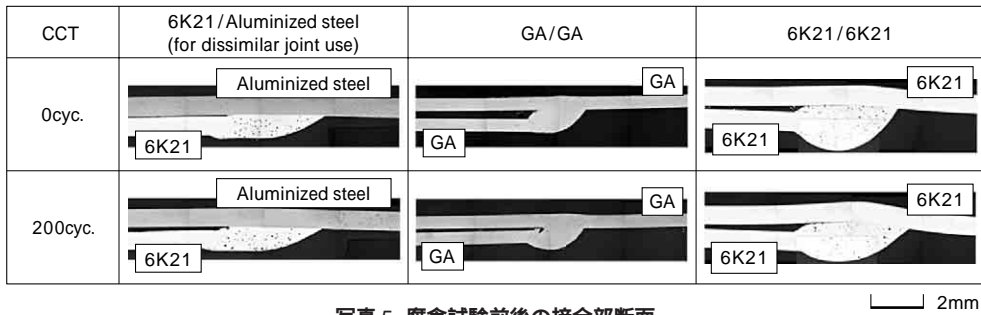


写真5 腐食試験前後の接合部断面
Photo 5 Cross section of joining region before and after corrosion test

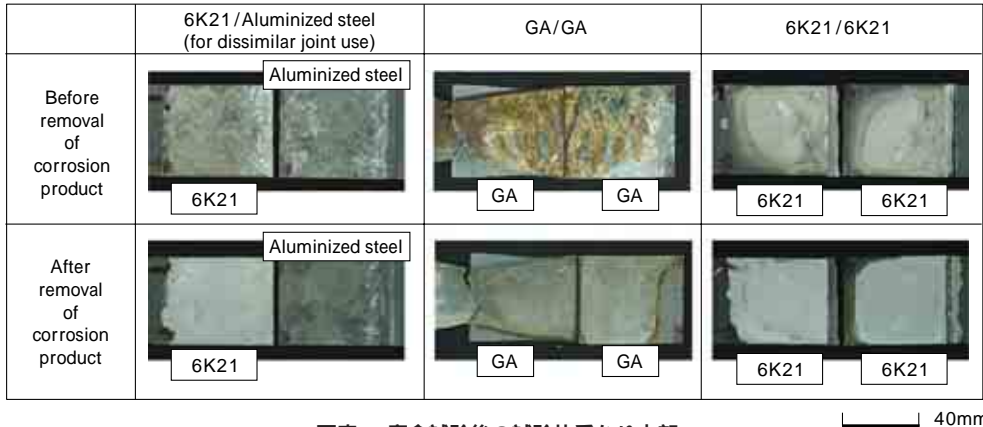


写真6 腐食試験後の試験片重なり内部
Photo 6 Internal lap of specimens after corrosion test

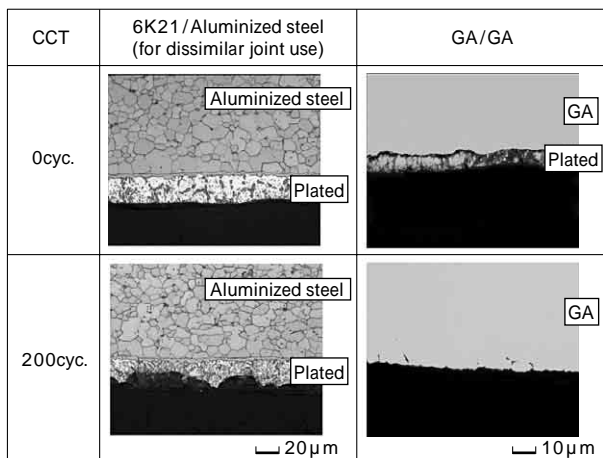
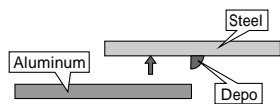


写真7 腐食試験前後のめっき皮膜断面
Photo 7 Cross section of plated coating before and after corrosion test

以上のとおり、200 サイクルにおいては6K21 / 本鋼板の接合継手は良好な耐食性を示しており、引き続き長期サイクルでの腐食挙動を調査する予定である。

むすび = 今回紹介したアルミ合金と鋼との接合方法の特長は、通常使用されている溶接装置を使用しながらも、

新開発の異材接合用溶融アルミめっき鋼板と、脆弱な金属間化合物生成を抑制する各種接合技術とを組み合わせることにより、接合界面構造の適正化を図りアルミ材同士並の継手強度特性が得られることである。本技術が自動車材料としての選択の幅を広げ、各材料のもつ特長を最大限引き出す構造の創出に貢献できることを期待するものである。

参考文献

- 1) 岩瀬 哲ほか：溶接学会全国大会講演概要，Vol.77(2005-9) p.324.
- 2) 服部保徳ほか：溶接学会全国大会講演概要，Vol.77(2005-9) p.326.
- 3) 三尾野忠昭ほか：溶接学会全国大会講演概要，Vol.78(2006-4) p.160.
- 4) 服部保徳ほか：溶接学会全国大会講演概要，Vol.79(2006-9) p.380.
- 5) 笹部誠二ほか：溶接学会全国大会講演概要，Vol.77(2005-9) p.116.
- 6) 笹部誠二ほか：溶接学会全国大会講演概要，Vol.78(2006-4) p.16.
- 7) 笹部誠二ほか：溶接学会全国大会講演概要，Vol.79(2006-9) p.14.
- 8) 岩瀬 哲ほか：溶接学会全国大会講演概要，Vol.79(2006-9) p.16.
- 9) 松本 剛ほか：溶接学会全国大会講演概要，Vol.79(2006-9) p.304.
- 10) 服部保徳ほか：溶接技術 Vol.55 (2007-3) p.84 ~ 85.