

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 難燃性マグネシウム合金で 鉄道車両を軽量化する

鉄道車両の軽量化は、車両の高速化や省エネルギー化につながる重要な課題です。現在の車両構体は、ステンレス鋼やアルミニウム合金を用いて作製されているものが主ですが、より軽いマグネシウム合金で車両構体を作製することができれば、さらなる車両の軽量化が期待できます。ここでは、難燃性マグネシウム合金の鉄道車両構体への適用を目指した検討の中から、合金の作製、鉄道部材の試作、中空形材の溶接、モデル構体の組み立てなどについて、これまでの材料技術的な知見を紹介するとともに、今後の方向性について述べます。



**森 久史**  
Hisashi Mori  
前 材料技術研究部  
主任研究員  
[専門分野] 金属材料,  
塑性加工, 破壊力学,  
溶接工学



**上東 直孝**  
Naotaka Uehigashi  
前 材料技術研究部  
研究員  
[専門分野] 車両材料,  
軽金属



**森本 文子**  
Fumiko Morimoto  
材料技術研究部  
摩擦材料研究室  
主任研究員  
[専門分野] 計算工学



**松井 元英**  
Motohide Matsui  
材料技術研究部  
摩擦材料研究室  
室長  
[専門分野] 金属材料,  
摩擦材料全般



**曾根 康友**  
Yasutomo Sone  
材料技術研究部  
部長  
[専門分野] 潤滑材の化学

## はじめに

鉄道がより早く、より快適に目的地に到着するために、軽くて安全な鉄道車両が開発されてきました。車体に使われている材料に着目すると、鉄道の開業当初の車体は木製でしたが、強度を向上させるために鉄鋼製に変わりました。その後、車両の軽量化のために種々の開発が進み、現在では、鉄鋼製車両も使われていますが、より軽量なステンレス鋼製車両やアルミニウム合金製車両が主流になっています。車両の高速化や省エネルギー化に役立つようにさらなる車両の軽量化を目指して、車両構体への難燃性マグネシウム合金の適用を検討しています。

## 高速化における課題と軽量化

### 車両のさらなる高速化の課題

鉄道車両をさらに高速化できれば、到達時間が短縮でき、乗客の利便性の向上につながります。しかし、車両の高速化を図る上での大きな問題として、沿線騒音をはじめとする環境問題があります。騒音に関する環境基準は国の法律で定められており、それをクリアする必要があります。また、車両の

高速化にともなって必要となるさまざまな機器が搭載されたために車両重量が増加し、地盤振動や低周波音といった新たな問題も顕在化してきています。車内環境の観点からは、高速化により車内騒音や車体振動が増大する可能性があり、快適な移動空間を提供するためにはこの問題への適切な対処が求められます。さらに、高速化による運行エネルギーの増加にともなって、二酸化炭素などの排出量が増え、環境負荷が大きくなります。このように、車両の高速化を図る上では、下記の3点が大きな課題であると考えられます。

- ・環境対策（沿線騒音、地盤振動、低周波音などの低減）
- ・二酸化炭素排出量の低減（車両のライフサイクルにともなうもの、とくに車両運行にともなうもの）
- ・車内快適性の向上（車内騒音の低減、乗り心地の向上）

上記の各課題に対し、有効かつ大きな影響を与えると考えられる解決策として車両の軽量化があります。

### 車両の軽量化

これまでの鉄道車両を振り返ると、車両の軽量化が進んだ主要因として、

(1)構体材料の変更(鉄鋼→ステンレス鋼またはアルミニウム合金),  
 (2)制御方式の変更(抵抗制御→VVVF制御),  
 (3)搭載機器の小型化・集約化, (4)台車構造の変更などがあげられます。しかし, さらなる

車両高速化を考えると, 出力の増加に対応する動力を発生および伝達する機器の軽量化は難しいこと, 良好な乗り心地を維持するためのシステムの搭載により重量が増加することなどから, 現状では, 車両のさらなる軽量化は相当難しい状況にあると考えられます。

そのような中, 抜本的な軽量化を図るためには, 下記の特徴を有する金属系新素材の適用が強く求められます。

- ① 現行の車両構体材料のうち最も軽いアルミニウム合金よりもさらに軽いこと。
- ② リサイクル性や振動吸収特性が良いこと。
- ③ 地球に多く存在し比較的容易に入手ができること。
- ④ 難燃性を示し, 強度および疲労強度がアルミニウム合金と同等以上であり, 溶接できること。

