

難燃性マグネシウム合金の摩擦攪拌接合技術

森 久史* 上東 直孝**
森本 文子*** 松井 元英***

Application of the Friction Stir Welding to Flame-resistant Magnesium Alloys

Hisashi MORI Naotaka UEHIGASHI
Fumiko MORIMOTO Motohide MATSUI

The anisotropy effect of the plate materials as well as the influence of the tool materials on friction stir welding (FSW) of flame-resistant magnesium alloy was investigated. Also, in this test, the possibility that hollow-shaped materials made of flame-resistant magnesium alloy are joined by FSW was investigated varying the tool feed speed and the rotating speed of tool on FSW. The results were as follows, it was found that the application of a tool made of steel with small heat conduction is more desirable than a tool made of ceramics or a tool made of SUS. The joint conditions were influenced by tool materials and anisotropy effect of the plate materials, as well as the feed speed and the rotating speed of the tool used in FSW. Before putting FSW to a practical use, it is necessary to obtain the basic data concerning joints under each condition experimentally. It was shown that surface defects do not appear, even if defects are generated inside the joint of hollow-shaped materials. It is important to check the joint through the observation of its surface and cross-section as well as nondestructive inspection such as X-ray inspection. It was found that the joining hollow-shaped materials under the conditions under which plate materials can be joined is difficult. This is because in the FSW of hollow-shaped materials, the distribution of the heat is more complicated than the FSW of plate materials, which influence the ease of FSW. It is suggested that it is necessary to analyze the distribution of the frictional heat and design a coupler shape for appropriate FSW of hollow-shaped materials.

キーワード：車両軽量化，難燃性マグネシウム合金，摩擦攪拌接合，板材，中空形材，欠陥

1. はじめに

鉄道車両の省エネルギー化および騒音振動の低減化に対して車両の軽量化が有効である。現在、アルミニウム合金製車両のさらなる軽量化を目的として、難燃性マグネシウム合金の鉄道車両部材および部品への適用について検討を進めている¹⁾。

鉄道車両に対する新材料の適用を考えるに当たり、溶接・接合技術は合金開発や加工技術とともに重要な課題となる。現在では、溶接・接合技術にアーク溶接としてメタルイナートガス (MIG) 溶接や摩擦攪拌接合 (FSW) が使用されている。

FSW は、溶接時の熱の影響がアーク溶接と比べて小さいことから軽金属材料の接合に有効であると期待され、適する条件の探索や異種材接合の検討^{2) ~ 5)}、アルミニウム合金製車両の実製造に適用されている^{6) 7)}。そこで、難燃性マグネシウム合金についても FSW に関す

る基礎から応用の知見が必要になるが、難燃性マグネシウム合金の FSW に関する検討は少ない。そこで本報では、これまで実施した難燃性マグネシウム合金の板材の FSW に対する検討結果の概要を示す。その後、難燃性マグネシウム合金の板材の FSW に及ぼすツール材質と材料の加工方向の影響について調べた結果を記す。さらに難燃性マグネシウム合金製の中空形材を試作し、中空形材への FSW の適用に対する基礎研究を行った結果を示す。

2. 難燃性マグネシウム合金の FSW の概要と課題

FSW ではアルミニウム合金に関しての知見が多く見られるが、難燃性マグネシウム合金の FSW に関する研究に関する報告は多くない。著者らはこれまで、難燃性マグネシウム合金への FSW の適用の基礎研究を進めており、FSW による板材接合の実施および接合部の金属組織の特徴解析、適正条件範囲の探索、継手強さおよび疲労強度の検討を行ってきた。これまで得られた知見を下記にまとめて示す。

