

## 高速鉄道車両への軽金属材料の適用\*

森 久史\*\*, 箕田 正\*\*, 高谷 舞\*\*\*, 宮崎 悟\*\*\*  
水越秀雄\*\*\*\*, 一谷幸司\*\*, 田中 宏樹\*\*\*\*\*

## Application of Light Weight Metals on High Speed Train\*

Hisashi Mori\*\*, Tadashi Minoda\*\*, Mai Takaya\*\*\*, Satoshi Miyazaki\*\*\*  
Hideo Mizukoshi\*\*\*\*, Koji Ichitani\*\* and Hiroki Tanaka\*\*\*\*\*

### 1. 緒言

CO<sub>2</sub>排出量の少ない大量高速輸送機関として高速鉄道(新幹線)がある。鉄道車両は、昔から、安全性、信頼性、経済性、利便性、環境保護性を重視し、その時代に応じた社会情勢や新技術を取り入れながら開発が進められてきた<sup>1)~4)</sup>。高速鉄道車両では、到達時間のさらなる短縮化(高速化)や省エネ化が強く求められており、車両の軽量化が基本的な課題になる<sup>5), 6)</sup>。車両の軽量化は、車両部材の部品点数の削減、高強度材の適用による薄肉材の適用、軽量材料の適用から考えられ、比強度が高く、加工性に優れ、種類(熱処理型、非熱処理型)も豊富にあるアルミニウム合金を適用した技術は大きな革新であった。アルミニウム合金製車両は1962年に山陽電鉄2000形で開発され、新幹線では、1969年に新幹線951系でアルミニウム合金が適用されており、1980年の東北・上越新幹線200系車両で営業線に投入された<sup>1), 2), 5), 6)</sup>。以降、新幹線300系電車、新幹線700系電車などが開発・生産されており、2019年で累積26000両に到達し、さらに増加の一途にある。また、近年では、アルミニウム合金よりも比強度の高い、難燃性マグネシウム合金の適用なども検討され始めている<sup>4)</sup>。本稿では、高速鉄道車両への軽量金属材料の適用について、主に当社が協力してきた技術事例を簡単に紹介した。

### 2. 構体材料への7000系高強度材の適用

#### 2.1 車体構造へのアルミニウム合金の適用

1964年に新幹線0系電車が開業し、日本の新幹線技術の開発が始まった。その後、国鉄の「スーパひかり構想」により新幹線100系電車が開発されたが、車両材に適用されたのは一般圧延炭素鋼であった。1971年に国鉄新幹線整備法が発令され、東北・上越方面への新幹線化が着手され、新幹線100系電車による試験運転が行われた。この試験において、線路から巻き込んだ雪の車体への付着、車体屋根への積雪によって、車両重量が計画以上となり、強度上に影響を及ぼすようになった。また、材質が鉄鋼材料であるために、塗装を行っても雪の付着による腐食の影響も認められるようになった。

そこで、東北・上越新幹線の豪雪区間での走行を目的とし、先頭部の雪避けの設置、耐雪装置の搭載、台車を覆う構造を基本方針として考えられた。このような装置の搭載および構造の採用を検討した際に、車体の軸重が16.3トン以内という設計目標内に収める目的として、車体構造にアルミニウム合金の適用が考えられた。

#### 2.2 アルミニウム合金製新幹線構体の開発

この当時、山陽電鉄2000系および国鉄301系で車体へのアルミニウム合金化が行われていたために、アル

\* 本稿は、軽金属学会第139回秋期大会企業招待講演での報告内容、主要部分は、軽金属、71(2021)、258-263に解説記事として掲載。  
The main part of this paper has been published in Journal of The Japan Institute of Light Metals, 71(2021), 258-263.

\*\* 株式会社UACJ R&Dセンター 第一研究部 博士(工学)  
Research Department I, Research & Development Center, UACJ Corporation, Ph. D.(Eng.)

\*\*\* 株式会社UACJ R&Dセンター 第一研究部  
Research Department I, Research & Development Center, UACJ Corporation,

\*\*\*\* 株式会社UACJ 自動車部品事業本部 モビリティテクノロジーセンター  
Mobility technology Center, Automotive Parts Business Division, UACJ Corporation

\*\*\*\*\* 株式会社UACJ R&Dセンター 第一研究部 博士(工学)  
Research Department I, Research & Development Center, UACJ Corporation, Dr. Eng.

