

鉄道車両の軽量化



松澤

浩*

Weight Reduction of Railway Rolling-stock

Hiroshi MATSUZAWA*

1. 結 言

鉄道輸送の特徴は専用の軌道を利用して、大量かつ高速での輸送が可能なことである。もともと鉄道は現在わが国で多く見られる電車や気動車のように動力装置を分散装備した方式ではなく、機関車が客車や貨車をけん引する動力集中方式であった。機関車の力を列車の後部にまで伝えて、大きな輸送力を発揮するには、客車や貨車の車体や連結器は頑強なものとなり、重量も大きくならざるを得なかつた。一方、限られた機関車のけん引力で勾配を登り、高速で乗客を運んだり、大量の貨物を輸送するには、客車や貨車は少しでも軽い方が有利である。こうして、約 50 年以前からヨーロッパを中心に鉄道車両の軽量化の動きが始まった。

また最近、各国の鉄道では航空機や自動車などの対抗輸送機関との競争に遅れをとらないために、わが国の新幹線やフランスの TGV (Train à grande vitesse) に見られるようないつその高速化を計ろうとしており、軽量化の必要性が一段と高まっている。一方、省エネルギーの面からも軽量化の経済性が見直されてきている。そのため世界の各鉄道では従来を上廻る軽量化の努力が続けられている。

ここでは電車や客車などの旅客用車両の車体を中心に軽量化の考え方や進め方について紹介してみたい。

2. 軽量化の目的と効果

鉄道車両は電動機や内燃機関の出力を車輪に伝え、各種の抵抗にうちかちて加速し、走行している。これらの抵抗を総称して列車抵抗と呼んでいるが、列車抵抗は走行抵抗、加速抵抗、勾配抵抗および曲線抵抗から構成されている。

走行抵抗は平坦な直線状の軌道を走行する場合にも受けるもので、車輪とレールの間のころがり摩擦抵抗、車軸軸受部の回転摩擦抵抗など列車重量に比例する部分と、列車重量とは無関係で、列車速度や車体断面積などに関係する空気抵抗からなっている。加速抵抗、勾配抵抗および曲線抵抗はそれぞれ列車の加速度、軌道の勾配

および曲線半径に関係し、いずれも列車重量に比例している。したがって列車重量を軽くすることにより、走行エネルギーを減少させることができる。軽量化が列車抵抗の減少にどの程度寄与するかは、動力方式、列車編成、運転形態、列車速度などの多くの要因によつて異なるが、電車を例にとつて試算すると、表 1 のような結果となる。

表から明らかなように、大きなエネルギーを必要とする加速時において軽量化の効果が大きく、軽量化率がほとんどそのまま走行抵抗の減少となつて表れる。

したがって運転条件を同じにすれば、軽量化によつて運転動力費を節減することができ、しかも駅間距離が短く、頻りに発、停車を繰り返す都市形の高速度鉄道ではその効果が大きい。

車体の軽量化は単にそれのみに止まらず、走行装置や動力装置などの小形化が可能になり、いつその軽量化をはかることができる。また、駆動装置やブレーキ装置の負相が軽くなり、摩耗部分の寿命が延びて車両保守費が低減される。さらに軸重が軽くなれば軌道破壊が減少して、その保守費が低下し、主電動機の小型化は地上側電気施設の容量を小さくおさえて設備費の縮減がはかれるなど波及的な経済効果は大きい。

また同一出力であれば、軽量化によつて高加速度運転が可能になり、軌道にも大きな影響を与えないで、運転速度を向上することができる。その結果、到達時分が短縮され、輸送サービスが向上するばかりでなく、車両運用や乗務員運用の効率化がはかれることになる。

貨車の場合は軽量化により、軸重を変えないで、貨物の積載重量を増して、輸送力や採算性を高めることができる。

表 1 軽量化が列車抵抗に及ぼす寄与率

	加 速 時	高 速 均 衡 時
通勤形電車 (6M4T)	99%	66%
新幹線電車 (ひかり号, 16M)	97%	79%

注 1 寄与率 = 列車抵抗低減率 / 列車軽量化率
 2 M は電動車、T は付随車を示す。6M は M 車 6 両、4T は T 車 4 両を示す。新幹線電車はすべて電動車で、16M は M 車 16 両を示す。

昭和 58 年 5 月 11 日受付 (Received May 11, 1983) (依頼解説)

