

鉄道車両の高速化と新材料

鈴木 康文*

Yasufumi SUZUKI

New Materials for High Speed Railway Vehicle

1 はじめに

鉄道が自動車や航空機等の輸送機関に対して競争力を高めるためには利便性、快適性の向上そして、高速化を図ることが重要となる。最近JR各社で鉄道の高速度の試みが盛んに行われ、新幹線の試験の最高速度記録も次々に塗りかえられており、1992年9月現在で、350km/hを超えるまでになっている。ちなみに、世界最高の速度記録はフランスTGVの1990年に達成した515.3km/hである。鉄道利用者にとっては、いかに速く目的地に到着するかが重要であり、そのためには最高速度の向上だけではなく、曲線の速度向上、分岐器の通過速度向上等の課題解決も必要となる。

車両の高速化において軽量化は研究開発の中でも重要なテーマの一つである。本稿では、車両の軽量化の必要性、最近のその取組状況、特に新材料の適用による軽量化の試み、今後の方向等について概説する。ここに、新材料の概念は、いわゆる一般にいわれる新材料そのものではなく、多分に鉄道車両にとっての新しい材料という意味あいになっている。

2 車両の軽量化の必要性

車両の軽量化の例として、図1に営業最高速度270km/hのJR東海の300系新幹線電車「のぞみ」と従来の100系新幹線電車（2階建て車両が組み込まれている比較的新しい東海道山陽新幹線電車）との質量比較を示す¹⁾。車両の各部の軽量化が進められ、全体で約25%の軽量化となっている。

高速化のための軽量化の傾向は海外でもみられ、ドイツのICEはアルミ車体を採用し、フランスのTGVも2階建て車はアルミ製となっている。

軽量化の必要性は次のように考えられる。

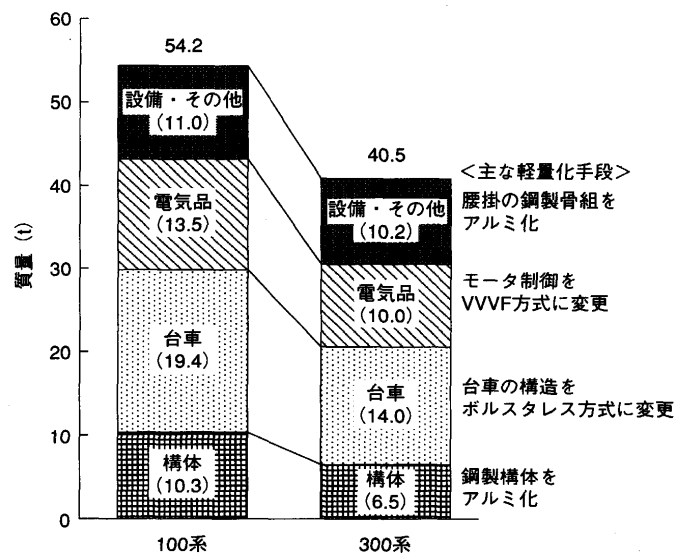


図1 新幹線電車の質量比較

(1) 軌道構造の建設費、軌道保守費の低減

車両重量がレール、枕木、バラストなど軌道構造に与える影響は大きく、車両の軽量化はこれら構造を簡略化でき建設費を低減できる。また、高速化により一般に軌道狂いが起きやすくなるが、車両の軽量化は軌道への負荷を軽減でき、またレール摩耗も少なくでき軌道保守を軽減することができる。特に軌道狂いを抑制する点からは、ばね下質量の軽量化が重要である。ここに、ばね下質量とはレールと接し、レールへの衝撃力に直接寄与する部分の質量であり、車輪、車軸、軸受、軸箱、歯車などの合計質量である。

(2) 省エネ

列車の抵抗（惰行時の走行抵抗、加速抵抗、勾配抵抗、曲線抵抗）は一般に列車重量に比例する。車両の軽量化は、加速、減速の頻度の高い通勤電車や、勾配や曲線の多い在来線では動力費の軽減に大きく寄与する。ただし、新幹線

のような高速車両では、走行抵抗には車両重量より空気抵抗の方が大きく影響を及ぼす。

加速に要するエネルギーが小さいことは、減速のためのブレーキの容量を小さくできることとなり、軽量化の点で相乗効果をもたらす。

(3)環境保全（地盤振動低減）

速度向上により地盤振動は一般に増加するが、車両の軽量化はその増加を抑制することができる。

(4)走行性能の向上

台車の軽量化は、振動乗り心地の向上の点で有利である。台車の部品のうち、特にばね下質量の軽量化は高速走行時のレールへの衝撃荷重の増大を抑制する上で重要である。

(5)電力設備・電車線設備費の低減

速度向上や列車本数の増加は変電所などの電力設備、トロリー線などの電車線設備の増強を一般には必要とするが、車両の軽量化により、設備増強を抑制することができる。

制御装置の集約化などが行われている。

(2)構造の変更，小型化，薄肉化

例えば、台車の枕はり省略(ボルスタレス台車)、端ばり省略といった構造の変更、車体の小断面化、強度に余裕のある部材の薄肉化などが行われている。

(3)材料の変更

おおまかに鉄系材料、アルミニウム合金、複合材という順序で多くの部品の材料が置き換えられている。複合材は1次構造部材（台車枠、車軸、構体等）を除く部分で既に適用されている。新材料の適用にあたっては、コスト、耐久性、耐候性、難燃性などの面の検討が必要である。

