

マグネシウム合金を車両構造部材に適用する

森 久史 辻村 太郎 石塚 弘道 藤野 謙司
 材料技術研究部 同 車両構造技術研究部 東日本旅客鉄道(株)
 (主任研究員) (主管研究員) (主管研究員) (先端鉄道システム
 開発センター 課長)

橋本 克史 向井 智一 吉村慎一郎 河田 真
 東日本旅客鉄道(株) 同 西日本旅客鉄道(株) 九州旅客鉄道(株)
 (先端鉄道システム 同 課員) (車両本部 車両部 (鉄道事業本部
 開発センター 課長) 車両設計室 担当課長) 新幹線部 運輸課 主査)



はじめに

現在、新幹線電車の車両構体の構造部材にはアルミニウム合金が使われています。開業当初の新幹線電車には高耐侯性鋼板が使われていましたが、速度向上、省エネルギー化を目的として、車体構造の軽量化が検討され、その結果、アルミニウム合金が適用されました。そして、現在、さらなる速度向上と省エネルギー化を目指し、アルミニウム合金製の新幹線電車の車体重量を軽量化するという課題があります。そこで、アルミニウム合金よりも軽く、炭素繊維プラスチック(CFRP)とはほぼ同じ比重を有する、マグネシウム合金の適用可能性の検討が進められています。

マグネシウム合金は軽くて強く、振動減衰特性が優れている一方、発火性、加工性、耐食性に課題がありますが、近年、燃えにくく、延性のある合金の開発や加工の条件の探索、表面処理などの様々な方面において課題が改善されてきました。しかし、マグネシウム合金の材料技術は、鉄道車両構造部材に適用できるようなレベルにまでには至っておらず、車体構造や部材の設計や製造を行うためのデータや技術が揃っていないのが現状です。

そこで、鉄道総研や鉄道事業者では、マグネシウム合金の車両構造部材への適用を考えるために、日本マグネシウム協会が幹事団体として主催している「マグネシウム合金高速車両構体実用化技術委員会」に参加し、車両メーカーおよび材料メーカー、大学などと意見交換を行いながら、車両構造部材への適用に必要な合金開発や加工などの基本的な技術の検討を行っています。

本稿では、軽量材料の適用が進んでいる新幹線電車の車両構体に絞り、新幹線電車のさらなる軽量化とそれに対するマグネシウム合金の適用可能性について説明します。次いでマグネシウム合金の材質やマグネシウム合金を車両構造部材に適用するための技術的課題と現在の取り組みについて紹介します。

新幹線電車のさらなる軽量化

昭和39年に国鉄が東海道新幹線を開業して以降、山陽、東北・上越、北陸(長野まで)、九州の各新幹線が開業しました。昨年12月には東北新幹線が新青森駅まで延伸し、本年3月には山陽・九州新幹線の直通運転が開始されました。時代とともに新幹線ネットワークは拡大しつつあります。

今後、高速輸送手段である新幹線では、拡大しつつあるネットワークを活かしながら、航空機に対する競争に優位に立つことが必要となります。そのためには、営業運転速度をさらに向上し到達時間を短縮するなどの課題があります。

速度向上は車両の軽量化と密接な関係があります。図1は運転速度と車両構体重量の変化を示したものです¹⁾。開発当初の新幹線電車の車体には高耐侯性鋼板が使われていましたが、車体構造にアルミニウム合金が適用されるとともに、速度の向上も進みました。今後、さらに高速化するためには、現在のアルミニウム合金製車両よりも重量を軽くすることが、省エネルギー化、空気抵抗などの走行抵抗の低減、加減速性能の向上とともに必要となります。

