鉄道車両への 難燃性マグネシウム合金の適用

森 久史*・上東 直孝*

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 66, No. 5 (2016), 226-232
© 2016 The Japan Institute of Light Metals

Feasibility of application of flame-retardant magnesium alloy to railway vehicles

Hisashi MORI* and Naotaka UEHIGASHI*

Keywords: vehicle, weight saving, flame-retardant magnesium alloy, strength, hollow shape material

1. 緒 言

鉄道は自動車、航空機と比較してCO₂排出量の少ない輸送手段であり、環境にやさしい輸送機関であると言えるが、さらなる省力化の可能性について追求していく必要がある。

秦らは、鉄道技術のエネルギー消費について図1のように分析し、必要となる課題の設定を行っている¹⁾。鉄道におけるエネルギー消費量の大半は車両走行エネルギーが占めており、省エネ化に対して車両の軽量化は重要な技術課題であることが図1からも理解できる。

車両の軽量化は高速化やメンテナンス性の軽減などを目的として検討されてきた。それには、軽量材料の適用が最も有効であり、車両構体の強度ならびに剛性に配慮しながらアルミニウム合金化、ステンレス化ならびに樹脂系複合材料の部分適用などが進められてきた^{2)~7)}。

今後の車両の軽量化においては、アルミニウム合金、ステンレスおよび樹脂系複合材料よりも比強度の高い難燃性マグ

ネシウム合金の適用が考えられる⁸⁾。難燃性マグネシウム合金は、カルシウムを添加して発火温度を上昇させた合金であり、難燃性を有し、さらに高い比強度を維持している⁹⁾。

たとえば、単純な板材を仮定して強度および弾性率に基づく軽量化効果を検討すると、アルミニウム合金に比べて強度重視設計では約3割、弾性率設計では約2割の軽量化が見込める試算ができる。しかし、難燃性マグネシウム合金は研究開発段階の材料であり、さらにマグネシウム合金が一次強度部材として適用された例がない。そのため、難燃性マグネシウム合金を適用するための車両強度および剛性の検討を始める以前に、今後、車両を製造してゆくための基本技術として、素材、加工、溶接に関する各技術の確立が必要である。また、設計のための強度、疲労強度等の検討も必要になる。

本稿ではまず軽量化のニーズを示し、続いて車両構体に必要となる事項について整理する。その後、難燃性マグネシウム合金の適用に対する必要技術を示し、研究動向を簡単に紹介する。

2. 鉄道車両の軽量化

2.1 鉄道車両の軽量化の必要性

鉄道車両は電動機の出力を車輪に伝達し、走行抵抗等の抵抗に打ち勝って加速して走行する。走行抵抗は車輪とレール間の摩擦抵抗に影響を受け、列車重量に比例する。したがって、列車重量を軽くすることによって、走行エネルギーを減少させることができる。特に大きなエネルギーを必要とする加速時に軽量化の効果が認められ、軽量化率が走行抵抗の減少となって現れるようになり、駅間距離が短く、頻繁に発・停止を繰り返す都市型的高速鉄道ではその効果が大きい。また、省エネルギー化のほか、加速に対して良好な効果を示す

図1 鉄道技術における省エネルギー化の課題¹⁾

ために高加速度運転が可能になり、運転速度を向上することができる。その結果、高速化による到達時間の短縮化によって、輸送サービスの向上が図れる。さらに、軽量化は、摩耗部品の寿命を延ばすほか、輪重が軽くなることで軌道破壊が減少するために、車両や軌道の保守費が低減するなど、経済上に対しても波及効果が増加する。その一方、軽量材を使用することによる初期コストや補修費用の増加、剛性、遮音性の低下による乗り心地や車内騒音の増大などのデメリットも考えられる。

これらのことから車両の軽量化は、メリットおよびデメリットを分析して経済的な効果などを検討しつつ検討する必要がある、鉄道事業者側における重要な技術課題として位置づけられている。