このような特性を持つ材料として, マグネシウムがあげられます。図1のように, 密度(体積 $1\text{cm}^3$ あたりの質量)を鉄, アルミニウム, マグネシウムと比較すると, 鉄は約 $7.8\text{g}$ , アルミニウムは約 $2.7\text{g}$ であるのに対し, マグネシウムは約 $1.7\text{g}$ であり, マグネシウムが構造用金属材料の中で最も軽い材料といえます。また, マグネシウムはアルミニウムの倍程度の減衰能を持ち, 振動吸収特性にも優れています。しかし, マグネシウムは活性金属であり, 条件次第ではありますが燃える可能性があることが問題です。これに対

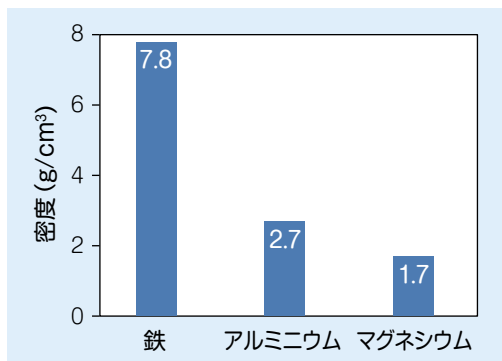


図1 金属の密度の比較

しては, マグネシウム合金にカルシウムを添加すると難燃性を示すという報告があります<sup>1)</sup>。

難燃性のマグネシウム合金を開発して車両構体に適用し, 車両を軽量化することができれば, 安全性, 快適性を確保しつつ車両高速化に寄与できると考えられます。さらに軽量化は省エネルギーおよび二酸化炭素排出量の低減にもつながります。

### 難燃性マグネシウム合金の研究開発事例

#### 難燃性マグネシウム合金の作製

マグネシウム合金の難燃化は, カルシウムや希土類元素(たとえば, イットリウム(Y), スカンジウム(Sc)など)を添加することによって可能です。希土類元素は比較的高価であるため, コストの観点からカルシウムの添加が一般的です。

図2に, 難燃性マグネシウム合金(Mg-6Al-Zn-Ca合金), 汎用マグネシウム合金(Mg-6Al-Zn合金)およびアルミニウム合金(Al(6N01)合金)の3種類の試験片をガスバーナーにより直火加熱して難燃性の効果の確認を行った結果を示します。雰囲気温度が $600^\circ\text{C}$ 近くに達した時に汎用マグネシウム合金は発火しましたが, 難燃性マグネシウム合金では発火が認められま

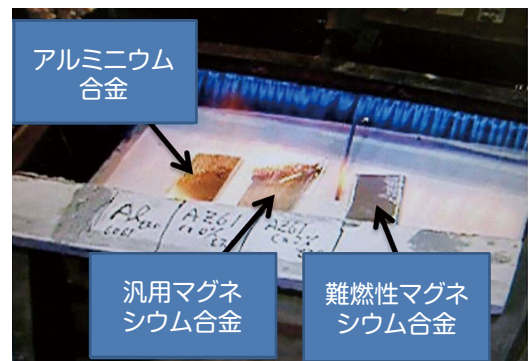


図2 ガスバーナー直火加熱試験による難燃性確認試験の外観

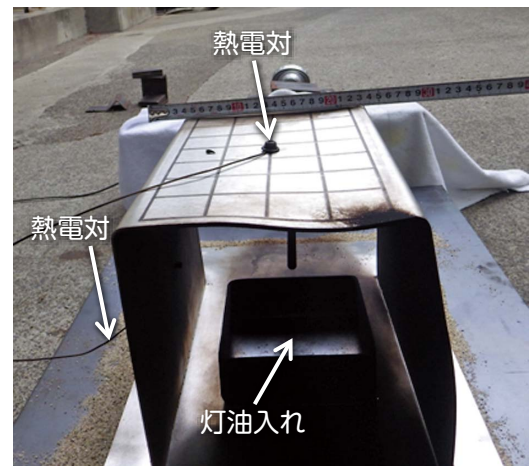


図3 難燃性マグネシウム合金の四面体の燃焼試験後の外観

せんでした。さらに雰囲気温度を上昇させると, アルミニウム合金も難燃性マグネシウム合金も, 発火は生じずに溶け落ちました。このことから, 難燃性マグネシウム合金はアルミニウム合金と同程度に燃えにくいことを確認しました。

