

論文・解説

22

## 鋼板／アルミ異材抵抗スポット溶接技術の開発 Development of Steel/Aluminum Resistance Spot Welding Process

田中 耕二郎\*1    杉本 幸弘\*2    西口 勝也\*3  
Kojiro Tanaka    Yukihiro Sugimoto    Katsuya Nishiguchi

### 要 約

年々高まる自動車の軽量化の要求に対し、マルチマテリアル車体を想定した鋼板とアルミニウムの抵抗スポット溶接技術の開発を進めている。その中で、鋼板に低融点で必要最小限の目付量の亜鉛めっきを施すことで、より高い強度が得られることが分かった。

鋼板表面にめっきを施すことで、強度低下の要因となる鋼板の酸化被膜の影響をなくし、接合中のめっき成分の除去により健全に接合ができる。接合界面を詳細分析した結果、低融点、低目付量めっき材の場合、強度向上に適しているとされる厚さ1~2 $\mu$ mの金属間化合物層が、非めっき材や高融点めっき材に比べてより広範囲に形成していることを確認した。

### Summary

In response to growing demand for lighter vehicles, we are developing steel/aluminum resistance spot welding technology for the multi-material bodies. In that, the joint strength was found to be increased by the application of zinc coating with a low melting point and minimum necessary amount on the steel sheet.

Influence of the oxide film of steel sheets that have strength-weakening factors can be eliminated by coating on steel sheets surface, and it can be obtained good joining by removing coat components at welding. In case of low-melting-point and small amount coated steels, detailed analysis of the joint interfaces shows that the strength-improving intermetallic compound layer in 1-2 $\mu$ m thickness was confirmed to be formed in wider areas than those in cases of uncoated steels and high-melting-point coated steels.

## 1. はじめに

### 1.1 背景

排ガス規制や燃費向上の観点から自動車の軽量化の要求が年々高まっており、車体のマルチマテリアル化技術の確立が必要となっている。マルチマテリアル化における主要課題の一つに異種材料の接合があるが、特に軽量材料として使用量の増加が予想されるアルミニウム（以下、アルミ）と鋼板との異材接合技術が重要となる。

これまでに、マツダでは鋼板とアルミの摩擦攪拌点接合技術（Spot Friction Welding, 以下SFW）を世界で初めて開発し、クロージャール部品に適用した。SFWはFig. 1に示すように回転ツールを金属表面に押し当てることで摩擦熱を発生させ、その熱と圧力により異材金属同士を固相

接合する技術である。この方法の場合、鋼板表面の酸化被膜がアルミの直接接触を妨げるため、めっき鋼板を使用し、接合中にそのめっきを溶融させて界面から排除することで、鋼板酸化膜の悪影響を回避した<sup>(1)</sup>。参考として各種めっき材を使用した場合の接合強度の比較をFig. 2に示す。特定のめっき材を用いることで接合強度が大幅に向上することが分かる。

一方、ボディーシェルを想定した場合、アルミ／鋼板／鋼板などの3枚組やウエルドボンドにも対応できる異材接合技術が必要との観点から、SFWの知見を活かしつつ、新たに鋼板とアルミの抵抗スポット溶接技術の開発に取り組んだ。

