

## 各種材料のFSWの特徴と適用

## 第1回

## アルミニウム合金のFSW

中田 一博

大阪大学 接合科学研究所

## 1 はじめに

摩擦攪拌接合法（FSW）は1991年に特許が出願された新しい固相接合法であり<sup>1)</sup>、現在は、おもにアルミニウム（Al）合金において実用化されている。またAl合金以外の金属材料への適用性に関する研究も積極的に実施されてきており<sup>2)</sup>、これまで困難とされてきた鉄鋼材料もFSW接合が可能とされており、その実用化が待たれるところである<sup>3)</sup>。本連載講座では各種金属材料のFSWについて紹介するが、本稿ではまずAl合金のFSWについて、実用的な観点からFSWの基本的な特性を含めて解説する。

## 2 FSWパラメータ

FSWパラメータをまとめると表1のようになる。基本的には突合継手を対象としたものである。大きくはツールに関係するものと、接合条件に関係するものとに分けられる。ツールは、ツール材質とその形状および寸法がおもなものであり、接合される材料の材質やその板厚により決定される。接合条件は、いわゆる一般的な溶接条件に相当するものであり、FSWでは①ツール回転速度、②接合速度、および③ツール押込荷重あるいはツール押

込位置（プローブ挿入深さ）の3つが主たるものである。これ以外に、ツール先端のプローブ挿入角度があるが、これはツール形状にも依存するので、ツールに関するパラメータに入れることができる。なおFSW装置には、荷重制御型と位置制御型の2タイプがあるが、これはプローブ挿入深さを制御するためにツール押込荷重で制御するかあるいはツール押込位置で制御するかの違いであり、それぞれに特徴がある。

FSWの実施に際して、まず被接合材の材質と板厚が決まれば、これまでの経験によりツール材質とツール形状およびツール挿入角度を決めることができる。図1にツール挿入状態の模式図を示す。次に、実際のFSW接合時には、上記の①から③の3つの接合条件を変化させて適正条件を設定することになる。適正条件とは、接合欠陥が無く、継手強度特性が目標値を満足し、かつ接合速度が可能な限り早い条件となるのが一般的である。

図2<sup>4)</sup>（次ページ）にADC12ダイカストAl合金を例にとり、ツール回転速度と接合速度からなる接合欠陥の無い適正接合条件範囲を、異なるツール押込荷重に対して求めた結果を示す。ツール形状などは一定である。荷重が小さい場合は欠陥の無い接合条件はツール回転速度が

表1 FSW接合パラメータ

FSWパラメータ		備考
ツール関係	ツール材質	SKD61, WC-Co, PCBN など
	ツール形状	ショルダー、プローブ
	ツールサイズ	ショルダー径、プローブ径、プローブ長など
	プローブ挿入角度	ツール形状による。 一般的には2～3度の前進角
接合条件関係	ツール回転速度	1000～1500rpm程度 厚板は400～500rpm
	接合速度	板厚と合金の種類による
	ツール押込荷重	荷重制御方式
	ツール押込位置	位置制御方式

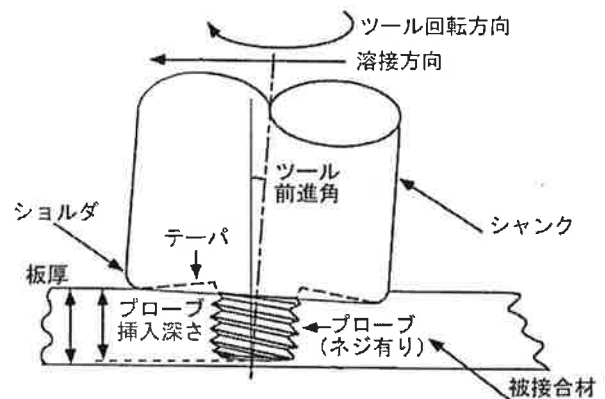


図1 ツール形状と被接合材への挿入状態

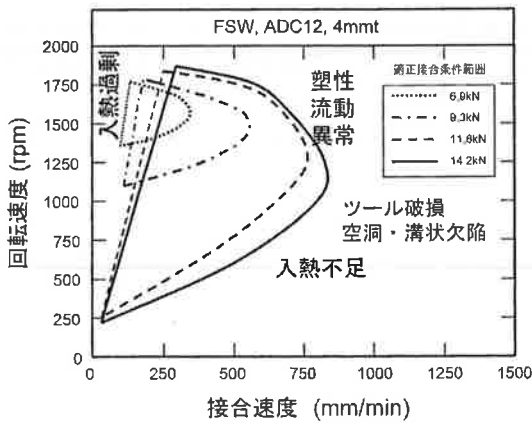


図2 FSW接合パラメータと適正条件範囲(ADC12)

