

## 異材溶接の基礎とその展開

第4回 (最終回)

## —新しい固相接合プロセスによるアルミニウムと鉄の接合—

中田 一博

大阪大学 接合科学研究所

## 1 はじめに

これまで鉄/アルミニウム異材接合に対して、連続した継手が得られる可能性の高い接合法として、直接熔融溶接法<sup>1)</sup>とブレース溶接法<sup>2)</sup>について述べた。

一方、固相接合では摩擦圧接、爆発圧接、クラッドなどの圧接法により鉄/アルミニウム異材接合を始め各種の異材金属組合せ継手が実用化されている。しかし、これらの固相接合では応用できる継手形状に大きな制約がある。例えば摩擦圧接では棒やパイプの突合せ継手、爆発圧接やクラッドでは板材の張り合わせ継手(面接合)に限られる。

一方、固相接合の中でも近年開発された新しいプロセスには熔融溶接と同じように連続した継手が得られるプロセスがある。摩擦攪拌接合(FSW)や電磁圧接法である。FSWは第1回講座<sup>3)</sup>で紹介した異材溶接に対するアンケート調査において大きな期待が寄せられたプロセスである。また、電磁圧接法はFSWと同様に国際的にも次世代固相接合法として注目されているプロセスである。

本稿では、これら2種類の新しい固相プロセスによる鉄/アルミニウム異材接合の最新の試みについて紹介する。

## 2 摩擦攪拌接合法 (FSW)

2.1 FSWの原理<sup>4), 5)</sup>

FSWは固相接合法の一種であり、その原理を図1に示す。突合せた2枚の板のI開先部に先端に長さが板厚相当のネジ状の突起を有する棒状のツールを高速回転させながら押しつけると摩擦発熱により開先部の金属が軟化し、ピンは開先内に挿入される。ツール端面が開先表面に達するとさらに温度が上昇し、軟化した金属はピンおよびツールの回転により容易にピンの周囲を塑性流動する。この状態でツールを開先線に沿って移動すると2枚

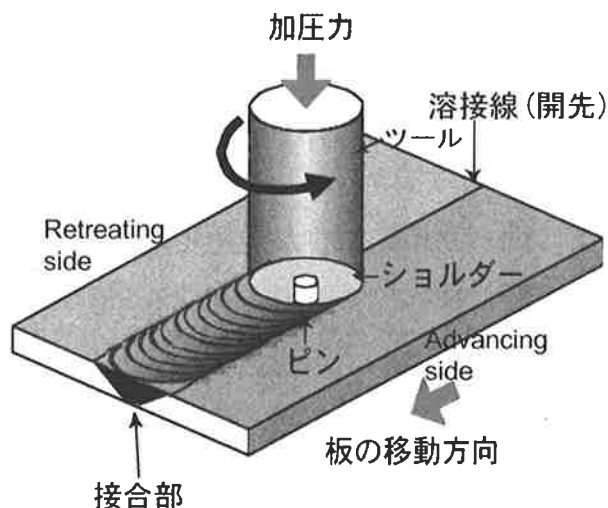


図1 FSWの原理図

の板はピンにより攪拌混合され、さらに、拡散現象等により金属として一体化することにより接合される。

現在はアルミニウム合金、マグネシウム合金、一部の銅合金などの塑性流動が容易な、いわゆる軟質金属に対して適用されている。これに対して、鉄鋼材料には実用化はまだなされていない。この理由は、使用するツール材質に依存している。すなわち、軟質金属に対しては接合部の温度は、例えばアルミニウム合金では450~500℃であり、既存のSKD61等の工具鋼製のツールで十分に接合に耐えうる。一方、鉄鋼材料では、接合時の温度は1,000~1,200℃の高温と推定されており、鋼製のツールでは高温強度が不足する。したがって、現状ではこれに耐えうるツール材質としてセラミックスである多結晶窒化ボロン(PCBN)製が試作され、その耐久性に関する検討が進められているが、まだアルミニウム合金に対する様にはFSWの鉄鋼材料への適用はできていない。

