

# 摩擦攪拌接合の異種材接合への応用 (第3報)

水谷 予志生、小寺 将也

## Application of friction stir welding to dissimilar material joining (III)

Yoshiki Mizutani and Masaya Kodera

摩擦攪拌接合 (FSW) による異種材接合として、それぞれ板厚 3mm のアルミニウム展伸材 (A6061-T6) と黄銅板 (C2801P) または純銅材 (タフピッチ銅: C1100P) との突き合わせ接合を行った。既報<sup>1,2)</sup>で取り組んだアルミニウム展伸材と鋼材またはステンレス材との FSW 異種材接合同様の条件で接合実験を行ったところ、十分な接合強度は得られなかった。また、銅合金との FSW を行った場合、ハイス鋼製 FSW ツールに銅合金が凝着してしまう問題が起こった。銅と鉄との反応性が良すぎるのが原因と考えられ、銅との反応性の悪い材質で FSW ツールを作製するのが良いのではないかと考えられる。

### 1. はじめに

自動車等輸送機器の軽量化等のため、場所によって最適な素材を使い分けるマルチマテリアル化が進んでいる。これにより、素材接合の新たな組み合わせの要望が増えており、種々の手法が開発・実用化されている。その中でも特に使用量が増加しているアルミニウム合金との異種材接合が注目されており、構造材として多く使われている鉄鋼材料との異種材接合の要望が高い。しかし、異種材料を一般的な溶融溶接法で接合しようとした場合、脆い金属間化合物が生成しやすいという問題がある。これに対し、固相接合法である摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding: 以降 FSW)<sup>3,4)</sup>では、金属間化合物層の厚みを非常に薄く制御することが可能であり、アルミニウム合金とマグネシウム合金や鉄、銅、チタンといった異種材料との接合<sup>5-16)</sup>や、鉄あるいは銅同士のような高融点材料の接合<sup>17-20)</sup>といった研究開発も進んでいる。そこで、当所でもアルミニウム合金と、鉄鋼材料またはステンレス材との FSW による異種材接合に着目し、厚さ 3mm の板同士の付き合わせ接合に取り組んできた<sup>1,2)</sup>。その結果、ツールショルダー部の侵入はさせない方がいいこと、鉄よりステンレスの方が良好な接合が得られる加工条件範囲が狭い傾向であることが分かった。

一方、自動車の HV・EV 化が進むことで銅の使用量も増えている。このため、銅合金との接合の要望も高まる可能性がある。しかし、アルミと鉄との異種材接合に関する研究例は多いが、銅合金との研究例は少ない。そこで、本研究ではアルミニウム合金と黄銅あるいは純銅との FSW 異種材接合に取り組むこととした。

### 2. 実験方法

本実験では、それぞれ 50mm×250mm×3mm のアルミニウム展伸材 (A6061-T6)、黄銅板材 (C2801P) または純銅板材 (タフピッチ銅: C1100P) を接合用試料とした。

FSW 方法は既報<sup>1,2)</sup>と同様に、ツール進行方向の右側 (RS 側) にアルミニウムを、左側 (AS 側) には黄銅または純銅を配して行った。FSW ツールにはハイス鋼を用いており、φ12mm のショルダー先端に M5 の逆ネジ状プローブ (長さ 2.6mm) が付いた形状となっている。ツール侵入深さはプローブ長さと同じ 2.6mm とした。

ツール挿入位置は既報<sup>1,2)</sup>と同様で、突き合わせ面よりアルミ側とし、プローブ側面が約 0.2mm だけ黄銅板あるいは純銅板の側面に食い込むように調整している。ツールの回転数と移動速度を変化させ、接合強度への影響を調査した。接合後の試料からワイヤーカットを用いて引張試験片を作製し、万能試験機 (Instron Corporation 製、5985 型) にて引張強度を測定した。また、接合断面のマクロ・ミクロ組織観察も行った。さらに、接合に用いたハイス鋼ツールの断面観察と SEM-EDS (エネルギー分散 X 線分光法) による元素分析も行った。

