

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3報)

摩擦アンカー接合によるアルミニウム合金／鋼／鋼3枚継手の機械的性質

坂村 勝, 大石 郁^{*1}, 大田 耕平

Development of Joining Process for Vehicle Weight Saving Ⅲ

Mechanical properties of dissimilar friction anchor welded joints of Al alloy/steel/steel

SAKAMURA Masaru ,OHISHI Kaoru^{*1} and OHTA Kohhei

We devised the Friction anchor joining (FAJ) process. This process was applied to lap joints of aluminum alloy (A5052;1mm thickness) , low carbon steel (SPCC;0.6mm thickness) and low carbon steel (SPCC;1mm thickness). Consequently, when a ϕ 10mm sphere was used as the tip of the rotating tool, on the condition of the plunged depth: 1.95mm, the tool rotation speed: 1500rpm and the welding time: 2.5 s, the tensile shear strength was 2.47kN. When a ϕ 12mm sphere was used as the tip of the rotating tool, on the condition of the plunged depth: 1.95mm, the tool rotation speed: 1500rpm and the welding time: 2.5 s, the tensile shear strength was 3.85kN. In each case, when a tensile shear test was conducted, the area near the aluminum alloy and steel joining interface was broken. And, with increasing the plunged depth, a projection of steel formed in aluminum alloy became larger and the tensile shear strength increased.

筆者らが開発した摩擦アンカー接合をアルミニウム合金板（A5052；1mm厚）、冷間圧延鋼板（SPCC；0.6mm厚）と冷間圧延鋼板（SPCC；1mm厚）の異材3枚重ね点接合に適用し、押込量及び球面径をパラメータとして、せん断引張強度を評価した。その結果、①球面 ϕ 10mmでは、回転数1500rpm、接合時間2.5秒、ツール押込量1.95mmでせん断引張強度2.47kNを達成し、②球面 ϕ 12mmでは、回転数1500rpm、接合時間2.5秒、ツール押込量1.95mmでせん断引張試験3.85kNを達成できた。球面 ϕ 10mm、球面 ϕ 12mmの場合ともに、せん断引張試験時の破断位置はアルミニウム合金と鋼の接合界面近傍であり、ツール押込量が大きくなるに従い、アルミ部に形成される鋼の突起が大きくなり、接合強度が上昇する傾向にあることが分かった。

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

CO₂排出量削減の観点から、自動車重量の軽量化は必須課題である。この対策として、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, 2, 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、セルフピアシングリベットや摩擦攪拌点接合など様々な接合が検討されている⁴⁾⁻¹²⁾。

この中の摩擦攪拌点接合技術による異種金属接合では、重ねて配置された2枚（アルミニウム合金／鋼板）の供試体に、接合ツールを回転させながら押し当て、上板のアルミニウム合金のみを攪拌し接合する技術である^{10, 11, 12)}。摩擦攪拌点接合の特長としてヒュームレスやス

パッタレスなどの作業環境性が良いことや省電力などのメリットが挙げられている。しかしながら、本接合方法では上板のアルミニウム合金のみを攪拌し接合するため、3枚以上の重ね継手に適用することができないという課題が残る。そこで、著者らは先端が球面の接合ツールを回転させながら下板の鋼側まで押し込み、下板の鋼板からなる突起部を上板のアルミニウム合金側へ形成することによって、その突起部のアンカー効果により接合する方法を考案し¹³⁾、“摩擦アンカー接合”という名称で特許出願した¹⁴⁾。本手法は、原理的には3枚重ねの異材継手の点接合やシール剤を挟んだ条件での接合が可能である。本技術報文では、自動車車体製作においてニーズのある、アルミニウム合金／鋼／鋼の3枚重ね異材継手に摩擦アンカー接合を適用した際の接合強度についての評価結果を報告する。

2012.6.29 受理 加工技術研究部

*1 西部工業技術センター

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、最上部の A5052 は 110mm×80mm×t1mm、中間部の SPCC は 110mm×40mm×t0.6mm、最下部の SPCC は 110mm×80mm×t1mm とした。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

