

## 鉄道車両用アルミニウム合金の異材摩擦攪拌接合

Dissimilar Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Railway Vehicle

橋本 健司 Kenji HASHIMOTO  
河田 直樹 Naoki KAWADA

石川 武 Takeshi ISHIKAWA  
藤井 英俊 Hidetoshi FUJII

Al合金製鉄道車両構体では主にA6N01合金とA7N01合金が用いられている。A6N01合金は、Al合金の中で中強度で、良好な押出性を有することから、屋根や側構体に様々な形状の押出形材が使用される。一方、A7N01合金はAl合金の中で高強度であり、かつ溶接部が自然時効により母材強度近くまで回復するため、信頼性が要求される台枠に中板材として使用される。本報では、側構体（A6N01合金）と台枠（A7N01合金）の構体結合におけるFSW適用を目指し、A6N01/A7N01継手の組織と機械的特性を調査した結果を報告する。

A6N01 and A7N01 aluminum alloys are often used in several railway car bodies as structural materials. A6N01 has a medium strength and good formability as an aluminum alloy, so it is applied as an extruded alloy of various shapes on the side or roof panels. On the other hand, A7N01, which is a high strength aluminum alloy, is used as the underframe that requires a high reliability. However, in the dissimilar welding between A6N01 and A7N01, the mechanical properties of the joints have not been clarified although necessary for understanding the effect of FSW on them. In this investigation, as a feasibility study, we evaluated the microstructure and mechanical properties of dissimilar A6N01/A7N01 joints.

### 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、アーク溶接と比較して変形量が数分の一以下であることや、気孔、割れなどが発生しにくいなどの特徴をもつ。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り、Al合金<sup>(1)-(4)</sup>やMg合金<sup>(5)</sup>などの軽量金属に関する研究例が多数報告されている。

Al合金製鉄道車両構体には、主にA6000系のA6N01合金（Al-Mg-Si）と、A7000系のA7N01合金（Al-Zn-Mg）が用いられる。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・側構体に中空押出形材が適用される。一方、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板材が用いられている。側構体（A6N01合金）と台枠（A7N01合金）の構体結合にFSWの適用を考えた場合、A6N01/A7N01継手の組織と機械的特性を把握しておく必要がある。本報では、それらを調査した結果を報告する。

### 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はおこなわれる。

供試材は、板厚3mmのA6N01-T5およびA7N01-T5合金押出形材を用いた。供試材の化学成分を表1に示す。接

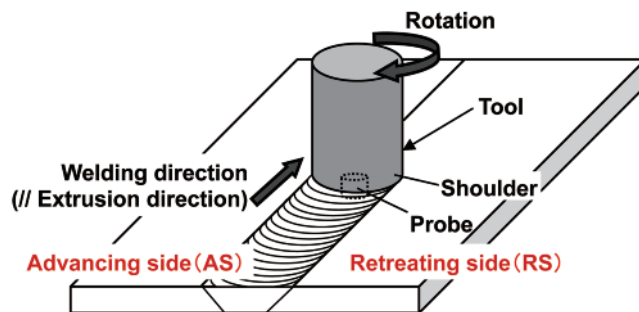


図1 FSWの模式図

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   |
| A6N01 | 0.53                           | 0.07 | 0.10 | 0.07 | 0.68 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | -    | Bal. |
| A7N01 | 0.08                           | 0.20 | 0.16 | 0.36 | 1.3  | 0.09 | 4.4  | 0.02 | 0.20 | Bal. |

表2 接合条件

| Tool tilt<br>(°) | Rotation speed<br>(rpm) | Welding speed<br>(mm/min.) | Welding length<br>(mm) |
|------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------|
| 3                | 1500                    | 600                        | 400                    |