\*1~3 技術研究所  
Technical Research Center

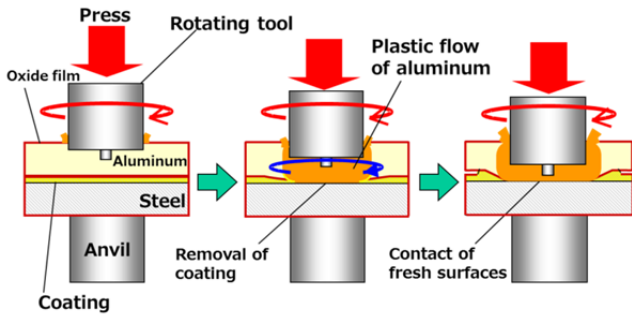


Fig. 1 Schematic View of Steel/Aluminum SFW Process

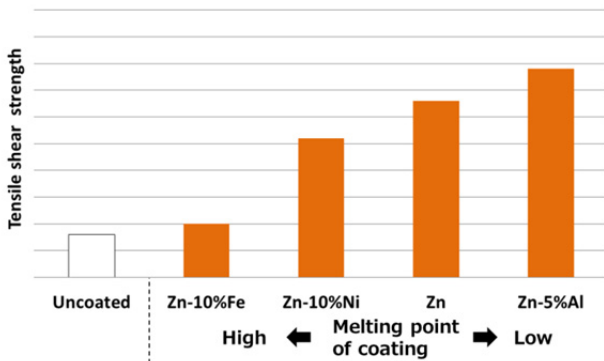


Fig. 2 Effect of the Type of Coating on Steel to SFW Joint Strength

### 1.2 鋼板／アルミ抵抗スポット溶接技術の概要

抵抗スポット溶接は溶接電極で板組みを挟み、通電することで生じる抵抗発熱を用いた接合手法である。アルミ／鋼板及びアルミ／鋼板／鋼板の板組みでの、発熱状態、接合後の断面写真及び断面の概略図をFig. 3に示す。鋼板とアルミのスポット溶接では、接合界面におけるもろい金属間化合物 (Inter Metallic Compound, 以下, IMC) の形成を抑制するため、直流インバーター方式の抵抗溶接機を用いてアルミのみが溶融するように通電制御する。3枚組の場合には中板と下板の鋼板間に溶融ナゲットを形成するとともに、上板のアルミが溶融するよう通電条件を設定する。

この場合、アルミの表面酸化膜はアルミが溶融することで破壊されるが、アルミに接する鋼板は固相のままであり、その表面酸化膜が接合性を阻害する。そこで、SFWと同様にアルミと接する鋼板にめっき材を用い、その酸化膜の悪影響を回避している。

アルミに接する鋼板種を変えた場合の3枚組での剪断強度の比較をFig. 4に示す。なお、3枚組は鋼板間の発熱によりアルミの溶融域が広くなりやすく、総じて2枚組の場合よりも強度が高くなる傾向を示す。

鋼板には非めっき鋼板 (以下SPCC) の他、自動車用として使用頻度の高い合金化溶融亜鉛めっき鋼板 (以下GA, 目付量: 55g/m<sup>2</sup>, めっき融点: 約700℃), GAと目付量

やめっき融点が大きく異なる電気亜鉛めっき鋼板 (以下EG, 目付量: 10, 20, 30g/m<sup>2</sup>, めっき融点: 約420℃) を用いた。SPCCに比べてめっき材を使用することで剪断強度が向上し、めっきの中でも目付量が少なく、低融点であるEGがGAより高くなる。また、EGの中でも目付量が少ない程、より強度が高くなり、SPCCの2倍近い実用レベルの剪断強度が得られる。

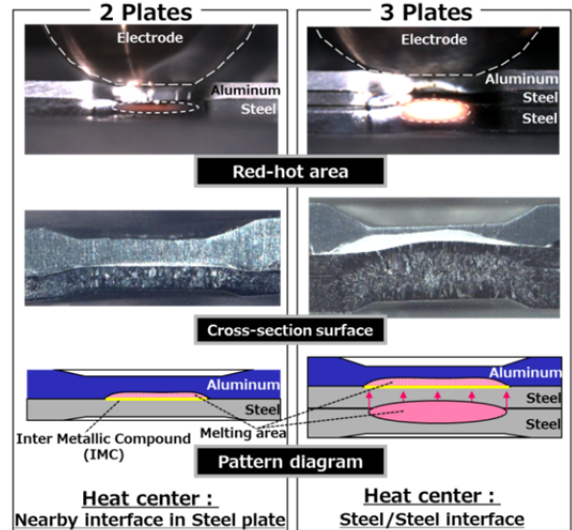


Fig. 3 Schematic View of Steel/Aluminum Resistance Spot Welding Process

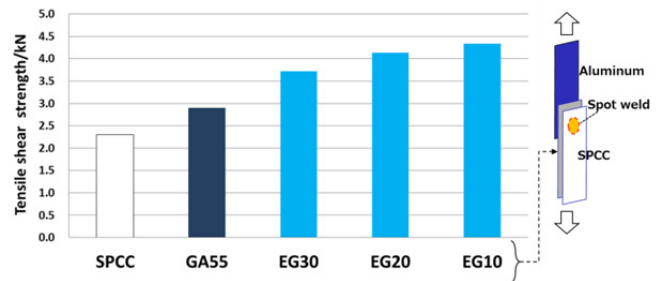


Fig. 4 Effect of the Type of Coating on Steel to Resistance Spot Welding Joint Strength

