

Techno Scope

電車としては日本初のステンレス鋼製車両である「東急電鉄デハ5201」

旅客ニーズに対応する ステンレス鋼製車両

鉄道車両は、古くは木製、鋼製の時代からステンレス鋼製、アルミ合金製、そして樹脂系材料を取り入れた車両の時代へと変化してきた。中でも軽量でメンテナンス性に優れたステンレス鋼製車両は、通勤・近郊型車両として広く利用されている。現在の鉄道車両の開発は、軽量化に加えて、経済性や乗り心地、環境負荷の軽減、外観のデザインなど、幅広いニーズに応えることが要求されている。今回は、我が国のステンレス鋼製車両の歴史とともに進歩してきた製造技術や材料を紹介する。

日本で発展した「インターアーバン」

都市と都市を結ぶ電気鉄道はインターアーバン(Interurban: 都市間電気鉄道)と呼ばれ、19世紀末の米国で急速に発展した都市間鉄道をこう呼んだのが始まりとされる。米国では第一次世界大戦後の自動車の普及によって、インターアーバンは衰退することになる。これに対して我が国では、通勤・近郊型の移動手段としてインターアーバンが独自の進化を遂げている。

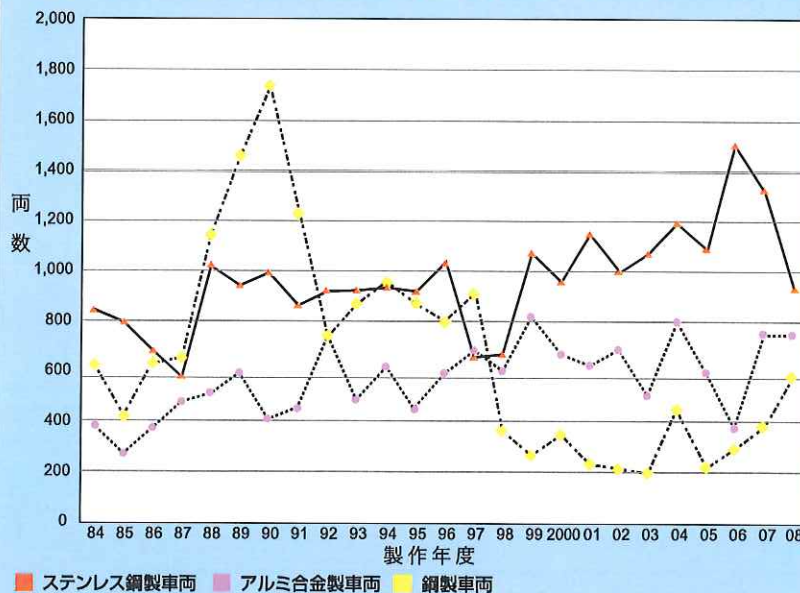
我が国のインターアーバンは、1905(明治38)年に開業した阪神電気鉄道の大阪(出入橋)～神戸(三宮)間が最初とされている。電車には大量輸送を可能にするボギー車が採用された。ボギー車は、車体に対して水平方向に回転可能な台車を持つ車両をいい、車体長を大型化しても曲線通過に支障がないため、車両の大型化が可能である。現在のほとんどの電車にはボギー台車が採用されている。

当時の電車の多くは木製であったが、大型のボギー車になり、運転速度も高速度化してくると、

木製では強度が不足であった。そこで加工の容易な鋼板を用いた鋼製車両が開発されることになる。最初の鋼製車両は1923(大正12)年に川崎造船所が製作した神戸市電200型であった。溶接技術が発達していなかったため、接合にはリベットが用いられた。

