

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# 軽量金属の新素材を求めて

鉄道車両ではさらなる省エネルギー化や高速化が求められており、車両構体の軽量化は重要な課題です。現行の軽量金属としてはアルミニウム合金が用いられていますが、さらに軽量化するためには、アルミニウム合金をさらに高強度化して適用する方法や、アルミニウム合金よりも軽いマグネシウム合金の適用が考えられます。そこで、本稿では、軽量金属系新素材の車両構体への適用に向けた研究事例として、アルミニウム合金の特性改善と新材料としてのマグネシウム合金の事例を紹介するとともに、今後の方向性について述べます。

## 軽量金属の適用による車両構体の軽量化

車両構体の軽量化は、車体に必要となる強度、剛性、振動性、意匠性、安全性、製造性、メンテナンス性、コストなどのあらゆる面から総合的に検討されます。それを部材の面から見ると、構体に使用される部材および部品数を減らす方法や軽量材料を適用する方法が考えられます。

当初の0系や100系新幹線電車の車両構体には鉄鋼材料が使われていましたが、これより後の新幹線電車にはアルミニウム合金が適用されるようになりました。図1に100系新幹線電車と300系新幹線電車の車両構体の質量の

比較を示します<sup>1)</sup>。車両構体へのアルミニウム合金の適用が軽量化に有効な手法であることが理解できます。

## 車両構体の軽量化に対する軽金属材料の開発の方針

現行のアルミニウム合金製車両構体よりもさらに軽量化する場合、2つの方法が考えられます。

一つは、アルミニウム合金の強度を向上する方法です。これにより素材の強さを増し、安全性を維持しつつ断面肉厚を薄くすることで軽量化を図ることができます。しかし、アルミニウム合金は、注目する性質(たとえば強度)を増せば、注目する性質以外の性質(伸

び、溶接性、耐食性)が低下します。これはアルミニウム合金だけでなく、一般的な金属材料でみられる現象です。そのため、アルミニウム合金の材質をナノレベルで制御する必要があります。



**森 久史**  
Hisashi Mori  
材料技術研究部  
摩擦材料研究室  
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  
材料技術研究部  
摩擦材料研究室  
研究員  
[専門分野] 非鉄金属,  
摩擦材料, 接合工学



**辻村 太郎**  
Taro Tsujimura  
前 材料技術研究部  
主管研究員  
(現 研究開発推進室 主管研究員)  
[専門分野] 摩擦材料,  
環境影響評価



**石塚 弘道**  
Hiromichi Ishiduka  
車両構造技術研究部  
主管研究員  
[専門分野] 金属材料,  
材料強度学, 破壊力学

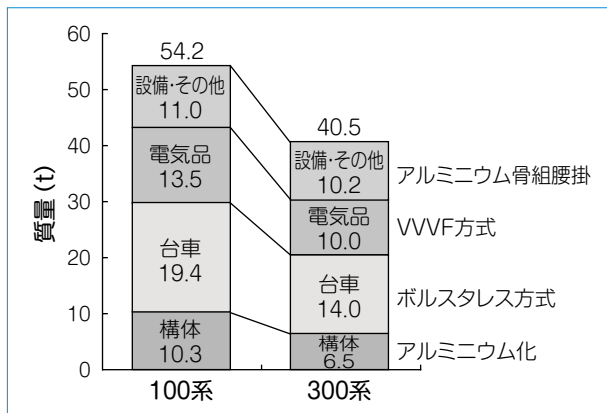


図1 100系新幹線電車と300系新幹線電車の質量比較<sup>1)</sup>

表1 主な軽量金属(合金)の密度

材質	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
アルミニウム合金	2.7
チタン合金	4.8
マグネシウム合金	1.9