合ツールは、SKD工具鋼製のショルダ径20mm、プローブ径M6とし、位置制御方式で接合をおこなった。接合条件は表2のとおりで、接合方向は供試材の押出方向と平行方向とした。図1に示したように、接合ツールの回転方向と接合方向が一致する側を前進側（Advancing Side, AS）、反対を向いている側を後進側（Retreating Side, RS）と呼ぶ。FSWは、ASとRSで左右非対称の塑性流動現象が生じ、また接合中の最高到達温度が変化することが知られている。したがって、本実験ではASとRSにA6N01合金とA7N01合金をそれぞれ配置した場合について検討をおこなった。ASにA6N01合金を配置した継手をA6N01/A7N01（AS/RS）、ASにA7N01合金を配置した場合をA7N01/A6N01（AS/RS）と記載する。また、比較のために同種合金継手も作製した。

接合部の組織は、接合方向と垂直な面を観察面として、光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡を用いて評価した。腐食液には、ケラー氏液（塩酸20ml＋硝酸20ml＋弗酸5ml＋蒸留水20ml）を用いた。母材および継手攪拌部の集合組織は、押出方向または接合方向と垂直な面を観察面として、EBSD（electron back-scatter diffraction pattern analysis）を用いて評価した。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、測定

荷重1.96N、荷重保持時間10sの条件で測定した。測定位置は板厚中心部（centerと記載する）と板上下面から0.2mmの位置（それぞれtop, bottomと記載する）とした。引張試験片形状は、接合方向と垂直方向に切り出したJIS Z 3121 1A号試験片とした。

### 3 実験結果および考察

#### 3. 1 断面組織

図2に同種合金継手と異種合金継手の断面マクロ組織を示す。各継手の接合部において、内部欠陥等は観察されなかった。攪拌部にはFSW特有の組織であるオニオンリング（同心円状の模様のこと、玉葱の断面に似ていることからそう呼ばれる）が観察され、各継手でその形状は酷似していた。これは、ツールが一回転する間に進む距離、つまり回転ピッチ（接合速度/ツール回転数）が同一であるからである。また、図2（c）（d）に示すように、異種合金継手の攪拌部はA6N01合金とA7N01合金が完全に混ざり合っておらず、不均一な組織を呈していた。これは、FSWはアーク溶接のように材料の溶融を伴わず、固相状態で接合が達成されるからである。

図3に母材および同種合金継手攪拌部のEBSDマップを示す。このマップは、電子線を照射している点の回折パターン（菊池線と呼ばれる）に合致する結晶方位を割り出したものであり、方位が同じ結晶は同じ色で描画さ

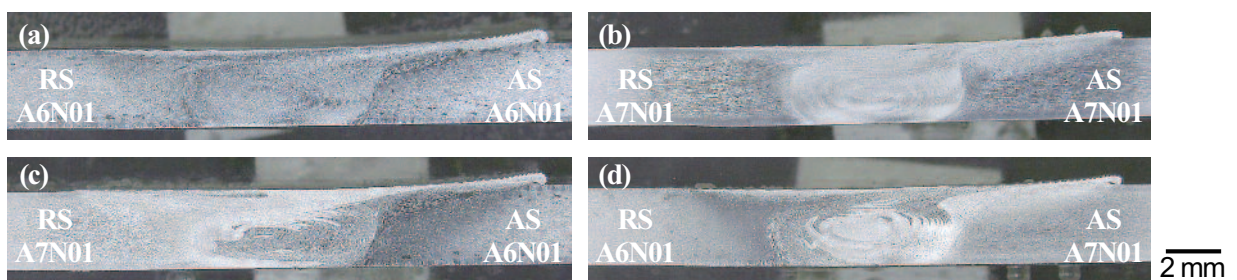


図2 継手の断面マクロ組織：（a）A6N01/A6N01，（b）A7N01/A7N01，（c）A6N01/A7N01（AS/RS），（d）A7N01/A6N01（AS/RS）。