* 日本国有鉄道車両設計事務所 (Rolling Stock Design Office, Japanese National Railways, 2-2-6 Yoyogi Shibuya-ku 151)

3. 旅客用車両の車体

3.1 構体と荷重条件

旅客用車両は通常車体とその前後に配した2軸ボギー台車によつて構成されている。一部には車体と車体との間の連結部分に台車を設けた接続方式と呼ばれる車両もある。

車体は一般に金属製の骨組と外板からなる構造体で、これに内装を施し、必要な機器を搭載、ぎ装している。この構造体は構体と呼ばれ、強度、剛性および外形デザインの主体となつている。これに対し、窓、戸および腰掛などを取り付け、内装を施したものを車体と呼んで区別することとする。

旅客用車両の構体は図1のように台わく、側構(がわがまえ)、妻構(つまがまえ)および屋根から構成されている。ここで紹介するのは主として、この構体についての軽量化である。全車両重量の中で構体重量がどの程度の比率を占めているかは、動力装置、制御装置、冷房装置など装備品の大小、有無によつて異なるが、動力装置、冷房装置を持たない鋼製客車で見ると、全重量の約1/4程度となつている。

車体の軽量化といつても、強度を無視して軽量化することはできない。鉄道車両に加わる荷重は垂直荷重、前後荷重、左右荷重、ねじり荷重および車体内外の圧力差による荷重が上げられる。

前後荷重は鉄道車両の特徴である連結運転に起因する荷重であり、運転中の準静的な荷重以外に、連結作業時や加減速時の車両相互間の速度差による車端衝撃を考慮する必要がある。国鉄では旅客用車両に対して表2のような前後水平荷重を考慮することを標準としている。

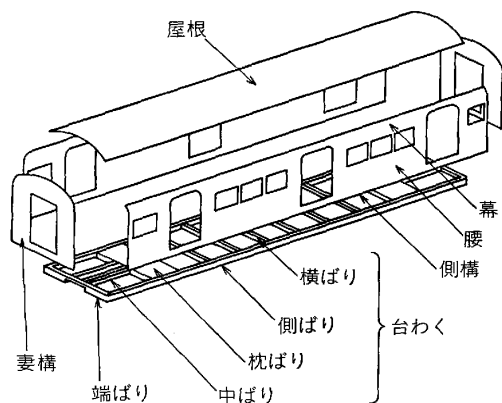


図1 構体の構成

表2 標準前後荷重

車種	引張荷重 (t)	圧縮荷重 (t)
客車	35	50
電車	35	50
動電車	35	50
新幹線電車	50	100

垂直荷重は自重を含めて車体に取り付けられる各種機器類の重量と乗客や荷物などの積載重量によるものであり、主変圧器やエンジンなど大型機器については集中荷重として、その他は分布荷重として取り扱われる。乗客重量は特急形や通勤形など車両の用途によつて最大乗車人員を考慮して計算し、さらにこれらの静荷重に対して、上下振動加速度として0.1~0.3gの割増しを行つたものを垂直荷重としている。

左右荷重やねじり荷重は走行中や保守作業中に発生するものである。

新幹線電車ではトンネル通過時、圧力の急激な変化によつて鼓膜に不快な刺戟を与えないよう、走行中車体を気密化しているので、車体内外の圧力差による荷重を考慮している。

3.2 構体強度と剛性

構体の強度計算は、垂直荷重に対して台わくの側ばりを含む側構が有効に働くものとして、側構体をラーメン構造に置き替えて、全垂直荷重を負荷した計算を行い、前後荷重は台わくが負担するものとして、台わく各部の強度を計算する方法が行われてきた。最近、有限要素法による計算が行われるようになり、垂直荷重に対する側構体の平面解析では、はり要素の軸力、モーメント、応力、板要素の主応力とその方向、節点におけるたわみなど、応力状態の詳細な解析ができるようになった。また、構体全体で荷重を負担する立体解析も行われており、精度の高い結果が得られるとともに、平面解析では求められなかつた面外変形やその力などが解析され、各断面変形も知ることができる。このような計算技術の進歩によつて、細部に及ぶ詳細な強度の検討が可能となり、キメ細かい構体の軽量化が進められることになった。

旅客用車両の車体は使用上十分な強度を有すると同時に、乗心地を害するような振動が発生することのないよう、全体的にも、局部的にも適当な曲げおよびねじり剛性を持つ必要がある。

