

研究論文

摩擦攪拌接合によるアルミニウム合金突合せ接合継手の特性評価

徳田宙瑛*1、横山博*2、清水彰子*3、津本宏樹*2、
永縄勇人*2、児玉英也*4、杉本貴紀*5

Evaluation of Properties of Friction Stir Butt Welded Aluminum Alloy

Hiroaki TOKUDA*1, Hiroshi YOKOYAMA*2, Akiko SHIMIZU*3, Hiroki TSUMOTO*2,
Hayato NAGANAWA*2, Hideya KODAMA*4, and Takanori SUGIMOTO*5

Industrial Research Center *1~*4 Research Support Department*5

2種類のアルミニウム合金(A5052-O、A2024-T3)を組み合わせて、摩擦攪拌接合により突合せ接合を実施した。ツール傾斜角、ツール回転速度、接合速度、合金板の配置を変えた接合実験を行い、得られた接合継手について引張試験、ビッカース硬さ試験による機械的特性を評価した。あわせて、バリ、表面欠陥等の外観検査を実施した。合金板の配置を変えることで、引張強さ、外観に問題のない適正接合条件範囲が大きく変わる結果となった。また外観で問題がないものの引張強さが劣る試験片をX線CTで分析したところ、多数の欠陥を確認でき、内部欠陥の解析に有効であることを確認した。

1. はじめに

摩擦攪拌接合は、1991年にイギリスの溶接技術研究所(TWI)で発明された固相接合法の一つであり、棒状の工具を高速で回転させながら材料に挿入させ、材料を溶融させることなく摩擦熱を利用して接合する方法である。溶融接合と比べ変形が少なく、欠陥・割れ等が発生しにくいことから自動車、航空機等の分野で幅広く用いられることが期待されている。

また、環境問題への配慮から、輸送機器を中心に燃費向上を目的とした軽量化のためにアルミニウム合金等の軽金属材料の利用が増えており、今後もその流れが加速していくものと思われる。摩擦攪拌接合はこれらの金属の接合に有効な方法として注目されている²⁾。

接合の種類の一つである突合せ接合は2枚の板を重ねて接合する重ね接合とともに摩擦攪拌接合では代表的な接合の種類である。アルミニウム合金の突合せ接合に関する研究は、同種材による事例は多数報告があるが、異なる種類のアルミニウム合金に関する研究の報告は少ない。

本研究では、異種アルミニウム合金突合せ接合を行い、接合継手の機械的強度の評価および外観検査を実施した。

2. 実験方法

2.1 接合条件

摩擦攪拌接合は5軸摩擦攪拌接合装置(東海テクノ社

製)を使用した。接合条件を表1に示す。ツール挿入速度は10mm/minとした。

表1 接合条件

接合速度(mm/min)	200, 400, 600
ツール回転速度(rpm)	500, 1000, 1500, 2000
ツール傾斜角	2°, 4°
ツール挿入深さ	2.8mm

2.2 接合ツール

摩擦攪拌接合に用いたツールを図1に示す。ツールの材質はSKH56相当の高速度工具鋼でロックウェル硬さ67~69HRCになるように熱処理を施したものを使用した。ショルダー径はφ15mm、プローブはM5、ピッチは0.5mm、中心に向かって上がっていく逆テーパ型形状とした。

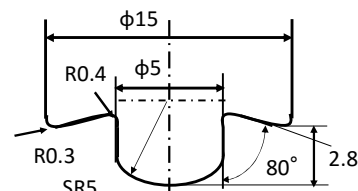


図1 摩擦攪拌接合に用いたツール

2.3 供試材

用いたアルミニウム合金は以下の2種類とした。

- ①A5052-O(焼きなまししたもの：以下A5052)
- ②A2024-T3(溶体化処理後冷間加工を行い自然時効させ

*1 産業技術センター 金属材料室 (現産業技術センター 総合技術支援・人材育成室) *2 産業技術センター 金属材料室 *3 産業技術センター 金属材料室 (現共同研究支援部 計測分析室) *4 産業技術センター 自動車・機械技術室 *5 共同研究支援部 計測分析室技術室