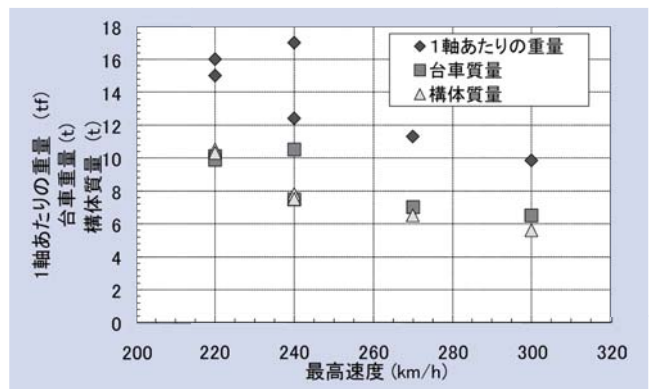


図1 新幹線の営業最高速度と車両質量の関係¹⁾

(出典：鈴木 康文：軽金属, Vol.60(2010)No.11 pp.565-570)

また、新幹線は都市間の高速輸送手段ではありますが、日本のような人口密集地帯が連続する環境では、沿線近くに住居があり、騒音・振動の問題から走行速度に対して制約が出てくる場合もあります。したがって、アルミニウム合金よりも軽く、振動などの対環境性能が確保できるような材料の適用が強く望まれます。

軽量化に対するマグネシウム合金の適用

車両の構体を軽量化するには、構体構造を見直して使用部品数を削減する方法、強度余裕のある部材を薄肉化する方法、より軽量な材料に置き換える方法などが考えられます。その中でも軽量材料への置き換えは最も効果が期待される方法ですが、軽量材料に置き換えるためには、その材料に適した構造に変える必要があります。また、実際の車両製造に向けては、軽量材料を部材へと加工する方法や部材同士を溶接する方法などを確認することも必要です。

表1に実用材料の中でアルミニウム合金よりも軽いCFRPとマグネシウム合金(AZ31合金:Mg-Zn-Al合金)の特性を車両用として使われているアルミニウム合金(6N01合金:Al-Mg-Si合金)と比較して示します。CFRPは炭素繊維とプラスチックを複合した材料で、アルミニウム合金よりも軽い材料です。CFRPは、0系新幹線の前頭部の光前灯に以前使われていましたが、現在では、E4系新幹線電車の一部の構体の先頭部、または一部の新幹線電車の碍子覆いなど、部分的に実用化されています。しかし、CFRPは、鉄道車両に求められる不燃性については改善されていますが、強度は繊維の配列方向に強く依存すること、大型の成型品を作り込むのに時間がかかること、製造治具の開発を要することなどの課題の他、さらにコストの問題があります。これらの課題を克服する技術開発は進められ

表1 マグネシウム合金(AZ31合金)、アルミニウム合金(6N01合金)、CFRPの引張強さ、弾性率、密度の比較

	引張強さ (MPa)	弾性率 (GPa)	密度 (g/cm ³)
マグネシウム合金 (AZ31合金)	235	45	1.9
アルミニウム合金 (A6N01)	240	70	2.7
CFRP	(繊維平行)	540	1.7
	(繊維垂直)	220	

ていますが、鉄道車両部材への適用に向けた大型化に関しては、ブレークスルーが必要な課題がまだ多く残されています。

そこで、CFRPと同様の軽さで、アルミニウム合金と同様の金属材料であるマグネシウム合金が注目されるようになりました。マグネシウム合金は強度が現状の新幹線電車の構体で使われている6N01合金とほぼ同等のレベルにあります。また、アルミニウム合金と同様の金属材料であるため、アルミニウム合金の製造ラインを使える可能性があり、製造に関してはCFRPのような特殊治具などの開発は不要で、CFRPよりも製造コストを低減できる可能性があります。

マグネシウム合金はアルミニウム合金よりも軽く、ほぼ同等の強度を持っていますが、縦弾性率がアルミニウム合金の約60%のため、そのままマグネシウム合金をアルミニウム合金に置き換えると剛性が低下します。そのため、アルミニウム合金よりも低い剛性を補うための設計上の工夫が必要となります。また、現在のマグネシウム合金は、車両の設計や製造を可能にする水準にまでは至っておらず、素材自体の強度、加工性、耐食性、溶接性などの基本的なデータも整備されていません。表2にマグネシウム合金を車両構造部材に適用するための主な課題を示します。鉄道車両に適用するには、不・難燃性を十分に確保した素材の開発、素材特性の性能向上、剛性を確保するための設計手法、素材の構造部材への加工、溶接手法の開発、腐食防止手法などの検討が必要になり、これらの技術の早急な開発が望まれます。

