

## 各種材料のFSWの特徴と適用

第4回  
FSWによる異材接合

中田 一博

大阪大学 接合科学研究所

## 1 はじめに

FSWは固相接合であるという特徴を生かして異種金属接合法として注目されている<sup>1)</sup>。すなわち、例えば従来溶融溶接では接合が困難であったジュラルミン等の高強度アルミニウム合金（2000，7000系合金）<sup>2,3)</sup>，鋳物およびダイカスト材<sup>4,5)</sup>，複合材料（粒子分散型Al基合金）<sup>6,7)</sup>などがFSWにより接合できるようになったために，既存の溶接可能なアルミニウム合金との新しい異材組合せが可能となっている。また，鉄／アルミニウムに代表されるような溶融溶接では脆い金属間化合物を形成するために溶接が不可能な異材組合せへの期待も大きい<sup>1,8)</sup>。これはすでに述べたようにFSWが連続した接合部が得られる固相接合であることと，接合温度が比較的低く，かつ冷却速度も速いことから，接合界面の脆い金属間化合物層の形成を抑制できる可能性が高いと予想されているからである。

以下にこれまでに報告されている鉄／アルミニウムなどの異種金属接合や同種金属ではあるが異なる合金間の接合，さらに展伸材・鋳物材，複合材など製造法の異なる材料間の異材接合の検討例を紹介する。

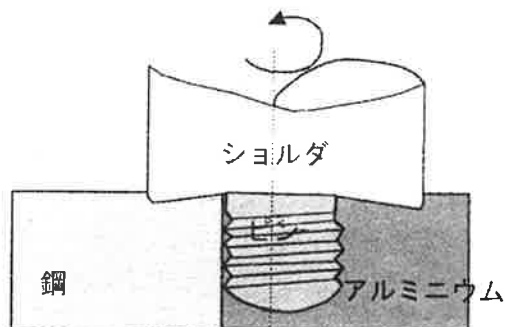


図1 FSWによる異材突合せ接合法の原理（接合部断面とピン挿入位置）<sup>9)</sup>

## 2 異種金属間の異材接合

## 2.1 鉄／アルミニウム

## (1) 鉄／アルミニウム突合せ異材接合

岡本ら<sup>9,10)</sup>は鉄とアルミニウムを接合部で直接攪拌混合した場合に形成される金属間化合物を抑制し，かつ鉄とプローブ（ピン）の接触によるプローブの摩耗を避けるために図1の方法を提案した。すなわち，プローブは鉄の開先面には接触させずに軟らかいアルミニウム側に挿入し，プローブの周囲を塑性流動しているアルミニウムを鉄開先面に押しつけて，拡散現象を利用して両者を接合しようとするものである。図2<sup>9)</sup>はステンレス鋼SUS304とアルミニウム合金6061の異材接合部断面組織であり，界面には拡散層が形成されている。

渡辺ら<sup>11)</sup>は同様の方法ではあるがプローブ（ピン）挿入位置を段階的に変えた実験を行い，図3<sup>11)</sup>を得た。プローブに接触しない条件では岡本らの結果と同様であるが，プローブが鉄側にわずかに食い込んだ状態（0.2mm）で最も高い継手接合強度，約230MPaを得てい

