

日本における鉄道車両は、材料ごと「鋼製車両」「ステンレス車両」「アルミ車両」に分けられる。1950年代後半まで車両といえばもっぱら鋼製だったが、耐食性や軽量化の求めのなかステンレス車両とアルミ車両が誕生した。これが大きな流れだ。

21世紀、地球環境への意識が高まるなか、特にステンレス車両とアルミ車両ではカーボンニュートラルにつながる技術開発がさかんに進められている。今回は、2022（令和4）年度の新造車材料別シェアを6割台にのせたアルミ車両の取り組みに光をあてる。

軽量化などで環境保全に寄与

アルミ車両の国内初製造は1962（昭和37）年。山陽電気鉄道2000系で、川崎車輛（現・川崎車両）製だった。当時、川崎車輛の社員が車両軽量化を目指すなか、独WMD社から設計製造技術を習得し、古くから付き合いのあった山陽電鉄にアルミ車両の製造・納入を打診し、「国内初」に至ったという。

当時、アルミ材から車両の構体・部品をつくる時、材料を加圧して型に通すことで一定の断面形状をもつようにする「押出成形」と、材料をロールとロールの間を通して薄くする「圧延」の方式が使われた。それぞれ「トコテン方式」「そば打ち方式」と例えられる。山陽電鉄2000系には、

骨材に押出材材、また側・屋根・妻などの外板に圧延板材が使われた。

鉄道の未来を思っただろう、山陽電鉄と川崎車輛の担当者らは2000系電車3両編成を、アルミ車両だけでなく、ステンレス車両でも製造し、重量や性能などを比較した。一両あたりステンレス車両の重量約14・5tに対し、アルミ車両約9・9t。「アルミで軽量化」は果たされたわけだ。運転時の使用電力や制輪子の摩擦についてほぼ同等の低減率となった。

これらのアルミ車両での特性は環境保全、今というカーボンニュートラルに貢献しうるものといえる。ここで、アルミ合金の環境保全性を整理しておく。アルミニウムは同じ質量ではステンレス鋼の約1・7倍の強度、板の剛性ではステンレス鋼の約8倍の剛性が得られる。相対的にアルミ車両は軽量化を図れるわけだ。

この軽量化が、環境保全性に大きくつながってくる。基本的に軽いものほうがエネルギー消費を抑えられるからだ。鉄道運行に関わるエネルギー消費の約70%が車両運行関連とされる。日本アルミニウム連盟（現・日本アルミニウム協会）の研究報告によると、アルミ車両1両あたりの走行時のCO₂排出量は、鋼製車両1両より9%、またステンレス車両1両より4%抑えられる計算だ。

ほか、アルミ車両の寿命には、新幹線の13〜20年を除けば一般的に長い寿

REPORT.2 「第5世代」への道

リサイクルで環境に貢献する時代へ

アルミニウム合金を使った鉄道車両は、カーボンニュートラル実現へ向けてさらなる進歩を求められている。今後の本格的な「リサイクル期」を前に、質をとまなうリサイクルに向けた取り組みが展開されている。一般社団法人日本アルミニウム協会を訪れ、アルミニウム合金車両のこれまでの歩みとともに、鉄道アルミニウム車両の現状や今後期待されることについて話を聞いた。

取材・文◎漆原次郎／撮影◎加藤有紀／写真提供◎山陽電気鉄道株式会社 京阪電気鉄道株式会社 京浜急行電鉄株式会社 西武鉄道株式会社 東京地下鉄株式会社



日本アルミニウム協会
参与・技術開発部

中野直男

Tadao NAKANO



日本アルミニウム協会
参与・技術開発部長

森山勉

Tsutomu MORIYAMA

一般社団法人日本アルミニウム協会

日本アルミニウム連盟を前身とし、40年以上にわたり、アルミニウムやアルミ産業に関わるさまざまな研究や事業を行う。アルミニウム車両委員会では、アルミ車両のリサイクルに関する調査研究、車両安全設計のための各種データの整備、アルミ車両統計の調査、アルミニウム車両委員会報告書の編纂などを行う。

アルミニウム合金製品車両の歴史

第3世代(1981年～)



例：京浜急行 1500 形

第1世代(1962年～)



