

6 摩擦アンカー接合によるマグネシウム合金と鋼の異種金属接合

大石 郁, 坂村 勝*, 府山 伸行, 寺山 朗, 森下 勇樹

Dissimilar Spot Joining of Mg Alloy and Steel sheets by Friction anchor welding

OHISHI Kaoru, SAKAMURA Masaru*, FUYAMA Nobuyuki, TERAYAMA Akira and MORISHITA Yuki

Recently dissimilar metal welding has attracted much attention as a significant technology of vehicle weight saving. And the light metal like Al alloy and Mg alloy is employed for vehicle weight saving. However, dissimilar welding of Al alloy and steel is necessary method for low mechanical property of the light metal. Reinforcement by steel is necessary for low mechanical property of the light metal. So the dissimilar welding of light metal and steel is important method. One of the authors has developed the friction anchor joining for dissimilar welding. In this work, Mechanical property of dissimilar friction stir welding of Mg alloy and steel has been investigated from plunge depth and Cross-sectional images of the specimens.

Projection of stirring steel was enlarged by increasing of plunge depth. And sufficient strength of dissimilar lap joint was obtained by this joining process, the tensile shear strength was 2.0kN/point and the cross tensile strength was 1.0kN/point. It was suggested that stable mechanical property of this joining process was obtained by measurement of plunge depth, that is, control of projection.

キーワード：異種金属接合，摩擦アンカー接合，マグネシウム合金 鋼板

1 結 言

近年，自動車業界では燃費向上を目的とした自動車の軽量化(マルチマテリアル化)が図られており，アルミ化や樹脂化の研究が盛んに実施されている。金属材料で最も軽いマグネシウム合金も同様に軽量化材料として期待されている。そして，これら軽金属と鋼板を接合する異種金属の接合方法として摩擦攪拌接合(FSW)¹⁾や摩擦攪拌点接合(FSSW)が注目を集めており，2012年発売のホンダ・アコード(ガソリン車)やマツダ・ロードスターにこれら接合技術が適用されている²⁾。またアルミニウム合金同士の接合ではあるがトヨタ・プリウスなどにおいても摩擦攪拌点接合技術が適用されてきている。このように従来鉄道車両^{3,4)}が中心であった摩擦攪拌接合技術が自動車業界においても普及しつつある状況である。

これら市場のニーズに対応して，著者らはアルミニウム合金と鋼の異種金属接合法として摩擦アンカー接合^{5,6)}を考案した。これ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させ，その突起部のアンカー効果により接合する方法である。本研究では，アルミニウム合金/鋼で培った摩擦アンカー接合技術をマグネシウム合金(AZ31)と鋼板(SPCC)の異種金属接合に応用し，各接合因子が与える機械的性質への影響や接合時の挙動を調査した。

2 実験方法

本研究で用いた汎用フライス盤および接合実験の概略図を図1に示す。まず汎用フライス盤の切削ツール設置箇所にはφ12.7mmセラミック球を鋼板製のホルダー部に焼き嵌めし，固定した接合ツールをセットした。この際，球面はホルダー先端部から約5mm突出させた。

次に，エアシリンダ上に固定された基板上に，上板にマグネシウム合金(AZ31, t1.0mm)，下板に鋼板(SPCC, t1.0mm)を重ねて押え板で固定した後，回転する接合ツールを所定位置まで押し込み接合した。本接合ツールには一般的なFSSW接合ツールのホルダー部はなく，セラミック球のみを試験片に押し込み異種金属接合した。その際，押し込む圧力は最大12kN，接合時間は2.5sec，接合ツールの回転速度は1500rpm，接合ツールの押し込み深さは約1.1~1.9mmとした。

また鋼板と裏当て板の間に図1に示す位置にK熱電対を，裏当て板とエアシリンダの間に圧力センサーをセットして，押し込み深さ1.8mmの条件での接合時の温度および圧力の変化を測定した。得られた接合材については，JIS規格に従ってせん断引張試験および十字引張試験を行い，接合断面の観察を光学顕微鏡やSEM-EDX装置等を用いて実施した。