ミニウム合金の適用に懸念事項は認められなかった。しかし、新幹線車両として、鉄鋼材料からアルミニウム合金への代替による剛性低下、高強度長尺材の製造、気密疲労に耐えられる疲労設計、アルミニウム合金の溶接可能性について課題が残されており、これらの課題からアルミニウム合金製車両に適した車両構造(ボディーマウント構造)が考えられた。その試験構造車(以降、試験車)と新幹線電車0系の車体構造をFig. 1に示す<sup>7)</sup>。車体構造は0系がほぼ四角断面であるのに対し、新幹線951形では、軒部(屋根部分)にRを付け、床から下にも側構体を伸ばし、台車機器類を保護するような構造(ボディーマウント構造)へと変更された。このボディーマウント構造は、台車機器類が雪から保護され、気密で問題となる軒部の応力集中を低減できる構造である。まだ0系と比較して断面積が大きいことから断面2次モーメント(I)が増加することで、鉄鋼材料からアルミニウム合金への置換による剛性低下(EI)を防ぐことができるのに特徴がある。構造は、新幹線0系電車と同様、骨組に板を溶接で組み立てる工法であり、外板には耐食性、加工性、溶接性の5083の薄板、骨組みには強度と溶接性に優れた7N01の押出材を用いる構造とされた。その後、新幹線窓の大きさを小さくし、軒桁部に7003の押出材を適用した新幹線962形が試作され、新幹線200系電車の礎が完成した。

2.3 7000系合金押出材の開発

当社が提案した7003合金は、7N01のMg量を減少させることによって押出加工性を向上させた合金であり、6063に近い押出加工性を有し、母材強度および溶接強

度が5083よりも高く、耐食性も比較的良好な合金である。また、押出材の作製では、押出後の急冷過程でメタルマスアンバランスによる収縮により部分的に変形が生じやすく、曲がり、反りなどの原因になる。型材の寸法精度がそのまま車両組み立て工作精度に反映するため、部材の反り、曲がり、ねじれなどに高い精度が要求される。そのため、矯正が行われるが、肉厚の局部的薄厚部のある型材の矯正では、薄肉部で変形が優先的に生じて型崩れしやすい。また、大きな曲面を有する型材では曲面が崩れて平板化しやすい。

さらに、時効の進行が進む3元系合金では、自然時効によって材料強度が上昇するため矯正を困難にする場合もある。そこで、当社では、962形の開発において、変形防止のダイス設計、冷却過程の変形防止と矯正方法を改善することにより見栄え良い車両の開発に貢献した。

3. 車体技術へのハニカムパネルの適用

3.1 新たなアルミニウム合金製車両の開発

200系新幹線電車以降、新幹線電車のさらなる軽量化の検討が進み、200系のようなアルミニウム合金を部分的に使用した車両から、車体全体にアルミニウム合金を適用する方式が考えられた。部品取り付け部と外板とを長尺一体化した押出材を自動MIG溶接によって、工程数が減り、工作コストを極力下げることができるシングルスキン構造が開発され、新幹線300系電車に適用された。車体全体をアルミニウム合金に置き換えた新幹線300系は、鉄製車両である新幹線100系よりも