たもの：以下 A2024)³⁾

幅 45mm、長さ 190mm、板厚 3mm の供試材を並べて、摩擦攪拌接合装置により突合せ接合を行った。

板の配置は、工具の回転方向と接合する方向が同じ側(前進側)を AS(Advancing Side)、工具の回転方向と接合する方向が逆側(後退側)を RS(Retreating Side)とした。

2.4 接合継手の評価方法

接合継手はバリや表面欠陥等がないか目視で外観検査を行った。

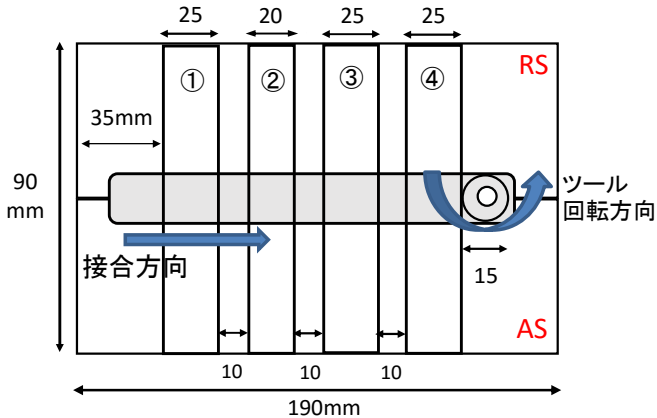


図2 接合継手の材料取りの場所、位置

図2に示す位置から切り出し、試料を作製した。試料①、③、④は JIS Z 3121(突合せ溶接継手の引張試験方法)に準ずる方法により機械的特性を評価した。引張試験は 5mm/min の速度で行った。試料②は接合部の断面組織の観察及び硬さ試験に用いた。接合部の断面組織は、接合部を切断して樹脂に埋め込み、バフにより鏡面仕上げを行った後、金属顕微鏡で観察した。腐食液にはフッ酸、硝酸、塩酸の混合液を用いた。接合断面の硬さは、マイクロビッカース硬さ試験計を用い、接合面方向及び深さ方向に等間隔で測定し、硬度分布を求めた。

3. 実験結果

3.1 引張強さ

ツール傾斜角が 2° のときのアルミニウム合金板の配置の違いによる引張強さの試験結果を図3、4に示す。図2に示す試料①、③、④の引張強度がいずれも JIS H 4000(アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条)の A5052 母材の強度である 170MPa を上回っている場合を灰色の円、いずれかが下回る場合を白の円と判定してまとめた。円の中の数値は試料①、③、④の引張強さの平均値(MPa)である。AS 側に A2024、RS 側に A5052 を配置したものが、引張強さが全体的に高い傾向を示した。これはアルミニウム合金が固有に持つ材料の押し出し性、高温での加工性のしやすさの違いによるものと考え

られる。

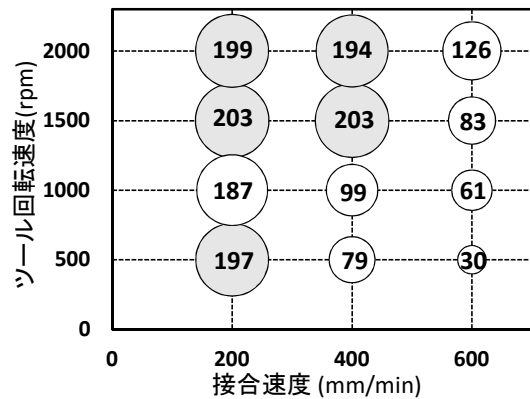


図3 引張強さ試験結果(AS:A5052、RS:A2024)