以上のように、鋼板とアルミの異材接合では鋼板の亜鉛めっきが重要な役割を果たすことは明白であるが<sup>2)</sup>、その作用や接合強度向上のメカニズムについては十分に解明されていない。そこで、抵抗スポット溶接の接合過程におけるめっき成分の挙動や、接合界面に生成するFeとAlのIMCの状態を詳細調査し、その結果を元にめっきが異材接合に及ぼす作用や強度向上のメカニズムを検討した。

## 2. 試験方法

### 2.1 供試材及び接合試験

アルミは6000系合金板 (1.2t) とダイカスト板材 (以下DC材, 2.0t) を用いた。鋼板には厚さ0.8tのGA (目付量: 55g/m<sup>2</sup>), EG (目付量: 10g/m<sup>2</sup>), SPCCの3種を供

試した。接合試験はアルミと鋼板の2枚組または3枚組（アルミ／鋼板／鋼板）とし、先端径6mmのR8電極を用いて抵抗スポット溶接した。溶接時間は一定とし、電流値はめっき種、板組みごとに溶接チリが発生しない範囲で設定した。

2.2 断面観察

接合過程におけるめっきの挙動や接合界面のIMC形成状態を明らかにするため、光学顕微鏡、電子線マイクロアナライザー（EPMA）、走査型電子顕微鏡（SEM）、透過型電子顕微鏡（TEM）を用いて接合界面の組織観察と成分分析を行った。

3. 試験結果と考察

3.1 接合中のめっきの挙動

Fig. 5にDC材とGAを用いた3枚組接合試験片の断面マクロ分析結果を示す。接合時間は最大30cyc（=0.5sec）とし、時間経過による変化を観察した。時間の経過とともにDC材の熔融域が拡大し、その熔融域内にGAめっき層に含まれるFe成分とZn成分が拡散していくことが分かる。通常、熔融しためっき成分は加圧とともに接合部外へ排出されると考えられるが、併せて、アルミ内部へ拡散することが確認できた。

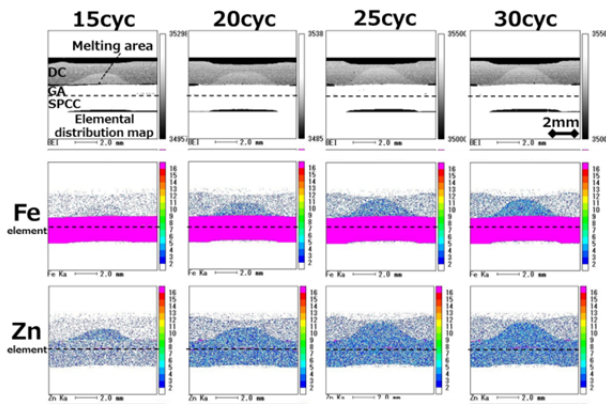


Fig. 5 Result of Macro EPMA Analysis of GA/DC Joint Cross-Section Surface

更に接合部中央の界面近傍における組織変化を光学顕微鏡観察と面分析結果を元に模式図化した（Fig. 6）。めっきに含まれるFe成分はDC材内部へ徐々に拡散するが、短時間側では界面近傍にFe成分が層状に残存し、Fe濃化層とDC母材との際が起点となり接合後に割れが発生している。一方、30cyc時点で界面近傍に濃化した領域はなく、めっき成分はほぼDC材側に拡散している。

以上、めっきは接合中に熔融して鋼板の新生面を露出させるが、その後のアルミ側への拡散が不十分な場合は接合強度を低下させることが分かった。

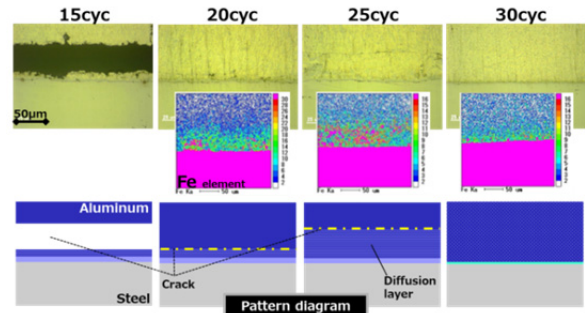


Fig. 6 Result of Optical Micrograph and EPMA Analysis nearby GA/DC Interface

3.2 IMC層の分布調査

鋼板／アルミ異材抵抗スポット溶接では、IMC層厚さが1~2µm程度の場合に高い接合強度が得られるとの報告がある②。そこでアルミに6000系合金板を使用し、接合界面にあるIMCの厚さを光学顕微鏡により計測した。鋼板がGAの場合はZn-Fe合金層とIMCの判別が困難なため、IMCを含む中間層の厚さを測定した。接合中心からの距離を横軸とした厚さの分布図をFig. 7に示す。また、Fig. 7中の①、②、③の各範囲の断面写真を鋼板別にFig. 8に示す。

