

自動車の軽量化を実現するために必要な新接合プロセスの開発 (第1報)

アルミニウム合金と鋼の摩擦攪拌点接合による機械的特性

大石 郁, 坂村 勝, 竹保義博

Development of Joining Process for Vehicle Weight Saving I

Mechanical properties of the joining sheet of aluminum alloy and steel by Friction Spot Joining process

OHISHI Kaoru, SAKAMURA Masaru and TAKEYASU Yoshihiro

Recently, various joining process such as laser welding and riveted joint is considered as dissimilar metal welding of aluminum alloy and steel. Friction spot joining (FSJ) having economical efficiency and versatility has attracted considerable attention as the key process of dissimilar metal welding. In the present work, dissimilar bonding specimens of aluminum alloy (A5052) and steel (SPCC) were welded using the FSJ tool having a spherical probe. It was found that, with increasing the rotating speed and the welding time, the insertion depth that the FSJ tool inserted to specimen and the average tensile shear strength increased. The tensile shear strength was suppressed by increasing of the thickness of intermetallic compound formed at the bonding interface of aluminum alloy and steel. FSJ specimens welded by a rotational speed of 970rpm and upward force of 0.6MPa in process time from 2.5~8.5sec showed high tensile shear strength above a target value (JIS Z 3140 A).

現在、アルミニウム合金と鋼の異材接合に対してレーザ溶接やリベットなど様々な接合が検討されているが、コストや汎用性などの点から摩擦攪拌点接合 (FSJ) が注目を集めている。本研究では、著者らが開発した球面プローブを有するFSJツールを用いて、板厚1mmのアルミニウム合金と冷間圧延鋼板に対し摩擦攪拌点接合を行った。その結果、回転速度が速くなるまたは接合時間が長くなるに従って、接合ツールの押込み量および接合強度が大きくなった。また、接合時間が長くなると接合界面に形成する金属間化合物の層が大きくなり接合強度の増加が抑制された。ツールの押込み圧力0.6MPa、回転速度970rpm、接合時間2.5~8.5秒の接合条件で当初の目標値(JIS Z 3140 A)を満足した。

キーワード：摩擦攪拌点接合，異材接合，鋼板，アルミニウム合金

1. 緒 言

近年、地球温暖化に対する危機意識の高まりなどから、自動車産業ではエンジン性能の向上 (例えば HEV) など様々な技術が開発されている。その中でルーフやボンネットといった外壁パネルを従来の鋼材料の代わりに軽い金属 (アルミニウム合金) を用いることで、自動車の車体重量を軽量化し燃費を向上させることが検討されている。しかし、アルミニウム合金は従来の鋼板と比較して強度が弱いことから鋼による補強、すなわちアルミニウム合金と鋼の異材接合が必要となっている。現在、アルミニウム合金と鋼の異材接合に対してレーザ溶接やリベットなど様々な接合^{1,2)}が検討されており、コストや汎用性などの点からは摩擦攪拌点接合 (以下 FSJ とする) が注目を集めている^{3,4,5)}。

図1に一般的なFSJ技術を示す。接合ツールは、接合

ツール本体端部 (以下、ショルダーという) と、本体端部から突出した部分 (以下、プローブという) から構成される。そして重ねて配置された2枚の供試体に、接合ツールを回転させながら押し当てることによって、ショルダーと供試体の間で発生する摩擦発熱により材料を軟化し、プローブにより攪拌させることによって接合する方法である。

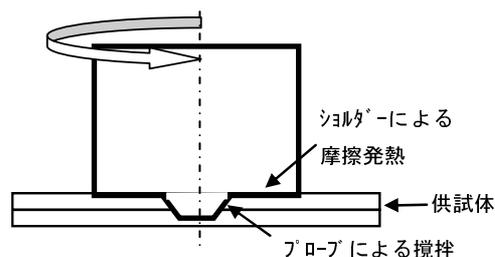


図1 従来ツールでの接合方法

FSJ の特徴として、現行のスポット接合と比較した場合、接合時の 1 打点当たりの単価が 1/5 に抑えられること⁶⁾、ヒュームやスパッタなどが発生せず作業環境が良い⁷⁾ことなどが挙げられている。一方、接合ツールが高価であること、ツールの耐久性、接合時の品質管理が確立されていないことなどの課題がある。その為、接合ツールの耐久性を向上させる手段として、プローブなしの接合ツールを用いて上板のアルミニウム合金のみを攪拌することによって接合する研究が多く発表されているものの^{8,9)}、供試体を 3 枚以上重ねた接合には適用できないなどの課題がある。

