

窒化ケイ素製ツールを用いた鉄道車両用 A7N01合金の摩擦攪拌接合

Friction Stir Welding of A7N01 Aluminum Alloy for Railway Vehicles Using Si₃N₄ Ceramic Tool

橋本 健司 Kenji HASHIMOTO
河田 直樹 Naoki KAWADA

石川 武 Takeshi ISHIKAWA
藤井 英俊 Hidetoshi FUJII

摩擦攪拌接合に用いられる接合ツールは、接合長が長くなるにしたがって磨耗が進行し、ついには破損に至る。したがって、接合長が長い場合、安定した良好な接合品質の継手を得るには、ツールに耐摩耗性が求められる。従来、アルミニウム合金の接合には、工具鋼などの鉄鋼材料製のツールが用いられてきた。本研究では、ツール寿命の延伸を目的として、鉄鋼材料よりも耐摩耗性に優れた窒化ケイ素をツール材質として用いた。そして、まず本ツールを用いた接合が実際の製造に应用可能かを検討するために、各接合条件で作製した継手の組織と機械的特性を調査した。

A tool wears out during friction stir welding as the welding length increases, then it finally breaks. Therefore, the high wear resistance is required for the tool to accomplish a stable long welding. A ferrous tool, such as tool steels, has been conventionally used for the friction stir welding of aluminum alloys. In this study, for the purpose of extending the tool life, silicon nitride, which has a higher wear resistance than a ferrous material, was used for the tool material. As a feasibility study of the tool in actual manufacturing, the microstructure and mechanical properties of the FSW joints made using this tool were investigated.

1 緒言

摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding : FSW) は、1991年に英国のTWI (The Welding Institute) で開発されてから、これまでに鉄道車両、航空・宇宙機器、自動車部品等の製造に適用されてきた。FSWは、摩擦熱を利用して接合する固相接合法であり、次のような特徴をもつ⁽¹⁾。

- ① アーク溶接と比較して変形量が数分の一以下である。
- ② 開先加工や接合時の前処理が不要である。
- ③ 接合中にヒューム、スパッタ、紫外線の発生がない。
- ④ 気孔、割れなどが発生しにくい。
- ⑤ Al合金の場合は、シールドガスが不要である。
- ⑥ フィラーが不要である。

以上の特徴から、低コストで、かつ接合継手の信頼性が高い鉄道車両構体を製造する上で、FSWは有用な接合法であると言える。

これまでに、融点が高い鉄鋼材料よりも、融点が比較的低いAl合金に対して、FSWの実用化は進んできた。それは、高融点金属の接合では、高温領域での接合ツールの耐久性が問題となり、実用化の障壁になっていたことに起因する。これを克服すべく、優れた高温強度と耐摩耗性をもつツールの開発が国内外で盛んに行なわれてきた。例えば、Ir合金⁽²⁾⁽³⁾、WC合金⁽⁴⁾、Ni基合金⁽⁵⁾、Co

基合金⁽⁶⁾ ツールがその例として挙げられる。そのような中、近年、ツール材質として、優れた高温強度と耐摩耗性をもつ窒化ケイ素を適用し、かつツール形状の最適化を行なうことで、高融点金属であるステンレス鋼に対して良好な接合が可能であるという報告がされた⁽⁷⁾。

一方、Al合金製鉄道車両構体には、主に6000系合金のA6N01 (Al-Mg-Si) と、7000系合金のA7N01 (Al-Zn-Mg) が用いられている。A6N01合金は押出性に優れ、Al合金の中で中程度の強度を有するため、屋根および側構体に中空押出型材が適用され、FSWの研究も多数報告されている⁽⁸⁾。これに対して、A7N01合金は高強度であるため、信頼性が求められる台枠に中厚板が用いられているが、高温における変形抵抗が高く、ツールにかかる負荷が大きい。そのため、FSW適用の障壁となっていた。

