

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2報)

アルミニウム合金／鋼の摩擦アンカー接合継手の強度決定因子に関する研究

坂村 勝, 大石 郁, 岩谷 稔*1, 大田 耕平

Development of Joining Process for Vehicle Weight Saving II

Study of the primary factor in the strength of dissimilar friction anchor welded joints of aluminum alloy and steel

SAKAMURA Masaru, OHISHI Kaoru, IWATANI Minoru*1 and OHTA Kohhei

We invented Friction anchor joining process. This process was applied to a lap joint of aluminum alloy (A5052) and low carbon steel (SPCC) with 1mm thickness each. Consequently, on the condition of the plunged depth: 1.45mm, the tool rotation speed: 1500rpm and the welding time: 2.5 s, the tensile shear strength was 3kN and the cross tensile strength was 0.6kN. Next, we observe cross sections of samples after tensile tests and discussed the primary factor in the joining strength. When tensile shear tests were conducted on the joints, the aluminum regions were broken. On the other hand, when cross tensile tests were conducted on the joints, the aluminum regions were broken on condition that projections of steel formed in aluminum were small. On condition that projections were large, initial cracks occurred at the bonding interface of aluminum and steel, and, after that, the cracks mainly advanced through the bonding interface.

筆者らが開発した摩擦アンカー接合を板厚 1.0mm のアルミニウム合金板 (A5052) と冷間圧延鋼板 (SPCC) の異材重ね点接合に適用した。その結果、回転数 1500rpm、接合時間 2.5 秒、押込量 1.45mm でせん断引張強度 3kN、十字引張強度 0.6kN を達成した。次に、試験後の試料の断面観察を行うことにより、接合強度を決定する主要因子について考察を行った。せん断引張試験ではアルミ部が破断することが分かった。一方、十字引張試験では、アルミ内に形成される鋼の突起が小さいときはアルミ部が破断し、突起が大きいときは接合界面で初期亀裂が発生し、主として接合界面を亀裂が進行することで破断が起こることが分かった。

キーワード：摩擦アンカー接合、異材接合、鋼板、アルミニウム合金

1. 緒 言

近年、車体重量の軽量化の観点から、アルミニウム合金を適用したアルミニウム／鋼ハイブリット構造が検討されており¹⁾⁻³⁾、アルミニウム合金と鋼の異材接合への要望が高まっている。現在、アルミニウム合金と鋼の異材接合については抵抗スポット溶接、レーザ溶接やリベットなど様々な接合⁴⁾⁻⁶⁾が検討されているが、コストや汎用性などの点からは摩擦攪拌点接合が注目を集めている⁷⁾⁻⁹⁾。

摩擦攪拌点接合の特徴として、現行の抵抗スポット溶接と比較した場合、接合時の1打点当たりの単価が1/5に抑えられること¹⁰⁾、ヒュームやスパッタなどが発生せず作業環境が良いこと¹¹⁾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。そのため、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^{12), 13)}、供試体を3枚以上重ねた接合には適用できないなどの問題がある。

これまで筆者らは、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鋼板用摩擦攪拌点接合ツールの開発に取り組んできた¹⁴⁾⁻¹⁶⁾。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とした。本ツールをアルミニウム／鋼の重ね点接合に適用すると下材である鋼が上材のアルミニウム内に侵入し突起を形成することを確認した^{17), 18)}。本技術については摩擦アンカー接合という名称で特許出願済みである¹⁹⁾。本技術報文では、アルミニウム／鋼の

2011. 5. 31 受理 加工技術研究部

*1 西部工業技術センター生産技術アカデミー

摩擦アンカー接合継手の接合強度が何で決まるのかを探るべく、強度試験及び断面観察を実施したので報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材としては、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。供試材の寸法は、せん断引張試験用は 110mm×80mm×1mm、十字引張試験用は 50mm×150mm×1mm とし、供試材の表面は、接合前に 180 番の耐水研磨紙で研磨した後、アセトンで脱脂した。

2.2 接合ツール

写真 1 に用いた接合ツールを示す。接合ツール本体には S45C の焼きならし材を用い、先端のセラミックスとしては、窒化珪素を用いた。接合ツールの寸法は、本体直径が 20mm、セラミックスは直径 10mm の球面とした。また、球面セラミックスの、本体先端からの突出長さは 1.5mm とした。