2.2 鉄道車両に必要な特性

2.2.1 車両用材料に必要な特性

鉄道車両に適用する材料は、無害であり、比較的入手しやすいこと、コストが安価であること、難燃・不燃であること、そして安全性、快適性（剛性、遮音性、制振性）、耐久性（強度、耐力、疲労特性、摩耗特性、耐食性）が常に求められる。また、材料自体の加工性（押出性（薄肉・中空）、成形性（圧延・プレス））や溶接性に優れることが必要である。また、最近ではリサイクル性も考慮されるようになってきている。

2.2.2 車両構体に必要な特性

鉄道車両の構体を考えるには、様々な条件から受ける荷重に対する許容応力を明らかにする必要がある。また、車体各部の上記した強度が十分に許容範囲内であっても剛性が低い場合には走行中に車輪やレールに起因する振動を受けたときに車体の振動が大きくなり乗り心地に影響を及ぼす。したがって剛性も強度とともに重要な指標となる。

(a) 車体が受ける強度

車体構体受ける強度には、静的荷重および動的荷重がある。静的荷重には垂直荷重（乗客および機器を含めた荷重）および車端荷重（ブレーキ時において接続している車両から受ける荷重）がある。また動的荷重としては疲労荷重がある。強度設計ではこれらの荷重条件を把握し、JIS E 7103 鉄道車両-旅客車-車体設計通則に従って行われる。

(b) 車体の剛性

車体の剛性としては、相当曲げ剛性と相当ねじり剛性がある。相当曲げ剛性は、車体の曲げに対するたわみにくさであり、相当ねじり剛性とは、ねじりに対する変形しにくさである。強度とは異なり、剛性について規定値はないが乗り心地を悪くしないために高く設けることが望ましい。車体全体の剛性の求め方についても、JIS E 7103 鉄道車両-旅客車-車体設計通則に従って計算される。

2.3 剛性確保の課題

軽量材料は縦弾性率が低いために剛性の確保が課題となる。剛性を上げるには構造部材自体の断面積をなるべく小さくしながら、面積要素に対する重心軸からの距離を有効にとり、断面二次モーメントを大きくするといった配慮が必要になる。この手法には、押出型材の有効利用が考えられる。

たとえば、現在、アルミニウム合金車両では図2に示すような中空型材を使用した構造（ダブルスキン構造）とし、剛性の確保が行われている¹⁰⁾。

図2 車両用の中空型材の外観¹⁰⁾

AZ61:Mg-6Al-Zn alloy

AZX611:Mg-6Al-Zn-Ca alloy

図3 マグネシウム合金（AZ61）、難燃性マグネシウム合金（AZX611）、アルミニウム合金（A6061）圧延材の燃焼試験の状況

3. 難燃性マグネシウム合金の車両への適用に対する必要技術

難燃性マグネシウム合金は、カルシウムをマグネシウム合金に添加して発火温度を上昇させた合金である。一般のAZ合金のような汎用マグネシウム合金ではなく、材料特性や溶接、加工、表面処理などのさまざまな研究開発が行われている。特に、難燃性マグネシウム合金の車両への適用を考えるにあたり、主に下記の技術が求められる。

- ・素材の難燃性および材質の確認
- ・機械的性質、加工性、溶接性等の諸特性の把握
- ・部材作製技術（幅広材、長尺材）の確立
- ・最適な溶接・接合技術の提示
- ・溶接および接合部の疲労を含めた信頼性の確保
- ・表面処理および塗装技術の確立
- ・材料のコストダウンおよび生産性の確立
- ・マグネシウム合金適用の構造技術

4. 難燃性マグネシウム合金の技術動向

4.1 素材の難燃性および材質の確認

マグネシウム合金の難燃性化に対してカルシウムの添加が有効であるとされている⁹⁾。図3にMg-6Al-1Zn合金（AZ61）にカルシウムを添加した合金（AZX611）と比較に用いたア