*広島県立総合技術研究所 東部工業技術センター



図1 実験に用いた汎用フライス盤（上）および実験の概要図（下）。

3 実験結果及び考察

3.1 接合時の荷重および温度変化

図2に接合時の接合ツールの押し込み深さと圧力、各位置での温度変化を示す。(ステップ1) まず、回転する接合ツールが上板のマグネシウム合金内を攪拌し、押し込まれる。(ステップ2) 次に、接合時間 約 0.4sec で押し込み深さが 1.0mm、すなわち接合ツールが鋼に接触することで押し込み深

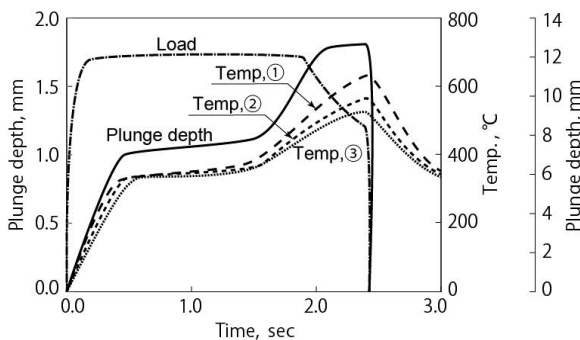


図2 接合時の温度、垂直圧力、接合ツール位置の関係

さは一旦停止状態となる。(ステップ3) そして、図1の①地点での温度が約 400°Cを超え、鋼が金属流動し易い温度になると再び接合ツールが押し込まれ、約 2.0sec で設定押し込み深さ 1.8mm 付近まで到達した。(ステップ4) 垂直圧力は減少したが、①地点の温度は接合ツールが離れるまで上昇し、AZ31の融点以上の約 650°Cまで達することがわかった。

3.2 断面観察

図3に接合ツールの押し込み深さ1.8mmにおける接合部の断面写真を示す。また図4に接合ツールの押し込み深さPd1.2mm, 1.6mm, 1.8mm及び1.9mmにおける接合部近傍の断面写真を示す。この写真より、これまでのアルミニウム合金/鋼板の摩擦アンカー接合と同様に下板の鋼からなる突起部が上板のマグネシウム合金側に形成されることがわかった。また、接合ツールの押し込み深さが増加するに従って、鋼の突起が大きくなっていくことがわかった。

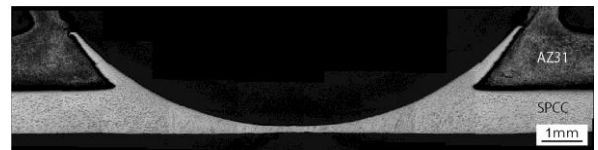


図3 押し込み深さ 1.8mm における接合部の断面状態

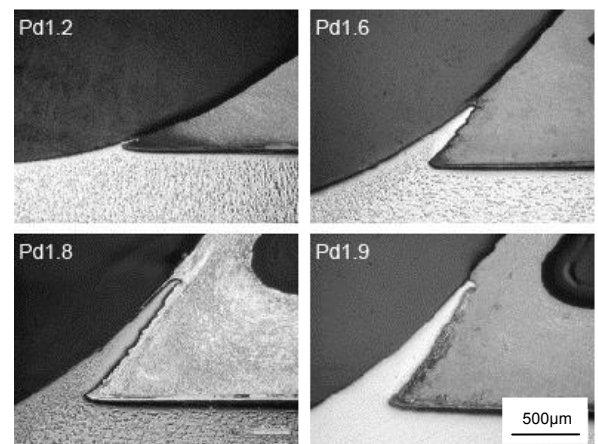


図4 各押し込み深さにおける接合断面

続いて図5に押し込み深さ1.8mmの突起部の界面について観察した結果を示す。笠井らの研究発表では、マグネシウム合金と鋼の接合において、界面にマグネシウム合金内に含まれるアルミや亜鉛の金属間化合物が形成され、接合強度に影響を及ぼすことが報告されている⁹⁾が、今回の観察に

においては、鋼からなる突起部と上板のマグネシウムの界面には金属間化合物は確認されなかった。図2の結果と併せて推察すると、摩擦アンカー接合は他の摩擦攪拌点接合と比較して摩擦熱が高く、一部の接合地点ではマグネシウム合金の融点以上となる。その為、界面の熔融したマグネシウム合金は回転する接合ツールの攪拌力により、界面の外側へ弾きだされ、新生面同士が接合したものと考えられる。また、突起によって接合強度を維持しているため、界面の金属間化合物が無くても高い接合強度を保持できることがわかった。

