

相模鉄道株式会社納
6000 形 全 軽 合 金 製 電 車
 6000 Type All Light Alloy Electric Car for Sagami Railway

藤岡多喜男* 藤井宏康* 笠井靖夫*
 Takio Fujioka Hiroyasu Fujii Yasuo Kasai

要 旨

車両の構造材として鋼に代わる軽合金材料の研究をいろいろ行なってきたが、このたび軽量化および外板仕上げ簡易化を目的とした全軽合金製電車を完成した。この電車は台わく、構体にすべて軽合金材料を使用しており、これによって同一形式の普通鋼製車の構体重量に比べて約40%の重量軽減を達成することができた。外板の仕上げは軽合金材料特有の軽快な金属色をそのまま生かしたヘヤライン加工クリヤラッカー仕上げの簡易塗装で、従来の普通鋼製車の完全塗装に比べて著しく簡単であり、動力費および維持費などの経済面において将来威力を発揮するものと確信する。

この電車は部材形状および配置に特別の注意を払って設計してあるので、軽合金車であるにもかかわらず、一般普通鋼製車並みの強度、剛性を有しており、各種静的荷重試験および現地走行試験で性能確認のうえ納入された。

本稿はこの電車の車体構造、強度、試験について述べたものである。

1. 緒 言

車両近代化の最も重要な項目として車両の軽量化および保守の簡易化があげられる。なぜならば鉄道車両は非常に長い耐用寿命をもち、軽量化による電力費などの節減、保守の簡易化による維持費などの節減は非常に成果が大であるからである。そのうえ軽量化により線路や電力施設など現状のまま輸送力の増強が可能であり、乗客へのサービスの向上を図ることもできるからである。

普通鋼製車は過去において非常な速度で軽量化の道を歩み、現在では完成されたものといわれており、これ以上の軽量化は強度面および工作面より多くを望めず、また車両の大形化も重量増加となって設備面より限界に達している。したがって軽量化を行なうには構成材料を軽くすること、すなわち軽合金材料を使用することが最も手近な方法であり、軽合金製車両は今後急速に発展するものと考えられる。しかしながら現在まで長い間使用されてきた普通鋼製車は保守の方式も確立されており、材料面、製作面においても一日の長がある。したがってこれに代わる軽合金製車両の発展には容易ならざるものがある。したがって軽合金材料の利点である耐食性、押出成形性を十分に考慮した設計を行なう、これらに対処しなければならない。

日立製作所においては現在までにケーブルカーやモノレールカーにおいて相当数の軽合金製構体の製作を行ない軽合金構造におけるいろいろな問題点を解決してきた。このたび製作した全軽合金製電車は、これらの実績を基に設計、製作されたものである。この電車は既納鋼製車と混結運転されるので、既納車と同一割付、同一外形寸法であるとともに、各種部品および台車の互換性など、いろいろな制約があったので、割付変更などによって最も有利な構造とすることはできなかった。したがって強度、剛性上最も有効な断面形状の押出型材を、最も有効な部材配置とし、剛性の低下を最小限に押え、重量軽減の目的を達成しなければならなかった。

この電車ではこれらの点を考慮し、構体の約60%に押出型材を使用し、同一形式の鋼製車構体に比べて約40%重量軽減に成功した。強度面においても車体は垂直荷重で定員の2.6倍に相当する重量42.3tに対して、また車端衝撃50tに対して十分に耐えるように設計してあり、これは静的荷重試験および現地走行試験によって確