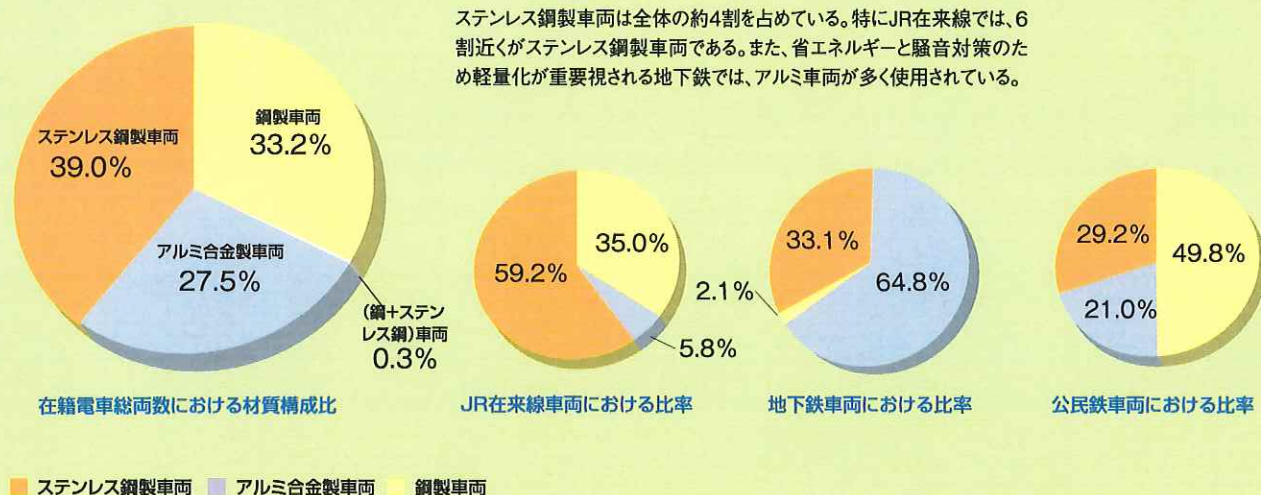
■ 構体の材質別生産両数推移

年毎の増減はあるものの、普通鋼は概ね減少、アルミ合金は微増、ステンレス鋼は増加傾向にある。



(資料提供: (社)日本鉄道車輛工業会)

■在籍電車の材料構成



(資料提供：(社)日本鉄道車輛工業会)

その後、鉄道需要の高まりとともにスピードアップ、経済性向上のニーズが強まり、車体の軽量化が求められるようになった。軽量化に応える技術革新は2つあり、一つはモノコック構造の採用であり、もう一つはステンレス鋼やアルミ合金などの軽量化材料の採用である。

近郊・通勤電車で広く利用されるステンレス鋼製車両

現在、在籍している電車の車両は普通鋼、ステンレス鋼、アルミ合金のいずれかが使用されている。材質の使用割合は鉄道の種類によって傾向が異なり、JR在来線車両ではステンレス鋼製車両が6割近いのに対し、地下鉄ではアルミ合金、公民鉄車両では普通鋼製車両が多くなっている。ステンレス鋼製車両は、JRや私鉄各線の近郊車両を中心として、幅広く利用されており、生産量数も増加傾向にある。

ステンレス鋼製車両の増加理由として、ステンレス鋼の優れた耐食性を挙げることができる。ステンレス鋼製車両では、車両のメンテナンスの際に鋼製車両では必要な腐食部分の修理と塗装作業が不要になる。メンテナンス作業が簡略化されることによって、工場への入場期間を短縮することができる。また、予備車両の保有台数削減によるランニングコストの削減効果も期待できる。

さらにステンレス鋼製車両では、設計の際に腐食代を見込まなくてよい分だけ肉厚を薄くできるので、車両の軽量化が可能になる。車体の軽量化にはアルミ合金の使用も有効であるが、比較的安価なステンレス鋼が近郊・通勤電車で多く利用されている。