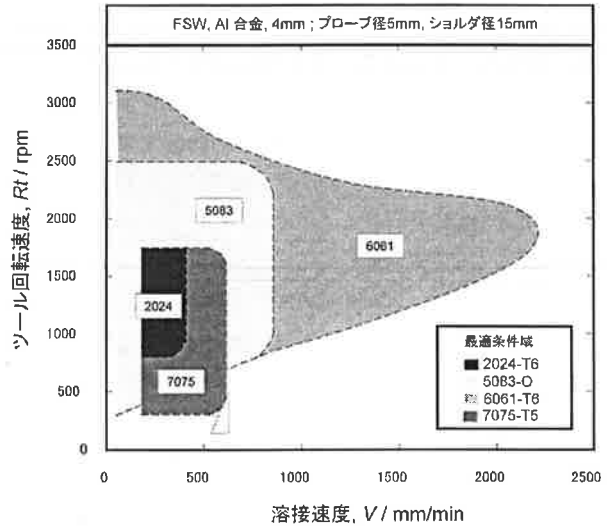


図4 代表的なAl合金展伸材のFSW適正条件範囲

	Cross-section
Advancing side 無欠陥 Retreating side	
トンネル状 空洞欠陥	
溝状欠陥	
キッシングボンド (不完全接合)	
過剰なバリ	

図3 代表的なFSW接合欠陥

速く、接合速度が遅い領域に制限されているが、押込荷重の増加にともない適正条件範囲は低回転速度ならびに高接合速度側にも拡大し、最終的にはほぼ飽和する。

代表的なFSW接合欠陥には、図3に示すようなものがあり、それぞれ適正条件範囲の外側で、特徴的に発生する。すなわち、ツール回転速度が小さく、接合速度が速い条件では、入熱不足のためにトンネル状の内部空洞や溝状欠陥あるいはツール先端のプロープ破断が発生する。また回転速度が速すぎてもショルダー直下と内部との温度差によると考えられる攪拌異常による空洞欠陥が発生する。さらに高回転速度、かつ低接合速度では入熱過剰により異常に多いバリの発生や、固相線温度（共晶温度）の低い2000や7000系では粒界液化による著しい表面荒れが見られる。

このような欠陥の発生傾向は、接合部の温度に依存し、ツールの摩擦発熱による加熱現象に深く関係する。一般にFSWにおけるツール発熱量は次式で与えられる<sup>9)</sup>。

$$Q = (4/3) \pi^2 \mu PNR^3$$

ここに、 $Q$ ：入熱(W)、 $\mu$ ：摩擦係数、 $P$ ：加圧力(N/ $m^3$ )、 $N$ ：ツール回転速度( $s^{-1}$ )、 $R$ ：ショルダー径(m)

移動熱源と考えると、単位接合長あたりの入熱量 $q$ は次式となる。ただし $\alpha$ ：入熱効率

$$q = \alpha Q/V = \alpha N/V$$

すなわち、 $\alpha$ や $\mu$ 、 $P$ 及び $R$ を一定とすると単純に $N/V$ に比例することになる。図2の適正条件範囲の低回転速度・高接合速度側の限界線がこれを意味している。

なお、ツール形状などに関するパラメータが不適切な場合でも同様の接合欠陥が発生するが、適正条件を得ることはより困難となる。またトンネル状内部欠陥や溝状欠陥はツール回転方向と接合方向との相対関係にも依存し、両者が一致する前進側(Advancing side)で発生しやすい。