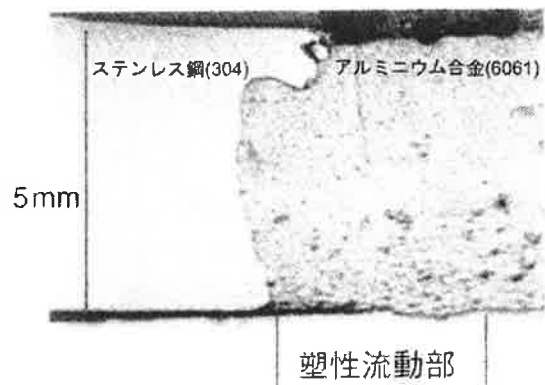


図2 FSWによるステンレス鋼（SUS304）／アルミニウム合金（A6061）突合せ接合部断面組織<sup>9)</sup>

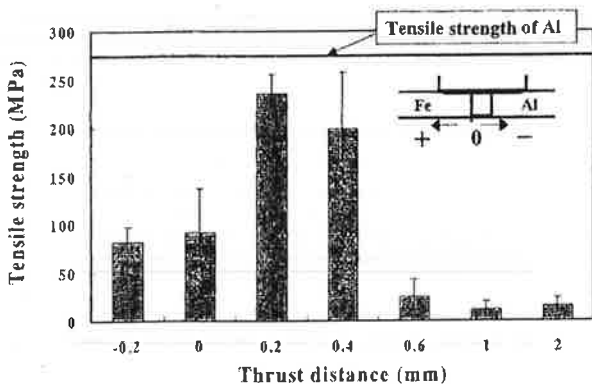


図3 FSWによるSS400軟鋼/A5083アルミニウム合金突合せ継手強度に及ぼすピン挿入位置の影響 (横軸はピンとAl/Fe界面との距離, プラス: 鉄側にピンが食い込んだ状態, マイナス: ピンと鉄が非接触)<sup>11)</sup>

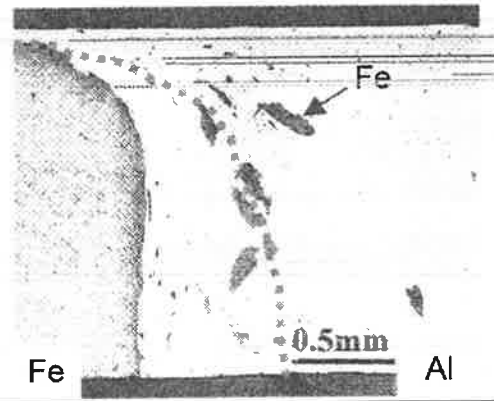


図5 ピンにより削り取られた微小鉄片の摩擦攪拌部への混入状況, 破線は引張試験における継手破断経路<sup>11)</sup>

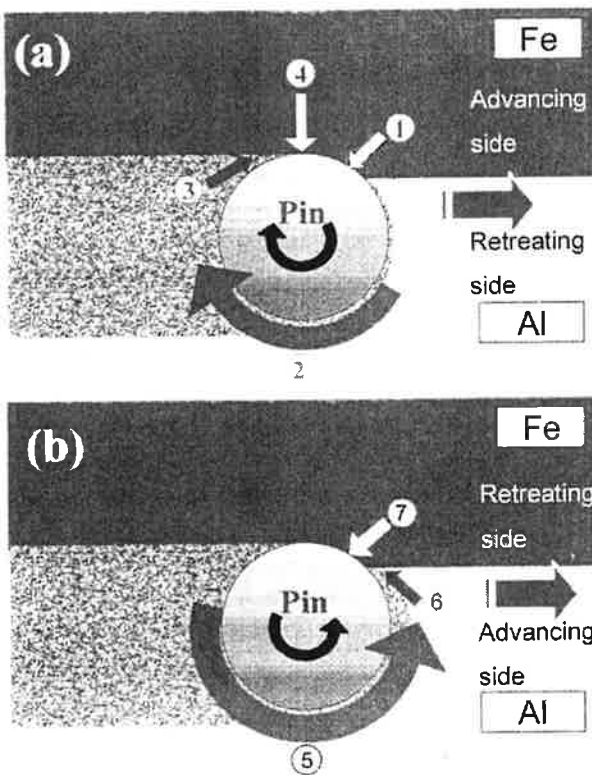


図4 接合性に及ぼすピン回転方向と試片配置の組合せの影響 (著者により再編集)<sup>12)</sup>

る。プローブを鉄の開先面に接触させることによりその表面が清浄化, 活性化されて接合が達成される。この場合, プローブの回転方向と鉄/アルミニウム合金の試片配置との関係が大きく関係し, 図4に示すように, プローブを時計回転方向とした場合, 鉄は溶接方向に対して左側 (Advancing side) に配置しなければならない。福本ら<sup>12)</sup>も同様の結果を得ており, 図4 (a)において①の部分で鉄開先面がプローブにより削られて表面活性化さ