* 日立製作所笠戸工場

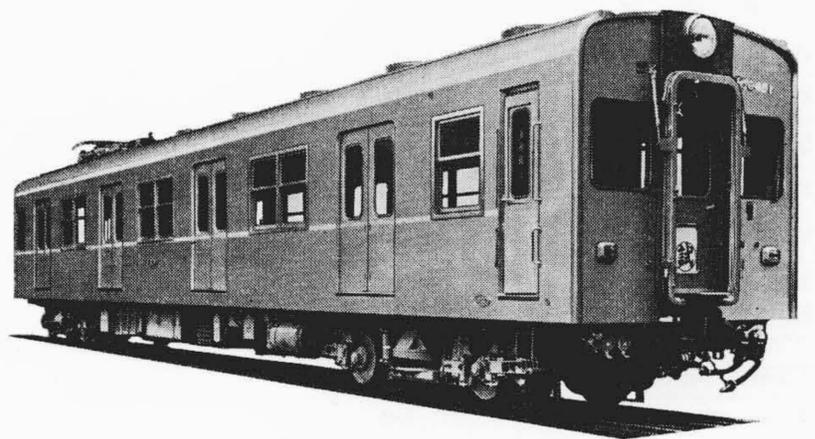


図1 全軽合金製電車

認されている。

2. 仕様および特長

この全軽合金製電車の外観を図1に、形式図を図2に示す。表1はおもな仕様である。

この電車は既納鋼製車と同一割付、同一外形寸法に製作してあるが、次の点が特長としてあげられる。

- (1) 台わく、構体にはすべて軽合金材料を使用し、ブロック製作から構体組立まで、すべて溶接による構体構造であり、有効な部材断面、部材配置を得るとともに、部品製作工数の低減を図るため全部材の約60%に押出型材を使用している。
- (2) 構体重量において同一形式の鋼製車の9.83tを、軽合金製構体にするにより5.93tと約40%の重量軽減を達成した。
- (3) 雨どい管を車体外部に設けることにより、構造を簡単にするとともに、前頭部のデザインに利用した。
- (4) 前頭部はデザインをいろいろ検討した結果、中央部を70mm浮かせて、この部をホロ座および前照灯座に利用し、周囲の雨どい管を輪郭とした。またこの中央部には赤色塗装を施し、遠方より列車の進行を識別できるようにし、踏切などにおける衝突事故防止の一手段とした。
- (5) 軽合金材料のもつ耐食性を利用した外板仕上げとするとともに、保守を簡易化するためヘヤライン加工クリヤラッカー仕上げの簡易塗装とし、軽合金材料特有の軽快な金属色を打ち出した。
- (6) 側窓および妻窓は上昇式構造となっているが、外ばめ式ニ