### 3. 結果及び考察

既報<sup>1,2)</sup>と同様に 8 本の引張試験片を切り出し、万能試験機にて引張試験を行い、FSW の開始点を原点とした引張試験片の採取位置による引張強度をプロットした。図 1 に、アルミと黄銅の組み合わせで FSW した場合の引張強度について示す。これらの接合実験を一番最初に行った回転数 800rpm、移動速度 100mm/min で FSW した試料の最初だけ、4kN と高い値が得られているが、その他の条件では約 2kN 以下と非常に低い値しか得られていない。アルミ同士を FSW した場合には 8kN 程度の強度が得られていることから、良くて 1/2 程度、悪いと 1/8~1/4 程度しか得られなかった。また、回転数を 1200rpm にあげた場合には、100~500mm/min のいずれの移動速度でも、FSW 後簡単に割れてしまうような接合しかできなかった。

一方、純銅との FSW ではアルミ側に大きな溝欠陥が

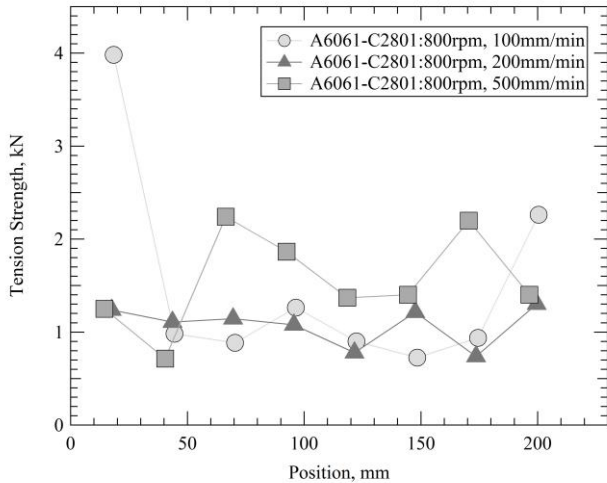


図1 黄銅-アルミのFSW後の引張試験片採取位置と引張強度の関係

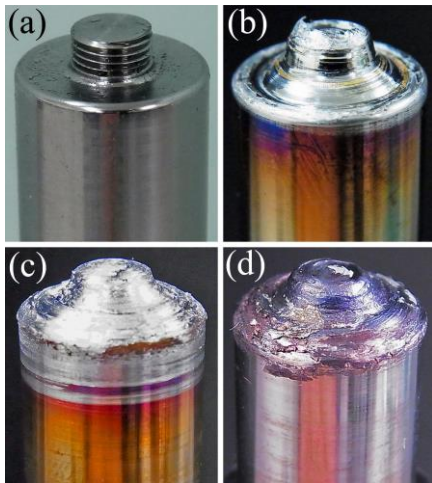


図2 ハイス鋼FSWツールの外観  
(a)未使用, (b)黄銅とのFSWに使用後,  
(c)黄銅および純銅とのFSWに使用後,  
(d)ツール(c)を10%水酸化ナトリウム水溶液に浸漬後

生じてしまった。また、FSW後のハイス鋼製プローブ（黄銅で使用後さらに純銅でも使用したもの）には図2(c)のようにアルミの凝着が確認され、図2(a)の使用前の状態からプローブが大きく太っているのが分かる。この使用後のツールのネジ形状を確認するため、凝着しているアルミを除去しようと10%水酸化ナトリウム水溶液に浸漬したが、図2(d)のようにほとんど形状は変わらず、プローブ形状を確認できなかった。この表面が褐色を呈していることから、内部の大部分は銅が凝着しており、最表面にアルミが存在していたものと考えられる。同様に、黄銅とのFSWに何度か使用したハイス鋼ツールでも、図2(b)のように黄銅あるいはアルミによるものと考えられる凝着が起こっていた。このような状態では定常的に適正な接合が行えないため、凝着しにくいツールが望ましいと考えられる。

