

MARTA(米国アトランタ市交通局)納め 軽量ステンレス製電車

Lightweight All-Stainless Steel Electric Cars for Metropolitan Atlanta Rapid Transit Authority

このたび日立製作所では、軽量ステンレス製電車の米国ジョージア州MARTAへの納入を開始した。

この電車は、MARTAの延長新線用の増備車両で、総計100両の製作が予定されているが、通勤用電車としては極めて高い性能をもち、随所に新たな構想に基づく構造が盛り込まれている。各部の構成は厳重な信頼性確認を経て決定されており、その総合性能は1984年9月から11月の米国コロラド州プエブロ試験線での走行試験で所期の値を満足することが確認された。

荒井 実* *Minoru Arai*
中村正武** *Masatake Nakamura*
岡崎正人** *Masato Okazaki*
藤田正美** *Masami Fujita*

1 緒 言

米国ジョージア州MARTA(アトランタ市交通局)では、既にフランス製のアルミ合金製電車120両を運行しているが、現在路線の延長を推進しており、増備車両が順次投入されてゆく計画となっている。

日立製作所では、この増備車両100両を受注し、現在鋭意製作中である。量産先行車(プロトタイプ車)2両は日本国内で完成し、米国コロラド州プエブロ試験線で性能試験が実施された。量産車は、半完成状態で米国へ輸送しアトランタ市内にある最終組立工場で完成した後、MARTAへ順次納入されることになっている。

この電車は、通勤用電車としては、日本国内の水準を上回る機器、接客設備、各種性能をもち、更に米国での厳しい安全上の制約条件もクリアできる車両である。

この車両は、日立独自の軽量ステンレス構体技術の適用による軽量化をはじめとして、多くの信頼性確認試験を経て確立された新しい構造と材料を効果的に組み合わせることで完成された。

本論文では、その主要性能、車体の軽量化、耐火災安全強化、台車の軽量化及び米国製電気品を適用したシステム構成について述べる。

2 車両の特徴

2.1 車両の概要

車体は日立独自の技術による軽量ステンレス製で、全長23m、全幅3.2mの大形車両であり、チョップ制御方式で、かつ1両ごとにほとんどすべての走行機器を搭載する全電動車方式でありながら、空車完成質量36.7tという極めて軽量の車両である。

安全性については、耐火災安全性を特に強化してあるほか、ATC(自動列車制御システム)、故障モニタをはじめとする各種安全装置を設け、万全を期している。

電車の外観を図1に、電車の主要仕様を表1に示す。

2.2 居住性の向上

室内の接客設備をはじめとして、乗客の居住性向上には格別の注意が払われている。



図1 米国ジョージア州MARTA向け電車の外観 前頭の腰部にはブルー、イエロー、オレンジの米国ジョージア州MARTA(アトランタ市交通局)のシンボルカラーを配して、周囲にFRP(ガラス繊維強化プラスチック)製マスクで縁どったアクセントを付け、車体も丸みをもったスマートなデザインとしている。

表1 米国MARTA向け電車の主要仕様 ステンレス鋼製車体で、車長22.8m、車幅3.2mの大形車両で、自重36.7tは最軽量車両として位置付けされるものである。制御は電機子及び界磁チョップ制御方式を採用している。

項 目	仕 様
車 種	全ステンレス鋼製2軸ボギー電動客車
電 車 編 成	MC1(A車)+MC2(B車)2両固定、最大8両編成
軌 間	1,435mm
電 気 方 式	直流750V、第三レール方式
自重及び定員	自重:36.7t、定員(座席):68人/両
車 体 寸 法	幅3,200mm×長さ22,860mm×高さ3,607mm
心皿中心間距離	16,002mm
常用最高速度	112km/h(70mph)
加 速 度	4.8km/h・s(3mphps)
減 速 度	4.8km/h・s(3mphps)
制 御 方 式	電機子及び界磁チョップ制御方式、他励磁直流分巻電動機(136kW×4/両)
制 動 方 式	回生ブレーキ、電気ブレーキ及び空気ブレーキ併用方式
補 助 電 源	DC-DCコンバータ:直流650V、バッテリー:直流37.5V
空 調 装 置	直流電動機駆動セパレート形(27,000kcal/h×2)
連 結 装 置	編成端:電気、空気連結器付き自動連結器、自動解結式 固定編成間:棒式連結器
自 動 運 転	ATC(自動列車制御システム)