このような現状にも関わらず、FSWによる鉄/アルミニウム異材接合への期待は大きい。これはすでに述べたように、連続した接合部が得られる固相接合であること

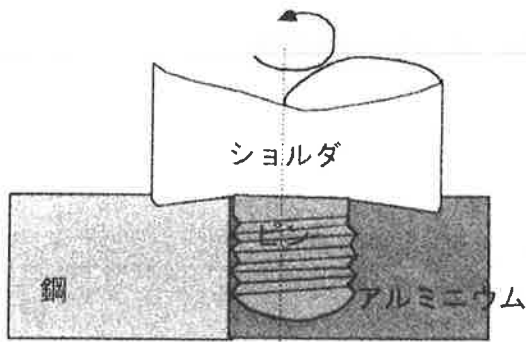


図2 FSWによる異材接合法の原理(接合部断面とピン挿入位置)<sup>6)</sup>

と、接合温度も比較的低温、かつ冷却速度も速いことから、接合界面の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。

以下に現状のツール材料を用いた鉄／アルミニウム異材接合の検討例を紹介する。

## 2.2 鉄／アルミニウム突合せ異材接合

岡本ら<sup>6), 7)</sup>は鉄とアルミニウムを接合部で攪拌混合した場合に形成される金属間化合物とピン摩耗を避けるために図2の方法を提案した。すなわち、ピン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、ピン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3<sup>6)</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>8)</sup>は同様の方法ではあるがツールピン挿入位置を段階的に変えた実験を行い、図4<sup>8)</sup>を得た。ピンが鉄に接触しない条件では岡本らの結果と同様であるが、ピ

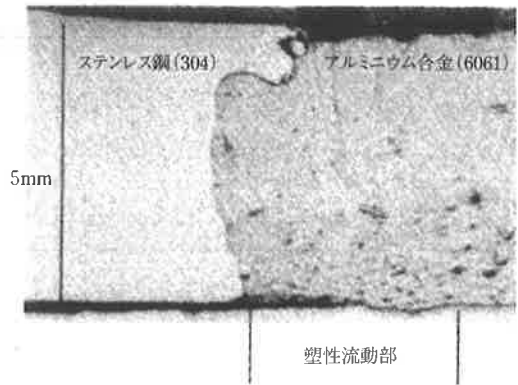


図3 FSWによるステンレス鋼(SUS304)／アルミニウム合金(A6061)突合せ接合部断面組織<sup>6)</sup>

ンが鉄側にわずかに食い込んだ状態(0.2mm)でもっとも高い継手接合強度、約230MPaを得ている。ピン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、ピンの回転方向と鉄／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5(次ページ)に示すようにピン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>9)</sup>も同様の結果を得ており、図5(a)において①の部分で鉄開先面がピンにより削られて表面活性化され、ピン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。同じ配置でピンが逆回転の場合(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>8)</sup>、かつ、⑦で

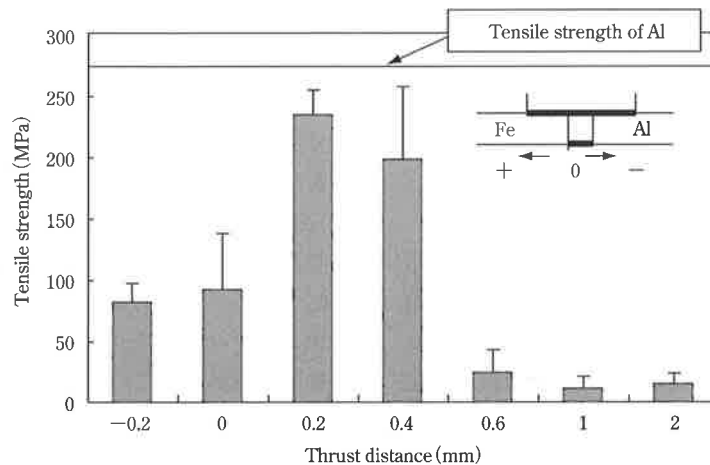


図4 FSWによるSS400軟鋼／A5083アルミニウム合金突合せ継手強度に及ぼすピン挿入位置の影響(横軸はピンとAl/Fe界面との距離、プラス：鉄側にピンが食い込んだ状態、マイナス：ピンと鉄が非接触)<sup>8)</sup>