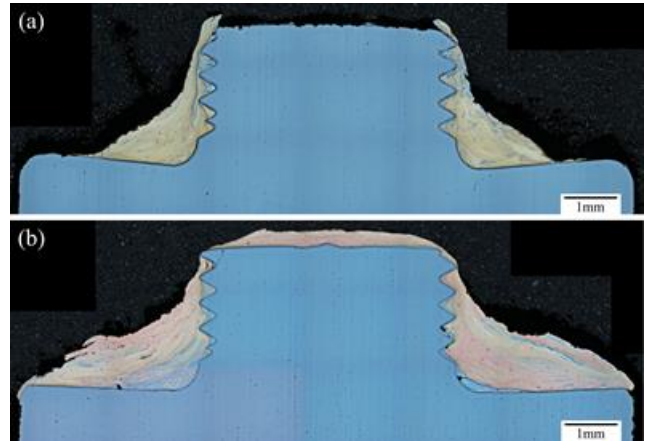


図3 使用後ツールの断面図  
(a)図2(b)のツール, (b)図2(d)のツール

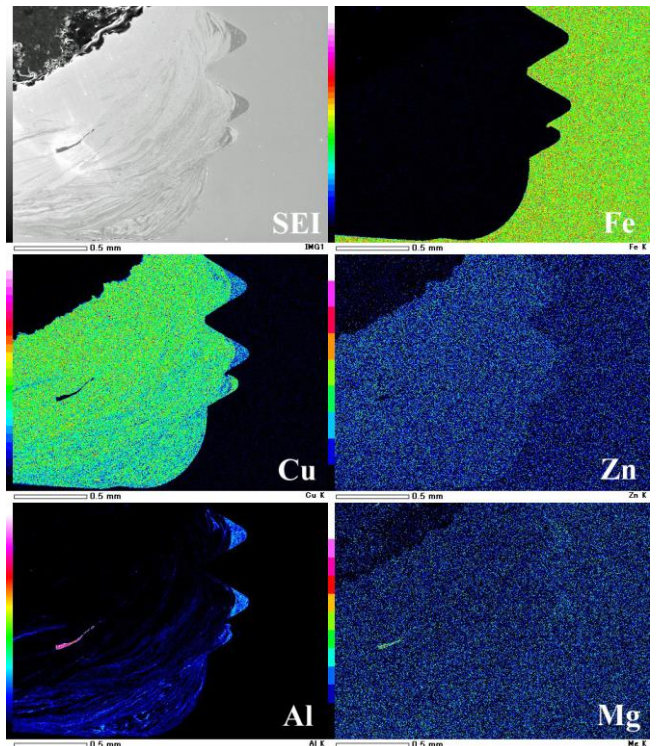


図4 図3(b)のツール断面の元素マッピング

図3に、図2(b)と(d)のFSWツールの断面図マクロ写真を示す。図3(a)のツールは黄銅に対してのみ、図3(b)は黄銅と純銅の両方で使用したものである。いずれも、黄銅あるいは純銅とアルミと思われる、それぞれ黄色・赤茶色・灰色の物質が層状に付着・堆積していた。また、いずれもネジ形状はきれいに残っているのが確認され、摩耗や欠損はほとんど起こっていないと考えられる。一部、最先端側のネジ山で、形状の歪みや、谷部からのクラックの発生が確認できた。

これらのツール断面について、鉄・アルミ・銅等による化合物が形成されていないか確認するため、EDSによる元素マッピングの結果を図4に示す。この図は、黄銅と純銅の両方で使用した図3(b)のものである。ネジ

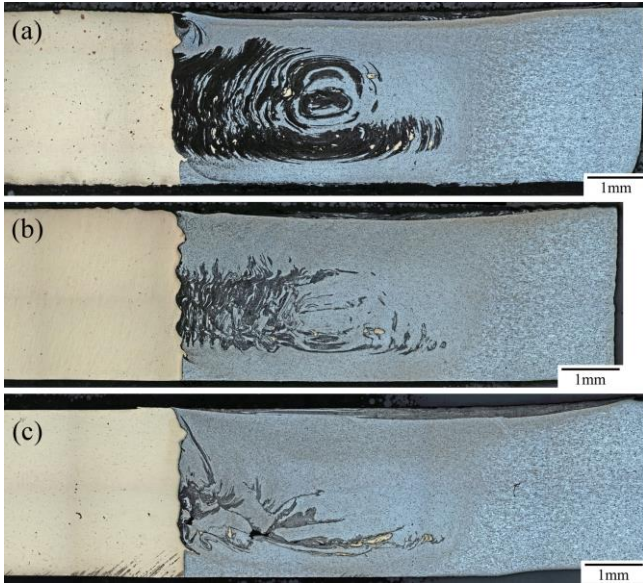


図5 黄銅-アルミのFSW後の断面マクロ組織  
移動速度：(a)100mm/min, (b)200mm/min, (c)500mm/min  
回転数：800rpm

