

補助加熱した回転工具によるアルミニウム合金の摩擦攪拌接合

日大生産工(院) ○寺井 克 日大生産工 前田 将克
日大生産工 加藤 数良 日大生産工 野本 光輝

1. 緒言

摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding : FSW) はツールと素材の摩擦熱および塑性流動を利用した固相接合法である。FSW は材料に適した接合条件を用いることによって、多くの材料に適用できることが知られている。FSW の主要接合条件にはツール回転数と接合速度が挙げられる。これらは「摩擦発熱による熱の供給」と「素材の攪拌」という 2 つの仕事を行えるよう選定されるが、ツール単体がこれら 2 つの仕事を担当しているため、条件選定の自由度が低く、接合条件範囲の狭い材料も多い。そこで、摩擦熱以外の熱源を用いて熱の供給を行うことで、ツールから温度上昇の仕事を取り離すことができれば、ツール回転数および接合速度の自由な選定が可能になり、接合条件範囲の拡大が期待できる。

補助加熱の方法としては素材あるいはツール加熱の 2 つの方法が考えられる。本研究では、ツールの直下のみでの加熱が可能であり加熱された素材を即時に攪拌することが可能な、ツールの加熱を行う手法であるツール加熱型補助加熱 FSW (Tool heating FSW, TH-FSW) ¹⁾ を選択した。

本研究では、アルミニウム合金中でも接合条件範囲の広い 1050 アルミニウムおよび接合条件範囲の狭い 2024 アルミニウム合金を用い、ツール加熱を行いつつ突合せ摩擦攪拌接合を行い、接合条件範囲および材質による加熱効果の差異、得られた継手の性質について比較、検討した。

2. 供試材および実験方法

供試材には板厚 1 mm の 1050-H24 アルミニウム薄板 (200^t×50^w, 以後 A1050 と称す) および 2024-T3 アルミニウム合金薄板 (200^t×50^w, 以後 A2024 と称す) を、特別な前処理は行わずに接合に供した。供試材の機械的性質を Table 1 に示す。接合には全自動摩擦攪拌接合機を使用し、予備実験により選定した Table 2 に示す条件を組合せ、ルート間隙なしの I 型突合せ接合とした。補助加熱ありの場合の接合前のツール設定温度は 673 K とし、補助加熱なしの場合は 298 K とした。ツールは SKD61 をショルダー径 9 mm, ショルダー角 4°, プロブ径および長さを 3 mm, 0.7 mm に機械加工したものをを用いた。

加熱方法の概略を Fig.1 に示す。ニクロム線を用いたヒーターをツールに挿入し、ニクロム線に電流を流すことで加熱を行った。

供試材の温度変化を測定したほか、継手の評価は外観観察、組織観察を室温で行った。

3. 実験結果および考察

FSW における入熱量はツール回転数に比例、接合速度に反比例し、入熱不足となる条件では継手に欠陥が生じる。Table 3, Table 4 に欠陥のない健全な継手が得られる接合条件での、ツ

Table 1 Mechanical properties of base metals.

Materials	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV0.1)
A1050	130	6.0	41
A2024	433	14.4	135

Table 2 Friction stir welding conditions.

Materials	A1050	A2024
Rotational speed N (rpm)	60~1200	270~1200
Welding speed V (mm/s)	0.5~80	1.0~3.0
Tilt angle θ (deg.)	3	
Probe insert speed V_p (mm/s)	0.1	0.3
Preheating time t (s)	1.3	

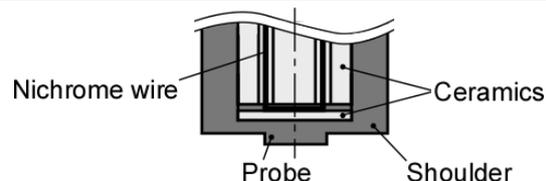


Fig.1 Schematic illustration of heating method.

Friction Stir Welding of Aluminum Alloy by Heat Assisted Tool

Masaru TERAJ, Masakatsu MAEDA, Kazuyoshi KATOH, and Mitsuteru NOMOTO

ール回転数の下限および接合速度の上限を示す。Table 3 より、両供試材ともに加熱ありの場合は2分の1のツール回転数での接合が可能となり、材質による加熱効果の違いはみられなかった。それに対し、Table 4 より、加熱ありの場合 A1050 は 1.75 倍、A2024 は 2.5 倍の接合速度での接合が可能となり、A1050 の加熱効果が小さくなった。このことに対する要因の1つとして、熱伝導率の違いが考えられる。

熱伝導率は、A1050-H24 が約 230 W/m・K、A2024-T3 が約 120 W/m・K であり、A1050 は A2024 に比較して熱が容易に伝導する。Fig.2 に、ショルダー径と等しい直径 9 mm の丸棒を 673 K まで加熱した後に、接合時と同様に固定した供試材に回転させずに押当てた際の、丸棒中心部（突合せ部）の材料温度がピークを示した瞬間から 3 秒後の材料内温度分布を示す。丸棒中心部および 4.5 mm 離れたショルダー外周部に相当する位置で、A1050 が約 9 K 低い値を示した。以上のような熱伝導の差異が加熱効果の違いに現れていることが考えられる。

