

機関番号：13501

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760578

研究課題名（和文） 摩擦攪拌を利用した異種金属接合材の創製と
接合界面における合金生成挙動研究課題名（英文） Alloying behavior at welding interface in dissimilar metal joint
fabricated by friction stir process

研究代表者

渡邊 満洋 (WATANABE MITSUHIRO)

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・助教

研究者番号：90532036

研究成果の概要（和文）：摩擦攪拌スポット接合を利用して、アルミニウム／鋼接合材の接合条件と接合強度ならびに接合界面に生成する金属間化合物層の関係を調査した。接合界面はツール保持時間の変化に依存せず強固であった。接合界面の観察と組成分析により、接合界面には $Al_{13}Fe_4$ 相と Al_5Fe_2 相の金属間化合物層が形成されており、その厚さはツール保持時間の平方根に比例して厚くなることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：Lap joining of a pure aluminum plate and a low carbon steel plate was performed using friction stir spot welding. Welding was achieved for all dwell times. Intermetallic compound layer was produced along the welding interface. Precise backscattered electron image observation and energy dispersive X-ray spectroscopy analysis revealed that the intermetallic compound layer consisted of an $Al_{13}Fe_4$ phase layer and an Al_5Fe_2 phase layer. The thickness of the layers increased in proportion to the square root of the dwell time.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：接合・溶接，構造・機能材料

1. 研究開始当初の背景

近年、構造材料において、個々の材料特性を生かし、適材適所に材料配置を行うという観点から、異種材料接合が求められている。特に輸送機器産業では、車体の軽量化を目的とした材料置換に伴い、従来の鋼から軽量かつ高強度なアルミニウム合金へ置き換えることが検討されている。しかし、全てを置換することはコストなどの観点により現実的ではない。そこで、適材適所に鋼とアルミニ

ウム合金を配置する、いわゆる金属材料のハイブリット化が検討されている。そこではアルミニウムと鋼の異種金属接合法の確立が必要となる。しかし、アルミニウムと鋼は、融点や熱伝導率などの機械的ならびに物理的性質が異なるため、これらの接合は容易ではない。

従来のアーク溶接や抵抗スポット溶接などの熔融溶接法を用いてアルミニウム／鋼接合を行うと、接合界面に $Al_{13}Fe_4$ 相や Al_5Fe_2

相などの脆弱な金属間化合物相が層状に厚く生成してしまうため、接合部における十分な強度を得ることができないことが知られている。この解決策の一つとして、入熱量を制御することが容易な固相接合の適用が考えられ、この固相接合法を用いた異種金属接合材の創製に関わる接合条件の調査ならびに接合界面形態を知る必要がある。

2. 研究の目的

自動車などの輸送機器産業でもっとも求められているアルミニウムと鋼の接合に固相接合法の一種であり、抵抗スポット溶接の代替法として期待されている摩擦攪拌スポット接合法を適用し、機械的性質評価ならびに接合界面における微細組織観察を行うことにより、信頼性の高い異種金属接合材の創製および非平衡接合界面における合金生成挙動の解明を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 供試材

供試材には、1050 純アルミニウム板 (99.50 mass%Al, 以後アルミニウムと示す) と軟鋼板 SPCC (以後鋼と示す) を用いた。それぞれの板の形状は、幅 100 mm, 長さ 30 mm, 厚さ 1.0 mm である。接合前に、試料表面は耐水研磨紙を用いて機械研磨を行った後、アセトンを用いて超音波洗浄を施した。

(2) 接合条件

本研究で用いた接合ツールは SKH51 (高速工具鋼) 製であり、ショルダーの直径は 10 mm, プロブの直径は 5 mm, プロブ長さは 0.7 mm である。さらに、プロブ外周部には、幅 0.5 mm, 深さ 0.2 mm の溝が 0.5 mm ピッチに施されている。

Fig. 1 に、摩擦攪拌スポット接合の模式図を示す。接合には立型フライス盤を用い、その台座の上に鋳鉄製の台座を設置し、その上に供試材を重ね合わせ、固定した。高速回転したツールをアルミニウム側から挿入し、プロブ先端がアルミニウム/鋼重ね合わせ界面よりも 0.2 mm だけアルミニウム側に留めた状態で接合を行い、保持時間を 0 s から 120 s まで変化させた。ツール回転速度は