用いた接合ツールを写真 1 に示す。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 $\phi 20\text{mm}$ 、セラミックスは直径 $\phi 10\text{mm}$ 及び $\phi 12\text{mm}$ 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 2.0mm とした。



写真 1 摩擦アンカー接合用
ツール外観

2.3 接合

本研究で用いた実験装置の模式図を図 1 に示す。SS400 製の裏当ての上に A5052 を最上部に、中間部と最下部に SPCC を重ねて配置した。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。

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、“供試体が上昇する時間”と“回転する接合ツールが供試体に押し込まれている時間”を合わせた時間である。なお、押し込み量を変化さ

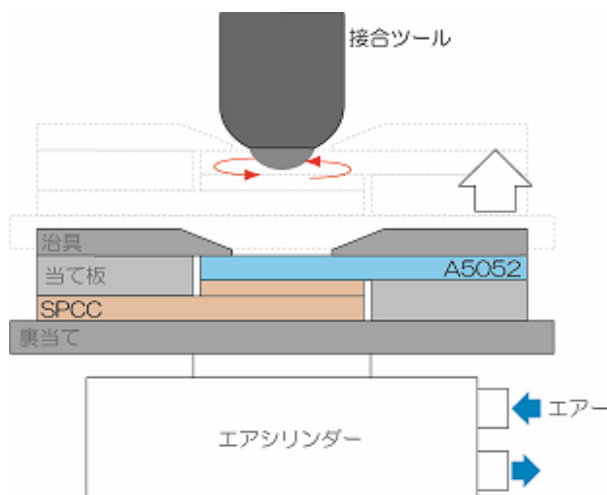


図 1 実験装置模式図

表 1 接合条件

回転速度 (rpm)	1500
接合時間 (s)	2.5
ツール押込量 (mm)	1.45~1.95

せる方法としては、エアシリンダーによる供試体の上下移動距離が 12mm と一定であるため、土台となるフライス盤を上下させて押し込み量を変化させた。そのため、厳密には供試体と接合ツールとの距離は設定する押し込み量によって変化し、接合ツールを供試体に押し込み攪拌する時間は変わってくるが、本実験の最大値と最小値の差が 0.002sec とわずかな時間差であるため考慮しないこととした。なお、接合用装置としては日立精機㈱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

得られた被接合材は、JIS-Z3136 に準じ、幅 30mm×長さ 130mm の短冊状に切断して最上部の A5052 と最下部の SPCC を引張ることによってせん断引張試験を実施した。なお、試験は㈱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、オリンパス㈱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㈱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㈱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 球面 $\phi 10\text{mm}$ での接合

写真 2 に球面直径 $\phi 10\text{mm}$ 、ツール押込量 1.95mm の条件で接合した被接合材の外観写真を、写真 3 には断面マクロ写真を、写真 4 には写真 3 中の 部、つまり、中間部の SPCC と最下部の SPCC の接合部マクロ写真を示す。写真 2 より、ツールを押込むことで押し出された材料がバリとなっていることが分かる。写真 3、写真 4 より、中間部及び最下部の SPCC が A5052 側に塑性流動し突起

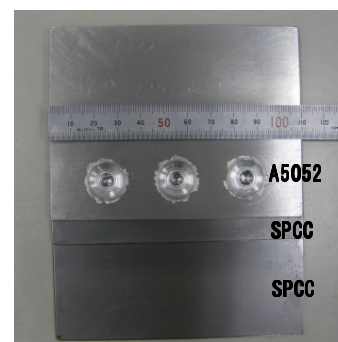


写真 2 被接合材外観写真
(球面 $\phi 10\text{mm}$, 押込量 1.95mm)

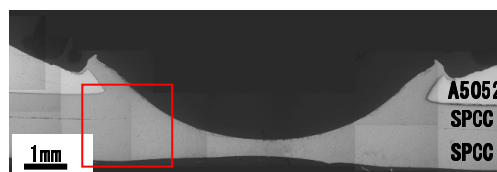


写真 3 被接合材断面写真
(球面 $\phi 10\text{mm}$, 押込量 1.95mm)

を形成して接合していること, 中間部の SPCC と最下部の SPCC の未接合部は写真中央より認められなくなり, SPCC 同士が接合していることが分かる。次に, 図 2 にせん断