新材料の中で特に有機材料の適用にあたっては、難燃性が問題となることが多い。鉄道車両材料の難燃性については、運輸省「普通鉄道構造規則」等により規定されている。難燃性の主旨は、屋根（「特殊鉄道構造規則」では不燃性）、床板は金属性であること、外板、天井、内張およびそれらの表面は不燃性の材料であることなどで、構成体全体の機能というより材料そのものの特性を規定するものである。

4 車面に使用されている材料の現状

図2に100系新幹線電車の主な部品の材料を示す。

3 軽量化の進め方

車両の軽量化は次のような考え方で進められている。

(1)システム変更，集約化

例えば、システム変更では動力制御方式を抵抗制御・直流モータ駆動方式からVVVF制御・交流回生・交流モータ駆動方式に変更すること、集約化では動力制御装置、空調

車 体	部 品	金 属	非 金 属
	構 体	耐候性鋼	
	化粧板	アルミニウム合金	メラミン樹脂
	便・洗面所ユニット	ステンレス鋼	FRP、ガラス
	腰掛け	普通鋼、アルミニウム合金	ウレタンフォーム、塩化ビニール
	タンク		FRP
	窓	アルミニウム合金	ガラス、ポリカーボネート、FRP、CRスポンジ
	戸	アルミニウム合金、ステンレス鋼	ガラス、ペーパーハニカム、CRゴム
	連結器	鋳鋼	

機 械 部 品	部 品	金 属	非 金 属
	側引戸装置	普通鋼	
	自動ドア装置	普通鋼	ナイロン
	ブレーキ制御装置	鋳鋼、普通鋼	ゴム
	弁 類	鋳鋼	ゴム
	電動空気圧縮機 空気管	鋳鋼、普通鋼 普通鋼	

電 気 品	部 品	金 属	非 金 属
	主変圧器	ケイ素鋼、銅、普通鋼	シリコン油
	平滑リアクトル	ケイ素鋼、純アルミ、アルミニウム合金	
	主電動機	ケイ素鋼、普通鋼、銅	カーボン
	主整流器	普通鋼	シリコン、フロン
	換気装置	アルミニウム合金	
	電 線	銅	ポリエチレン

台 車	部 品	金 属	非 金 属
	台車枠	普通鋼	
	車 軸	普通鋼	
	軸 受	軸受鋼	
	軸 箱	鋳 鋼	
	軸ばね装置	ばね鋼	ゴム
	ブレーキディスク	鋳鉄・鋳鉄クラッド材、鍛鋼	
	歯 車	普通鋼、ニッケルクロムモリブデン鋼	
歯車箱	歯車箱	鋳 鋼	

図2 主な構成材料（100系新幹線電車）

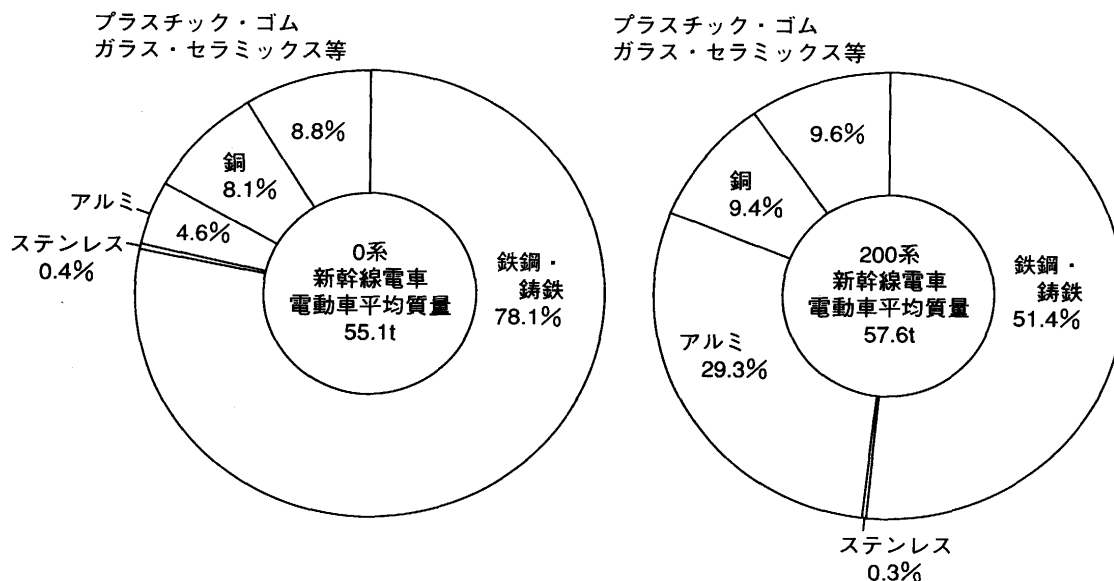


図3 0系および200系新幹線電車の材料構成 (質量比)