* 前 材料技術研究部

** 材料技術研究部

*** 材料技術研究部 摩擦材料研究室

特集：材料技術

- ・難燃性マグネシウム合金の板材では、アルミニウム量およびカルシウム量によらず、ツール回転速度が1000rpm程度、送り速度が5～20mm/sであれば接合が可能である^{8) 9)}。
- ・このツール送り速度およびツールの回転速度の適正条件の範囲はアルミニウム合金に比較して狭いため、アルミニウム合金よりもFSWによる接合は難しいと考えられる。
- ・接合部の断面組織には塑性流動が観察された。その流動は、接合方向に対し、ツール回転方向が一致する前進側(Advancing Side: AS)とツール回転方向が逆方向となる後退側(Retreating Side: RS)で非対称であることが認められた。これはRS側からAS側に金属組織が流動したためと考えられ、このような塑性流動はアルミニウム合金の接合の際にも現れることから特に異常ではない^{10) 11)}。
- ・難燃性マグネシウム合金の接合部断面には攪拌部(Stir Zone: SZ)、熱加工影響部(Thermo-Mechanically Affected Zone: TMAZ)、熱影響部(Heat Affected Zone: HAZ)が認められ、一般的なFSWで認められる特有の組織形態を示す^{8) 9) 10)}。
- ・SZ内は結晶粒や析出物が母材と比較して微細化しており、約10 μ m程度以下であった。また、部分的に集合組織の形成が認められた。結晶粒の微細化は攪拌時の塑性変形と摩擦熱によって生成したと考えられる¹¹⁾。
- ・接合部に認められる析出物は主に微細なAl₂Caであり、析出物の微細化は攪拌時に機械的に分断されて生じたと考えられる^{8) 11)}。
- ・FSW接合材の継手の引張強さは母材の80～95%程度を維持し、平面曲げ疲労試験では疲労限度が母材の70%程度を維持していた。これは結晶粒の微細化が影響しているためであると考えられる⁸⁾。

このように、難燃性マグネシウム合金の板材に関する基本的な知見は得られたが、ツールの材質や材料の加工方向の影響については今後の課題である。また、難燃性マグネシウム合金の車両への適用では、車両用素形材で使用される中空形材の接合が必要になり、中空形材の接合の基礎研究についても行う必要がある⁶⁾。

3. 板材の摩擦攪拌接合に対するツール材質と材料の加工方向の影響

3.1 実験方法

3.1.1 供試材

本試験で用いた難燃性マグネシウム合金はMg-6Al-Zn-Ca合金(AZX611合金)であり、化学成分は、Alが6.3%、Znが0.56%、Mnが0.27%、Caが1.12%、残りがMgである。合金には不純物として0.03%以下の

Si、0.002%以下のFe、Cu、Niが含まれているが、JIS H4204 マグネシウム合金押出形材で規定される含有量以下の値である。

3.1.2 FSWによる接合

FSWによる接合は、板材の圧延方向に対して平行(長手方向)もしくは垂直(幅方向)に行った。

ツールにはセラミックス(Si₃N₄)製およびステンレス(SUS)製の2種類を用いた。SUS製ツールではプローブ先端にねじ加工が施されているが、セラミックス製ツールではプローブ先端にねじ加工が施されていない。

加工条件はツール挿入量が2.9mm、ツール挿入後保持時間が5s、ツール回転速度が1000rpm、ツール前進角が3°とし、送り速度は10mm/sおよび20mm/sで行った。

3.1.3 接合材の断面観察

得られた接合材を精密切断機によって切断し、研磨および腐食処理後に光学顕微鏡を用いて欠陥の発生有無について調べた。

3.2 実験結果および考察

FSW接合後のサンプルは外観上、接合部周辺にバリが認められるものもあるが、表面の接合欠陥等は認められなかった。また、接合材には強い曲がり等の発生は認められなかった。

