

# 車両用材料技術の変遷

森 久史  
材料技術研究部  
(主任研究員)

辻村 太郎  
同  
(主管研究員)



もり ひさし つじむら たるう

## はじめに

鉄道車両は様々な部品から構成されており、そのほとんどに金属材料が用いられています。近年、車両の軽量化を目的として、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を始めとした樹脂系複合材料などの使用も若干進められているようですが、未だ金属材料が多く使われています。

鉄道車両を大きく台車と車両構体 (いわゆる車体) とに分けて使用材料の動向を見てみましょう。台車は枠、車軸、ブレーキ部品、車輪などから構成されますが、そのほとんどは鉄鋼材料です。これらは、材料の種類にはほとんど変化はなく、主に部品形状あるいは構造の変更がなされてきています。一方、車両構体は、構造の変化と共に、木製から普通鋼、アルミニウム合金、ステンレス鋼、樹脂系複合材へと使用材料にも大きな変化が見られます。

これらの使用材料の変化は車体の強度や剛性などの構造検討とともに新しい材料の製造、加工、接合などの材料技術の発展があったためと考えられます。そこで、本稿では車両用、特に材料技術の進歩に伴って著しい変化が見られる車両構体に絞り、車両用材料技術の移り変わりを詳しく見ていくことにします。

## 鉄道車両用材料に必要な特性

鉄道車両では車体として所要の構造強度、剛性、振動特性が求められます。車体強度を得るためには素材に高い機械的性質 (引張強さ、0.2%耐力、縦弾性率、疲労特性、衝撃動的強度、衝撃破壊特性) が求められます。また、素材を様々な部品へと加工し、構造体とするための素材加工のしやすさ (押出加工、圧延加工、プレス加工など) や接合・溶接のしやすさ (アーク溶接、スポット溶接など) が必要になります。また、重要なこととしては鉄道車両は乗客の安全の観点から燃焼に対する抵抗性が高いことが必須となります。このような車両製造上から要求される特性の他、検査等でのメンテナンスの容易さ (補修や塗装のしやすさ)

やさびにくさ、近年の環境問題に対応するための素材のリサイクルのしやすさや分離のしやすさなどが求められます。

## 鉄道車両用材料の移り変わり

鉄道車両の移り変わりを材料の観点から眺めると、鉄道創業期からの木製車両時代、それに続く鋼 (普通鋼) 車両時代、アルミニウム合金・ステンレス鋼車両時代、そして樹脂系を取り入れた車両時代と分けることができます。わが国における鉄道開業当初の車両はイギリス製の木製客車でした (1872年)。その後、乗客の安全性を高めるために、木製車体を普通鋼製車体へと変える検討がはじまり (1923年)、実際に鋼製車両が製造されたのは1927年でした。さらに鉄製車両の軽量化が望まれるようになって、アルミニウム合金の車体への適用が検討されはじめ (1951年)、日本初のアルミニウム合金車体は山陽電鉄200系電車として製造されました (1962年)。本格的にアルミニウム合金車体が製造されたのは国鉄301形通勤型電車であり (1966年)、その後、新幹線電車などへのアルミニウム合金の適用が検討され、200系新幹線電車にアルミニウム合金が適用されました。表1にアルミニウム合金車両の主な移り変わりを示します。大まかな技術の移り変わりを「世代」として特徴づけられます。200系新幹線電車でのアルミニウム合金の適用は、鉄鋼材料の一部をアルミニウム合金に置き換えるというものでした。その後、アルミニウム合金の

表1 アルミニウム合金車両の主な移り変わり

世代	特徴
第一世代	普通鋼をアルミニウム合金 (A5083, A6061) に置き換えてリベット及びアーク溶接して製造
第二世代	高強度合金 (Al-Zn-Mg (7000系)) の開発と適用
第三世代	薄型押出型材や自動溶接技術、加工性合金 (Al-Mg-Si (6000系)) を適用した簡素化・部品点数削減 (シングルスキン車両)
第四世代	骨皮一体の中空押出型材の使用による骨組省略、最新の溶接技術を適用 (ダブルスキン車両)