図より鉄系の材料が非常に多く使用されていることがわかる。図3は0系新幹線電車(100系以前の東海道山陽新幹線電車)及び200系新幹線電車(東北・上越新幹線電車)の材料別質量割合を示したものである²⁾。0系は100系とほぼ同様な質量割合と考えられる。200系は構体(車体の骨組の部分)がアルミニウム合金製であるが鉄系材料の質量比は高い。このように車両に鉄系の材料が多く使用され、重くなっている理由としては、鉄道が大量輸送機関であり安全が第一となること、しかも低コストも大きな要素となることから、鉄系材料が多くなり、材料の使用に関しては保守的な傾向が強くなるためと考えられる。

0系新幹線電車の部品別の質量構成を図4に示す。以下、質量構成割合の高い部品の幾つかについて、材料の変更に

関わる軽量化を中心に、車両の軽量化の現状及び今後の動向について述べる。

5 車体の軽量化

5・1 構体の軽量化

(1) 構体の概要

構体は車体の骨格に相当する部分で、旅客を安全・快適に輸送するための重要な構成部品である。図5は100系新幹線電車の構体であり、薄い外板を張りめぐらすように柱に溶接して組み立てたセミモノコック構造である。

構体に要求される機能は、まず乗客を安全に輸送するために様々な負荷に対して十分な強度を持つことである。負荷の種類には①車体の自重及び乗客重量からなる垂直荷重、②車両が連結されていることにより発生する前後荷重、③ねじり荷重、④新幹線のような高速車両ではトンネルを走行する時に受ける車体内外の圧力差による荷重が主なものとしてあげられる。

この圧力差による繰り返し荷重に対する疲労強度を確保することが軽量構体の強度設計の大きな課題となっている。また、車体が曲げ振動を起こし乗心地を悪くしないために、構体の剛性を高くし、車体の曲げ固有振動数が低下しないようにしなければならない。そのほか、構体に対する要求として、軽量性、遮音・断熱性、耐火・耐熱性、新幹線では気密性がある。また、製作・保守コストの低減、成形性、リサイクル性も要求される。