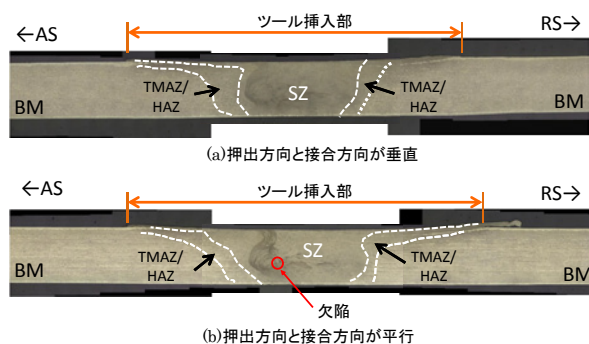


図1 SUS製ツールのFSW接合材の断面マクロ観察結果(送り速度:10mm/s)(BM:母材)

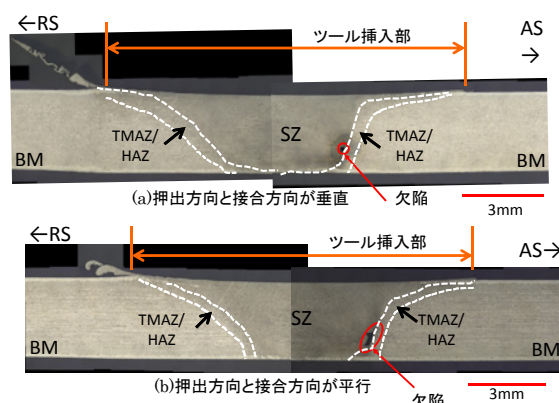


図2 Si₃N₄製ツールのFSW接合材の断面マクロ観察結果(送り速度:10mm/s)(BM:母材)

接合材を接合部で切断して接合部のマクロ観察を行った。送り速度を 10mm/s として接合した時の断面マクロ組織観察結果を図 1 および図 2 に示す。図 1 は SUS 製ツール、図 2 は Si₃N₄ 製ツールを用いて接合した時の断面マクロ観察結果を示した。図に示すように、SUS 製ツールを用いて押し出し方向と接合方向が垂直になるように接合した場合（図 1 (a)）を除いて内部欠陥の発生が認められた。また送り速度を 20mm/s とした場合にはすべてのケースにおいて内部欠陥の発生が認められた。欠陥は主に AS 側に認められ、SZ と TMAZ との境界に発生していた。

欠陥および欠陥周囲の金属組織の観察例を図 3 および図 4 に示す。欠陥の周辺の金属組織は微細化しているが、一部の結晶粒の粗大化が認められた。また、未接合部や欠陥を境にして金属の結晶粒の大きさが異っていた（図 4）。

Si₃N₄ 製ツールではプローブ先端のねじ加工が行われていないため、攪拌が不十分になり欠陥が発生したと考えられる。また、ねじ加工が施されている SUS 製ツールでも 20mm/s では入熱不足であったと考えられる。