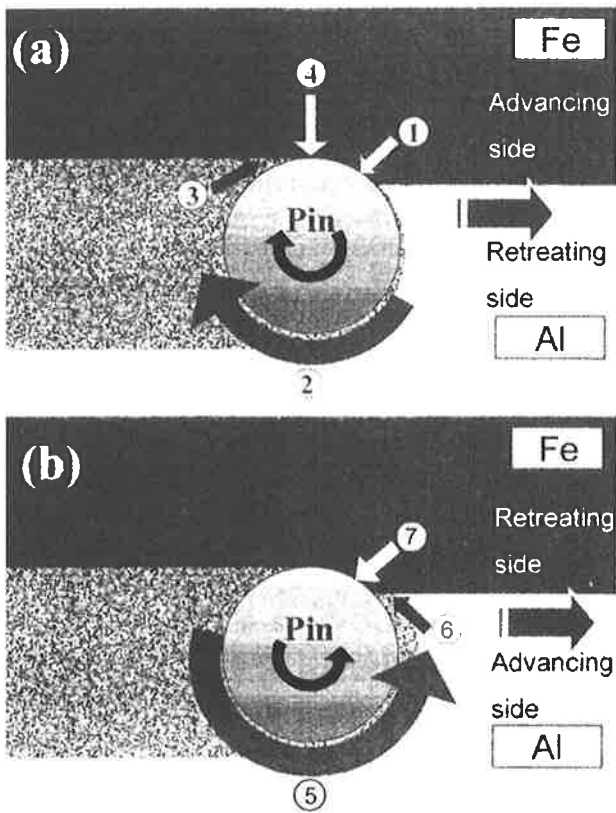


図5 接合性に及ぼすピン回転方向と試片配置の組合せの影響 (著者により再編集)<sup>9)</sup>

ピンにより破碎されること<sup>9)</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6<sup>8)</sup>に示すように接合部にはピンにより削り取られた微小鉄片が混入することである。接合界面およ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>8), 9)</sup>。

### 2.3 鉄/アルミニウム重ね異材接合

FSWを用いて図7に示す方法<sup>10)</sup>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8 (a) および (b)<sup>11)</sup>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。ピンは上板のアルミニウム側から挿入されている。(a)は界面よりピン先端が鉄側に0.3mm入った状態、(b)はピン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9<sup>11)</sup>(次ページ)はこれら重ね継手のピール試験後の破面を示すが、ピンが鉄側に挿入された場合には鉄およびアルミニウム側共に延性破壊を示すディンプル破面であるのに対して、ピン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ピン接触による鉄界面の活性化の重要性が示唆されている。