(2) 構体の軽量化

構体材料は従来の耐候性鋼に替わり、近年ステンレス鋼、アルミニウム合金が多くなってきた。新幹線電車の構体は連続アーク溶接で気密を確保するようにしており、200系及

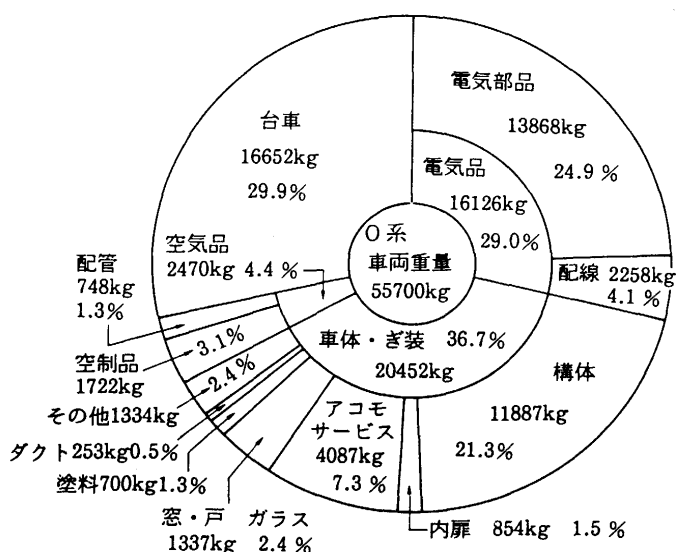


図4 新幹線電車の質量構成

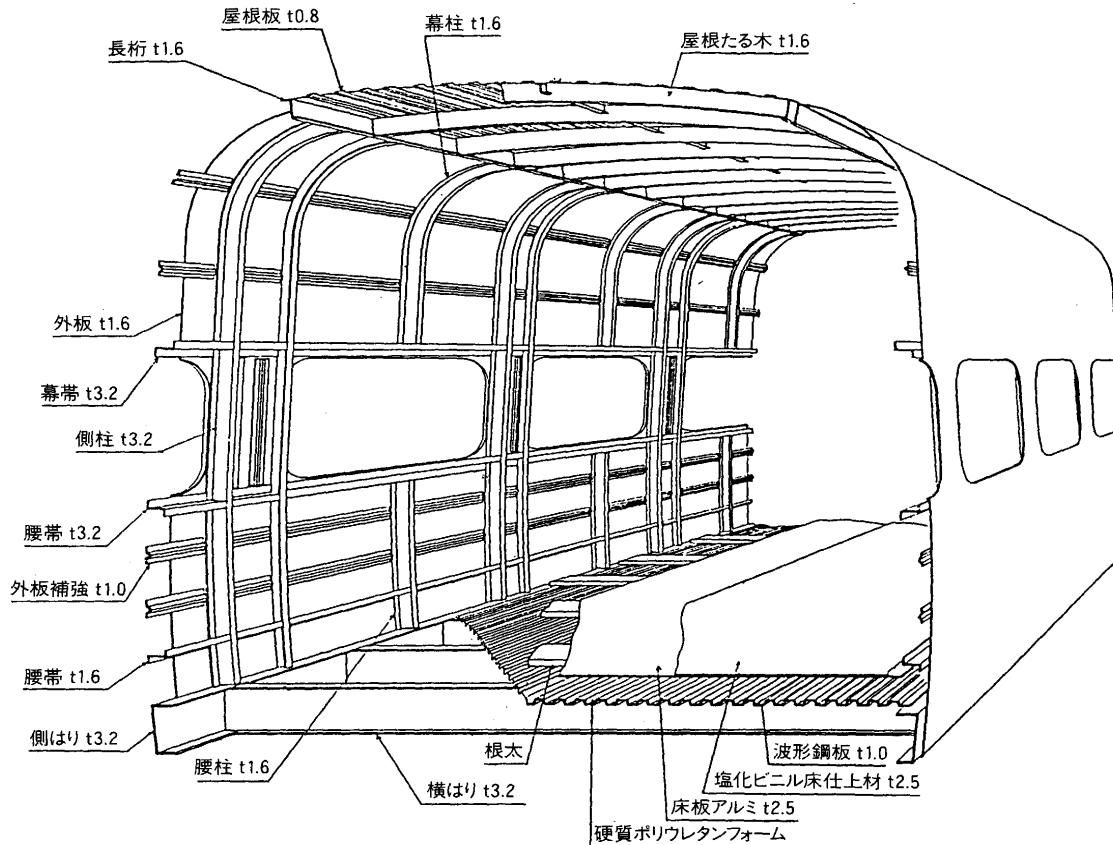


図5 100系新幹線電車の構体（鋼製，数字は板厚（mm）を示す）

び300系がアルミニウム合金製である以外は耐候性鋼製である。我が国のステンレス鋼製構体，アルミニウム合金製構体はともに5000両以上の製造両数となり，それぞれ全旅客車両の1割を超えるに至っている。これら材料の変更は，軽量化の他，材料の耐腐蝕性等からもたらされる保守コストの低減をねらったものである。最近では，ステンレス鋼は耐粒界腐蝕性，溶接性を改善した低炭素のSUS301Lが主体で，薄い外板と骨をスポット溶接により組み立てている。アルミニウム合金は押出成形性の良い6N01の600mm程度の幅の押出型材を用いて溶接の工数を減らし，素材のコストアップをカバーして，製作コストの低減をねらっている。図6の左から3本の棒グラフに同じ大きさ，外観の通勤型車両の構体質量を比較して示す。軽量性の点ではアルミニウム合金製とするのが有利となっている。

材料変更により構体をさらに軽量化するためには，新材料に頼らざるを得ない。新材料としては，ハニカムサンドイッチパネル，FRP（繊維強化プラスチック），MMC（金属基複合材），新しいアルミニウム合金（例えばアルミリチウム合金）などが考えられる。近年，スキンとハニカムコアがろう付けされたアルミハニカムサンドイッチパネルがアルミメカにより開発された。これは従来のサンドイッチパネルのような接着剤が使用されていない，全部が金属のため一般の構体と同様，溶接の手法で組立可能というメ

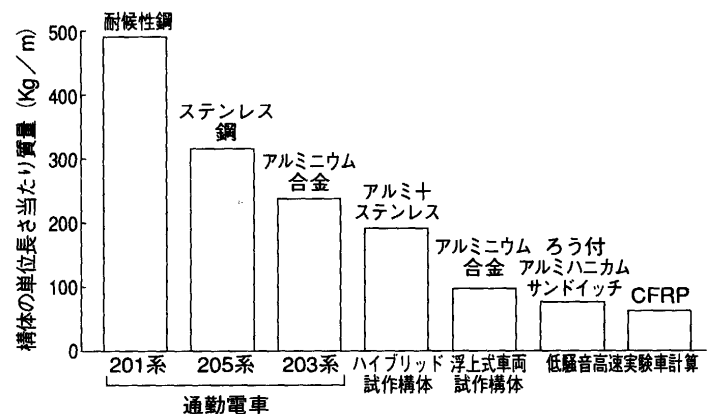


図6 構体の軽量化

リットが評価される。JR東日本の実験車「STAR21」の一部の車両はこのハニカムサンドイッチパネルを構体の一部分に適用している³⁾。

FRPのうち，炭素繊維で強化したプラスチック(CFRP)は航空機の主構造にも使用されるようになっている優れた構造材料であるが，コストが非常に高い。鉄道車両の構体に適用するためにはコストダウンを図らなければならない。航空機で行われている大きな型とオートクレープで焼き固める製法ではなく，引き抜き法により外板のパネルを製作し，それをリベット接合で組立てたCFRP製の实物大断面部

分構体を試作した(図7)。このようなCFRPパネルの製法により構造コストは大幅に低減でき、また強度・剛性の点でも満足のいく軽量構体が実現できる見通しが得られた。実用化に当たっては更なるコスト低減、火災に対する安全性の確認等が必要である。