表2 ステンレス鋼車両の主な移り変わり

世代	特徴
第一世代	外板のみをステンレス鋼に置換(スキステンレス車両)
第二世代	外板・骨・梁もステンレスに置換(セミステンレス車両)
第三世代	台枠の一部を除き全体をステンレス鋼に置換(オールステンレス車両)
第四世代	オールステンレス車両の部品点数の削減, 外板の平滑化, 外板・骨・車体外周の自動溶接化による製造精度向上(軽量ステンレス車両)

材料技術が進展し、現在では車体全体にアルミニウム合金を適用した「オールアルミニウム合金車両」が製造されています。表1には示してありませんが、現在ではさらに技術が発展して、蜂の巣状構造のアルミニウム合金をろう付けして作成されたハニカムパネルや3次元ルータ加工により部分的に削り出した素材(インテグラルスキン)の新幹線車両先頭車への適用やくぼみを設けた素材(ディンプルスキン)の床材への適用などもありました。

一方、ステンレス鋼を適用した車両は、アルミニウム合金車両と相前後して研究が進められ、日本で最初のステンレス車両(東急電鉄デハ5200形)が1952年に製造されて以降、ステンレス車両の軽量化が進められてきました。表2にはステンレス車両の移り変わりを示します。ステンレス車両においてもアルミニウム合金車両と同様に技術の発展を「世代」で区分されます。これまでステンレス鋼ではアーク溶接やスポット溶接による接合が行われてきていますが、近年、摩擦攪拌接合(FSW)による接合などの検討も行われています。

このような金属材料に関する技術開発が進められる一方で、1957年頃から複合材料を車体に適用する検討が開始されました。複合材料は航空機機体への適用が積極的に検討されている材料であることから、鉄道車両への適用についても考えられ、これまで材料及び、その航空機等への適用状況などが調査されCFRP製車体などが試作されてきました。複合材料は、かつて0系新幹線電車の光前頭(先頭車の最先端部)にFRPが使われていたことがありますが、最近ではE4系新幹線電車の先頭部構体や台車ふさぎ板などにCFRPが使われるなど、複合材料が使われる部分が増えてきています。現在、今後の車両への複合材料のさらなる適用が検討されているところです。

### 車両材料技術の移り変わり

鉄道車両用材料の変遷は、前に述べたように材料技術の変遷と密接に結びついていることが分かります。そして、使われる材料は構造設計とともに、要求特性、材料特性および製造技術のバランスを取りながら検討されているのが

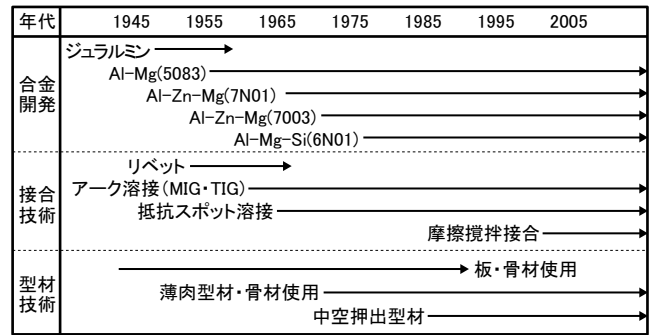


図1 車両用アルミニウム合金の材料技術の変遷

特徴です。次に、車体で使用されている材料とその移り変わりについて紹介します。

### 普通鋼

普通鋼は比較的強度が高く、各種の成形、加工、溶接、補修などが容易であり、価格も安いなどの利点があります。普通鋼は鉄に添加する炭素の量と熱処理と呼ばれる手法を制御することによって容易に強度等の特性が制御できるため、とても使いやすい材料です。古くは、一般構造用圧延鋼(SS)や冷間圧延鋼板(SPCC)、一般構造用軽量型材(SSC)が主に使われていましたが、後に普通鋼の高性能化により、高耐候性圧延鋼(SPA)や高張力鋼(SHT)などが採用されました。