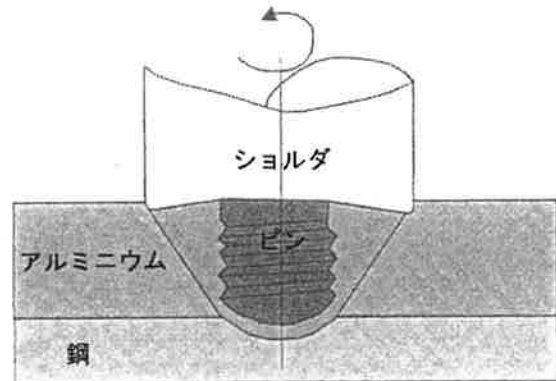


図6 FSWによる鉄/アルミニウム重ね異材継手形成法<sup>13)</sup>

れ, プローブ後方を廻り込んだ塑性流動アルミニウムが③の方向から鉄に押しつけられて④の部分で圧接されると考えられている。同じ配置でプローブが逆回転の場合 (鉄がRetreating sideとなる) では, (b)に示すように塑性流動アルミニウム⑤は⑥で鉄開先面に圧接されるが, ここではまだ開先面は活性化されていないために接合は十分ではなく<sup>11)</sup>, かつ⑦でプローブにより破碎されること<sup>12)</sup>も考えられる。このため健全な接合は達成されない。いずれの場合も注意すべきは図5<sup>11)</sup>に示すように接合部にはプローブにより削り取られた微小鉄片が混入することである。接合界面及びこれら鉄片における金属間化合物の形成は抑制されている<sup>11,12)</sup>。

(2) 鉄/アルミニウム重ね異材接合

FSWを用いて図6<sup>13)</sup>に示す方法で重ね継手による異材シーム溶接の可能性も検討されている。図7<sup>14)</sup>(a)及び(b)は上板にアルミニウム合金A1100, 下板に低炭素IF鋼を配置した重ね継手断面マクロ組織である。プローブ (ピン) は上板のアルミニウム側から挿入されている。(a)は界面よりプローブ先端が鉄側に0.3mm入った状態,

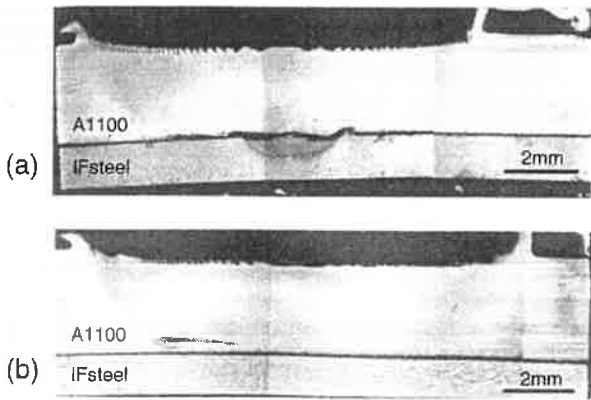


図7 FSWによるA1100アルミニウム/IF鋼重ね異材継手の断面マクロ組織, ピン先端位置: (a) 鋼側0.3mm, (b) アルミニウム側0.1mm<sup>14)</sup>

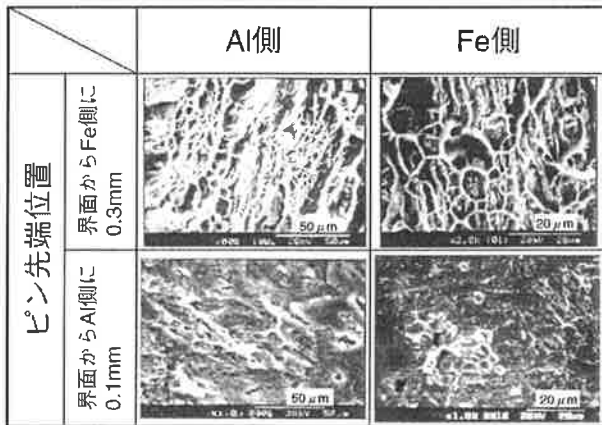


図8 A1100アルミニウム/IF鋼重ね異材継手のピール試験後の破面組織 (著者により再編集)<sup>14)</sup>

(b)はプローブ先端は界面には達せず, アルミニウム側に留まり界面から0.1mmの距離である。図8<sup>14)</sup>はこれら重ね継手のピール試験後の破面を示すが, プローブが鉄側に挿入された場合には鉄及びアルミニウム側に共に延性破壊を示すディンプル破面であるのに対して, プローブが界面に達していない場合には平坦な破面であり, ピール破断強度は前者の30%と低い。突合せ接合の場合と同様に接触による鉄界面の活性化の重要性が示唆されている。

