

# 鉄道車両構体用の最新溶接技術

森 久史\* 辻村 太郎\*

## Investigation of Advanced Welding Technology for Railway Vehicles

Hisashi MORI Taro TSUJIMURA

It is important for manufacturing of railway vehicles to investigate the recent development of welding technology. This paper reports the results of investigation of advanced weld technology with focus on the material feature, and of application of advanced technology to light weight alloy such as magnesium. The recent advanced welding technologies such as Friction Stir Welding (FSW) and Laser MIG hybrid welding were investigated in this report. It was found out that formation of the heat affect zone in welding parts was less in FSW and Laser MIG hybrid welding in comparison with that in MIG and TIG welding. The application of those techniques to the manufacturing vehicles is increasing every year. For enlargement of application of FSW and Laser MIG hybrid welding, it is considered that further investigation on items such as the effect of material type, the joint geometry, and the strength property of weld material including fatigue properties will be needed.

キーワード：鉄道車両溶接，摩擦撈拌接合，新材料，溶接熱影響，結晶粒

### 1. はじめに

鉄道車両の車体の製造においては、素形材の接合技術が必要となる。金属材料の接合では、樹脂系材料などと異なり、接着手法などによる化学的接合の適用が、材料表面の酸化皮膜の影響を受けることから、難しいとされている。そのため、高エネルギー熱源を与えて素形材同士を部分的に熔融する溶接が適用される。溶接技術は1800年代から検討されている比較的古い技術である。これまで熱源や接合環境などの工夫が行われ、図1に示すような様々な溶接技術が研究開発されてきた。

図1に示すように、溶接は大きく2種類の方法に分けられる。一つは融接であり、もう一つは圧接である。融接は部分的に熔融して素材同士を接合する方法である。圧接は材料の再結晶開始温度で圧力を加えて接合する方法である。熱源や方法は異なるが、外部熱あるいは摩擦熱を加えて接合する点では同じである。これらの溶接方法は、形状による制約や作業環境、必要となる接合強度基準から選ばれる。鉄道車両の製造では、TIG溶接、MIG溶接、スポット溶接が古くから適用されてきた。また、近年では、融接技術としてレーザ溶接を工夫したレーザMIGハイブリッド溶接、圧接として摩擦撈拌接合（Friction Stir Welding：以降、FSWという）が車両構体用の溶接技術として適用されつつある。

近年開発されたFSWやレーザ溶接は、接合で常に問題とされてきた溶接熱影響部が小さく抑えられることが特徴であり、特にFSWでは接合部の材質組織が微細化して継手強度低下が小さいなどの特徴を有している<sup>1)2)</sup>。

近年、車両の構体素材としてアルミニウム合金が適用されている。これまでアルミニウム合金ではMIG溶接などが適用されてきた。MIG溶接では接合部に溶接熱影響部が形成される。この溶接熱影響部は結晶粒がビード部と比較して粗大化しており、一般的に母材よりも強度が低い。そこで今後、さらなる接合部の強度を確保するためには、このような新しい接合手法の適用が考えられ、現在、その適用は増加しつつある。今後、さらなる最新の溶接方法の適用を行うためには、強度面はもちろんのこと、新接合法の材料学的特徴についても調べておくこ

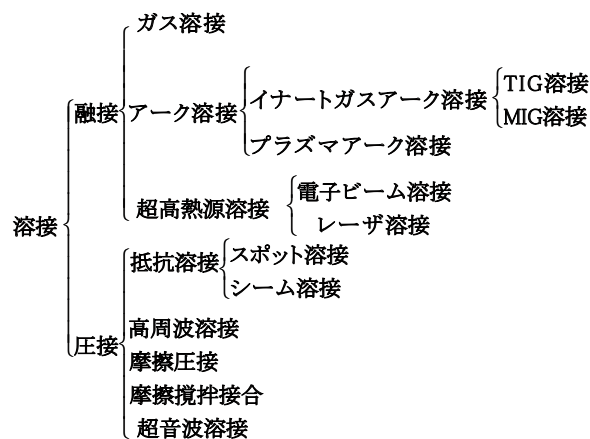


図1 溶接方法の種類

\* 材料技術研究部

とが必要になる。また、今後の高速車両の構造を考える上で、アルミニウム合金よりも軽量の難燃性マグネシウム合金の適用可能性が検討されており、その実用化に向けては溶接方法の検討が必要になる。