れる。得られた結晶方位データから、相の同定や粒径評価など、多様な組織評価に展開でき、更には継手の高機能化のための組織制御指針を得ることができる。図3 (a) に示すA6N01合金母材は、平均結晶粒径が約 $50\mu\text{m}$ であり、結晶方位は $\{001\}$  (赤色) を優先方位とする集合組織が形成されていることがわかる。これにFSWを施すと [図3 (c)], FSW中に動的再結晶が生じ、結晶粒が約 $18\mu\text{m}$ まで微細化された。結晶方位は、圧縮変形の際の最終安定方位である $\{011\}$  (緑色) と、せん断変形特有の $\{111\}$  (青色) 方位領域が存在しており、FSW中に複雑な応力場が生じていることが示唆される。また、図3 (b)

に示すように、A7N01合金母材は数 $\mu\text{m}$ 程度の伸長した繊維組織であり、 $\{001\}$ と $\{112\}$  (紫色) を優先方位とする集合組織が形成されている様子がわかる。これにFSWを施すと [図3 (d)], 組織は約 $5\mu\text{m}$ の等軸粒となり、また層状に周期的な方位変動が確認される。この周期変動は $\{111\}$ と $\{001\}$ の2種類の主方位が交互に現れるものであり、これは強いせん断変形や塑性流動の影響で生じたと考えられるが、詳細は不明である。これらの結果が示すのは、A6N01合金およびA7N01合金は固溶・析出形態が様々であるので、FSW中における結晶粒の変形や回転挙動に違いが生じ、結果的に合金系により動的再結晶

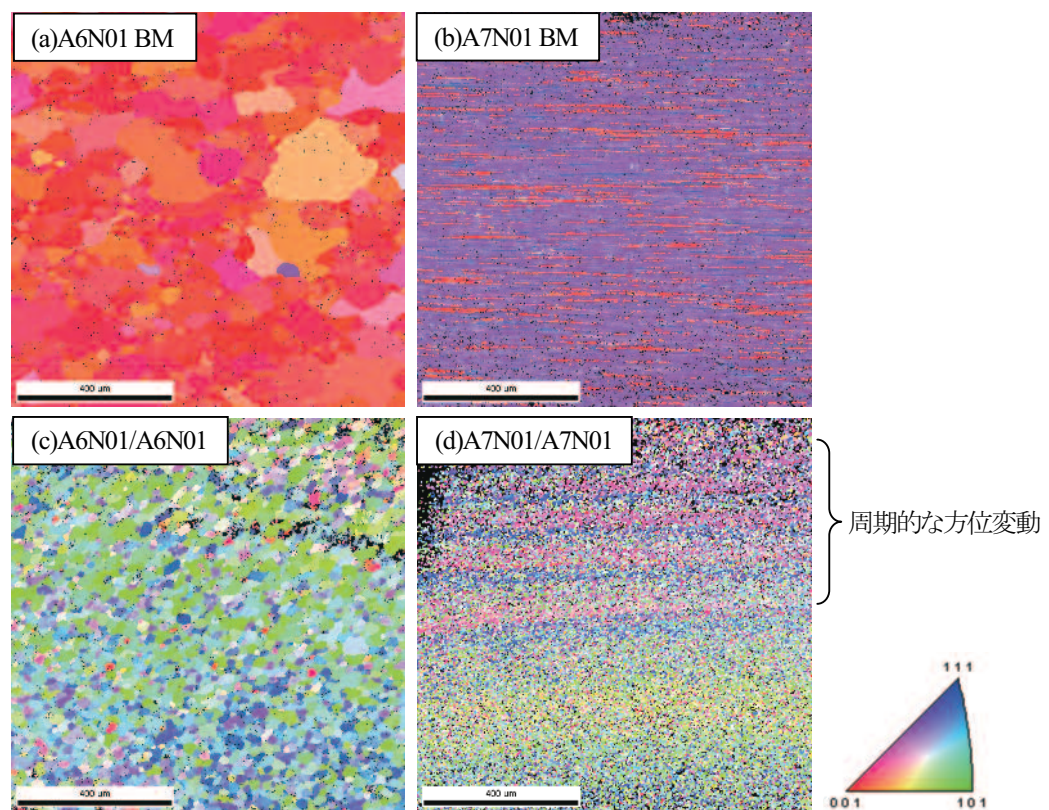


図3 母材および同種合金継手攪拌部のEBSDマップ： (a) A6N01合金, (b) A7N01合金, (c) A6N01/A6N01, (d) A7N01/A7N01.