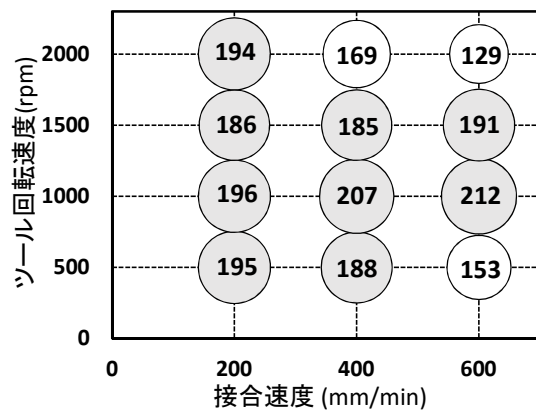


図4 引張強さ試験結果(AS:A2024、RS:A5052)

3.2 断面組織観察、ビッカース硬さ

ツール傾斜角 2°、接合速度 200mm/min、ツール回転速度 1000rpm、合金板の配置 AS:A2024、RS:A5052 における金属顕微鏡による断面組織観察、ビッカース硬さ試験の結果をそれぞれ図5、6に示す。

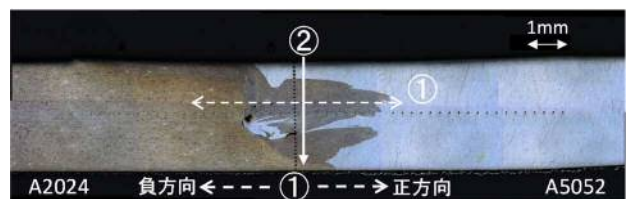
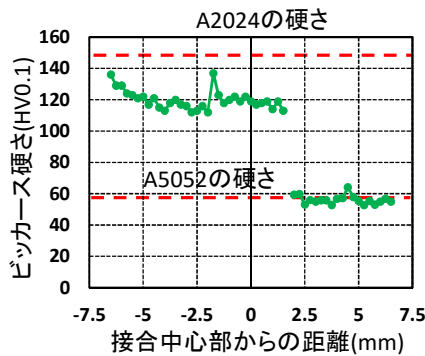


図5 断面組織観察結果

ビッカース硬さは図5に示す①接合面方向と②深さ方向についてそれぞれ測定した。接合面方向の硬さは A2024 の領域で接合中心に近いほど硬さは低下した。A2024 が析出強化の金属であり、摩擦熱により硬さが低下したと考えられる。ただし接合中心付近(接合中心から負方向に 2mm の位置)では硬さが一時的に上昇している。その領域に FSW 特有のたまねぎの断面の縞模様のようなものが現れ、結晶粒の微細化により、硬さが上

昇したものと考えられる。

①接合面方向



②深さ方向

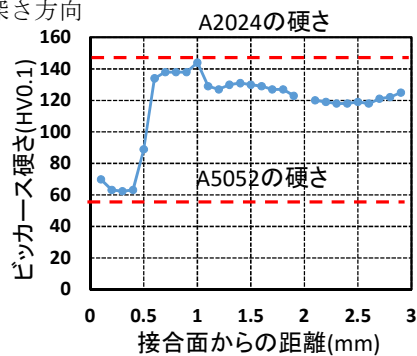


図6 ビッカース硬さ試験結果

また、深さ方向は、A2024 が攪拌されたことにより A5052 の領域に含まれている。

3.3 外観検査および X 線 CT による内部欠陥の検査

ツール傾斜角が 2° のときのアルミニウム合金板の配置の違いによる外観検査の結果を図 7、8 に示す。接合継手に目視で確認できる界面欠陥、表面欠陥、バリ等が全く発生していない場合を○(合格)、いずれかの欠陥が発生しているものを×(不合格)と判定した。

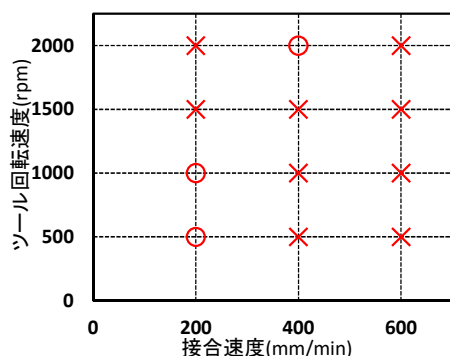


図7 外観検査結果(AS:A5052、RS:A2024)