図4 難燃性マグネシウム合金 (Mg-6Al-1Zn-1Ca 合金: AZX611) の (a) 鋳造材および (b) 圧延材の走査型電子顕微鏡 (SEM) 像

図5 難燃性マグネシウム合金 (Mg-Al-Zn-Ca 合金: AZX) 圧延材のアルミニウム添加量が耐力, 引張強さおよび伸びに及ぼす影響

ルミニウム合金 (A6N01) 材をバーナで加熱し, 発火性の評価を行った結果を示す。AZ61では融点の約半分の温度で著しい発火を認めたが, AZX611では発火が認められずに熔融した。これはA6N01と同じ傾向が認められた。このようなカルシウムの添加により発火が抑制された理由としては, カルシウムの添加による酸化カルシウム (CaO) の生成が燃焼に対するバリアとして作用したと考えられる^{9), 11)}。

今後は難燃性を定量的に評価するためのパラメータの設定や試験方法, カルシウムの添加量などの検討が必要になると考えられる。

図4の (a) に難燃性マグネシウム合金の鋳造材, (b) にその圧延材の金属組織を示す。鋳造材には α 固溶体のデンドライト境界にアルミニウムとカルシウムとの金属間化合物が認められる¹¹⁾。この金属間化合物は, 鋳造時には (a) に示すようにネットワーク状で認められたが, 圧延加工を行うことにより, (b) に示すように圧延により粉砕されて圧延方向に認められるようになる。このことで, 金属間化合物は塑性加工によって晶出形態の制御が可能であると考えられる。

4.2 特性の把握

図5にMg-3Al-1Zn-1Ca (AZX311), Mg-6Al-1Zn-1Ca (AZX611), Mg-9Al-1Zn-1Ca (AZX911) の耐力, 引張強さおよび伸びを示す。図に示すようにアルミニウム量とともに耐力, 引張強さが増加し, アルミニウムによる固溶強化の作用が確認される。しかし, 固溶強化には限度があり, アルミニウム量の増加とともに伸びが低下する。これは, アルミニウムとカルシウムとの化合物量が増加し, ボイドやき裂生成点が増加するためであると考えられる¹¹⁾。

今後の材料設計を考えるうえで, 強度や伸びと金属組織と

図6 難燃性マグネシウム合金 (AZX) 圧延材の平面曲げ疲労試験時のS-N線図

図7 難燃性マグネシウム合金 (AZX611) 圧延材の損失係数の温度依存性

の関係の定量的な把握が必要であると考えられる。

一方, 疲労強度についても, 耐力および引張強さと類似する傾向が認められ, 比較した中で, AZX611>AZX911>AZX311であった (図6)。AZX611がAZX911に比べて疲労強度が高い理由としては, AZX611では強度のほかに伸びの影響もあると考えられるが, このような疲労破壊メカニズムを含めた考察は今後の課題としたい。

マグネシウム合金の利点として高い比強度特性を示すほかに減衰能に富むことがあげられる。難燃性マグネシウム合金の減衰能を損失係数 (tan δ) によって測定した結果では, 図7に示すように難燃性マグネシウム合金の損失係数がアルミニウム合金 (A6061) と同等または若干下回る傾向が認められた。マグネシウム合金の減衰能は双晶型で認められるとの報告がある¹²⁾。

難燃性マグネシウム合金では金属組織中にアルミニウムとカルシウムとの晶出物が認められることや加工による結晶粒の微細化によって双晶変形が妨げられることなどにより, 純マグネシウムで認められるような高減衰能を示さなかったと考えられる。

一方, マグネシウム合金は結晶がHCP構造を有するため, 塑性変形時に活動するすべり系が少なく, 加工性が悪い¹³⁾。しかし, 難燃性マグネシウム合金においても, 流動応力に対する温度およびひずみ速度の影響が認められ, 温度上昇, ひずみ速度の低下とともに変形抵抗が減じて加工しやすくなる

図8 難燃性マグネシウム合金 (AZX611) 圧延材の流動応力に及ぼす温度およびひずみ速度の影響

$\dot{\epsilon} / \text{s}^{-1}$	2.7×10^{-1}				
T_{CC} / K	293	373	423	473	523
D_0 / mm	36.0	32.6	28.1	28.1	27.1
H_0 / mm	1.8	8.5	14.4	15.5	16.1
Specimens configuration					