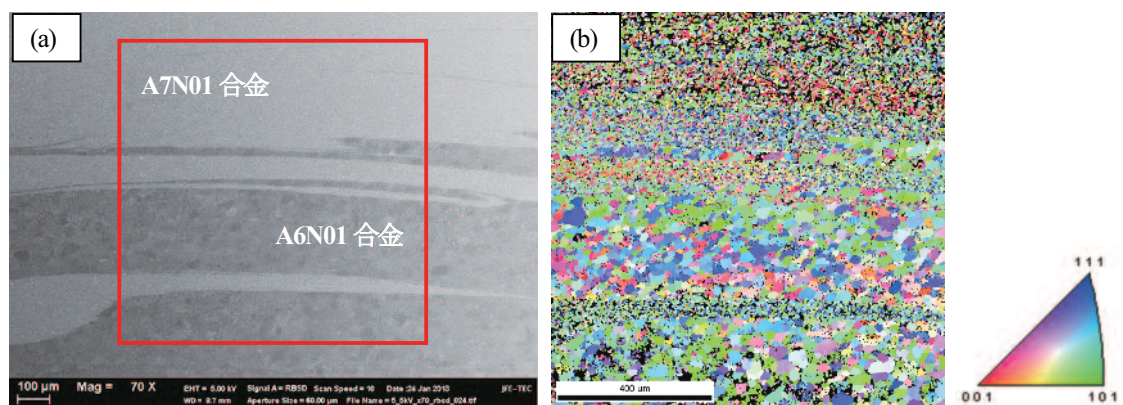


図4 A6N01/A7N01 (AS/RS) 異種合金継手攪拌部の組織： (a) SEM像, (b) EBSDマップ。

や集合組織形成過程が異なるということである。

図4 (a) にA6N01/A7N01 (AS/RS) 異種合金継手攪拌部のSEM像を示す。明るいコントラストで示されるのがA7N01合金、暗いコントラストがA6N01合金に対応する。この結果からも、異種合金継手の攪拌部は、ASとRSに配置した材料が互いに混ざり合わず、不均一な組織であることが確認できた。SEM像の赤枠領域のEBSDマップを図4 (b) に示す。A6N01合金およびA7N01合金に対応する領域の結晶粒径はそれぞれ同種合金継手攪拌部のものと同等であった。すなわち、異種合金継手の攪拌部組織は、同種合金継手の攪拌部組織で構成されていると言える。

### 3. 2 継手の機械的特性

図5 (a) (b) にA6N01/A6N01, A7N01/A7N01のビッカース硬さ分布を示す。A6N01合金とA7N01合金の母材硬さはそれぞれ103Hv, 126Hvであった。A6N01/A6N01およびA7N01/A7N01の接合部は母材硬さから軟化しており、軟化域の硬さはそれぞれ69 Hv, 108 Hvを示した。

ここで、A6N01合金およびA7N01合金は時効硬化により強度を発現する熱処理型合金であり、下記のように複雑な時効析出挙動を示す。

A6N01合金：

SSS→GPゾーン→ $\beta''$ 相→ $\beta'$ 相→ $\beta$  ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ ) 相

A7N01合金：

SSS→GP (I) ゾーン→GP (II) ゾーン→準安定相 $\eta'$ →安定相 $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ )、または、T'相→T' $\{\text{Mg}_{32}(\text{Al}, \text{Zn})_{49}\}$ 相

図3で示したように、継手攪拌部の結晶粒は動的再結晶により母材と比較して微細になっていた。一般に、結晶粒径と強度（硬さ）に関してはHall-Petch則が成り立ち、結晶粒径が小さくなるほど強度は上がることがよく知られているが、本結果では逆の現象が起きている。この軟化は、A6N01合金とA7N01合金の強度を支配する上記の微細析出物が、FSW中の入熱によって母相中に再固溶するために生じるものである。また、図5 (c) (d) に示すように、異種合金継手の硬さ分布は、同種合金継手の

