

第53回

鉄道車両用構体の材料と構造

はじめに¹⁾

鉄道車両の車体は大きく分けて「構体」、「内装」、「ぎ装（電気機器など）」から成り、「構体」は車体全体の強度を担う基本構造部分です。

日本で鉄道が開業してから140年余りが経ちましたが、軽量化、部品点数の低減、溶接の単純化と信頼性向上などの要求とも相まって、構体の材料および構造が時代とともに進化を遂げてきました。

ここでは構体の材料と構造の変遷について概説するとともに、今後の展望を紹介します。

材料の変遷¹⁾²⁾³⁾

日本における鉄道は1872年10月14日、新橋－横浜間で開業しました。開業当時の客車は車体長が約5mであり、現在の一般的な通勤型車両（約20m）と比較するとかなり小型でした。さら

に、車体のほとんどが木製であり、現在とは大きさや使用される材料が大きく異なっていました。

開業後、輸送力増強の要求が高まり、列車編成長の増大や客車の大型化、速度向上が図られました。しかし、1926年に発生した山陽本線特急列車脱線事故で、木製車体が大破し、死者34名の甚大な被害が発生しました（図1）。この事故をきっかけに、木製車体の強度や衝突安全性が見直されることになり、車体の鋼製化が促進されました。しかし、当時の製造技術では全てを鋼製に置き換えることは難しく、主要部材や外板などが鋼製となりましたが、屋根や内装は木製のままでした。このような構造は後に登場する全鋼製車体と区別するため、半鋼製車体と呼ばれ、広く普及するようになりました（図2）。この頃、車体強度を担う鋼製の基本構造は「鋼体」と呼ばれており、「構体」という言葉が使われるようになったのはアルミニウム合金が車体の

材料に採用されてからだと言われています。1950年代頃から、溶接技術の発展とともに、全鋼製車体が製作されることとなりました。

また、アルミニウム合金の適用の検討は古く、1930年代には車体全体をアルミニウム合金とした試作車両が登場しました。1946年には、航空機用材料を外板に使用した、ジュラルミン製車両が製造され、本格的な適用は、1962年に登場した山陽電鉄2000系電車で始まり（図3）。軽量かつリサイクル性に優れているため、私鉄や新幹線電車で広く普及し、現在では新幹線構体の主要材料となりました。

また、ステンレス鋼は普通鋼に比べ腐食しにくいことから、腐食防止の塗装が省略でき、メンテナンス性に優れています。そこで、ステンレス鋼を使用した構体の開発が進められ、1958年には外板にこれを適用した東急電鉄5200系電車が登場しました（図4）。その後、高抗張力ステンレス鋼（SUS301）



図1 山陽本線特急列車脱線事故

出典：鉄道大臣官房研究所業務研究資料, Vol.17, No.10, 1929

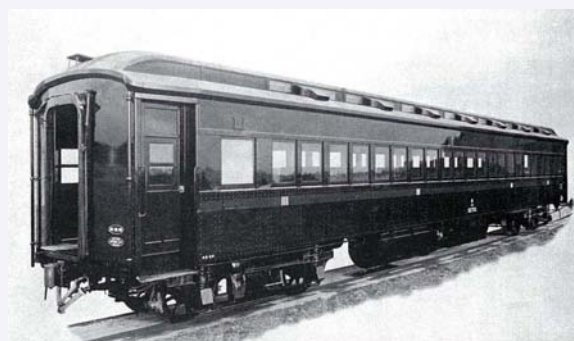


図2 半鋼製車両（スハ32600形）

出典：日本の客車編さん委員会 編, 日本の客車, 電気車研究会, 2010



図3 山陽電鉄2000系電車

出典：By T.Shima [CC BY-SA 3.0], via Wikimedia Commons



図4 東急電鉄5200系電車

出典：By Hahifuheho [CC0], via Wikimedia Commons

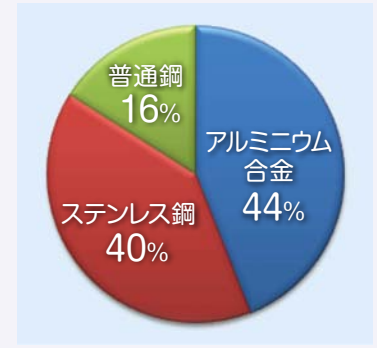


図5 鉄道車両の構体材料別の生産実績 (2014年度)

データ提供：日本鉄道車輛工業会

と溶接技術の開発により、構体のほとんどをステンレス鋼に置き換えた車両が東急電鉄7000系として1962年に完成しました。

図5に2014年度における鉄道車両の生産実績を構体の材料別に分類した結果を示します。普通鋼製構体は全体の16%となっており、車体に

用いられる主要材料がアルミニウム合金やステンレス鋼へ移り変わっていることがわかります。

また、複合材料の車体への適用もなされています。現在、GFRP (ガラス繊維強化プラスチック) がステンレス鋼製車両の前面部に、CFRP (炭素繊維強化プラスチック) が一部の新幹線電車の先頭部に使われており、複合材料が使われる部分が広がってきています。製造コストやメンテナンス、耐火性などの問題はありますが、今後の車両へのさらなる適用が検討されているところです。