図9 難燃性マグネシウム合金 (AZX611) 圧延材のコニカルカップ試験の結果

可能性がある (図8)。たとえば、深絞り性の評価に対して福井式コニカルカップ試験によって調べた結果、図9に示すように深絞り性は温度増加とともに良好となる結果が得られている。これらのことから、難燃性マグネシウム合金の加工は室温では著しく困難であるが、高温・低ひずみ速度化になるほど良好になることが確認された。

4.3 部材作製技術の確立

鉄道車両の製造にはさまざまな形状の部材が用いられている。部材には板材と押出材が使われているが、現在ではコストや一体性が考慮されて押出材が主として使用されている。

特に難燃性マグネシウム合金の縦弾性率 (約42 GPa) はアルミニウム合金のそれ (約70 GPa) と比較して低いため、剛性の低下が課題になり、それに対して図10に示すような中空形材やリブ付き形材、チャンネル断面材を押出加工によって作製した材料の適用が見込まれる。

押出加工は、材料の変形や最終形状に強く依存し、製品作製にあたる押出しのしやすさの傾向を知る一つの目安として (1) 式に示す難易度ファクタがあげられる¹⁴⁾。

難易度ファクタ

$$= \text{形材断面の全周長 (mm)} / \text{形材の単重 (kg/m)} \quad (1)$$

難易度ファクタが小さい形材ほど製造が容易で寸法精度のよい押出製品を得やすい。たとえば、アルミニウム合金と同一寸法のマグネシウム合金製中空形材を作製すると考えた際、マグネシウム合金では、アルミニウム合金よりも軽いことから難易度ファクタが大きくなる。そのため、マグネシウム合金製の中空形材の作製はアルミニウム合金よりも難易度

中空押出形材 (Mg-6Al-Zn-Ca合金: AZX611)

(コ形断面材)

(Z形断面材)

(チャンネル断面材 (Mg-9Al-Zn-2Ca合金: AZX912))

図10 難燃性マグネシウム合金製の押出形材の試作例

ビード部

熱影響部

図11 難燃性マグネシウム合金 (AZX611) のTIG溶接の結果および溶接部の断面マクロ組織およびミクロ組織。溶接棒もAZX611を使用

が高いと考えられる。

難燃性マグネシウム合金の形材の試作においても、図2のような中空形材の試作において、薄肉部が厚肉部よりストレッチ効果を受けやすいため、薄肉部の方向に反りが生じやすく曲がりなどが生じた。そこで、押出加工時におけるメタルフロー等の考慮や押出しやすい断面形状へと変更することによって、図10に示すような中空形材、コ形およびZ形断面のチャンネル材の作製を可能にした。現在では長さ为数m程度のモデル材に留まっているが、実用化においては、均一形状の寸法・肉厚を有する25m長の長尺・幅広材の作製が

図12 健全条件 (a) および電流過剰条件 (b) でTIG溶接を行ったときの難燃性マグネシウム合金 (AZX611) 圧延材の溶接ビード部の外観

図13 難燃性マグネシウム合金 (AZX611) 圧延材のTIG溶接材の平面曲げ疲労試験で得られたS-N線図

必要になる。

このような長尺材の加工では、押出後の後行程での形状矯正を行うよりは、むしろ押出時に変形の少ない精度の良好なものが必要である。それには安定なメタルフローを得るほか、形状崩れ改善が求められる。特に屋根のような曲面を有する薄肉形材の作製では熱間状態で自重により曲面部が扁平化するため、局部形状保持を考える必要があることが明らかにされている¹⁵⁾。