また, 難燃性マグネシウム合金の板を溶接して四面体構造の試験体を試作し, 中に灯油を入れた皿を入れて燃やす燃焼試験を実施しました。図3は, その試験後の試験体の外観です。試験体には煤と変形が認められるものの発火は生じず, 若干の変形はあるもののほぼ原形をとどめていました。このように, カルシウムを添加することによってマグネシウム合金を難燃化できることを確認しました。さらに, 合金の化学成分を調整することにより, 複数の種類の難燃性マグネシウム合金を

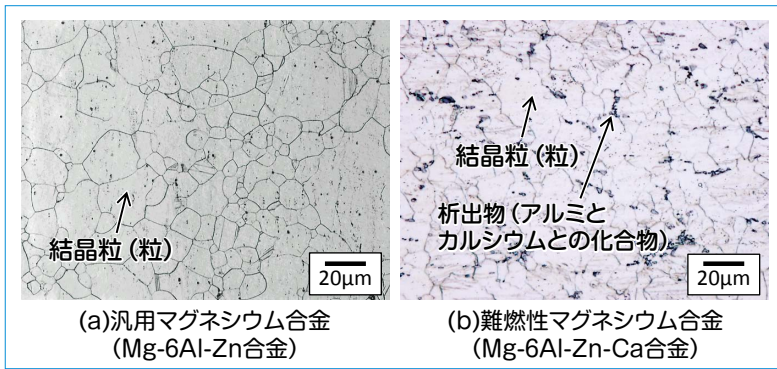


図4 汎用マグネシウム合金と難燃性マグネシウム合金の金属組織の比較 (どちらも圧延率5%の圧延板材)

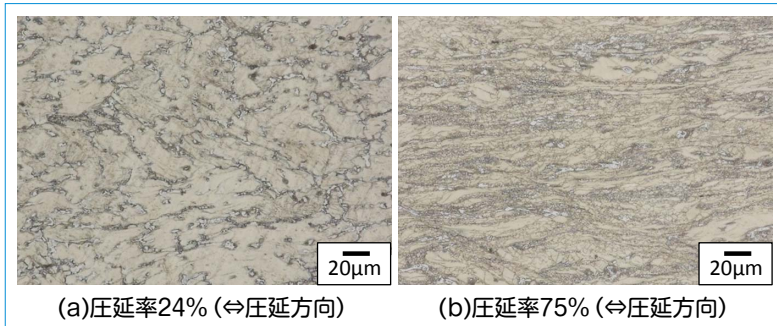


図5 難燃性マグネシウム合金の金属組織の圧延率による違い

試作しました。

難燃性マグネシウム合金と汎用マグネシウム合金を比較すると、板の状態では両者は同じように見えますが、顕微鏡で見られる金属組織や機械的特性には相違が認められます。

図4は、汎用マグネシウム合金と難燃性マグネシウム合金の圧延板材の顕微鏡による金属組織です。

汎用マグネシウム合金では全体に粒状の組織(結晶粒)が認められます。これに対して難燃性マグネシウム合金では、結晶粒が汎用マグネシウム合金に比べて微細であり、さらに析出物が全体的に分散しています。このように汎用マグネシウム合金と難燃性マグネシウム合金では、結晶粒の大きさや析出物の有無に相違があることがわかりました。

難燃性マグネシウム合金の機械的性質には、このような金属組織が強く影響します。図4に示した合金では、汎用マグネシウム合金で0.2%耐力(☞参照)が180MPa、引張強さ(☞参照)が220MPa、伸び(☞参照)が12%であるのに対し、難燃性マグネシウム合金で0.2%耐力が220MPa、引張強さが240MPa、伸びが5%であり、難燃化により強度が増加しますが、伸びが著しく低下します。これは、脆い析出物と結晶粒の微細化により変形抵抗が増加したものの、析出物自体が破壊源

となり伸びが低下したためと考えられます。また、同じ加工方法でも加工条件が異なると、金属組織とともに機械特性が大きく変化します。図5に圧延率(☞参照)の異なる2条件で圧延加工した難燃性マグネシウム合金の金属組織を示します。圧延率を約3倍にすると結晶粒も析出物も一層微細化し、結晶粒が圧延方向に配列するようになります。これら圧延材の強度は、0.2%耐力は圧延率24%で260MPa、圧延率75%で350MPaであり、圧延率が高いほど、すなわち金属組織が微細であるほど強度が増加しました。この傾向は押出加工材についても認められています。