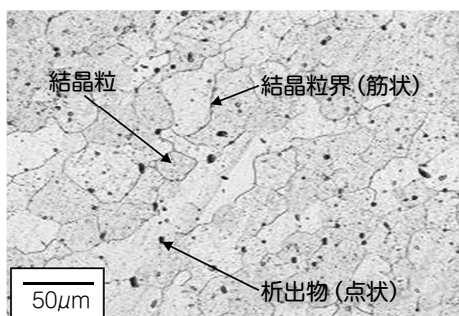


図2 アルミニウム合金で観察される金属組織

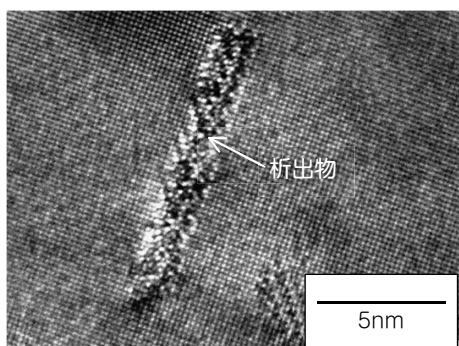


図3 透過型電子顕微鏡で観察した析出物

もう一つは、現行で使用されているアルミニウム合金よりもさらに軽量の金属(合金)に置き換える方法です。表1に軽量合金の密度を示します。アルミニウム合金よりも軽量の合金としてマグネシウム合金があります。これは金属材料の中でも最も軽量の材料ですが、発火性があることや加工性および接合性に課題があり、車両構体に適用された例はありません。そのため、マグネシウム合金の難燃性を確保する方法、車両構体に適用するための加工性や接合性に関する検証が必要になります。

マグネシウム合金にカルシウムを添加することによって発火が抑えられ難燃化することが知られています<sup>2)</sup>。本研究の難燃性マグネシウム合金の開発では、軽量部材及び部品用のマグネシウム合金の開発を行うことを目的とし

て、汎用のマグネシウム合金にカルシウムを添加した合金を開発し、その機械的性質や加工性、溶接性がアルミニウム合金と同等以上であるかの検証を行っています。

### アルミニウム合金のナノ組織の制御

人体は細胞組織からなり、細胞組織は主に細胞膜、リボゾームなどで構成されています。この細胞は人体の生理や運動機能に影響を及ぼします。同じように金属材料は、金属組織からなり、金属組織を細胞組織に例えれば、結晶粒は細胞、結晶粒界は細胞膜、析出物はリボゾームに対応します。図2にアルミニウム合金の金属組織を示します。このような結晶粒や析出物は、アルミニウム合金の強さ、加工・腐食・溶接しやすさなどに影響を及ぼします。こ