本稿では新しい溶接手法としてFSW及びレーザ溶接(レーザハイブリッド溶接)方法の特徴についてアルミニウム合金を対象に調べ、またこれらの溶接方法の難燃性マグネシウム合金への適用の試みの結果を報告する。

## 2. 最新の溶接手法

鉄道車両に適用されつつある新しい溶接手法としては、FSW及びレーザ溶接が挙げられる。そこで、新しい溶接技術の特徴を調べるために、6000系のアルミニウム合金(Al-Mg-Si)の板材にFSW、レーザ溶接、レーザとMIGを組み合わせたハイブリッド接合、TIG溶接及びMIG溶接を行い、各溶接材を室温において引張試験を行って引張強さと耐力を調べた。引張試験は板厚5mmのJIS14号比例試験片を用い、余盛は削除していない。各溶接材の引張強さ及び耐力を比較した結果を図2に示す。

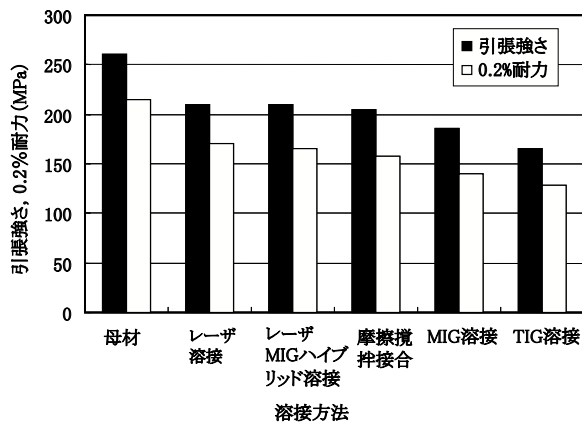


図2 各溶接法における継手強度の比較

継手強度は、いずれの溶接方法も母材強度の70%以上を確保でき、JISで規程される継手効率70%を満たしている。引張強さは、レーザ=レーザMIGハイブリッド溶接>FSW>MIG>TIGであった。このような強度の相違は溶接継手の熱影響部の大きさと相関があると考えられる。そこで、各溶接材の熱影響部の断面マクロ観察を行って熱影響部の寸法を定量的に調べた。

表1 レーザ・MIGハイブリッド接合法の特徴<sup>6)</sup>

溶接方法	熱影響寸法 (mm)
レーザ	8
レーザMIGハイブリッド	9.2
摩擦攪拌接合	10.8
MIG溶接	20
TIG溶接	28

表1に溶接方法と熱影響寸法の測定結果をまとめて示す。熱影響寸法はTIG>MIG>FSW>レーザMIGハイブリッド溶接>レーザ溶接であり、熱影響部寸法は引張強さと相関が認められる。今回の調査の結果、FSW及びレーザ溶接は、継手強度に影響を及ぼす熱影響部がMIG溶接あるいはTIG溶接と比較して低減できるところに特徴があることがわかる。

## 3. 最新の溶接技術に関する調査

以上の結果から、FSW及びレーザ溶接の接合部の金属組織学的な調査を行うこととした。

### 3.1 FSW

#### 3.1.1 FSW概要

FSWは英国溶接研究所(TWI)において開発された技術であり、図3に示すように、回転工具を材料に接触させて摩擦熱を発生させてから、プローブを接合部に挿入し、摩擦熱により軟化した部分を攪拌することで接合する方法である。FSWは突き合わせ継手や重ね継手の溶接に適用が可能であり、熔融溶接に比べて熱影響が少ないなどを特徴を有し、現在、鉄道車両の製造に適用が拡大している<sup>1)3)</sup>。

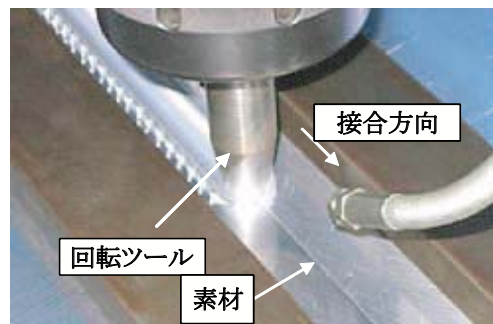


図3 FSW工程中の外観

#### 3.1.2 FSWで形成される継手金属組織の特徴

図4に金属組織の特徴が得られやすい7000系アルミニウム合金の板材をFSWによって接合して金属組織を観察した結果、図5に接合部をEBSD(電子線後方散乱)解析にて観察して結晶粒の大きさとその方位を表した結果を示す。