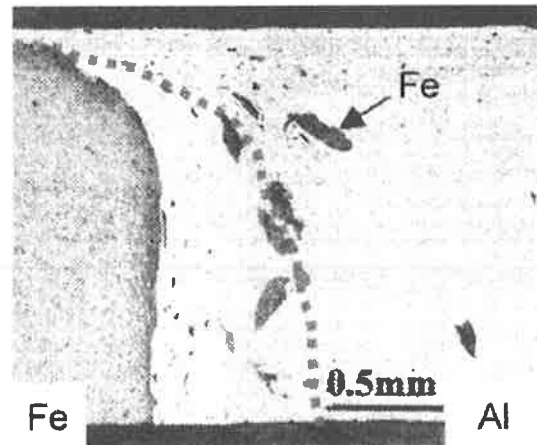


図6 ピンにより削り取られた微小鉄片の摩擦攪拌部への混入状況、破線は引張試験における継手破断経路<sup>8)</sup>

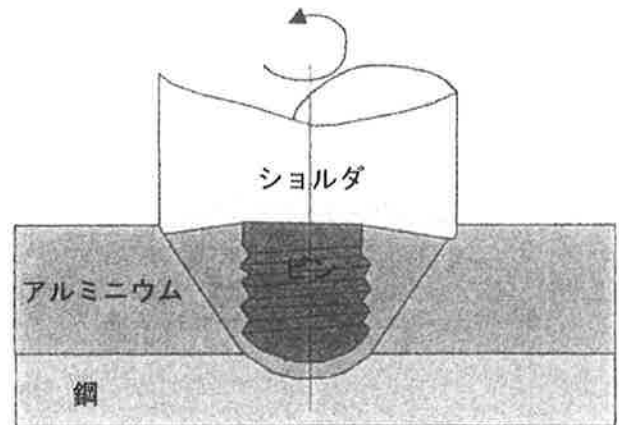


図7 FSWによる鉄/アルミニウム重ね異材継手形成法<sup>10)</sup>

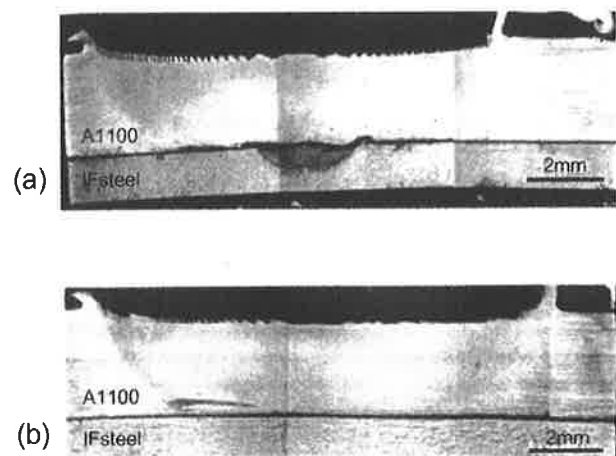


図8 FSWによるA1100アルミニウム/IF鋼重ね異材継手の断面マクロ組織、ピン先端位置：(a) 鋼側0.3mm、(b) アルミニウム側0.1mm<sup>11)</sup>

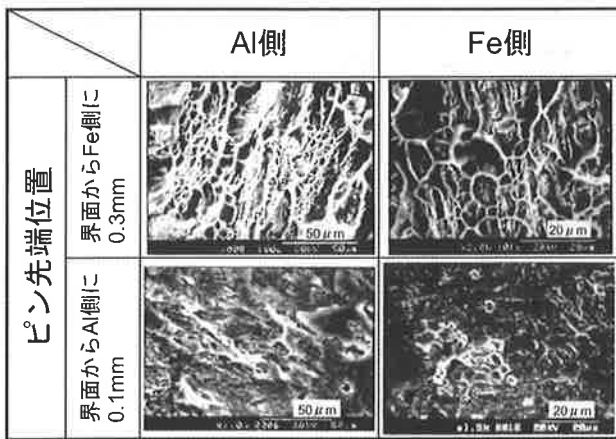


図9 A1100アルミニウム/IF鋼重ね異材継手のピール試験後の破面組織 (著者により再編集)<sup>11)</sup>

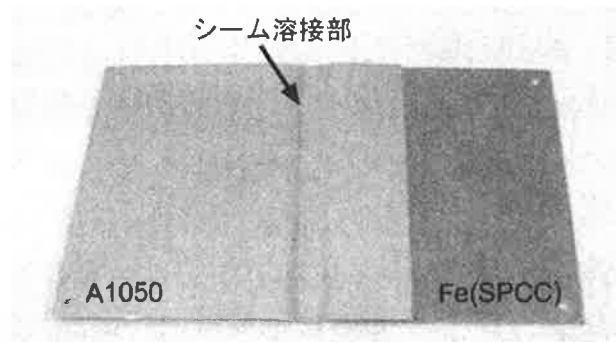


図11 電磁圧接法(両側磁束印加)による軟鋼SPCC(1mmt)/アルミニウムA1050(0.5mmt)の異材重ねシーム溶接部外観写真<sup>15)</sup>