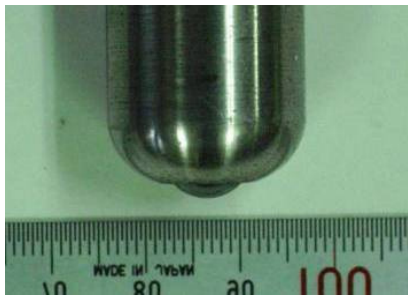


写真 1 摩擦アンカー接合用ツール外観

2.3 接合

図 1 に本研究で用いた実験装置の模式図を示す。SS400 製の裏当金の上に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。そして、汎用フライス盤に考案した接合ツールを取り付け、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押込量を変化させて接合を実施した。

表 1 実験条件

回転速度 (rpm)	1500
接合時間 (s)	2.5
ツール押込量 (mm)	1.2~1.6

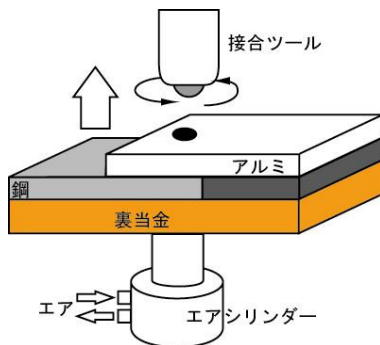


図 1 実験装置模式図

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。なお、接合用装置としては日立精機（株）製汎用フライス盤 3K（立型）を用い、シールドガスは用いなかった。

2.4 接合強度及び接合断面評価

得られたせん断引張試験用の被接合材は、JIS-Z3136 に従い、幅 30mm×長さ 130mm の短冊状に切断してせん断引張試験を実施した。十字引張試験用の被接合材は、加工は行わず、JIS-Z3137 に従って十字引張試験を実施した。なお、試験は（株）島津製作所製オートグラフ AG-10TB を用いて引張速度 0.08mm/s で行った。

被接合材の断面評価については、切断、研磨後、斉藤光学（株）製マイクロSCOPE SKM-3000A-PC、オリンパス（株）製倒立型金属顕微鏡 PMG3 を用いて行った。また、接合界面の観察及び分析は（株）日立製作所製静電界放射型走査電子顕微鏡 S-4100 及び付属の（株）堀場製作所製エネルギー分散型 X 線分析装置 EMAX-ENERGY を用いて行った。

3. 結果及び考察

3.1 強度試験

図 2 にせん断引張試験結果を示す。せん断引張強度は、ツール押込量が大きくなるに従い上昇し、1.45mm で極大となつて、1.6mm では若干低下する傾向が認められる。図 3 に十字引張試験結果を示す。十字引張強度については、ツール押込量 1.3mm まではツール押込量が増大するに従い十字引張強度が上昇し、1.3mm でほぼ飽和する傾向が認められる。

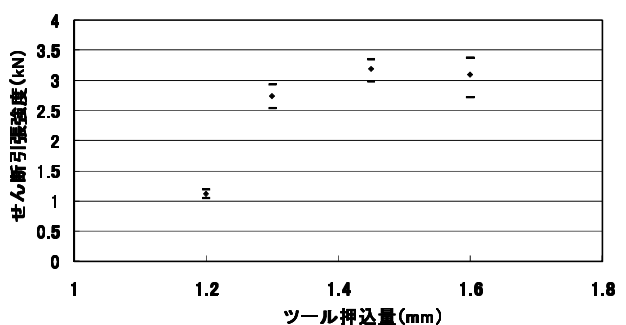


図 2 ツール押込量とせん断引張強度の相関

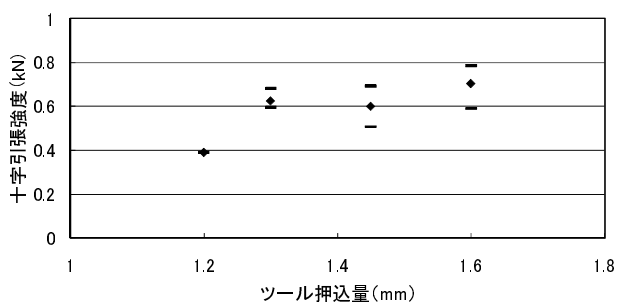


図 3 ツール押込量と十字引張強度の相関

3.2 被接合材の断面観察

写真2にツール押込量1.35mmの試料の接合断面をマイクロスコップで観察した写真を示す。写真3には押込量1.2~1.6mmの試料の断面の光学顕微鏡写真を示す。観察位置は写真2中の□部である。押込量が1.3mmとなった際に下材である鋼が上材であるアルミ中に進入し突起を形成し、突起の大きさは押込量とともに増加し、押込量1.6mmではアルミの上面に達することが分かる。写真4