これまで筆者らは FSJ に関する研究を行い、接合ツールの形状や材質を見直すことで、安価で耐久性の高い接合ツールの開発に取り組んできた。図 2 に考案した接合ツールを示す^{10,11)}。考案した接合ツールは、接合ツールの耐久性向上及び低コスト化のために、接合ツール本体は鋼製とし、先端部をセラミックスとした。また、セラミックスの欠損対策として、形状を応力集中の少ない球面（以下、球面プローブとする）とした。本技術論文では、図 2 に示す接合ツールを用い、接合強度に与える各パラメータの影響を報告する。

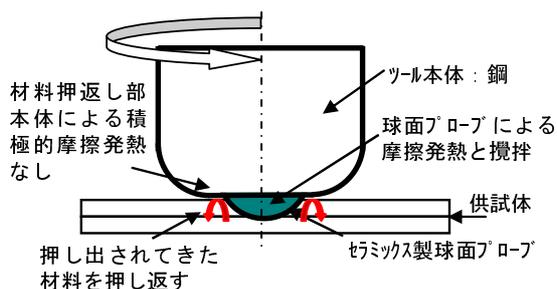


図 2 考案した接合ツールと接合方法

2. 実験方法

図 3 に本研究にて実施した実験の状態図を示す。供試体には自動車用材料として広く用いられているアルミニウム合金板 (A5052) と冷間圧延鋼板 (SPCC) を用いた。

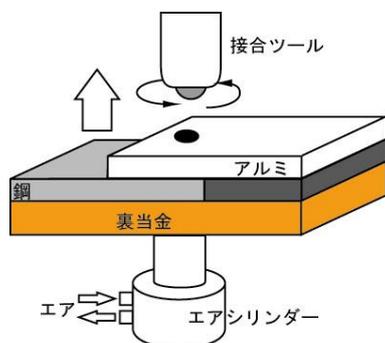


図 3 実験の状態図

供試体の寸法は共に 110mm×80mm×1mm とし、供試体の表面は接合前に 800 番の耐水研磨紙で研磨した後、アセトンで脱脂した。そして、汎用フライス盤に考案した接合ツールを取り付け、アルミニウム合金板を上板に冷間圧延鋼板を下板に 2 枚重ねて配置した。その後、エアシリンダーの空気圧を上げることで供試体を上昇させ、回転する接合ツールを供試体に押込むことにより実験を行った。その際、表 1 に示すように接合ツールの回転速度および接合時間を変化させてせん断引張強度（以下、接合強度とする）に与える影響を調査した。

表 1 実験条件

回転速度, rpm	270, 500, 970, 1500
接合時間, sec	1.5, 2.5, 4.5, 6.5, 8.5
押し込み圧力, MPa	0.6
設定押し込み量, mm	1.6

ここで、接合時間とはエアシリンダーへの圧縮空気の供給時間を示しており、基板を含めた供試体が上昇する時間、接合ツールが供試体に押込まれ攪拌する時間を合わせた時間である。

また、接合試料の上板と下板の界面の状態を調査するため、接合界面を走査型電子顕微鏡（以下 SEM とする）による観察及びエネルギー分散形 X 線分析装置（以下 EDX とする）による成分分析を実施した。

3. 結果及び考察

3.1 回転速度の影響

図 4 に回転速度 970rpm、設定押し込み量 1.6mm、押し込み圧力 0.6MPa、接合時間 2.5sec の条件で接合した供試体の接合部の断面状態を示す。図 4 に示すように、下板の鋼が角のような形状で上板へせり上がっている状況が確認された。またアルミニウム合金と鋼の境界が明確であり、同質材料の FSJ にみられるような接合状態（接合界面がみられない、連続的な結晶構造）ではなかった¹²⁾。