アルミニウム合金製車両構体⁴⁾⁵⁾

普通鋼と比較した場合、アルミニウム合金は重さ (密度) が1/3程度であり非常に軽い材料です。さらに、比強度 (強度を密度で割った値) が大きく、軽量化に適しています。しかし、形材の加工や接合は普通鋼に比べて容易で

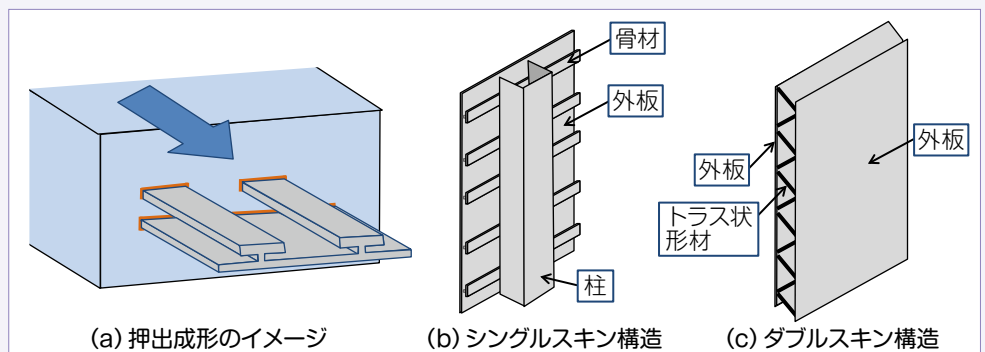


図6 アルミ押出形材構体構造

はなく、製造加工費が高いという問題がありました。そのため、部品点数の削減や接合作業の効率化が重要な課題でした。そこで、押出性と溶接性の良好な合金と大型押出プレス機の開発が推進され、骨材と外板を一体化した押出成形が可能となり、部品点数や溶接箇所削減が実現しました。押出成形とは図6 (a) に示すようにところてんのように材料を押し出し、所定の断面形状に成形する方法です。この構造は、後にシングルスキン構造と呼ばれるようになりました (図6 (b))。

1985年頃になると押出技術の進歩により、大型の中空形材の押し出しが可能となり、ダブルスキン構造と呼ばれるトラス状の形材が成形されるようになりました (図6 (c))。この構造は、外板2枚とトラス状形材が一体化しているため、シングルスキン構造よりも質量が重くなる傾向にありますが、高剛性であることから骨組みが廃止でき、構造を単純化できます。そのため、溶

接の工数を削減できるほか、室内空間を広く確保できるなどのメリットがあり、新幹線電車や特急車両を中心に採用されています。

また、アルミニウム合金の溶接は容易ではなく、溶接時の入熱で強度が低下するなどさまざまな問題があります。そこで近年、FSW (Friction Stir Welding) と呼ばれる、摩擦熱で接合する方法が開発されました。FSWでは接合部分の組織が微細となり、従来溶接と比べ接合部分の強度低下が小さい特徴があり、一部の車両製造ですでに適用されています。

ステンレス鋼製車両構体⁴⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾

鉄は時間とともに酸化して腐食するため、普通鋼製構体ではあらかじめ腐食による強度低下を考慮して厚めに各部材の板厚を選定しなければなりません。しかし、ステンレス鋼は、普通鋼製構体と比較して腐食しに

くいことから、強度上必要最小限まで板厚を薄くすることが可能です。そこで、1970年代半ばから、数値解析を活用した各部の設計が積極的に行われ、より薄い材料による構体構成を可能にしました。このような車両は「軽量ステンレス車両」と呼ばれるようになりました。軽量ステンレス車両の205系(図7)では普通鋼製車両の201系と比較し、構体質量で約3tの軽量化を実現しました。

ステンレス鋼は普通鋼に比べて熱伝導率が低いいため、連続的に溶接を行うと、熱が溜まって変形を起こしやすいという難点があります。したがって、構体の組み立てには入熱が少ない抵抗スポット溶接がよく用いられています。抵抗スポット溶接とは溶接したい金属に力を加えながら電流を流して、ジュール熱で金属を溶かし接合する方法で、ステンレス鋼のような電気抵抗が比較的高い金属の接合に適していま

す(図8)。また、熱変形が接合部付近に限定されるため、構体の組み立て時に、ゆがみが生じにくいのが特徴です。しかし、溶接箇所は非常に多いため、外板のゆがみを完全に無くすことはできません。そのため、外板の断面が波型(コルゲート)になるように加工し、外板の剛性を増す工夫をしていました。