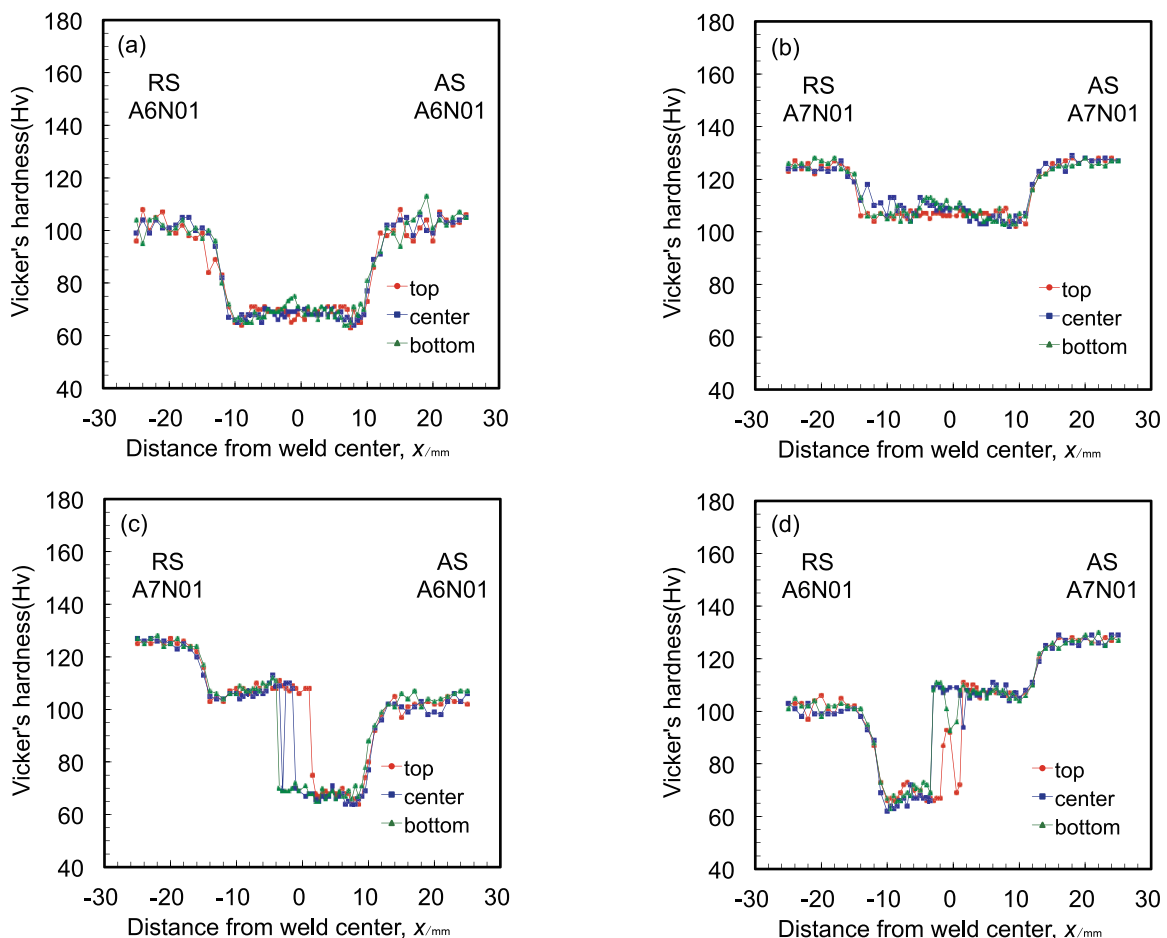


図5 ビッカース硬さ分布：(a) A6N01/A6N01, (b) A7N01/A7N01, (c) A6N01/A7N01 (AS/RS), (d) A7N01/A6N01 (AS/RS)。