また表 1 に示す通り設定押し込み量は 1.6mm であったが、図 4 の接合試料における窪み痕の深さ（実際の押し込み量）は約 1.3mm であった。これは、回転する接合ツールと供試体との摩擦により発生する摩擦熱の影響が小さいため供試体の軟化が遅れたこと、接合ツールの押し込み圧力が小さいこと、接合時間が 2.5sec と短いこと、以上の要因により接合ツールが設定押し込み量まで押し込めない状態で引き抜かれた（供試体が下降した）ことによる。

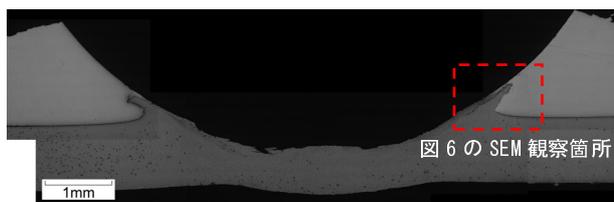


図 4 接合部の状態

次に図5に回転速度を変化させた際の接合強度および実際の押し込み量の関係を示す。図5に示す通り、回転速度が速くなるに従って、実際の押し込み量は増加し接合強度も強くなった。これは、回転速度が速くなると、接合ツールと供試体との摩擦が大きくなり、発生した摩擦熱によって供試体が軟化し、ツールが押し込み易くなったものと考えられる。そして、押し込み量が増加することで、供試体の攪拌される領域も大きくなり、強度が強くなったものと考えられる。

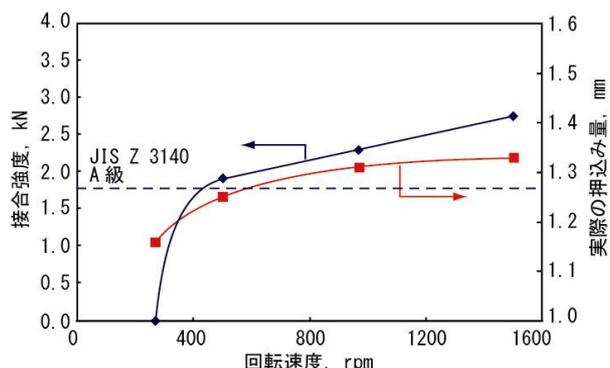


図5 回転速度の影響

図6に接合時間2.5secの条件での接合界面のSEM観察結果を示す(図4の□箇所)。図(下)に示す通り、アルミ/鋼の界面には中間相がみられる。この中間相および両材料をEDX分析した結果を表2に示す。

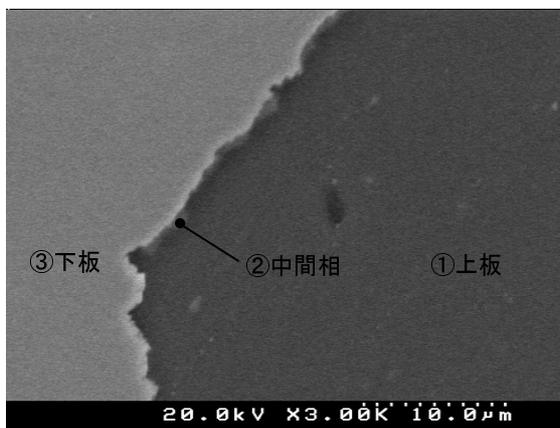
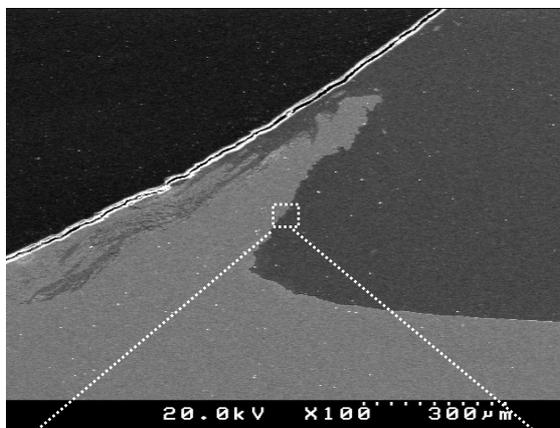