さらに見落としてはならない接合欠陥に接合部裏面のルート部におけるキッシングボンド(Kissing Bond)、あるいは不完全接合がある。これらの欠陥はX線透過試験でも検出が困難である。プローブ先端位置が十分な深さにまで達していなかった(挿入不足)場合に発生しやすく、ツール形状と接合条件の両方が関係する。

### 3 展伸材

#### 3.1 各種Al合金の適正接合条件範囲

図4<sup>6)</sup>に代表的なAl合金展伸材のFSW適正接合条件範囲(板厚6mm)を示す。一般に6000系合金は条件範囲が広く、接合性は良好であり板厚にもよるが2m/minも的高速接合が可能である。これに対して2000, 5000, 7000系合金では接合条件範囲は狭くなる。このような傾

向は合金の押出加工性と相関性があり、高温における塑性変形抵抗の大小による。また板厚が厚くなればツールサイズやツール形状も変化させる必要があり、一般に低回転速度・低接合速度側に適正条件は移行する。現在では図5<sup>7)</sup>に示すようにA5083合金で板厚25mm程度までの1パス片面接合が可能となっている。

### 3.2 接合部形成組織と硬さ分布

図6<sup>8)</sup>に接合部断面組織をA2024を例として示す。よく知られているように接合部はプロープが通過した部分が攪拌部(SZ, Stir zone)、その周囲に熱的・機械的影響部(TMAZ, Thermo-mechanically-affected zone)、さらにその外に熱影響部(HAZ)があり、母材(BM)に至る。攪拌部は、母材である圧延もしくは押出加工組織とは大きく異なり、結晶粒径が2~3 $\mu$ m程度にまで著しく微細化した再結晶組織を呈する。高速回転するプロープにより激しい塑性流動を受け、動的再結晶現象により微細化する。このため再結晶内には転位組織がほとんど形成されないのが特徴である。再結晶粒は前出の接合入熱の影響を受け、入熱が小さいほど微細化する。また合金元素としてCr, Mn, Zrなどの遷移元素を多く含む合金ほど微細化の程度が著しい。TMAZとHAZは広い意味で熱影響部であるが、TMAZでは母材組織が塑性流動を受け、一部で再結晶粒を含む組織形態を呈するが、HAZはその領域幅が狭く、明確な識別は難しい場合が多い。

熱処理型合金では、上記のマクロ的な組織変化以外に、時効析出に関係するミクロ組織的な変化が発生する。基本的に攪拌部は最高到達温度が析出物の再固溶温度以上となるため析出物の再固溶現象が起こる。TMAZとHAZは温度が十分に高い部分は再固溶、低い部分では過時効による析出物の粗大化現象が起こる。

以上のような組織変化により、接合部の硬さも母材とは異なる値を示すことになる。5000系合金などの非熱処理型合金では、図7<sup>9)</sup>に示すように、母材が焼鈍O材と加工硬化H材とは異なる硬さ分布を示す。加工硬化材では接合部全体が熱影響により軟化するが、O材では攪拌部は母材よりも若干高くなる傾向を示す。しかし両者

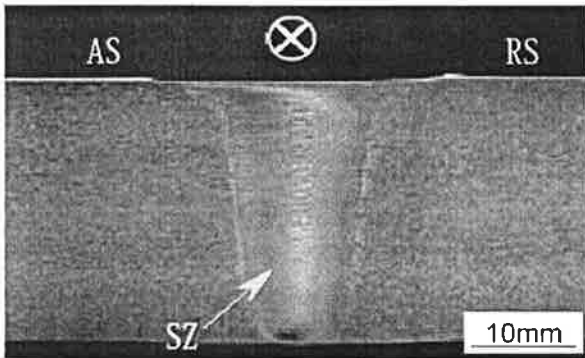


図5 厚板A5083材(25mm厚)のFSW片面接合部断面組織

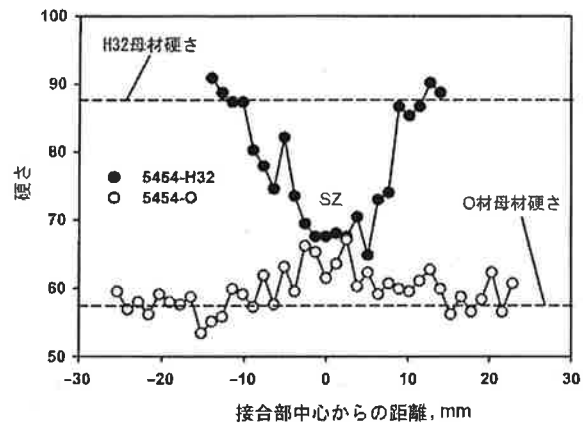


図7 FSW接合部断面硬さ分布(A5454-H32,-O)