Chenら<sup>15)</sup>は亜鉛めっき鋼板(0.8mm厚)とアルミニウム合金AC4C(4mm厚)との重ねシーム接合を検討し, プローブ先端が鋼板に接触しない条件で接合を行うと, 図9<sup>15)</sup>に示すように亜鉛めっき層が攪拌部のアルミニウムと反応して共晶融解し, これが活性界面の形成に寄与して, 鋼板母材破断を示す良好な継手が得られている。

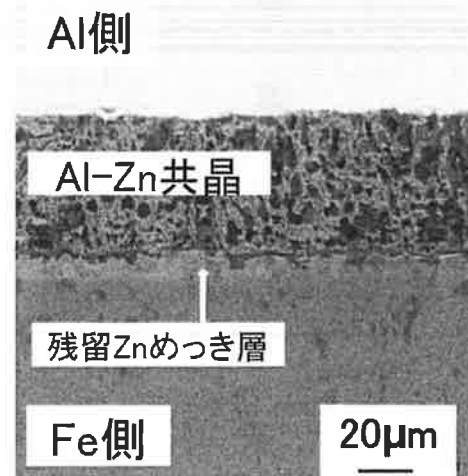


図9 亜鉛めっき鋼板とAC4Cアルミニウム合金とのFSW重ね異材継手の接合界面におけるAl-Zn系共晶組織<sup>15)</sup>

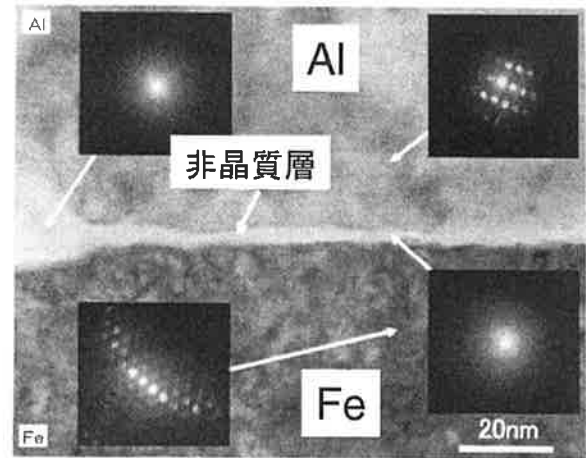
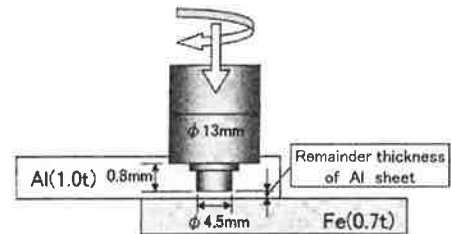


図10 摩擦攪拌点接合による6000系Al合金とSPCCとの異材重ね点接合の模式図と接合界面に形成された非晶質層の微細組織 (ツール回転速度1000rpm)<sup>16)</sup>

FSWによる重ね点接合法を用いた鉄(SPCC)/6000系アルミニウム異材接合も検討されており, 良好な継手が得られた適正な条件では図10<sup>16)</sup>に示すように接合界面にMg-Si-O系のごく薄い非晶質層(厚さ数十nm)の形成が確認されている。