一方、10mm/s では入熱は十分であるが、材料の加工

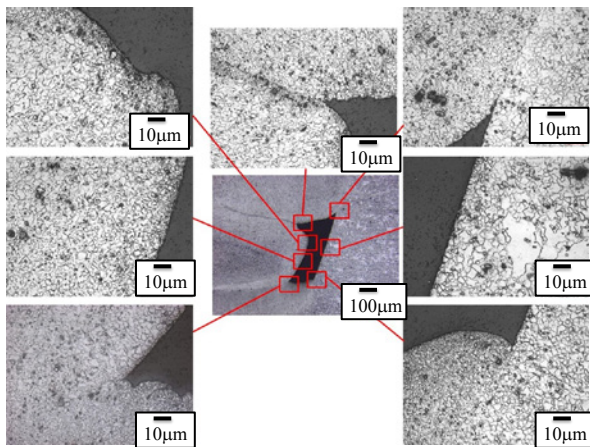


図 3 欠陥の周辺の金属組織（Si₃N₄ 製ツール、送り速度：10mm/s、接合と押し出し方向が平行）

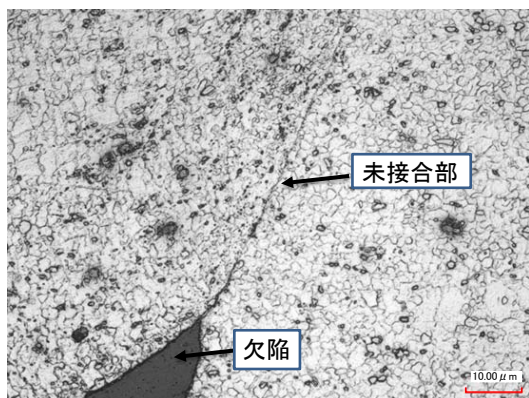


図 4 欠陥の周辺の金属組織の拡大観察結果の一例

に伴う変形抵抗の差異が影響し、押し出し方向と接合方向が垂直な場合では健全な接合ができたのに対し、水平な場合では欠陥が発生したと考えられる。

3.3 まとめ

難燃性マグネシウム合金の板材の FSW に対するツール材質と材料の加工方向の影響について調べた。ツールの材質は送り速度および材料の加工方向とともに接合性に影響を及ぼすことがわかった。現状では、ツール先端のねじ加工が必要であり、本研究で検討した Si₃N₄ 製ツールおよび SUS 製ツールの使用を考えた場合、Si₃N₄ 製ツールではねじ加工が困難であるため、SUS 製ツール等の鉄鋼製ツールの適用が望ましいと考えられる。ただし、ツール材質やツール径などを変更した場合には、ツール回転数等の接合条件について、実験による検証が必要になると考えられる。

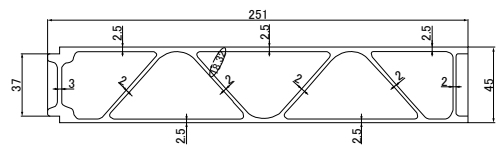
4. 中空型材の摩擦攪拌接合の基礎的検討

4.1 実験方法

4.1.1 供試材

本試験で用いた難燃性マグネシウム合金は Mg-6Al-Zn-Ca 合金（AZX611 合金）であり、化学成分は 3.1.1 で説明したものとほぼ同等である。本試験では、押し出し加工により試作したトラス形状を有する中空押し出型材を用いた。

なお、試作材は三協立山(株)三協マテリアル社から提供を受けた。図 5 に形状と寸法を示す。



(単位：mm)

図 5 接合試験に用いた中空型材の形状および寸法

表 1 接合条件

番号	R (mm/min)	r (rpm)	w (mm)
1	300	2000	4.4
2	300	1000	4.4
3	300	600	4.9
4	150	600	4.9
5	100	600	5.2
6	100	600	5.0

4.1.2 FSW による接合

FSW では、これまでの試験的検討の結果から、ダイス鋼（SKD61）製のツールを用いた。ツールは、シヨ

特集：材料技術

ルダ径が ϕ 16mm、プローブ径が ϕ 6mm、プローブ長が4.9mmである。プローブ先端には左ねじ細目加工を施してある。

FSWのツールの前進角は 3° とし、ツールの送り速度(R)、回転速度(r)、押し込み量(w)の適正条件の探索を行うため、表1に示す6条件での接合を試みた。

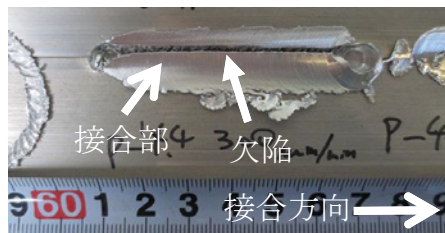
4.1.3 接合材の調査

得られた接合材については、まず外観観察を行って表面欠陥の有無について調べた。また一部の接合材については、精密切断機を用いて断面観察用の試験片を作成し、研磨及び腐食処理後に光学顕微鏡により断面マクロ観察を行って表面欠陥の状態や内部欠陥の発生状態について調べた。また欠陥周辺のマイクロ組織観察を行って金属組織の特徴を調べた。