垂直荷重のみを考えると車体は前後の台車で支持されたはりで見なすことができる。したがつて、車体中央部のたわみと等しい等分布荷重の単純はりの剛性をとり、これを車体の相当曲げ剛性と呼んでいる。

また、車体のねじりに対する剛性としては、構体の一端を固定し、他端に偏心荷重をかけてねじり角を実測し、車体を一樣な丸棒と見なして相当ねじり剛性を算出している。

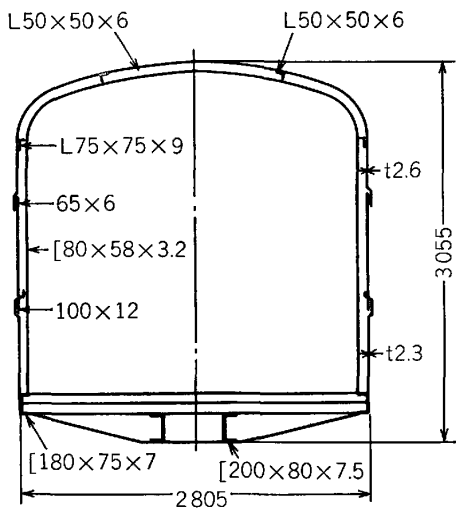
一方、固有振動数は車体の相当曲げ剛性や相当ねじり剛性から近似的に算出することもあるが、多くは実測によつている。

剛性や固有振動数に対して、とくに規定したものはないが、主として乗心地の面から設計目標として、曲げ固有振動数10Hz以上をねらつている。

新しく設計、製作した車両は構体荷重試験を行つて構

表3 車体の剛性と固有振動数

車種	相当剛性		固有振動数 Hz		記事
	曲げ 10^{14} kgf-mm ²	ねじり 10^{13} kgf-mm ² /rad	曲げ	ねじり	
鋼製車体	国鉄 101系	1.26	47.7	10.0	通勤形電車 // 東海道・山陽新幹線
	" 201系	1.76	55.2	12.0	
	" 0系	1.73	42.0	11.3	
軽合金製車体	" 301系	0.60	21.1	14.1	東西線乗入れ電車 東北・上越新幹線
	" 200系	3.06	57.8	13.2	
	山陽 3050系	0.57	19.8	14.7	
ステンレス鋼製車体	営団 5000系	1.15	25.4	11.0	
	東急 8090系	0.85	19.0	14.7	



単位：mm

図2 旧形車両の構体断面

体各部に生じる応力や前記の特性値を実測するほか、必要に応じ各種の試験を行つている。表3に実測による車体特性値の1例を示す。

3.3 軽量構体構造

国鉄が軽量構造を採用したのは1955年のナハ10形客車以降である。それ以前の構体は木製車時代の思想がそのまま残されており、あくまで台わくが強度部材の主体であつた。図2はその時代の一般的な客車の車体断面を示すものである。台わくは大型溝形鋼による中ばりが車体全長にわたつて通してあり、垂直荷重と車端からの圧縮力を同時に負担する構造である。その他主要部材には溝形鋼や山形鋼などの形鋼および平鋼の規格品を使用していた。

戦後、航空機技術の影響を受けて、車体構造の各部に均等な応力が働くような応力外皮構造の張殻構造が取り入れられた。当時の私鉄の車両の一部にだ円形断面の車体を見ることができる。しかし、このようなたまご形の車体では実用面や製作面で難点があつた。

したがって、完全な張殻構造ではないが、極力これに近付けるように主要強度部材である台わく、側構および屋根を一体に近い形で有効に利用する方法がとられるようになった。図3はこのタイプの一例で急行形電車の構