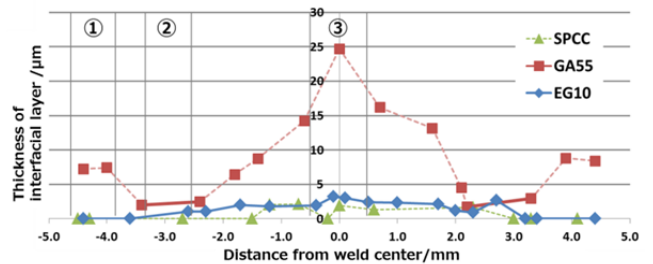


Fig. 7 Thickness Distribution Chart of Interfacial Layer on Steel/6000 Series Aluminum Joint Cross-Section Surface

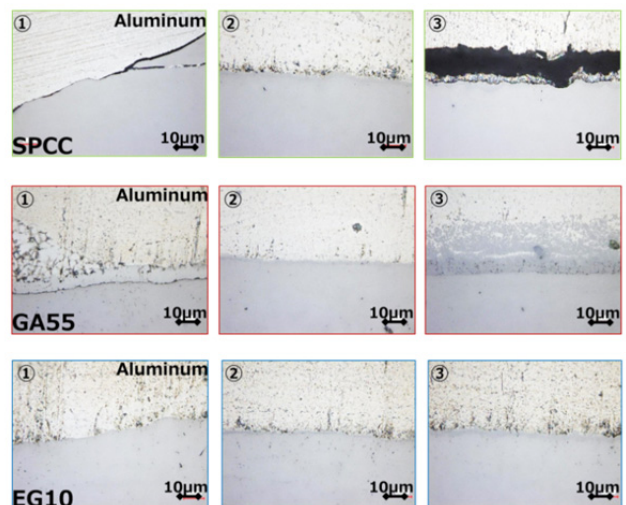


Fig. 8 Optical Micrograph of Steel/6000 Series Aluminum Joint Cross-Section Surface

鋼板がSPCCの場合、厚さが1~2μm程度のIMCが形成されているものの、不連続であり、写真①や③のように観察時点で界面の広い範囲で剥離が生じている。これは鋼板の酸化被膜の影響によりアルミとの直接接触が部分的にしか生じなかったためと考える。

GAの場合は、最外周部分に入熱不足によるめっき層の残留が見られる。中心部分には元のめっき層厚さよりも厚い、拡散途中のめっき成分を含む化合物層がアルミ内部に形成されている。厚さ1~2μmに近いIMC層はFig. 7 ②の付近にドーナツ状に形成していた(実線部分)。

一方、EGの場合は接合界面の全域に厚さ1~2μm程度の均一なIMC層を形成している。これはめっき自体が薄く、融点もGAより低いことで、接合部外への排出とアルミ内部への拡散が容易になったためである。より広範囲で鋼板新生面とアルミの直接接触が達成され、剥離の生じない健全な接合部が形成されることで、高い接合強度が得られると考えられる。

### 3.3 IMC層の成分分析

接合により生成したIMC自体のめっき種による違いを調査するため、GAとEGのIMC層 (Fig. 7 ②付近) についてSEM観察とEDXによる成分ライン分析を行った。結果をFig. 9に示す。IMC層内はAl及びFeが厚さ方向に同程度の成分比率で存在しているが、GAでは微量のZnが認められる。

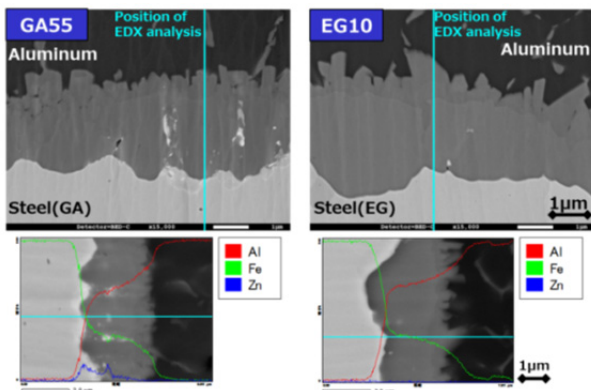


Fig. 9 Result of EDX Line Analysis of IMC Layer in Steel/6000 Series Aluminum Interface