4.2 実験結果および考察

4.2.1 外観観察

接合材の外観観察結果の例を図6に示す。条件1および条件2では接合線に沿って線状にむしれた状態(溝状欠陥)が接合開始点から接合終了点までの間に認められ



(a)接合材(条件2で接合)



(b)接合材(条件4で接合)



(c)接合材(条件6で接合)

図6 接合部の接合線の外観

た。条件3および条件4での接合では、表面欠陥は認められず、健全な接合面が得られた。条件5および条件6では溝状欠陥が認められたが条件1および2に比べて軽微であった。ツールの回転速度が大きい場合、あるいは回転速度が小さくとも、送り速度が小さい場合に表面欠陥が発生しやすいことがわかった。ツールの回転速度が大きい場合や回転速度がに対して送り速度が小さい場合には入熱過剰となる。このように、ツール回転速度および送り速度は入熱状態に影響し、結果として過剰熱量による欠陥が現れたと考えられる。

4.2.2 接合部の断面マクロ観察結果

接合部の断面マクロ観察結果の例を図7に示す。条件1は溝状欠陥が認められた接合材、条件4は表面欠陥が認められなかった接合材、条件5は軽微な溝状欠陥が認められた接合材である。接合部断面のSZの形態はAS側とRS側とで非対称であった。これはRS側からAS側に組織が流動しているためであると考えられる。

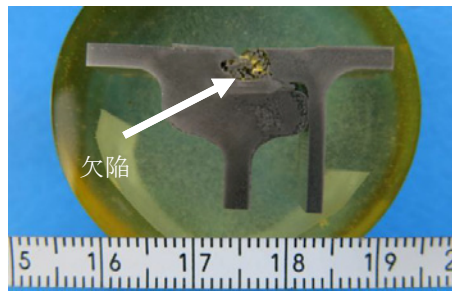
ここで条件1では、表面に認められた溝状欠陥が内部の底部に広がっている状態が認められた。溝状欠陥の開口量は表面部で約2.5mm、最大幅は5mmであり、深さは3mmであった。

条件2も同様であり底部にも空洞状の欠陥が認められた。条件4の接合材では表面欠陥は認められなかったが溶接部の底部に内部欠陥の発生が認められた。条件3も同様の状態であった。内部欠陥としては、条件3では非常に微細な空洞状の欠陥が複数認められたのに対し、条件4では条件3で認められた欠陥よりも粗大であり、その形状も巣状であり、巣状欠陥に隣接するように複数の空洞状欠陥が認められた。

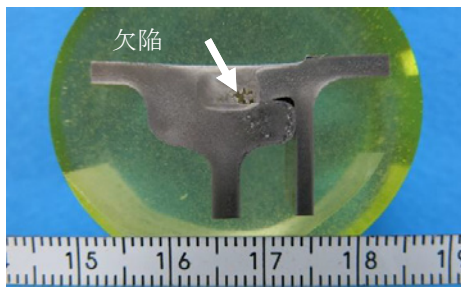
欠陥は条件3では接合部内部(攪拌層)、条件4では底部に認められた。条件5では欠陥が表面から内部にまで至っていた。条件6も同様にこの傾向が認められた。表面の欠陥の開口量は小さいが底部方向に欠陥が広がっており、底部には空洞状欠陥が認められた。この傾向は条件1および2と同じであり、溝状欠陥の表面の開口量が異なっているだけである。さらに共通することとして、リブの座屈が顕著であることが挙げられる。

