

6061 アルミニウム合金 FSW 継手の高温特性

日大生産工（院）

玄永 正幸

日大生産工

金子 純一，菅又 信，久保田 正広

1. 緒言

摩擦攪拌接合（Friction Stir Welding：以下 FSW）は現在，実用化されている溶接・接合法の中で最も新しい接合プロセスである。FSW は固相接合の一種であるため，溶融溶接と比べて，接合による熱歪みが小さい，気孔・割れなどの欠陥が発生しにくい，外観的にきれいなどの特徴がある。同じ固相接合である摩擦圧接と比べると，FSW では接合する材料の形状に対する自由度が高く，板材の接合が可能である。また，FSW は酸化防止対策を要しない。これらのことから FSW はアルミニウム合金の接合に適しているため，アルミニウム合金製鉄道車両の構体の接合にすでに適用されている。Fig.1 に FSW の概略図を示す。

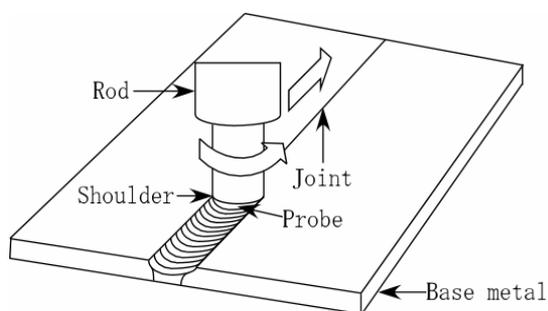


Fig.1 Outline figure of FSW.

FSW では，現在までに室温では信頼性の高い優れた継手が得られている。しかし，FSW の利用範囲が広がってくると，室温ばかりではなく，高温域における特性を把握する必要がでてくる。しかし，FSW 継手の高温域における機械的特性

や組織変化についてはほとんど明らかにされていないのが現状である。そこで本研究では，中強度で耐食性や溶接性に優れる A6061 合金を母材に選び，その FSW 継手の高温特性を引張試験及びクリープ試験により評価し，母材のそれと比較検討した。

2. 実験方法

供試材には，Al-Mg-Si 系合金で最高硬さまで時効硬化させた A6061P-T651(厚さ 20mm)を用いた。Table 1 に合金成分の主な組成値を記す。

Table 1 Alloy composition of base metal.

Material	composition (mass%)				
	Mg	Si	Fe	Cu	Cr
A6061	0.98	0.58	0.41	0.27	0.25

FSW は板の突合せ部を圧延方向と平行方向に 200mm/min の速度で行った。なお，X 線透過検査によって接合欠陥がないことを確認した。継手の接合部付近について，ビッカース硬さ試験を行った。切り出した FSW 板横断面の接合部を中央にして，板幅方向に 0.5mm 間隔で 50mm 測定した。試験荷重は 100gf，保持時間は 15s とした。

引張試験には，全長 90mm，平行部直径 5mm，標点距離 25mm の円形断面試験片を用いた。クリープ試験片の形状は Fig.2 に示すように，全長 120mm，平行部直径 10mm，標点距離 50mm とした。両端のねじ部は，M18 のつば付円形断面試験片とし，標点外での破断を防ぐため標点

High temperature properties of FSW joints of 6061 aluminum alloy

Masayuki GENEI, Junichi KANEKO, Makoto SUGAMATA and Masahiro KUBOTA

外での平行部直径は 10.2mm とした .引張試験片 ,クリープ試験片とも長手方向が圧延方向と直角になるように採取した .また FSW 継手については接合部が標点間中央に位置するように機械加工した .

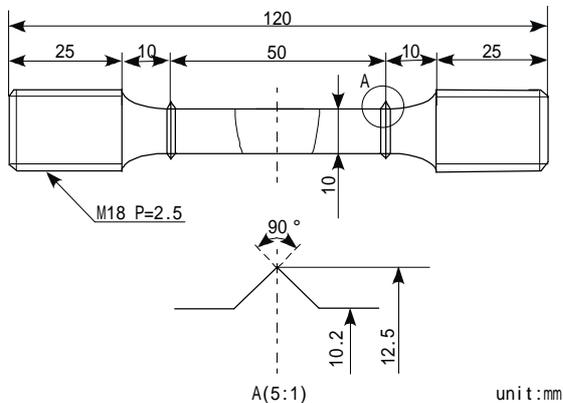


Fig.2 Size and dimension of creep test specimens.