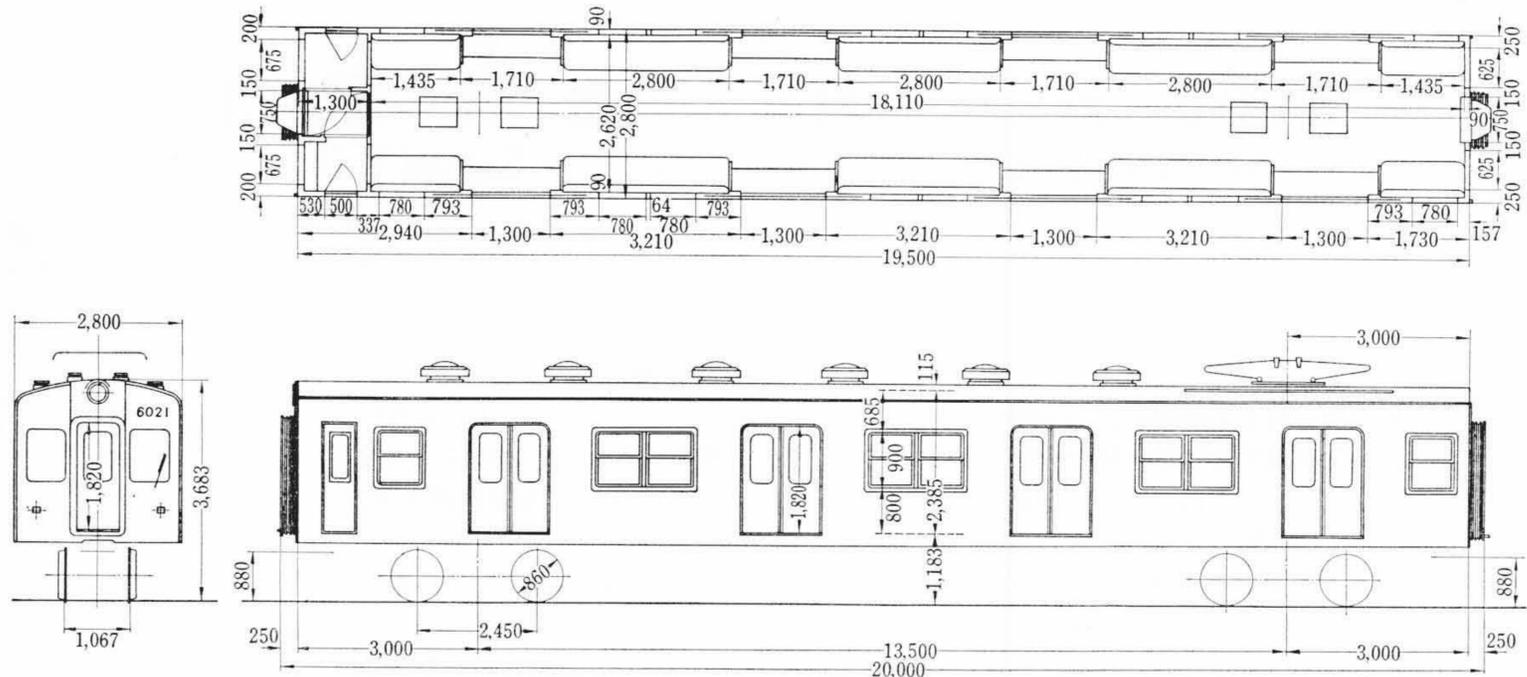


図2 全 軽 合 金 製 電 車 形 式 図

表1 概 略 仕 様

車 両 形 式	6000 形 制 御 電 動 車
車 両 番 号	6021
軌 間 (mm)	1,067
車 両 重 量 (t)	34.5
定 員 (名)	160
車 体 長 さ (連 結 面 間) (mm)	20,000
車 体 長 さ (妻 間) (mm)	19,500
車 体 幅 (mm)	2,800
車 体 高 さ (mm) (レール面より屋根まで)	3,683
床 面 高 さ (空 車 時) (mm)	1,183
連 結 器 高 さ (mm)	880
心 皿 間 距 離 (mm)	13,500
台 車	KH-43H 車輪径 860φ 軸距 2,450 mm 直角カルダン空気バネ式台車 ディスクブレーキ方式
電 気 方 式	架線電圧 DC 1,500 V 主電動機 MS-514-Crb 750V 110kW×4台 制御装置 MMC HT 10C 形 多段式電動機操作カム軸/回転式 可変荷重機構付
ブ レ ー キ 方 式	ACMR形中継弁付自動空気ブレーキ併置電磁直通空気ブレーキ(可変荷重弁付)および手ブレーキ

3. 構 体 構 造

3.1 構体に使用した軽合金材料

一般に車両用の軽合金材料として使用されているのは耐食アルミニウム合金またはそれに準じた合金である。特に構体構造に使用するためには強度が高いということは当然必要な条件であるが、車両用材料としては長い間の使用に耐えるように耐食性の良好なことが必要である。特に外板においては耐食性が車両の寿命を左右する大きな要素となる。また構体は長大な薄板構造で溶接組立によって製作されるのであるから溶接性の良好なことが、完成時のできばえ、製作工数、重量軽減に大きな役割を果たすものといえる。押出成形性は軽合金材料特有の性質であって、適切な部材断面を得ることによって、これが車体の剛性、軽量化および工数低減に与える影響は大きい。

以上の条件を満足する軽合金材料として、このたび使用した材料の主要化学成分および機械的性質を表2に示す。

各種材料の使用個所の選定も経済的な構体を製作するためには重要なことである。これは押出成形性の難易度、その部材の必要強度、荷重の種類などを考慮して決定されなければならない。

3.2 構体構造

構体は普通鋼製車と同様に台わく、側構、屋根構、妻構の6ブロックから構成され、それぞれのブロックは溶接によって組み立てられる。構体の組立に溶接とリベット併用した例も見受けられるが、作業能率の点から溶接組立が望ましく、今後は溶接組立の方向に移行するものと思われる。このたびの構体組立に際しては、いろいろと試験を行なった結果、強度上、製作上問題がないことが確認できたので、構体組立には全面的に溶接を採用した。

軽合金材料は鋼に比べて比重は約1/3であるが、縦および横弾性係数が約1/3と低いので同一割付の軽合金製車両で鋼製車と同等の剛性を得ようとすれば、断面二次モーメントを約3倍にしなければならない。同一割付の車両でこれを行なえば部材断面積が約3倍となって、本来の目的である重量軽減は達成できない。したがって、それぞれの部材に最も適した断面の部材を配置することによって、強度、剛性の低下を最小限にして軽量化を達成しなければならない。

部材断面の強度、剛性を求めるには電子計算機を用いて、最も合理的なものとした。使用した型材は全部材の約60%に相当し、このことは鋼製車の場合に多量に存在するプレス加工の工数をほとんど無くし、構体を経済的に製作するうえに大きい役割を果たしてい