* 日立製作所機電事業本部 ** 日立製作所笠戸工場

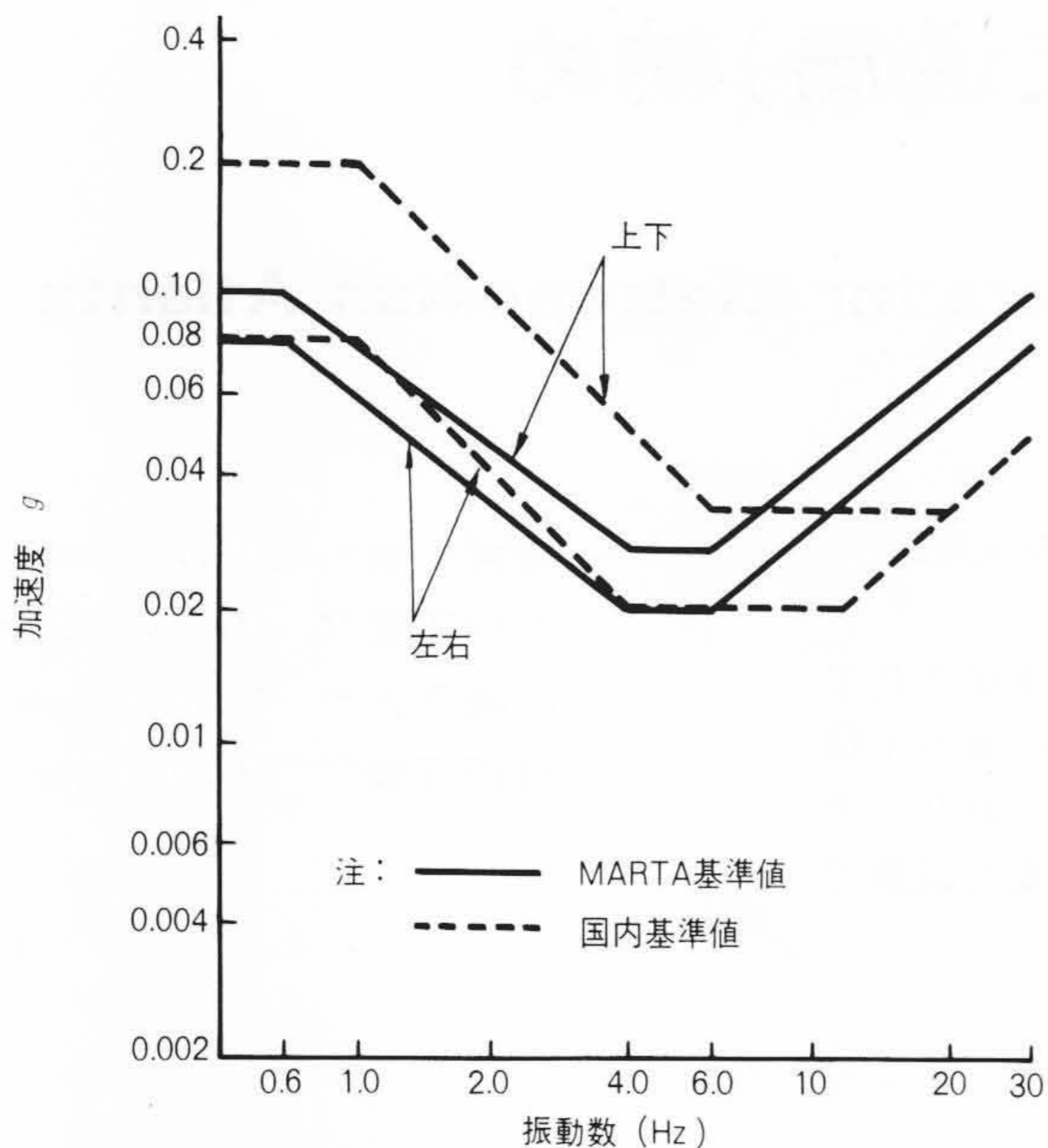
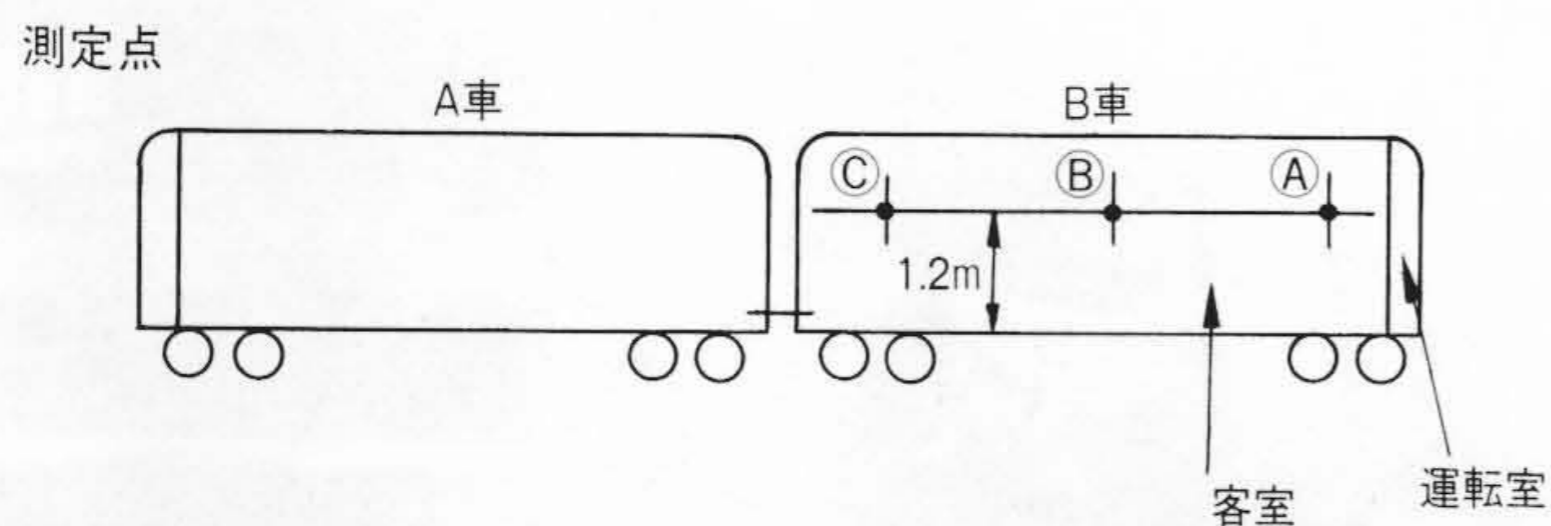


図2 乗り心地基準値 MARTA基準値は低い振動数で国内基準レベル(乗り心地係数1)を上回っている。



規制値と実測結果

規 制 値	停止中	走行中(112km/h)		
	65以下	70以下		
実測結果	(A)	63	67	66
	(B)	62	68	70
	(C)	63	67	66
測 定 車	B車	(B車先行) B車	(A車先行) B車	

注: 単位 (dBA)

図3 室内騒音の規制値と実測結果 各騒音値は、通勤用電車としては非常に低いものである。騒音源となる駆動装置や床下回転機器は、それぞれ単体で低騒音化してある。



図4 客室内アレンジメント サイドパネルはFRP製、天井はメラミン化粧板サンドイッチパネルの平天井で、空調エアの吐出しはラインフロー式である。腰掛はセミクロスタイプとし、床全面にカーペットを敷いた豪華な造りとなっている。

乗り心地向上のため、台車の軸ばねにシェブロンゴム、まくらばねに空気ばねを用いたばね系の構成とし、図2に示す基準値をクリアできるものとした。

室内の低騒音化のため、車体の側壁、屋根の内面には特殊なダンピングコートを塗布し、床は二重構造として、かつ室内の床全面にカーペットを敷き吸音性を高め、図3に示すように非常に静粛な室内となっている。図4に客室内アレンジメントを示す。

3 車両構体の軽量化

3.1 軽量化レベル

車両構体の軽量化については、最近、耐応力腐食割れ性の優れた高抗張力のステンレス鋼(SUS301L)を使用し、独自の塑性加工技術を組み合わせ、信頼性の高い高精度の強度解析技術を駆使して薄肉構造化設計を行ない、アルミニウム合金製に近い質量の軽量ステンレス製構体を構成する技術¹⁾が確立した。