引張試験条件は ,引張速度を 3mm/min (初期ひずみ速度 2×10^{-3} /s) 一定 ,温度を室温 ,573K ,623K ,673K ,723K の 5 条件とした .各条件において 2 本ずつ試験を行い ,その平均値を求めた .高温の引張試験については ,試験片近傍が試験温度に達してから 5min 間保持した後 ,試験を開始した .

クリープ試験機は ,たて型単てこ一定荷重方式の引張クリープ試験機を用い ,試験中のクリープひずみは ,試験片左右に取り付けた 2 個のダイヤルゲージにより伸びを読み取り ,両者の平均値より求めた .温度は ,試験片に取り付けたクロメル - アルメル熱電対により連続的に検出し ,試験中の温度変動を所定の試験温度から ± 3 K 以内に保つようにした .試験片近傍が試験温度に達してから 20h 保持後 試験を開始した .試験は破断に至るまで行った .クリープ試験条件を Table 2 に示す .表に丸印を記した 10 条件において ,1 条件につき 1 本ないし 2 本の試験を行った .

Table 2 Conditions for creep tests.

Creep stress	Creep load	Temperature (K)			
		573	623	673	723
MPa	kgf				
31.22	250				
18.73	150				
12.49	100				
9.36	75				

3. 実験結果

3.1 継手の硬さ分布

Fig.3 に FSW 接合部横断面のビッカース硬さ分布図を ,板厚方向の距離別に 3 データ示す .図の横軸は長手方向の距離を示しており ,0 が接合部の中心である .なお母材の硬さは約 100HV であった .接合部は板厚方向の距離によらず約 75HV となっており ,母材部よりも硬さの低下が見られた .接合部両側の熱影響部においてはさらに軟化しており ,最軟化部で約 55HV を示した .また ,FSW 板の裏面へ近づくほど接合部の幅は狭くなっていた .板の表面付近では約 25mm であったが ,裏面付近では約 15mm となっていた .

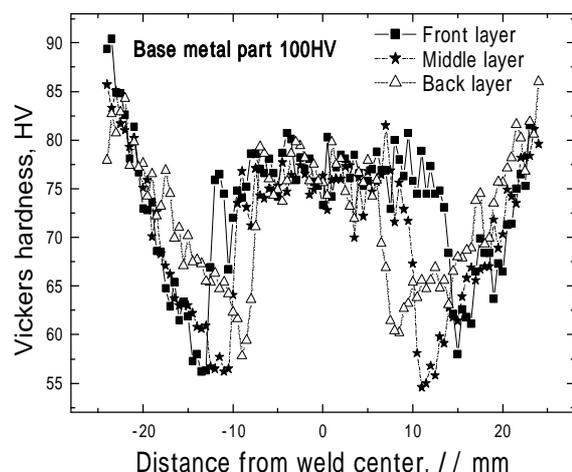


Fig.3 Hardness distributions of the FSW joint.

3.2 引張試験

FSW 継手は、室温、573K、623K では熱影響部で破断し、673K、723K では接合部で破断した。673K で試験後の引張試験片の外観写真を Fig.4 に示す。写真上が母材、下が FSW 継手である。FSW 継手はくびれを伴って破断しており、延性的である。各温度における母材と FSW 継手の引張強さを Fig.5 に、伸びを Fig. 6 に示す。引張強さは母材よりも FSW 継手の方が低い値を示しているが、高温になるほどその差は小さくなった。伸びは 573K を除き母材が FSW 継手よりもわずかに高い値を示しているが、これは引張試験後の試験片を観察したところ、母材は標点間全体で伸びているのに対し、FSW 継手での伸びは、破断部である熱影響部または接合部に伸びが集中しているため、継手全体の伸びとしては母材よりも低い値を示している。外観写真からもわかるように、破断部での局所的な伸びではむしろ FSW 継手の方が母材を上回っている結果が得られた。723K では、その他の条件と比べ大きな伸びを示し、大きくくびれて破断した。