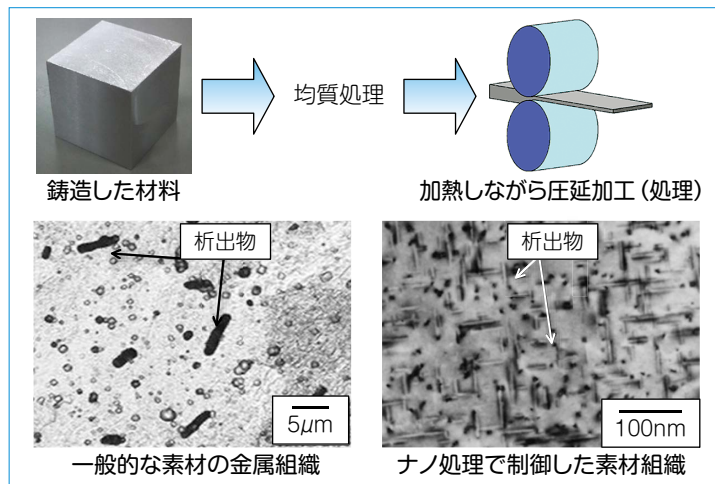


図4 一般的な素材とナノ処理で制御した素材の金属組織の比較

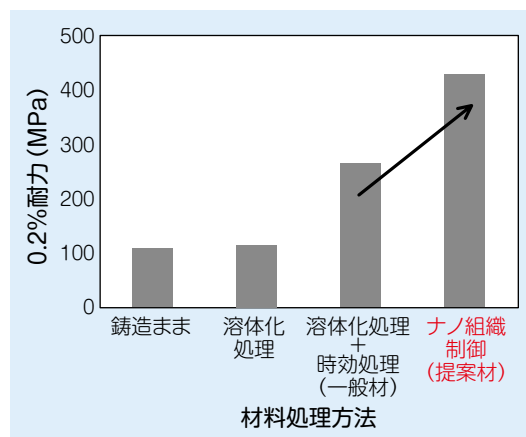


図5 材料処理手法と0.2%耐力の関係 (Al-Mg-Si系アルミニウム合金)

れまでの研究では結晶粒を制御する方法で強さを増す検討が主に行われてきました。本研究でのアルミニウム合金の高性能化では、図3に示すようなナノレベルで認められる析出物を制御して、強さ向上と他の性能向上の両立に向けた開発を行っています。

铸造した塊を均質化し、加熱しながら圧延加工を行った結果、熱と歪との作用によって析出物が微細化できることを確認しました(図4)。

図5に、Al-Mg-Si系アルミニウム合金で検討した、材料処理手法と塑性変形が開始する強さ(0.2%耐力)の関係を示します。材料処理手法としては、铸造のまま(铸造まま)、均質化後に急速冷却した処理(溶体化処理)、溶体化処理後に一定の温度と時間で加熱して、金属組織を均質化する処理(溶体化処理+時効処理)およびナノ処理

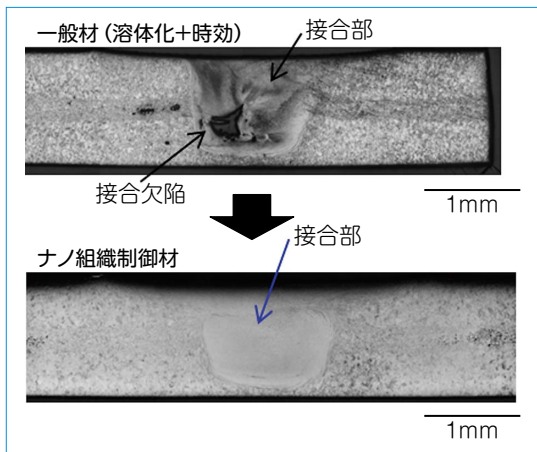


図6 接合断面の金属組織

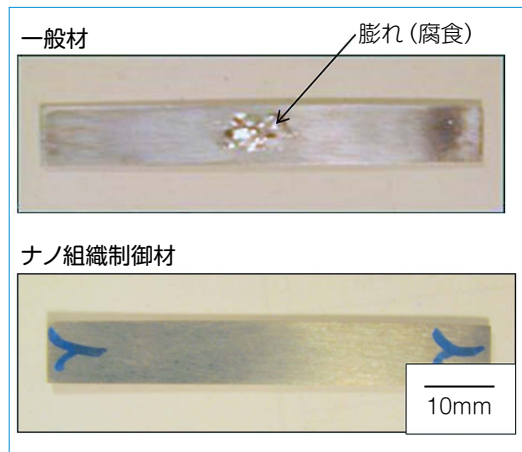


図7 応力腐食割れ試験後の一般材とナノ組織制御材の外観の比較

(ナノ組織制御)を比較しました。その結果、ナノ処理材は、一般的な処理材よりも耐力が増加することを確認しました。ナノ処理化に伴う接合性の改善を確認するために、摩擦かくはん接合(FSW) (☞参照)を行った結果を図6に示します。FSWを一般材の薄板に適用した際、接合部には図のような接合欠陥が発生しますが、析出物を制御することによって、欠陥の発生を伴うことなく接合できることを確認しました。