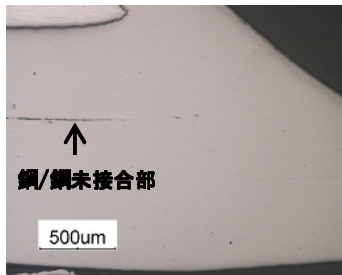


写真 4 鋼/鋼接合部断面マイクロ写真

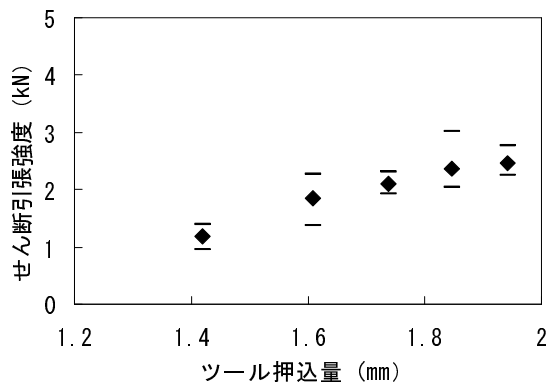
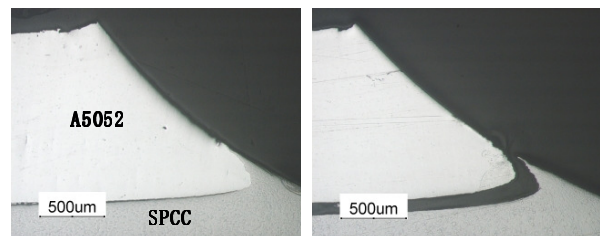
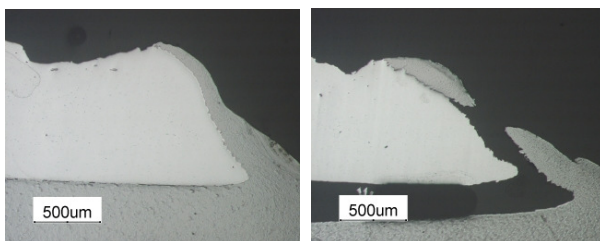


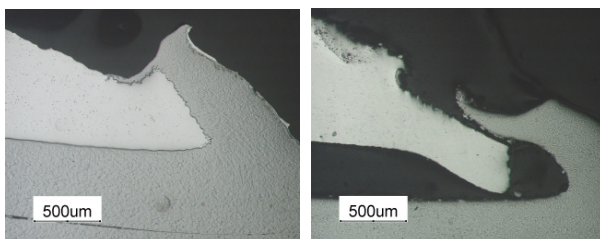
図 2 接合ツール押込量とせん断引張強度の相関
(ツール球面径: φ10mm)



押込量 1.45mm



押込量 1.6mm



押込量 1.95mm

引張前 引張後

写真 5 せん断引張試験前後の断面写真
(ツール球面径: φ10mm)

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, 1.95mm で 2.47kN に達した。

写真 5 にはツール押込量 1.45mm, 1.6mm, 1.95mm の場合のせん断引張試験前後の断面写真を示す。いずれの場合も破断位置は最上部の A5052 と中間部の SPCC の接合界面近傍であった。ツール押込量 1.45mm では接合界面で破断し, 1.6mm では接合界面及び突起部の鋼部で破断し, 1.95mm では接合界面で破断している。

3.2 球面 φ12mm での接合

写真には示さないが, 球面 φ12mm の場合も, 球面 φ10mm の場合と同様に, 外観上, バリ発生があり, 断面観察の結果, SPCC が A5052 側に突起を形成して接合してお