3.3 クリープ試験

FSW 継手は、すべての条件で接合部に破断に至った。母材と FSW 継手のクリープ試験片の一例として、試験荷重 150kgf、試験温度 573K の試験後の外観写真を Fig.7 に、そのクリープ曲線を Fig.8 に示す。FSW 継手は母材に比べてクリープ破断時間は短く、約 5 分の 1 の時間で破断に至った。クリープ破断伸びは、FSW 継手は母材に比べてやや小さいことが認められたが、これも引張試験の結果と同じく FSW 継手はほぼ接合部でのみで伸びているためである。母材、FSW 継手ともに遷移クリープはほとんど認められず、ほとんどの時間を定常クリープが占めた。その後、加速クリープにおいて短時間で急激な伸びの増加をみせて破断に至っており、くびれ伸びが大きいことが認められた。

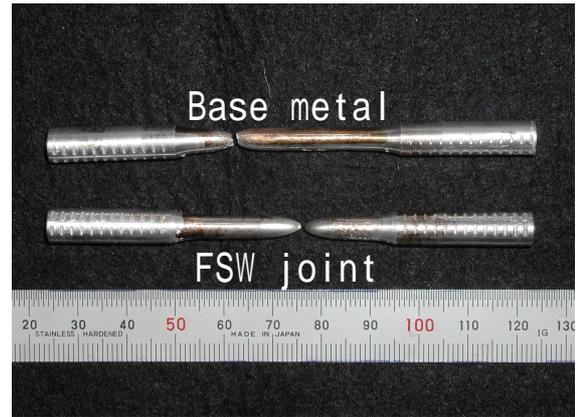


Fig.4 Test pieces of base metal and FSW joint after tensile test at 673K.

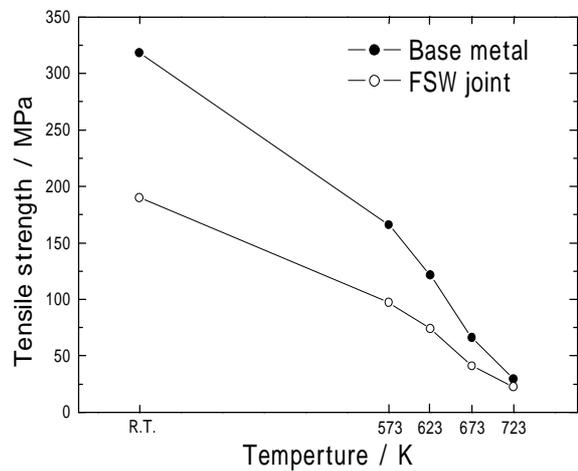


Fig.5 Tensile strength of base metal and FSW joint at various temperatures.

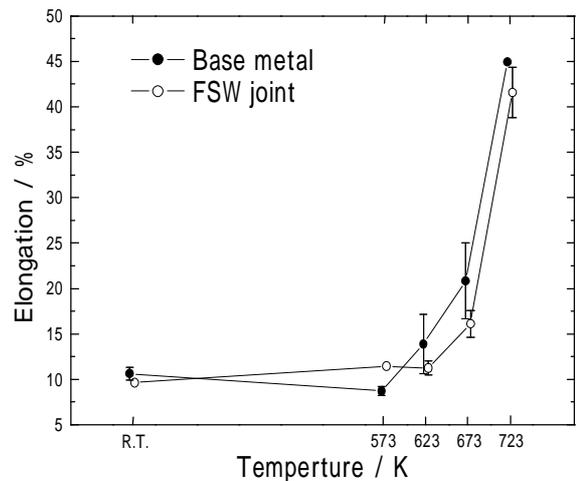


Fig.6 Elongation of base metal and FSW joint at various temperatures.

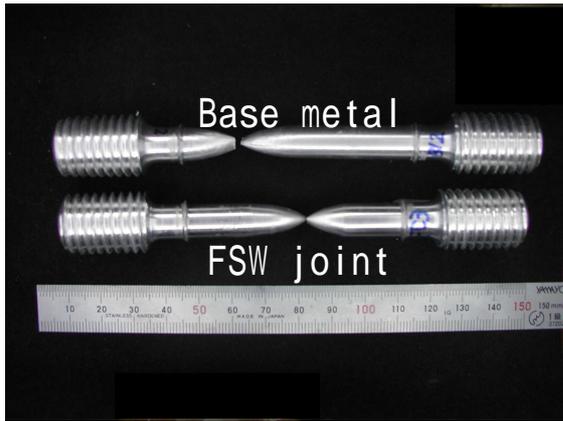


Fig.7 Test pieces of base metal and FSW joint after creep test at 573K-150kgf.