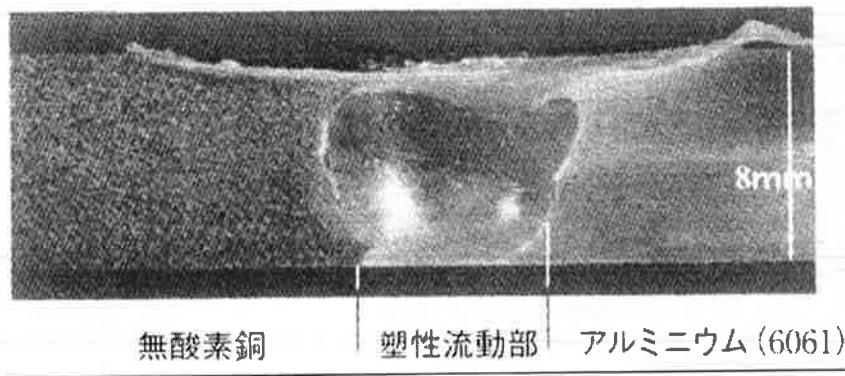


図11 銅とアルミニウム合金A6061のFSW異材接合部断面組織<sup>9)</sup>

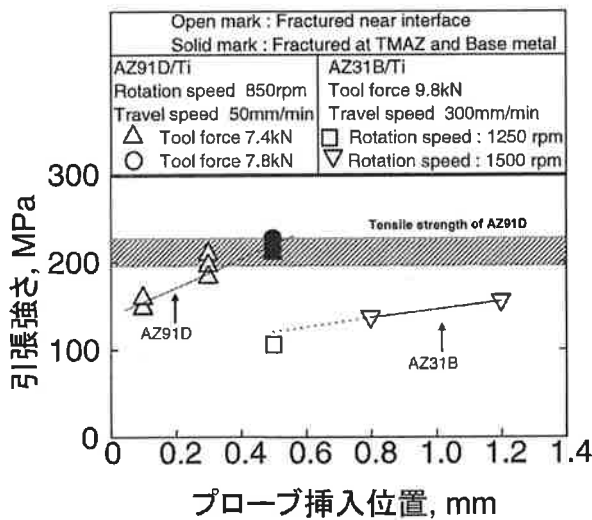


図12 純チタンとMg合金AZ31及びAZ91DとのFSW突合せ異材接合継手の引張強度とプローブ挿入位置との関係<sup>20)</sup>

## 2.2 銅／アルミニウム

導電性部材の製造において、この組合せの異材継手が用いられるが、脆い金属間化合物の形成のために異材溶接が難しい組合せである。しかし、鉄／アルミニウムの場合と同様の手法を用いて、FSWにより良好な異材継手が図11<sup>9)</sup>に示すように得られている。

## 2.3 マグネシウム／アルミニウム

軽量構造材として注目されているマグネシウム合金とアルミニウム合金との異材溶接は437℃における共晶反応による金属間化合物 $\beta$ -Al<sub>12</sub>Mg<sub>17</sub>の形成により著しく脆化して困難である。FSWでは接合条件の最適化により両者の混合を極力さけることにより異材接合が可能であるが、金属間化合物の形成を完全に防止するのは難しく、例えばAZ31/A5182継手<sup>17)</sup>では1500rpm、400mm/minの

条件で継手強度77%、伸び4%、またAZ31/A5052H継手<sup>18)</sup>では継手効率61%、伸び3.4% (1000rpm、200mm/min) が得られている。

## 2.4 マグネシウム／チタン

チタンは耐熱軽量材として、同じ軽量材料であるマグネシウムとの異材接合が注目される。両金属の組合せは金属間化合物を形成しない、いわゆる2相分離型の状態図を有しており、この観点からは異材接合が容易なタイプである。しかし融点の差が大きいため異材接合が困難となる。FSWではアルミニウム／鉄と同様の手法で、プローブをマグネシウム合金側に挿入し、チタン側に適度にオフセットすることにより、図12に示すように比較的良好な継手が得られている<sup>19-20)</sup>。

## 2.5 ジルコニウム／鉄

図13<sup>21)</sup>に示すジルコニウム／鉄重ね継手において、タングステン棒製ツールを用いて高速回転させながらツールを上から押しつけることにより、重ねシーム異材継手が得られており、接合界面には金属間化合物の形成は認められていない。

## 2.6 銅／鉄

脆い金属間化合物は形成しないが、熱伝導度が大きく違うために溶接が困難な組合せである。図13に類似したピンの無い回転ツールのみを押しつけることにより図14<sup>22)</sup>に示すような板厚1mmのタブピッチ銅／SPCC鋼重ね継手で良好な継手が得られている。