また航空機用の超強力なアルミニウム合金 (Al-Zn-Mg系アルミニウム合金) に対してもナノ組織制御を行いました。この合金は、アルミニウム合金の中でもFSWによる接合が難しく、さらに負荷環境下で腐食(応力腐食割れ)するという欠点があります。接合については、Al-Zn-Mg系アルミニウム合金の一般材をFSWで接合すると接合欠陥が認められましたが、ナノ組織制御材では欠陥の発生なしにFSWにより接合できることを確認しています<sup>3)</sup>。腐食に対しても、ナノ組織制御により、強度向上とともに腐食の改善が可能です。

図7に一般材とナノ組織制御材に応

力腐食割れ試験を行い、腐食状態を調べた結果を示します。一般材では表面に腐食が進行しているのに対し、ナノ組織制御材では、腐食の発生が認められません。このように、アルミニウム合金のナノ組織を制御することによって、強度が増加し接合性や耐食性も同時に改善することを明らかにしました。

### 難燃性マグネシウム合金の開発

マグネシウムは軽量金属材料の中でも最も密度が小さく、軽量化に有効な金属ですが、発火しやすいことが問題となります。鉄道車両の部材や部品に使用する材料は、難燃性または不燃性が求められますので、材料自体にこれらの性質が必要になります。

図8にカルシウムを添加した難燃性マグネシウム合金 (AZX611)、汎用のマグネシウム合金 (AZ61)、汎用のアルミニウム合金 (6N01) の燃焼試験状況を示します。汎用のマグネシウム合金では発火が認められましたが、難



図8 燃焼試験の状況

燃性マグネシウム合金では、汎用のアルミニウム合金と同様、発火しないことを確認しました。

マグネシウムに対し、難燃性を向上するための成分としてカルシウムを1%、合金の作製を容易にするための成分として亜鉛を1%、強度を得るための成分としてアルミニウムを3~9%それぞれ添加したマグネシウム合金を試作して、強度および伸びを調べました。表2にその結果を示します。

難燃性マグネシウム合金の強度はアルミニウムの添加量で変化することがわかりました。また、アルミニウムの添加量が6%および9%の合金の強度は6N01 (Al-Mg-Si系アルミニウム合金) と同等かそれ以上あることを確認しました。しかし9%のアルミニウムの添加量の合金では伸びが低下します。そのため、難燃性、強度及び伸びにバランスの取れた合金として、アルミニウムを6%添加した合金が良いと判断し、

### ☞ 摩擦かくはん接合 (Friction Stir Welding : FSW)

溶接・接手法法には高温を与えて材料を溶融させて付ける方法と固体の摩擦熱を利用して付ける方法があります。FSWは摩擦熱を利用した接合方法であり、熱歪が少ないなどの利点が多いため近年の車両構体の製造に適用されています。

表2 難燃性マグネシウム合金の強度と伸び

合金	0.2%耐力 (Mpa)	引張強さ (Mpa)	伸び (%)
Mg-3Al-Zn-Ca	230	255	16
Mg-6Al-Zn-Ca	270	285	15
Mg-9Al-Zn-Ca	260	270	7
6N01 (Al)	250 以上	—	20 以上