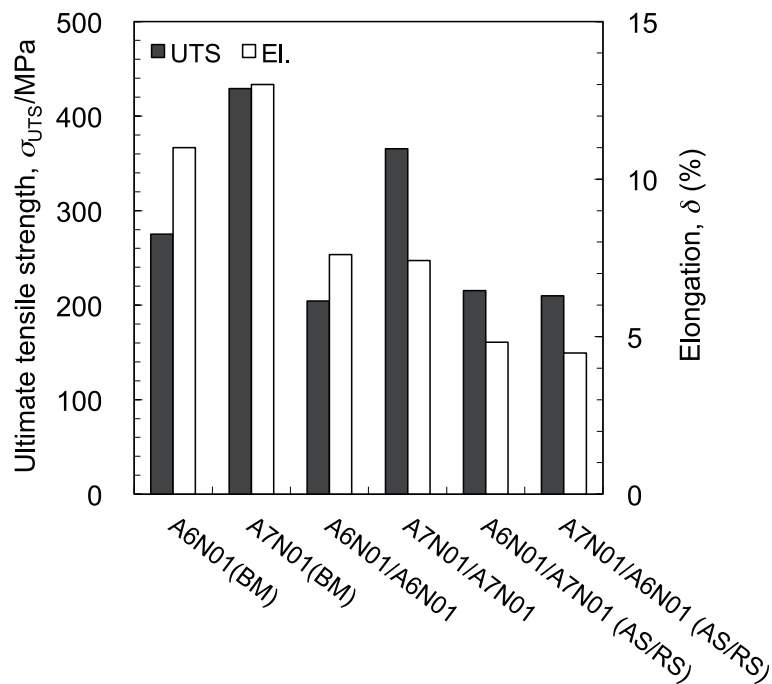


図6 母材およびFSW継手の引張特性

硬さ分布で構成されており、最軟化域の硬さはA6N01合金における軟化域の硬さに対応する。また、接合線中心 ( $x=0\text{mm}$ ) 付近では、板上部 (top) から下部 (bottom) にかけて、不均一な硬さ分布を示しているが、これは板厚方向で塑性流動現象が異なることに起因している。

図6に母材およびFSW継手の引張試験結果を示す。A6N01/A6N01の引張強度は204MPaであり、継手効率 (母材強度に対する継手強度の割合) は74%であった。一方、A7N01/A7N01の引張強度は365MPa、継手効率は85%であった。A6N01/A7N01 (AS/RS) とA7N01/A6N01 (AS/RS) の引張強度はそれぞれ215MPa、210MPaであり、A6N01/A6N01の引張強度とほぼ同等の値であった。異種合金継手の引張試験片の破断位置は、図5 (c) (d) に示したA6N01合金の軟化域に対応する最軟化域であることから、異種合金継手の引張強度は最軟化域の硬さに支配される<sup>(6,7)</sup>とすることができる。ここで、FSW時の材料の温度履歴を模式的に表したものを図7に示す。最高到達温度 ( $T_{\text{max}}$ ) が固溶温度 (Solid solution temp.) まで上昇する [図7 (a)] ことで、微細析出物が母相中に再固溶し、継手強度は低下する。したがって、継手強度の向上を図るには、図7 (b) に示すように  $T_{\text{max}}$  を固溶温度以下に抑えることが重要である。Frigaardらによると、FSW時に材料に投入される熱量  $Q$  (W) は次式で表すことができる。

$$Q = \frac{4}{3} \pi^2 \mu P N R^3 \quad (1)$$

ここで、 $\mu$ : 摩擦係数、 $P$ : 攪拌部の圧力 ( $\text{N/m}^2$ )、 $N$ : ツール回転数 ( $\text{s}^{-1}$ )、 $R$ : ショルダ径 (m) である。(1) 式から、 $T_{\text{max}}$  を固溶温度以下にするには、圧力  $P$  とツール回転数  $N$ 、ショルダ径  $R$  を小さくし、低入熱条件で接合をおこなうことが有効である。また上式は、接合ツ