4.2.3 接合部の断面マイクロ/マクロ観察結果

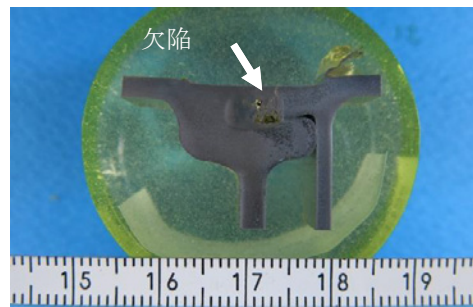
接合部の断面マイクロ/マクロ観察結果の例を図8に示す。欠陥は主にSZのRS側に認められた。また、複数の微細な空洞状欠陥が発生し、その一部が連結・合体して大きな欠陥となり、接合条件はその空洞の数や大きさに影響を及ぼしていた。さらに攪拌部の結晶粒は $10\mu\text{m}$ 以下まで微細化しているが、欠陥周囲の流動金属がせん断で分離しているのが認められた。図9に断面継手部のマクロ観察結果の一例を示す。ツール挿入箇所から表面板厚方向に結晶粒が粗大化していた。また、継手の下部の受け部とリブとの接触部にも粗大粒の発生が認めら



(a)接合材(条件1で接合)



(b)接合材(条件4で接合)



(c)接合材(条件5で接合)

図7 接合部継手断面のマクロ観察結果

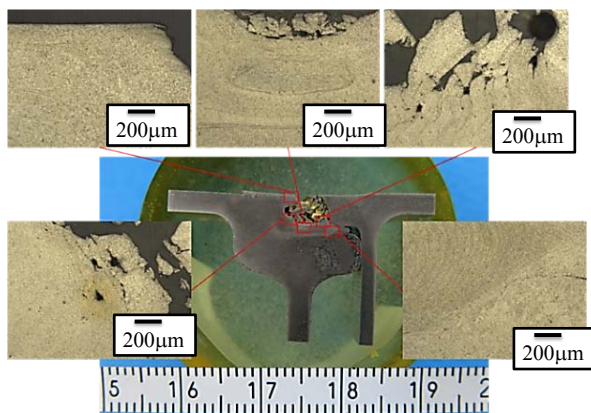
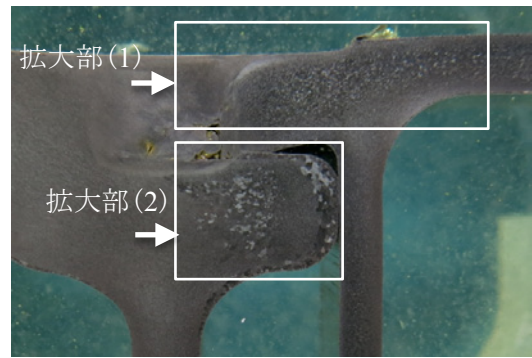


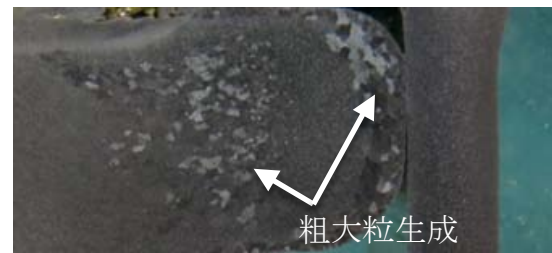
図8 継手部のマクロ観察結果と欠陥部のミクロ観察結果(条件1で接合)



(a) マクロ観察結果(条件3)



(b) (a)の拡大部(1)



(c) (a)の拡大部(2)

図9 断面マクロ観察結果および粗大粒の発生箇所の拡大観察結果

れる。一般的にFSWでは摩擦熱が発生し、それが部材等の形状によって変化する⁶⁾。特に中空形材では、内部が空洞であり、放熱過程が板材よりも複雑になると考えられる。このことから、中空形材の継手部では摩擦による発熱や冷却が均一でなく、結晶粒の粗大化やせん断分離後の不十分な再結合が発生しやすくなると考えられ、これが欠陥として現われたと考えられる。以上より発熱・放散の不均一性が、中空形材のFSW接合を困難にしていると考えられ、現在、熱解析等を行って継手形状の最適化を行っているところである。