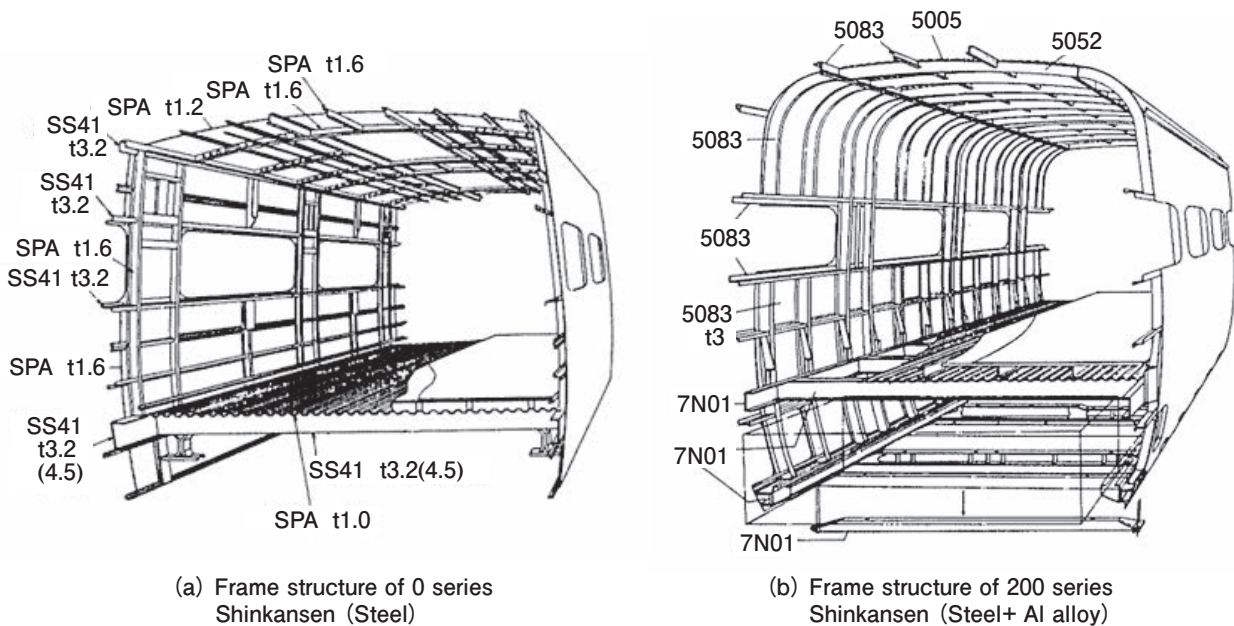


Fig. 1 Comparison of frame structure of Shinkansen between 0 and 200 series on car vehicles<sup>7)</sup>.