普通鋼は圧延やプレスによって板や型材が容易に製造でき、溶接もアーク溶接などの一般的な技術が適用できるため、極めて汎用的な材料であると言えます。しかし、普通鋼の欠点は錆びやすい、すなわち耐食性が低いことにあり、必ず塗装が必要であることと、腐食を考慮して板厚を増加させるために軽量化が難しい点にあります。

### アルミニウム合金

アルミニウム合金は重さ(密度)が普通鋼の30%程度であり、比強度(強度を密度で除した値)が普通鋼に比べて大きいため、軽量化に対して有効な金属材料です。また、アルミニウム合金はアルミニウムに様々な元素を添加して熱処理することによって、様々な特性が得られるので、用途に応じて選択の可能性が大きい材料であると言えます。図1にアルミニウム合金の材料技術の変遷を示します。鉄道車両では、前述した要求特性を満たしながら材料の選定あるいは新しい合金種の開発が行われてきました。しかし、型材の加工や接合は普通鋼のように容易ではないため、材料特性に基づいて加工性あるいは接合性を調整することや新しい接合技術を開発するなど、アルミニウム合金を実用化するための様々な技術開発が行われてきました。例えば、当初は自動車で適用実績のある、加工性のよいA5083(Al-Mg系)合金やA6061(Al-Mg-Si系)合金が適用されてきました。A5083よりも強度を必要とし、A6061合金では溶接強度が低いことから、鉄道車両用としてAl-Zn-Mg系のA7N01やA7003が開発されました。これらの合金は熱処

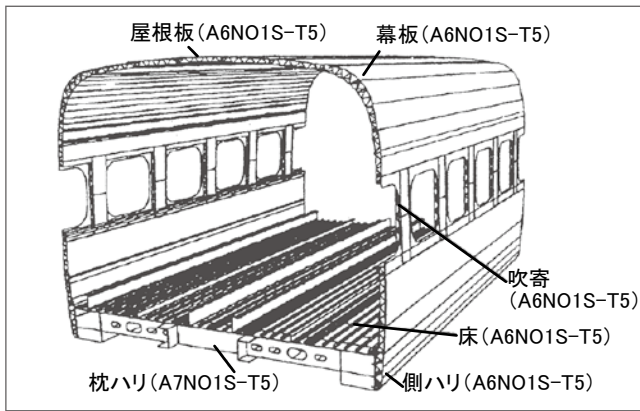


図2 新幹線電車(700系)の構体断面図および使用材料<sup>1)</sup>

理型で強度及び加工性に優れる材料であり、強度を要する部材への適用が行われました。しかし、A7N01やA7003は材料価格が高いことから、普通鋼との単純な置き換えは困難でした。そこで、大型押出材を作成して一体溶接することにより溶接点数と工作点数を削減することと耐食性を付与するために、比較的強度がありながらも大型薄肉型材への加工性があり、溶接性、耐食性にもバランスの取れたA6N01 (Al-Mg-Si系)が開発されました。この材料の代表的な使用例として、700系新幹線車両の構体断面を図2に示します。A6N01は現在の新幹線の車両構体の主要材料です。

アルミニウム合金での問題は板あるいは型材の溶接性にあります。アルミニウム合金の溶接は極めて難しく、従来のアーク溶接などは溶接時の熱の影響で強度が低下するなど、様々な問題がありました。そこで、溶接法、溶接条件などの改良がなされガス溶接やスポット溶接が適切な溶接手法として技術的に確立され、製造時の施工で使われています。また近年、FSWと呼ばれる、板材あるいは型材同士を摩擦熱で接合する方法が英国で開発されました。一般的なアーク溶接を使うと溶接部の金属組織が熱の影響により大きくなり強度が低下しますが、FSWでは図3に示すように接合部分の組織が極めて微細となって、接合部分の強度が逆に増加するという特徴があります。このためFSWはアルミニウム合金の接合手法として期待されており、一部の車両製造には取り入れられています。