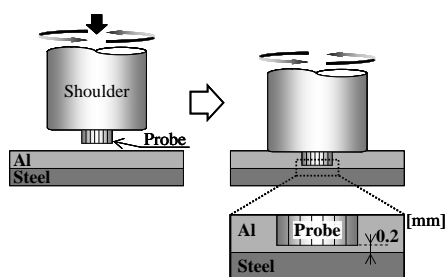


Fig. 1 Schematic illustrations of friction stir spot welding process.

3000 rpm, ツール挿入速度は 4 mm/min 一定である。

(3) 接合界面の強度試験

接合強度評価には、接合界面に対して垂直な方向に荷重を負荷するため、改良型十字引張試験を用いた。改良型十字引張試験とは、2 枚のアルミニウム板を 1 枚の鋼板の上に重ね合わせて 3 枚の板を同時に接合し、中央のアルミニウム板が上側のアルミニウム板と下側の鋼板に接合された接合材を作製する。上側のアルミニウム板と下側の鋼板には、ボルト孔を設けておき、これを負荷用の治具に締め付けて固定する。このような接合材を用いることにより、上側のアルミニウム板は引張試験時に優先的に変形し、あたかも自在継手のように機能する。したがって、通常の十字引張試験に比べ、中央のアルミニウム板と鋼板との接合界面に垂直に引張負荷を加えることが可能となる。改良型十字引張試験は、インストロン型の万能試験機を用い、室温においてクロスヘッド速度 0.1 mm/min の条件で行った。

(4) 接合中の温度測定

複数の熱電対を、その先端が重ね合わせたアルミニウム板と鋼板の界面に位置するように設置し、プローブ中心部の直下、ならびにショルダー下における接合中の接合界面の温度変化を測定した。

(5) 組織観察

組織観察には、光学顕微鏡ならびに電界放出形走査型電子顕微鏡 (FESEM, 加速電圧: 15 kV) を用いた。光学顕微鏡観察用試料には、結晶粒の形状を観察するため、鏡面研磨後に腐食を施した。腐食は、アルミニウムに対しては HF : H₂O = 1 : 50 (容積比) 溶液、鋼に対しては HNO₃ : C₂H₆O = 1 : 50 (容積比) 溶液を使用し、いずれの場合も室温で行った。組成分析には、FESEM 付属のエネルギー分散型 X 線分析装置 (FESEM -EDS) を用いた。

4. 研究成果

(1) 接合中の界面の温度

Fig. 2 に、ツール保持時間を 60 s に設定した際の接合中のアルミニウム/鋼界面における温度変化を示す。横軸の接合時間が 0 s とは、回転ツールの底面がアルミニウム板の表面に接した時間である。界面における温度は、ツールの挿入と共に急激に増加し、ツールの押し込みの停止と共に一定の値を示した。ツールを保持している時間では、界面温度は変化しないことがわかった。この一定値は保持時間に依存せず、プローブ中央の直下では約 750 K であり、ショルダー直下では約 700 K であった。

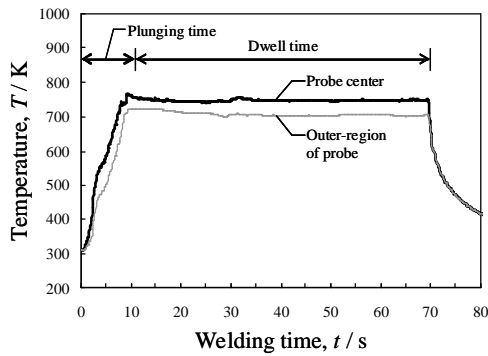


Fig. 2 Welding time dependency of temperature generated at the aluminum/steel interface.