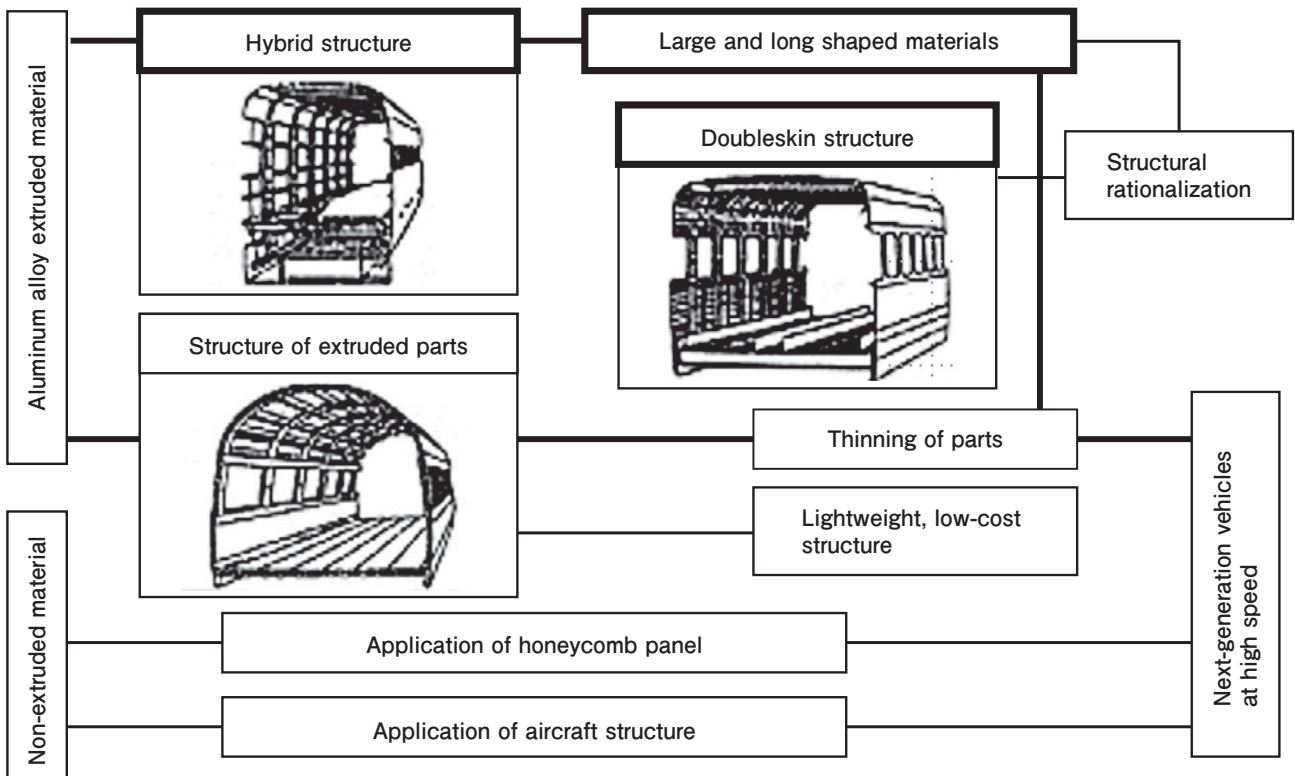


Fig. 2 Concept of next-generation aluminum alloy vehicles<sup>8)</sup>.

4トン近い軽量化が可能になり、アルミニウム合金への置き換えによる軽量化効果が実証された。以降、輪重の目標値を11.5トンとし、アルミニウム合金製構体の検討が始まった。

Fig. 2に高速試験車両の流れを示す<sup>8)</sup>。新幹線200系電車、新幹線300系電車で適用されてきた押出型材を中心にする方法、国鉄時代に開発された中空型材を新たに車体全体に適用する方法、アルミニウム合金製ハニカムパネルを適用する方法などを組み合わせて、疲労を考慮した限界設計、工数低減可能な設計・構造を再検討し、高速試験車による構造・部材適用の検証が行われた。高速試験車は新幹線を有するJR3社で開発され、JR東日本ではStar21、JR東海では300X (Fig. 3)、JR西日本ではWin350が製造された<sup>9)~11)</sup>。

これらでは、アルミニウム合金製ハニカムパネル、アルミニウム合金製大型リブ付き長尺材、アルミニウム合金製のトラス断面の中空押出型材製を各々適用した構体構造の車両が製造され、実車走行試験を行って、応力、振動、騒音などについて調べられ、部材とそれら車両特性について評価された。

東北・上越新幹線 (JR東日本)、長野新幹線 (JR東日本)、東海道新幹線 (JR東海)、山陽新幹線 (JR西日本) は走行環境 (トンネル数、山間部・海岸部・都市部、曲線通過箇所、対抗すれ違い数)、運転頻度、軌道路盤が異なることから、車両の受ける応力、振動、騒音が異なってくる。そこで、各JRの仕様に見合った構造が採



Fig. 3 High speed train of 300X on Central Japan Railway Company (JR Tokai). (Photo by Railway Technical Research Institute).

択された。特にJR西日本は航空機との競合があり、さらなる軽量・高速車両の開発を目的として、当社のアルミニウム合金製ハニカムパネルが適用された、新幹線500系電車が開発された<sup>12)</sup> (Fig. 4)。新幹線500系電車は、構体重量が4.8トンであり、過去製造された新幹線の中でも最も軽量である。また、お客様の人気の高い車両でもある。アルミニウム合金製ハニカムパネルは、Fig. 4 (b)<sup>13)</sup>のように、側構体および床全体に適用されている。