ここで、欠陥が認められた継手の一例として、Fig.3 に低回転数の条件で欠陥が生じた継手の外観を、Fig.4 に高接合速度の条件で欠陥が生じた継手の外観および接合部横断面底部の微視的組織を示す。低回転数で欠陥が生じた継手では表面にむしれや溝状欠陥がみられ、不均質な外観となった。このことは、入熱不足によって正常に攪拌が行われなかったためと考える。それに対し、高接合速度で欠陥が生じた継手では接合部表面には欠陥がみられず均質であるが、底部にキッシングボンドと呼ばれる欠陥が認められる。この欠陥は、入熱不足により底部の攪拌が不十分な場合に生じるものである。

これらの欠陥を生じさせないためには、十分な入熱を与え材料を軟化させ、その軟化した範囲内を攪拌できる接合速度を選定する必要がある。反対に、接合速度を過度に上昇させ、軟化していない範囲を攪拌しようとした場合は欠陥が生じることになる。そのため、熱伝導率が高くツールからの熱が広範囲に拡がり、局所的な温度上昇をさせにくい A1050 では、A2024 と比較して加熱効果が小さくなったと考える。

以上のことから、補助加熱 FSW を行う場合、熱伝導率の低い材料ほど効果的であると考えられる。

参考文献

- 1) 寺井 克ほか：軽金属学会第 128 回春期大会講演概要，(2015)，271-272。

Table 3 Minimum rotational speed of sound joint.

	Minimum rotational speed (rpm)	
	Without heating	With Heating
A1050 (V=0.5mm/s)	120	60
A2024 (V=1.0mm/s)	600	300

Table 4 Maximum welding speed of sound joint.

	Maximum welding speed (mm/s)	
	Without heating	With heating
A1050 (N=1200rpm)	40	70
A2024 (N=1200rpm)	1.0	2.5

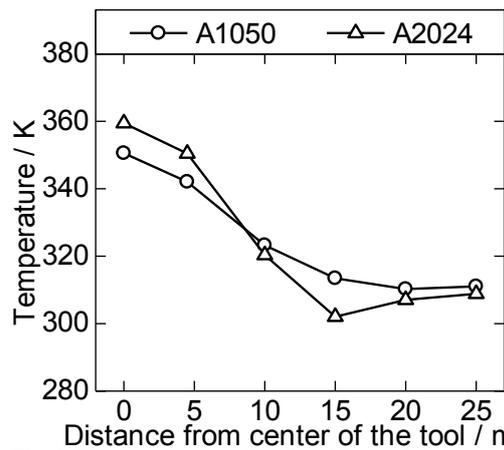
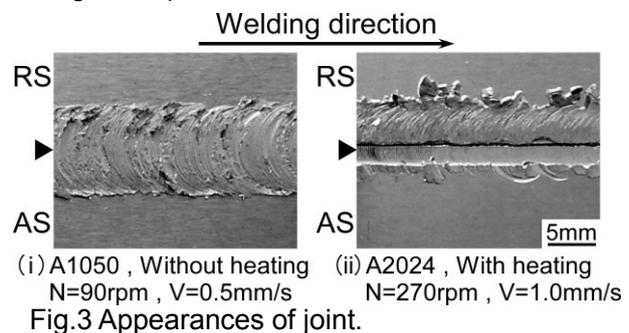
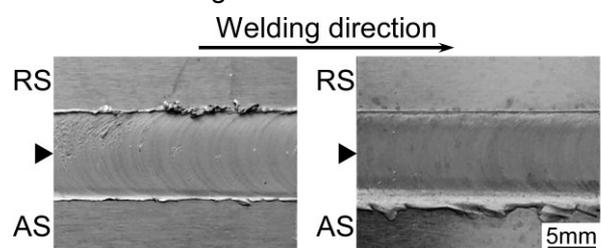


Fig.2 Temperature distributions of the materials.

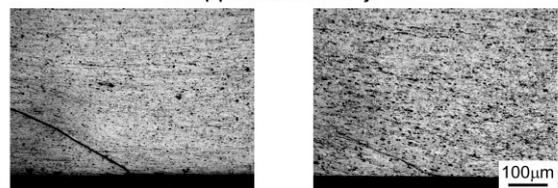


(i) A1050, Without heating (ii) A2024, With heating
N=90rpm, V=0.5mm/s N=270rpm, V=1.0mm/s
Fig.3 Appearances of joint.

The triangle marks are the weld interface.



(a) Appearances of joint



(b) Microstructures of joint

(i) A1050, With heating (ii) A2024, Without heating
N=1200rpm, V=80mm/s N=1200rpm, V=1.5mm/s
Fig.4 Appearances and microstructures of joint.

The triangle marks are the weld interface.