例：山陽電鉄 2000 系

第4世代(1992年～)



例：西武鉄道 20000 系

第2世代(1964年～)



例：京阪電鉄 5000 系

命性がある。
また、無塗装でも腐食しづらいなどの省メンテナンス性がある。さらに、記事後半で話題にするリサイクル性も高い。これらの点も環境保全面の優位性につながる要素となる。

技術革新とともに新世代へ移行

アルミ車両はその後、材料や製造技術の革新とともに進歩を遂げた。初期車両を「第1世代」とすると、近年の車両は「第4世代」となる。では、世代を

新たにさせた技術とはどんなものか。
アルミ車両誕生と同じ1962（昭和37）年、新アルミ合金「A7N01」（現A7204）が鉄道車両向けに開発された。アルミ合金には、アルミニウムに含有させる別の金属の種類により系統が割り振られ、亜鉛とマグネシウムを主に含有させた7000系合金の一つにA7N01は位置づけられる。強度が高く、溶接部では常温放置するだけで母材並みの強度回復が見られるため、高強度を要する台枠の梁に使われた。A7N01はアルミ車両の量産を確固たるものにしたといえよう。こうして製造されたアルミ車両は「第2世代」と呼ばれる。民営鉄道を例に挙げると山陽電鉄3000系、営団地下鉄（現・東京メトロ）6000系・7000系・8000系、相模鉄道7000系、京阪電鉄5000系が該当する。
1969（昭和44）年には、大手アルミ圧延企業の出資で軽金属押出開発（KOK）が設立され、世界最大級9500tのプレス能力をもつ大型押出機を稼働させた。これで薄肉かつ大型のA7003合金押出材がつけられるようになり、「第2・5世代」を生み出した。
さらに1980年代初頭、アルミニウムにマグネシウムとシリコンを添加した6000系合金の一種として、「A6N01合金」（現A6005C合金）が開発された。以前よりアルミ車両の一部に6000系合金が使われていたが、A6N01合金の誕生で押出型材のみの構成で車体を実現できるようになったのだ。部材点数や工数が大幅減となり、アルミ車両の普及を加速させた。この時期より製造された山陽電鉄3050系、営団地下鉄01系・02系・03系・05系・9000系、京阪電鉄6000系、阪急電鉄7000系・8000系、京浜急行1500形、相模鉄道8000系などが「第3世代」に当たる。
そして1992（平成4）年、二つの技術革新が「第4世代」をもたらす。押出成形による「ダブルスキン構体」の実現と、溶接技術の一つである「摩擦攪拌溶接」（FSW：Friction Stir Welding）の本格導入だ。
ダブルスキン構体とは、段ボールのように、2枚のアルミ合金板の間にトラス（三角形を単位とする構造）状の補強部材を入れたつくりを指す（※20頁右上写真）。この構体を押出成形でつくることで、骨組みなしで強度を保てるようになる。加えて、新たな溶接技術FSWが英国から導入された。装置の先端についたプローブ（突起）を二つのアルミ合金の境目で回転させて摩擦熱を生じさせ、プローブを移動させることでシームレスな固相接合を実現するのだ。これで、ダブルスキン構体をFSWでつなぎあわせられ、大面積化できる。「第4世代」に当たるのは西武鉄道10000系・20000

東京メトロはすべて アルミ車両だから…



メンテナンス の負担を軽減

きびにくいアルミ車体は、
美しさと清潔感が持続
します。またメンテナンス
も容易です。

高い リサイクル率

今では80%以上もアルミ
合金を回収できるまでに
なりましたが、アルミ製
からアルミ車両への水平
リサイクルを目指します。



静かで快適な 車内空間

高い加工の自由度を生かし、
最近では大型ダブル
スキン構造として静寂さ、
快適さも向上させています。

省エネへの さらなる貢献

軽量のアルミニウムを積極
採用してきたことで、消費
電力の低減を通じ地球温暖
化ガス削減に貢献して
います。

詳しくは「[鉄道車両の部屋](http://www.aluminum.or.jp/railway_vehicle/)」
または  http://www.aluminum.or.jp/railway_vehicle/