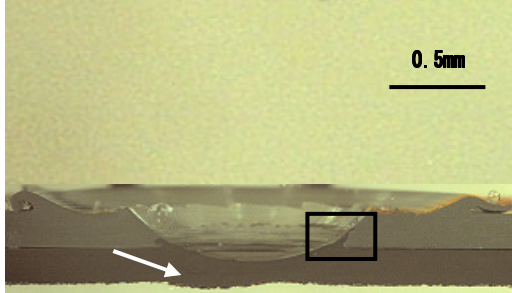


写真2 接合断面のマイクロスコップ写真
(ツール押込量 1.35mm)

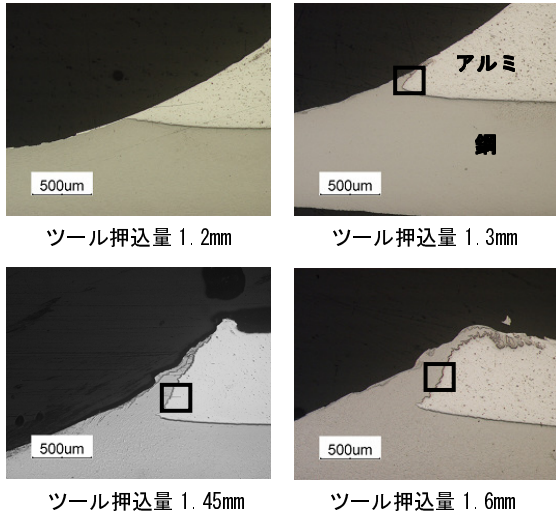


写真3 接合断面の光学顕微鏡写真

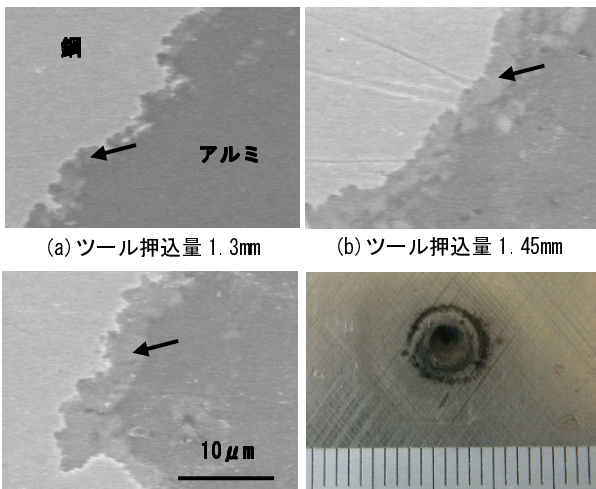


写真4 接合界面の電子顕微鏡写真

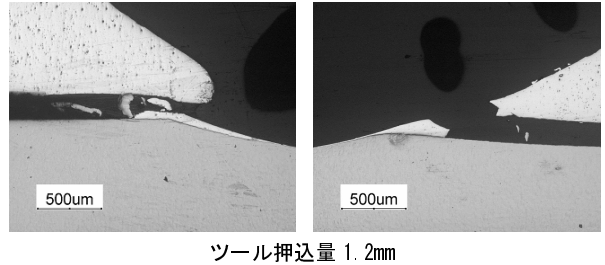
写真5 裏当金外観写真

にツール押込量 1.3mm, 1.45mm, 1.6mm の試料の接合界面（写真3中の□部）の電子顕微鏡写真を示す。接合界面には金属間化合物層が認められ（写真4中の→部）、突起部はアルミニウム合金と鋼が接合していることが分かる。また、押込量が大になるほど金属間化合物層が厚くなっていることも分かる。なお、接合ツールを鋼側まで押込んでいるにもかかわらず押込量 1.3mm 未満では突起は形成されなかったが、これは裏当金にできた若干の凹みのためであると考えている。写真2中に矢印で示すように鋼板の下側に若干の膨らみが認められる。写真5には実験で使用した裏当金を示す。長期の実験使用のため凹みが認められる。

