摩擦攪拌接合時の初期条件が 6061 アルミニウム合金継手の機械的性質に及ぼす影響

日大生産工(院)	O谷	亮輔	日大生産工(院)	荒深	純一
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) は摩擦熱と塑性流動を利用した固相接合法の 一種である.FSW は溶融溶接に比較して変形が 小さい,気孔,割れなどの接合欠陥が少なく, 接合に要するエネルギー効率が高いなどの利 点から発明されて以来多くの研究開発が進め られ,航空機,鉄道車両,土木建築構造物を中 心として様々な産業分野で実用化されている<sup>1)</sup>.

FSW の主な接合パラメータとして工具回転 数および接合速度が挙げられ,これらの条件 を組合せて接合を行った研究報告は多数あり, 被接合材の種類により適正接合条件範囲が存 在する<sup>2)</sup>.しかし,これらの主要パラメータ 以外に初期条件である工具挿入速度と予熱時 間があり,工具挿入速度および予熱時間が FSW 継手の機械的性質に及ぼす影響について は明確ではないのが現状である.古市らは先 に5052アルミニウム合金板などを用いてFSW を行い,FSW 継手の機械的性質に及ぼす工具 挿入速度および予熱時間の影響を報告した<sup>3)</sup> ~<sup>5)</sup>.その結果,それぞれの材質に工具挿入速 度および予熱時間の適正値が存在することを 明らかにした.

本研究では 6061 アルミニウム合金板を用 いて FSW を行い, 撹拌部の組織および継手の 機械的性質に及ぼす工具挿入速度および予熱 時間の影響について検討した.

## 2. 供試材および実験方法

供試材には板厚 5mm の 6061-T6 アルミニウ ム合金を幅 50mm,長さ 200mm に機械加工後, 接合面を脱脂洗浄し実験に供した.供試材の Table 1 Mechanical properties of base metal.

Tensile strength	Elongation		Hardness				
(MPa)	(%)		(HV0.1)				
316	10.6		106				
Table 2 Friction stir welding conditions.							
Rotational speed	Ν	(rps)	16.7				
Welding speed	V	(mm/s)	3				
Tilt angle	θ	(deg.)	3				
Probe Insert speed	Vp	(mm/s)	0.1 ~ 5				
Preheating time	t	(s)	0.1 ~ 20				

機械的性質を Table 1 に示す.実験には全自 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 ト間隔なしの I 型突合せ接合とした.回転工 具は合金工具鋼(SKD61)製とし,ショルダー径 20mm,ショルダー角4°,プローブはM6,長 さ4.5mm に機械加工したものを用いた.得ら れた FSW 継手の外観,巨視的および微視的組 織観察,硬さ試験,引張試験をいずれも室温 で行った.引張試験片は接合部を平行部中央 とし,接合方向に垂直に JIS14B 号試験片に準 じて採取した.合わせて回転工具先端部およ び供試材の温度測定を行った.

#### 3. 実験結果および考察

Fig.1 に接合開始点の継手外観を示す.始点 部では挿入速度の増加に伴い接合部表面のば りは減少した.工具挿入速度が遅い条件では, 帯状のばりが観察され,工具挿入速度が速い 条件では,うろこ状のばりが認められた.ま た,工具挿入速度が遅く予熱時間が長い条件 では,粉末上の付着物が認められた.このこ

Effect of Initial Conditions of Friction Stir Welding on Mechanical Properties of 6061 Aluminium Alloy Joint

Ryosuke TANI, Junichi ARAFUKA, Kazuyoshi KATOH and Mitsuteru NOMOTO



Fig.2 Macrostructures of start position of joint. The mark (▼) is weld center.

とは工具挿入速度が遅いため、ショルダーに 抑えられる以前に素材が外部に排出されたも のと考える.接合開始点から終端部までショ ルダー径とほぼ一致する幅の円弧状の模様が 観察された.

Fig.2 に接合開始点の継手横断面巨視的組 織を示す. 全条件で FSW 特有の同心楕円状の オニオンリングが撹拌部で明瞭に観察された. 予熱時間の増加に伴いオニオンリングの幅が 大きくなる傾向を示した. このことは予熱時 間の増加により,入熱量が増加することで軟 化範囲が広くなり,素材の流動が容易となっ たためと考える.