MARTA向け電車の構体には、この技術を全面的に適用するとともに、更に軽量化を進めて構体質量6.8tを達成した。

従来の代表的なアルミニウム合金製構体、ステンレス鋼製構体及び既開発の軽量ステンレス製構体との質量レベルの比較を図5に示す。

3.2 軽量化の手法

構体質量の軽量化のためには、使用材料の巧みな選定、剛性や強度解析の高精度化による部材配置の適正化、及び製作・組立技術の向上が必要である。

主材料としては、部材の薄肉化を図るために高抗張力ステンレス鋼(SUS301L)を使用し、部分的にアルミニウム合金その他も併用した。薄肉化に伴うひずみ発生抑制のため、スポット溶接を主として使用する組立方式とし、独自の塑性加工技術を活用して製作の合理化を図った。

また、構体部材の薄肉化による剛性低下、局部応力の増大、座屈応力の低下などを防止するために、日立製作所で開発した対話形構造解析プログラム“HIDESS”(Hitachi Interactive Design System for Structure Analysis and Strength Evaluation)を活用して、部材配置及び部材寸法の適正化を図った。

3.3 軽量構体の構造

構体は、台枠の車端連結器取付部、台車との結合部、横は

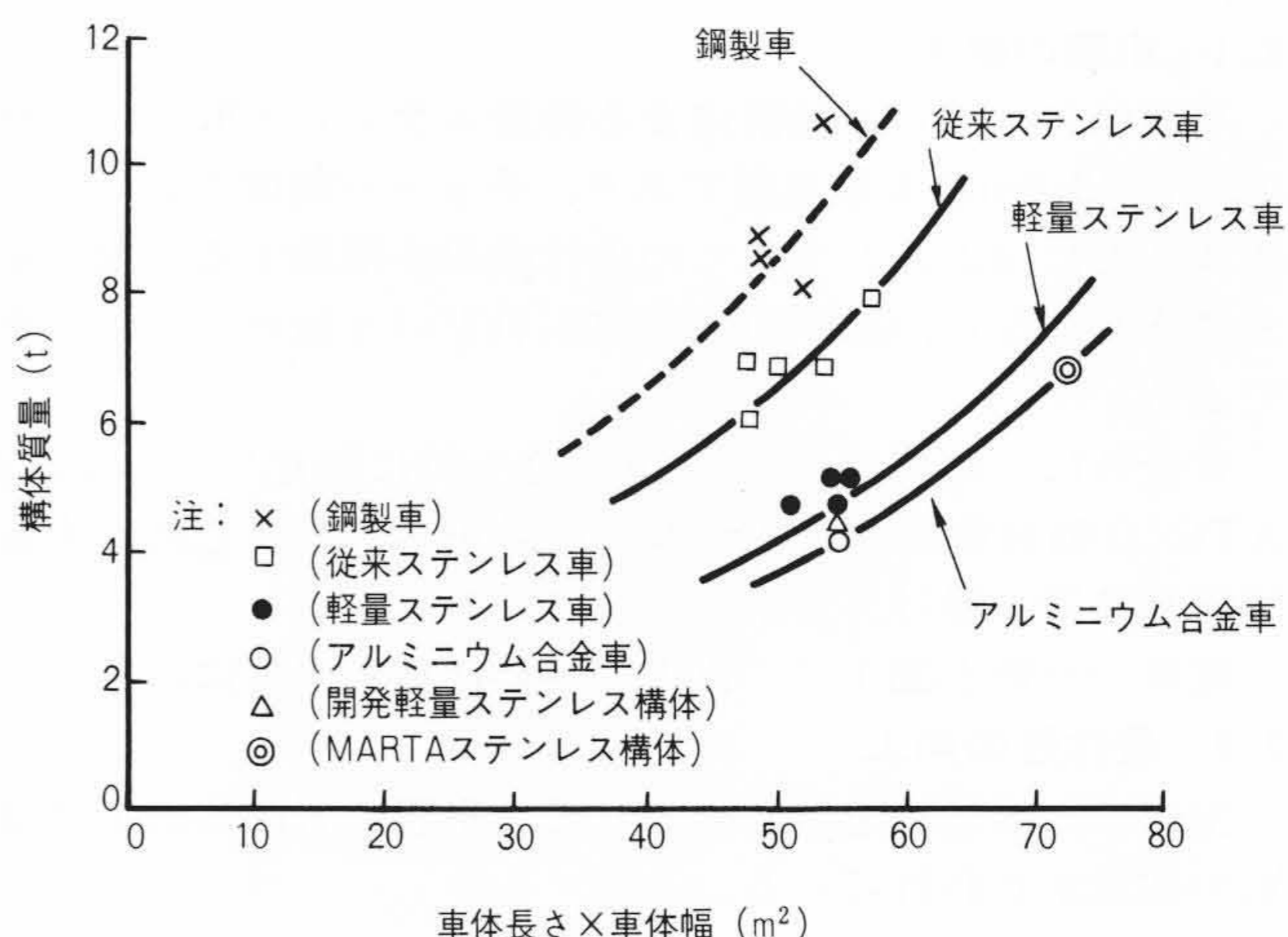


図5 各種構体質量レベルの比較 MARTAのステンレス構体質量は、最軽量レベルのアルミニウム合金車並みの構体質量となっていることが分かる。

り及び床下機器取付部を除いては、全面的に高抗張力ステンレス鋼板(SUS301L)を使用している。

主な構造とステンレス材料の使用区分を図6に示す。

側外板はMARTAの既存車との外観デザインの統一を図るために1.2mm板厚のコルゲート板としたが、屋根板には0.8mm板厚の日立独自の長尺ビード出し加工板を使用し、屋根骨組縦けたを省略し軽量化を図った。このビード加工板は、ビード末端部のかぶせを必要としないため、防水性及び外観出来栄えが優れているなどの特長をもっている。

側構体の柱などの主要骨組は1.0mm板厚として、L形断面を採用し、座屈強度及び剛性を保ちながら軽量化を図っている。骨組同士の結合は、構造が簡単で、ひずみ発生抑制と窓隅部などの応力緩和に優れた立体骨組継手を採用し、ほぼ全面的にスポット溶接で結合する方式とした。