ニット窓として構体構造を単純化し、かつ外板のアクセントとした。

(7) 側出入口は乗客の荷物などで損傷を受けやすいので、取り換えができるように車外寄りにも出入口面を設けるとともに外板の端未処理に利用した。

(8) 引戸、開戸をすべて軽合金製とし、外板同様にヘヤライン加工クリヤラッカー仕上げとして軽合金製車両であることを強調した。

(9) 屋上通風器としては耐食性、電気絶縁性、加工性にすぐれた硬質塩化ビニル溶接構造の通風器を用いた。

(10) 台車は高性能で乗心地の良好な空気バネ、ディスクブレーキ方式である。この台車は既納鋼製車と全く同じものであるが、軽合金製車体の重量軽減量に合わせてバネ系は変更してある。

表3 電食防止対策

分類	処置	適用箇所
湿気、ゴミにさらされやすい箇所	SS製品に亜鉛メッキを行ない、更に接触部にSUS27薄板をはさみ、ジंकクロメートを塗布	床下機器取付部、胴受パネ箱取付部（ただし伴板取付部はSUS板は使用しない）
その他	SS製品に亜鉛メッキを行ない、接触部にジंकクロメートを塗布	一般部品のうら座
小ネジ類	車外に取付のもの	SUS製小ネジを使用
	室内に取付のもの	亜鉛またはカドメニウムメッキをする
		窓わくなどの取付ネジ
		内張などの取付ネジ

3.3 溶接

構体の溶接にはMIG溶接がTIG溶接に比べて作業能率、溶け込み深さなどの点において有利であるので、骨組の溶接には全面的にMIG溶接を使用した。外板および屋根板の取り付けはひずみ発生と溶接後の仕上げなどで有利な抵抗スポット溶接をできる限り使用し、これが使用できない箇所のみ、アークスポット溶接を行なった（キーストプレートおよび運転室床板は構造上、抵抗スポット溶接ができないので、全面的にアークスポット溶接を使用した）。

軽合金材料の溶接は鋼に比べて非常に溶接部の欠陥が生じやすく、大気中の水分、ゴミ、鉄粉などが溶接に悪影響を及ぼす。またこの欠陥が生ずると溶接継手の強度が著しく低下する。したがって溶接前の処理、開先角度、溶接環境、溶接棒の管理などには十分の配慮が必要である。

この構体では特に溶接部の確認および今後の溶接作業管理の資料を得るため、構体主要継手約100個所にX線検査を実施した。

3.4 外板の仕上げおよび保護

現在使用されている軽合金製車両は軽量化、保守費の軽減から、ほとんどの車両が簡易塗装されており、外板表面は反射光によるほかの交通機関への障害、および見ばえの点からヘヤラインなどの加工が行なわれている。

ヘヤライン加工クリヤラッカー仕上げの工程は普通鋼製車の塗装に比べて著しく簡略化されており、塗料の使用量も比較にならないほど少ない。

外板仕上用クリヤラッカーについては次の3種について検討した。

- (1) アクリルクリヤラッカー
- (2) ウレタンクリヤラッカー
- (3) アクリルウレタンクリヤラッカー

この3種のクリヤラッカーについて塗料の作業性、研磨性、付着性、腐食性、耐水性、黄変性について試験した。その結果、ウレタンクリヤラッカー、アクリルウレタンクリヤラッカーはアクリルクリヤラッカーに比べて、作業性に多少劣るが、研磨性、付着性、耐水性に一段とすぐれている。したがって、このたびの電車では、この2種のクリヤラッカーについて実際に試験するため、顧客の協力を得て、半々に塗装して試験を行なっており、今後の結果を見守ることにした。

3.5 電食防止

軽合金材料は鋼に比べると耐候性、耐食性ははるかに良いが、湿度や水のたまりやすい部分の除去、良好な排水などについても特に留意した。

次に軽合金材料の防食で最も問題となるのは電食である。これを防止するためにはアルミニウムと異種金属を直接に接触しないようにすればよい。このたび製作した軽合金製電車では表3に示すように電食防止対策を行なった。

また、電気品については一般鋼製車の場合、車体をアースとして

表4 強度設計に用いた数値

材 質	強 度 (kg/mm ²)			
	状 態	引張強さ	耐 力	疲れ強さ
耐食アルミニウム合金 7種 A ₂ P ₇ -O A ₂ S ₇ -F	母 材	27	13	8
	溶 接	27	12	4.5
三 元 合 金 Al-Zn-Mg-T ₄ , T ₅	母材 T ₄	33	22	11
	溶 接	31	21	8