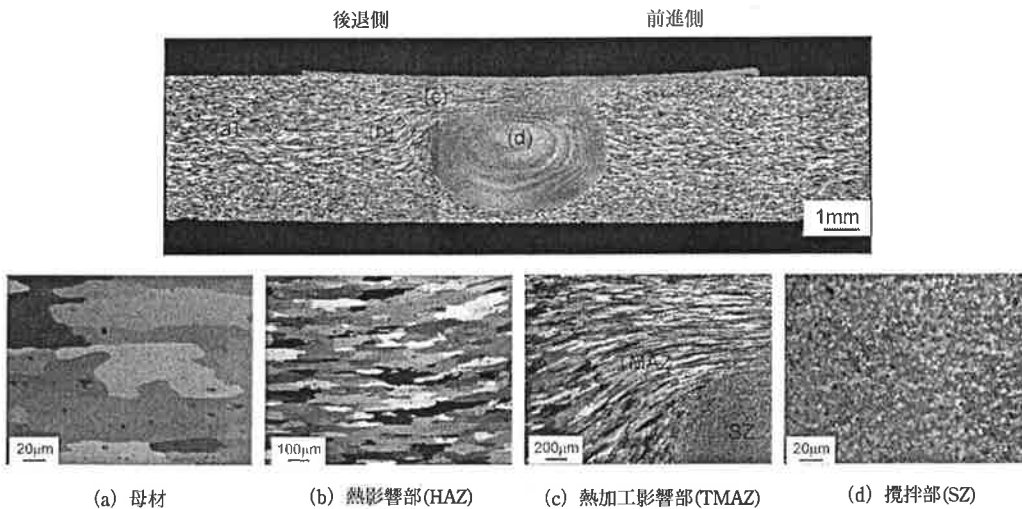


図6 典型的なFSW接合部断面形成組織(A2024)

の攪拌部の硬さはほぼ同程度である。攪拌部の硬さが母材O材よりも若干高くなるのは攪拌部の結晶粒微細化のためであり、降伏応力が結晶粒径の平方根に反比例する、いわゆるホールペッチの法則による。

一方、6000系や7000系で焼入性の良好な熱処理型合金では図8<sup>10)</sup>に示すように接合後に人工時効処理（この場合は175℃）を施すことにより、析出物が再固溶した攪拌部を中心に硬さの顕著な回復が得られる。これは接合後の冷却速度が十分に早いためであり、FSWのプロセスとしての特徴でもある。

いずれの場合でももっとも硬さの低い部分はTMAZか

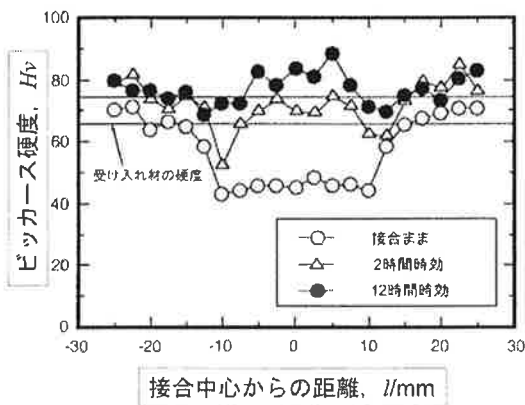


図8 FSW接合部の硬さ分布に及ぼす溶接後の人工時効処理の効果(A6063-T5)

らHAZにかけての部分となる。

### 3.3 機械的性質

表2はこれまでに報告されている代表的なAl合金のFSW継手の引張強度特性をまとめて示す<sup>11,12)</sup>。溶接割れ感受性が高いためにアーク溶接が困難な2000系や7000系合金、熱影響を受けやすい熱処理型合金でも高い継手強度が得られる。