3.4 構体強度

構体は、表2に示す負荷荷重条件を満足する強度をもつが、これは従来の国内の通勤用電車を大幅に上回る強度である。この構体は、車体デザイン上、側構の腰部が丸みをもった構造となっており、軽量化に伴う部材薄肉化に加えて、更に垂直荷重負荷時に面外変形を生じて、剛性低下が増大する傾向があり、前述のように“HIDESS”を使用して詳細な精度の高い解析を行ない、剛性低下を抑えるように構造を適正化した。

また、量産車の構体製作に先行して、強度確認用のダミー構体を製作し、各種負荷条件で荷重試験を行ない、十分な強度をもつことを確認した。図7に垂直荷重を負荷した場合の構体各部の応力と変形量を、“HIDESS”による強度解析値と荷重試験実測値を比較して示す。

このほかに、最高運転速度112km/hでの正面衝突時の解析も実施し、発生する損傷の程度の把握も行なった。

表3に、軽量構体の特性値(実測値)をまとめて示す。

4 車体の安全性の強化

近年、車両の火災に対する安全性の強化についての要求が高まりつつあり、MARTA向け電車ではそのニーズに対応するため、使用される非金属材料の見直しを材料選定の原点に立ち戻って実施し、また、床構造については特に耐火災安全

表2 主要荷重試験項目と荷重条件 床下機器ブラケットの荷重条件は、従来の車両に比べて安全のため非常に厳しく設定しており、実車荷重試験で強度確認を実施した。

種類	荷重条件		許容値
	荷重値		
垂直等分布	(空車重量243kN)+132kN {(25.3×10 ³ kgf)+18.6×10 ³ kgf} 座席定員×4		発生応力は耐力の50%以下 車体中央のたわみ12.7mm以下 振動加速度0.2gでの疲労限度
	座席定員×2.5		
車端圧縮 + 垂直等分布	890kN{90.7×10 ³ kgf} +182kN{18.6×10 ³ kgf} (アンチクライマー作用) 国内車両では規定なし		発生応力は耐力の90%以下 耐力限度内
	779kN{79.4×10 ³ kgf} +182kN{18.6×10 ³ kgf} (カブラー作用) 国内通勤車では、 343kN{35.0×10 ³ kgf}		
四点支持及び三点支持ジャッキアップ+台車つり	248kN{25.3×10 ³ kgf} +115kN{11.7×10 ³ kgf} 国内車両では規定例なし		発生応力は耐力以下
床下機器 ブラケット	上下	3g 0.3g	破損変形しないこと。
	前後	6g 0.3g	
	水平	2g 0.3g	

注：下欄は従来車の例を示す。

性に優れた構造を実験による確認を経て採用した。

4.1 非金属材料の耐火災安全性強化

一般に、電車に使用される非金属材料の火災に対する安全性を増すためには、下記の各項目が考慮されなければならない。

- (1) 着火しにくく、炎の進展が遅いこと。
- (2) 燃焼時の発熱量が少ないこと。
- (3) 燃焼時に有毒ガスを発生しないこと。
- (4) 燃焼時の煙の発生が少ないこと。

MARTA向け電車では、上記の各項目について検討を加え、非金属材料の使用部位、使用量に応じて、難燃性、低発煙性を表4に示すように厳しく規制した。材料の選定に当たり、評価できるデータのないものについては、米国内の公的な試験機関に依頼して試験を実施した。評価基準はすべて米