## 3 同種金属系における異なる合金間の異材接合

基本的にはそれぞれの合金のFSW接合が可能であれ

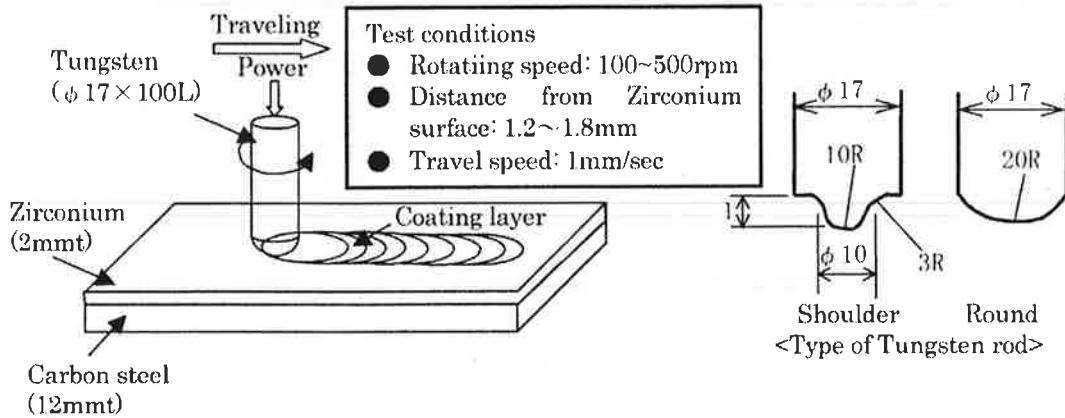


図13 ジルコニウム/鉄異材重ねシーム接合法の模式図<sup>21)</sup>

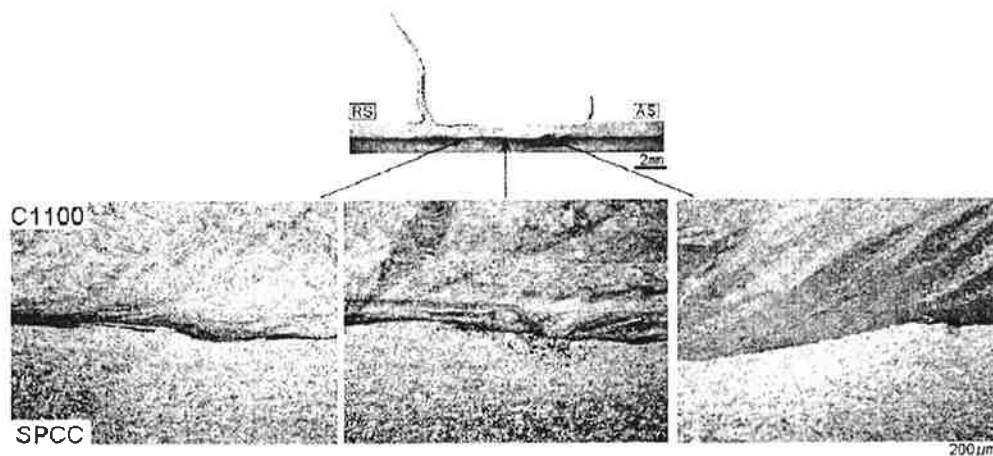


図14 C1100銅/SPCC鋼異材重ねシーム溶接継手界面組織 (ツール回転速度1332rpm, 接合速度120mm/min)<sup>22)</sup>

ば、同系合金間の接合は比較的容易と言える。

例えばアルミニウム合金展伸材は、1000系から7000系までの合金系に分かれているが、FSWではこれら合金間の異材接合は異種金属間の異材接合に比較すると遙かに容易である。展伸材は1000, 3000及び5000系の加工硬化材と2000, 6000及び7000系の時効硬化材に分類されるが、いずれも熱影響部が軟化し、継手引張試験では最も軟化した合金側の熱影響部で破断する。従って、材料の熱伝導率などの熱的性質の違い及び加工度や熱処理条件の違いを考慮して試片配置を行う必要がある。図15<sup>23)</sup>にA5083/A6061異材継手の断面組織例を示すが、引張試験での破断位置はA6061側の熱影響部となる。