図 7 において、AS:A5052、RS:A2024 の組み合わせでツール回転速度 1500rpm の場合、ツール傾斜角 2° 、外観検査は不合格と条件が同じにも関わらず、図 3 では

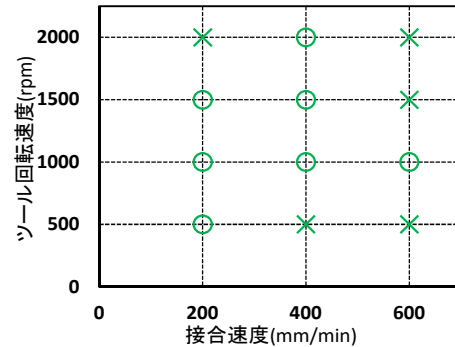


図8 外観検査結果(AS:A2024、RS:A5052)

引張強さは接合速度 200mm/min、600mm/min でそれぞれ 203MPa、83MPa と大きな差が見られた。

そこで X 線 CT(島津製作所製)により内部欠陥の有無を確認した。

外観写真を図 9 に、X 線 CT の内部欠陥の解析結果を図 10 にそれぞれ示す。外観写真の四角部が X 線 CT の測定領域である。

接合速度 200mm/min の試料は表面欠陥があるものの、図 10 で内部欠陥がほとんど見られず、引張強さは JIS H 4000 の基準を上回る結果となっている。一方、接合速度 600mm/min の試料は図 10 のようにトンネル状の内部欠陥が多数現れた。これが、引張試験時の破断の起点となり、引張強さが低くなったと考えられる。

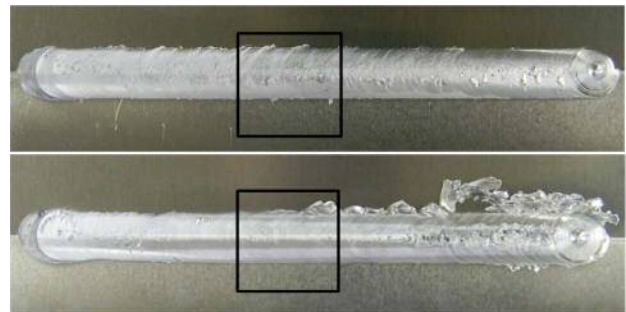


図9 外観写真(上:200mm/min 下:600mm/min)

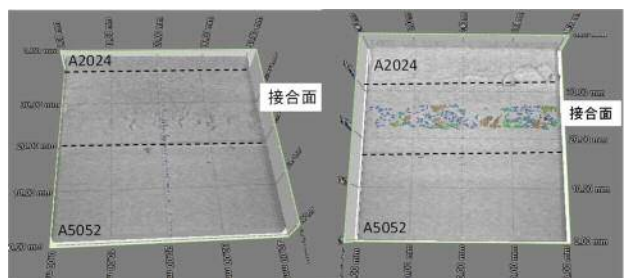


図10 X線CT解析結果
(左:200mm/min 右:600mm/min)

3.4 適正接合可能範囲の導出

引張強さおよび外観検査の結果から A5052 と A2024 の異種アルミニウム合金突合せ接合継手の外観に問題がなく、かつ JIS H 4000(アルミニウム及びアルミニウム

合金の板及び条)の A5052 の引張強さの基準を満たす適正接合可能範囲⁴⁾を求めた。

ツール傾斜角が 2° のときの結果を図 11、12 に、ツール傾斜角が 4° のときの結果を図 13、14 に示す。

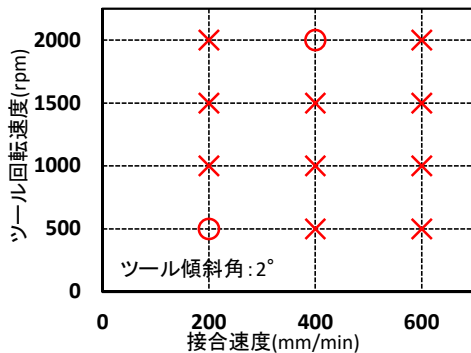


図 11 適正接合可能範囲(AS:A5052、RS:A2024)