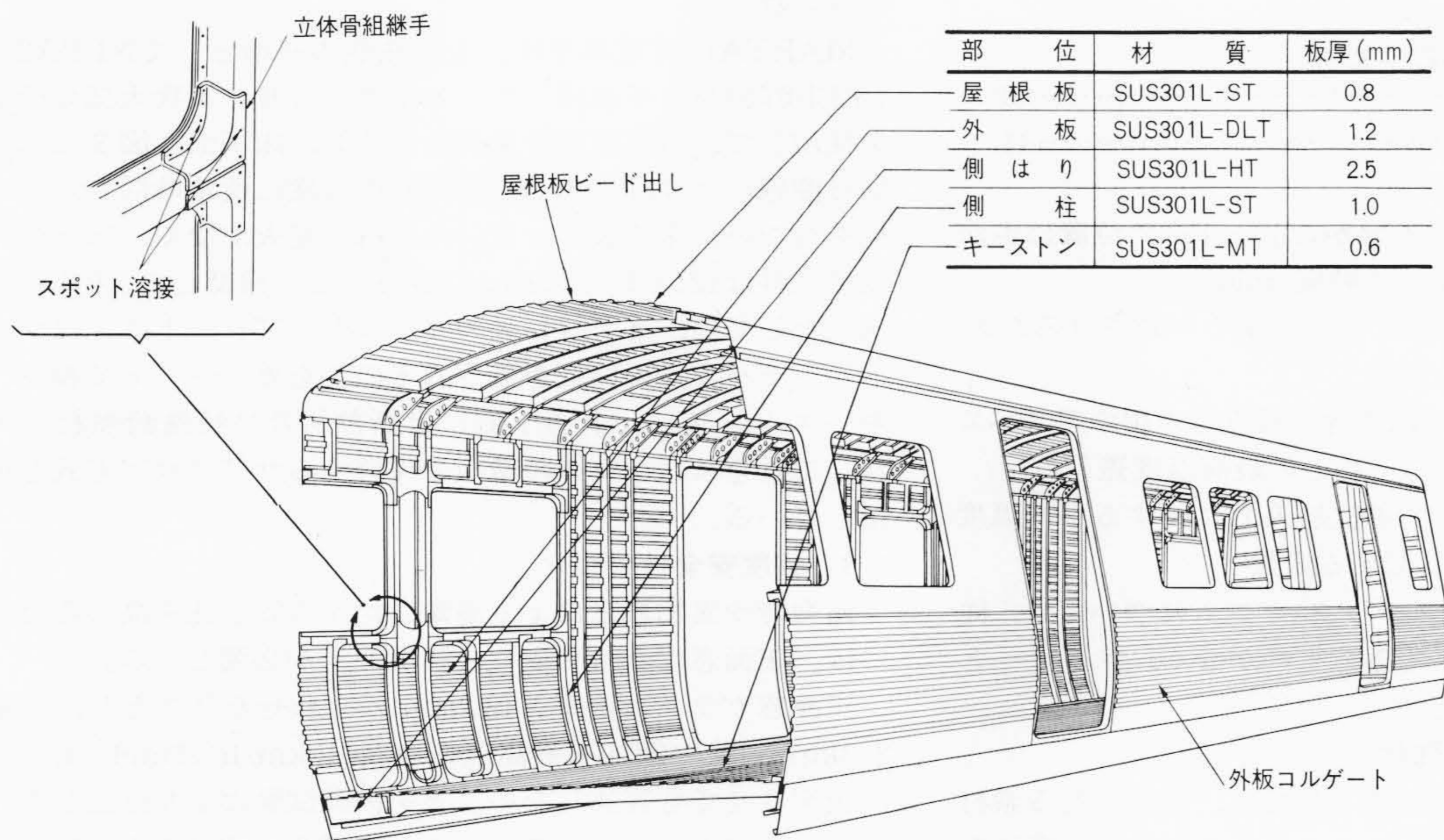


図6 軽量構体の構造と使用材料 ステンレス鋼材には高抗張力極低炭素材を採用し、骨組は立体骨組継手を用いてスポット溶接で組み立てられる。

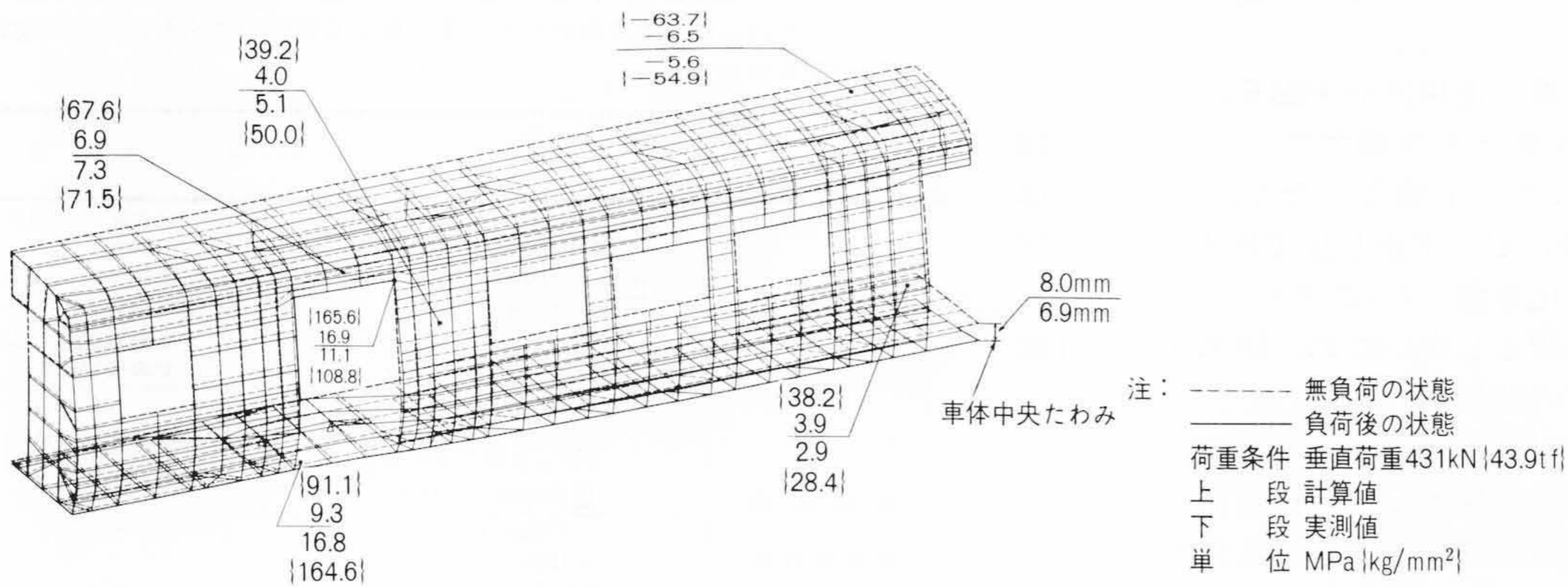


図7 垂直荷重によるFEM計算値と荷重試験実測値の比較 本図は車体の変形状態を示すものである。公称応力部は計算値と実測値は比較的よく合っているが、開口隅部は応力集中の影響がでている。

表3 米国MARTA向け電車の軽量ステンレス構体の特性値 構体質量目標値6.8tを達成し、曲げ剛性も所期の目標を満足した値となっている。

項目	特性値
相当曲げ剛性	0.79GN・m ² {0.81×10 ¹⁴ kgf・mm ² }
相当ねじり剛性	0.25GN・m ² {25.5×10 ¹² kgf・mm ² }
曲げ固有振動数	4.4Hz(空車重量時)
ねじり固有振動数	3.8Hz(空車重量時)
構体質量	6,800kg

国基準により定量化している。一例として、同表に示す発煙性(Ds値)は、燃焼による発煙量を比光学濃度で示したもので、燃焼性(Is値)は所定の熱放射源に対する材料の燃焼進行度を展炎指数で示したものであり、次式で表わされる。

$$\text{比光学濃度 } D_s = G[\log_{10}(100/T) + F] \dots\dots(1)$$

ここに

- G: V/AL
- V: 閉じたチャンバの体積(m³)
- A: 供試体の暴露面積(m²)
- L: 煙が通る光路の長さ(m)
- T: 感光計から読み取られた光透過率(%)
- F: 係数

$$\text{展炎指数 } I_s = F_s Q \dots\dots(2)$$

ここに

- F_s: 展炎係数
- Q: 放熱要因
- $F_s = 1 + \frac{1}{t_3 - t_0} + \frac{1}{t_6 - t_3} + \frac{1}{t_9 - t_6} + \frac{1}{t_{12} - t_9} + \frac{1}{t_{15} - t_{12}} \dots\dots(3)$
- $Q = C \cdot \frac{T}{\beta} \dots\dots(4)$