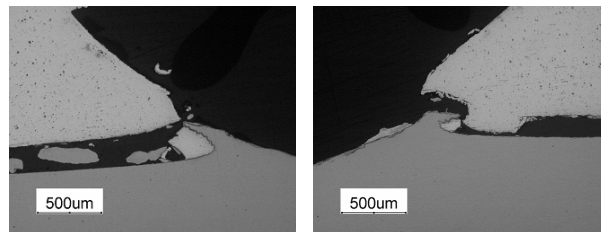
3.3 強度試験後の断面観察

接合強度が何で決まっているのかを調べるために、引張試験後の断面観察を実施した。写真6にはせん断引張試験後の試料の断面写真を示す。いずれの場合もアルミ部で破断していることが分かる。せん断引張強度が、図2に示したように、ツール押込量 1.45mm で極大となり、1.6mm では若干低下する傾向となった原因については次のように推定した。以下、写真7を用いて説明する。

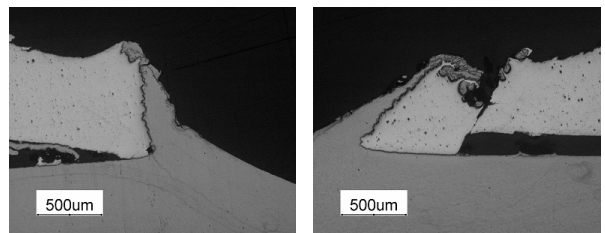
ツール押込量が増える→突起長さが大となる→突起先端からアルミ下面までの距離が大となる→強度向上。さらに押込量が増える→アルミがツールショルダー部によって押込まれ、アルミ板厚が小となる→強度が低下する。続いて、十字引張試験後の試料の断面写真を写真8に示す。十字引張り試験では突起がないときにはアルミ部で



ツール押込量 1.2mm



ツール押込量 1.3mm



ツール押込量 1.45mm

左断面 右断面

写真6 せん断引張試験後の断面写真

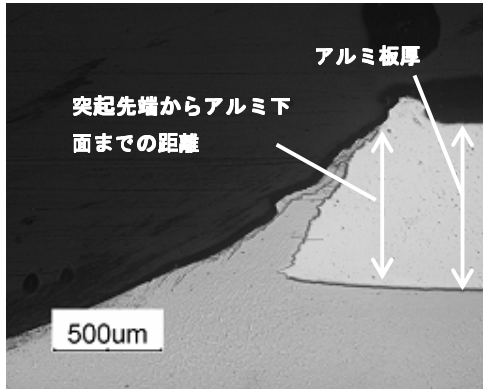
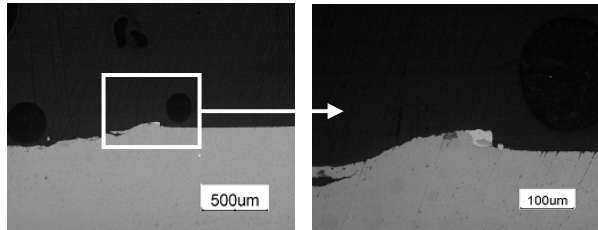
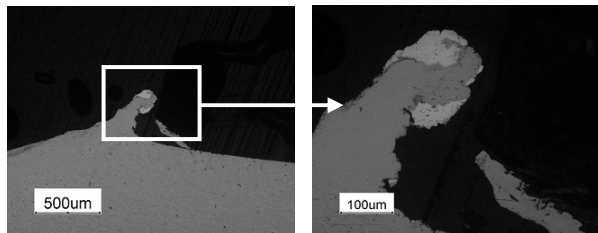