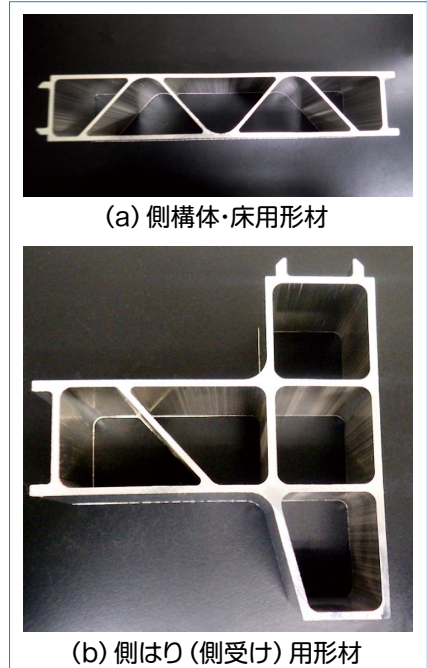


図6 難燃性マグネシウム合金製中空型材の外観

また、同じ加工方法でも加工条件が異なると、金属組織とともに機械特性が大きく変化します。図5に圧延率(☞参照)の異なる2条件で圧延加工した難燃性マグネシウム合金の金属組織を示します。圧延率を約3倍にすると結晶粒も析出物も一層微細化し、結晶粒が圧延方向に配列するようになります。これら圧延材の強度は、0.2%耐力は圧延率24%で260MPa、圧延率75%で350MPaであり、圧延率が高いほど、すなわち金属組織が微細であるほど強度が増加しました。この傾向は押出加工材についても認められています。

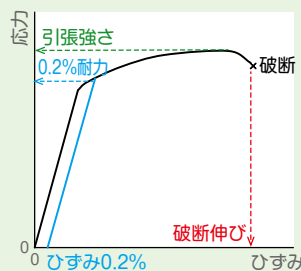
さらに、合金に添加する元素や、加工後の材料に加える加熱や冷却などの熱処理によっても、難燃性マグネシウム合金の特性を調整できるとわかりました。

さらに、合金に添加する元素や、加工後の材料に加える加熱や冷却などの熱処理によっても、難燃性マグネシウム合金の特性を調整できるとわかりました。

#### ☞ 0.2%耐力、引張強さ、破断伸び

この図は、材料の強さを見るための引張試験において、ひずみ(伸び率)に対する応力の関係を表しています。

0.2%耐力は、除荷時のひずみが0.2%となる点の応力で、塑性変形の始まる応力に相当します。引張強さは破断までの最大応力値を、破断伸びは材料が破断する時の伸びを表します。