時代とともに進化してきたステンレス鋼製車両

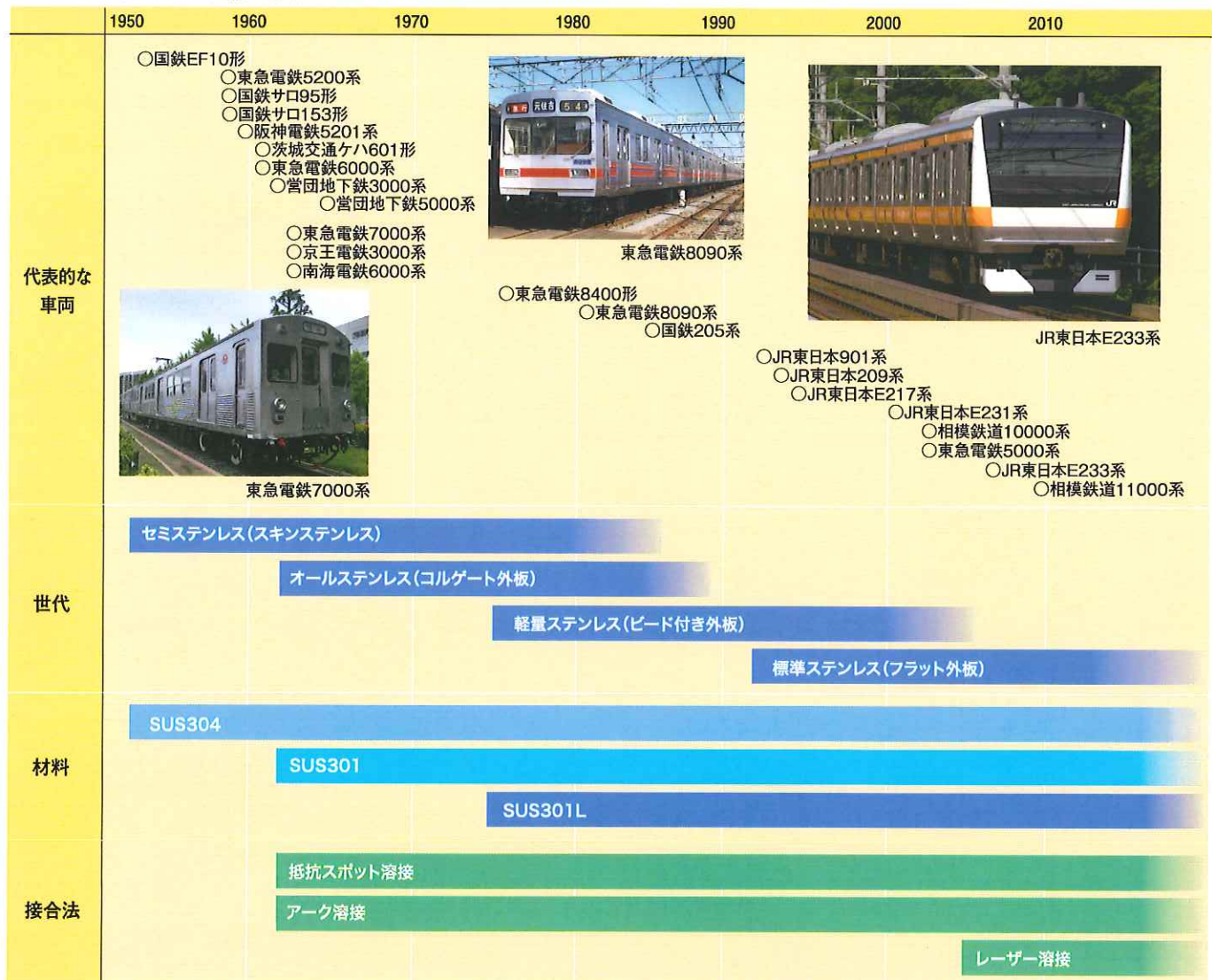
鉄道車両は、車輪、ブレーキ、電動機などが組み込まれた台車と、台車に支えられる箱形の車体から構成される。車体から内装や電気品などを取り除いた構造体の部分を構体と呼ぶ。構体は、床になる「台枠」、それぞれ2組の乗客が乗り降りする面の「側」と進行方向の前後側の「妻」、「屋根」の6つのブロックから構成される。台枠は他の5つのブロックの他、床下に取り付けられた機器など、車体にかかるすべての重量を支える。車体の荷重は、車体と台車を結合する丈夫な「枕はり」に集約され、台車に伝えられる。中間車の妻には貫通路、先頭車の妻には運転台が設けられる。また、屋根板は垂木と桁で支えられ、空調機器やパンタグラフの重量に耐えることができる構造になっている。