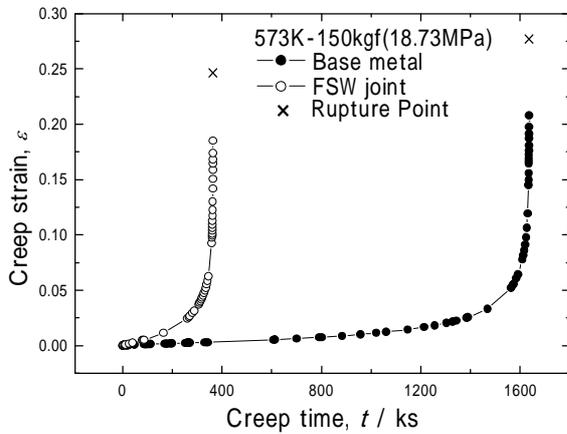


Fig.8 Creep curves of base metal and FSW joint at 573K-150kgf.

各温度における定常クリープ速度の応力依存性を Fig.9 に示す．縦軸の定常クリープ速度は対数表示である．すべての条件において応力が増加するほど定常クリープ速度が大きくなっている．

各試験温度におけるクリープ破断時間の応力依存性を Fig.10 に示す．縦軸のクリープ破断時間は対数表示である．試験温度が高い程，定常クリープ速度が増加するため，クリープ破断時間の応力依存性が顕著に表れた．

以上より，すべてのクリープ条件で FSW 継手は母材に比べて定常クリープ速度が大きく，クリープ破断寿命が短い．これは，FSW 継手からなる構造物を高温荷重下で使用する場合に注意すべき事実と考えられる．

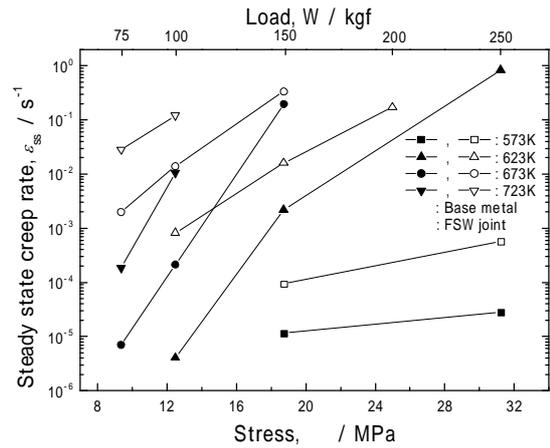


Fig.9 Logarithmic plot of steady state creep rate vs. stress.

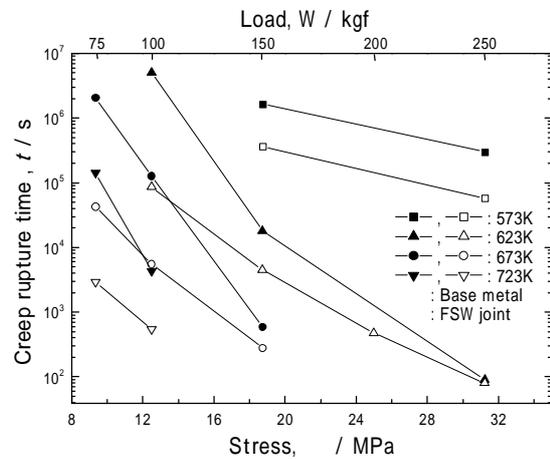


Fig.10 Logarithmic plot of creep rupture time vs. stress.

4. 結言

- (1) A6061P-T651 の FSW 接合部は母材部より約 25%軟化していた．継手としての最軟化部は接合部両側の熱影響部である．
- (2) FSW 継手の引張強さは母材を下回った．しかし，高温になるほどその差は減少し，破断位置は熱影響部から接合部に移った．
- (3) FSW 継手の定常クリープ速度はすべての条件で母材に比べて大きく，1/5 ~ 1/50 の短いクリープ時間で破断した．破断部はすべて接合部であった．
- (4) FSW 継手の接合部は，高温において母材より延性的であり，局部的に大きなくびれ伸びを生じて破断に至った．