(2) 接合材の外観ならびに接合界面強度

Fig. 3 に接合後のツールを押し込んだアルミニウム表面 (a), 引張試験後のアルミニウム表面 (b) ならびに鋼表面 (c) の光学顕微鏡写真を示す。引張試験による破断様式はツール保持時間に依存せず同様であった。引張試験後のアルミニウム表面はプローブ径とほぼ同径の領域がなくなっており、その領域は鋼板表面に残留していた。これにより、引張荷重によって破断はプローブ外周部に対応するアルミニウムで起こり、接合界面では破断しないことが明らかになった。

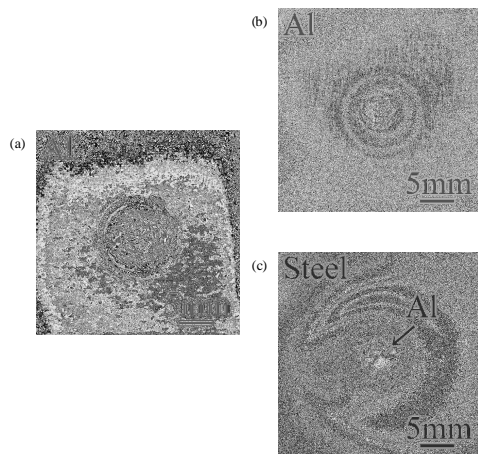


Fig. 3 Macroscopic appearances. (a) Upper surface of the aluminum plate of the lap joint. (b) Fracture surface of the aluminum plate after the cross tension test. (c) Fracture surface of the steel plate after the cross tension test.

(3) 接合界面の微細組織

Fig. 4 (a) に、保持時間 20 s で接合した接合材の光学顕微鏡断面組織を示す。写真上方がアルミニウム、下方が鋼である。Fig. 4 (b), (c) は、腐食試験によって得られた接合界面近傍の鋼とアルミニウムの結晶粒組織

である。接合界面近傍においても、鋼の結晶粒形状は接合前と変化はなかったのに対し、アルミニウムの結晶粒は微細化されていた。これは、回転ツールをアルミニウムに挿入しているため、アルミニウムが塑性流動により強加工されたためであると考えられる。Fig. 4 (d) は、接合界面の光学顕微鏡写真である。接合界面には、アルミニウムならびに鋼とは異なるコントラストの相が層状に生成していた。Fig. 5 は接合界面の反射電子像である。写真上方の暗コントラストが Al, 下方の明コントラストが Fe である。接合界面にはアルミニウムと鋼の中間のコントラストを有する金属間化合物層の連続的な生成が明瞭に観察された。この中間層の組成分析結果を Fig. 6 に示す。これにより、中間層は 2 相から構成されていることがわかった。その 2 相は、Al と Fe の組成比から、アルミニウム側に $Al_{13}Fe_4$ 相、鋼側に Al_3Fe_2 相が層状に生成していることが明らかになった。

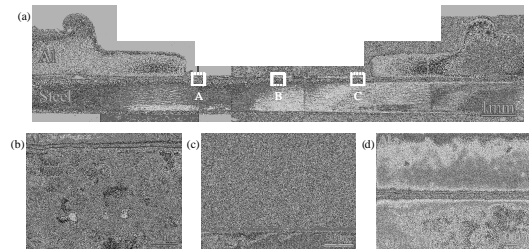


Fig. 4 (a) Optical micrographs of cross section of the lap joint (dwell time: 20 s). (b), (c) Grain structure at the steel and aluminum matrix close to the welding interface. (d) Welding interface.

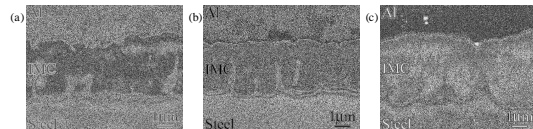


Fig. 5 Backscattered electron images of the welding interface which correspond to the positions in Fig. 4 (a). (a) A, (b) B, and (c) C (dwell time: 20 s).

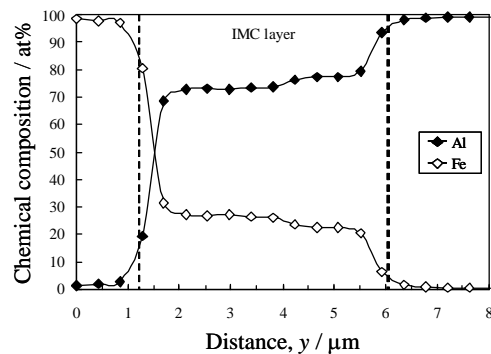


Fig. 6 Change in relative chemical composition of Al and Fe. Composition analysis was performed across the welding interface.