なお、本稿では便宜的にステンレス鋼製車両を4つの世代に分類する。すなわち、外板のみにステンレス鋼を使用したセミステンレス鋼製車両世代（またはスキステンレス車両）、台枠の一部を除き全体にステンレス鋼を使用したオールステンレス鋼製車両世代、車両を軽量化した軽量ステンレス鋼製車両世代、いっそうの軽量化を実現した標準ステンレス鋼製車両世代の4つである。

我が国で最初のステンレス鋼製車両は、関門トンネルを通過する5両の国鉄EF10形電気機関車で、1953年に外板をステンレス鋼に改造されている。

新造のステンレス鋼製車両の電車は、1958年に製造された東急電鉄5200系電車が最初であった。試作車としては、国鉄サロ95形電車、国鉄サロ153形電車や阪神電鉄5201系電車が製造された。これらはステンレス鋼外板のメリットを確認するため

ステンレス鋼製車両の技術の推移



(社)日本鉄道車輛工業会、東急車輛製造(株)、(財)鉄道総合技術研究所の資料を元に作成
(写真提供:東急車輛製造(株)、東京急行電鉄(株)、東日本旅客鉄道(株))

に製造されたもので、塗装が不要である点と腐食代が不要である分軽量化が可能である点が実証された。その後、1960年に量産型の東急電鉄6000系電車などが製造されたものの、本格的な普及には至らなかった。外板のみにステンレス鋼を使用したセミステンレス鋼製車両では、軽量化や耐候性の要求を満足できなかったためである。

オールステンレス鋼製車両の登場と軽量化の実現

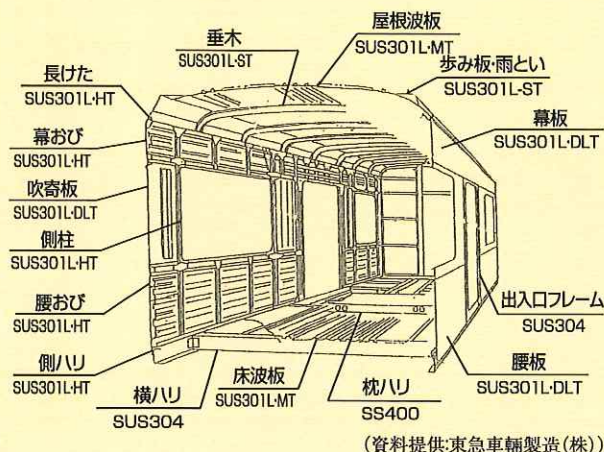
骨組みや主要な構造部分にステンレス鋼を使用した最初のオールステンレス鋼製車両は、1962年に東急車輛製造が製造した東急電鉄7000系電車であった。これは当時、ステンレス鋼の加工法と溶接法、構造設計技術などステンレス鋼製車両の製造技術で世界をリードしていた米国バッド社との技術提携により実現したものである。オールステンレス鋼製車両の外観上の特徴は、外板に使用した波状のコルゲート板である。設計に際し

ては、当時のフィラデルフィアの地下鉄をモデルにしたという。溶接にはステンレス鋼への熱影響を抑えたスポット溶接が用いられた。骨組みに高強度の材料を使用することで軽量化を実現し、鋼製車体と比較して約20%の軽量化が可能になった。また、バッド社が開発した台車を採用することで、台車の軽量化も実現している。

東急電鉄7000系電車に続き、京王3000系電車、南海6000系電車、国鉄キハ35形電車などでオールステンレス鋼製車両が採用された。しかし、ほぼ同時期の車両と1両あたりの重量を比較すると、普通鋼製車両が約10t、オールステンレス鋼製車両が約8t、アルミ合金製車両が約5t強であり、ステンレス鋼製車両にはいっそうの軽量化が求められていた。

軽量化の要求は昭和40年代のオイルショックによりさらに強まることになったが、大型コンピュータを利用した立体構造解析手法を駆使することによって、腐食代を最小限に見積もり、素材の強度を活かした設計が可能になったのである。1978年には軽量ステンレス鋼製車両の東急電鉄8400形電車が登場する。