4.3 まとめ

難燃性マグネシウム合金製の中空形材を試作し、ツール送り速度、回転速度、押し込み量を変えて形材同士をFSWにより接合して接合可能性の基礎検討を行った。

中空形材へのFSWでは、摩擦熱の放散過程が板材に比して極めて複雑であり、その温度分布が接合性に影響を強く及ぼしていると考えられる。そのため、中空形材

特集：材料技術

へのFSWを適切に行うためには継手形状の設計を適切に行う必要があると考えられる。また、板材と同様、表面に欠陥が認められなくとも、内部に欠陥が発生している場合がある。そのために、表面観察や断面観察とともに、X線等の非破壊検査による欠陥発生検査を行っておく必要がある。

5. おわりに

難燃性マグネシウム合金の板材のFSWに対するツール材質と材料の加工方向の影響について調査した。また、難燃性マグネシウム合金製の中空形材を試作し、ツール送り速度、回転速度、押し込み量を変えて形材同士をFSWにより接合し、接合可能性の基礎検討を行った。結果を総括して下記に示す。

- (1) ツールの先端のねじ加工は送り速度および材料の加工方向とともに接合性に影響を及ぼす。本研究で検討したような Si_3N_4 製ツールは加工が困難であるため、加工性と強度を有する鉄鋼製ツールの適用が望ましいと考えられる。
- (2) ツール材質やツール径などを変更した場合、接合条件についての実験による検証が必要になると考えられ、現状では、各条件での接合に関する基礎データを試験的に求めておく必要がある。
- (3) 中空形材を接合する際、表面に欠陥が認められなくとも、内部に欠陥が発生している場合がある。そのために、表面観察や断面観察とともに、X線等の非破壊検査による欠陥発生検査を行っておく必要がある。
- (4) 中空形材のFSWによる接合では、摩擦熱の放散過程が板材よりも極めて複雑であり、その熱分布が接合性に強く影響するため、欠陥が発生しやすいと考えられる。
- (5) 中空形材のFSWを適切に行うには摩擦熱分布の解析を行って、適切な継手形状の設計を行う必要があると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、三協立山(株)三協マテリアル社 清水和紀様、(株)総合車両製作所 石川武様にご協力を得た。心より厚くお礼申し上げます。

文献

- 1) 森 久史, 藤野謙司, 栗田 健, 千野靖正, 齊藤尚文, 野田雅史, 駒井 浩, 小原 久: 高速鉄道車両への難燃性マグネシウム合金の適用, までりあ, Vol.52, No.10, pp. 484-490, 2013
- 2) 加藤敦良, 時末 光: 難燃性マグネシウム合金摩擦攪拌接合継手の機械的性質, 溶接学会全国大会講演概要, pp.14-15, 2004
- 3) 青沼昌幸, 中田一博: 摩擦攪拌接合法による異種金属接合, 塑性と加工, Vol.53, No.621, pp.869-873, 2010
- 4) 中田一博: 異種材料接合のニーズとその接合法, 溶接技術, Vol.62, No.5, pp.71-76, 2014
- 5) 山本尚嗣, 廖 金孫, 中田一博: 高強度 Mg 合金の摩擦攪拌接合特性, 高温学会, Vol.37. No.4, pp.197-202, 2011
- 6) 宮道知典: 鉄道車両への摩擦攪拌接合の適用, 電気製鋼, Vol.78, No.2, pp.141-147, 2007
- 7) 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
- 8) 森 久史, 上東直孝: 車両軽量化に向けた難燃性マグネシウム合金への摩擦攪拌接合の適用, 機械学会交通・物流部門大会講演論文集, pp.35-36, 2014
- 9) 森 久史, 上東直孝, 辻村太郎: 車両構体への難燃性マグネシウム合金の適用, 鉄道総研報告, Vol.28, No.2, pp.41-46, 2014
- 10) 森 久史, 辻村太郎: 鉄道車両構体用の最新溶接技術, 鉄道総研報告, Vol.24. No.8, pp.53-58, 2010
- 11) 上東直孝, 森 久史: 難燃性マグネシウム合金の接合材の機械的特性評価, (一社)軽金属学会, 第130回春季大会講演論文集, pp.128-129, 2016