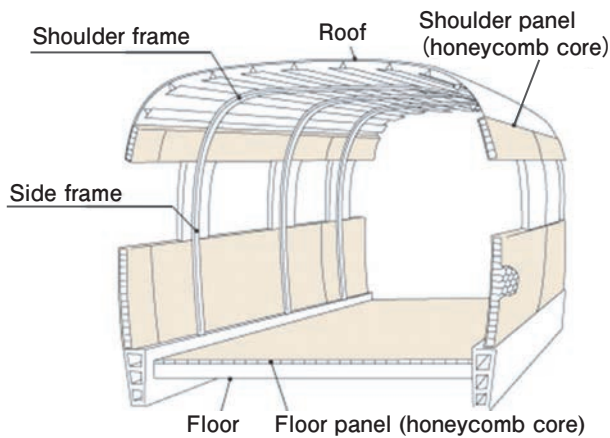
### 3.2 アルミニウム合金製ハニカムパネルの特徴

アルミニウム合金製ハニカムパネルをFig. 5に示す<sup>13)</sup>。ハチの巣状のコアを表面板でサンドイッチし

た構造であり、コアの積層方向に対して剛性が高く、中空のために最も軽量効果が認められる。ハニカムパネルにはろう付けと接着剤タイプがある。特にろう付けハニカムパネルは、接着剤ハニカムパネルよりも接合部の強度が高く、一般のアルミニウム合金と溶接が可能である。また、軽量だけでなく、共振周波数が高く、制振性にも優れ、曲げ剛性とねじり剛性を向上できる、衝撃吸収能が優れるのが特徴である。ハニカムパネルは、Fig. 4 (b)<sup>13)</sup>に示すように、パネル同士(側)とパネ



(a) Head shape of 500 series Shinkansen



(b) Car structures of 500 series Shinkansen

Fig. 4 Structure of Shinkansen train 500 series (JR West Japan) and its car body structure.

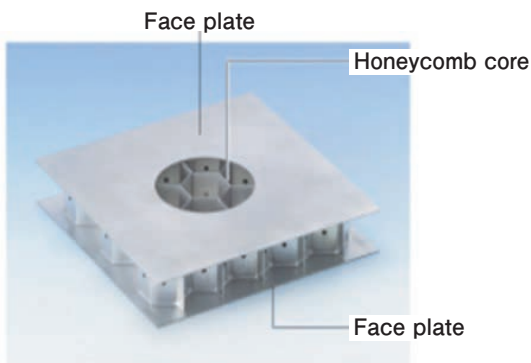


Fig. 5 Structure of honeycomb sandwich panel.

ルと屋根のように一般アルミニウム合金材との溶接が必要になる。アルミニウム合金製ハニカムパネルでは、面板同士の突合せや面板上に他のアルミニウム合金を溶接することが可能である。面板が薄い場合には、溶接ビードがハニカムコアに及ぶ可能性があるが、それによる接合部の剥離やコアの優先溶融はない。また、コアが溶接熱を抜熱する効果があり、溶け落ち防止も可能になる。

### 3.3 アルミニウム合金製ハニカムパネルの車両部品への適用

アルミニウム合金製ハニカムパネルは、軽量で剛性を有し、疲労強度にも優れる特性がある。そのため、構体の主要材の他に床にも適用されている。JR東日本は、Fig. 6に示す、ハニカム床材、ゴム入りアルミニウム合金製ハニカム床材、発泡樹脂入りアルミニウム合金板材を試作して現車試験を行い、アルミニウム合金製ハニカムパネルの有効性を確認し、新幹線の床材に適用している<sup>14)</sup>。また、アルミニウム合金製ハニカムパネルの車体部品の適用として、パンタグラフカバーが挙げられる。パンタグラフカバーは、軽量であり、

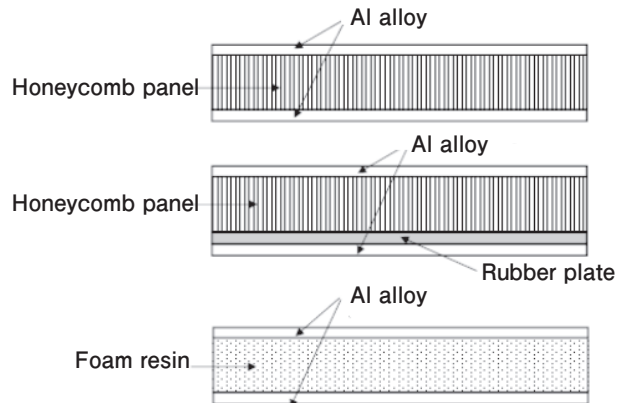


Fig. 6 Examination of application of aluminum alloy plate as floor material of example (JR East)<sup>14)</sup>.



Fig. 7 Pantograph cover made by honeycomb sandwich panel on Shinkansen.