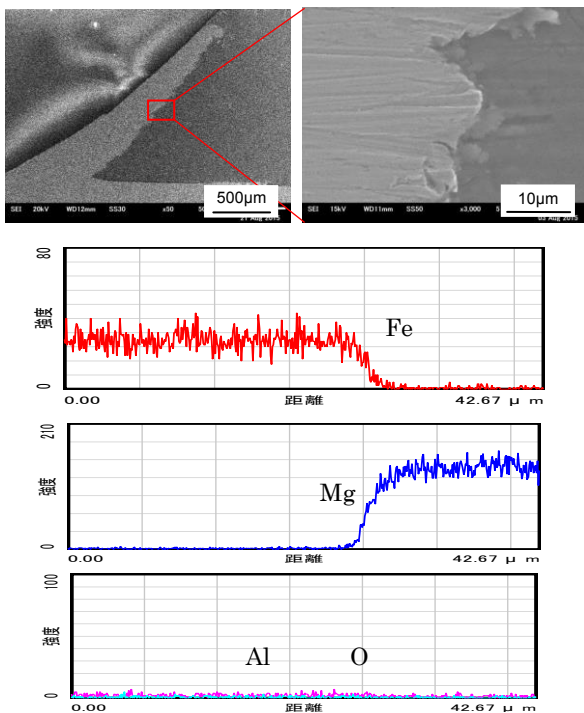


図5 押し込み深さ 1.8mm の試料における接合界面の元素状態

次に、接合ツールの押し込み深さ 1.8mm におけるせん断引張試験後の接合断面を図6に示す。図6より、せん断引張試験時において接合部（突起部）に荷重が加わった際、突起部には剥離する力が加わる側（図6.c）と圧縮する力が加わる側（図6.b）が発生することがわかった。そして剥離する右側の突起部では、剥離する突起部にて初期クラックが発生し、その後クラックは突起部周辺の接合界面に沿って進行することがわかった。そして剥離側で発生した初期クラックは、その後全周に進展することがわかった。一方、左側の突起部では、圧縮方向の力が加わることで、突起部が立つこと

がわかった。このような現象は押し込み深さが変わり、突起部の大きさが変わっても同じ傾向にあった。

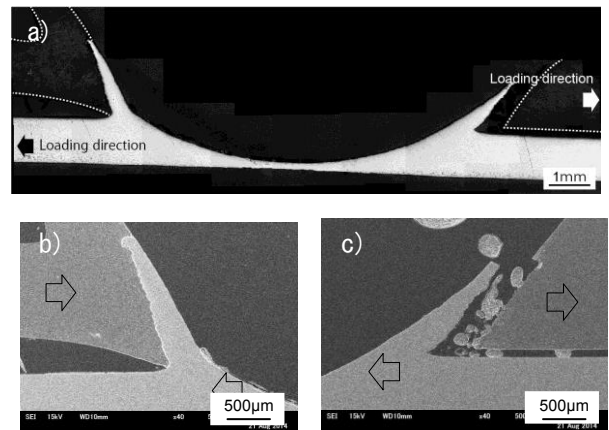


図6 せん断引張試験後の接合部断面観察（押し込み深さ 1.8mm）

続いて、十字引張試験後の接合断面を図7に示す。十字引張試験時においては、全ての突起部にて同じ方向に力が加わることで、どの箇所においても突起部が立つことがわかった。また、破断後の接合界面の様子をSEM-EDXを用いてマッピングした図8の結果からクラックは突起部周辺の界面および界面付近のマグネシウム合金内に沿って進行することがわかった。

最後に図9に各押し込み深さとせん断引張強度、十字引張強度の相関を示す。押し込み深さの増加とともにせん断および十字引張強度は増加し、押し込み深さ約 1.7mm 以上では、せん断引張強度 2.0kN 以上、十字引張強度 1.0kN 以上となった。さらに押し込み深さを増やすことでせん断引張強度は 2.9kN、十字引張強度は 1.6kN に達した。

突起部は球面ツールが下板の鋼に押し込み、金属流動させた量に比例して大きくなることが考えられる。形成された突起部が大きくなれば、せん断および十字引張試験時の負荷荷重への抵抗力も相対的に高くなり、各接合強度も増加したものと考えられる。



