

アルミニウムと異種金属の摩擦攪拌接合に関する研究

—アルミニウムと鉄, ステンレス鋼との点接合—

増井孝実*, 林 一哉**

Research of Friction Stir Welding of Aluminum and Dissimilar Metals —Spot Joints of Stacked Aluminum/Steel and Aluminum/Stainless Steel—

Takami MASUI* and Kazuya HASUYASHI*

Key words: Friction Stir Welding, Dissimilar Metals, Spot Welding, Al/Fe, Al/Stainless

1. はじめに

自動車の車体の軽量化は, 鉄鋼材を軽いアルミニウム材等の材料に置き換える方法と, 同じ鉄鋼でも更に高強度な高張力鋼板を使用し薄肉化する方法で進められている. 量産車ではコストの面から高張力鋼板が用いられる割合が多いが, 外板部などはアルミニウム材と高強度の鉄鋼材とを複合化して使用することも次の世代の選択肢になると思われる. しかし, アルミニウム材と異種金属を合わせて用いる場合, その結合に溶融接合を用いると接合界面に脆い金属間化合物が生成されるため健全な接合は難しい.

そこで, 接合温度が溶融温度以下で, 固相接合であるとされる摩擦攪拌接合法を用い異種金属接合を行った. 摩擦攪拌接合法は高速回転している接合ツールを, 接合部に押し付け摩擦熱で軟化させ挿入し, 双方の材料を攪拌し塑性流動することにより接合する手法であり, 1991年に英国のTWI (The Welding Institute) にて発案された¹⁾. アルミニウム材などの低融点材に適した方法で, 鉄道車両のパネルの突合せ接合などにも実用化されている²⁾.

本研究では, スポット溶接の形態に近い, この摩擦攪拌接合法の薄板の重ね合わせの点接合につ

いて, アルミニウム材と鉄鋼材の冷間圧延鋼板, ステンレス鋼の組み合わせで行った. 接合ツールの長寿命化を優先的に考え, アルミニウム側から挿入し, 挿し込み量はアルミニウムの板厚以下とした. 下の接合相手の硬い異種金属材には直接接触しないようにして, アルミニウム側材料のみの攪拌で接合を行った.

2. 実験方法

2. 1 接合方法

供試材にはアルミニウム (A1100P), 冷間圧延鋼板 (SPCC-S), ステンレス鋼 (SUS304) の厚さ 1 mm 薄板を 30×100 mm の短冊状に切断し, 表面は研磨など行わず脱脂したのみのものを用いた. アルミニウム側を上にして端部を重ねて, 摩擦攪拌接合装置に固定し点接合を行った. ツールの挿入は柔らかいアルミニウム側から行い, 接合ツールのプローブおよびショルダー部の押し込み深さはアルミニウムの板厚を超えないようにし, 塑性流動はアルミニウムの板厚の範囲で行った.

接合実験は図 1 に示すように日立設備エンジニアリング(株)の摩擦攪拌接合装置 (1D-FSW) で行い, 接合ツールは図 2 に示すような, ショルダー径 $\phi 8$ mm のプローブは直径 $\phi 3$ mm, 長さ $\phi 0.6$ mm の形状のものを用いた. 接合条件は一定で, 回転数は 2500 rpm, 接合ツール挿入深さ 0.8 mm, 挿入速度 50 mm/min, 挿入保持時間 5 sec で行った.

* ものづくり研究課

** プロジェクト研究課



図1 摩擦攪拌接合装置

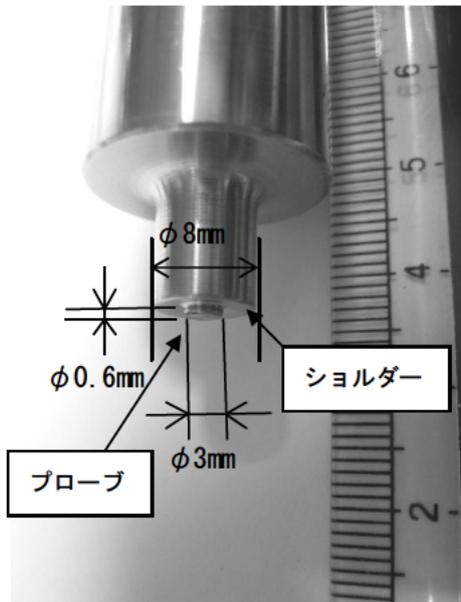


図2 接合ツール

2. 2 評価方法

接合強度はせん断引張試験にて評価を行った。

せん断引張り試験後の破断面の観察および分析は、走査電子顕微鏡(SEM)および付属のエネルギー分散型X線分析装置(EDS)を用い、結晶構造の確認はX線回折装置(XRD)にて行った。また接合部界面の断面についても走査電子顕微鏡(SEM)を用い解析を行った。