4.4 溶接・接合技術の検討

4.4.1 アーク溶接の試み

現在の車両は全溶接組立方法で作製されている。

製造に用いられている溶接手法はTIG溶接、MIG溶接のアーカ溶接や摩擦攪拌接合 (FSW) が適用されている。

難燃性マグネシウム合金の圧延板材に対するTIG溶接の施工の結果、溶接施工中には発火も認められず、図11に示すように、良好な溶接部が得られている。また、断面組織を光学顕微鏡で観察した結果、ビード部には鑄造組織が認められ、熱影響部には粗大結晶粒が認められた。条件が適切であれば、難燃性マグネシウム合金へのTIG溶接も可能であることを確認した。ただし、溶接電流および電圧が適切でない場合には図12に示すような高温割れが発生する。

溶接部の断面ビッカース硬さは、母材で50Hv、凝固部で45Hv、熱影響部で38Hvであり、多少のばらつきがあるものの、熱影響部において軟化が認められている。

図14 難燃性マグネシウム合金 (AZX611) の圧延板材にツール送り速度を5, 10, 15mm/sでFSWした断面のマクロ組織観察結果。図中矢印は流動層を示している

TIG溶接材の引張試験の結果、破断が熱影響部で認められ、継手効率は70%程度であることを確認している。TIG溶接材の疲労強度は図6および図13より、母材と比較して低下する。これはアルミニウムとカルシウムとの晶出物が欠陥として作用すると考えれば、晶出物の含有率の高い難燃性マグネシウム合金では、疲労強度が低下することが推察される。また、疲労強度は余盛有無の影響を受ける (図13)。これは止端部における応力集中がひとつの原因になったためと考えられる。

4.4.2 FSW適用の試み

鉄道車両のような大型構造物へのアーカ溶接では、ひずみの問題が大きく、除去に多大な工程を要している⁴⁾。特に熱膨張が鉄よりも大きいマグネシウム合金では溶接時のひずみの問題が極めて重要になる。そこで近年、ひずみの発生が少

図15 ツール送り速度を20mm/sでFSWした難燃性マグネシウム合金（AZX611）の圧延板材の断面のマクロ組織観察結果（SZ：攪拌部，TMAZ：熱塑性加工部，HAZ：熱影響部，BM：母材）

図16 難燃性マグネシウム合金（AZX611）圧延材におけるFSW接合材の攪拌部（SZ部）に認められた断面金属組織。(a) 光学顕微鏡によるSZ部の金属組織，(b) SZ部のSEM像，(c) EBSD方位解析のIQマップ，(d) (0001)面極点図

ない，軽金属の最良な溶接手法としてFSWの適用が注目されており，鉄道車両の製造にも適用されている¹⁶⁾。

ツールの送り速度を制御して難燃性マグネシウム合金板材にFSWを行い，接合部断面マクロ組織を示したのが図14である。

接合部中心には円状のような金属組織の変化が認められる。これはオニオンリングと呼ばれ，金属組織の塑性流動による結果で形成される，FSW材断面に特有の金属組織である¹⁷⁾。オニオンリング状組織変化において，送り速度が増加するに従い，円状の流動組織が不明瞭になる傾向が認められた。送り速度を20mm/sでFSWした時の断面マクロ組織観察結果を図15に示す。送り速度が大きくなると接合部にボイド状の欠陥の発生を認めた。送り速度は摩擦熱に影響を及ぼすと考えられる。FSWでの摩擦熱量については，FSWの施工パラメータに対して(2)式で与えられる¹⁸⁾。

$$Q = \frac{3}{4\pi} \cdot R^3 \cdot P \cdot N \cdot \frac{\mu}{V} \quad (2)$$

ここで， R はショルダ径， P はツール荷重， N はツール回転数， V は送り速度， μ は摩擦係数である。 R, P, N, μ は一定であることから送り速度が増加すると熱量が下がる傾向にある。このことから，欠陥は入熱不足により発生したものと推定される。このように，健全な溶接部を得るためには最適な

条件による施工が重要であるが，難燃性マグネシウム合金のFSW条件はアルミニウム合金の6000系と比較して条件の幅が狭いことを確認している。

図16にFSW接合材に認められた接合部断面における攪拌層（SZ部）の金属組織を示す。SZ部では晶出物が微細になり，結晶粒も微細な状態で認められた。

母材の結晶粒径が約30～40μmであり，SZ部の結晶粒径が1～10μm程度である。このことから，SZ部に認められた結晶粒の微細化は，FSW時の機械的分断や動的再結晶化によるものと考えられる。また，SZ部に認められるその他の金属組織の特徴として，結晶粒の多くが主に0001面に配列した状態にあることがあげられる。