ここに

- t₃~t₁₅: 試験片着炎先端から3"~15"の位置に炎が到着するまでの時間(min)
- C: メートル法換算前に得た結果と一致させるために選んだ任意の定数
- T: 試験片の温度-時間曲線と目盛定め用のアスベストセメント試片のそれとの最高温度差(°C)
- β: 目盛定めバーナの単位熱入力に関する平均温度上昇(°C)/装置に関する定数

FRP(ガラス繊維強化プラスチック)とゴムについては、従来品では、規制目標をクリアできるものがなく、メーカーと共同で新たな材料を開発した。

4.2 床構造の耐火災安全性強化

床構造に要求される耐火災性能としては、使用される素材の表面が難燃性、低発煙性であることとともに、床下機器を発火源とした火災が発生した場合に、客室内の乗客が安全な

表4 非金属材料の発煙性及び燃焼性規定 米国基準に定められた試験方法によって得られる定量的な数値を、材料の採否の判定規準として使用している。

対象品目	基準	発煙性基準			燃焼性基準	
		規定値(Ds値)			基準	規定値
		1.5分	4分	Ds max		
メラミン化粧板	NFPA-258	35	280	300	ASTM E162	35
FRP内張り	NFPA-258	35	280	300	ASTM E162	35
グラスファイバ	NFPA-258	-	100	300	ASTM E162	25
ゴム	NFPA-258	35	280	300	ASTM C542	●15分間炎さらし後炎の伝播、進行がないこと。 ●残存長さ測定
フレキシブルダクト	NFPA-258	-	100	300	ASTM E162	35
サウンドダンピング材	NFPA-258	-	100	300	ASTM E162	25
電線クリート(ニコライト)	NFPA-258	35	200	300	ASTM E162	35
腰掛クッション材	NFPA-258	-	175	300	ASTM E162	10
布張織物	NFPA-258	-	250	250	ASTM E162	35
電線被覆材	NFPA-258	35	200	300	UL-758 FP-1	炎除去後の自己消化時間: 60秒以下

注: 略語説明 NFPA(National Fire Protection Association)
ASTM(American Society for Testing Materials)
UL(Underwriter's Laboratories Inc.)

場所に退避できるまで構造体が着火せずに保持できることが挙げられる。

MARTA向け電車では、上記性能の基準としてNFPA251(米国消防規格)を適用した。本基準により、実物大部分模型を使用して、所定荷重を載荷したうえ、床下面を図8に示す加熱曲線により加熱し、最高927°Cの温度に所定時間さらす試験を行ない、床の表面に置いた木綿の発火がなく、床表面の温度上昇は121°C以下に抑えられることを確認した。床構造の構成としては、ステンレスのキーストンプレートの上にサンドイッチパネルの床板を置き、その上をカーペットで覆い、キーストンプレートの下側には断熱材及び特殊断熱材を入れ、これをステンレスの薄板で保持するサブフロア方式を採用している。

4.3 強度安全性の強化

衝突時や異物飛来による衝撃に対する安全性を高めるためには、正面窓ガラスや妻柱の強度向上が必要となる。

正面窓ガラスは総厚さ18.3mmの合わせガラスとし、質量2.3kg(5 lb)の鋼球を最高運転速度112km/h(70mph)走行時に衝突させても貫通しないことを模擬試験により確認した。更に、運転士の安全を考慮して、正面窓ガラスの内側には万一衝突物体がガラスを貫通したときの保護用として合成樹脂

