

## 車両構体への難燃性マグネシウム合金の適用

森 久史\* 上東 直孝\* 辻村 太郎\*\*  
石塚 弘道\*\*\* 花木 悟# 清水 和紀#

### Application of the Flame - resistant Magnesium Alloy to Body Shell

Hisashi MORI Naotaka UEHIGASHI Taro TSUJIMURA  
Hiromichi ISHIDUKA Satoru HANAKI Kazunori SHIMIZU

It is expected to use flame-resistant magnesium alloy having high specific strength, in order to lessen the weight of the body shell. Since the research and development of flame-resistant magnesium alloy has just started, its basic data and process technologies have yet to be well understood. This paper presents the results of investigations on its test processing, evaluation of its mechanical properties and workability. A trial for manufacturing hollow extruded materials and establishing the welding process is also briefly described.

キーワード：構体軽量化，難燃性マグネシウム合金，強度，中空形材，接合

### 1. はじめに

新幹線電車のさらなる省エネルギー化が求められ、車両の軽量化はそのための技術課題の一つとして挙げられる。

車両の軽量化には軽量材料の適用が有効であると考えられており、新幹線電車の車両構体へのアルミニウム合金の適用によりその効果が確認されている<sup>1) 2)</sup>。今後、車両構体の軽量化をさらに図るため、アルミニウム合金よりも軽量である難燃性マグネシウム合金の適用を検討している。

難燃性マグネシウム合金は、マグネシウム合金にカルシウムを添加して発火性を抑制した材料であり、この適用により、従来から問題とされてきた難燃性については改善できると考えられる。しかし、鉄道車両構体へ適用するには課題も多い。そこで本稿では、最初に車両構体の軽量化の現状等について簡単に説明し、次いで、車両構体への適用を目標として、新規の難燃性マグネシウム合金を試作して、金属組織の特徴、機械的性質、加工性を調べた。また、剛性を確保するための中空押出形材の作製の可能性、さらに溶接・接合技術を調べた結果について報告する。

### 2. 難燃性マグネシウム合金の適用による軽量化

車両構体の材料開発においては、軽量化、省メンテナンスなどを目的として、鋼からアルミニウム合金、ステンレス鋼、樹脂系複合材料 (CFRP)、アルミニウム合金製ハニカムパネルへの転換が図られてきたが<sup>2) 3) 4)</sup>、CFRP やハニカムパネルは車両の一部への適用に留まり、現在ではアルミニウム合金の適用が大半を占めている<sup>5)</sup>。

今後、車両構体のさらなる軽量化への検討に向けては、アルミニウム合金よりも軽いマグネシウム合金への置換えが考えられる。

マグネシウム合金は CFRP 程度の密度であり極めて軽く、しかも比強度 (単位重量当りの引張強さ) が高いため、大幅な軽量化が期待されるが、その構体への適用については検討された例はない。その理由として、マグネシウム合金は、化学的に活性であり、発火する可能性があること、さらに構造材料としての実績がないことが挙げられる。そのため、実用に対しては、この発火性を抑制する特性 (ここでは難燃性と定義する) を考える必要がある。

難燃性を付与する方法として、マグネシウム合金にカルシウムを添加することが有効であることが知られており、本稿ではこれを難燃性マグネシウム合金と言う<sup>5)</sup>。難燃性マグネシウム合金については、試作はされているものの諸性質が不明であり、実用段階には至っていない。

そこで、本研究では、難燃性マグネシウム合金の車両構体への適用を目的とし、材料に関する基礎的な検討を行った。

\* 材料技術研究部 摩擦材料研究室

\*\* 材料技術研究部

\*\*\* 車両構造技術研究部

# 三協立山株式会社 三協マテリアル社

特集：材料技術

3. 検討内容

新しい材料を車両構体に適用するためには、その材料の試作手法を確立することや機械的性質等の諸特性を把握する必要がある。また、車両構体の組立に必要となる素形材の加工技術および溶接・接合技術などについても検討する必要がある。本研究では、基礎的な検討として、表1の項目について調べた。

表1 調査項目

項目	目標	実施内容
合金材の試作および金属組織の評価	欠陥のない作製手法	様々な雰囲気下での casting 法による試作
	金属組織の均質化	試作材の金属組織観察
難燃性、機械的性質、加工性	アルミニウム合金程度の諸特性の確保	難燃性、機械的性質（強度および伸び）、加工性（高温延性および圧延性）の調査
中空形材の試作	高精度な形材試作の可能性の確認	押出手法によるモデル中空形材の試作および寸法精度の評価
溶接・接合法	溶接・接合の可能性の確認および溶接・接合部の状態の把握	アーク溶接および摩擦攪拌接合（FSW）による接合性の検討および溶接・接合部の金属組織の評価