図6 接合時間2.5sec 試料の接合界面

表2 各領域の成分分析結果 at%

	Fe	Al
①上板 (アルミニウム合金)	0.4	99.6
②中間相 (金属間化合物)	24.0	76.0
③下板 (鋼)	98.9	1.1

表2の結果から、中間相(金属間化合物)は $FeAl_3$ または Fe_2Al_5 であると考えられる。このことから、接合時において鋼板を攪拌することにより高温の摩擦熱が発生し、一部のアルミニウム合金が溶解し、鋼板との接合界面に金属間化合物を形成したと考えられる。形成された金属間化合物は脆い材質であるが、図にみられるように形成した金属間化合物の層厚は0~1 μm とわずかであることから、接合強度への影響は小さいと考えられる^{13,14)}。

次に、せん断引張試験後の接合部の状態を図7に示す。この図に示すように、せん断引張試験による破断(亀裂)の進行は、上板へ突き出した鋼内部を貫通するのではなく、アルミニウム合金と鋼の接合界面に沿って進行することがわかった。そのため接合界面を長くすること、すなわち下板の鋼を上板へ攪拌させる(突き出させる)こと、金属間化合物の厚さを小さくすることにより接合強度が向上することが示唆される。

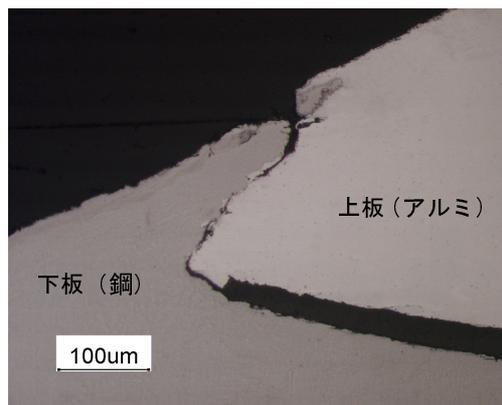


図7 せん断引張試験後の接合部の状態

3.2 接合時間の影響

次に接合強度がJISのA級以上である回転速度970rpmの条件で実験を行った。図8に設定押し込み量1.6mm、回転速度970rpmの条件で、接合時間を変化させた際の接合強度および実際の押し込み量の関係を示す。

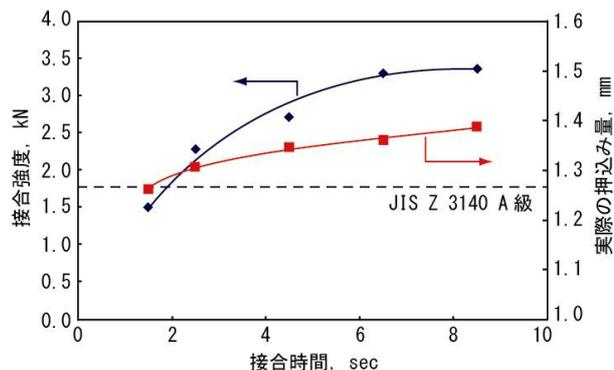


図8 接合時間の影響

図 8 に示す通り、接合時間 2.5sec 以上で接合強度はスポット溶接の JIS 規格 (JIS Z 3140 A 級) を満足した。また接合時間が長くなるに従って実際の押込み量も大きくなり、接合強度も強くなった。しかし接合時間 8.5sec の条件では、実際の押込み量は大きくなっているが接合強度は強くならなかった。この原因を調査するため、接合時間 8.5sec の条件で作製した試料の接合界面の SEM 観察結果を図 9 に示す。この図より、接合界面に形成されて金属間化合物の層が 5 μ m 程度と厚くなっていることが確認された。このことから、脆い材質である金属間化合物の層が厚くなり破断が進行し易なり、接合強度の増加が抑制されたと考えられる。