■最近のステンレス鋼製車両(JR東日本E233系)の構造と材料(例)



フラット外板のステンレス鋼製車両の例 (資料提供: 東日本旅客鉄道(株))

材料面では溶接時の熱影響を抑えるためにステンレス鋼の炭素含有量を低減したり、圧延技術の改良による精度向上などによって、精緻な設計の実現を支えた。また、従来まで使用していたコルゲート板に代わり、ビードプレス材を使用したことで、外観のイメージも大きく変わった。これによって、1980年には量産を続けていた東急電鉄8000系電車の軽量化タイプである東急電鉄8090系電車が生まれた。この車両はオールステンレス鋼製車両と比較して1両あたり1~1.5tの軽量化の実現に成功している。

1984年には、国鉄初の軽量ステンレス鋼製車両として、205系が正式採用された。201系と比較して1両あたり5~6tの軽量化を実現した205系は、翌1985年より山手線に投入されている。この205系の開発は、国鉄と各車両製造会社が協力して進められた。これによって、軽量ステンレス鋼製車両の製造ノウハウが各車両製造会社に広まることになり、ステンレス鋼製車両の普及につながっていくのである。

ちなみに、現在のステンレス鋼製車両には、骨組みなどの強度部材にSUS301Lハード材が使用されている。当初は、SUS304が用いられていたが、高強度による薄肉化と高い加工性が求められた結果、SUS301が開発された。さらにSUS301を改善し、溶接部耐食性や強度に優れたSUS301Lが開発されている。これらの材料は、強度が必要な部分には車両専用規格として規格が厳しく、板厚交差も厳格なSUS301Lハード材を使

デザインの自由度を広げる FRP 先頭車両

ステンレス鋼は耐食性が高い一方で、冷間加工が難しいという一面がある。そのためステンレス鋼製車両では、鉄道会社の「顔」でもある電車の前面形状やデザインが単調になりがちであった。

そこで最近では、成形が容易で強度のあるFRPが電車前面の材料として用いられるようになってきている。最初にFRPを用いたのは京王3000系電車であった。加工性の良いFRPを用いてステンレス鋼の欠点を補う構造は「ハイブリッド構造」と呼ばれている。



日本で初めて車両前面にFRPを採用した京王3000系電車 (資料提供: 京王電鉄(株))

用し、高い強度が求められない部分にはSUS304を用いるなどの、使い分けが行われている。

重量、価格、寿命を2分の1にする

ステンレス鋼製車両の普及にともない、コスト低減のニーズも高まりを見せていた。1987年に国鉄から分割民営化されたJR東日本では、通勤通学用の103系電車の後継車両として「重量半分、価格半分、寿命半分」をコンセプトにした新型車両の開発に着手した。重量半分、つまり車両の軽量化を進めることによって、省エネルギー、騒音の低減、線路保守のコスト低減などを狙った。また、車体構造に量産に適した設計を採用し、材料にも汎用ステンレス鋼のSUS304を使用するなどして、製造コストの削減を実現している。寿命を半分にする、というのは意外なコンセプトに感じられる。従来、車両のオーバーホールは3~6年で行われていたが、これを非解体で13年間(200万km)運用することを目的として開発が進められた。なお、鉄道車両の減価償却期間は13年である。

このようにして開発が進められた901系電車は1992年に試作車が完成し、1993年には量産型の209系電車が製造され、京浜東北線などに投入された。この901系電車が現在も運用され

乗務員と乗客を守る衝撃吸収構造

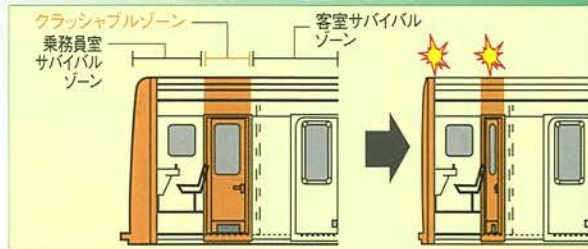
元々日本の鉄道システムは、衝突事故が起こることを想定せずに設計されてきた。しかし、近郊型の電車は踏切が多い区間を高速で運転していることと、自動車の大型化によって、踏切事故が発生した場合には、重大事故となる危険性がある。そのため、近郊形電車には自動車にも用いられている「衝撃吸収構造」が採用されている。