4. 検討結果および考察

4.1 合金材の試作および金属組織の評価

4.1.1 合金材の試作

一般的なマグネシウム合金の材料設計では、高強度化を目的としてアルミニウム、铸造性の改善で亜鉛が添加される。そこで、本研究では、亜鉛、アルミニウムおよびカルシウムを化学組成とする難燃性マグネシウム合金を試作した。マグネシウム合金の製造では铸造雰囲気が強影響する。そこで、溶解した後に、大気中および真空中の雰囲気で行い、その金属組織を調べた。図1にマグネシウムにアルミニウムを6%、亜鉛を1%、カルシウムを1%添加した難燃性マグネシウム合金（Mg-6Al-Zn-Ca合金（以降、AZX611合金とする）を大気および真空中で溶解して作製した時の金属組織を示す。大気铸造では欠陥が顕著に認められた。一方、真空铸造では

欠陥の発生のない良好な金属組織が得られた。これらより難燃性マグネシウム合金の試作では雰囲気の影響が大きいことが分かり、真空铸造は欠陥の発生がない良好な難燃性マグネシウム合金が作製できることを確認した。

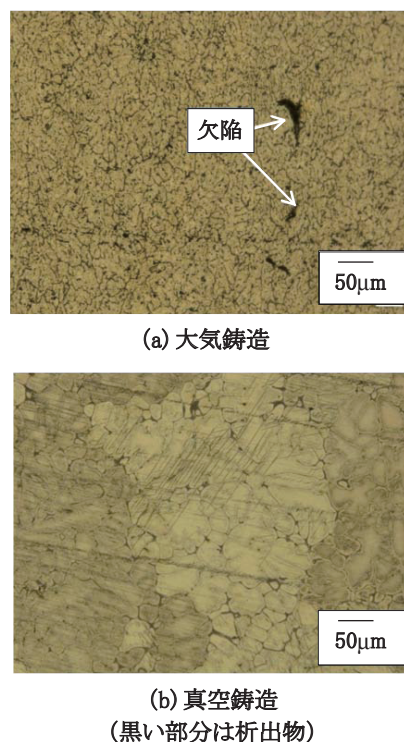


図1 铸造雰囲気を変えて作製した材料の金属組織

4.1.2 金属組織の評価

アルミニウム合金の金属組織では、化学組成に応じた化合物が結晶粒内に析出した状態で認められるのが標準である。しかし、難燃性マグネシウム合金での標準的な金属組織は不明である。そこで、難燃性マグネシウム合金の金属組織を調べた。

図2にAZX611合金（圧延材）の金属組織を光学顕微鏡によって観察した結果を示す。図2に示すように、結晶粒を下地として、粒状の析出物が粒界に沿って網目状、また粒内に認められる。この析出物を透過型電子顕微鏡（TEM）により観察した結果を図3に示す。

図3(a)に示すように10μm以下の析出物が多く認められる。析出物は図3(b)に示すように規則的な原子配列から構成されている。この析出物は、原子配列の間隔および別途行った化学成分の分析より、アルミニウムとカルシウムとの化合物であると考えられる。また、圧延の他に、押出加工においても同様の金属組織の状態であることを確認した。