またマグネシウム合金間の異材接合もFSWにより容易に行える。さらに高融点材料のチタン合金間や鉄鋼材料間の異材接合も可能と考えられる。

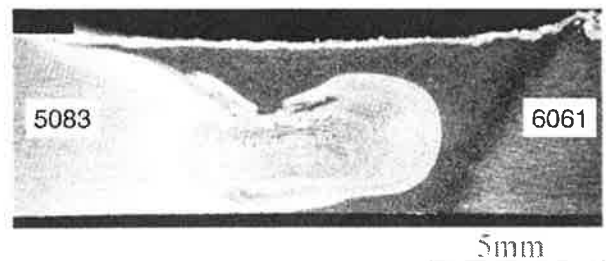


図15 Al合金A5083とA6061とのFSW異材突合せ継手の断面組織<sup>23)</sup>

#### 4 鋳物・ダイカスト材と展伸材との異材接合

鋳物、ダイカスト、チクソモー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

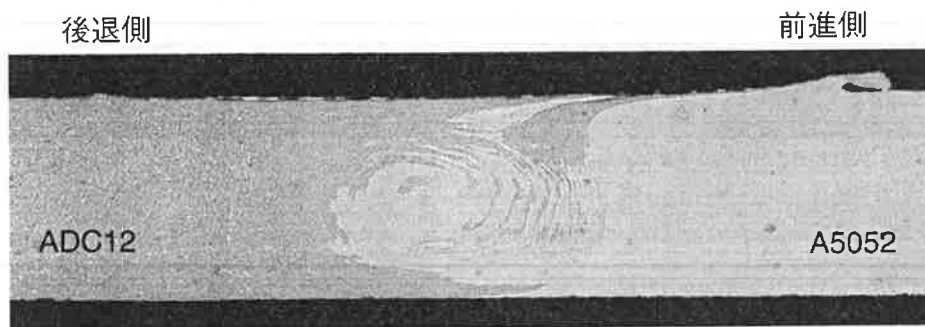


図16 FSWによるADC12ダイカストアルミニウム合金とA5052アルミニウム合金展伸材との異材突合せ接合部断面組織（板厚4mm，ツール回転速度1250rpm，接合速度250mm/min）<sup>25)</sup>

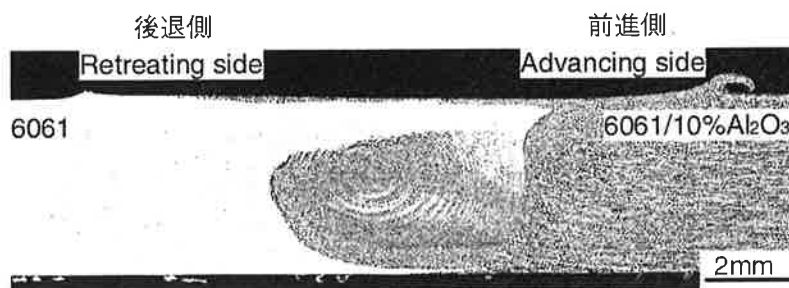


図17 FSWによる10%アルミナ粒子添加6061合金基複合材/A6061アルミニウム合金の異材突合せ接合部断面組織（ツール回転速度2000rpm，接合速度250mm/min）<sup>27)</sup>

融溶接は難しくなる<sup>24)</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、材質に依らず接合が可能である。さらに、接合部では铸造組織の改質（組織微細化，铸造欠陥除去）も同時に行える利点がある。

一例として図16<sup>25)</sup>はアルミニウムダイカスト材ADC12とアルミニウム圧延材A5052との突合せ異材継手の断面組織を示す。両者は攪拌部で良好な混合組織を示しており、継手引張試験では破断配置は5052の熱影響部であり、継手効率は95%を示した。マグネシウム合金ダイカスト材であるAZ91及びAM60とマグネシウム合金展伸材であるAZ31との組合せでもそれぞれ良好な突合せ異材継手が得られている<sup>26)</sup>。ただし、両者の組織や成分が大きく異なる場合には、攪拌部の組織は図16にも示したように完全には均一化されずに、回転ピッチ（接合速度/ツール回転数）に対応する層状の混合組織を呈し、後述する複合材でも顕著にみられる。