### 3 電磁圧接法

#### 3.1 原理

アルミニウムや銅などの良導電性金属に適した電磁力を利用した圧接法であり<sup>12)~15)</sup>、薄板金属のシーム溶接の原理を図10<sup>14)</sup>に示す。ワンターンコイルの中に間隔(1mm)を開けて配置された同じ板厚のアルミニウム薄板に対して、コンデンサ電源よりコイルにパルス大電流を流すと高密度の磁束が発生し、これによりアルミニウム薄板には渦電流が流れ、ジュール発熱により加熱されるとともに、発生する電磁力によりアルミニウム薄板はお互いに押しつけられて圧接される。標準的な条件では、最大電流は150~200kA、通電時間は約5 $\mu$ s、電磁力に相当する最大磁気圧力は300MPa以上とされている<sup>14)</sup>。

(a)の配置で片側を鉄にした場合、鉄側に流れる渦電流はアルミニウム側よりも格段に小さく、このため電磁力のバランスが崩れて接合が困難となる。したがって、(b)のように絶縁シートを挟んでもう1枚のアルミニウム

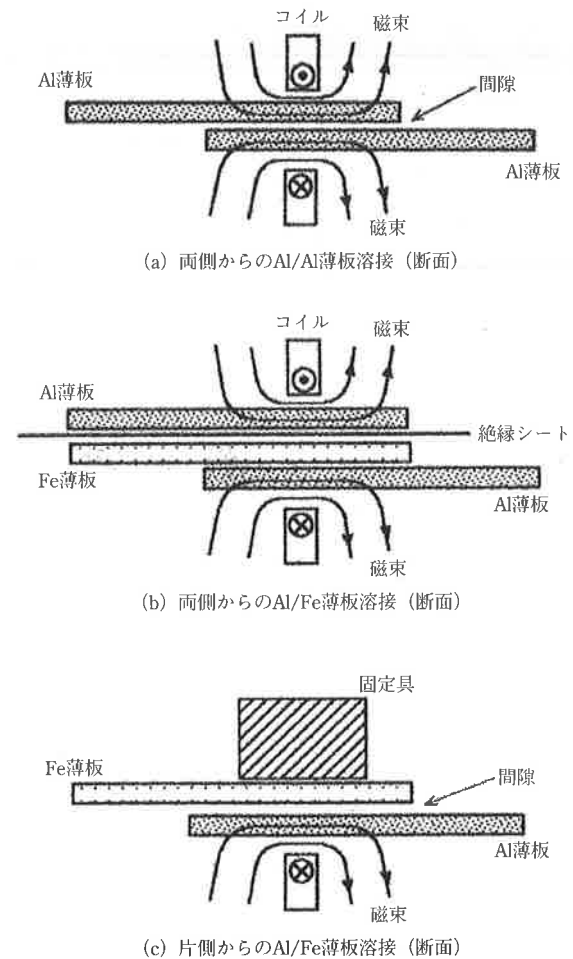


図10 電磁圧接法による (a) アルミニウム薄板同士、(b) 及び (c) アルミニウム/鉄薄板の異材重ね接合法の原理<sup>14)</sup>

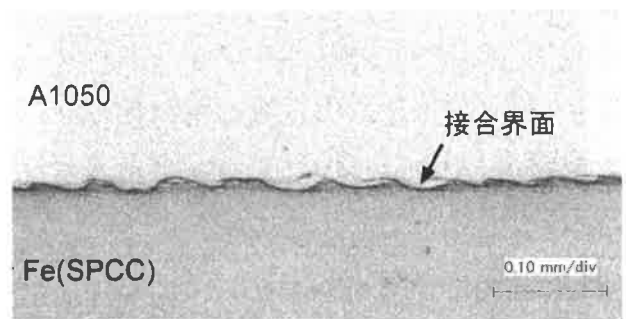


図12 電磁圧接法(両側磁束印加)による軟鋼SPCC(1mmt)/アルミニウムA1050(0.5mmt)の異材重ねシーム溶接部接合界面<sup>15)</sup>

ム板とでサンドイッチ構造とするか、(c)のようにコイルの配置を変えてアルミニウム板側のみから磁束をかけて固定具上の鉄板に押しつける方法が採られる。いずれの場合も鉄表面にも弱い渦電流が流れることにより加熱される。