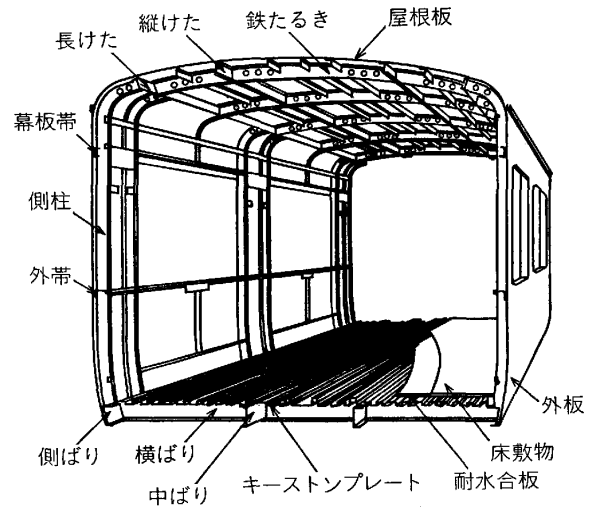


図3 急行形電車の構体断面

体断面を示すものである。すなわち、台わくは床を含めて強度と剛性を上げるようにキーストンプ板張りとし、側構は下屋根部分まで延長して強度を増大すると同時に中立軸を高くする。また、側構自体で垂直荷重を分担するだけでなく、台わくと屋根を結合する役目を持たせて、側柱とたるきを1本で通すような感じで配置し、全体を1本の筒のようにして、構体全体で垂直曲げ荷重や水平圧縮荷重を分担できるように縦けたや長けたを通し、これらを一体溶接構造とする。こうすることにより、外板や柱などの負担応力が下がり、板厚を薄くすることができる。また、主要部材は極力形鋼を使用せず、最適な形状、寸法の鋼板プレス物を使用する。こうして全体的な構体の軽量化がはかれる。

4. 車体材料による軽量化

4.1 普通鋼

鉄道車両の構体材料として、軽合金やステンレス鋼が使われるようになってきたが、大部分の車両は長年にわたつて用いられてきた普通鋼が依然として用いられている。その理由は他の材料に比較して価格が低く、各種の成形、加工、溶接、補修などが容易である点である。

台わくや骨組は一般構造用圧延鋼 (SS41) のプレス成形品が主体であるが、一部には高耐候性圧延鋼 (SPA-

H), 高張力鋼 (SHT2), 一般構造用軽量形鋼 (SSC41) などが用いられている。

また外板, 屋根板, 床板などには冷間圧延鋼板 (SPCC) が用いられていたが, 最近では高耐侯性圧延鋼板 (SPA-C) が広く用いられるようになった。

普通鋼の欠点は腐食である。このため必ず塗装が必要となり, 設計の際にも腐食を考慮して重量が増加しがちである。とくにわが国のような高温, 多湿の気候条件の下では外板や側柱下部, 出入口, 戸袋部分, 窓廻り, 雨どいなどの腐食が甚しいので, 2~3年ごとに補修, 再塗装を行い, 10年近くなると外板や構体の切継, 補修を行う必要がある。したがってプライマー, シール材による防錆処理を行うとともに, 外板と台わく間や出入口外板端部には連続溶接を行うなど十分な腐食対策を施す必要がある。車両によつてはとくに腐食の発生しやすい腰板下部や雨どい部分にステンレス鋼板 (SUS304) を使用している。

普通鋼を使用する場合は前述の軽量構体構造をとるが, 現状では大きな軽量化は望めない。

4.2 軽合金

普通鋼による軽量化には限度があり, より高度な軽量化の要求には普通鋼よりも強度重量比の高い材料を用いなければならない。こうした要求を満たすものとして, 軽合金が認められてきた。

軽合金が鉄道車両に利用されたのは意外に古く, 今世紀初頭にはすでに英国で外板に使用された例がある。その後いくつかの使用例はあるが, 本格的に軽合金を車両の構造材として使用したのは 1952年ロンドン地下鉄においてであった。軽量化による電力消費量の節減を目標に量産を行い, 現在 4000両に及ぶ無塗装軽合金製車両を有している。

わが国では 1962年に山陽電鉄が初めて軽合金製車両を導入し, 以後地下鉄東西線乗り入れ用 301系電車など次々と全軽合金製車両が登場し, 現在までに 2000両をこえる車両が製作されている。

初期の軽合金製車両には Al-Cu系合金が使用され, 鋼製車両に近い構造のリベット組み立てで製作されていた。その後 Al-Mg-Si系合金の押し出し性の良さを生かした形材を利用する方式となり, またイナートガス溶接の発達, 普及にしたがつて溶接構造が採用されるようになった。さらに疲労強度や溶接継手強度が普通鋼に近い