しかし各層間は元素拡散により強固に結合されている。

## 5 複合材と合金との異材接合

金属基複合材の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

れないが<sup>24)</sup>，粒子分散型複合材に対してはFSWが適しており，粒子が均一に分散した接合部が得られる<sup>7)</sup>。図17<sup>27)</sup>は代表的な $Al_2O_3$ 粒子分散6061複合材とアルミニウム合金6061とのFSW突合せ継手の断面組織を示す。攪拌部において両者はよく混合されており，良好な継手が得られる。重ね継手も同様である。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 まとめ

FSWは融溶接では不可能な異材組合せへの展開が可能であり，実用化に向けての異材継手性能評価などの地道な検討が求められている。

おわりに下記の文献より多くの資料を引用させて頂きました。関係各位に紙面をお借りしてお礼申し上げます。

なお異材溶接・接合に関する全般的な情報については本誌の連載講座（平成16年9月号～12月号）を参照願いたい。

### 参考文献

- 1) 中田ら：異材溶接・接合のニーズと今後の技術開発の動向，溶接学会誌，71-6（2002），418-421.
- 2) K.Nakataら：ISIJ International, 40（2000），Supplement, S15-S19.

- 3) C.J.Dawes: Proc. of the 6th Int. Symp., JWS, (1996), Nagoya, 711-718.
- 4) 金ら: マルチパス摩擦攪拌プロセスによるADC12ダイカスト材の組織と期待的特性の改善, 鑄造工学, 78-9 (2006) 451-456.
- 5) 中田ら: AZ91Dマグネシウム合金チクソモールド薄板の摩擦攪拌溶接性, 軽金属, 51-10 (2001), 528-533.
- 6) T.W.Nelsonら: 2nd Int. Symp. on Friction Stir Welding, TWI, (2000).
- 7) K.Nakataら: Friction Stir Welding of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particulate 6061 Al Alloy Composite, Materials Science Forum, 426-432 (2003), 2873-2878.
- 8) 中田: 新しい固相プロセスによるアルミニウムと鉄の接合, 連載講座, 異材溶接の基礎とその展開 (4), 溶接技術, 52-12 (2004), 123-127.
- 9) 岡村ら: 溶接学会誌, 72-5 (2003), 436.
- 10) 岡村ら: 溶接技術, 51-5 (2003), 60.
- 11) 渡辺ら: 溶接学会論文集, 22-1 (2004), 141.
- 12) 福本ら: 溶接学会論文集, 22-2 (2004), 309.
- 13) 岡本ら: 軽金属溶接, 42-2 (2004), 49.
- 14) (財)宇宙環境利用推進センター: 「異材溶接技術の基礎研究」, 平成13年度調査報告書, (2002.3).
- 15) Y.C.Chenら: Materials Science and Technology (掲載予定).
- 16) 田中ら: 軽金属, 56-6 (2006), 317-322.
- 17) 平野ら: 溶接学会論文集, 21-4 (2003), 53-545.
- 18) M.Morishigeら: Extended Abstract, 2nd Asian Symposium on Mg Alloys, ASMA-2, Oct, 2007, Fukuoka, Japan, 254-255.
- 19) 青沼ら: 軽金属, 57-3 (2007), 112-118.
- 20) 青沼ら: 鑄造工学 (掲載予定).
- 21) 高橋ら: 溶接学会全国大会講演概要, 76 (2005-4), 114-115.
- 22) 加藤ら: 溶接学会全国大会講演概要, 76 (2005-4), 124-125.
- 23) 柴柳: 軽金属, 57-9 (2007), 416-423.
- 24) 中田: 材料学的側面からみた溶接・接合プロセスの展開, 溶接学会誌, 72-1 (2003), 12-15.
- 25) 立野ら: 鑄造工学, 78-8 (2006), 389-395.
- 26) R.Johnson: Materials Science Forum, 419-422 (2003), 365-370.
- 27) K.Nakataら: 生産技術の革新に貢献する接合科学, 大阪大学接合科学研究所30周年記念国際シンポジウムプロシーディング, (2003), 139-142.