3. 結果と考察

A1100 と SPCC の重ね合わせの点接合した試験片を図3に示す。また、接合部断面のマクロ写真を図4に示す。差し込まれた接合ツールのプローブ部の底はSPCCまでは達せず、A1100の肉厚が0.2mmほど残されていることが確認できる。

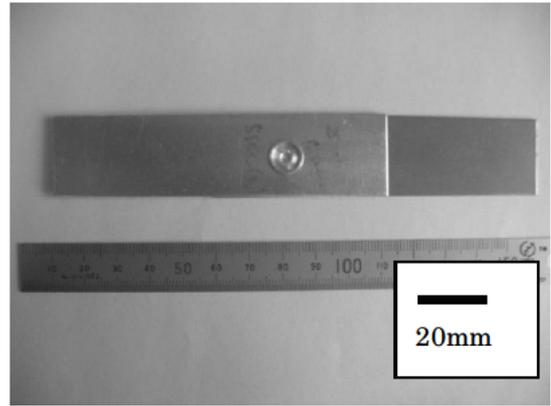


図3 摩擦攪拌接合した試験片
(上側(左)A1100 下側(右)SPCC)

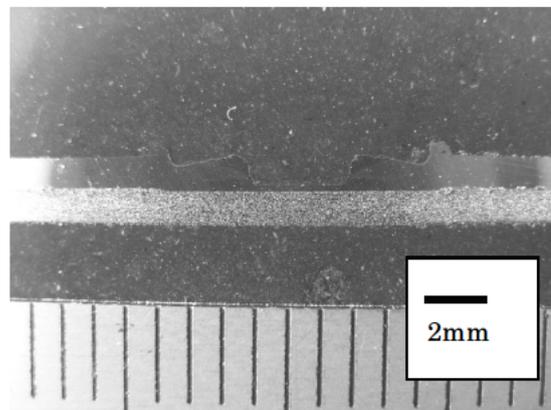


図4 接合部断面マクロ写真
(上側がA1100 下がSPCC)

せん断引張試験の結果を表1に示す。せん断引張り後の試験片は接合ツールのプローブの下のアルミニウム部分が相手側材料に残るプラグ破壊となった(図5)。しかし、いずれの異種金属同士のせん断引張り強さも、アルミニウムの同種材同士のせん断引張り強さには至らなかった。破面のSEM観察のところで後述するが、接合されている面積が異種材の場合はツールの接触部の全面ではなく、まだら模様のように部分的にしか存在しないことが、強度的に劣る原因であると考えられる。