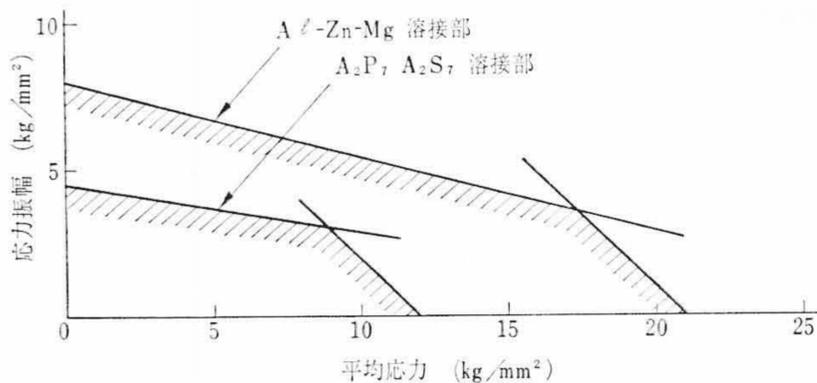


図6 材料の耐久線図

利用しているけれども、それぞれの電気品よりアース線を設けて電食防止の徹底を図った。

4. 構体強度

4.1 設計荷重

構体の強度計算に用いた荷重は垂直荷重42.3t、水平荷重50t、上下振動加速度0.2gである。ここで制御電動車の定員は160名であるが、中間車製作の場合を考慮して、定員は170名とし、乗客1人当たりの重量は55kgで満員時は定員の2.6倍とした。

4.2 強度の判定

普通鋼製車の場合は最大荷重時の応力値が材料の降伏点以下であれば問題ないと判定されている。軽合金製車の場合も上下振動加速度の値が小さいとして、アルミニウム合金の耐力値を鋼の降伏点に対応するものとして取り扱っている例が多い。このたび製作した電車では上下振動加速度の値を0.2gとして設計を行なったので、材料の疲労強度を主体にして強度の判定をした。表4は設計に使用した主要材料の標準強度を示したものである。図6は溶接部の疲労強度をもとにした耐久線図である。したがって強度の判定に際しては、次の条件を満足する必要がある。

- (1) 空車時50tの圧縮荷重を受けても、各部の応力が使用材料の耐力を越えない。
- (2) 図6に示す耐久線図において、満員時の垂直荷重42.3tによる応力を横座標にとり、0.2gの上下振動加速度による応力および4.2t-mのねじりによる応力との和を縦座標にとった場合、この点が安全領域内にあること。

4.3 構体強度計算

台わくで強度上特に問題になる部材は枕はりおよび中はりで、これらの強度は車端衝撃によって決定される。したがって、この部には耐力の高い三元合金を使用して、車端衝撃50tによる応力が、この材料の溶接部の耐力21kg/mm²以下になるように部材を決定した。

側構の強度計算には電子計算機を用いた。有効部材範囲として上弦材は側構長けた部まで、下弦材はキーストプレート側構寄600mmまでをとった。また同一形式鋼製車において既に静的荷重試験を実施しているため、この結果を計算値と比較し、計算結果の検討に役だたせた。

表5 静的荷重試験内容

試験項目	荷重	試験結果
垂直荷重試験	36 t	窓隅部応力集中部で -9.10 kg/mm^2 が最大であって、そのほかは $6\sim 7 \text{ kg/mm}^2$ 、公称応力部では 2 kg/mm^2 前後であった。また最大たわみ量は 6.52 mm であった。
圧縮試験	50 t	台わく応力集中部で -7.70 kg/mm^2 が最大で、そのほかは $5\sim 6 \text{ kg/mm}^2$ 以下であった。
ねじり試験	4.2 t-m	窓隅部応力集中部で 2.1 kg/mm^2 が最大であった。
構体の曲げ固有振動数	構体のみ	14.7 c/s
積車の曲げ固有振動数	12 t 積車	8.5 c/s
構体のねじり固有振動数	構体のみ	5.1 c/s
床下ブラケット試験	実物機器取付	MG取付金応力集中部で 1.89 kg/mm^2 が最大であった。