Fig. 10にTEM観察と制限視野回折による化合物の同定結果を示す。アルミニウム側近傍はAlリッチの $Al_3Fe$ 、鋼板側近傍はFeリッチの $Al_5Fe_2$ で構成され、IMCの基本構成はGAとEGで同じである。

TEMによるアルミニウム側近傍 (Fig. 10アルミ側指示部) の詳細分析結果をFig. 11, 12に示す。今回、EDXによる定量分析ではGAのみZnのピークを確認したが、制限視野回折による同定ではGA、EGともに $Al_3Fe$ であった。

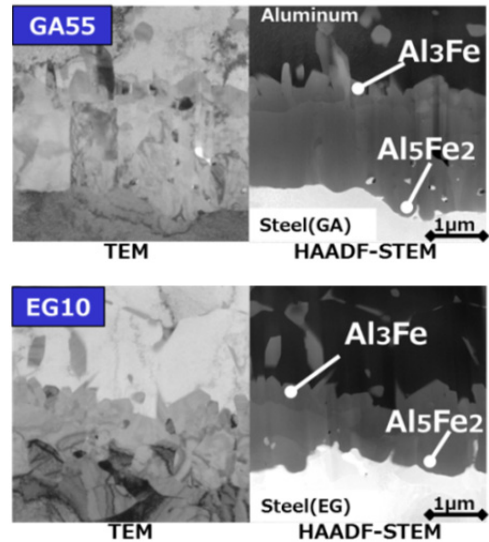


Fig. 10 Result of TEM Analysis of IMC Layer in Steel/6000 Series Aluminum Interface

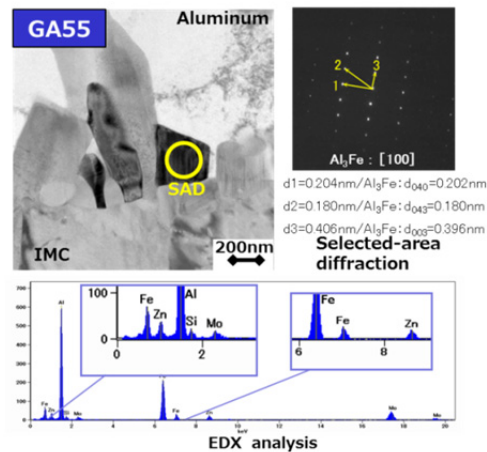


Fig. 11 Detailed Result of TEM Analysis of IMC Layer in GA/6000 Series Aluminum Interface

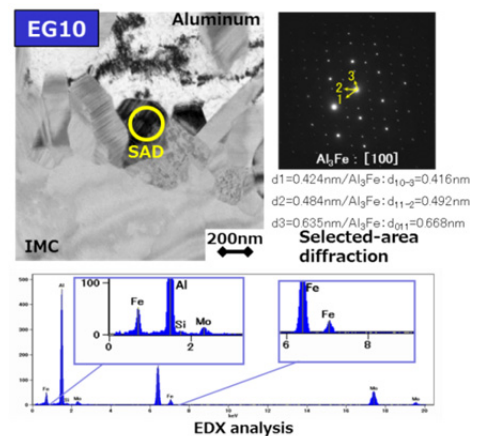


Fig. 12 Detailed Result of TEM Analysis of IMC Layer in EG/6000 Series Aluminum Interface

以上の結果から、めっき種の違いによりIMC層内のZn成分の有無という差はあるが、GAとEGで構成する化合物に大きな違いがないことが分かった。従って、めっき種による接合強度の違いは前述したIMC層の厚さと形成範囲に起因するものと考えられる。

### 3.4 めっきによる強度向上メカニズム

鋼板とアルミのスポット溶接における鋼板表面のめっきの効果についてまとめた模式図をFig. 13に示す。

強度低下の要因となるIMC層の粗大な成長や溶接チリの発生を抑制するため、入熱を抑えた場合、溶融が困難な鋼板表面の酸化被膜がアルミとの直接接触を妨げる。この問題に対して鋼板にめっき材を使用し、めっき成分を接合中に接合部外へ排出、もしくはアルミ内部へ拡散させて接合界面から除去することで、鋼板の新生面が露出する。これにより鋼板とアルミが直接接触し、IMC層を粗大に成長させることなく健全な接合が達成される。