また、FSW継手の疲労強度は、一般にアーク溶接継手に比して高い値を示すのが特長である。図9<sup>13)</sup>にその一例を示す。しかし検出困難なルート部の不完全接合

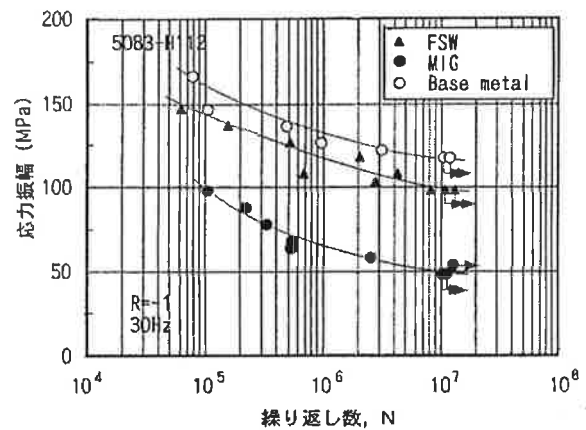


図9 FSW継手の疲労強度例(A5083)

表2 代表的なAl合金のFSW継手強度特性

Al合金	FSW継手					
	母材引張強さMPa	引張強さMPa	0.2%耐力MPa	伸び%	継手効率%	引用
A5083P-O	322	322	152	22	100	掘ら
A6N01S-T5	276	211	137	13	76	掘ら
A7N01S-T5	411	407	300	14	99	掘ら
AA2014-T6	474	378	247	6.5	80	C.J.Dawes
AA7075-T7351	548	384	208	5.5	70	C.J.Dawes