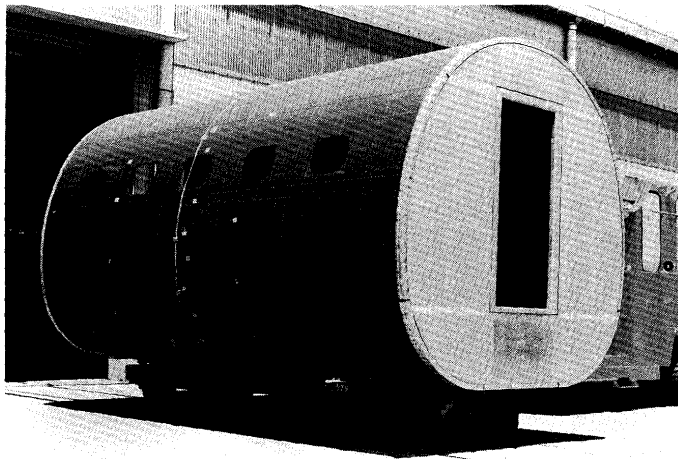


図7 CFRP製試作構体

様々な特長の材料を適材適所に組合せ、トータルとして多くの機能を満足する構体を実現させる試みとして、ハイブリッド構体がある⁴⁾。この構体は、上部(屋根、両側面、両端)をアルミニウム合金で構成し、その他(床)をステンレス鋼で構成している(図8)。この構体の狙いは、アルミニウム合金の軽量性・気密加工性とステンレス鋼の高融点からもたらされる床下機器の発熱等に対する安全性の向上である。アルミニウム合金部分とステンレス鋼部分の接合方法は、それぞれの金属を特殊な方法で予め接合したクラッド材を異種金属間に配置し、同種金属同士をクラッド材の両側で溶接するものである。クラッド材としては爆薬の爆発力で瞬時に接合する爆着クラッド材を採用した。荷重試験の結果、十分な耐久性を有していることが確認された。実用化のためには、クラッド材のコスト低減を図る必要がある。

MMCや新しいアルミニウム合金は現在のアルミニウム合金と同程度のコスト、加工性等が実用化の課題である。

図6には、ハイブリッド試作構体、アルミニウム合金構体で徹底的に軽量化を図った浮上式車両用試作構体、アルミハニカムサンドイッチパネルあるいはCFRPを全体に適用した構体の質量比較を併せて示す。ただし、右の3本は、構体の両端を除いた中間部分の質量であり、また右の2本は試算値である。

5・2 その他主要車体部品の軽量化

(1) 腰掛⁵⁾

従来の鉄道車両用腰掛の骨組は鋼製であり、腰掛全体の質量は2人掛けで50kg以上である。新幹線電車では、1両

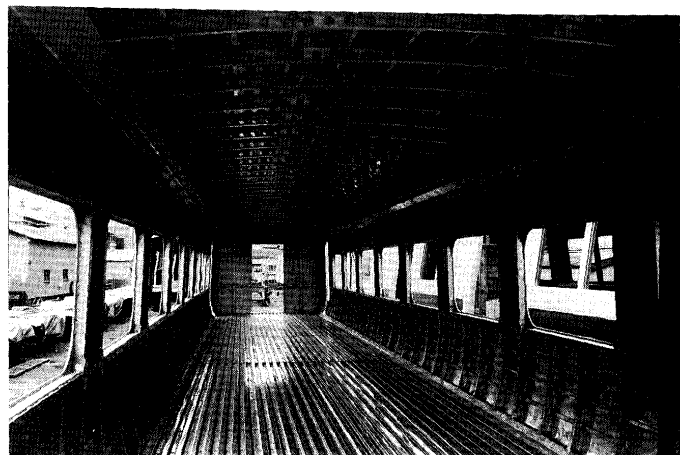


図8 ハイブリッド構体の内部

2.5t程度にもなり車体設備品としては大きな質量割合を占める。従来の鋼製の骨組みをアルミニウム合金とし、回転板にテフロン板を用いるなどで質量は半分以上にすることができ(図9)。現在、新形式車両のいくつかには、アルミニウム合金を多用した軽量腰掛が採用されている。

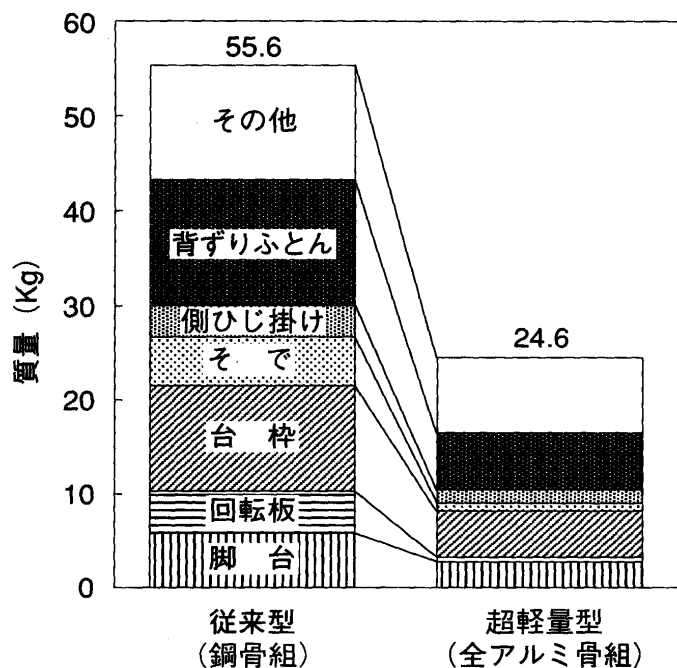


図9 腰掛(2人用)の質量比較

さらに、骨組をFRP化した腰掛の試作、試験も行われているが、コストの増大を抑制しつつ軽量の構造とするよう製作法を工夫する必要があると思われる。

(2) 窓ガラス⁵⁾⁶⁾

表面強度、耐火性の点でプラスチックではなく一般に、無機ガラスが使用されている。新幹線電車の客室の窓ガラスは5mmの空気層を含んだ厚さ18mmの合わせ複層ガラスが使われ、1両で700kg程度となっている。ただし、2階建新