図7 十字引張試験後の接合試料断面状態（押し込み深さ 1.8mm）

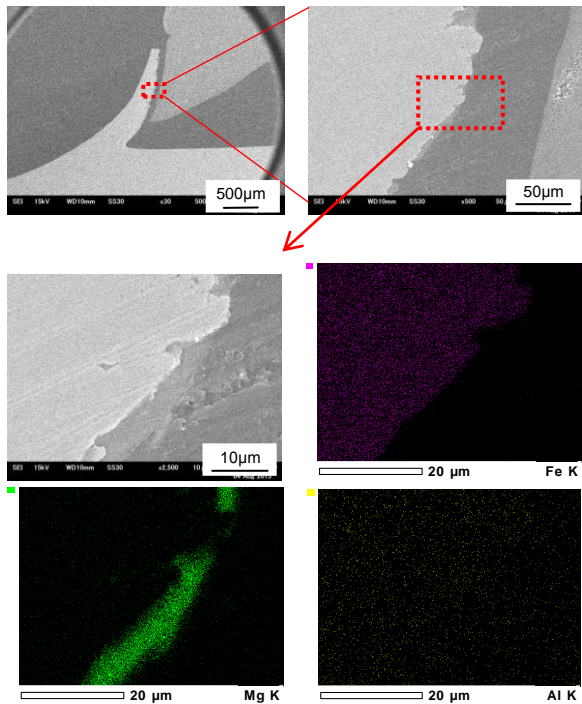


図8 SEM-EDXによる十字引張試験後の接合界面のマッピング状況

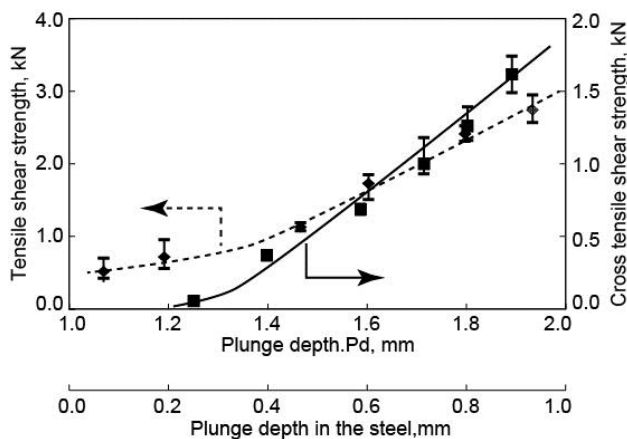


図9 押し込み深さと接合強度との関係

4 結 言

回転する接合ツール（先端はΦ12.7mmの窒化ケイ素球）をAZ31/SPCCの重ね継ぎ手に押し込むことによって以下の結論が得られた。

- ・摩擦アンカー接合時の温度が約400℃以上となり、下板鋼板が軟化することで、接合ツールを押し込め、突起部が形成できることがわかった。
- ・接合ツールの押し込み深さの増加に従って、上板に形成される突起部も大きくなる。
- ・突起部の大きさに比例して、せん断及び十字

引張強度も増加する。

- ・目標値である接合時間2.5secで押し込み深さ約1.7mm以上の条件下で、せん断引張強度2.0kN（最大2.9kN）、十字引張強度1.0kN（最大1.6kN）を達成できることがわかった。

文 献

- 1) W. M. Thomas, . : International Patent Application PCT/GB92/02203 and GB Patent Application 9125978.8, UK Patent Office, London, December 6, 1991.
- 2) 大石他：まてりあ Vol.53 (2014) 12
- 3) 摩擦攪拌接合—FSWのすべて—, 溶接学会編, 産報出版 (2006) .
- 4) 岡村他：軽金属 Vol.50 (2000) 4, p166-171.
- 5) 大石他：溶接学会論文集, Vol.32(2014)1
- 6) 坂村他：軽金属溶接 Vol.52 (2014) 12
- 7) 坂村他：溶接学会論文集 Vol.33 (2015) 2
- 8) 坂村他：溶接学会論文集 Vol.34 (2016) 1
- 9) 笠井他：溶接学会全国大会講演概要 Vol.95 (2014)

謝 辞

本研究は(独)科学技術振興機構による産学共創基礎基盤研究「ヘテロ構造制御」の支援および大阪大学 接合科学研究所共同研究員制度を利用して行った。ここに謝意を表する。