#### ☞ 圧延率

圧延加工時の板厚の減少率。板厚  $h_0$  が圧延により  $h_1$  になった場合の圧延率は、 $(h_0 - h_1) / h_0$  となります。

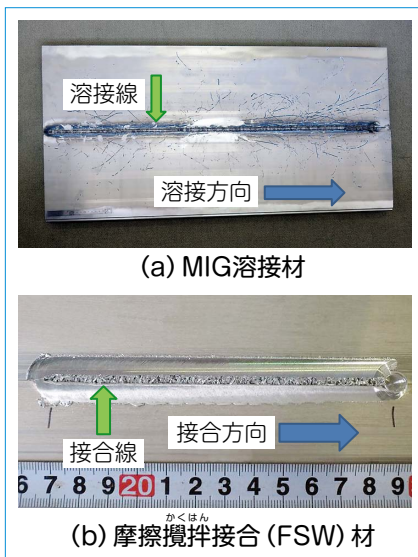


図7 溶接材の外観観察結果

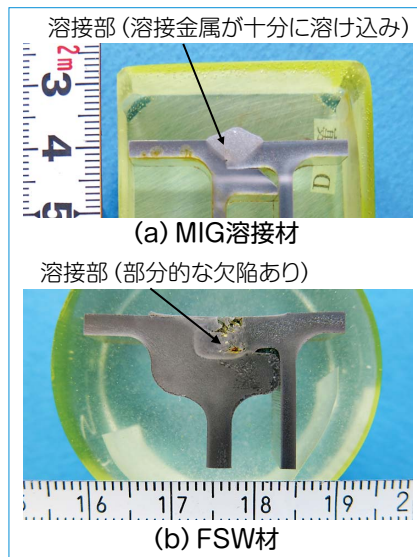


図8 溶接材の断面マクロ観察結果

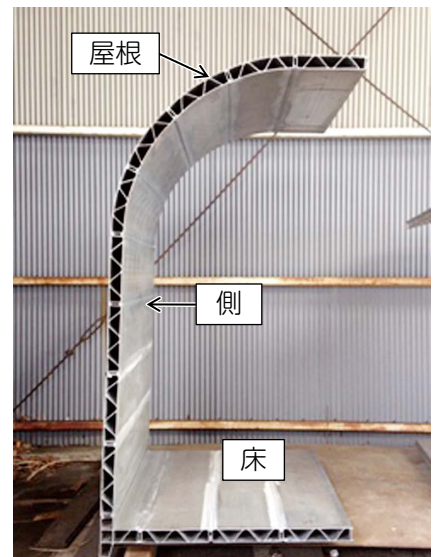


図9 試作した小型半断面構体の外観

### 鉄道車両部材の加工による試作

鉄道車両部材には圧延板材以外にも、さまざまな断面形状の形材が使われます。このような形材は主に押出法で作製されます。

押出法では、形材の断面形状の上下左右の非対称性が大きいほど、また、材料の変形抵抗が高いほど、作製の難易度が高くなります。難燃性マグネシウム合金製の薄肉トラス断面形状の形材の押し出しは難易度が高いですが、断面形状を工夫することにより、押出形材を試作しました。図6に試作した形材の断面の外観を示します。顕著な反り、曲がり認められず、いずれの断面形状の形材も目標に近い寸法で試作できました。

### 難燃性マグネシウム合金の接合

難燃性マグネシウム合金を車両構体に適用するためには、車両を組み立てるための接合技術が必要です。接合手法として、一般に金属の接合に用いられるアーク溶接と、回転する工具を接合部に押し付けて摩擦熱で接合する摩擦攪拌接合(FSW)を検討しました。

図7は、難燃性マグネシウム合金の中空形材に接合を行った結果です。図7(a)がアーク溶接の一つであるMIG(Metal Inert Gas)溶接による接合材、(b)が摩擦攪拌接合(FSW)に

よる接合材です。また、図8にそれぞれの溶接部の断面を観察した結果を示します。MIG溶接では、溶接部に溶接金属が十分に溶け込んでいることを確認できました。

一方、FSW材では溶接部断面に部分的に欠陥が認められ、内部にまで欠陥が進展していることが確認されました。FSWについては、溶接条件や中空形材の継手部形状についての改良が必要であると考えられます。

アルミニウム合金ではFSWが有効であることが確認されています<sup>2)</sup>。しかし、変形抵抗の高い難燃性マグネシウム合金の場合には、アルミニウム合金のFSWで用いられる施工条件や継手形状をそのまま使用することができません。難燃性マグネシウム合金はまだ新しい材料であるため、適切な施工条件を決めるための材料特性のデータベースが十分とはいええず、今後、難燃性マグネシウム合金のFSWに関する研究が必要であると考えられます。

### モデル構体の組み立て検証

これまで基本的な形材の研究などを進めてきましたが、実用化への展開を考えるために、これまで試作した中空形材にMIG溶接を適用して半断面形状の小型のモデル構体を試作し、組み立て性について調べました。図9に、

試作した半断面のモデル構体の外観を示します。組み立ての過程で、MIG溶接による熱ひずみの影響が大きいため、中空形材同士の溶接、組み立ての順番をうまく決定しなければならないことがわかりました。今後、新たな治具の開発、矯正方法などの検討が必要になると考えられます。

### おわりに

難燃性マグネシウム合金の車両構体への適用について検討しました。合金の作製、加工方法、溶接方法などの基礎的な検討から半断面のモデル構体の試作を通じ、難燃性マグネシウム合金に関する材料技術的な知見を得ることができました。実用化までにはまだ先が長いですが、FSWの検討、表面処理の選定の検討など、メーカーとともに各技術を確実にしながら実績を積み上げ、進めて行きたいと思えます。RRR

### 文献

- 1) 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, までりあ, Vol.39, No.1, pp.72-74, 2000
- 2) 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