表6 現地走行試験内容

試験項目	目的	結果
側構の応力測定	窓隅部応力集中部に発生する応力の大きさとひん度の測定	静的荷重試験 36 t 時 7.3 kg/mm^2 の点に対して最大応力が両振幅 $1.2\sim 1.3 \text{ kg/mm}^2$ であった。
中はりの応力測定	中はりに生ずる応力の大きさの測定	加速、減速時に両振幅 $0.3\sim 0.6 \text{ kg/mm}^2$ 程度であった。
床下ブラケットの応力測定	床下ブラケットに発生する応力の大きさの測定	応力集中部にて両振幅 $1.0\sim 1.2 \text{ kg/mm}^2$ が最大であった。
車体上下振動加速度の測定	車体に加わる上下振動加速度の大きさの測定	想定した加速度の $1/2$ 程度であった。
床下機器上下振動速度の測定	床下機器に加わる上下振動加速度の大きさの測定	想定した加速度の $1/2$ 程度であった。
屋根の振動調査	パンタ取付部屋根の共振の有無を調査	共振の現象は全く認められなかった。
乗心地の調査	軽合金製車両の鋼製低下が乗心地にどの程度の影響を与えるかを調査	同一形式鋼製車との差異は全く認められなかった。これについては図8に示す。

各部材の決定には各種部材断面を用いて計算を行ない、剛性の低下を最小限にして最も重量軽減に効果のある部材を選定した。この部材による各部の計算応力は出入口および窓隅部で $3.5\sim 4.0 \text{ kg/mm}^2$ であって、まだ余裕のある応力値であるが、鋼製車の場合の局部的な応力集中状況から推定して $6.0\sim 7.0 \text{ kg/mm}^2$ 程度の応力が発生する可能性もあり、かつねじりによる応力および大形軽合金製構体の未知な点も考慮して、この程度の値で構体設計を進めることにした。

相当曲げ剛性は同一形式鋼製車における計算値と実測値との修正係数を用いて計算すると $0.99 \times 10^{14} \text{ kg}\cdot\text{mm}^2$ となる。この値は同一形式鋼製車の剛性 $1.64 \times 10^{14} \text{ kg}\cdot\text{mm}^2$ と比較すると低い値であるが、一般の鋼製車の剛性に匹敵する値であり、十分であると判断した。

4.4 静的荷重試験

計算によって強度を検討したが、これを確認するためおよび各種構体特性値を知るために静的荷重試験を行なった。試験項目、想定した負荷および結果を表5に示す。試験装置および支持方法は一般鋼製車の場合と同様な方法である。

この結果より、4.2で掲げた基準で判定すると、50 t 圧縮時台わくの最大応力は材料の耐力の $1/2$ 程度であって、さらに軽量化の余地がある。

側構では窓隅部において計算値より、やや高い応力が発生したが、いずれも図6に示す耐久線図の安全領域内である。

構体の相当曲げ剛性および相当ねじり剛性は、36 t 垂直荷重時の最大たわみ量および4.2 t-m ねじりモーメント時のねじれ角から計算するとそれぞれ $0.93 \times 10^{14} \text{ kg}\cdot\text{mm}^2$ 、 $20.9 \times 10^{12} \text{ kg}\cdot\text{mm}^2$ となる。

図7はこの試験における構体の36 t 垂直荷重、50 t 圧縮荷重試験のたわみ量および4.2 t-m ねじり試験のねじれ角曲線である。これによってわかるように軽合金製構体としては、非常に強度、剛性