かつ、高速走行に伴う空力騒音および空力振動に対する抑制、高剛性、耐風圧強度が求められる。ハニカムパネルは共振周波数が高く、制振動性もよい。また、平滑面であるため、空力騒音源がなくなるため、騒音が抑えられることから新幹線のパンタグラフカバー (Fig. 7) に使用されている。

#### 4. 台車部品のアルミニウム合金の開発

##### 4.1 台車部品の概説

台車を Fig. 8 に示す<sup>15)</sup>。台車は車両を高速で正確に案内する役割があり、車輪、車軸、歯車、電動機、ブレーキ部品からなる極めて重要な装置である。昔の台車は、軸箱の支持剛性が前後・左右に硬く、台車の回転抵抗が非常に大きいこと、曲線走行時の左右の定常加速度が増加するなどの現象で、曲線走行時の走行性能を阻害し、軌道保守・車輪のフランジ摩耗が増加する、乗り心地が悪くなるなどの課題があった。そこで、車体支持装置の改良、車輪の小径化、中空車軸の適用、歯車箱・軸箱のアルミニウム合金化、端梁の廃止、横梁へのブレーキ装置の取り付けが検討され、部品の小型化および一体化、構造の簡素化・軽量化から見直された。当社は大型鍛造加工によりアルミニウム合金製の軸箱体を開発した。

##### 4.2 軸箱のアルミニウム合金化<sup>15)</sup>

Fig. 9 に軸箱の外観を示す。軸箱は車軸を受けるための軸受けを保護するための装置であり、内部には、軸受けと車軸との摩擦潤滑を良好にするために、潤滑油あるいは潤滑グリースが充填される。そのため、潤滑油等の漏れが発生しないような対応が強く求められ、疲労をはじめとする傷の発生は許容しない部品である。また、軸箱に取り付けた軸ばねからの荷重を受ける。そのため、強度、疲労強度とともに破壊靱性が求められる。さらに、潤滑油に対して反応性が無いことや、摩耗で発生した鉄粉で軸箱自体が摩耗しないよう、鉄粉末に対する耐摩耗性が求められる。その他、高速で走行中に、線路から巻き上げた石による衝撃性を考慮する必要がある。軸箱は、国鉄時代から台車走り装置部品へのアルミニウム合金化について検討された部品であり、当時の国鉄技術研究所 (現 公益財団法人鉄道総合技術研究所) が将来の高速アルミニウム 7050 合金を適用して候補品を試作し、疲労試験 (Fig. 10) および石との衝撃特性に関する評価 (Fig. 11) 等を行い、潤滑油のフラッシング中の鉄粉末に対する摩耗等も少ないことを認め、現車試験で確認後に採用された。現在、

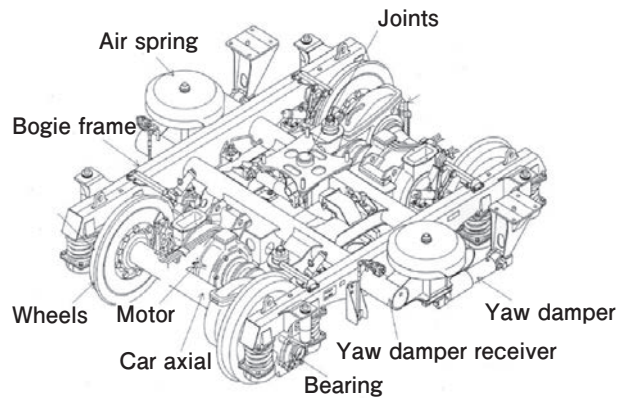
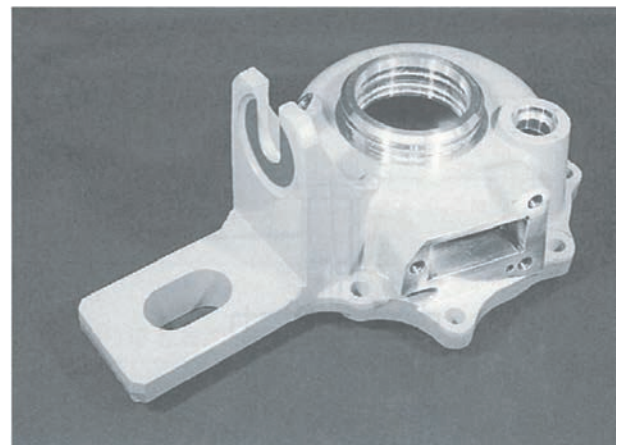


Fig. 8 Main parts and parts shape of bogies for Shinkansen.