表2 マグネシウム合金を車両構造部材に適用するための主な課題

主な課題	主な項目
車両に適用するための材質の選択	化学成分の規定 不燃性あるいは難燃性の確保 機械的特性、物理特性の向上
剛性確保の手法	板厚の増加、型材の使用
構造部材および部品の成型と加工	変形抵抗の解析と評価 圧延性、押出性、鍛造性、曲げ、絞り、プレス性の評価 圧延、押出加工条件の探索 加工材の機械的性質
構造部材の溶接	溶接種類 (MIG溶接、摩擦攪拌接合;FSW) の選定 溶接継手形状の解析 各種溶接時の溶接条件の選定 溶接継手強度およびその基準の設定 溶接棒およびその管理方法の検討 溶接部の信頼性を評価する手法
耐食性を付与するための技術	腐食メカニズムの解明 表面処理の種類 (化成処理、陽極酸化) の選定 塗装用のパテ、プライマーおよび上塗り塗料の種類 塗装の耐久性の評価 塗装の剥離の非破壊評価の検討

マグネシウム合金に関する技術調査

マグネシウム合金を鉄道車両に適用するには様々な課題がありますが、鉄道事業者の立場からは、マグネシウム合金の基本的な性質を知りながら、最新の技術開発の動向を調べておくことが必要です。現在までに、鉄道総研を中心としてマグネシウム合金の基本的な技術について調査研究を行ってきており、その動向を簡単に紹介します。

(a) マグネシウム合金の不燃化と強度特性

本来マグネシウム合金は発火温度が低いために燃えやすい金属材料です。このような発火性のある素材は鉄道車両用の部材には適さないと考えられてきましたが、カルシウムを添加することで、図2のように、発火温度が上昇して燃えにくくなる傾向があることがわかってきました。カルシウムを添加したマグネシウム合金としてMg-Al-Mn-Ca合金(AMX材)が開発されました。しかし、AMX材は強度が中程度で伸びが低く、さらなる高強度化と延性を改善するため合金成分を調整し、Mg-Al-Zn-Ca合金(AZX合金)を試作開発しました。AZX合金の引張強さは6N01合金以上で、さらに高い伸びがあることが確かめられていま

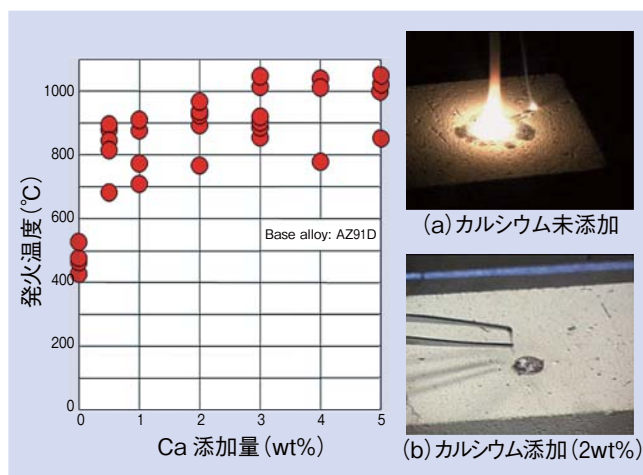


図2 マグネシウム合金の発火温度に及ぼすカルシウム量の影響及びカルシウム添加による発火性防止試験の結果
(出典：(独)産業技術総合研究所 中部センターHPより)