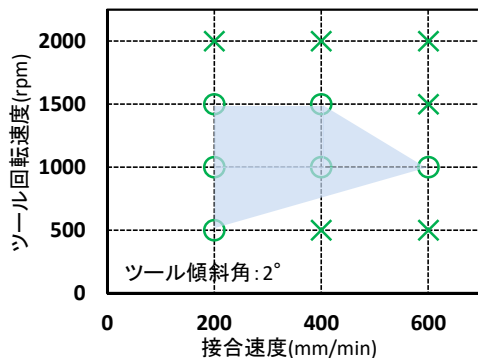


図 12 適正接合可能範囲(AS:A2024、RS:A5052)

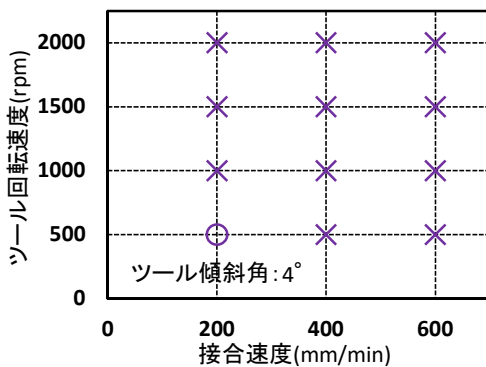


図 13 適正接合可能範囲(AS:A5052、RS:A2024)

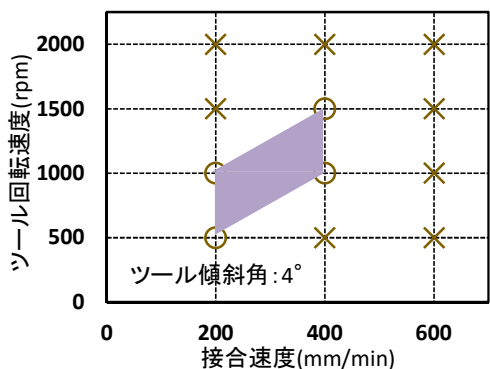


図 14 適正接合可能範囲(AS:A2024、RS:A5052)

図 11～図 14 から、どのツール傾斜角においても、アルミニウム合金板の配置により適正接合可能範囲は大きく変わることが明らかとなった。接合速度を 200mm/min とした場合にツール回転速度は 500rpm でアルミニウム合金板の配置に関係なく、適正な接合ができることを確認した。

また、ツール傾斜角を 2° と 4° で比較した場合、 2° の条件で適正接合範囲が広がることが明らかとなった。

ツールに傾斜をつけることで接合部の塑性流動が促進されるが、傾斜をつけすぎると、ツールやアルミニウム合金板にかかる圧力(押される力)が変化するため、結果、接合強度、外観にも影響を与えるものと考えられる⁵⁾。

4. 結び

A5052 と A2024 の 2 種類のアルミニウム合金を用いて突合せ接合を行い、接合継手を作製、評価を行ったところ、以下のことが明らかとなった。

- (1) ツール傾斜角、ツール回転速度、接合速度の条件が同じでも、合金板の配置を変えることで、引張強さ、外観検査の結果が大きく変わるため、適正接合範囲も大きく異なる結果となった。
- (2) 引張強さが JIS の A5052 の基準(170MPa)を満たしている場合、外観検査もバリや欠陥のない試料が多い傾向にある。
- (3) X 線 CT を用いることで外観検査では確認できない内部欠陥(トンネル状欠陥)を確認でき、外観検査で問題がなく、引張強度が低い場合の要因を考察するのに有効である。

文献

- 1) 大阪府立産業技術総合研究所テクニカルシート, No.9001
- 2) 荒深純一, 古市英樹, 加藤数良: 軽金属溶接, 52(12), 470(2014)
- 3) 社団法人軽金属協会: アルミニウムハンドブック, P6(1990)
- 4) 時末光: FSW の基礎と応用, P29(2005), 日刊工業新聞社
- 5) 時末光: FSW の基礎と応用, P19(2005), 日刊工業新聞社