Al合金の接合には、一般に工具鋼製ツールが用いられるが、本研究では、ツール寿命の延伸という観点から、高温強度と耐摩耗性に優れた窒化ケイ素製ツールを設計・製作し、A7N01合金の接合を行なった。そして、まず本ツールを用いて得た継手が要求特性を満足するかを検討するため、各接合条件で作製した継手の組織と機械的特性の評価を行なった。

2 実験方法

図1に接合方法の模式図を示す。FSWは、プローブと呼ばれる先端に突起のある円柱状のツールを回転させながら、被接合材と接触させ、材料との摩擦熱を利用して接合する固相接合法である。ツールは、径の大きいショルダー部とその先端にあるプローブ部から構成される。接合中はプローブのみが材料に押し入れられ、接合すべき突合せ面に沿って移動する。このとき、被接合材は裏当て板に拘束され、固体の状態を維持しながら、ツールによる塑性流動によって接合が行なわれる。

供試材は、板厚6mmのA7N01-T5合金押出型材を用い、突合せ接合を行なった。供試材の化学成分を表1に示す。接合には、位置制御方式のFSW装置を用い、板表面からのプローブ挿入量は6.0 mmとした。接合に用いた窒化ケイ素製のツール形状と接合条件を表2に示す。従来の工具鋼製ツールのプローブは円柱形状でネジがきってあるが、本ツールのプローブは円錐形のテーパ形状でネジはきっていない。接合は、回転ピッチ $P=0.25$, 0.75 mm/revの条件で行なった。回転ピッチ（接合速度/ツール回転数）は、ツールが1回転する間に移動する距離であり、回転ピッチが大きいほど、FSW中に材料に投入される入熱は減少する。裏当て板は、 $t15 \times w150 \times l1500$ mmの窒化ケイ素製とし、押出型材の押出方向と平行方向に接合を行なった。

接合部の組織は、接合方向と垂直な面を観察面として、光学顕微鏡で断面組織観察を行なった。腐食液には、ケラー氏液（塩酸20ml+硝酸20ml+フッ酸5ml+蒸留水20ml）を用いた。また、機械的特性は接合後、室温・大気中で1ヶ月の自然時効を施した継手のビッカース硬

さ試験および引張試験により評価した。硬さ試験は、接合方向と垂直な面を測定面として、板厚中心部から両端に22mmの範囲を、測定荷重1.96N、荷重保持時間10sの条件で測定した。引張試験片形状は、図2に示す接合方向と垂直方向に切り出したJIS Z 3121 1A号試験片とし、接合部の凹凸ならびに裏面の未接合部の影響を除去するため、いずれの試験片も接合部の表面と裏面を各1.0 mm機械加工して試験を行なった。

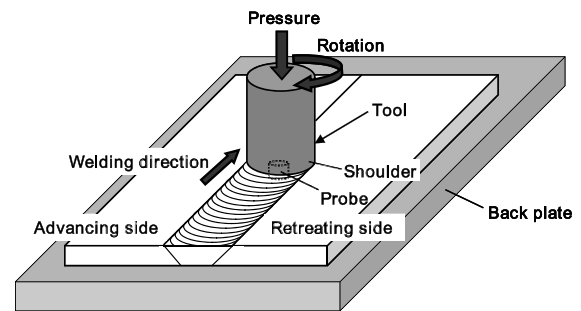


図1 摩擦攪拌接合 (FSW) の模式図

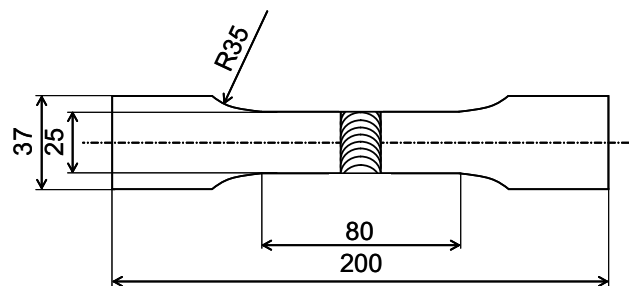


図2 引張試験片形状 (JIS Z 3121 1A号)

表1 供試材の化学成分

Type	Chemical composition in mass %									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Al
A7N01-T5	0.10	0.21	0.16	0.36	1.3	0.10	4.4	0.03	0.14	Bal.

表2 ツール形状と接合条件

Tool size			Welding parameters		
Shoulder diameter, D (mm)	Probe length, l (mm)	Tool tilt, θ (°)	Rotation speed, R (rpm)	Welding speed, V (mm/min)	Revolution pitch, P (mm/rev)
16	5.8	3	600~1500	150~1125	0.25
					0.75

3 実験結果および考察

3.1 ビード外観および断面組織

図3に代表的な例として、(a) $P=0.25$ mm/rev [600 rpm - 150 mm/min] および (b) $P=0.75$ mm/rev [1350 rpm - 1013 mm/min]

rpm - 1013 mm/min] で作製した継手のビード外観を示す。ビードには、等間隔のリプル模様が観察され、バリの排出も少なく、外観は良好であった。また、 P が0.25 mm/revから0.75 mm/revに増加し、入熱量が減少す

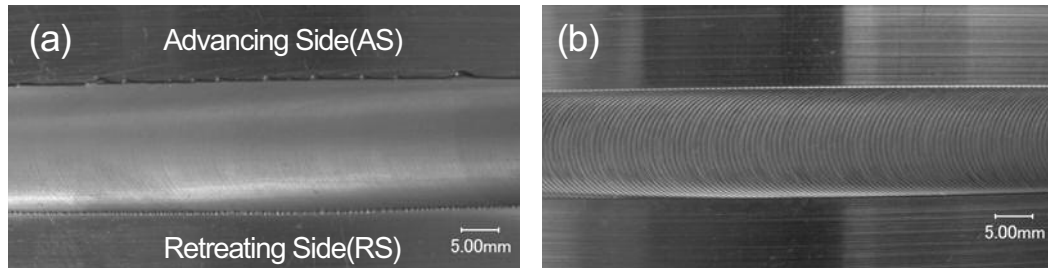


図3 (a) $P=0.25$ mm/rev [600 rpm - 150 mm/min] および (b) $P=0.75$ mm/rev [1350 rpm - 1013 mm/min] で作製した継手のビード外観

Revolution pitch, P (mm/rev)	
0.25	0.75
<p>(a) RS AS 600rpm-150mm/min</p>	<p>(d) 600rpm-450mm/min</p>
<p>(b) 900rpm-225mm/min</p>	<p>(e) 900rpm-675mm/min</p>
<p>(c) 1200rpm-300mm/min</p>	<p>(f) 1200rpm-900mm/min</p>
<p>W.D. 1mm</p> <p>(g) 1350rpm-1013mm/min</p>	
<p>(h) 1500rpm-1125mm/min</p>	

図4 各接合条件で作製した継手の断面マクロ組織

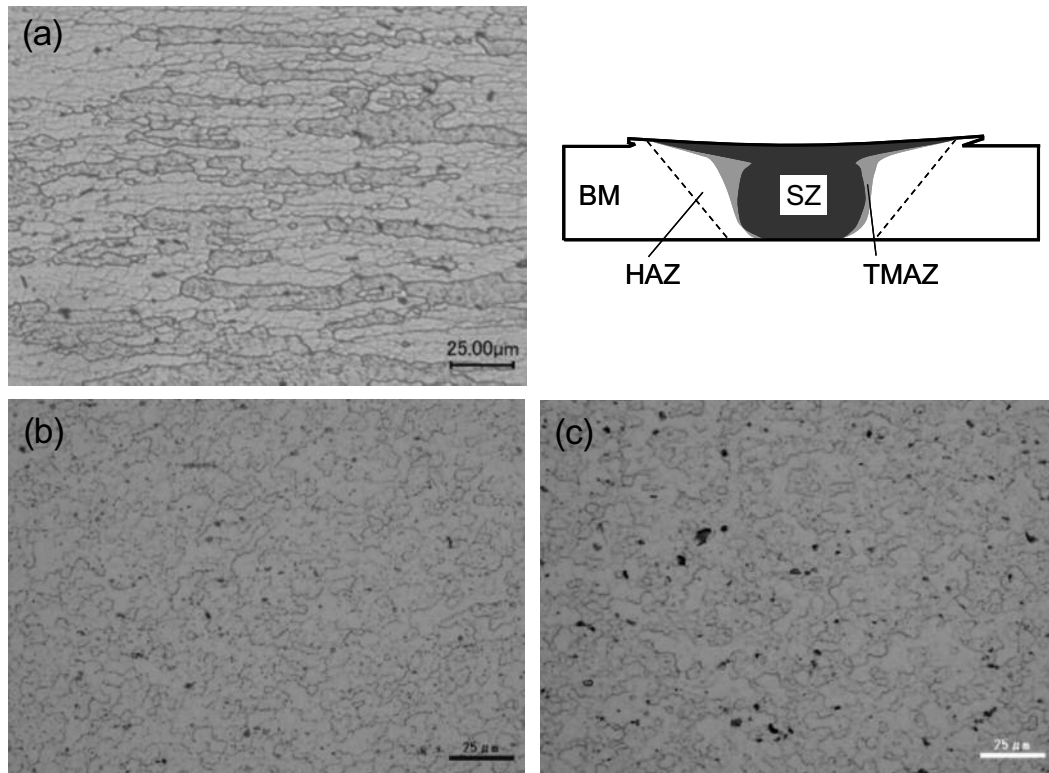


図5 (a) 母材, および攪拌部; (b) $P=0.25$ mm/rev [600 rpm - 150 mm/min], (c) $P=0.75$ mm/rev [1350 rpm - 1013 mm/min] の光学顕微鏡写真

ると、ビード幅は約18 mmから15 mmに減少した。

図4に各接合条件で作製した継手の断面マクロ組織を示す。図中の白丸で示す箇所に内部欠陥が観察された。発生箇所は、前進側 (Advancing Side : AS) であった。 $P=0.25$ mm/revにおいて、(a) 600 rpm - 150 mm/minの条件では無欠陥であるが、(b) 900 rpm - 225 mm/min, (c) 1200 rpm - 300 mm/minと接合条件が高回転・高速度側になると、内部欠陥の大きさが増大した。(c)の接合条件では、バリの排出が多く、また図中の試料表面近傍に攪拌の流れがスムーズでない領域が観察された。この現象は、回転数が高くなり、材料の塑性流動のバランスが悪くなったため発生したと考えられる。つまり、材料中の熱の伝達に比べ、回転ツールから材料表面の入熱量が大きくなりすぎ、表面温度のみが上昇し、局部的に塑性流動が促進したと考えられる⁽⁹⁾。 $P=0.75$ mm/revにおいては、(g) 1350 rpm - 1013 mm/minの接合条件で無欠陥であったが、それ以外の条件では、板下面に約0.2 mmの未接合部および内部欠陥が観察された。これらの欠陥発生は、攪拌不足が起因していると考えられる。

図5に母材 (Base Metal : BM) と、 $P=0.25$ mm/rev [600 rpm - 150 mm/min] および0.75 mm/rev [1350 rpm - 1013 mm/min] で作製した継手の攪拌部 (Stir Zone : SZ)

の光学顕微鏡写真を示す。母材の平均結晶粒径は約7.1 μ mであり、攪拌部は $P=0.25$, 0.75 mm/revでそれぞれ約6.4 μ m, 6.2 μ mであった。この結果より、母材の結晶粒はプローブによる攪拌で約1 μ m微細化されるものの、回転ピッチによる顕著な差はないことがわかった。

3. 2 継手の機械的特性

図6に $P=0.25$ mm/rev [600 rpm - 150 mm/min], および $P=0.75$ mm/rev [1350 rpm - 1013 mm/min] の条件で作製した継手の硬さ分布を示す。この結果より、母材硬さは約133 HVであり、いずれの回転ピッチにおいても、接合部硬さは中心付近から114 HVまで軟化することがわかった。一般に、硬さは結晶粒が小さいほど高い値を示すが、ここでは逆の現象が起きている。これは、析出強化型Al合金特有の現象で、微細析出物の量や分散状態が硬さの軟化の原因となっている⁽¹⁰⁾。また、 $P=0.25$ mm/revと0.75 mm/revの軟化領域 (Softening region) はそれぞれ約37 mm, 18 mmであった。同図上に各回転ピッチのビード幅を示すが、軟化領域は両ピッチでビード幅以上であることから、接合中の塑性流動よりも摩擦熱の影響が軟化現象に深く関与していると考えられる。

図7に各回転ピッチで作製した継手の引張試験結果を

示す。(a) (b) の結果より、 $P=0.25$ mm/revでは接合速度150~225 mm/minの範囲、 $P=0.75$ mm/revでは900~1013 mm/minの範囲でMIG溶接継手の引張強さと耐力⁽¹⁾を上回ることがわかった。また引張試験片の破断位置は、ほとんどの場合が攪拌部であったが、 $P=0.25$ mm/rev [600 rpm - 150 mm/min] の接合条件において、図6に示す硬さの最大軟化位置 (MIN_{0.75}) で破断した。

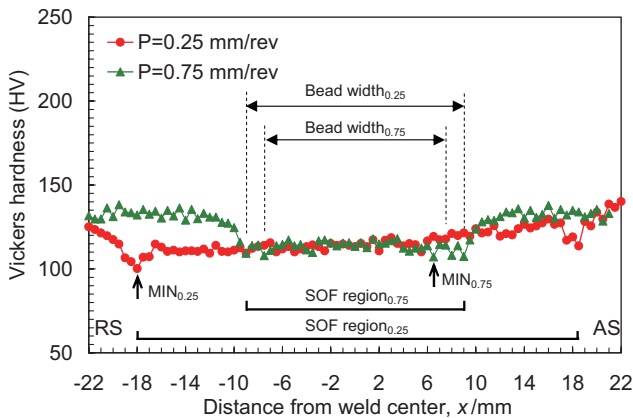


図6 $P=0.25$ mm/rev [600 rpm - 150 mm/min], および $P=0.75$ mm/rev [1350 rpm - 1013 mm/min] の硬さ分布

4 まとめ

窒化ケイ素製ツールを用いて、板厚6 mmのA7N01-T5合金押出型材の突合せ接合を行なった。得られた結果を以下に記す。

- 母材の平均結晶粒径は約 $7.1 \mu\text{m}$ であり、攪拌部は $P=0.25, 0.75$ mm/revでそれぞれ約 $6.4 \mu\text{m}, 6.2 \mu\text{m}$ であり、母材の結晶粒はプローブによる攪拌で約 $1 \mu\text{m}$ 微細化されるものの、回転ピッチによる顕著な差はないことがわかった。

- $P=0.25$ mm/revでは接合速度150~225 mm/minの範囲、 $P=0.75$ mm/revでは900~1013 mm/minの範囲でMIG溶接継手の引張強さと耐力を上回った。また、 $P=0.25$ mm/rev [600 rpm - 150 mm/min] の接合条件で、硬さの最大軟化位置 (MIN_{0.75}) から破断した。

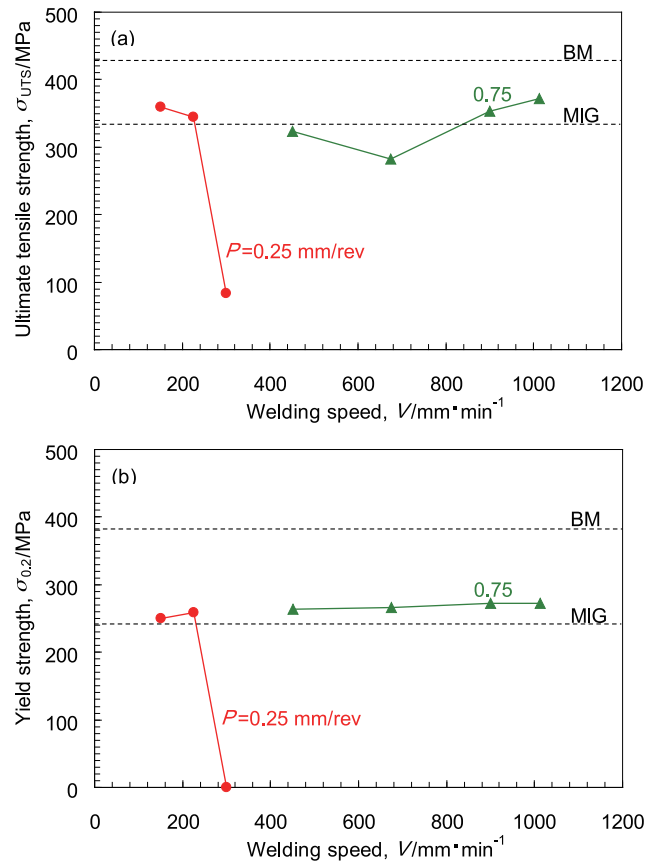


図7 各回転ピッチで作製した継手の引張試験結果 (a) 引張強さ, (b) 耐力

参考文献

- (1) 「摩擦攪拌接合-FSWのすべて-」, 社団法人溶接学会編, 産報出版, 16-17, (2006)
- (2) 宮澤智明, 他: 「高温材料の接合に向けたIr系摩擦攪拌接合ツールの開発」, 溶接学会論文集, 28-2, 203-207, (2010)
- (3) 宮澤智明, 他: 「高強度Ir系摩擦攪拌接合ツールの開発」, 溶接学会論文集, 29-1, 24-28, (2011)
- (4) 松下宗生, 他: 「高張力薄鋼板の摩擦攪拌接合 (FSW) 技術の開発」, 溶接学会論文集, 27-4, 360-370, (2009)
- (5) 東靖子, 他: 「Ni基超・超合金製ツールによるSUS430薄板の摩擦攪拌接合」, 溶接学会論文集, 28-1, 116-122, (2010)
- (6) 佐藤裕, 他: 「鉄鋼およびTi合金用新規Co基金属摩擦攪拌接合ツールの開発」, 溶接学会全国大会講演概要 87, 288-289, (2010)
- (7) 石川武, 他: 「Smart FSW™ツール&バックバーの開発」, 東急車輛技報, 61, 18-25, (2011)

- (8) 岩木俊一, 他: 「摩擦攪拌接合継手の後熱処理性—構造用アルミニウム合金の摩擦攪拌接合継手の諸特性に関する研究 (第6報) —」, 軽金属溶接, 45-5, 35-45, (2007)
- (9) Y. G. Kim, et. al. :Mater. Sci. Eng. A, 415, 250-254, (2006)
- (10) 佐藤裕: 「Al合金FSW部の機械的特性とマイクロ組織」, 溶接学会誌, 71-8, 581-584, (2002)
- (11) 溶接・接合便覧, 溶接学会編, 丸善, 1011

著者紹介



橋本健司
生産本部
技術部 (基礎開発)



河田直樹
博士 (工学)
生産本部
技術部 (基礎開発) 主査



石川 武
博士 (工学)
生産本部
技術部 (基礎開発) 課長



藤井英俊
博士 (工学)
大阪大学
接合科学研究所 教授