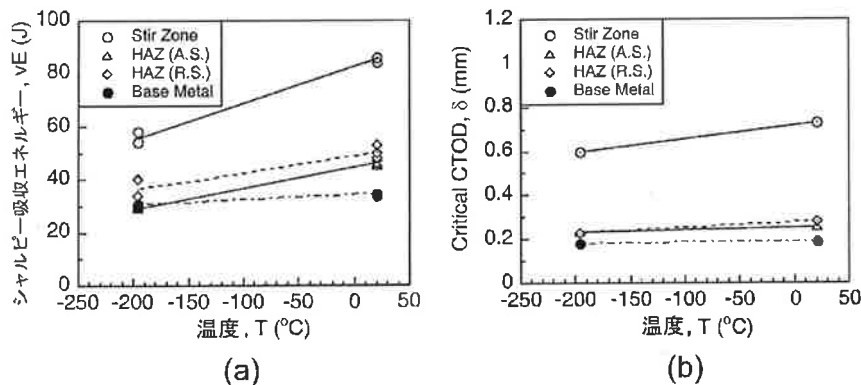


図10 FSW継手の靱性(A5083,25mm)、(a)シャルピー衝撃吸収エネルギー、(b)限界CTOD値

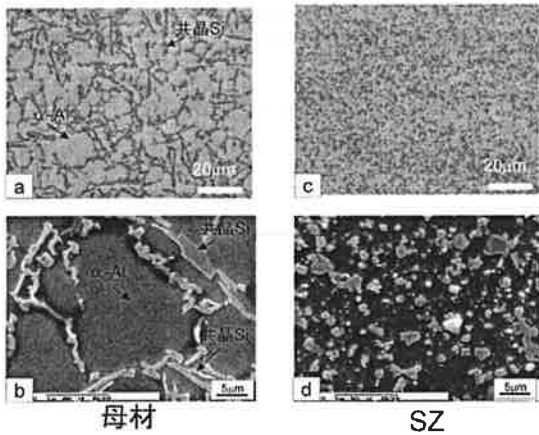


図11 ダイカストAl合金ADC12のFSW接合部組織

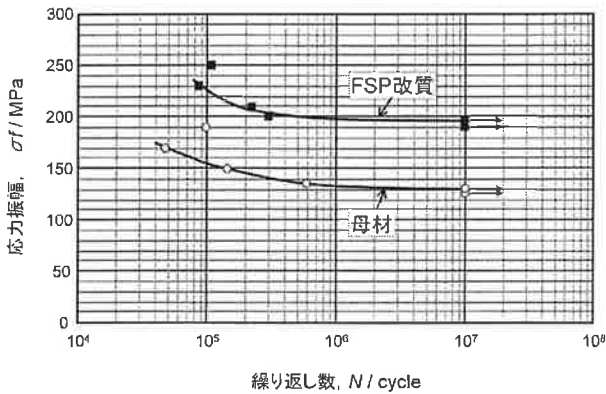


図12 ダイカストAl合金ADC12のマルチパスFSP改質部の疲労強度

部は線状欠陥として疲労強度低下を招くので注意が必要である。

さらに、FSW継手は良好な靱性を示す。図10<sup>14)</sup>は図5に示したA5083合金厚板(25mm)FSW継手の室温および液体窒素温度-196℃におけるシャルピー衝撃吸収エネルギー値(a)と限界CTOD値(b)を示す。母材、HAZ及び攪拌部を比較したものであるが、攪拌部の値はいずれの温度でも母材に比して格段に大きな値を示している。またHAZも母材と同等かそれ以上である。すなわち、FSW継手は室温のみならず、極低温においても極めて優れた靱性を有していることが分かる。

## 4 鋳物

鋳物、ダイカスト、チクソモルディング材などの材料では材料内に必然的に内包されたガスが溶融溶接時に吹き出し、溶接部にはブローホールが発生しやすく、溶融溶接は難しくなる<sup>15)</sup>。このような材料に対しては、固相接合であるFSWが極めて有利であり、材質に依らず接

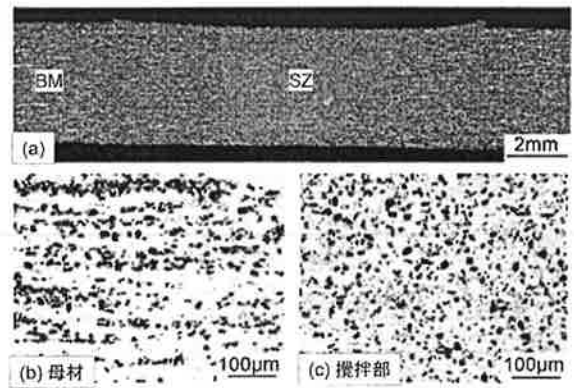


図13 Al基アルミナ粒子分散複合材のFSW継手断面組織

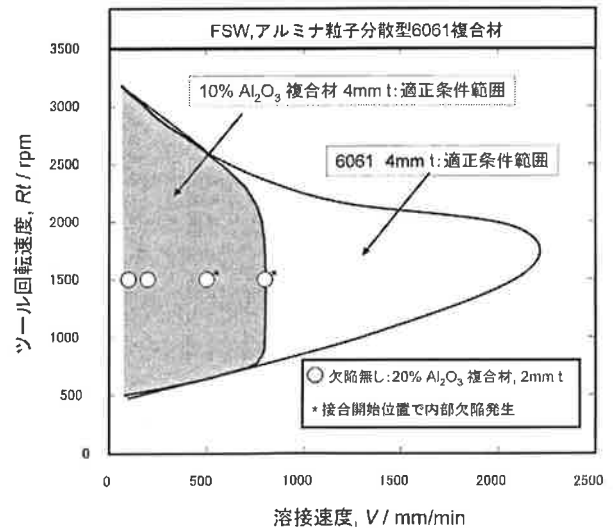


図14 Al基アルミナ粒子分散複合材のFSW適正条件

合が可能である。さらに、接合部では鋳造組織の改質(組織微細化、鋳造欠陥除去)も同時に行える利点がある。図11<sup>16)</sup>はADC12ダイカストAl合金FSWの組織を示す。攪拌部では粗大なシリコン粒子は微細分散し、ダイカスト材特有の欠陥である破断チル層も消滅する。このため接合部の機械的性質は著しく改善され、図12<sup>16)</sup>に示すように疲労強度も増加する。このような効果のために摩擦攪拌プロセス(FSP)の名称で、鋳造組織改質法として注目される。

## 5 Al基複合材

金属基複合材の溶融溶接は困難であり、強化材の分解による気孔の発生や強化材の凝集による劣化等が避けられない。粒子分散型複合材に対しては、FSWが適しており、図13<sup>17)</sup>に示すように、粒子が均一に分散した接合部が得られる。図14<sup>18)</sup>は代表的なアルミナ粒子分散6061合金のFSW適正条件範囲を示す。継手引張試験ではHAZ