表1 せん断引張結果

接合材料	(N)
A1100+SPCC	1549
A1100+SUS304	1123
A1100+A1100	1860
A5052(H34)+A5052(H34)	2143
A5052(H34)+SPCC	580

試験的にアルミニウム合金 A5052(H34)と SPCC との重ね合わせ接合も試行したが、当条件ではほとんど接合が出来なかった。

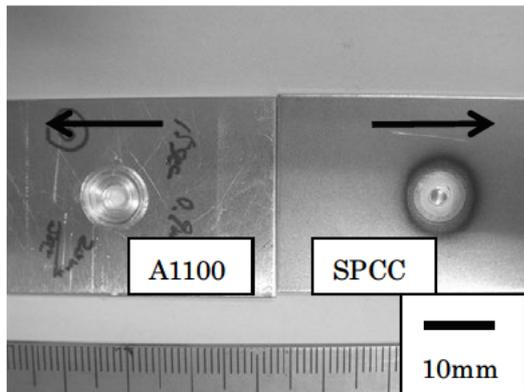


図5 せん断引張試験後の試験片

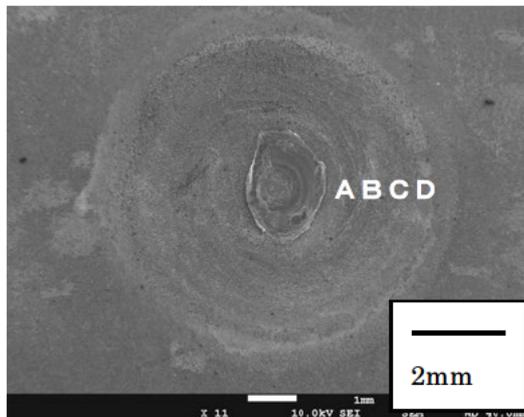


図6 せん断引張り試験後の破断面のマクロ写真 (SPCC側)

A1100 と SPCC のせん断引張り試験後の破断面の SPCC 側のマクロ写真を図6に示す。また、図6のA,B,C,D部のSEM写真を図7に示す。

図7より、破断面はA1100が接合され延性破壊している部分と、SPCCの表面そのままの部分とがまだらに混在した様相になっている。延性破断面は中心部に近いAからB部近傍までは半分以上の面積を占めるが、接合ツールのショルダーの端部の下に当たるD部の方へ行くに従い減少していることが確認できる。このことより実際の接合面積はツール接触面積の $\phi 8\text{mm}$ には及ばないために、せん断引張り強度は同種材同士の接合より劣るものになっていると考えられる。せん断引張りの破断面の延性破断面が中心のプロープに近い部分ほど多いのは、接合ツールのショルダー部の形状が中心のプロープ部に向かって凹んでいるため、ツール挿入時に相手材のSPCC側との間に挟みこまれるA1100が圧縮され強く押し付けられている

ものとする。

また、図7のA部を更に拡大観察すると、延性破断面の間に存在する粒状の結晶が集まったような付着物が観察された(図8矢印部)。

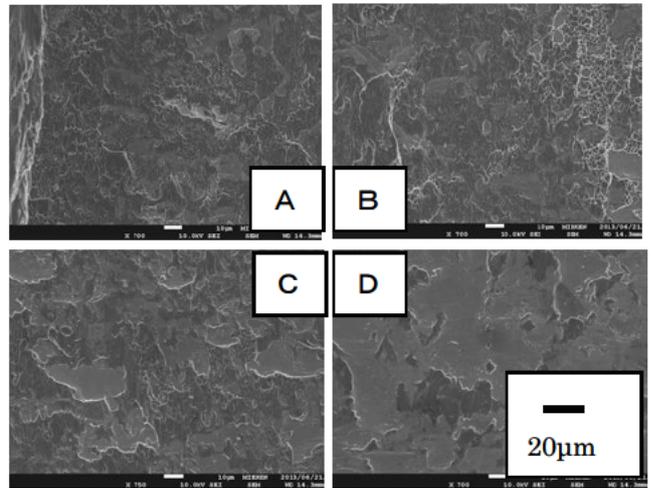


図7 破面のSEM写真 (図5のA部からD部の拡大) (SPCC側)