以上の結果から、回転速度や接合時間を管理することで発生する金属間化合物層の厚さおよび押込み量 (攪拌領域) を制御し、高い接合強度を得られることが判った。

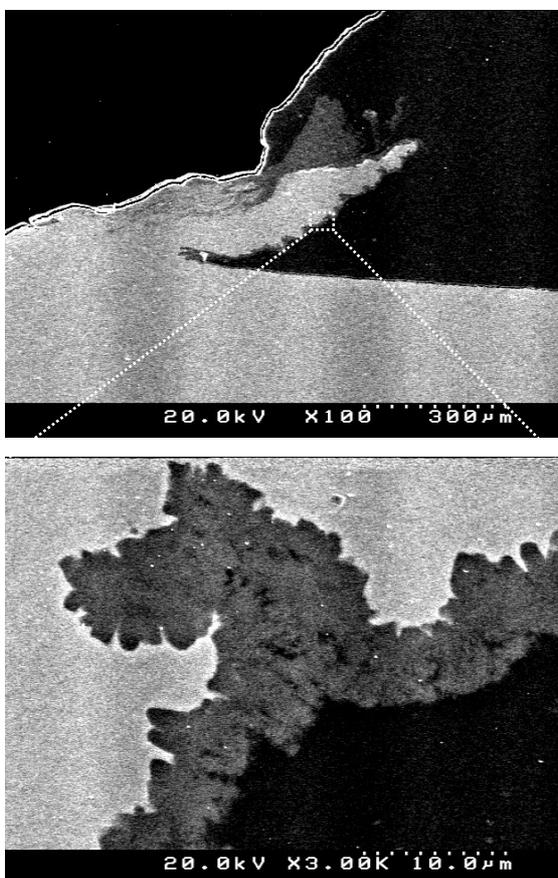


図 9 接合時間 8.5sec 試料の接合界面

4. 結 言

本研究では、これまでの研究で開発した球面プローブを持つ接合ツールを用いて、板厚 1.0mm のアルミニウム合金板 (A5052) と冷間圧延鋼板 (SPCC) を摩擦攪拌点接合した。その際、下板 (SPCC) まで接合ツールを押し込み、攪拌することによって以下の結論を得た。

- 1) 下板 (SPCC) までツールを押し込むことにより、下板が上板へ押し出され、角形状の突起部が形成される

ことが判った。

- 2) せん断引張試験すると突起部のアルミニウム合金/鋼の界面に沿って破壊が進行することが判った。
- 3) 突起部のアルミニウム合金/鋼の界面には金属間化合物が形成され、接合時間の増加とともに金属間化合物の層の厚さが大きくなることを判った。
- 4) 球面プローブを有する接合ツールを用い接合条件を選定することで、短い接合時間でも JIS 規格 (JIS Z 3140 A 級) 以上の接合強度を得られることが判った。

アルミニウム合金に対する接合技術として摩擦攪拌接合技術は既に実用化が進み、新幹線の車両用床材やロケットタンクなど様々な分野に適用されてきている。今後は、安価で作業環境性も良いなどのメリットを活かし、これまで接合が困難とされた異材接合やチタンなどの難溶接金属に対する研究が進むと思われる。当所も、FSJ によるアルミニウム合金/鋼の異材接合技術の実用化を図るために、さらなるツールの耐久性向上や接合時における品質管理手法の確立を目指す。

文 献

- 1) 松村吉修: 豊橋技術大学未来ビークルリサーチセンター第 3 回シンポジウム, 豊橋, 2006.
- 2) 中田一博: 溶接技術, 52(10), 126-130 (2004).
- 3) 青田欣也, 池内健二: 溶接学会論文集, 26, 54 (2008).
- 4) 立野高寛ほか 4 名: 溶接学会全国大会講演概要集, 79, 58 (2006).
- 5) 大橋良司, 藤本光生: 溶接学会全国大会講演概要集, 82, 66 (2008).
- 6) http://www.khi.co.jp/robot/robotnewsite%20f/robotnewsite/fsj/fsj_news-site-f/fsj-site/f_mm03_00.html
- 7) 加藤喜久生: 軽金属学会・第 78 回シンポジウム・自動車における究極の軽量化を目指して, 2006, p.31.
- 8) 田中晃二, 熊谷正樹, 吉田英雄: 軽金属, 56(6), 317-322 (2006).
- 9) 宮川堅: 豊橋技術大学未来ビークルリサーチセンター第 6 回シンポジウム, 豊橋, 2009.
- 10) 坂村勝, 大石郁, 竹保義博: 特開 2010-46676 (2010).
- 11) 坂村勝ほか 4 名: 広島県立総合技術研究所 東部工業技術センター研究報告, 21, 1 (2008).
- 12) 古賀信次, 瀬田良孝: 溶接技術, 52(7), 139-144 (2004).
- 13) 黒田晋一, 才田一幸, 西本和俊: 溶接学会論文集, 17(3), 484 (1999).
- 14) M. Kreimeyer, S. Spold, F. Wangner, Bremen, B. Criqui and M. Joly: Schweissen and Schneiden2002, DVS220, 256 (2002).