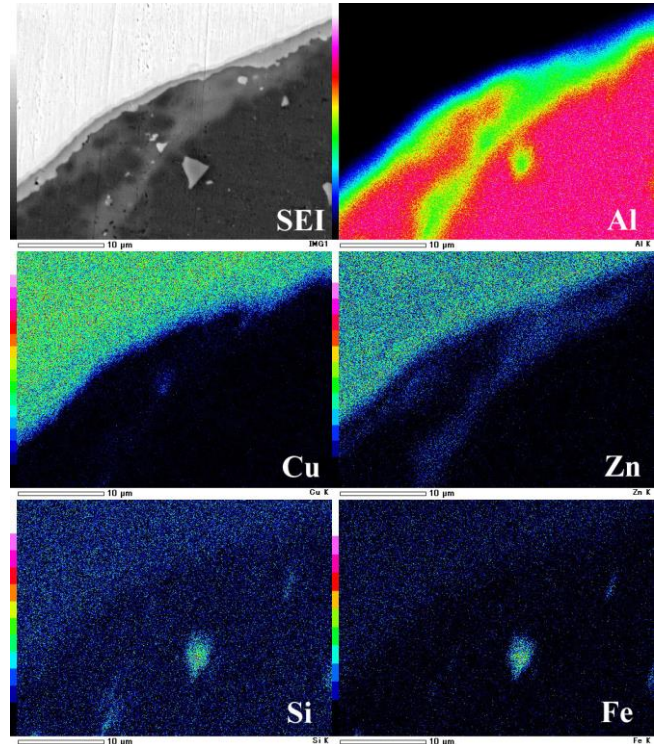


図7 図5(a)の黄銅-アルミ境界部の元素マッピング

れた黄銅片がアルミ中に分散しているのが確認された。また、アルミ中にエッチングで黒く変色したことで、FSW特有の攪拌の痕跡（オニオンリング）が明瞭に見られている。これを見ると、移動速度が100から500mm/minに増加するにつれ、攪拌の渦が少なくなっているのが分かる。また、最表面直下にも黒く変色した領域が広がっていた。さらに、移動速度500mm/minの試料（図5(c)）では、アルミ部に欠陥（空洞）が存在していた。

図6に図5(a)の移動速度100mm/minでFSWした試料断面のマイクロ組織を示す。図6(a)はアルミ（A6061-T6）素材部のマイクロ組織を示す。図6(b)は攪拌部中心付近であり、攪拌による塑性流動の痕跡と黄銅片が分散しているのが確認できる。また、アルミ素地のマイクロ組織は図6(a)と異なり、非常に微細になっていた。図6(c)はアルミと黄銅の境界部の、図6(d)は表面近傍のマイクロ組織を示す。いずれも、黒く変色した領域と白い領域が層状に並んでいる。黒く変色した部分は、黄銅との合金化が進んだ領域か、攪拌による強加工で結晶粒が微細化した領域ではないかと考えられる。

異種材接合には金属間化合物層の厚みが重要であるため、アルミと黄銅の境界部をSEMにて観察し、EDSにて元素マッピングを行った結果を図7に示す。測定した試料は図5(a)のものであり、マクロ組織写真の境界部で黄銅が凸になった箇所が測定点である。図中左上に黄銅成分が、右下にアルミの成分が検出され、その境界に1μm程度の厚みの金属間化合物層が確認できた。また、アルミ中に、素材に含まれるAl-Fe-Si系化合物の他に、

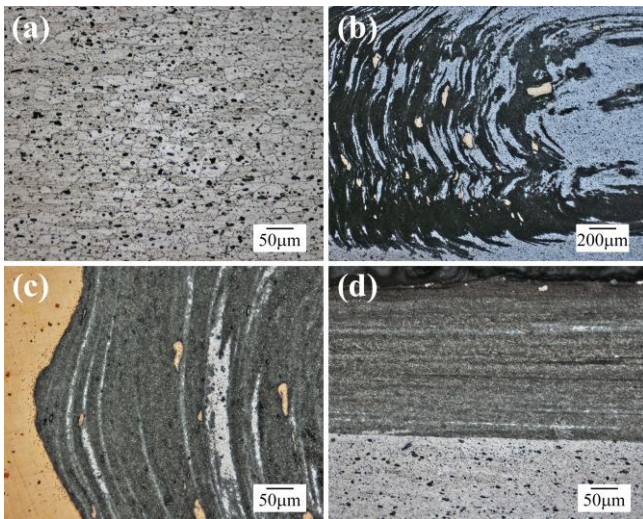


図6 図5(a)の断面のマイクロ組織  
(a)アルミ素材部, (b)攪拌部中心付近,  
(c)黄銅-アルミ境界部, (d)アルミ攪拌部表面近傍

谷部やツールショルダー上に、アルミが多く堆積している箇所が見られた。また、ツールの回転に伴い、アルミと銅が層状に堆積しているのが確認できた。一方、ツール材質の鉄が銅・アルミ側に混入したり、ツール側に銅・アルミ等が拡散している痕跡は見られなかった。