現在、E231系電車などに採用されている衝撃吸収構造は、乗務員室サバイバルゾーンと客室サバイバルゾーンがクラッシュブルゾーンを挟んだ形になっているが、より効果的に衝撃を吸収できる構造も研究されている。これはクラッシュブルゾーンを車両の前面に配置し、運転士座席を前面強化フレームに固定した強化高床ごとサバイバルゾーンに移動させるというものである。

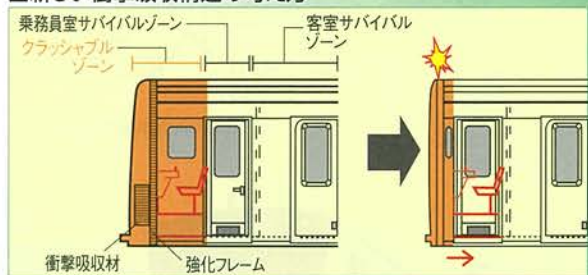
また、衝突シミュレーションの活用によって、屋根構体の部材に切欠きを設けることによって、より効果的に衝撃を吸収できることがわかっている。

(資料提供:東日本旅客鉄道(株))

■E231系近郊形の衝撃吸収構造の考え方



■新しい衝撃吸収構造の考え方



(JR East Technical Review No.3「衝突シミュレーションを活用した車両の安全確保対策に関する研究」を元に作成)

る標準ステンレス鋼製車両の基礎となっている。

より安全で、より快適なステンレス鋼製車両を目指す

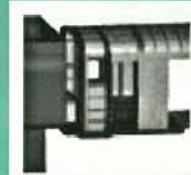
901系電車を基礎とする標準ステンレス鋼製車両は新系列車両と呼ばれ、公民鉄にも採用されており、E231系電車をベースとした相模鉄道10000系や東急電鉄5000系シリーズなどが投入されている。

また、量産車である209系電車はいっそうのライフサイクルコストの低減とサービス向上を実現するために改良が加えられ、E217系電車、E231系電車などが開発されていく。E231系電車の後継であるE233系電車は、故障に強い車両、人に優しい車両、情報案内や車両性能の向上、車体強度の向上を基本コンセプトとして開発されている。

特に車体強度では、例えば、側面からの衝撃に対して、側構体と屋根構体の柱の位置を合わせることによって、強度向上が図られている。また、前面衝突に対しては、衝撃吸収構造が採用されており、衝突時に「クラッシュブルゾーン」と呼ばれる部分が変形する

■衝突シミュレーション結果

クラッシュブルゾーンがうまくつぶれることにより、衝突エネルギーが吸収される。



【衝突前】



〈改良前〉

〈改良後〉

【衝突後】

(JR East Technical Review No.3「衝突シミュレーションを活用した車両の安全確保対策に関する研究」より転載)

ことによって、乗員のための空間である「サバイバルゾーン」を確保する。さらに、運転台の高さを高くするなどの工夫も施されている。衝撃吸収構造では最前部に衝撃吸収用アルミハニカムが用いられており、これは、1994年に開発されたE217系電車から採用された。

最新型のE233系電車には、ユニバーサルデザインやバリアフリーが採用され、液晶パネルを使用して車内案内が行われるなど、乗客へのサービスについても充実がはかられている。

鉄道の海外輸出では新幹線やリニアモーターカーが話題になることが多い。しかし、日本製のステンレス鋼製車両は新造車両、中古車両ともすでに海外に多く輸出されている。メンテナンス性に優れ、高い信頼性を実現している我が国のステンレス鋼製車両はいっそうの安全と快適さを実現するために、これからも進化を続けて行く。

●取材協力 (社)日本鉄道車輛工業会、東急車輛製造(株)
●文 杉山 香里 (文中敬称略)