幹線の階下窓には軽量化と飛石による破損防止のため、シリコンコートしたポリカーボネート板が使用されている。プラスチックガラスの高速鉄道車両への適用にあたっては、ガラスに対して要求される一般の機能のほか、トンネル走行時の車体内外の圧力差に対する強度、その時の変形量なども考慮する必要がある。

(3) 便洗面所ユニット、タンク⁷⁾

便洗面所には、軽量化のほか、衛生面、耐腐食性の点からFRPが使用されている。最近、不燃性のFRPが開発され100系新幹線電車の一部に使用されている。

タンクには水タンク、汚物タンク、汚水タンクがあり、いずれもFRPを内外に配したサンドイッチ構造になっている。

(4) 内装材⁸⁾

壁材、天井材などにはアルミニウム合金にメラミン・フェノール樹脂を積層したものが一般に使用されている。不燃性のFRPの出現により、その普及の可能性が大きい。

6 台車の軽量化

6・1 台車の質量の現状

図10に台車の構成例として新幹線用標準台車を示す。

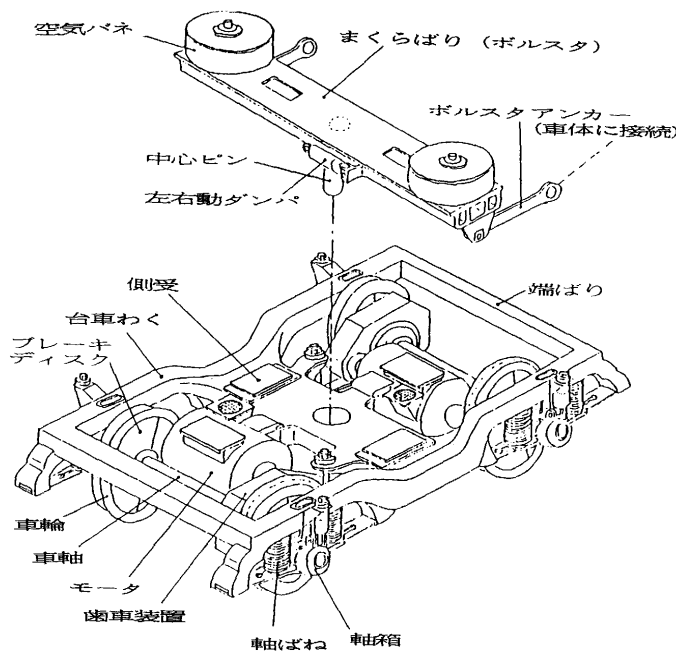


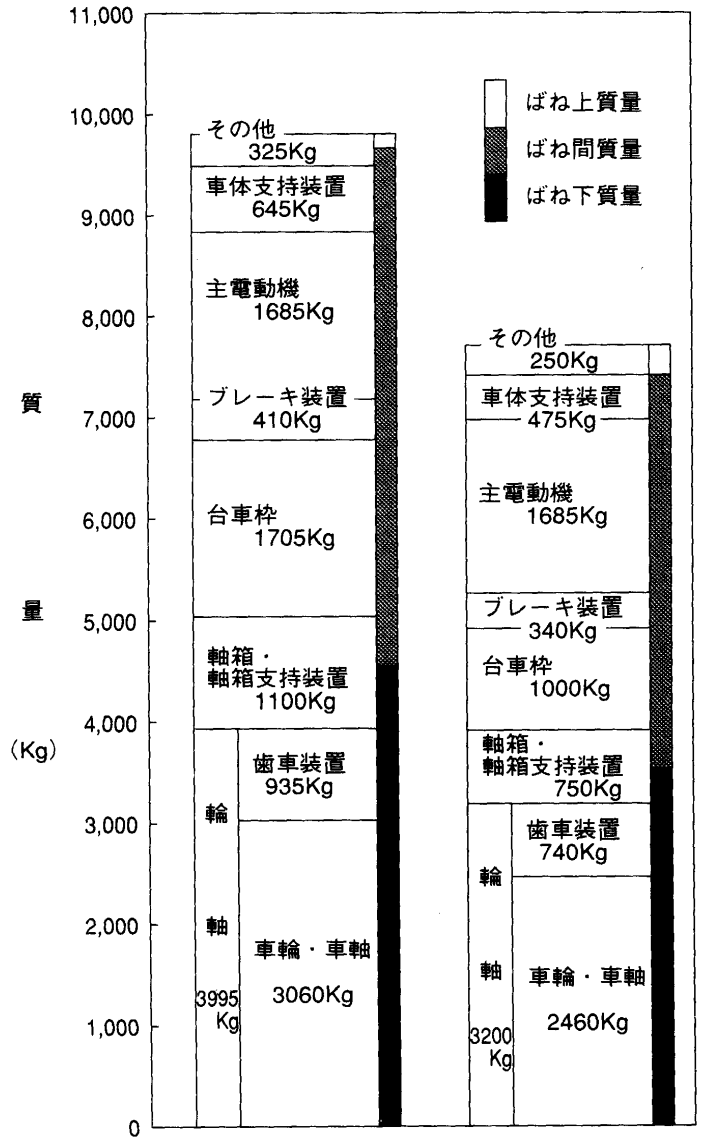
図10 新幹線標準台車

図11に台車の軽量化の例として、100系新幹線の台車と300系新幹線の台車の原型であるDT9023の質量比較を示す⁸⁾。

6・2 台車部品の軽量化

(1) 台車枠⁹⁾、枕はり

台車は車体の重量を支持し、走行安全性に係わる重要な



台車形式	100系電車用台車	鉄道総研試作台車
台車方式	ボルスタ付従来方式	ボルスタレス方式
台車 全体	9865Kg	7700Kg
質量 ばね下	4625Kg	3510Kg