図1で使用したアルミと黄銅をFSWした場合の断面マクロ組織を図5に示す。いずれも、全接合長の中心付近の断面であり、ツールの移動方向は紙面手前から奥となっている。アルミ（A6061）部を5%HF水溶液でエッチングし、光学顕微鏡の明視野像で撮像した。100～500mm/minのいずれの移動速度の場合でも、左側（AS側）の黄銅がプローブネジ部により凸凹に変形し、削ら

Zn が筋状に分布しているのも観察された。純銅 (C1100) とアルミ (A5052) の重ね FSW に対する研究例<sup>10)</sup>であるが、銅とアルミの金属間化合物層の厚みが 1 $\mu$ m を越えるた場合に破断荷重が急激に低下したことが報告されており、金属間化合物層はできるだけ薄くするのが望ましいとされている。本研究で十分な強度が得られなかったのは、金属間化合物層が厚すぎたためと考えられる。また、本研究で用いたハイス鋼製ツールでは、図2のようにアルミと銅の凝着が起こってしまうのが実用上の大きな問題と思われる。銅と鉄との反応性が良すぎるのが一因と考えられ、銅との反応性の悪い材質で FSW ツールを作製するのが良いのではないかと考えられる。

#### 4. まとめ

FSW による異種材接合として、板厚 3mm のアルミニウム展伸材 (A6061-T6) と黄銅 (C2801P) または純銅 (タフピッチ銅 : C1100P) との突き合わせ接合を行った。その結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 黄銅は回転数 800rpm で接合はできたものの、強度は非常に低く、アルミ同士の 1/8~1/4 程度しか得られなかった。回転数を 1200rpm にあげた場合、および純銅の場合には接合ができなかった。
- 2) 黄銅とアルミの界面に、1 $\mu$ m 程度の厚みの金属間化合物層が存在していた。十分な強度が得られなかったのは、この厚みが厚すぎることが原因と考えられる。接合条件を精査し、金属間化合物層が 1 $\mu$ m 以下になるような条件を見いだすのが重要と考えられる。
- 3) FSW に用いたハイス鋼製ツールに銅・アルミが凝着してしまっており、良好な接合が行えない原因ではないかと考えられる。銅と鉄の反応性が良すぎるのが一因と考えられ、銅との反応性の悪い材質で

FSW ツールを作製するのが良いのではないかと考えられる。

#### 【参考文献】

- 1) 水谷ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告, 3, pp24-27, 2015
- 2) 水谷ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告, 4, pp22-26, 2016
- 3) 佐藤ら, まてりあ, 42, pp214-220, 2003
- 4) 藤井, 金属, 83, pp5-10, 2013
- 5) 福本ら, 溶接学会論文集, 22, pp309-314, 2004
- 6) 安井ら, 溶接学会論文集, 23, pp469-475, 2005
- 7) 時末ら, FSW の基礎と応用, 日刊工業新聞社, pp40-44, 2005
- 8) 宮川ら, 溶接学会論文集, 26, pp42-47, 2008
- 9) 安井, 溶接技術, 62, pp51-54, 2014
- 10) 青沼ら, 塑性と加工, 53, pp869-873, 2012
- 11) P.Liu, et. al, Mater., Lett., 62, pp4106-4108, 2008
- 12) A.Esmaeili, et. al, Mater. Sci. Eng. A, 528, pp7093-7102, 2011
- 13) Q-Z.Zhang, et. al, Trans. Nonferrous Met. China, 25, pp1779-1786, 2015
- 14) M.F.X.Muthu, et. al, J. Mater. Proc. Tech., 217, pp105-113, 2015
- 15) P.K.Sahu, et. al, J. Mater. Proc. Tech., 235, pp55-67, 2016
- 16) M.P.Mubiayi, et. al, Trans. Nonferrous Met. China, 26, pp1852-1862, 2016
- 17) 中田, 溶接学会誌, 74, pp148-151, 2005
- 18) R.Ueji, et. al, Mater. Sci. Eng. A, 423, pp324-330, 2006
- 19) 松下ら, 溶接学会論文集, 27, pp360-370, 2009
- 20) Y.D.Chung, et. al, Scripta Mater., 63, pp223-226, 2010