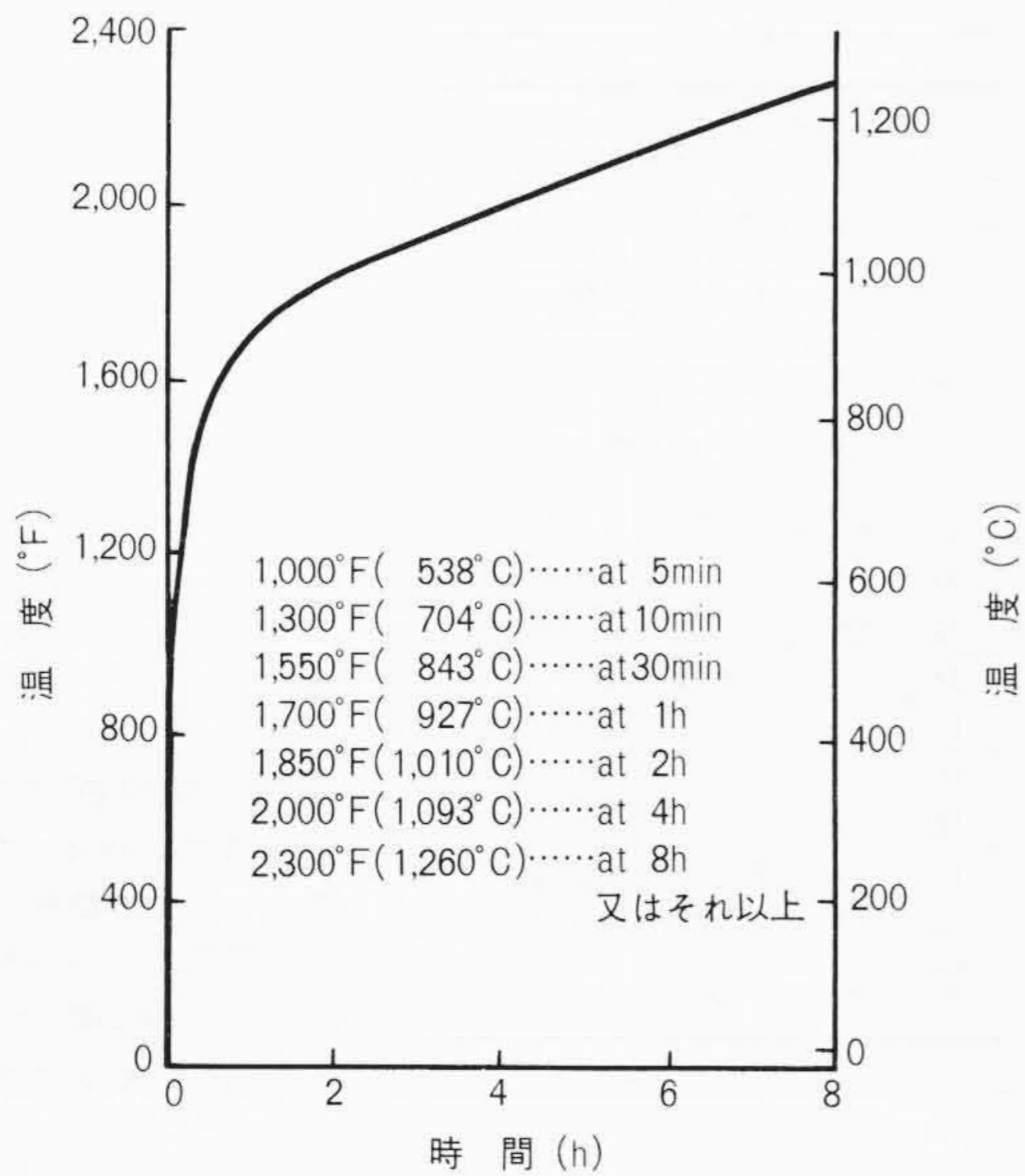


図8 床構造耐火試験加熱温度曲線 本加熱温度曲線は、NFPA.No. 251規格に基づくもので、Max.927°C(1,700°F)-1時間の耐火試験が実施された。

製のスポルシールド板を設けて万全を期してある。

一方、妻構体には強固な妻柱及び隅柱を設け、アンチクライマを設けていることと合わせて衝突時の車体変形をできるだけ抑える構造として、安全性を高めてある。

5 台車の軽量構造

台車は内側軸受方式として台車枠を小形化し、また車軸は中空軸として軽量化を図り、従来形の台車に比べて20%の軽量化を達成した。質量比較を図9に示す。

台車の主要仕様を表5に、全体組立を図10に示す。

軸ばねにシェブロンゴムを使用した内側軸受方式の採用により、台車の外形寸法が小さくなり、台車の側面部に車体側の空気ダクトが通せるなど、床下機器ぎ装にスペースが有効に活用できるとともに、台車の基礎ブレーキ装置の点検が車側から容易に行なえるメリットも生まれた。

台車枠については部材の薄肉化などの軽量化を行なっているが、強度信頼性を確認するために、実物疲労試験を含む各種の荷重試験を実施し、万全を期した。

静荷重試験としては、上下2g、左右0.37g、前後0.25gの荷重の同時負荷を行なって、応力値が許容範囲内にあることを確認した。また、上下1g±0.35g、左右±0.37g、前後±0.25gの荷重の組み合わせで実物疲労試験を行ない、2×10⁶回の繰返しに耐えられることを確認した。

駆動装置も小形化をねらって、ワッブル継手を用いた半つり掛け式の平行一段減速機方式とした。ワッブル継手は、中心線の相対変位がなく、継手中心に対する角度変化だけ許容されるので、従来のカルダン方式に比較して小形でありながら大きなトルク伝達が可能となった。

6 車両システム

6.1 システム構成

MARTA向け電車は、製作に当たり米国政府資金を使用するため、バイアメリカ法の適用を受けることになり、システムを構成する主要部品(主制御電気品、補助電源装置、連結器、空気調和装置、ブレーキ部品、腰掛など)の大半を米国製で調達し、それらを車体へ取り付ける最終組立も米国内で行なう