近年では、レーザービームを熱源にしたレーザー溶接が登場しました。加熱範囲を微小なエリアに抑えることができるのでゆがみが小さく、溶接速度が速いのが特徴です。さらに、車体表面に溶接痕が残らないため美観の向上にも貢献しており、今後、さらなる適用が予想されます。

構体構造の変遷¹⁾⁹⁾

構体は台車により長手方向に2か所で支持されており、その間隔が広いという特徴を持っています。そのため、

乗客や搭載されている機器類の重さに対してたわみにくくすること、いわゆる「曲げ剛性」を重視した設計が必要です。木製車体は台枠と呼ばれる底面の部分で荷重の大部分を負担していたため、図9に示すトラス棒と呼ばれる部材の採用や中央に向かって膨らみをもたせた形状(魚腹型)にするなどして曲げ剛性の向上を図っていました。その後、半鋼製車体を経て、全鋼製車体が登場しましたが、基本的な構造は変わらなかったため、木製部分を鋼製に置き換えたことによる質量増加が問題となりました。

そこで、1953年、国鉄では「車両の軽量化」を重要技術課題に取り上げ、1955年に軽量客車のナハ10形を試作しました(図10)。この車両の構体は普通鋼製ですが、従来と発想を変えて、航空機で採用されていた張殻構造の考え方を取り入れて軽量化を図っています。この構造は台枠だけでなく、側面や屋根



図7 軽量ステンレス車両205系
出典：By JobanLineE531 [CC BY-SA 4.0], via Wikimedia Commons

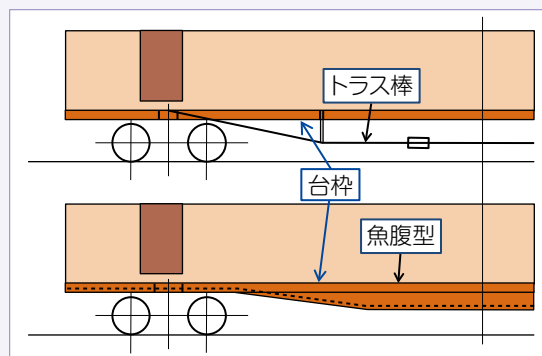


図9 初期の台枠構造

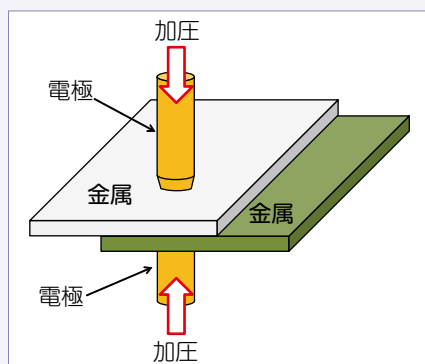


図8 抵抗スポット溶接

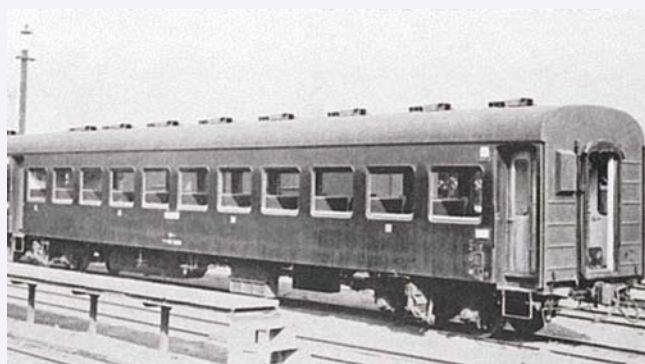


図10 ナハ10形(試作車)