これらより、難燃性マグネシウム合金の標準的な金属組織は、結晶粒にアルミニウムとカルシウムとの化合物が析出した状態であると考えられ、このようなカルシウ

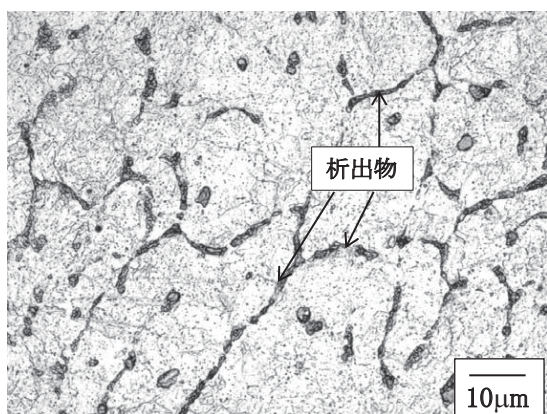


図2 AZX611合金圧延材の金属組織観察結果

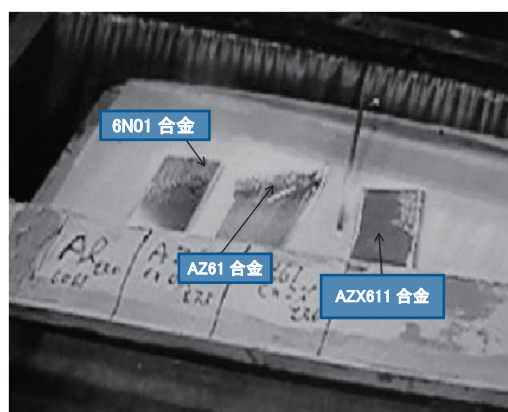
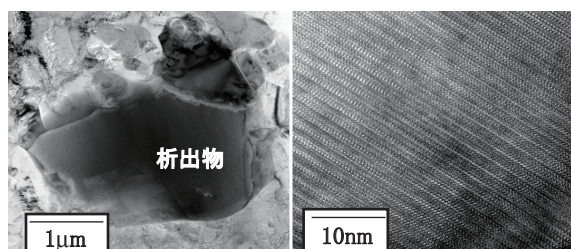


図4 難燃性試験の試験状況



(a) 金属組織の詳細 (b) 析出物の原子像

図3 析出物のTEMによる観察結果

ムの化合物を形成することから難燃性や高強度化が期待できる。

## 4.2 難燃性、機械的性質、加工性の評価

### 4.2.1 難燃性の評価

難燃性マグネシウム合金を試作して難燃性を調べた。難燃性を示す定量的な指標がないため、本調査では試験材を直接ガスバーナで加熱し、加熱中の温度を熱電対により測定して発火性の有無で難燃性を評価した。

試験には、カルシウムの添加の有無の影響を調べるために、AZX611合金とそのカルシウム未添加材(Mg-6Al-Zn合金：AZ61合金)を用いた。また、アルミニウム合金との比較を行うために、6000系アルミニウム合金(6N01合金)も用いた。図4に難燃性試験の試験状況を示す。カルシウムが添加されていないAZ61合金では450℃で発火し始めたが、それにカルシウムが添加されているAZX611合金と6N01合金では、発火せずに溶融する結果が認められた。

このことから、AZX611合金の難燃性は、6N01合金と同等であり、カルシウム添加によって、マグネシウム合金の難燃性が向上することを確認した。このようなカルシウムの添加による難燃性の向上については、酸化被膜の形成が酸素を遮断するためであると考えられるが、詳細なメカニズムの検討は今後の課題である。

### 4.2.2 機械的性質の評価

難燃性マグネシウム合金中のアルミニウムの量は、図3に示すような析出物に影響を及ぼし、それが強度に影響を与えると考えられる。本研究では、供試験材に、亜鉛を1%、カルシウムを1%添加し、アルミニウムの添加量を3、6、9%に変えた難燃性マグネシウム合金(圧延板材)を作製して引張試験を行った。

用いた試験片はJIS 14号比例試験片に準じて機械加工により作製した。試験は室温、大気中で行った。表2に耐力、引張強さおよび伸びを示す。難燃性マグネシウム合金(AZX611合金およびAZX911合金)は、強度が6N01合金の最低値以上を示すことが確認できた。

表2 試作した難燃性マグネシウム合金の耐力、引張強さおよび伸び

合金記号	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
Mg-3Al-Zn-Ca (AZX311合金)	230	255	16
Mg-6Al-Zn-Ca (AZX611合金)	270	285	15
Mg-9Al-Zn-Ca (AZX911合金)	260	270	7
6N01 (JIS)	250以上	-	20以上

### 4.2.3 加工性の評価

難燃性マグネシウム合金は加工しにくい結晶構造を有するために室温での加工は難しい。そのため加工時には温度および加工速度の調整が必要になる。そこで、難燃性マグネシウム合金の高温変形試験を行い、破断までの伸び(延性)に対する温度と初期ひずみ速度(加工速度に比例)の影響を調べた。図5には一例としてAZX611合金について調べた結果を示す。