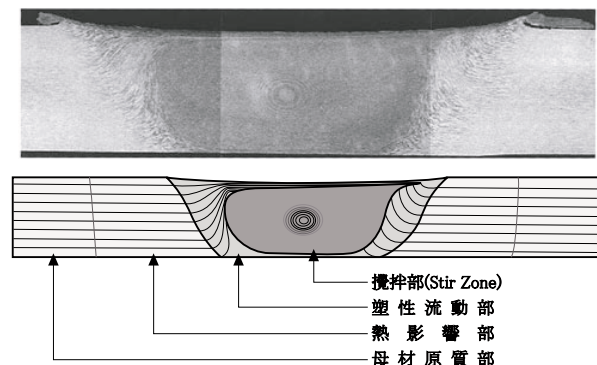


図4 FSW板材継手部の金属組織とその説明図



図5 接合部のEBSD解析による方位解析結果

FSWの接合部の金属組織は、図4に示すような、接合部が丸い形状を示すことに特徴がある。この丸い形状の組織は、ツールで素材が強く攪拌された「攪拌部」、素材が塑性変形してツール方向に結晶粒が伸びた「塑性流動部」、摩擦熱の影響で結晶粒が粗大化した「熱影響部」及び接合部外の「母材原質部」（以降、母材とする）から構成される。

攪拌部、塑性流動部は、摩擦熱と塑性変形に伴う動的再結晶により結晶粒が微細化している。このような微細化過程では、個々の結晶粒が様々な方位を有する。

接合部をEBSD解析したマップ（図5）では、接合部に様々な方位を持った微細粒が形成されていることがわかる。このことから、FSWの接合原理は動的再結晶挙動にあることがわかる。FSWでは常に図4のような組織形態が認められるとは限らず、継手形状や接合条件などによって組織形態が図4から大きく変化することもある。

### 3. 1. 3 中空型材の接合部の材料調査

FSW接合材の継手の金属組織は、板材については多く調査されてきたが<sup>4)</sup>、実車に適用する中空型材継手に対する調査の報告はない。FSW継手部の金属組織は、継手形状や接合条件などによって異なることから、板材で見られる状態とは異なると考えられ、実構体に使用する中空型材の接合継手の金属組織についても調べておくことが必要になる。そこで、継手構造の異なる2種類の中空型材継手にFSW接合してその継手部の金属組織観察を行った。図6に中空型材継手の断面マクロ観察の結果を示す。中空型材継手の接合部は、図4に示す板材の接合部と比較して形状が異なり、塑性流動部、攪拌部、熱影響部などは明瞭に区分できない状態にあった。そこで継手の結晶粒の状態を調べるために、中空型材継手個所の金属組織観察を行った。観察は、図6中に示すA、B、Cの部分について行った。観察結果を図7に示す。また、参考に比較として母材部分の組織観察も行った。