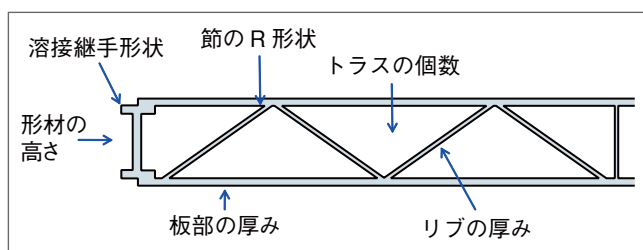


図3 中空型材の模式図と中空型材の設計パラメータ

す。現在、AZX合金の車両への適用に向け、難燃性や耐久性の確認を進めています。

(b) 剛性確保の検討

前述のように、軽量合金を適用した車両の設計では、強度を確保しつつ素材の弾性率の低下に見合う剛性の確保が必要になります。その方法として素材の板厚を厚くするか、図3に示すようなアルミニウム合金の車両で使われている中空型材の適用が考えられます。ただし、マグネシウム合金を適用して、アルミニウム合金と同等の剛性を得るには、図3のような表面板やリブの厚み、トラスの数、節のR形状など、中空型材の形状に関する設計やこの型材へ加工する技術が求められます。今後はマグネシウム合金で型材を試作して、その機械的性質について評価する予定です。

(c) 加工性の評価

車両用の部材としてマグネシウム合金を適用するには、素材自体を部材に加工することが必要です。マグネシウム合金は、結晶構造からも変形しにくい構造となっており、加工すること自体が難しい材料です。これはマグネシウム合金の使用を考える上で、古くからの課題でした。さらに車両用の素材として不燃性を得るためのカルシウムが、マグネシウムと一緒に析出した場合、その化合物が変形に対して抵抗として働くため、さらに加工が難しくなると考えられます。この変形に対する抵抗は変形抵抗と呼ばれ、温度と変形速度を変えた引張試験を行って変形抵抗を調べることで加工性が評価できます²⁾。

図4にAZX311合金を、温度523K,623K,673Kにおいて一定の変形速度で引張試験を行って得られた応力と歪との関係を示します。この曲線の最大応力が変形抵抗に相当します。変形抵抗は温度が高いと低下することが分かりま

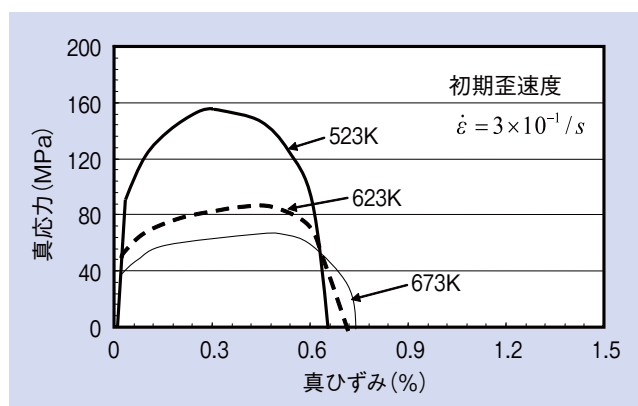


図4 一定の初期歪速度 ($3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$) で、異なった温度で引張試験を行って得られた応力-歪曲線

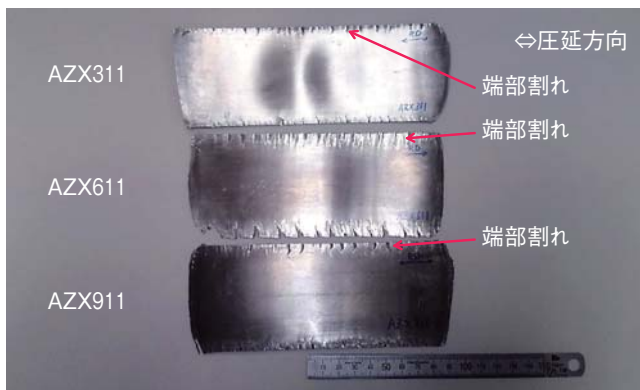


図5 難燃性マグネシウム合金を圧延した試験材の外観

す。一方、低い変形速度で変形抵抗が低下することも確認しています。このことから、不燃性のマグネシウム合金も、温度を上げ、遅い変形速度で変形すると、変形抵抗が低下するため加工性が良くなることが確認できました。