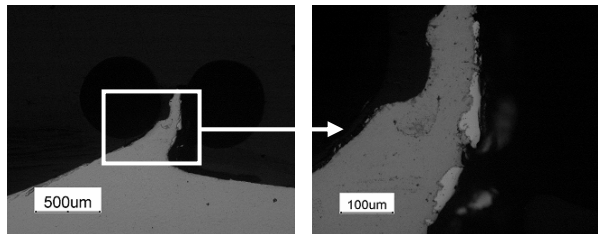
写真7 破断メカニズム説明図



ツール押込量 1.2mm



ツール押込量 1.3mm



ツール押込量 1.45mm

写真8 十字引張試験後の断面写真

破断し、突起が大になると接合界面が剥離後、主として接合界面を亀裂が進展していることが分かる。十字引張強度が図3に示したように、ツール押込量1.3mmまではツール押込量が増大するに従い上昇し、1.3mmで飽和する傾向となった原因については次のように推定した。以下、写真7を用いて説明する。

押込量が増える→突起長さが大となる→突起先端からアルミ下面までの距離が大となる→接合強度向上。さらに押込量が増える→破断位置がアルミ部から接合界面に変わる→接合界面面積は増大するものの、同時に界面の金属間化合物層が厚くなる(写真4参照)→強度はほとんど変わらない。

4. 結 言

本研究では、筆者らが開発した摩擦アンカー接合を板厚1.0mmのアルミニウム合金板(A5052)と冷間圧延鋼板(SPCC)の異材重ね点接合に適用し、押込量をパラメータとして、せん断引張強度及び十字引張強度を評価した。また、試験後の試料の観察を行うことにより、接合強度を決定する主要因子について考察を行い、以下の結論を得た。

- 1) 回転数1500rpm、接合時間2.5秒、押込量1.45mmでせん断引張強度3kN、十字引張強度0.6kNを達成した。
- 2) せん断引張試験ではアルミ部が破断する。従って、せん断引張強度は、ツール押込量が大になると、接合時にアルミ内に形成される鋼の突起が大きくなり向上する。しかし、ツール押込量がさらに大になると、アルミがツールショルダー部により押し込まれ、アルミ板厚が小さくなることから、強度は低下すると推定された。
- 3) 十字引張試験では、アルミ内に形成される鋼の突起が小さいときはアルミ部が破断し、突起が大きいときは接合界面で発生した初期亀裂が、主として接合界面を進行することで破断が起こる。従って、十字引張強度は、ツール押込量が大になると上昇するが、さらに押込量を大にすると破断位置が接合界面となり、押込量が大になるに伴って接合界面面積は増えるものの、界面の金属間化合物層が厚くなることで相殺され大きな変化はないと推定された。

本研究は大阪大学接合科学研究所共同研究員制度を利用して行いました。

文 献

- 1) 大谷忠司ほか：まてりあ, 39(11), 878(2000).
- 2) 吹沢一徳ほか：まてりあ, 39(1), 17(2000).
- 3) 丸山正明：まてりあ, 39(1), 31(2000).
- 4) 武田美佳子ほか：神戸製鋼技法, 57(2), 69(2007).
- 5) 松村吉修：豊橋技術大学未来ピークルリサーチセンター第3回シンポジウム, 豊橋, 2006.
- 6) 中田一博：溶接技術, 52(10), 126(2004).
- 7) 青田欣也, 池内健二：溶接学会論文集, 26, 54(2008).
- 8) 立野高寛ほか：溶接学会全国大会講演概要集, 79, 58(2006).
- 9) 大橋良司, 藤本光生：溶接学会全国大会講演概要集, 82, 66(2008).
- 10) http://www.khi.co.jp/robot/robotnewsite%20f/robotnewsite/fsj/fsj_news-site-f/fsj-site/f_mm03_00.html
- 11) 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.

- 12) 田中晃二, 熊谷正樹, 吉田英雄: 軽金属, **56**(6), 317 (2006).
- 13) 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.
- 14) 坂村勝, 大石郁, 竹保義博: 特開 2010-46676 (2010).
- 15) 坂村勝ほか: 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).
- 16) 坂村勝ほか: 溶接学会全国大会講演概要, **83**, 86 (2008).
- 17) 大石郁ほか: 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, **22**, 1 (2010).
- 18) 坂村勝ほか: 溶接学会全国大会講演概要, **87**, 248 (2010).
- 19) 大石郁, 坂村勝, 竹保義博: 特願 2011-033676 (2011).