(4) 接合界面に生成した金属間化合物層の成長に与えるツール保持時間の影響

Fig. 7は、ツール保持時間と金属間化合物層の厚さの関係である。金属間化合物層の厚さは、保持時間が長いほど厚くなり、その厚さはツール保持時間の平方根に比例して変化した。 $Al_{13}Fe_4$ 層と Al_5Fe_2 層の放物線係数(成長速度)は、それぞれ $1.30 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ ならびに $6.06 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ であった。本実験で得られた Al_5Fe_2 層の放物線係数は、静的な拡散実験によって報告されている係数よりも約2オーダー大きかった。これは、金属間化合物層が入熱のみで成長したのではなく、回転ツールによって導入されたアルミニウムの塑性流動も寄与していることを示していると考えられる。これにより、摩擦攪拌スポット接合界面における金属間化合物の成長には、摩擦による入熱だけでなく高速回転ツールによって生じたアルミニウムの塑性変形による寄与も大きいことが明らかになった。

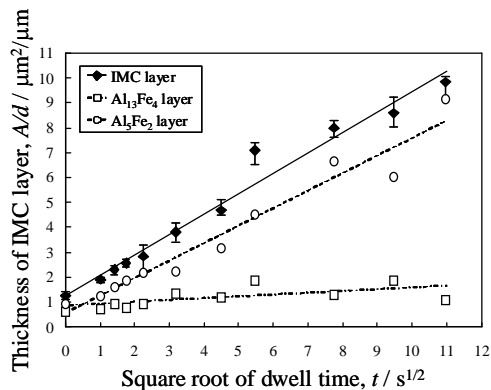


Fig. 7 Dwell time dependency of thickness of the IMC layer.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

① Mitsuhiro Watanabe, Keyan Feng, Yoshio Nakamura and Shinji Kumai, Growth Manner of Intermetallic Compound Layer Produced at Friction Stir Spot Welded Aluminum/Steel Lap Joint, Materials Transactions, 査読有, Vol. 52, 2011, 953-959.

② Mitsuhiro Watanabe, Keyan Feng, Yoshio Nakamura and Shinji Kumai, Growth Manner of Intermetallic Compound Layer Produced at Friction Stir Spot Welded Al/Steel Lap Joint, Proceedings of the 12th International Conference on Aluminum A

lloys (ICAA12), 査読有, 2010, 984-987.

③ Mitsuhiro Watanabe, Hiroshi Matsumoto, Keyan Feng, Yoshio Nakamura and Shinji Kumai, Effect of tool shape on interfacial microstructure of friction stir spot welded aluminum/steel lap joint, Proceedings of the 8th International Symposium of Friction Stir Welding, 査読無, 2010, 1-6.

[学会発表] (計3件)

① Mitsuhiro Watanabe, Keyan Feng, Yoshio Nakamura and Shinji Kumai, Growth Manner of Intermetallic Compound Layer Produced at Friction Stir Spot Welded Aluminum/Steel Lap Joint, The 12th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA12), 2010.9.8, Yokohama, Japan.

② Mitsuhiro Watanabe, Hiroshi Matsumoto, Keyan Feng, Yoshio Nakamura and Shinji Kumai, Effect of tool shape on interfacial microstructure of friction stir spot welded aluminum/steel lap joint, The 8th International Symposium of Friction Stir Welding, 2010.5.20, Timmendorfer Strand, Germany.

③ 渡邊満洋, 馮科研, 熊井真次, 中村吉男, 摩擦攪拌スポット接合したアルミニウム/鋼接合材の接合界面組織と強度, 軽金属学会第117回終期大会, 2009.11.14, 東京.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 満洋 (WATANABE MITSUHIRO)
山梨大学・大学院医学工学総合研究部・助教
研究者番号: 90532036

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし