

# 高強度アルミニウム合金の摩擦攪拌接合の接合性の向上

森 久史\* 辻村 太郎\* 石塚 弘道\*\* 石川 武\*\*\*

## Improvement of Bonding of Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloy

Hisashi MORI Taro TSUJIMURA Hiromichi ISHIDUKA Takeshi ISHIKAWA

The improvement of the bonding of Friction Stir Welding (FSW) of high strength aluminum alloy (extra super duralumin 7075) was investigated. We carried out FSW for the two different states of precipitate of specimen using a ceramic tool. As a result, the treated materials 473K with coarse precipitates was observed to have the internal defects such as flow and voids. However, the treated material 573K with dispersed fine precipitates was observed not to have internal defects. It was found that the bonding property of the high strength aluminum alloy was improved by the microstructural control to finely dispersed nano-precipitates, and by using a ceramic tool so that heat may be stored during the FSW.

キーワード：高強度アルミニウム合金，ナノ組織，材料処理，摩擦攪拌接合，接合条件

### 1. はじめに

新幹線の速度向上に伴って、図1に示すように、車両の軽量化が進められてきた<sup>1)</sup>。車両構体の軽量化においては、アルミニウム合金の適用が検討され、新幹線車両においても200系新幹線電車以降、構体全体にアルミニウム合金が使われている。

アルミニウム合金の密度は2.7g/cm<sup>3</sup>であり、鉄と比較して小さい。また、アルミニウム合金は加工しやすく、熱処理によって性質を調整することができる特徴があり、軽量化を検討するための金属材料として有望である。

しかし、アルミニウム合金は材料物性において、熱伝導率が大きいことや酸化皮膜の存在で溶接が難しいとされる。また車両組立においては、溶接熱による変形や熱影響による材料組織の変化に伴う強度低下が生じるなど、溶接施工の難しい材料であるとされる<sup>2) 3)</sup>。

一方、摩擦攪拌接合（以降FSWとする）は、英国溶接研究所で開発された接合方法で、アーク溶接で認められる溶接部の熱影響や熱変形が軽微である特徴を有している。このことから、FSWはアルミニウム合金の接合に有効であると考えられており、車両の製造に適用されている。

しかしながら、高強度のアルミニウム合金の薄肉板材へのFSWの適用に関する実施例及び研究例はほとんど見られない。

本研究では、析出物の制御とセラミックツールの適用により、FSWの接合が困難であるとされる7000系のアルミニウム合金について、欠陥の発生がなく、接合部の硬さが向上するような方法を検討した。高強度のアルミニウム合金の一つである7000系合金を加工熱処理して析出物をナノ組織化し、その後未再結晶処理及び再結晶処理を行なった。その後、その処理材を用い、熱伝導の小さいセラミックツールを用いてFSWを行った。接合の状態を調べるために、接合部の断面の金属組織観察を行なって、金属組織の状態を観察するとともに欠陥の発生の有無を調べた、また、接合断面の硬度の状態を調べるために、硬さ測定を行った。本報ではこれらの検討結果について述べる。

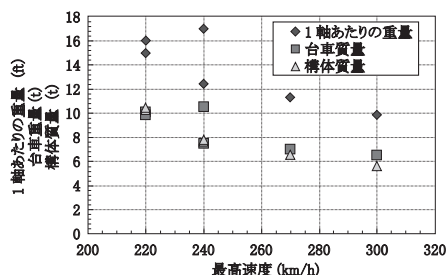


図1 新幹線電車の最高速度と車両重量の関係<sup>1)</sup>

\* 材料技術研究部  
 \*\* 車両構造技術研究部  
 \*\*\* 東急車輛製造(株) (現：(株)総合車両製作所)

## 2. FSW の概要

### 2.1 FSW とは

FSW は 1991 年に英国溶接研究所 (TWI) によって開発された接合手法であり、その工程の概略を図 2 に示す<sup>4)</sup>。

FSW は、ショルダーとプローブから構成される回転工具 (以降、ツールと呼ぶ) を材料に接触させて摩擦熱を発生させてから、プローブを接合部に挿入して、摩擦熱により軟化した部分を攪拌することで接合する方法である。

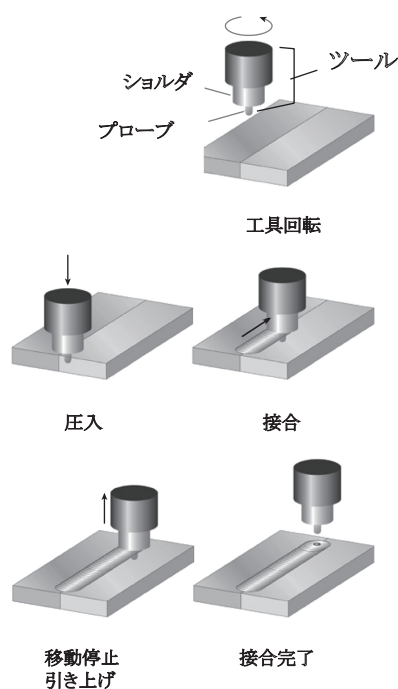


図 2 摩擦攪拌接合の工程<sup>4)</sup>

従来のアーク溶接では高エネルギーのアーク熱を使用しているが、FSW は摩擦熱で接合する接合方法である。従来のアーク溶接と比較すると、次のような利点を有する。

- ・ 余盛りがなく、仕上げが不要になるために、アーク溶接に対して作業性で優位性を持つ。
- ・ 摩擦熱のみで接合することから、材料組織の熱影響に対する変化はアーク溶接に比べて少ない。
- ・ 2つの板が継ぎ合わさった部材 (以降、継手という) の結晶粒が微細化することで、アーク溶接の継手よりも強度は著しく高くなる。また、再加熱を行うことにより、母材に近いレベルにまで強度が回復し、継手の強度の劣化に関する問題はない。

一方、欠点としては、接合強度などの基準がないことなどが挙げられる。このような欠点がある半面、従来のアルミニウム合金の溶接に比べて作業上及び特性上に利点が多いことから<sup>4)</sup>、アルミニウム合金製の車両製造の接合方法として有用であると考えられ、新幹線電車をはじめ通勤車両の組立で適用されるに至っている。

FSW は、現在の車両構造材として使用されている 5000 系 (Al-Mg 合金)、6000 系 (Al-Mg-Si 合金)、7000 系 (Al-Zn-Mg 合金) の各アルミニウム合金について適用が可能であるとされている。

### 2.2 高強度アルミニウム合金への FSW の適用

FSW は図 2 に示したように、ツール回転に伴う塑性変形と摩擦発熱で接合される。そのときの入熱量 ( $Q$ ) は (1) 式で与えられる<sup>5)</sup>。

$$Q = 3/4\pi \cdot R^3 \cdot P \cdot N \cdot \mu / V \quad (1)$$

ここで、 $R$ : ショルダー径 (m)、 $P$ : ツール荷重 (N)、 $N$ : ツール回転数、 $V$ : 接合速度 (m/s)、 $\mu$ : 摩擦係数である。

そのため、FSW の接合の良否は接合ツールの材質、ツールの挿入深さ・回転数・送り速度やショルダー形状、ツールへの負荷荷重が影響するようになる。

ここでプローブの挿入深さは一定に制御されるので、実質的には接合ツールの回転数、ツールの送り速度、ツールの材質が主な課題となる。ツールの送り速度と回転数の組み合わせが不適である際、図 3 のようなかじりの欠陥発生が認められるようになる<sup>6)</sup>。6000 系合金ではこの組み合わせ範囲が広いが、7000 系合金の場合の適用範囲には不明な点が多い。また、FSW では、ツールの被接合材への負荷荷重が重要となる。この負荷荷重には回転数、ショルダー径、ショルダー形状が影響するが、被接合材料の変形抵抗の影響が特に大きい。

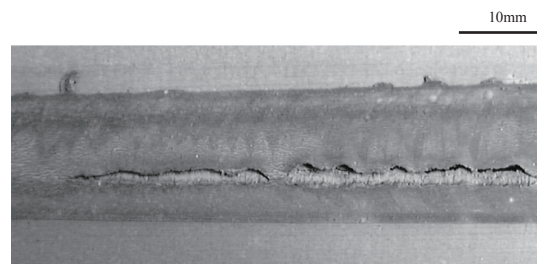


図 3 7000 系アルミ合金汎用材の FSW の接合線における欠陥例 (かじりの例)<sup>6)</sup>

図 4 に接合条件を検討した報告例を示す。7000 系のアルミニウム合金は、5000 系や 6000 系と比較して材質の高温変形抵抗が高い。そのため、ツールに与える押し込み負荷荷重は 5000 系や 6000 系合金を接合する時よりも大きな荷重を必要とするようになる。7000 系合金のような高負荷荷重が必要な接合では、(1) 式から計算されるように、入熱量が大きくなる結果、摩擦熱が増加して図 3 のような欠陥発生をもたらす可能性がある。

そこで本研究では、FSW の接合が困難であるとされる 7000 系のアルミニウム合金について、欠陥の発生がなく、接合部の硬さが向上するような方法を検討するために、材質の金属組織に存在する析出物をあらかじめ微

細に制御し、その後に再結晶処理により変形抵抗を下げ、接合中の摩擦熱を利用して析出物を整える方法を考えた。

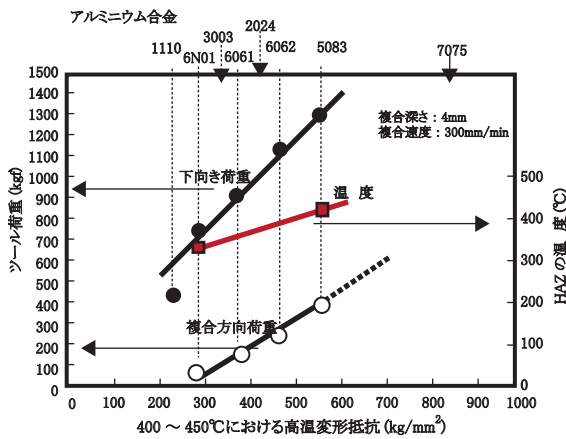


図4 接合条件の検討例<sup>5)</sup>

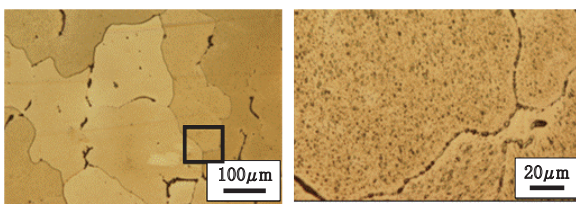
### 3. 実験方法

#### 3.1 試験材

本試験材では、7000系合金として、表1に示すような化学成分の7075合金を用いた。材料は精密鋳造法によって作成した。図5に鋳造したままの素材の金属組織を示す。金属組織は、(a)に示すように結晶粒径が100 $\mu\text{m}$ 以上であり、(b)に示すように粒界に最大1 $\mu\text{m}$ 程度の析出物が見られる状態である。

表1 試験材の化学成分 (単位は重量パーセント)

Si	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	Al
0.10	2.60	0.26	1.60	5.75	0.30	bal



(a) 結晶粒の状態 (b) 析出物の状態

図5 鋳造したままの素材の金属組織

#### 3.2 材料のナノ処理及び金属組織観察

本研究では、高強度アルミニウム合金にFSWの適用を検討するために、金属組織の析出物をナノレベルで制御した。ナノレベルでの制御では、図5に示す鋳造したままの素材に溶体化処理と時効処理を行い、その後に熱間圧延を行った。鋳造したままの素材の状態では、金属組織が不均一であることから均一化する必要がある。溶体化処理とは加熱保持後に急冷し、材料組織を均一化し、一度、準安定状態にする処理である。このような準安定状態では機械的性質が低いため、引き続き所定の温度に

加熱保持することで、目的とする性質に金属組織を調整する必要がある。この調整処理が時効処理である。これらの処理は一般的に熱処理型のアルミニウム合金で行われる。

本研究では、圧延加工後に見られる素材内の析出物の寸法をナノスケールで細かく分散させることを目的とするため、一般的な処理温度より低めに設定し、溶体化処理を743K $\times$ 1h、時効処理を673K $\times$ 8hで行った。

時効処理後の圧延加工は熱間で行い、圧延は温度が373Kであり、圧下率を96%として与えた。この状態では加工による歪で変形抵抗が高いため、その後、変形抵抗を下げるために再結晶化処理を行った。再結晶処理では、完全に再結晶した状態と、未完全な再結晶状態を比較するため、473K(473K処理材とする)と573K(573K処理材とする)で行った。473K処理材は、一部分を再結晶化した状態であり、573K処理材は完全に再結晶化した状態である。再結晶化処理は、熱間圧延した材料を加熱炉に入れて行った。加熱時間は析出物の粗大化を防ぐために180sとした。

再結晶化処理した材料の金属組織について観察した。観察試料は処理材を精密切断で切り出した後に研磨と腐食処理を行ってレーザー顕微鏡を用いて観察を行った。また、析出物の状態を調べるために透過型電子顕微鏡(TEM)による観察を行った。TEMの観察試料は、レーザー顕微鏡による金属組織観察片を用い、電解研磨及びツイジェット研磨機を用いて処理を行った。

#### 3.3 FSWの施工及び接合材の観察

接合は、再結晶処理を行った素材に対し、図6に示す方法でFSWによって行った。

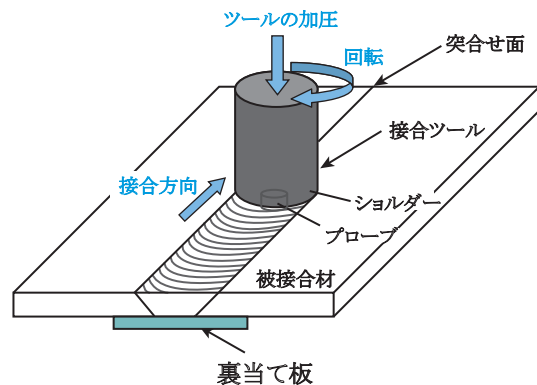


図6 試験方法の概略図

本研究では、再結晶処理により変形抵抗を下げ、接合中の摩擦熱を利用して析出物を整える方法を考えている。そこで、析出物を整えるためには、接合中の摩擦熱を蓄積し、接合部で温度勾配を持たせ、その熱勾配で組織の微細化を図ることが必要になる。一般的なFSWでは、鉄製のツールが適用されている。この鉄製ツールで

特集：材料技術

は、熱伝導が大きいために接合部に十分熱が蓄積することが難しく、また、熱勾配の制御も難しい。そこで、新たに考案したセラミック製ツールを用い、裏当て板には熱伝導の小さい材質を使う方法を検討した<sup>7)</sup>。

本研究で用いたセラミック製ツールは蓄熱性の高い窒化珪素製であり、裏当て板に SUS304 ステンレス鋼板を用いて接合した。接合ツールの形状は、ショルダ径が 12mm、プローブ径が 6mm、プローブ長さが 3mm である。ツール寿命を延ばすためプローブ部には凸形のテーパ形状に設計されているものを用いた。FSW は、ツールが一般的に接合面に対して角度を与えて挿入される。本研究での接合条件は、ツールの挿入角度を接合面に対して 3° の傾斜を与え、ツール回転数は 1000rpm、接合速度 500-1500mm/min、接合長 150mm とした。接合は、板材の長手方向に対して行った。

接合後に接合部の外観観察を行い、接合断面の金属組織を観察した。接合断面の金属組織の観察は接合材の接合線に対する垂直断面について行い、観察試験片は精密切断機によって切断後、研磨及び腐食処理を行って得た。観察は光学顕微鏡を用いた。

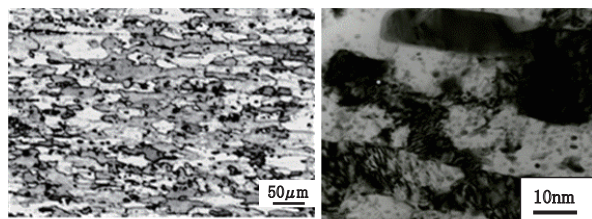
また、接合速度 500, 1000, 1250mm/min の試料に対して、接合後、接合材の断面に対してピッカース硬さ試験を行った。測定面は、接合方向と垂直な面とし、接合中心部から板厚中心方向に、水平方向に 0.5mm 間隔で片側 10mm まで測定を行った。測定には、微小硬度試験機を用い、測定荷重 1.96N, 荷重保持時間 10s で行った。

#### 4. 実験結果及び考察

##### 4.1 材料のナノ処理および金属組織の確認

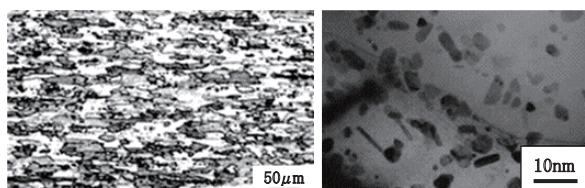
FSW の接合に用いた処理材の金属組織を図 7 及び図 8 に示す。図 7 及び図 8 の (a) はレーザー顕微鏡で金属組織のマイクロ観察を行った結果で、(b) は TEM で析出物の状態を観察した結果を示す。

473K 及び 573K で処理した材料の結晶粒は図 7 (a) 及び図 8 (a) に示すように、図 5 (a) の鋳造したままの素材と比べて微細である。473K と 573K の処理材における結晶粒の大きさには大きな差が認められなかった。しかし、図 7 (b) 及び図 8 (b) に示すように、析出物の大きさには処理温度の差が明瞭に認められ、473K 処理材の方が大きかった。



(a) 結晶粒の状態 (b) 析出物の状態

図 7 473K 処理材の金属組織観察結果

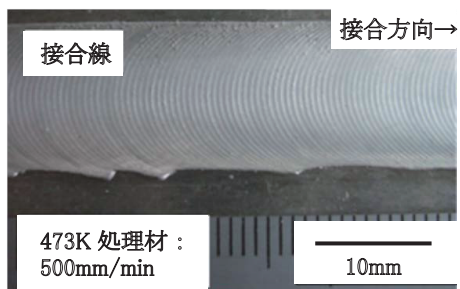


(a) 結晶粒の状態 (b) 析出物の状態

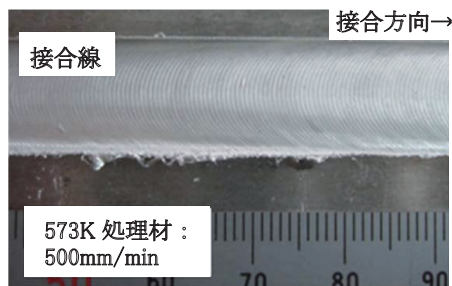
図 8 573K 処理材の金属組織観察結果

##### 4.2 接合材の接合部の外観

代表的な例として、接合速度 500mm/min で接合した時の接合線の外観を図 9 に示す。図 9 (a) は 473K 処理材の接合線であり、(b) は 573K 処理材の接合線を示す。接合線には、一般的な FSW 材と同様、ツールの回転痕跡が見られる。また、接合線の端部には、金属のバリの発生が認められる。バリはブラシで除去できる状態のものであった。また、いずれの接合速度の条件で接合した接合体の接合線も図 9 のような状態が認められ、本研究で調べた接合条件では、図 3 に示すようなかじりは認められなかった<sup>6)</sup>。



(a) 473K 処理材



(b) 573K 処理材

図 9 接合速度 500mm/min で摩擦攪拌接合した接合材の接合線の外観観察結果

##### 4.3 接合断面の金属組織観察結果

接合断面の金属組織の代表的な観察結果として、473K 処理材に接合速度を 500mm/min で接合した時のマクロ観察結果を図 10 に示す。一般的に、FSW の接合部の断面の金属組織には、摩擦攪拌層、塑性流動層、熱影響層が認められ、摩擦攪拌層内に、介在物が凝集した「オニオンリング」と呼ばれる介在物の凝集組織が認められる<sup>8)</sup>。

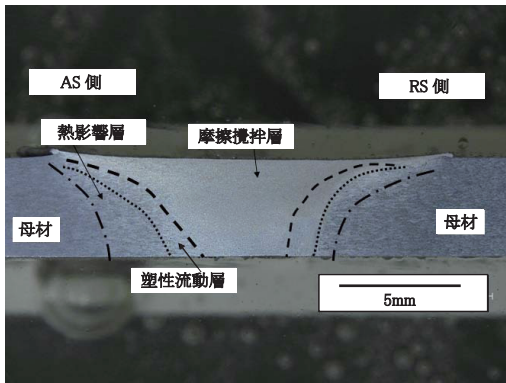
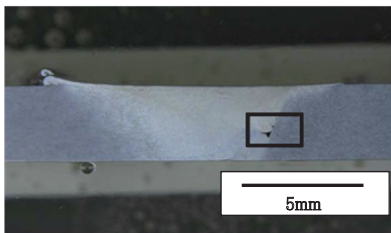


図 10 代表的な接合断面金属組織  
(473K 処理材, 接合速度 : 500mm/min)

本研究で接合した接合部の断面を観察した結果、図 10 に示すように摩擦攪拌層、塑性流動層、熱影響層が認められている。これは、一般的な FSW の接合材で見られる組織層であるが、オニオンリングは認められず、組織変化がワイングラスのような形で接合上面に広がっている状態で認められている。このオニオンリングとの相違については解析中であるが、接合時にステンレス製の裏当て板を設置したため、摩擦熱が裏に放出され、温度勾配が発生したことによると考えられる。

また、FSW では、ツールの回転運動の接線方向が接合方向と一致する場合に最も大きな速度成分となり、反対側では速度成分が最小値となる。最大速度成分を与える側を前進側 (AS 側 : advancing side) と呼び、反対側を後退側 (RS 側 : retreating side) と呼ぶ<sup>4)</sup>。被接合材の高温での塑性流動はこの速度成分の影響を受け、形成される接合領域は AS 側と RS 側とで非対称な形状となるのが一般的である。本研究の接合材でも、AS 側と RS 側とでは、接合領域は非対称であった。

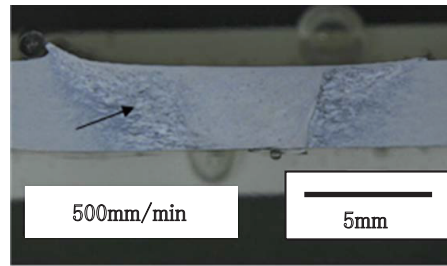


(a) 断面マクロ組織

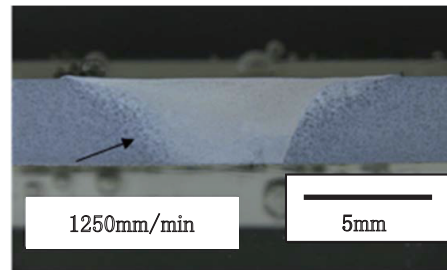


(b) 欠陥部

図 11 473K 処理材で接合速度を 750mm/min で接合した時の断面金属組織



(a) 接合速度 : 500mm/min



(b) 接合速度 : 1250mm/min

図 12 573K 処理材の接合部断面金属組織

図 11 (a) に 473K 処理材を 750mm/min で接合した接合部断面マクロ組織観察を示す。接合部の断面を観察すると、界面部に欠陥の発生が認められた。また、1000mm/min 以上で行った際、接合層内に流動不良が認められた。一方、573K 処理材では、473K 処理材に比べて欠陥の発生はなく、良好な接合断面が認められた。

573K 処理材で、接合速度を 500mm/min で接合した結果を図 12 (a)、1250mm/min で接合した結果を図 12 (b) に示す。

接合速度が 500mm/min と 1250mm/min とで断面金属組織を比較した場合、断面に認められる熱影響層の幅は、500mm/min では広いが 1250mm/min では狭い状態であった。一方、攪拌部の幅は、1250mm/min の方が 500mm/min よりも広く、断面金属組織が接合速度の影響を受けることがわかった。

#### 4.4 断面硬さ測定結果

図 13 (a) に 473K 処理材、(b) に 573 処理材の断面硬さ測定結果を示す。図にはショルダ径の外側及びプローブ径範囲を同時に示した。平均母材硬さは 473K 処理材で 113HV、573K 処理材で 97HV である。攪拌部の硬さは母材の硬さに依存せずほぼ同等の値を示すことが分かった。また、硬さ分布は接合部を中心に上に凸の分布を示していた。一般的な 7075 合金の FSW での接合材の断面硬さ分布は、微細析出物が再固溶するために、下に凸となるが、本研究で認められた硬さ分布は上に凸であり、接合部の硬さを増加できるような接合手法であると考えられる。この理由としては、結晶粒微細化もしくは微細析出物の増加が考えられる。

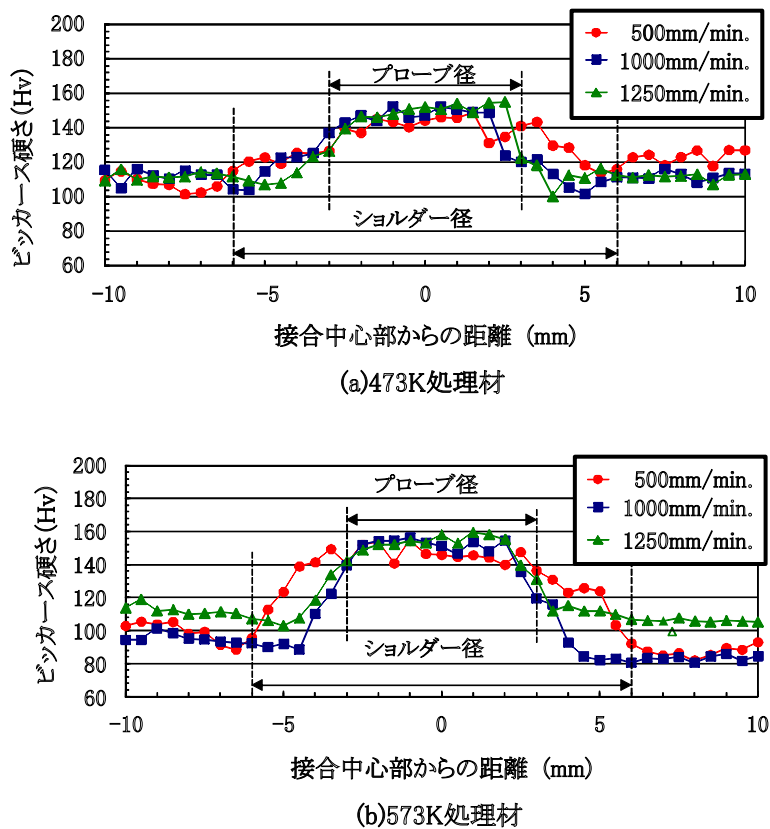


図 13 接合材の断面硬さ測定結果

5. まとめ

本研究では、析出物の制御とセラミックツールの適用により、FSWの接合が困難であるとされる7000系のアルミニウム合金について、欠陥の発生がなく、接合部の硬さが向上するような方法を検討した。

その結果、粗大な析出物が存在する473K処理材では、空隙や流動不良の内部欠陥が認められたが、析出物が微細に分散した573K処理材では欠陥の発生が認められなかった。このことから、析出物の大きさの相違に伴い変形抵抗の影響があると考えられる。また、本研究で検討したFSWの方法では、硬さ分布が接合部で増加し、一般的な硬さ分布の傾向とは逆の傾向が認められた。

以上から、析出物をナノ微細分散した後に完全再結晶化を行い、施工時に蓄熱性のあるセラミックツールを用いることにより、高強度アルミニウム合金のFSWでの接合性は向上できると考えられる。

今後は、接合部の金属組織を観察して欠陥の発生メカニズムを調べるとともに接合強度を確認する予定である。

文献

- 1) 鈴木康文：アルミニウム合金による鉄道車両の軽量化と今後の課題，軽金属，Vol.60，No.11，pp.565-570，2010
- 2) 松本 二郎：車体軽量化のためのアルミニウム合金の適用とその溶接の問題点，圧力技術，Vol.31，No.3，pp. 154-168，1993
- 3) 塔本 徹，阪口 章：アルミニウム合金製車両について，溶接学会誌，Vol.40，No.6，pp. 506-522，1971
- 4) 柴柳敏哉：摩擦攪拌接合の材料組織学的描像，軽金属，Vol.57，No.9，pp.416-473，2007
- 5) 岡村久宣，青田 欣也，高井英夫，江角昌邦：摩擦攪拌接合（FSW）の開発状況と適用上の課題，溶接学会誌，Vol.75，No.5，pp. 436-444，2003
- 6) 鈴木信行，地西 徹：7475 アルミニウム合金の超塑性成形に伴う摩擦攪拌接合部の変形，軽金属，Vol.54，No.12，pp.551-555，2004
- 7) 石川 武，藤井英俊，玄地一夫，岩木俊一，松岡茂樹，野城 清：オーステナイト系ステンレス鋼の高品質・高速度摩擦攪拌接合，鉄と鋼，Vol.94，No.11，pp.539-544，2008
- 8) 岡村久宣：摩擦攪拌接合（FSW）の特徴と日本における適用状況，溶接学会誌，Vol.69，No.7，pp.565-571，2000