図11 新幹線電車用台車の質量比較

部品であり、その骨格となる台車枠は特に重要な強度部材である。新幹線車両の台車枠の質量は、1.4tであり、モータ付き台車の場合台車質量の15%程度で、単一の部品としては大きな割合を占めている。我が国における新幹線電車を主体とした台車枠の軽量化の主な取組みを表1に示す。

表では、軸重（1軸当たりの荷重即ち車両重量の1/4）の軽減や枕はり（ボルスタ）省略などの構造の簡略化が台車枠の軽量化にも影響を与えていることがわかる。図12に60キロ級高張力鋼（溶接構造用鋼SM570相当）を用いた試作台車枠を示す。台車枠の強度上の最大の課題は溶接部の強度確保であり、溶接部の応力を低くするような構造上の工

表1 台車枠の軽量化

	新 幹 線					在 来 線
	0系DT200A	DT9023E,F	試作高張力鋼台車枠	試作アルミ台車枠	試作アルミ台車枠	FRP台車枠
質 量(t)	1.4	1.0	0.8	0.9	0.4	0.3
板 厚(mm)	9	8	6	20	12	16.4
材 質	構造溶接用鋼 SM400B	構造溶接用鋼 SM490	構造溶接用鋼 SM570 相当	アルミニウム合金 A7N01	アルミニウム合金 A7N01	CFRP
軸 重(t)	16	16	12 以下	16	10 以下	11
速度(km/h)	210	270	300	210	350	160
記 事		ボルスタレス 端はりなし 実走行で耐久性確認 済 300系車両で実用化	ボルスタレス 端はりなし 試験装置で耐久性確認 済 昭和63年度試作	端はりなし 強度上改善の余地あり 昭和60年度試作	ボルスタレス 端はりなし 耐久性など検討課題 が多い 平成元年度試作	ボルスタレス 端はりなし 耐久性の確認が必要 平成元年度試作

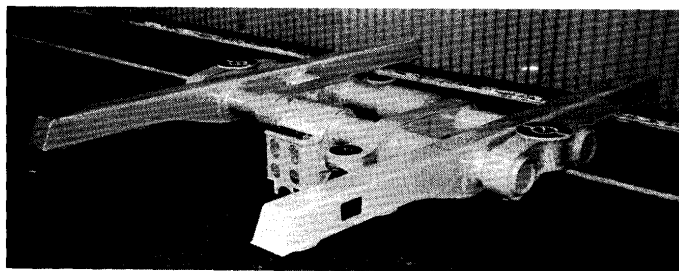


図12 高張力鋼 (SM570相当) 試作台車枠

夫及び溶接後の強度低下の少ない材料の開発が期待される。鋼からアルミニウム合金への変更による軽量化の効果は大きいと思われるが、実用化のためには、鋼の場合と同様繰り返し負荷に対して溶接部分の安全性を十分に保証する構成法及び材料面の改善が望まれる。

FRP台車枠について我が国では本格的な研究開発は始められたばかりである。ドイツではFRP台車枠が世界に先駆けて開発され、2年以上の実走行による耐久性確認試験が行われており、1990年代初期の実用化をめざしている。

200系新幹線電車の台車の枕はりはアルミニウム合金製であり、鋼製のものより約170kg軽量化されている。

(2) 軸受, 軸箱¹⁰⁾¹¹⁾

軸受については、従来の新幹線の円筒コロ軸受とスラスト玉軸受の併用式を300系新幹線ではツバ付円筒コロ軸受とすることにより、50kg程度軽量化されている。

軸箱は軸受を包み、軸受と台車枠との間の荷重を伝達する部品である。その支持方式を在来線電車では円錐ゴム式、ロールゴム式などに変えることにより軽量化がなされている。軸箱の材料は鋳鋼で新幹線電車の軸箱は約70kgである。これをアルミニウム合金7050製とすることにより質量を1/2以下にできる。バラスト飛散に対する衝撃強度、繰り返し

垂直荷重に対する強度の確認、実走行による耐久性試験を行い、300系新幹線電車に実用化されている。さらに、CFRP製にすることにより大幅な軽量化が期待できるがバラスト飛散に対する衝撃強度、耐久性、放熱性等が課題となる。

(3) 歯車装置¹⁰⁾¹¹⁾

歯車箱はモータと車軸間の減速歯車を包み、歯車間の距離を保持する部品である。鋳鋼製歯車箱をアルミニウム合金製とすることにより、歯車箱の質量160kgを約1/3にすることができ。材料はAl-Si-Mg系の鋳物材AC4Cである。軸箱と同様に強度確認を行い、300系新幹線電車に実用化されている。