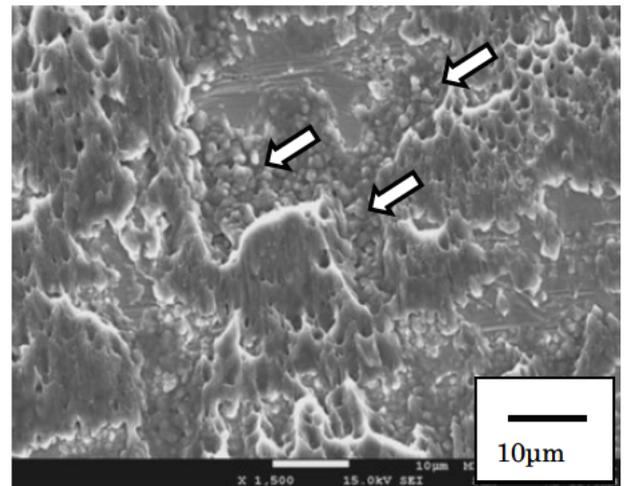


図8 図6のA部の拡大SEM写真

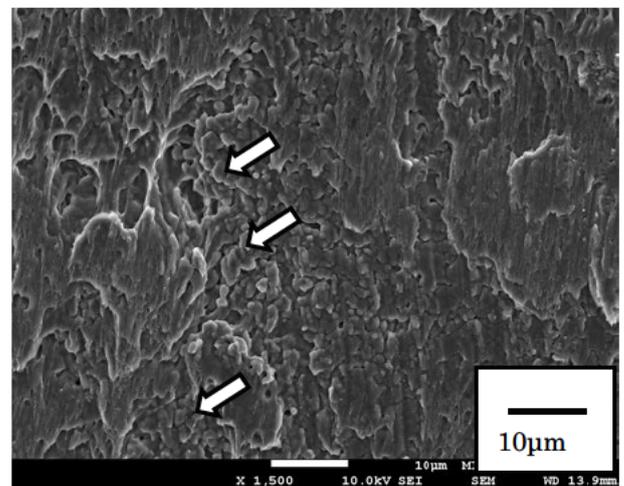


図9 破面のSEM写真 A1100側

EDSにて分析した結果は場所によりばらつきがあるが、概ね Al:90-75at%, Fe:10-25at%の範囲であった。同様な粒状の付着物は A1100 側の破面からも観察された(図 9)。

図 6 の SPCC 側の破断面および、その相手の A1100 側での XRD の結果を図 10 に示す。両面とも Fe と Al の母材成分のみで、金属間化合物のピークは検出されなかった。このことから図 8, 9 に見られる粒状の結晶の付着物は、Al が摩擦攪拌運動により界面で塑性流動した後、軟化したものが再度硬化したものと考えられる。筆者らが超音波接合で Al と Fe の重ね合わせの点接合を行ったときも、せん断破壊した後の破面で同様のポーラスな形態の付着物が見られた³⁾。超音波接合と摩擦攪拌接合は双方とも摩擦熱を利用し、接合面の材料を塑性流動させて接合する原理は似ており、同様な現象が出現したものとする。

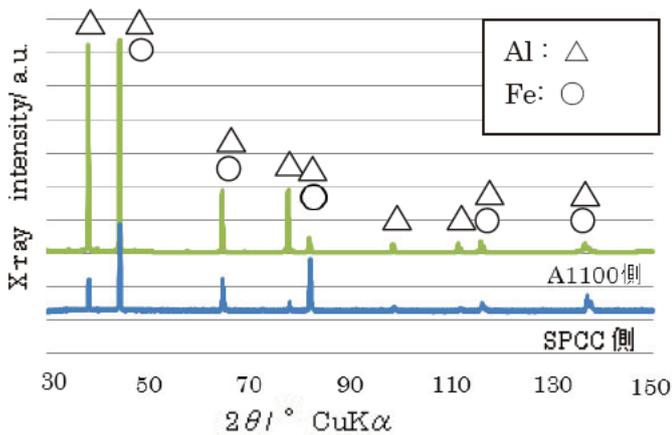


図 10 破面の XRD の結果

A1100 と SUS304 の接合破断面の SUS304 の破面を SEM 観察したところ、プローブ先端の周辺部分で不動体膜の上に、A1100 の延性破面部分が点在していた(図 11)。A1100 と SPCC の接合に比べ延性破面部分の面積は少なく、そのため、せん断強度が低かったものとする。SUS304 には不動態膜が存在するために、SPCC より接合面積が少なくなるものとする。

XRDにて A1100 と SUS304 のせん断引張り後の破面について分析を行ったが A1100 と SPCC の接合同様に母材成分の Al と γ -Fe のみが検出され、金属間化合物は検出できなかった。

次に A1100 と SPCC 接合界面の断面の SEM 写真および Al と Fe の線分析の結果を図 12 に示す。

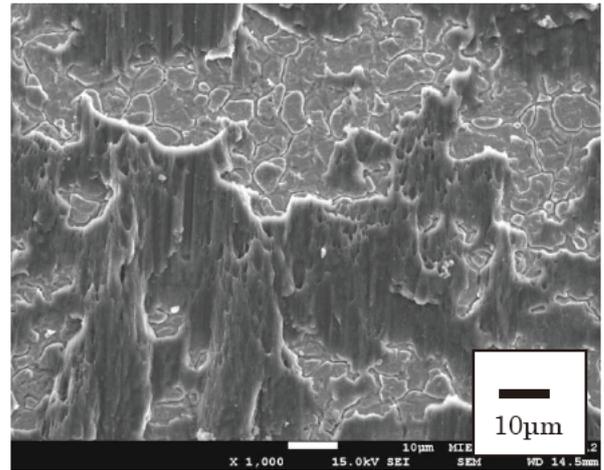


図 11 破面の SEM 写真(SUS304 側)