Fig.3 に接合開始点の継手横断面微視的組織を示す. 撹拌部は全条件で母材に比較して微細となり, 撹拌部外周で素材の流動が認められる熱機械的影響部(Thermo-mechanically

affected zone: TMAZ)が観察された. 接合部 底部は,工具挿入速度 5mm/s,予熱時間 0.1s の条件でキッシングボンドが認められたが, 工具挿入速度の減少および予熱時間の増加に より,素材の流動が容易となるためにキッシ ングボンドは消滅した.

Fig.4 に撹拌部中央の微視的組織よりチン マー法によって平均結晶粒径を算出した結果 を示す.母材の平均結晶粒径は32µmであっ た.撹拌部の結晶粒径は工具挿入速度 0.1mm/sで10~11µm,5mm/sで7~8.5µmと 母材に比較して著しく微細であった.工具挿 入速度の増加および予熱時間の減少に伴い接 合開始部の撹拌部中央の結晶粒は微細化した. このことは工具挿入速度の増加および予熱時 間の減少に伴い接合開始部での入熱量が減少 し,動的再結晶による結晶粒の粗大化を抑制



Fig.3 Microstructures of start position of joint.

されたためと考える.

Fig.5 に接合後4日間経過後の接合開始点 の横断面板厚中央部の硬さ分布を示す.図は 示さないが,接合部の硬さは接合直後より室 温に放置することで硬化したが,接合後4日 間以上放置しても硬さに変化が認められなか った.全条件でショルダー径に相当する範囲 に軟化が認められた.また,予熱時間が短く, 工具挿入速度が遅い条件では,わずかではあ るが軟化域の幅は広くなった.予熱時間が長 くなるに伴い工具挿入速度の大小による差は 小さくなり,軟化域の幅は広くなった.予熱 時間の長短に関係なく工具挿入速度が速い条 件で軟化部の硬さはわずかに小さくなった.

Fig.6 に接合後 4 日間経過後の接合開始点 の引張試験結果を示す.引張強さは工具挿入 速度 5mm/s,予熱時間 0.1s の条件で最高値 216MPa を示し,母材の約 70%であった.全条 件で工具挿入速度の増加および予熱時間の減 少に伴い引張強さは向上した.また,伸びは 予熱時間の増加に伴いわずかに低下する傾向 が認められ,工具挿入速度 0.1mm/s,予熱時 間 0.1s の条件で伸びは最高値を示したが,母 材に比較して著しく低下した.破断は工具挿 入速度および予熱時間の長短に関係なく熱影



響部(Heat affected zone: HAZ)に相当する位置であった.図には示さないが,始点部から離れた位置では,工具挿入速度および予熱時間の違いによる引張強さの大小に明瞭な差異は認められなかった.

Fig.7 に回転工具先端部, Fig.8 に接合中の 供試材の温度履歴を示す.工具挿入速度の増 加に伴い昇温速度は著しく大きくなった.工 具挿入速度が速く予熱時間が短い条件では, 接合開始時の工具先端の温度はほとんど変化 が認められないが,予熱時間の増加に伴い工 具先端の温度は接合開始時には約500Kであっ た.供試材の最高到達温度は接合開始時に予 熱時間が短い条件で約550Kであったが,予熱 時間20s では約700Kまで増加した.

# 4. 結 言

摩擦攪拌接合の初期条件である工具挿入速 度を増加させることにより,接合開始点では 組織は微細化し,引張強さもわずかではある が向上したが,接合開始点より離れた位置で はその効果は認められなかった.また,予熱 時間が短い条件では,組織の微細化に効果が 認められたが,予熱時間が長くなると引張強 さは低下した.

#### 参考文献

- 例えば、時末 光編:FSW(摩擦攪拌接合)の基礎と応用、日刊工業新聞社、(2005)、3.
- 2) 例えば、社団法人溶接学会編:摩擦攪拌 接合 -FSW のすべて-,産報出版株式会社, (2006),18
- 古市英樹, 荒深純一, 加藤数良: 軽金属
  第 69 巻 第 9 号, (2013), 303-309.
- 古市英樹,荒深純一,加藤数良:日本機 械学会 2012 年度年次大会講演論文集, (2012), DVD-ROM.
- 古市英樹,荒深純一,加藤数良:軽金属 学会第123回春期大会講演概要,(2013), 329-330.