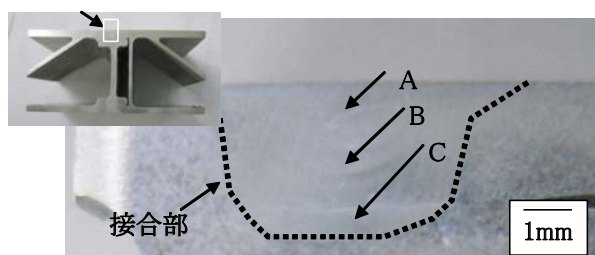


図6 中空型材のFSW継手部分の断面マクロ観察結果

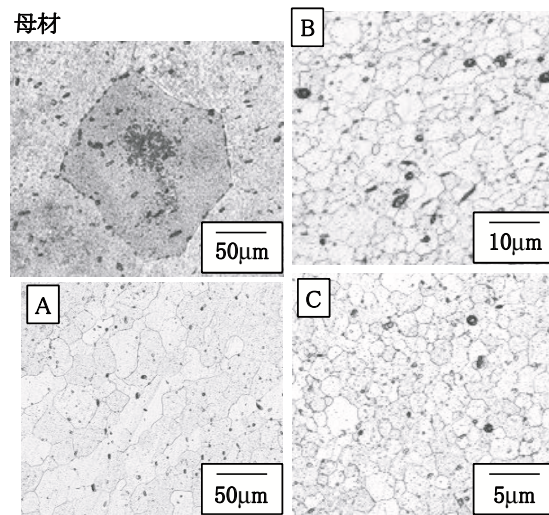


図7 母材及びFSW継手部内の金属組織観察結果

FSW継手部の結晶粒は母材と比較して微細化していることがわかる。また継手部の結晶粒はAの位置で20～30μm、Bの位置で5～10μm、Cの位置で1～7μmであり、接合部深さ方向に微細化している。表層部分で結晶粒が粗大化しているのは、摩擦熱の放熱と塑性変形の度合いの相違によるものと考えられる。今後、詳細を検討する予定である。次に継手構造の相違について比較した。図8に異なる形状の継手に対してFSWで接合し、断面マクロ観察した結果を示す。



(a) 二つのリブで支持する形状

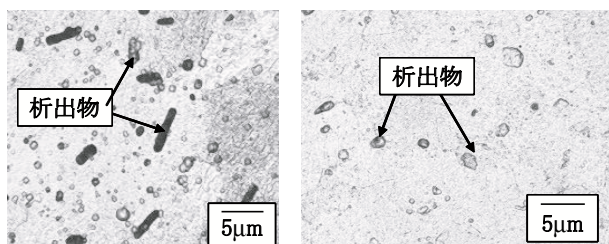


(b) 一つのリブで支持する形状

図8 異なる形状の継手に対してFSW接合した接合部断面マクロ観察結果

図8 (a) は継手を2つのリブで支持する形状、(b) は一つのリブで支持する形状である。攪拌組織は(a)が(b)よりも大きい、顕著な相違は見られなかった。また、(a) (b)ともに結晶粒の分布にも相違が認められない。しかし、図9に示すような、析出物の析出形態に影響を及ぼしていることがわかった。

FSWは素材の塑性変形と摩擦熱を利用して接合する方法である。このことから、継手構造が変わると、FSW時の摩擦力や塑性変形の度合いが大きく変化し、それに伴



(a) 二つのリブで支持する形状 (b) 一つのリブで支持する形状  
図9 継手個所に見られた析出物の状態

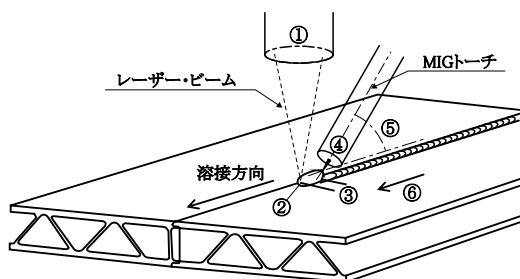
う摩擦熱や歪量も変化する。

アルミニウム合金の析出物は、熱に敏感であることから、析出物の形態が継手構造とともに変化したと考えられる。今後、強度等との関係を含めて詳細に検討する予定である。

### 3.2 レーザハイブリッド溶接

#### 3.2.1 レーザ溶接概要

レーザー溶接とは、レーザー光を熱源として金属に集光した状態で照射し、金属を局部的に熔融・凝固させることによって接合する方法である。レーザー光の絞り込みによって熱影響部を少なくできるなどの特徴を有している<sup>2) 5)</sup>。レーザー溶接は、熱影響が極めて小さく、入熱量が少ないため、熱に対する歪が大きいステンレス鋼などにも使用可能となり、非常に深い溶け込みが得られ、継手強度などについても維持できることに特徴がある。しかし、レーザー溶接は、素材の光反射率などの影響を受け、アルミニウム合金などの軽量合金では十分な溶け込みが得られない。そのため、図10に示すように、MIG溶接と併用するようなレーザーMIGハイブリッド溶接が開発され、一部実用化されている<sup>5) 6)</sup>。レーザー・MIGハイブリッド接合の特徴を他の接合方法と比較して表2に示す。レーザーMIGハイブリッド接合は他の接合方法と比較して接合作業性が極めて良い手法として期待されている。



①レーザー出力, ②レーザービーム径, ③レーザー・MIG間距離, ④MIGアーク電流・電圧, ⑤トーチ角, ⑥溶接速度

図10 レーザ・MIGハイブリッド溶接のイメージ図<sup>6)</sup>

#### 3.2.2 レーザハイブリッド溶接材の接合部の特徴

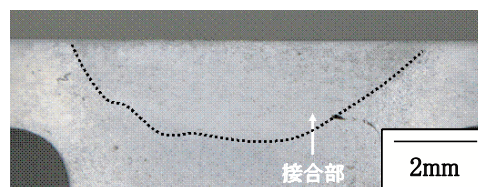
レーザーハイブリッド溶接は、MIG溶接と同等の入熱量を与えながら併用するレーザーにより比較的深い溶け込みが得られるのが特徴的である。