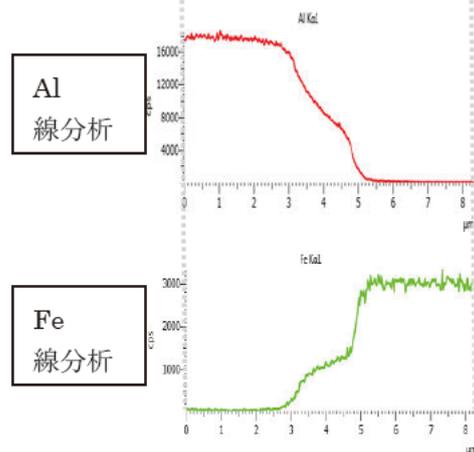
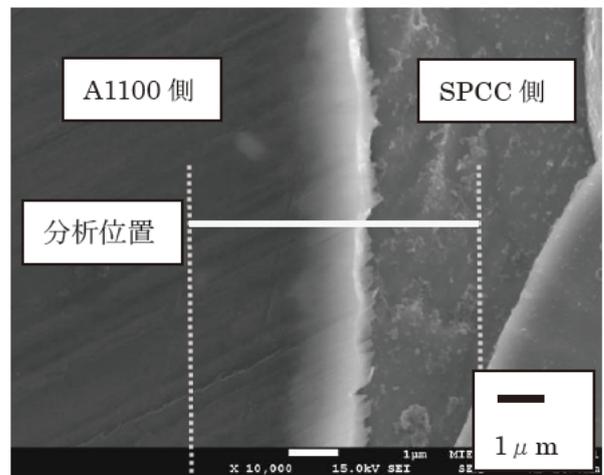


図 12 接合界面の断面の SEM 写真

接合界面には 1 μ m 程の厚さで拡散層と見られる層が存在した。EDS で分析すると Al:75at%, Fe:25at%であり、その結果からは、Al₁₃Fe₄ の金属間化合物の可能性も考えられる⁴⁾。破面の XRD の結果から金属間化合物は検出されなかったのは、金属間化合物の厚さが 1 μ m 程と薄いことに

加え、破面上に露出している面積が少なかったためと考えられる。

せん断引張り時の破断がこの金属間化合物と考えられる層内で脆性的に起こらず、Alの母材側で延性破壊として生ずるのは、この層の厚さが極めて薄いことにより、その層内での亀裂の発生が抑制されるからである。なお、A1100とSUS304の接合界面においても同様な金属間化合物と見られる層が1 μ mほどの厚さで存在した。

4. 結論

摩擦攪拌接合法を用いて、アルミニウムA1100と鉄鋼SPCC、ステンレス鋼SUS304との異種材料の重ね合せ接合を行った。接合ツールをSPCCなどに接触させずにアルミニウム側だけを塑性流動して接合をさせたが、アルミニウム材同士の接合強度には及ばなかった。

ミクロ的に観察すると部分的には接合がされていることを確認したが、実質的にはその接合面積は少なかった。接合面積を増やすためには、プローブの形状の改良、接合条件の検討が必要である。

参考文献

- 1)C.J.Dawes et al.”Friction Stir Joining of Aluminium Alloys”.TWI Bulletin,(1995)
- 2)和嶋武典:“鉄道車両のFSW(摩擦かくはん接合)技術”日本機械学会誌,70, Vol.112,No.1084,(2009)
- 3)増井孝実ほか:“アルミニウム合金と鉄鋼の超音波接合に関する研究”三重県科学技術振興センター工業研究部研究報告, 30, p1-4 (2006)
- 4)“HondaのFSW技術”
<http://www.honda.co.jp/tech/auto/fsw/topi>