図17に接合材の断面硬さ分布を示す。最も結晶粒が微細化した中心付近では著しい硬化が認められ，結晶粒微細化による硬化が確認された。FSW接合材の引張試験を行った結果，破断強さが，ほぼ母材と同じ強度を示し，継手効率が90%以上を示すことを確認した。アーク溶接では熱影響部の結晶粒粗大化に伴い軟化するのに対し，FSWでは，結晶粒の微細化および集合組織の形成により強化するため，難燃性マグネシウム合金の溶接に対してもFSWが有効であることを確認した^{17), 19)}。今後は適する条件を明確にし，さらに図14に認められるような欠陥検出の非破壊検査方法の確立，形材溶接用継手の工夫，継手の疲労強度の確認などの開発・

図17 難燃性マグネシウム合金(AZX611)圧延板材のFSW接合材の断面硬さ分布

検証が必要であると考えられる。

5. 結 言

車両の軽量化に対する難燃性マグネシウム合金の適用可能性を調べるために、難燃性マグネシウム合金の材料、材料特性、加工技術、溶接・接合手法に関する基礎的な動向を示した。車両用材料としての適用可能性は十分にあると考えられ、加工や溶接についても、技術的な見通しはあるものと考えられる。しかし、実用化に対しては、表面処理技術等を含めてさらに研究開発の活性化が強く望まれる。

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、適切な助言をくださいまし

た、長岡技術科学大学 鎌土教授、元 千葉工業大学 船見教授、JR 東日本 藤野様、JR 西日本 真下様に心より感謝申し上げます。また、研究にご協力いただきました、三協立山株式会社三協マテリアル社、不二ライトメタル株式会社、権田金属工業株式会社、木ノ下伸線株式会社、株式会社総合車両製作所、茨城県工業技術センターの各位に対しまして心より厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 秦 広：RRR, **69** (2012), 4-7.
- 2) 松澤 浩：鉄と鋼, **69** (1983), 1967-1971.
- 3) 馬場義雄, 西村嘉彦：軽金属, **33** (1983), 618-631.
- 4) 塔本 徹, 阪口 章：溶接学会誌, **40** (1971), 506-522.
- 5) 鈴木康文：鉄と鋼, **79** (1993), N568-N575.
- 6) 鈴木康文：軽金属, **60** (2010), 565-570.
- 7) 水田明能, 木村敏宣：まてりあ, **43** (2004), 392-395.
- 8) 森 久史, 藤野謙司, 栗田 健, 千野靖正, 齋藤尚文, 野田雅史, 駒井 浩, 小原 久：まてりあ, **52** (2013), 484-490.
- 9) 秋山 茂, 上野英俊, 坂本 満, 平井寿敏, 北原 晃：まてりあ, **39** (2000), 72-74.
- 10) 軽金属協会：軽金属車両委員会報告書, No. 6 (1999), 23-24.
- 11) 秋山 茂：鋳物, **66** (1994), 38-42.
- 12) 杉本孝一：日本金属学会会報, **10** (1971), 44-46.
- 13) 金子純一, 菅又 信：軽金属, **54** (2004), 484-492.
- 14) 田中 浩, 叶 秀作：軽金属, **21** (1971), 551-563.
- 15) 軽金属協会：軽金属車両委員会報告書, No. 4 (1984), 127-134.
- 16) 森 久史, 野田雅史, 富永誉也：軽金属, **57** (2007), 506-510.
- 17) 柴柳敏哉：軽金属, **57** (2007), 416-423.
- 18) 岡村久宣, 青田欣也, 高井英夫, 江角昌邦：溶接学会誌, **72** (2003), 436-444.
- 19) 山本尚嗣, 廖 金孫, 中田一博：日本金属学会誌, **75** (2011), 91-96.