温度150℃では、ひずみ速度に対して伸びに変化が認

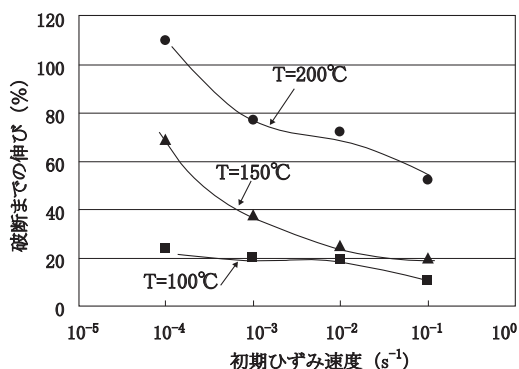


図5 AZX611合金の破断までの伸びに対する温度および初期ひずみ速度の影響

められないが、温度を上昇させ、初期ひずみ速度を下げることで伸びは増加するようになり、再結晶（変形時の内部ひずみを緩和するように金属組織が変化する現象）温度である200℃では大幅な伸びが認められるようになり、さらに低ひずみ速度で変形を加えると100%以上の伸びとなった。以上より、加工を行うには温度と加工速度の調整が必要であると考えられる。

一般的に、実際の素形材の作製で使用される圧延や押出加工における加工速度は、図5に示すような初期ひずみ速度より大きい。そこで、初期ひずみ速度の大きい条件での加工性を調べる目的で、圧延加工を行って加工性を調べた。AZX611合金を100℃で圧延した例を図6に示す。

圧延加工は100℃において可能であったが、反りが大きく、板材の端部に割れ（耳割れと呼ばれる）の発生が認められた。しかし、図5に示すように、加熱温度を増加して圧延を行うと大きく変形し、欠陥発生が少ない圧延板が得られることを確認した。このことから、難燃性マグネシウム合金では、アルミニウム合金のような室温における加工は難しいが、加熱することによって加工性が増すと考えられる。

### 4.3 中空形材の試作の検討

アルミニウム合金を車両構体に適用する際、鉄鋼材料に比べて弾性率が低いために剛性の確保が課題であり、このことからトラス形状の中空形材が用いられるようになった<sup>1)</sup>。

難燃性マグネシウム合金の弾性率は一般的なマグネシウム合金と変わらず、アルミニウム合金よりも低い。そのため剛性に関する検討が必要になる。

そこで、難燃性マグネシウム合金の中空形材の作製の可能性を確認するために、中空形材の試作を行ない、試作品の寸法精度をノギスで測定した。

試作に当たり、剛性を設定して形材の形状を決めるこ

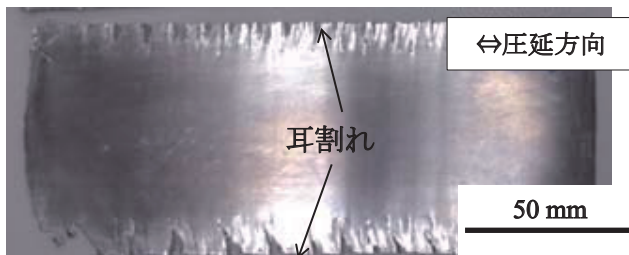


図6 AZX611合金の圧延板材（100℃）の外観

とが必要である。本研究では、モデル形材として、幅が250mm、高さが50mm、長さが10mの形材を試作した。その際、目標寸法として、上面および下面肉厚を2.0mm、中リブ（中骨）の肉厚を1.5mmとした。

図7に試作したAZX611合金の中空形材の外観を示す。また、表3に目標寸法と実寸法（平均）を示す。

加工時に表面板の焼き付きなどの発生も時折認められたが、ほぼ目標に近い寸法の中空形材が作製できたと考えられる。

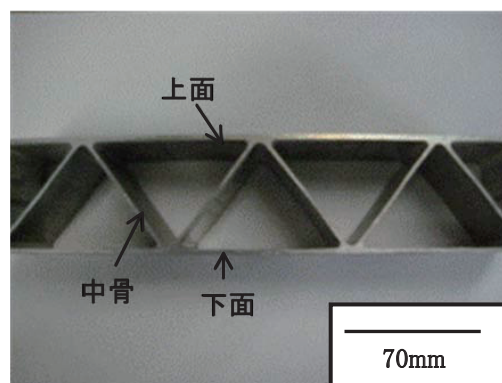


図7 試作した中空押出形材の外観

表3 中空押出形材試作材の目標寸法と実寸法 (mm)

部位	目標	実寸法
幅	250	(平均) 250.82 (最大) 251.13, (最小) 250.74
高さ	50	(平均) 49.63 (最大) 49.86, (最小) 49.62
上面肉厚	2.0	(平均) 2.34 (最大) 2.37 (最小) 2.15
下面肉厚	2.0	(平均) 2.0 (最大) 2.22 (最小) 1.98
中リブ (中骨)	1.5	(平均) 1.4 (最大) 1.53 (最小) 1.31