東京地下鉄株式会社 一般社団法人日本アルミニウム協会
2016年10月現在

東京地下鉄株式会社
と日本アルミニウム
協会のタイアップポ
スター（日比谷線
/2016年）。

鉄道車両に使われるアルミダブルスキン構体の一部。



東京メトロ銀座線の廃車両のアルミ片
を約7割使用し実証したアルミ押出材
のサンプル。



系、東京地下鉄10000系・15000系・16000系、京成電鉄新AE形、東武鉄道50000系、阪急電鉄9000系・9300系などだ。

新造車の6割超がアルミ車両に

アルミ車両はこうして、材料や製造技術の革新を受けながら進歩してきた。近年、新造車にアルミ車両が選ばれることが増えている。日本鉄道車輛工業会によると、2022（令和4）年度の電車・客車の完成車両の生産合計は1651両で、うちアルミ車両は62・3%の957両。前年度比3・7ポイント増で、初の60%台を記録した。アルミ車両向けの路線とはどういうものか。日本アルミニウム協会の技術開発部参与で同協会ウェブサイト「鉄道車両の部屋」(*)を立ち上げた中野直男氏は、二つの方向性を指摘する。「新幹線や西武鉄道の特急ラビューのような高速車両には、ステンレス車両では実現できない気密性をFSWで実現できるので向いています。もう一つ、地下鉄のように急勾配・急カーブが多く、駅間も短い路線では、加減速を繰り返すため軽さが有利となります」。加減速性能は柔軟なダイヤグラム運用にもつながるため、速達性の向上にも寄与しそうです。

※「鉄道車両の部屋」https://www.aluminum.or.jp/railway_vehicle/



質のよいリサイクルへ

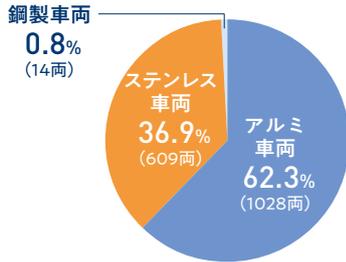
軽量であることが大きく貢献するため、アルミ車両の環境保全性は、鋼製車より確実に高く、少なくともステンレス車両にも引けをとらない。とはいえ「2050年カーボンニュートラル」に向け、より一層の進歩がアルミ車両に求められている。

今後、アルミ車両がさらに環境保全に貢献できるとすれば、それはリサイクルにおいてに違いない。なぜなら、アルミ合金のリサイクルは省エネルギー性に非常に優れているからだ。アルミ車両の耐用年数は50年と長く、これまでリサイクルされた車両は少ないが、これから多くのアルミ車両がリサイクル期を迎える。

アルミリサイクルの省エネルギー性は、「二から新地金を製造するとき必要エネルギーを100とすると、3で済む」と表される。これは主に、原料のボーキサイトから新地金を製造するとき、融点2000℃ほどの酸化アルミニウムに氷晶石を混ぜて融点降下を促し、約1000℃で溶融塩電解しなければならぬのに対し、リサイクルでは融点660℃ほどのアルミニウムをただ溶融すれば良いからだ。

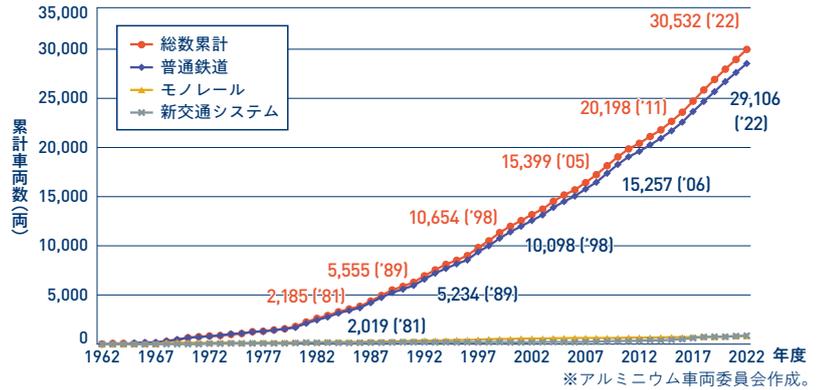
現状、新幹線を除けば、多くのアルミ車両がこれから廃車の時期を迎える。すでにアルミリサイクル車両の実例として、廃車時に生じたアルミ材の一部を再利用した東京メトロ東西線な