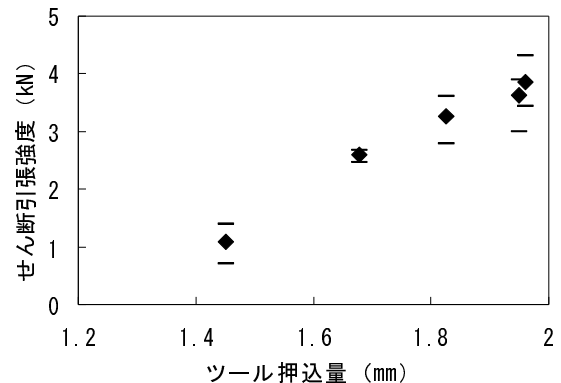
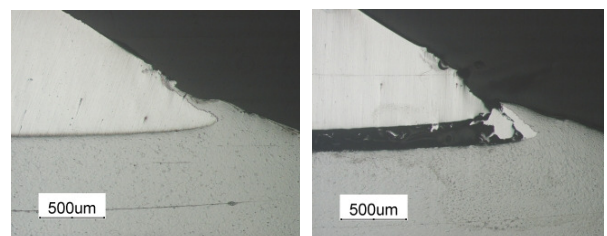
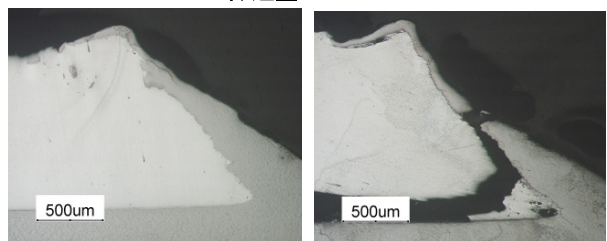


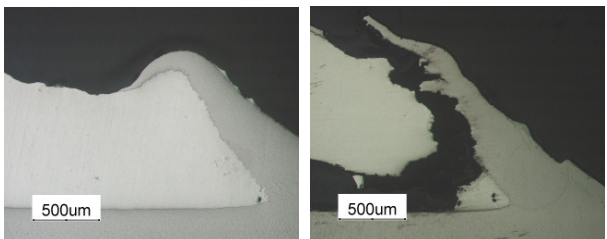
図 3 接合ツール押込量とせん断引張強度の相関
(ツール球面径: φ12mm)



押込量 1.45mm



押込量 1.8mm



押込量 1.95mm

引張前 引張後

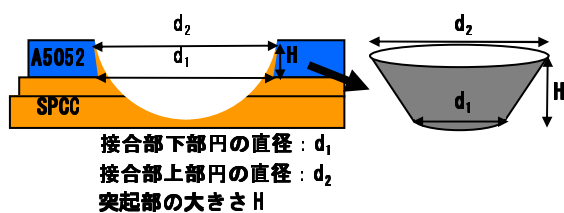
写真 6 せん断引張試験前後の断面写真
(ツール球面径: φ12mm)

り、SPCC 同士も接合していることを確認した。図 3 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、1.95mm で 3.85kN に達した。写真 6 にはツール押込量 1.45mm、1.8mm、1.95mm の場合のせん断引張試験前後の断面写真を示す。いずれの場合も破断位置は最上部の A5052 と中間部の SPCC の接合界面近傍であった。ツール押込量 1.45mm では接合界面近傍のアルミ部で破断し、1.8mm ではアルミ部、接合界面及び突起部の鋼部で破断し、1.95mm ではアルミ部及び接合界面で破断している。

3.3 せん断引張強度決定因子に関する考察

突起部の、SPCC と A5052 が接している部分（図 4 右図の灰色部）において SPCC と A5052 が金属的に接合しており、せん断引張試験では、この接合部近傍で破断が生じている。従って、接合部の面積（以下、接合面積とする）を図 4 に示すように概算して、球面φ10mm、球面φ12mm のせん断引張強度試験結果を合わせて考察し、以下のように推定した。

- ① 突起が小の場合は、接合面積が小さいため、接合界面をクラックが進展して破断する。
- ② 突起が少し大きくなると、接合面積が大きくなり、接合界面、接合界面近傍のアルミ部のいずれか、あるいは両方をクラックが進展する。鋼の突起部の厚さが小さい部位があると、写真 5 の押込量 1.6mm や写真 6 の押込量 1.8mm の場合のように、クラックは鋼突起部を貫通して破断に至る。
- ③ さらに突起が大きくなると、接合界面、接合界面近傍のアルミ部のいずれか、あるいは両方をクラックが進展するが、クラックが鋼突起部を貫通進展することはなくなる。