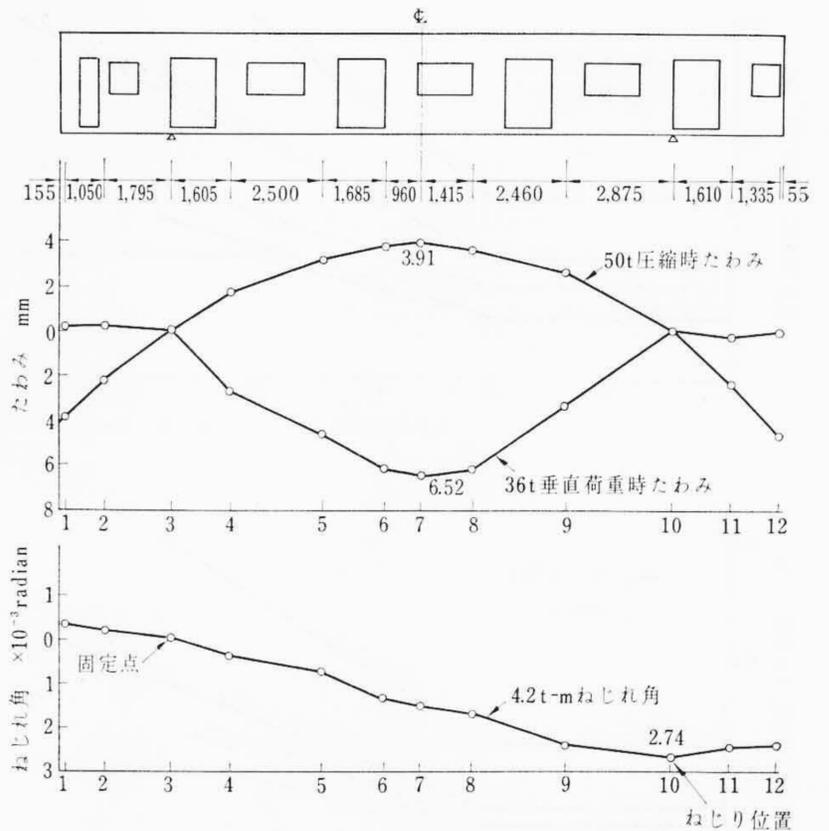


図7 36 t 垂直荷重、50 t 圧縮荷重時のたわみ量および4.2 t-m ねじり荷重時のねじれ角曲線

の高い構体であるといえる。

以上、静的荷重試験の結果、計算によって目標とした強度、剛性を有していることが確認できた。しかし、この試験で側構の実測応力値が公称応力部においては非常によく計算値と一致したが、応力集中部では、やや高い値となっており、この点で軽合金製構体は鋼製構体に比べて、応力集中の傾向が一段と大きいものと推定される。

4.5 現地走行試験

現地走行試験は実際の線路状況および静的荷重試験において想定した荷重の値が、実際に発生する外力に対して妥当なものであるかということを確認し、それによって、このたび製作した車両が十分長期間の使用に耐え得るかどうかを判定するために行なわれた。またこの資料は今後製作する車両を、さらに軽量化するのに重要な役割を果たすものであるともいえることができる。

表6は現地走行試験の試験項目、目的および結果を示したものである。走行試験を定員時の条件とするため、荷重8.2 tを積載して行ない、運転タイヤとしては、全線試験タイヤ、区間試験タイヤ、乗心地試験タイヤと、それぞれの解析に最も適した運転タイヤを設けた。ただし、乗心地試験は鋼製車と比較のため空車状態にて測定した。

この結果、静的荷重試験でやや高い応力を測定した点をも含めて、長期間の使用に対しなら問題とならないことが判明した。剛性低下により、最も問題とした乗心地は、鋼製車に比べて差異は認められなかった(図8参照)。最近の空気バネ使用の車両では、ほとんど A_1 と A_2 の範囲であるといわれ、この電車もその範囲にはいっている。

4.6 軽合金製車両の軽量化と剛性

このたび製作した車両の構体重量は5.93 tで、同一形式の普通鋼製車の約60%で40%近い重量軽減である。しかし、相当曲げ剛性は一般の鋼製車に匹敵する値を有しており、現在使用されている軽合金製車両に比べて非常に高い値である。表7は構体の重量と特性値を同一形式の鋼製車と比較して示したものである。