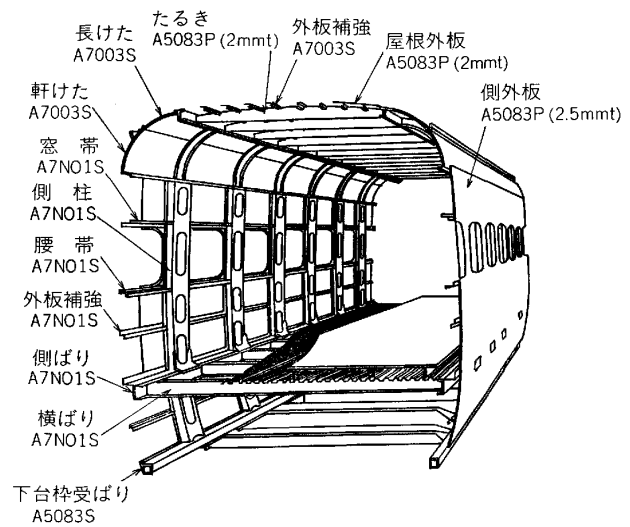


図 4 東北・上越新幹線電車の構体断面

Al-Zn-Mg系のいわゆる三元合金の出現によつて, 全軽合金製車両は大きく進歩することになった。

表 4 に鉄道車両に使用されている主な軽合金材料を, 図 4 に東北・上越新幹線電車の構体断面を示す。

軽合金の特徴の一つは押出加工が可能な点である。大型押出材を利用することによつて複雑な断面形状が得られ, 工数を大幅に節減することができる。また押出材では各部の必要な強度に見合った板厚を得ることができ, きめ細い軽量化が可能になる。

最近, 押出性にすぐれ, 強度もありかつ溶接性のよい A6N01が開発され, この合金を使用して側構体をはじめ屋根や床も大型押出材の組み合わせで構成した全断面形材利用の構体が登場した。とくに床を中空形材にして, 横ばりを省略した点が特徴で, 全体に溶接線が単純となり, 自動溶接の大幅な採用が可能となつて製作工数が節減できる。図 5 および図 6 に, この方式による車両の断面と使用形材を示す。この車両では全軽合金材料のうち約 79% が形材で占められている。

軽合金はステンレス鋼程でないにしても耐食性がよい

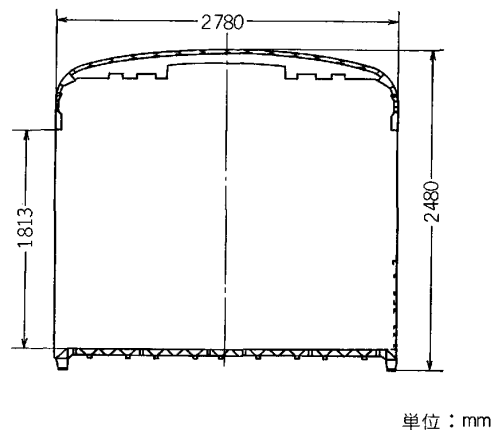


図 5 全押し出し形材構成の構体断面

表 4 鉄道車両に用いる主な軽合金材料

材 質	形 態	使 用 例
A3003	板	内装化粧板
A5005	板	床板, 屋根板
A5052	板	屋根骨組み, 戸
A5083	板, 形	構体骨組み, 外板
A6N01	形	台枠骨組み, 押し出し外板
A6061	板, 形	外板, 骨組み
A6063	形	雨どい, 窓枠, 内装材
A7N01	形	台枠骨組み
A7003	形	台枠骨組み, 押し出し外板

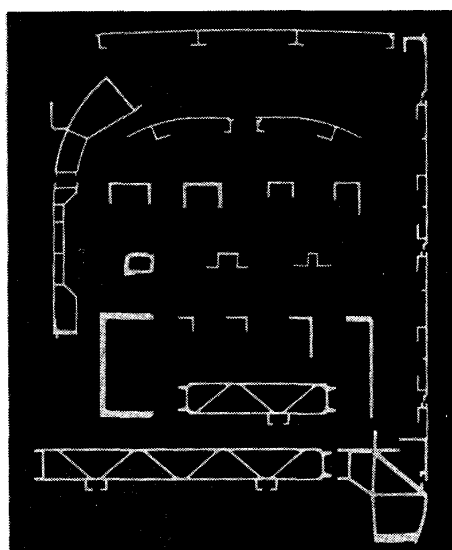


図 6 全押し出し形材構体の使用形材

ので、車体を無塗装化することができる。この場合検修部門における塗装設備が不要になり、修繕日数の短縮による車両稼働率の向上などのメリットがでる。金属表面のままでは美観に欠けるので、サンダー、ワイヤブラシなどによる表面仕上げが必要である。