(4) 車軸, 車輪⁹⁾

車軸の材料は高炭素鍛造鋼SFA55, SFA60, 機械構造用炭素鋼S38Cであり、新幹線電車の車軸1本当たり質量は約500kgである。新幹線や特急気動車等には強度、耐摩耗性の向上のために高周波焼入れ熱処理を施している。車軸の軽量化の手法は主として、設計法の見直しによる小径化、中空車軸の採用である。300系新幹線では中空軸が採用されている。FRP等の新素材の適用も考えられるが、剛性の確保、車軸や歯車等金属材料部品との結合法、また簡便で精度の高い非破壊検査法の開発が課題である。

車輪の材料はタイヤ鋼STY80で、新幹線電車の車輪一枚当たり350kgである。構造面からの軽量化としては、直径を小さくすること、摩耗代を始めから小さくすること、波打車輪とすることがある。材料面からの軽量化としてはアルミニウム合金や複合材料の適用が考えられるが、剛性の確保、踏面の耐摩耗性、耐熱きれつ性の確保のための表面改質等の技術開発が必要である。ドイツではFRP車輪が試作されている。輪心部はFRPとし、それを鋼製のタイヤとハブに接着しており、2%以上の軽量化が図れるとともに、騒音の低減、車輪・レール間の衝撃緩和に効果があるとき

れている。

(5) ブレーキ装置¹²⁾¹³⁾

新幹線では車輪の板部にディスクを取り付け、それをブレーキシューではさみつける方式のディスクブレーキが使われている。ディスクの軽量化を考えると、その熱容量の確保、摩擦係数の適正化が前提となる。現在、新幹線電車で用いるブレーキディスクの材料の主体はNCM鋳鉄であり、1台車8枚当たり480kgである。これを軽量化するために、セラミックスの粒子をアルミニウム合金の中に分散させた複合材のディスクが開発中であり現車試験を行っている。また、炭素/炭素繊維複合材ディスクについても研究開発が進められている。

7 軽量化に伴う課題

構体の軽量化は一般に曲げ剛性の低下、それによる乗心地の悪化をもたらす恐れがあり、また局所的なびびり振動を起こしやすくなる。車体（の壁）が軽く薄くなる場合には、遮音性能、断熱性能の低下に対して十分配慮し車体設計をしていく必要がある。また、車体の軽量化は横風による転覆に対しての安全率が低下する方向となるので、低重心化等とあわせて考える必要がある。衝突など事故時の安全性を低下させないような配慮も必要である。

台車の軽量化にあたっては、剛性の低下と相まって発生しやすくなる台車振動が車体振動、車内騒音に及ぼす影響等に配慮していく必要がある。

8 おわりに

以上、鉄道の高速度に関連して、車両の軽量化が材料との関わりでどのようになされているか概観してきた。車両の軽量化は、鉄道の特性を発揮していく上で重要な要素であり、今後ともその努力は続けられていくと考えられる。

車両の軽量化のための材料の変更は、一般に鉄系材料からアルミニウム合金、そして複合材へといった“鉄離れ”の流れと捉えることができる。しかし、全てがそのように置き変わるわけではなく、これは厳しくなる要求性能にかなうような特性の材料が適材適所に使用されるようになってきたということである。新幹線、在来線の特急車両、通勤車両等の車種により要求される特性は異なるので、鉄系材料はその特性を発揮し今後も台車部分はもとより車体でも多く使用されるであろう。

鉄道は大量に安全に安く乗客や物を運ばば良いという時代から、いかに多様化する乗客の要求に応えるか、いかに騒音等環境に配慮するか、そして地球規模の環境、資源の問題にどう答えていくかということが問われる時代になってきた。時代とともに、社会が鉄道車両に求める要求も変化し、また高度なものとなってくる。このような課題を解決する上で材料の果たす役割は大きく、常により優れた材料の開発が期待されている。

文 献

- 1) 石川栄, 伊藤順一, 小峰輝男: 車両技術, (1990) 191, p.12
- 2) 鉄道用材料使用実態調査グループ: 鉄道総研報告, 6 (1992) 12, p.1
- 3) 日経ニューマテリアル, 7月13日号, (1992), p.8
- 4) 鈴木康文, 阿久津勝則: RRR, 46 (1989) 7, p.15
- 5) 荒井汎, 中島洋, 高林盛久, 安井義彦: これからの鉄道車両の求める新素材, (1990) [冬樹社]
- 6) 伊藤順一: 車両技術 (1988) 182, p.89
- 7) 荒井汎, 安井義彦: 電気車の科学, 42 (1989) 4, p.19
- 8) 岡本勲, 鈴木康文: 溶接学会電気溶接部会溶接技術講習会テキスト, (1991), p.7
- 9) 荒井汎, 宮石源基, 手塚和彦: 電気車の科学, 42 (1989) 10, p.23
- 10) 新田幸雄, 鈴木政治: 車両と機械, 3 (1989) 9, p.4
- 11) 新田幸雄, 鈴木政治: 車両と機械, 3 (1989) 10, p.4
- 12) 辻村太郎, 高尾喜久雄, 熊谷則道: 車両と機械, 3 (1989) 10, p.4
- 13) 熊谷則道: 車両と機械, 4 (1990) 2, p.4