表2 レーザ・MIGハイブリッド接合法の特徴<sup>6)</sup>

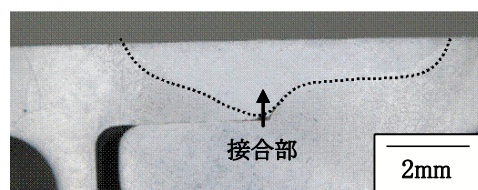
	レーザー MIGハイ ブリッド	MIG溶接	レーザー 溶接	FSW
溶接速度	○	△	○	△
溶接歪	○	△	○	○
継手形状 の自由度	○	○	△	△
余盛仕上	○	△	○	△

○：優れている, △：普通

6000系アルミニウム合金のモデル構造継手に対してレーザーMIGハイブリッド接合と従来のMIG接合を行ない、断面マクロ観察を行った結果を図11に示す。図に示すように、レーザーMIGハイブリッド溶接ではMIG溶接と比較して溶け込み深さが大きく得られていることがわかる。次に熱影響部の結晶粒の状態を観察した結果を図12に示す。



(a) レーザMIGハイブリッド溶接



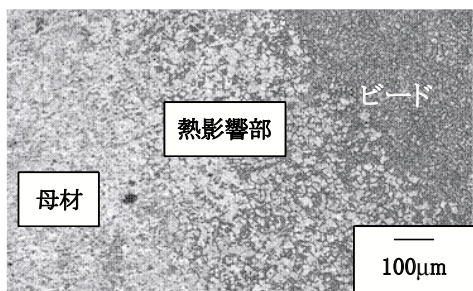
(b) MIG溶接

図11 レーザMIGハイブリッド溶接材とMIG接合材の断面マクロ観察結果

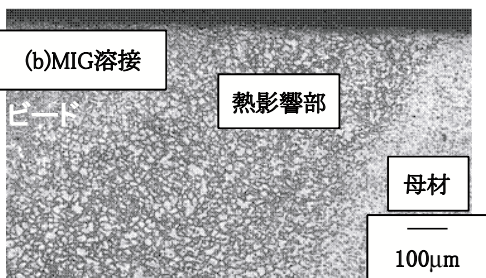
レーザーMIGハイブリッド溶接及びMIG溶接材ともに、ビード部、熱影響部が形成されている。ビード部分の結晶粒度は同程度であるが、熱影響部の結晶粒はレーザーMIG溶接材がMIG溶接材と比較して微細化している。このようにレーザーMIGハイブリッド溶接は、深い溶け込みが得られ、MIG溶接と比べて溶接熱影響部の結晶粒の粗大化を防ぐことができる接合方法であると考えられる。

## 4. 新軽量金属材に対する溶接技術

アルミニウム合金よりも軽量の金属材料であるマグネシウム合金の適用が、今後の車両構体の軽量化に対する候補材料として検討されている。マグネシウム合金は活性金属であり、燃焼性が問題となってきた。しかし、最近では、マグネシウム合金にカルシウムを添加し、共晶温度を制御して難燃性が付与された難燃性マグネシウム合金が開発されている<sup>7)</sup>。



(a) レーザMIGハイブリッド溶接



(b) MIG溶接

図12 レーザMIGハイブリッド溶接材とMIG溶接材の接合部の断面金属組織観察結果

本調査では、難燃性マグネシウム合金を中空型材に押出加工し、FSW及びレーザーMIG溶接を行なって断面金属組織観察を行うことにより、難燃性マグネシウム合金の溶接性に関して主に材料面から調査した。

#### 4.1 難燃性マグネシウム合金に対するFSW接合の検討

難燃性マグネシウム合金 (AMX602合金) に押出加工を行って中空型材を試作してFSWにより接合した。接合後に、継手個所と垂直に観察材を切り出し、研磨を行ってレーザー顕微鏡で組織観察を行った。また、継手部分の結晶粒の方位をEBSDにより解析した。

図13に接合部近傍の外観を示す。また、図14には図13中の口部の金属組織を示す。さらに図14中の(a)及び(b)の個所について金属組織観察を行った結果を図15に示す。