出典：日本の客車編さん委員会 編、日本の客車、電気車研究会、2010

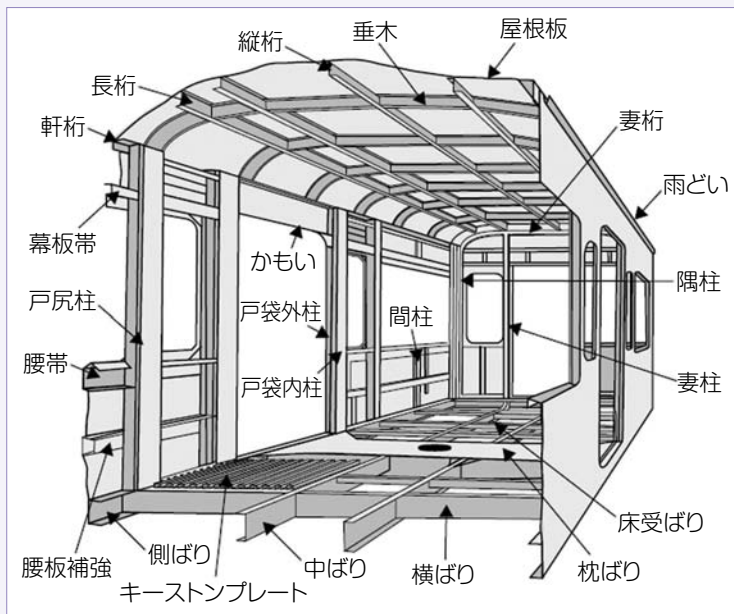


図11 張殻構造を採用した普通鋼製構体の一例
出典：RRR, vol.61, No.10, 2004

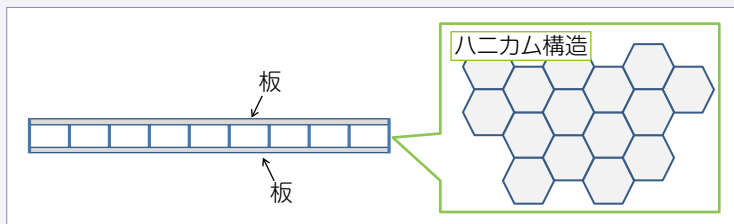


図12 アルミハニカムパネル

が一体となって曲げ剛性を担う構造となっており、従来形式に比べ、車体の質量を30%近く低減することとなりました。参考までに張殻構造を採用している普通鋼製構体の一例を図11に示します。その後、次々と製作される電車、気動車、客車に張殻構造が採用され、軽量化に貢献しました。

1980年以降、アルミニウム合金の材料開発と押出技術の向上により、前述の外板と骨組みを一体化したダブルスキン構造を採用した車両が登場しました。製造工程の簡素化、製造コストの低減が可能となっただけでなく、中空部分を有している二層構造のため、遮音性が高く、車内快適性の向上にも貢献しました。さらに、700系新幹線ではその構造を活かし、中空部分に制振材を挿入してさらなる遮音性能の向

上を図っています。また、500系新幹線では、軽量化のために、ハチの巣状の構造(ハニカム構造)を2枚の板で挟んだアルミハニカムパネルが使用されました(図12)。

最近では、内装品取り付けを目的にした補助的部材を活用することで剛性を向上させる構造や衝突事故時の人的被害を軽減するための衝撃吸収構造を採用している車両もあります。車体構造は剛性や強度を確保しながら、軽量化、快適性、衝突安全性などさまざまなニーズに応えるべく日々研究が進められています。

今後の展望⁵⁾¹⁰⁾

ここでは鉄道車両の構体の材料、構造の変遷を見てきました。新しい構造

の登場の裏には新しい合金などの材料開発があり、新しい構体の開発のためには、相互の発展は不可欠です。最近では車両のさらなる軽量化について、アルミニウム合金より軽い、難燃性マグネシウム合金の適用が検討されています。しかし、難燃性マグネシウム合金単体の使用では剛性が低下します。そのため、CFRPや難燃性マグネシウム合金、アルミニウム合金などの異種材料を効果的に配置した構造案が示されており、異種材料を高強度で接合する技術が求められています。

鉄道車両用の構体に求められる要求特性は高く、新しい材料や構造を実用化するには多くの課題を解決しなければなりません。新しい構体の実現に向け、一翼を担えるよう今後も研究開発を進めていきます。

(佐藤裕之/車両構造技術研究部
車両強度研究室)

文献

- 1) 服部守成：鉄道車両用構体の変遷 速度向上と構体材質の進歩, 金属, Vol.70, No.2, pp.51-62, 2000
- 2) 宇治田寧：機械・構造物の強度設計と事例(2) 鉄道車体, 材料, Vol.59, No.7, pp.575-582, 2010
- 3) 石塚寿彦, 種田勝治：車両構体の軽量化の方策—軽合金製車両—, 車両技術, Vol.182, pp.29-38, 1988
- 4) 大西剛司：より強く、より軽い構体を探求する, 近畿車輛技報, Vol.12, pp.6-7, 2005
- 5) 森久史, 辻村太郎：車両用材料技術の変遷, RRR, Vol.67, No.3, pp.8-11, 2010
- 6) 金井博史：車両技術の動向, 鉄道工場, Vol.34, No.7, pp.20-23, 1983
- 7) 平嶋利行：鉄道車両におけるレーザー溶接技術, WE-COM マガジン, Vol.10, 2013
- 8) 木村耕：ジュニアのハイテク・メカ・スクール, 鉄道ジャーナル, Vol.21, No.9, pp.67-73, 1987
- 9) 野元浩：車体構造の変遷と軽量化技術, JR EAST R & D REPORT, No.8, pp.3-5, 2002
- 10) 内閣府：総合科学技術会議評価専門調査会「革新的新構造材料等技術開発」評価検討会(第2回)資料, 2012