鉄道車両の生産両数における
アルミニウム車両の割合



※アルミニウム車両委員会がまとめた令和4年度アルミニウム合金製車両の生産実績と一般社団法人日本鉄道車輛工業会がまとめた令和4年度車両(電車および客車の完成車両)の生産実績を基に作成。

アルミニウム合金製車両生産実績(モノレール、新交通システムを含む)



どはあるが、まだ限定的だ。こうしたなか、「アルミ車両をリサイクルしてアルミ車両に」という「水平リサイクル」推進への動きがある。新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「動静脈一体車両リサイクルシステム」の実現による省エネ実証事業」で、早稲田大学や日本アルミニウム協会が中核となり、東京地下鉄などの鉄道事業者、鉄道車両メーカー、リサイクル事業者、アルミ車両メーカーなどが参画し、「アルミ車両の水平リサイクル推進委員会」を2016(平成28)年に発足させた。同委員会は「レーザー誘起ブレイクダウン分光法」(LIBS)によるアルミ合金選別の規格化などをはかってきた。数ある選別技術のなかでLIBSには多様な元素を分別できるなど、多くの利点がある。アルミ廃材を効率的に選別できれば、いったんすべて溶解してしまうという工程を避け、「A6005CならA6005C」「A7204ならA7204」といった具合に水平リサイクルができる。同委員会は、使命を終えた東京メトロ銀座線車両のアルミ片を用いるなどして試験をし、実証性を確認(※20頁右下写真)。2019(令和元)年6月、LIBS選別の規格書を発行した。日本アルミニウム協会参与で技術開発部長の森山勉氏は、「廃車の時期に差しかかった第1世代や第2世代には、多様な合金が混ざっています。選別し、水平リサイク

ルを実現するため、LIBSの活用が重要です」と話す。また、リサイクルの質や効率性を高める「モノアロイ化」の取り組みもある。モノアロイ化とは、同一車両に使われるアルミ合金の種類を統一化すること。これで選別の手間そのものが省ける。東京地下鉄は、1980年代から2000年代前半の「合金使用部位を考慮したアルミ車両の製造」の時代を経て、2000年代後半よりモノアロイ化を進めた。2006(平成18)年度に設計された有楽町線・副都心線1000系より使用合金をA6N01(現・A6005C)に統一している。以降、9000系5次車・15000系・16000系・10000系で同様のモノアロイ化を実現した。また、西武鉄道は、2008(平成20)年に運用開始した30000系電車A6N01(現・A6005C)によるモノアロイ化を実現。2017(平成29)年からの40000系でもモノアロイ化を実施している。

「第5世代」創出と技術への期待

アルミ車両「第4世代」の登場は1992(平成4)年。それから30余年。今後どのような革新をもって「第5世代」誕生となるのか。前出の中野氏はこう話す。「考えられる一つの方向性は、解析技術の進歩です。例えば、川崎重工業(現・川崎車両)の担当者は、台枠構造において部材同士を締結するリベットの配置を工夫することで周辺の応力を低減し、モノアロイ化を実現したと講演会で述べておられます。アルミ合金構体の材料をいかに使うかはこれから議論の対象となり、そこでは最適化解析の技術が鍵となるでしょう。そして、もう一つが資源循環や脱炭素に向けた前進です。アルミ車両の寿命はあまりに長いので、廃車のリサイクルを待っていてよいのかという議論が起るかもしれません。環境面ですらに貢献できる材料や構体を用いるようになったとき、「次の世代」といえる段階がくるのではないのでしょうか」長期的には「水平リサイクル」の先として「アップグレードリサイクル」を目指すべきとの考えがある。アルミ合金でいえば、アルミスクラップから、アルミ材や板材を再生することを指す。NEDOの2021~2025年度「アルミニウム素材高度資源循環システム構築事業」では、この種のリサイクルに向け、不純物元素低減技術の開発などが目標とされている。事業対象は鉄道のみではないが、アルミ合金のリサイクルに寄与できる分野に鉄道が入っているのは確かだ。「第何世代」と定めるのは未来の人たちかもしれない。だが、「次世代」について考えられるのは現在の人たちではない。アルミ車両はどう走っていくだろうか。