試作数や寸法精度にも課題があるが、このようなマグネシウム合金の中空型材の作製できることを初めて確認した。今後、さらに難燃性マグネシウム合金製の中空型材の形状および寸法を見直すとともに、高精度な長尺材の試作について検討する予定である。

#### 4.4 溶接・接合法の検討

車両への適用において溶接・接合法の検討が必要になる。現在、アルミニウム合金製の車両の修繕ではTIGアーク溶接、車両の製造ではMIGアーク溶接及び摩擦攪拌接合（FSW）が適用されている。事前に行った難燃性マグネシウム合金のMIG溶接では溶接棒の溶融現象、アークの不安定現象が発生する等からMIG溶接は現段階で適用が難しいと考えられる。そこで、難燃性マグネシウム合金に対してTIGアーク溶接および摩擦攪拌接合（FSW）の適用について検討した。

##### 4.4.1 TIGアーク溶接の適用

AZX311合金およびAZX611合金について、アルミニウム合金を溶接する際に適用している条件でTIGアーク溶接を行った。

TIGアーク溶接には、別途AZX611合金を押し出法で作成したφ2.7のTIG溶接棒を用いた。

溶接部の外観を図8に示す。図に示すように溶接ビードが得られており、ビード部に表面欠陥は認められなかった。この溶接板を精密切断機によって切断して断面のマクロ観察を行った。

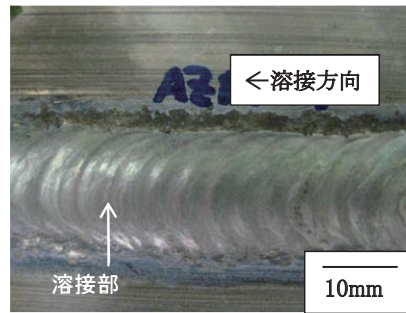
図9にはAZX311合金及びAZX611合金の断面マクロ観察結果を示す。断面部にも欠陥の発生がない溶接部が得られることを確認した。また、アルミニウム合金の溶接条件で難燃性マグネシウム合金のTIG溶接が行えることも確認できた。これら溶接材について引張試験を行った結果、TIG溶接では熱影響部での破断が認められた。また継手効率は母材の75%～80%であった。

##### 4.4.2 FSWの適用

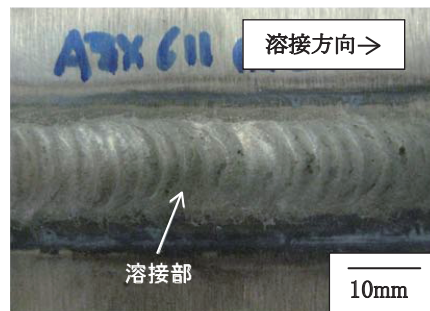
TIGアーク溶接のような入熱溶接に対し、近年、入熱が少ない摩擦攪拌接合（FSW）が注目され、アルミニウム合金製車両の製造にも使用されている<sup>6)</sup>。そこで、アルミニウム合金の条件で難燃性マグネシウム合金のFSWによる接合を検討した。

AZX611合金をFSWによって接合した断面金属組織の観察結果を図10に示す。

接合部には円状の組織変化が観察された。接合部に認められる円状の組織変化はオニオンリング組織と呼ばれ、FSWの接合部に認められる特有の金属組織であり、特に異常な状態ではない<sup>7)</sup>。また、接合部を詳細に観察すると、攪拌部（接合部中心）と熱影響部では金属組織が異なり、攪拌部が熱影響部よりも微細である。これもFSWの特徴として認められる金属組織変化である。こ