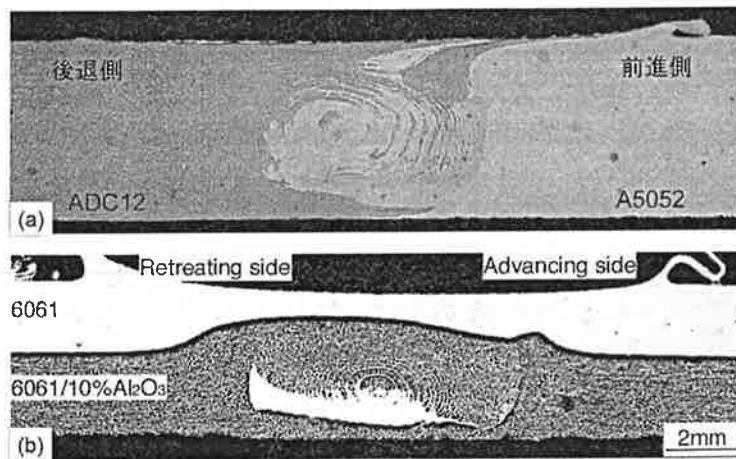


図15 Al合金のFSW異材接合部組織例：(a)ダイカスト材ADC12と圧延材A5052の突合せ継手,(b)圧延材A6061とAl基アルミナ粒子分散複合材の重ね継手

軟化部で破断するが引張強度は母材約320MPaに対して接合のままでは230~250MPa、接合後の人工時効材では280~300MPaまで回復する。強化粒子の種類や含有体積率によっては、FSWのツールの摩滅が著しくなり、この問題の解決が今後の課題である。

## 6 Al合金間の異材接合

合金系の異なるAl合金間の異材接合は比較的容易である。図15は極端な例として、ダイカスト材ADC12と圧延材A5052との突合せ継手(a)<sup>19)</sup>、及びAl合金基MMCとA6061圧延材との重ね継手(b)<sup>20)</sup>の断面組織を示す。いずれも欠陥の無い良好な異材接合継手が得られている。

## 7 おわりに

アルミニウム合金のFSWについてその特徴を、FSWを適用する観点から簡単に取りまとめた。詳細は参考文献を参照されたい。資料を引用させて頂いた関係各位に紙面をお借りしてお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) Thomas, W.M.ら:Friction stir butt welding. International Patent Application No.PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No.9125978.8.
- 2) (社) 溶接学会編：摩擦攪拌接合，産報出版（2006）.
- 3) 中田：溶接技術，55-2(2007),75-81.
- 4) 金 永坤：大阪大学博士学位論文，(2005年12月),23.
- 5) O.Frigaardら：INALCO'98(1998),197-207.
- 6) 中田：摩擦攪拌接合，(社) 溶接学会編,産報出版（2006）,18.
- 7) 古賀ら：溶接技術,51-5(2003),71-73.
- 8) K.Nakataら:ISIJ International, 40(2000), Supplement, S15-S19.
- 9) R.S.Mishra and M.W. Mahoney:Friction Stir welding and Processing,ASM International,(2007)56.
- 10) (社) 溶接学会：摩擦攪拌接合の基礎と応用,FSWシンポジウム，(2005年4月),13.
- 11) C.J.Dawes: Proc. 6th Int. Symp., JWS,(1996), Nagoya.
- 12) 堀ら：軽金属溶接，45-5（2007）,202-210.
- 13) 熊谷ら：軽金属溶接,39-1(2001),22-28.
- 14) M.Mochizukiら:Science and Technology of welding and Joining,11-3(2006),366-370.
- 15) 中田，駒崎：溶接技術,54-2(2006),94-98.
- 16) 金ら：鑄造工学,78-9(2006),451-456.
- 17) 中田：溶接学会誌,72-1(2003),12-15.
- 18) K.Nakataら:Materials Science Forum, Vols.426-432 (2003),2873-2878.
- 19) 立野ら：鑄造工学，78-8(2006),389-395.
- 20) 中田：未発表