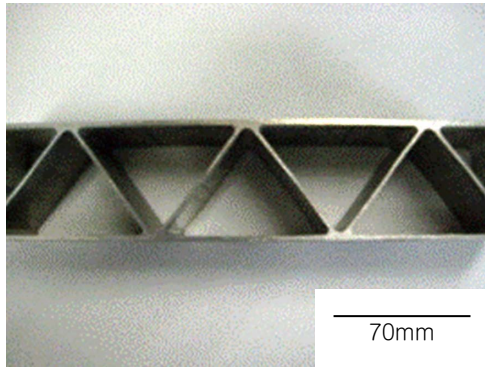


図9 試作した難燃性マグネシウム合金中空型材の断面外観

以降の加工性や溶接・接合性の検証では、アルミニウムを6%添加した難燃性マグネシウム合金を作成して車両構体への適用可能性を検討しています。

車両構体では強度の他に剛性が求められます。材料の単純な置き換えを考えた場合、同一断面形状の素材を使用すると仮定すると、剛性は弾性率に比例します。

弾性率を、難燃性マグネシウム合金で40GPa、アルミニウム合金で70GPaとして、アルミニウム合金を難燃性マグネシウム合金に置き換えることを考えると、アルミニウム合金を使用した時と比べて剛性は4割低下することになります。剛性を確保するためには、適用する素形材の断面を制御して弾性率差を補う必要があります。この方法として、現在のアルミニウム合金製車体で使用されているトラス形状をした中空型材での適用を考え、その型材の設計及び試作を行っています。

図9に難燃性マグネシウム合金で試作した中空型材の外観を示します。マグネシウム合金は加工が難しい金属ですが、ほぼ目標に近い寸法の中空型材が試作でき、車両構体への適用可能性

があることを確認しました。特に、これらの素形材を用いて車両を製作する場合には、素形材を溶接・接合する必要があります。

そこで、いくつかの溶接・接合手法を難燃性マグネシウム合金に適用して確認しました。図10にFSWにより接合し、接合部の金属組織を光学顕微鏡により観察した結果を示します。アーク溶接では接合自体は可能ですが、溶接部の結晶粒が熱によって粗大化し、その結果、接合部の強さは低下します。一方、FSWでは接合部の結晶粒が微細化し、接合部の強さは増加します。このことから、難燃性マグネシウム合金もFSWの方が接合に適しています。

### 今後の方向性

このように、アルミニウム合金ナノ組織制御材および難燃性マグネシウム合金を車両構体として適用するためには、中空型材の断面形状や加工技術に関する検討、型材自体の材料特性(破壊、疲労強度や衝撃強さ)に関する検証、溶接・接合部の構造特性に関する検証が必要です。今後は、複数の中空型材を溶接・接合して部分的な構体モデル材(部分構体)を試作し、部分構

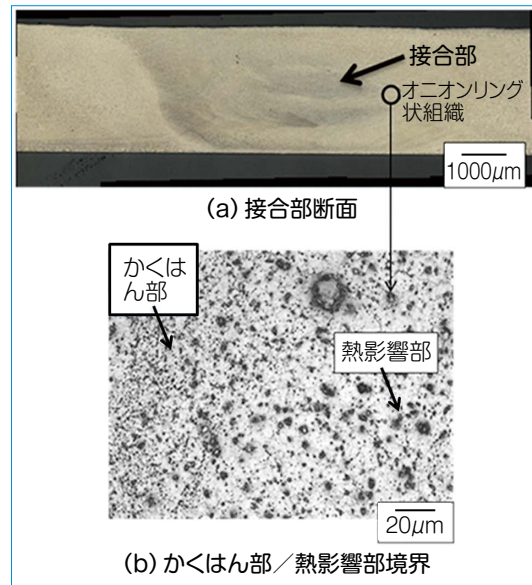


図10 FSWで接合した難燃性マグネシウム合金の接合部の金属組織

があることを確認しました。特に、これらの

体を用いた構造特性の評価により、具現化を目指します。

### おわりに

鉄道は、車両、軌道、電気などの分野から構成されており、材料の役割はそれらの分野の縁の下の力持ちです。実用化されるまでには、材料を作る、評価する、実用化するための周辺技術を整えるといった、さまざまなハードルがあります。軽量金属の新素材を探る場合にも、同じ過程を経る必要があります。今、まさに材料開発という基礎研究を抜け出す見通しが得られ、構造特性を評価する段階まできました。今後もさまざまな課題を克服しつつ、実用化に向けて取り組みます。RRR

### 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) 森久史，上東直孝，辻村太郎，石塚弘道，花木悟，清水和紀：車体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
- 3) 森久史，辻村太郎，石塚弘道，石川武：高強度アルミニウム合金の摩擦攪拌接合の接合性の向上，鉄道総研報告，Vol.26，No.12，pp.51-56，2012