難燃性マグネシウム合金に対してもFSWによる接合は可能であった。接合個所を観察すると図14に示すように、摩擦攪拌層が形成されているのがわかる。難燃性マ



図13 難燃性マグネシウム合金モデル継手のFSW接合部断面の外観

グネシウム合金のFSW接合材の金属組織は図4に示すアルミニウム合金のFSW材のように、塑性流動部や熱影響部などは明瞭に認められなかった。しかし、図15に示すように接合部の結晶粒は母材と比較して微細化していた。

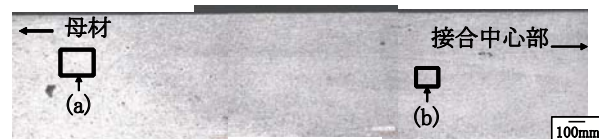
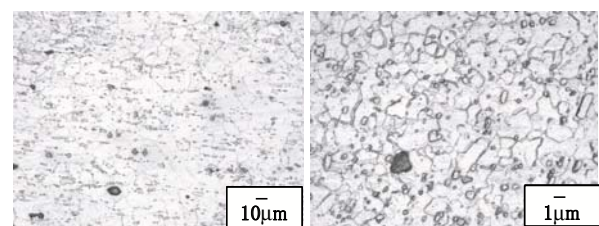


図14 接合部の断面マクロ観察結果

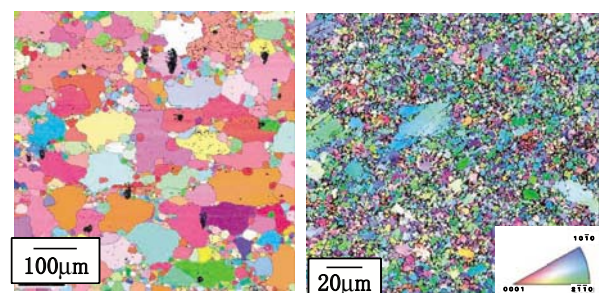


(a) 母材部拡大 (b) 接合部拡大

図15 母材及び接合部の金属組織観察

難燃性マグネシウム合金に対しても、アルミニウム合金と同様に、加工と歪を与えることによって動的再結晶挙動が発現して、結晶粒が微細化するとの報告がある<sup>8) 9)</sup>。難燃性マグネシウム合金では押出時に集合組織が形成され、ある方位に優先的に方位形成される。このような押し出し材に動的再結晶が生じると結晶粒方位はランダム化する。母材と摩擦攪拌部をEBSDによって方位解析した結果を図16に示す。

図に示すように、摩擦攪拌部は母材部よりも結晶粒は微細化しており、微細粒は様々な結晶方位を有していることがわかる。このことから、難燃性マグネシウム合金においてもアルミニウム合金と同様の、動的再結晶のメカニズムで摩擦攪拌接合されていると考えられる。



(a) 母材部 (b) 摩擦攪拌部

図16 母材部及び摩擦攪拌部のEBSD方位解析結果

#### 4.2 難燃性マグネシウム合金に対するレーザーMIG溶接の検討

熱影響部の少ないレーザーMIGハイブリッド溶接を難燃性マグネシウム合金への適用について検討した。方法は、難燃性マグネシウム合金に押出加工を行って中空型

材を試作し、試作材をレーザーMIGハイブリッド溶接して継手断面部分の金属組織観察及びEBSDによる結晶粒の方位分布を調べてその特徴を調査した。図17に断面金属組織観察結果を示す。また、図18に母材と熱影響部のEBSD方位解析結果を示す。