$$\text{接合面積（右図の灰色部）} \approx (\pi \times d_2 + \pi \times d_1) \times H / 2$$

図 4 接合面積の概算方法

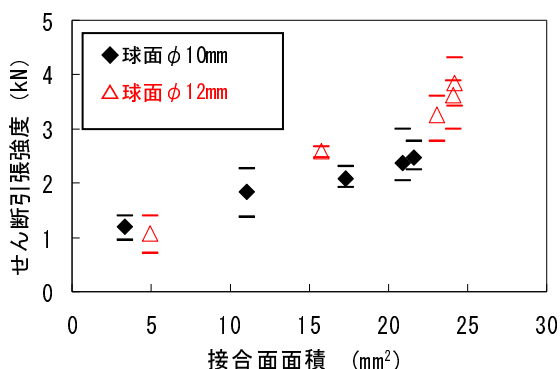
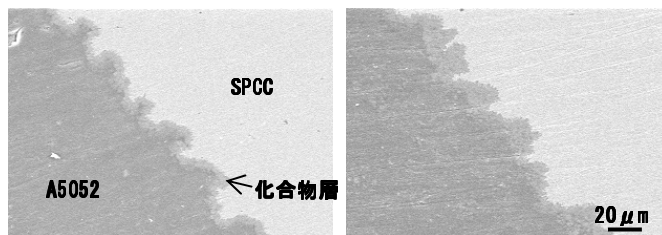


図 5 接合面積とせん断引張強度の相関



球面φ10mm 接合面積 22mm² 球面φ12mm 接合面積 24mm²

写真 7 アルミニウム合金/鋼接合界面 SEM 写真

次に、球面φ10mmと球面φ12mmの結果を標準化すべく、接合強度と接合面積との相関を調べた。図 5 にその結果を示す。球面φ10mmと球面φ12mmともに接合面積が大きくなるほどせん断引張強度が向上するものの、接合面積が大きくなった際には球面φ12mmの方が球面φ10mmよりもせん断引張強度が大きくなっている。写真 7 に球面φ10mm、接合面積 22mm²（ツール押込量 1.95mm）の場合と球面φ12mm、接合面積 24mm²（ツール押込量 1.95mm）の場合の接合界面の SEM 写真を示す。接合界面の化合物層は両者 10 μm 程度の厚さであることが分かる。一方、写真 5 及び写真 6 に示したように、破断位置は球面φ10mmでは接合界面のみであるのに対し、球面φ12mmでは一部アルミ部をクラックが進行している。この結果と、前述の球面φ12mmの方が接合面積大の場合にせん断引張強度が増すことに何らかの因果関係があるとも考えられる。この理由については現在のところ不明であり、今後、更なる接合界面の解析が必要である。

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アルミニウム合金板（A5052；1mm 厚）、冷間圧延鋼板（SPCC；0.6mm 厚）と冷間圧延鋼板（SPCC；1mm 厚）の異材 3 枚重ね点接合に適用し、ツール押込量及び球面径をパラメータとして、せん断引張強度を評価し、以下の結論を得た。

- 1) 球面φ10mmでは、回転数 1500rpm、接合時間 2.5 秒、ツール押込量 1.95mm でせん断引張強度 2.47kN を達成した。
- 2) 球面φ12mmでは、回転数 1500rpm、接合時間 2.5 秒、ツール押込量 1.95mm でせん断引張試験 3.85kN を達成した。
- 3) 球面φ10mm、球面φ12mmの場合ともに、せん断引張試験時の破断位置はアルミニウム合金と鋼の接合界面近傍であり、ツール押込量が大きくなるに従い、アルミ部に形成される鋼の突起が大きくなり、アンカー効果がより大きくなることによって接合強度が上昇する傾向にある。

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：豊橋技術大学未来ビ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) 庄司庸兵ほか：マツダ技報, **24**, 90 (2006).
- 11) 田中晃二, 熊谷正樹, 吉田英雄：軽金属, **56**(6), 317 (2006).
- 12) 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.
- 13) 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, **24**, 1 (2011).
- 14) 大石郁, 坂村勝, 竹保義博：特願 2011-033676 (2011).