(a) Axle box shape



(b) Axle box (in sight)

Fig. 9 Aluminum alloy axle box for Shinkansen.

一部の新幹線電車に使用されている。

##### 4.3 軸箱以外の台車部品のアルミニウム合金化による軽量化

軸箱等の台車部品のアルミニウム合金化によって、1台車当たり 200kg 程度の軽量化が可能になった。台車の部品のほとんどが鉄鋼材製であることから、200 kg の軽量化の効果は極めて大きな成果である。現在、ダ

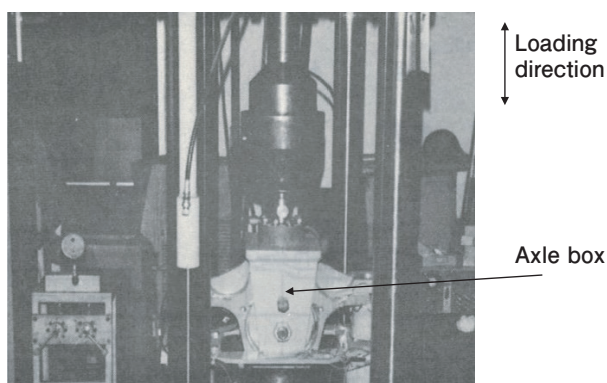


Fig. 10 Fatigue test of aluminum alloy axle box for Shinkansen.



Fig. 11 JR East Shinkansen train E4 series head car part<sup>16)</sup>.

ンパー受けや歯車箱等の部品についてもアルミニウム合金化が進められており、アルミニウム合金による軽量化の効果が、車体技術と同様あるいはそれ以上に著しく認められている。

## 5. 競合材料の動向

車両の軽量化に向けた、アルミニウム合金との競合材として、樹脂系複合材料および難燃性マグネシウム合金が考えられる。Fig. 12にJR東日本向け新幹線E4系電車の先頭部の一部を示す<sup>16)</sup>。先頭部がCFRPの一体成型で作製された時があった。現在はリサイクル性や修繕性、コストよりアルミニウム合金に置き換えられている。今は新幹線では樹脂系複合材を大型構造体として使用していないが、在来線や私鉄電車の先頭車両にはCFRPの適用が進められている。また、CFRPでは、Fig. 13に示すような台車が開発されている<sup>17)</sup>。従来の鉄製台車と比較して重量は大幅に減少し、樹脂系複合材の特徴を生かした設計であるために、簡素な構造に変更できることによって、メンテナンスが行いやすくなっている。また、難燃性マグネシウム合金の

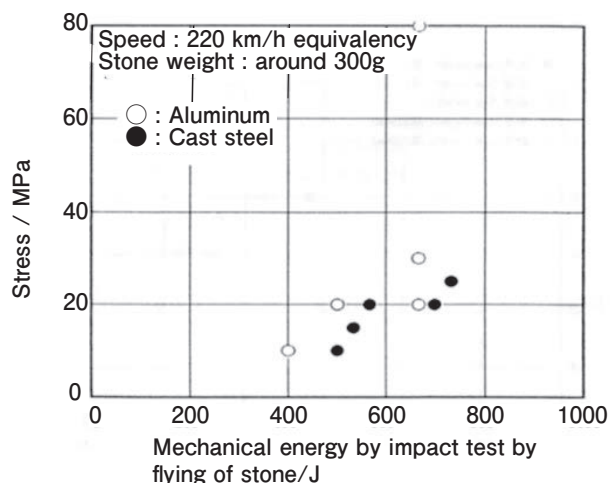


Fig. 12 Result of impact test by flying of stone<sup>15)</sup>.



Fig. 13 Cart made of carbon fiber composite material (Kawasaki Heavy Industries: efSET)<sup>17)</sup>.