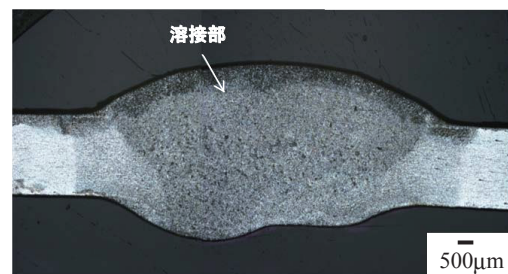


(a) AZX311合金

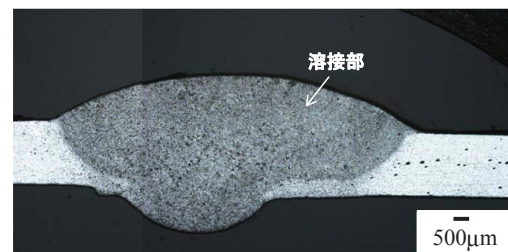


(b) AZX611合金

図8 TIG溶接部の外観



(a) AZX311合金



(b) AZX611合金

図9 TIG溶接材の断面マクロ観察結果

のように難燃性マグネシウム合金をFSWによって接合した結果、一般のFSWの接合部に認められるような金属組織が得られている。

さらにFSWによって接合したAZX611合金の引張試験を行った結果、継手強さは母材強度とほぼ同等であることを確認しており、そのばらつきも少ないことを認めている。このことから、FSWはTIGアーク溶接よりも継手効率の高い接合が行えると考えられる。

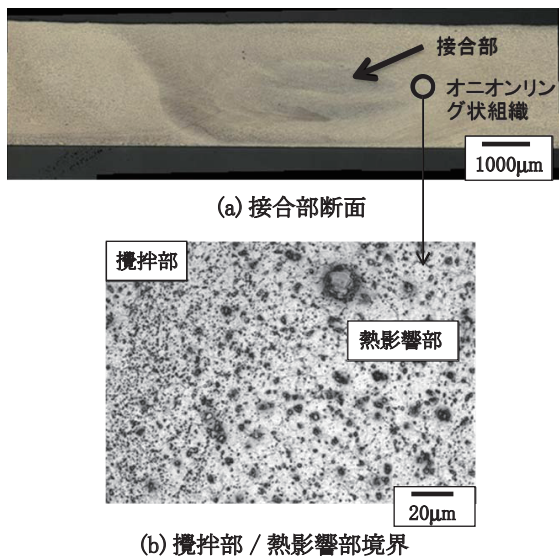


図 10 AZX611 合金の FSW 接合材の断面金属組織

## 5. まとめ

鉄道車両構体への適用を目標として、新規の難燃性マグネシウム合金を試作し、金属組織の特徴、機械的性質、加工性について調べた。また、剛性を確保するための中空押出形材作製の可能性、さらに溶接・接合法を検討した。結果をまとめて示す。

- (1) 欠陥のない作製方法として真空鋳造での作製が望まれる。
- (2) 難燃性マグネシウム合金の強度はアルミニウム合金(6N01)と同程度であることを確認した。なお、加工は、適切な温度で行う必要がある。
- (3) 難燃性マグネシウム合金中空押出形材として、幅 250mm モデル形材が試作できた。
- (4) 難燃性マグネシウム合金の溶接および接合では、

TIG 溶接も FSW も可能であり、特に FSW は反りがなく健全な接合が行えた。

- (5) 難燃性マグネシウム合金の溶接・接合部の継手効率は TIG 溶接で 75～80%，FSW では母材とほぼ同等の強さであった。このことから、FSW は TIG アーク溶接よりも継手効率の高い接合が行えると考えられる。

## 謝 辞

本研究を行うに当たり、権田金属工業(株)、(株)総合車両製作所、千葉工業大学、(独)茨城県工業技術センターにご協力をいただいた。心から謝意を表します。

## 文 献

- 1) 鈴木康文：アルミニウム合金による鉄道車両の軽量化と今後の課題，軽金属，Vol. 60, No. 11, pp.565-570, 2010
- 2) 水田明能，木村敏宣：鉄道車両が求める軽量金属の材料特性，まてりあ，Vol. 43, No. 5, pp.392-395, 2004
- 3) 鈴木康文：車両分野における複合材料利用の現状と将来，溶接学会誌，Vol. 64, No. 8, pp.612-614, 1995
- 4) 森 久史，辻村太郎：車両用材料技術の変遷，RRR，Vol.67, No.3, pp.8-11, 2010
- 5) 秋山 茂，上野英俊，坂本 満，平井寿敏，北原 晃：難燃性マグネシウム合金の開発，まてりあ，Vol. 39, No.1, pp.72-74, 2000
- 6) 岡村久宣，青村欣也，高井英夫，江角昌邦：摩擦攪拌接合(FSW)の開発状況と適用上の課題，溶接学会誌，Vol.72, No.5, pp.436-439, 2003
- 7) 柴柳敏哉：摩擦攪拌接合の材料組織学的描像，軽金属，Vol.57, No.9, pp.416-423, 2007