軽合金は構体材料ばかりでなく、内装材としても広く使用されている。とくに室内化粧板はほとんどが軽合金基板のメラミン樹脂化粧板である。その他窓わく、内帯、仕切引戸、荷物棚受、幌子掛などが軽合金製であり、東北・上越新幹線電車の床や一部の戸にはハニカム構造のものも使用されている。

4.3 ステンレス鋼

ステンレス鋼車両は 1934 年アメリカで製作されたのが最初とされている。わが国で初めてステンレス鋼を車両に使用したのは関門トンネル用 EF10 形電気機関車で、1951 年海水による腐食対策として車体をステンレス鋼製に改造したものである。新製車としては 1957 年東急電鉄で初めて採用された。当初は軽量化よりも耐食性を生かした車両寿命の延長、無塗装化による保守経費の節減を目的として、外板のみステンレス鋼板を使用しスキン・ステンレスまたはセミ・ステンレス車と呼ばれたる方式の車両であつたが、しだいに枕はり、中はりなど台わくの一部を除き、すべての構造部材にステンレス鋼を使用したオール・ステンレス車に変わつてきており、高抗張力の材料を利用して軽量化をはかっている。

鉄道車両に用いられるステンレス鋼はオーステナイト系で SUS301 または SUS304 であるが、構体材料としては主に SUS301 の調質材が用いられる。

オーステナイト系ステンレス鋼は加熱によつて粒界腐食を生じ、き裂の危険性があるので、溶接には大きな入熱を避け、可能な限り抵抗溶接によるスポット溶接、シーム溶接などを使用するとともに一般に加圧力を増し、電流値を下げて溶接する。したがつて骨組の結合にはス

表 5 鉄道車両の構体重量

種 別	形 式	構 体 重 量 kg
鋼 製 車 両	国 鉄 201系	9 395
	小 田 9000系	9 100
	東 武 8000系	9 850
セ ミ ・ ス テ ン レ ス 車 両	菅 泉 5000系	9 080
	団 北 3000系	9 700
オ ー ル ・ ス テ ン レ ス 車 両	東 急 8400系	6 000
	南 " 海 8090系	6 300
	8200系	6 770
軽 合 金 製 車 両	国 鉄 203系	4 740
	菅 山 8000系	4 650
	3050系	4 300

注：重量はいずれも電動車のものである。

ポット溶接を利用したガセット接手などが用いられる。またオール・ステンレス車でも一部に普通鋼などを使用しているため、これらの鋼材とステンレス鋼、あるいはステンレス鋼どうしてもスポット溶接の不可部分にはアーク溶接を採用している。この場合も極力熱影響を少なくするため穴溶接を原則とし、冷却水を使用してできるだけ早く温度を下げる必要がある。最近炭素量を 0.03% 程度にまで下げた SUS301 材が開発されており、この材料であれば Cr 炭化物を生じることが少ないので、アーク溶接の範囲を拡げることができる。

ステンレス鋼は比較的硬い材料であるため、曲面部の多い前頭形状とすると、製作工数がかさむことになるので、単純な形状で割り切るか、複雑な形状でも成形の容易な FRP などで前面に変化を持たせている。

外板は無塗装とするのが一般的で、腰板や幕板はコルゲートにして、剛性を上げるとともに装飾を兼ねていたが、最近の車両では僅かなビード成形を行つた程度のものが多くなつた。

5. む す び

構体の軽量化について、使用材料の面から紹介したが構体重量の実例を表 5 に示す。これらの車両は大きさおよび構成が必ずしも同一ではないので、参考として見ていただきたい。

ここでは金属材料についてのみ説明したが、構体の一部に FRP などの高分子材料が使用された例もあり、また内装材としては軽量化のために高分子材料などが広く使用されている。

今後も鉄道車両の軽量化努力は続けられるであろうが軽く、強度もあり、なおかつ経済的な材料の開発が望まれる。

文 献

- 1) 星 晃：車両の軽量化 (1956) [鉄道図書刊行会]
- 2) 鉄道車両と設計技術 (1980) [大河出版]
- 3) 里田 啓：地下鉄電車と省エネルギー、アルミニウム No. 256 (1980-4)
- 4) 松田和夫：鉄道車両の車体軽量化設計と材料、日本機械学会第 508 回講習会資料 (1980-9)
- 5) 川添和彦、中野清盛、関谷正次郎：山陽電鉄 3050 系新形式アルミ電車、車両技術 No. 155 (1981-5)