### ステンレス鋼

ステンレス鋼は鉄鋼材料の一種ですが、鉄中に添加されたニッケルとクロムの元素が鋼表面に皮膜を作ることで錆あるいは汚れから保護されるという特徴を持っています。ステンレス鋼の比重は、普通鋼と同等であるため単なる置き換えでは軽量化は難しいですが、高い強度を有することや腐食による肉厚の増加をほとんど考えなくてよいことから、板厚を薄くすることにより軽量化できる利点があります。また、ステンレス鋼の耐食性を生かすことで、車両の外板への無塗装化、錆発生防止のためのメン

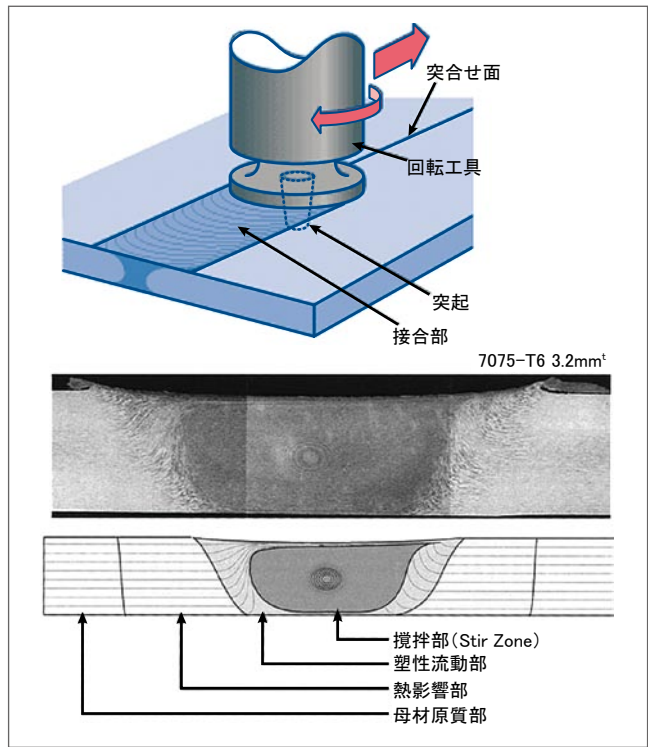


図3 摩擦攪拌接合の方法と接合部分の材料組織の状態

テナンスの省力化ができるところに特徴があります。ステンレス鋼の材料技術の変遷を図4に示します。ステンレス鋼は当初SUS304 (18Cr-8Ni) が用いられていましたが、高強度化、材料の薄肉化、型材等への加工性の要求からSUS301 (17Cr-7Ni) が開発されました。この鋼種の開発により、板材のプレス加工性が良好になることや山形、波形等の様々な形状の型材が製造できるようになり、車両全体にステンレス鋼を適用できるようになりました。しかし、SUS301では鋼中の炭素量が多いため耐食性が低下すること、溶接時に熱影響を受ける部分で腐食が生じること、製造コスト等を削減するためには溶接しやすくする必要がありますなどから改良が必要となりました。そこで、ステンレス鋼の添加元素を改良し、SUS301M (炭素量が0.08重量パーセント以下)、SUS301L (炭素量が0.03重量パーセント以下)が開発されました。SUS301Mは熱処理の方法によって、表3のように強度が調質できる特徴があり、さらに溶接性も改善されています。図5にオールステンレス車両の構体断面構造を示します。強度をあまり必要としない部材や内装にはSUS304を用い、骨材を中心とした高強度部分にはSUS301LやSUS301Mの調質材が用いられるという使い分けがなされています。

### 複合材料

複合材料とは、目的となる特性を得るために、各種材料の利点を組み合わせた材料です。鉄道車両では軽量化ならびに高強度化を目的として、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を適用することが有効であるとされています。