逆に界面にめっき成分が残存する場合は接合強度低下の要因になる。その点、薄目付けのEGはめっき成分の除去がGAよりも容易であり、接合強度向上に有効に作用したと考える。

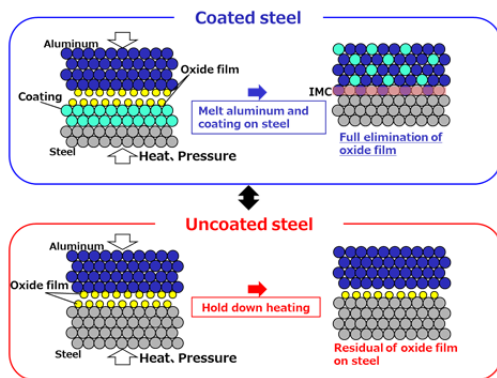


Fig. 13 Pattern Diagrams of Effect of Coating on Steel to Steel/Aluminum Resistance Spot Welding

## 4. 接合プロセスの改善

車体用鋼板として一般的なGA材にも本技術を適用するため、めっきの作用や接合強度向上メカニズムに基づき、プロセスの改善を進めている。その一例として、接合界面からのめっき成分の排出促進を目的とした多段通電プロセスを紹介する。

Fig. 14にその通電パターンを示す。これは十分な冷却時間を挟みながら段階的に高い溶接電流を通電させることで、溶接チリを発生させることなく、健全な接合領域径の拡大を図るものである。通電条件を制御することで、Fig. 15に示すように特に強度低下しやすいGA材の場合の剥離強度についても改善が可能となる。今後、電極形状も含めた検討を行い、接合技術としての汎用性を高める。

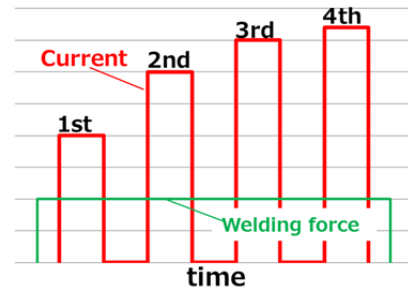


Fig. 14 Pattern of Current-Carrying in Multistep Steel/Aluminum Resistance Spot Welding

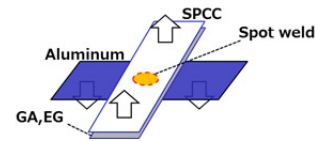
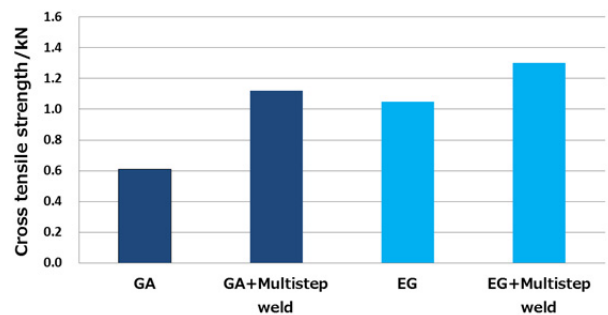


Fig. 15 Effect of Multistep Welding Process to Steel/Aluminum Spot Welding Joint Cross Tensile Strength

## 5. おわりに

鋼板とアルミのスポット溶接において、鋼板に低融点で必要最小限の目付量のめっきを施すことで効果的に高い強度が得られることが分かった。

鋼板表面にめっきを施すことで、強度低下の要因となる鋼板の酸化被膜の影響をなくし、接合中のめっき成分の除去により健全に接合することができる。

接合界面を詳細分析した結果、強度向上に適しているとされる厚さ1~2μmの金属間化合物層が、非めっき材や高融点めっき材に比べてより広範囲に形成していることを確認した。

加えて、通電条件の制御により高融点めっき材においても強度を改善することができ、より汎用性を高めることが可能となる。

本研究の一部は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 事業「革新的新構造材料等研究開発」の支援を受けて実施した。

### 参考文献

- (1) 玄道ほか：摩擦点接合技術の開発，日本金属学会誌，第70巻11号（2006）
- (2) 武田ほか：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（2007）

### ■ 著 者 ■



田中 耕二郎



杉本 幸弘



西口 勝也