### 3.2 鉄／アルミニウム異材シーム溶接例

図11<sup>15)</sup> および図12<sup>15)</sup> はそれぞれ軟鋼SPCC板 (板厚1 mm) とアルミニウム板A1050 (板厚0.5mm) の重ねシーム溶接材の外観写真とその断面組織例であり、いずれも図10(b)の両側から磁束を加える方法で作製されたものである。断面組織では爆発圧接でも見られるような波状界面が認められ、金属間化合物層の厚さは10 $\mu$ m以下と推定されている。また、溶接可能な板厚は現状では10 $\mu$ m～2 mm、長さは500 mmとされている<sup>14)</sup>。

## 4 おわりに

本連載講座では、鉄／アルミニウム異材接合において連続した接合継手部が得られるプロセスに注目して、かつ、その大きな可能性を有する比較的新しい溶接・接合プロセスについて解説した。

現状ではまだ静的機械的性質により継手性能が評価されている段階のものが多いが、今後、動的機械的性質、熱的安定性や化学的性質等の評価が進められるものと思われる。本誌の連載講座の趣旨からはずれた内容になってしまったことをお詫び申し上げるとともに、しかし、この分野にご興味をお持ちの方々には少しでもお役に立てれば幸いである。

なお、最近各紙で異材接合に関する特集記事が取り上げられており、ご参考のために参考文献として挙げておく。最後に多くの資料を本連載講座に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。

### 参考文献

- 1) 中田：連載講座「異材溶接の基礎とその展開」(2)、本誌、52-10 (2004)、126.
- 2) 中田：連載講座「異材溶接の基礎とその展開」(3)、本誌、52-11 (2004)、126.
- 3) 中田：連載講座「異材溶接の基礎とその展開」(1)、本誌、52-9 (2004)、141.
- 4) 篠田：連載講座「Friction Stir Welding (摩擦攪拌溶接) の基礎と実際」(1)、本誌49-6 (2001) 128, (2) 本誌49-7 (2001) 138, (3) 本誌49-8 (2001) 125, (4) 本誌49-9 (2001) 128, (5) 本誌49-10 (2001) 128.
- 5) 古賀：入門教室/Q&A「FSW (摩擦攪拌溶接)」(1)、本誌、52-9 (2004) 136, (2) 本誌52-10 (2004) 122.
- 6) 岡村、青田、高井、江角：摩擦攪拌溶接 (FSW) の開発状況と適用上の課題、溶接学会誌、72-5 (2003)、436.
- 7) 岡村、青田、高井、江角：FSW (摩擦攪拌溶接) における適用上のポイント、本誌、51-5 (2003)、60.
- 8) 渡辺、柳沢、高山：回転ピンによる鉄鋼とアルミニウム合金の固相接合、溶接学会論文集、22-1 (2004)、141.
- 9) 福本、椿、下田、安井：摩擦攪拌作用によるADC12/SS400材料間の接合、溶接学会論文集、22-2 (2004)、309.
- 10) 岡本、青田：摩擦攪拌溶接 (FSW) による異種金属の接合、軽金属溶接、42-2 (2004)、49.
- 11) (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)、81.
- 12) 特許公報：特公昭35-011813.
- 13) 公開特許公報：特開平11-192562、(1999).
- 14) 相沢：金属薄板の電磁シーム溶接法、軽金属、54-4 (2004)、153.
- 15) 相沢：Al/Fe薄板の電磁圧接シーム溶接法、軽金属溶接、42-2 (2004)、79.
- 16) フォーラム「異種溶接金属のかんどころ」：本誌、48-11 (2000)、103-115.
- 17) 特集「異材溶接・接合」：溶接学会誌、71-6 (2002).
- 18) 特集「異材溶接の新展開」：本誌、51-2 (2003)、76-93.
- 19) 異材接合特集号 (その1)：軽金属溶接、42-1 (2004)、12-37.
- 20) 異材接合特集号 (その2)：軽金属溶接、42-2 (2004)、49-84.