構体の軽量化と剛性は同時に良い結果を得ようとするのは非常に困難であり、どちらかを犠牲にするかということが問題である。

一般に軽合金製構体は軽量化が第一の目的であるといわれている

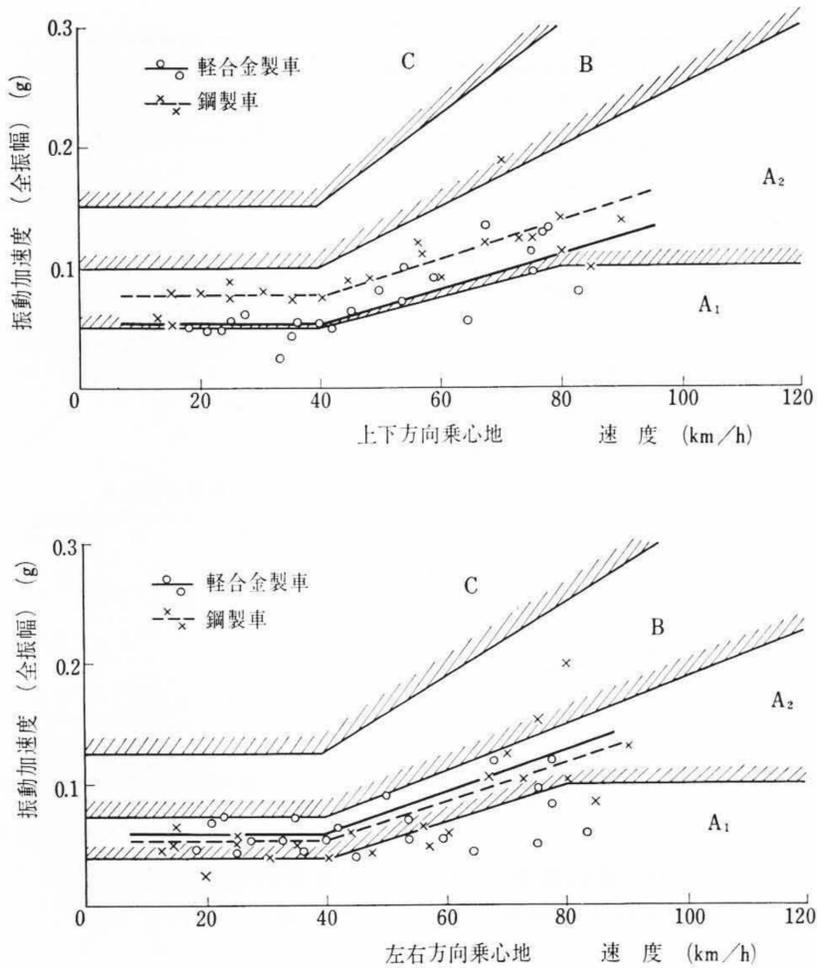


図8 軽合金製車と鋼製車の乗心地

が、剛性も忘れることのできない重要な特性である。特に剛性は車両の乗心地に最も影響を及ぼす特性であるが、現在のところ最低値はいくらだという具体的な数値で表わされてはいない。したがって、今後における軽合金製構体の軽量化の度合いも、この剛性値の限界いかんによって決定されるものと考える。

参考までに掲げると、構体の剛性は大体普通鋼製車 $0.8 \sim 1.4 \times 10^{14}$

表7 軽合金製構体と鋼製構体の特性値

特 性	軽合金製構体	鋼製鋼体
重 量 (kg)	5,930	9,830
相当曲げ剛性 (kg-mm ²)	0.93×10^{14}	1.64×10^{14}
相当ねじり剛性 (kg-mm ²)	20.9×10^{12}	50.7×10^{12}
空車曲げ固有振動数(構体) (c/s)	14.7	13.0
12t積車曲げ固有振動数(ぎ装時) (c/s)	8.5	—
ねじり固有振動数(構体) (c/s)	5.1	3.6
最大たわみ(36t時) (mm)	6.52	3.57

kg-mm², ステンレス製車 $0.5 \sim 0.7 \times 10^{14}$ kg-mm², 軽合金製車 $0.6 \sim 0.7 \times 10^{14}$ kg-mm² のものが多い。

5. 結 言

以上、構体の構造、強度、試験について述べてきたが、既納鋼製車と混結運転するため割付をそろえ、鋼製車と変わらない強度・剛性をもたせるなどの種々制約条件があったにもかかわらず、構体重量を鋼製車に比べ約40%軽量化できた。さらに割付・寸法など軽合金製電車に適したものとすることができるとすれば、なお構体重量を軽減できる見込みである。

また、強度計算から現地における走行試験まで一連の試験によって得た資料は、今後の量産設計に重要な役割を果たすものであり、さらに一歩進んだ軽量化を行なうことが可能となろう。

現在この軽合金製電車は好評のうちに営業運転中であり、いろいろな面において優位性を発揮し、今後の軽合金製車両のゆくえを示すものとして注目されている。

最後に、車両の設計、製作にご指導賜った関係各位、ならびに設計から現地走行試験まで、全面的にご協力賜った相模鉄道株式会社の関係各位に感謝する次第である。

第30巻

日

立

第4号

目

次

- 随 想.....岡 潔
- 砂 漠 の 超 特 急
- 日 立 の 車 両 輸 出
- M H D 発 電 の 実 用 化 を め ぐ っ て
- “みかんどろっぶ”をつくる 一日本最大の凍結工場一
- い かる が の 春一よみがえる法隆寺金堂壁画一

- 郵 便 局 の 近 代 化—スタンプもオートメデー
- 万 博 シ リ ー ズ 第 3 回
- 話のロビー/国際貿易の“水先案内人”
- COLOR SPOT
- Hight Light / 荒 磯 に こ つ ぜ ん と
- サ イ エ ン ス ・ ジ ョ ッ キ ー

発行所 日立評論社

東京都千代田区丸の内1丁目4番地

取次店 株式会社 オーム社書店

振替口座 東京71824番

東京都千代田区神田錦町3丁目1番地

振替口座 東京20018番