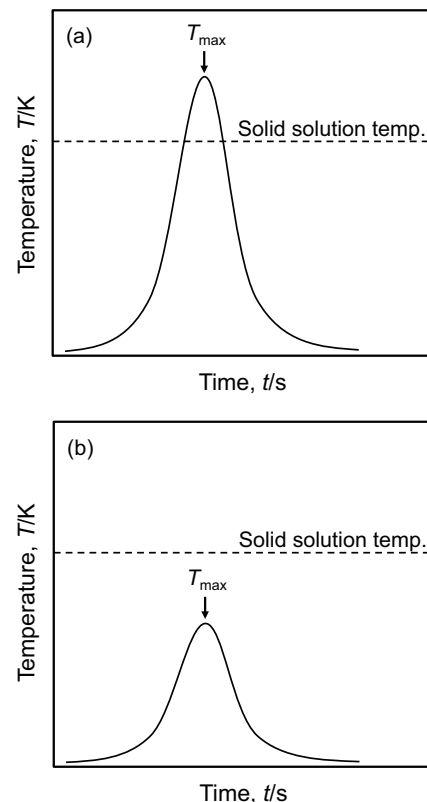


図7 FSW時の温度履歴



ルを移動させない場合のモデルであるので接合速度 $V$ の概念がないが、 $V$ を大きくすることでも低入熱での接合が可能となる。

#### 4 まとめ

- ・異種合金継手の撹拌部組織は同種合金継手の撹拌部組織で構成されており、不均一な組織を呈していた。
- ・A6N01, A7N01をASとRSのどちらに配置しても、異種合金継手の引張強度は、A6N01/A6N01と同等とみなすことができる。
- ・異種合金継手の引張特性は最軟化域の硬さに支配されることから、継手強度の向上のためには、低入熱条件でFSWをおこない、FSW時の最高到達温度 ( $T_{\max}$ ) を微細析出物の固溶温度以下に制御することが重要である。

#### 参考文献

- (1) 橋本健司, 他: 「A6N01/A7N01合金摩擦撹拌接合継手の組織と機械的特性」, 溶接学会全国大会講演概要, 92 (2013) 52-53.
- (2) 橋本健司, 他: 「A6N01/A7N01異材摩擦撹拌接合継手の機械的特性に及ぼすツール形状と狙い位置の影響」, 溶接学会全国大会講演概要, 93 (2013) 96-97.
- (3) 橋本健司, 他: 「鉄道車両製造における摩擦撹拌接合の利用拡大」, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 19 (2012) 611-612.
- (4) 橋本健司, 他: 「窒化ケイ素製ツールを用いた鉄道車両用A7N01合金の摩擦撹拌接合」, 総合車両製作所技報, 1 (2013) 10-14.
- (5) Juan Chen, Hidetoshi Fujii, Yufeng Sun, Yoshiaki Morisada, Katsuyoshi Kondoh, Kenji Hashimoto, “Effect of Grain Size on the Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Non-combustive Magnesium Alloys”, Mater. Sci. Eng. A, 549 (2012) 176-184.
- (6) H. J. Liu, H. Fujii, M. Maeda and K. Nogi, “Tensile Properties and Fracture Locations of Friction Stir Welded Joints of 2017-T351 Aluminum Alloy”, J. Mater. Proc. Tech., 142 (2003) 692-696.
- (7) H. Liu, M. Maeda, H. Fujii and K. Nogi, “Tensile Properties and Fracture Locations of Friction-stir Welded Joints of 1050-H24 Aluminum Alloy”, J. Mater. Sci. Lett., 22 (2003) 41-43.

#### 著者紹介



橋本健司  
生産本部  
技術部 (接合技術センター)



河田直樹  
博士 (工学)  
生産本部  
技術部 (接合技術センター) 主査



石川 武  
博士 (工学)  
生産本部  
技術部 (接合技術センター) 課長



藤井英俊  
博士 (工学)  
大阪大学  
接合科学研究所 教授