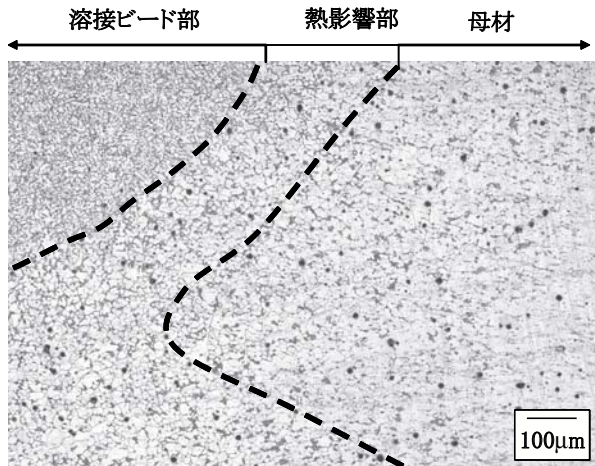


図17 レーザハイブリッドMIG溶接材の接合部断面観察結果

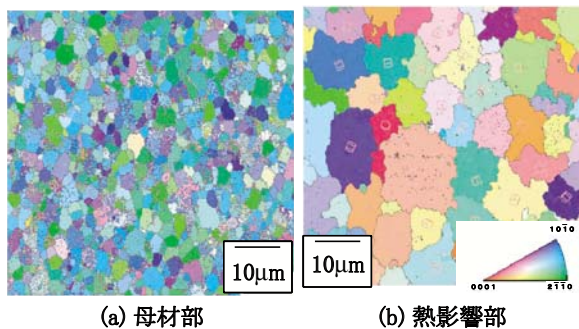


図18 母材及び熱影響部のEBSD方位解析結果

レーザーハイブリッドMIG溶接では、従来のMIG溶接と同様に熱影響部において結晶粒は粗大化し、粗大粒はFSWの摩擦攪拌部と同様に様々な結晶方位を有していることが明らかになった。レーザーハイブリッドMIG材の熱影響部は、押出加工時の加工歪が熱の影響で回復あるいは粒成長するために、結晶粒が粗大化したと考えられる。このような粗大化はアルミニウム合金よりも顕著であるが、特に異常な状態ではない。今後、このような粗大粒の強度に対する影響を調査する必要がある。

#### 4.3 新軽量金属材に対する溶接技術

新軽量金属材として難燃性マグネシウム合金を取り上げ、難燃性マグネシウム合金へのFSW及びレーザーMIGハイブリッド溶接の適用について調査した。難燃性マグネシウム合金にFSW及びレーザーMIGハイブリッド溶接

で接合したところ、金属組織学的に見てアルミニウム合金とほぼ同様の材料挙動を示すことがわかり、その接合メカニズムもアルミニウム合金と同じであると考えられる。このことから、難燃性マグネシウム合金の溶接方法としてFSWやレーザーMIGハイブリッド溶接の適用可能があると考えられる。今後は難燃性マグネシウム合金のFSW及びレーザーMIGハイブリッド溶接材の接合強度特性などをさらに検討して、強度的な面を含めた総合的な評価を行って溶接性を考える予定である。

#### 5. まとめ

近年、車両製造に適用されつつある本稿でとりあげた溶接技術は熱影響が少なく、継手強度も高いことが特徴である。今後のこれらの溶接技術を適用拡大するためには、材料の種類、継手形状、強度特性及び今回実施したような接合部の材料学的な検討を重ねることが必要であると考えられる。

#### 文献

- 1) 熊谷正樹：アルミニウム材料の最近の固相接合方法—摩擦攪拌接合 (FSW)、軽金属溶接, Vol.46, No.8, pp.358-363, 2008
- 2) 杓名宗春：レーザー溶接の基礎 (特集 レーザ加工の基礎), レーザ加工学会誌, Vol.15, No.4, pp.246-254, 2008
- 3) 森 久史, 野田雅史, 富永誉也：鉄道車両への摩擦攪拌接合の適用の現状, 軽金属, Vol. 57, No. 11, pp.506-510, 2007
- 4) 酒井康士：鉄道車両へのアルミニウム合金適用の現状と今後の展開, 軽金属, Vol. 56, No. 11, pp.584-587, 2006
- 5) 江口法孝, 笹部誠二：レーザー・アークハイブリッド溶接のアルミニウム合金への適用, 神戸製鋼技報, Vol.54, No.2, pp.57-61, 2004
- 6) 米谷 弘：レーザー・MIGハイブリッド溶接のアルミニウム車両への適用, 近畿車輛技報, Vol.13, No.10, pp.33-35, 2006
- 7) 坂本 満, 上野英俊：部材の軽量化による輸送機器の省エネルギー—難燃性マグネシウムの研究開発, 構成学, Vol.2, No.2, pp.127-136, 2009
- 8) 伊藤吾朗, 伊勢野陽平, 本橋嘉信：冷間圧延とその後の焼鈍によるマグネシウム合金展伸材AZ31の再結晶粒微細化, 日本金属学会誌, Vol.66, No.1, pp.16-21, 2002
- 9) 西澤正行, 森 宏治, 大石幸広：マグネシウム合金再結晶挙動のEBSDその場観察, 軽金属, Vol.59, No.7, pp.333-338, 2009