車両への適用では、Fig. 14に示すような大型構造体の試作段階まで進んでおり、基本的な部材生産、加工、接合、表面処理技術については、整備されつつあると考えられる<sup>18)</sup>。

今後は新幹線電車のさらなる軽量化と、磁気浮上式鉄道、燃料電池車両、ハイブリット電池車両などの省エネ車両の開発が注目されている。また、社会要請として、材料リサイクルについても今後は考慮していく必要がある。それに対し、当社では、アルミニウム合金を中心として、樹脂系複合材料や難燃性マグネシウム合金の技術と調和を図りながら、マルチマテリアルへの対応も含めて鉄道車両技術に対して貢献していく予定である。

## 6. おわりに

高速車両における非鉄金属の適用に関する動向では、鉄鋼材料製の車両からアルミニウム合金製車両への置き換え、オールアルミニウム合金製構体の開発、オールアルミニウム合金製車両のさらなる軽量化のステップで進んでいる。

当社は、高強度アルミニウム合金(7000系)の開発お



Fig. 14 The simulated structure of car vehicles on flame-retardant magnesium alloy<sup>18)</sup>.

よび生産、アルミニウム合金製ハニカムパネルおよび適用に関する要素技術の開発、アルミニウム合金製大型部材の造加工を行って、高速車両の発展に貢献してきた。輸送機器向けの技術は、文献<sup>13)</sup>として紹介している。

<https://uacj-automobile.com/jp/aboutus.html>

今後また、新材料および技術の提案を行い、競合材料との調和を図りつつ、水平リサイクル技術についても検討しながら高速車両の発展に貢献したいと考えている。

### 謝 辞

本稿は軽金属学会第139回秋期大会で発表したものである。このような機会を与えていただきましたMAアルミニウム株式会社 山口恵太郎氏、当社 戸次氏に心より感謝申し上げます。また本稿の作成にあたり、車両メーカーおよび旅客鉄道株式会社の方々にはアドバイスを頂戴した。心より厚くお礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 石井幸孝：日本機械学会誌, **84** (1981), 1259-1266.
- 2) 馬場義雄, 西村嘉彦：軽金属, **33** (1983), 618-631.
- 3) 鈴木康文：軽金属, **60** (2010), 565-570.
- 4) 田口真：軽金属, **67** (2017), 460-469.
- 5) 酒井康士：軽金属, **56** (2006), 584-587.
- 6) 松本二郎：圧力技術, **31** (1993), 154-168.
- 7) 軽金属車両委員会：軽金属車両委員会報告書, No.4 (1984), 175-179.

- 8) 伊藤順一：R&M：Rolling stock & machinery, **7-4** (1999), 18-23.
- 9) 遠藤隆：JR EAST Technical Review, **1** (2002), 6-8.
- 10) 吉江則彦：車両技術, **197** (1991), 29-34.
- 11) 石津和正：電気学会誌, **117** (1997), 283-284.
- 12) 吉江則彦：鉄道車両と技術, **2-4** (1996), 3-8.
- 13) UACJ Automobile Technology, <https://uacj-automobile.com/jp/aboutus.html>
- 14) 菅野悟, 藤野謙司, 橋本克文：JR EAST Technical Review, **31**, (2010), 27-28.
- 15) 森久史：アルトピア, **12** (2019), 9-12.
- 16) 水田明能, 木村敏宣：まてりあ, **43** (2004), 392-395.
- 17) 西村武宏, 松原剛, 稲村文秀, 津村洋祐：日本機械学会, 2019年度年次大会, (2019).
- 18) 新構造材料研究技術組合：ISMA レポート, 12-9 (2018), 1-2



森 久史 (Hisashi Mori)  
(株)UACJ R&D センター 第一研究部  
博士(工学)



箕田 正 (Tadashi Minoda)  
(株)UACJ R&D センター 第一研究部  
博士(工学)



高谷 舞 (Mai Takaya)  
(株)UACJ R&D センター 第一研究部



宮崎 悟 (Satoshi Miyazaki)  
(株)UACJ R&D センター 第一研究部



水越 秀雄 (Hideo Mizukoshi)  
(株)UACJ 自動車部品事業本部  
モビリティテクノロジーセンター



一谷 幸司 (Koji Ichitani)  
(株)UACJ R&D センター 第一研究部  
博士(工学)



田中 宏樹 (Hiroki Tanaka)  
(株)UACJ R&D センター 第一研究部  
博士(工学)