この条件を参考にして、623Kに板材を加熱し、1mmまでの厚さに圧延して加工性を調べた結果を図5に示します。AZX合金は温度を上げると圧延により1mmの薄肉板材へと加工できることがわかりましたが、端部割れが発生するなどの課題があることがわかりました。現在、このような欠陥の発生がない加工条件を探索しています。また、押出加工による中空形材や板材の試作などの検討も同時に進めています。

(d) 溶接技術の検討

鉄道車両の車体構造の組み立てには、溶接技術が不可欠であり、マグネシウム合金についても素材自体の溶接性について調べておくことが必要です。しかし、マグネシウム合金については、溶接手法、継手強度を得るための溶接条

件、不燃性のマグネシウム合金用の溶接棒の開発など、様々な課題があります。

AMX602合金およびAZX912合金の溶接棒を試作し、TIG溶接でそれぞれAMX602合金とAZX911合金の板同士を溶接し、溶接凝固部の断面金属組織を調べた結果を図6に示します。凝固組織は合金種で異なり、AZX911合金の凝固組織はAMX602合金よりも微細になることがわかりました。これはマグネシウム合金に添加する合金元素の種類の影響であると考えられ、強度を確保できるような最適な溶接性を確保するための溶接方法、溶接条件、溶接棒について材料および強度上から検討を進めています。

おわりに

軽量化は鉄道だけでなく、航空機および自動車業界でも重要なテーマです。これらの業界でも種々の方策が考えられており、マグネシウム合金についても、いくつかの採用例が公表されています。本稿では紙面の関係上、すべての調査の結果について説明できませんでしたが、耐食性やコストの問題もあり、マグネシウム合金についてはまだまだ不明な点があり、課題も多く残っています。今後もマグネシウム合金の車両構造部材への適用に向けて技術的な検討を進めていきたいと思います。[RRR]

文献

- 1) 鈴木康文：軽金属，pp.565-570，Vol.60，No.11，2011
- 2) 金子純一，菅又信，沼政弘，西川泰久，高田秀男：日本金属学会誌，pp.141-147，Vol.64，No.2，2000

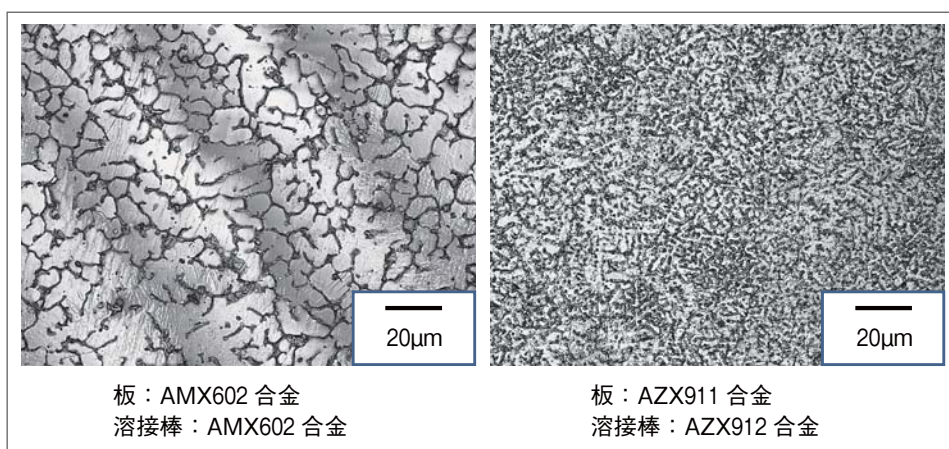


図6 AMX602合金，AZX911合金をTIG溶接した時の溶接凝固部の金属組織の比較