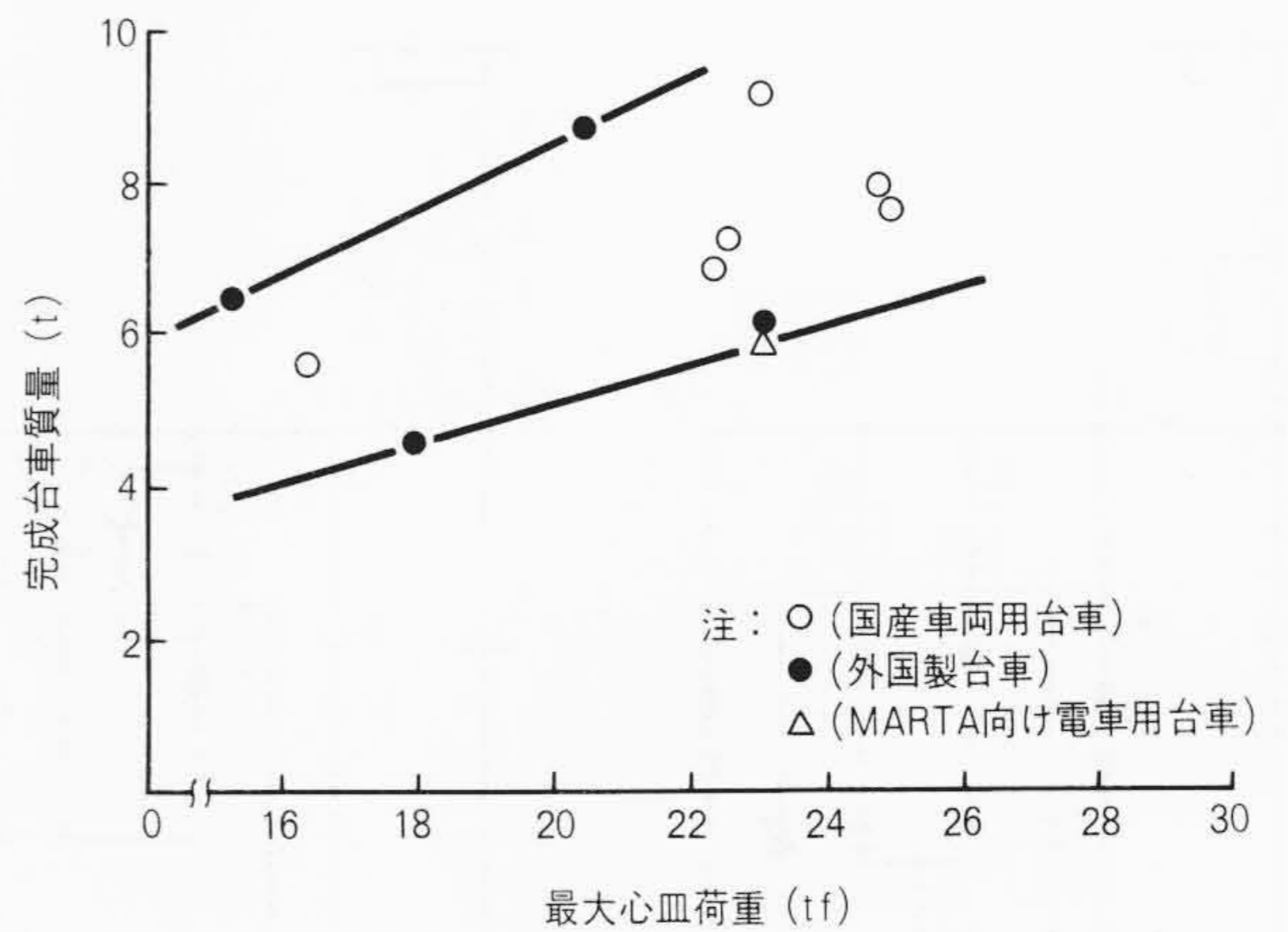


図9 各種台車の質量比較 台車質量を心皿荷重に対比して示しており、従来の実績台車と比較してMARTA向け台車は非常に軽量化されている。

表5 軽量台車の主要仕様 内側軸受方式の台車にしたことにより、非常に小形・軽量化された寸法、仕様となっている。

項目	数値
軸間距離	2,209.8mm
軌間	1,435mm
車輪径	876.3mm
最大幅	2,300mm
台車高さ(レール面から)	911.2mm
台車総質量(駆動装置を含む)	5,790kg
軸ばね左右間隔	1,149.4mm
まくらばね左右間隔	1,282.7mm
最大心皿荷重	23tf
最高車速	112km/h

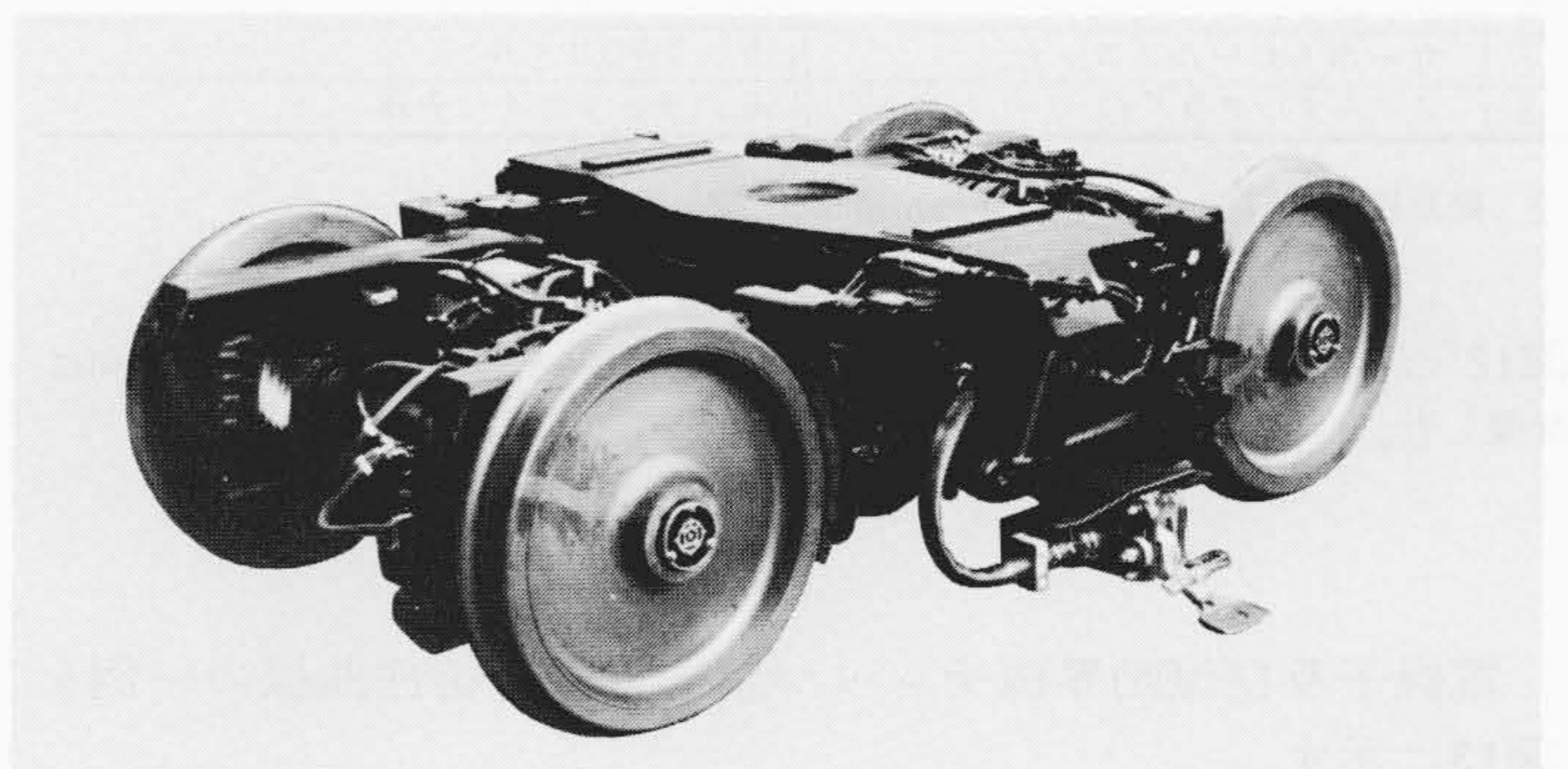


図10 軽量台車の外観 内側軸受方式で軸ばねにシェブロンゴムを、まくらばねに空気ばねを採用し、小形・軽量にまとめられている。

こととなっているのが大きな特徴である。

主制御電気品は、米国のギャレット社製を採用した。主回路は図11に示すとおりであり、回生ブレーキ付き他励界磁チョップ制御車であるが、回生不能時に備え、発電ブレーキを設けている。全車両が制御電動車で、A車とB車の2両がペアになって使用されるが、バッテリー及び空気圧縮機が2両に1台であることを除けば、全く同一車両であり図12に示すように車両中央部にも機器を並べた3列配置としている。

6.2 機器の安全性

安全のため、多数の保護装置を設けたシステムとなっている。例えば、主電動機、ブロワ用電動機、冷房用電動機、空気圧縮機用電動機、ドア開閉用電動機など、ほとんどの電動機に過温度保護装置が取り付けられている。

6.3 主制御部品

(1) 主電動機

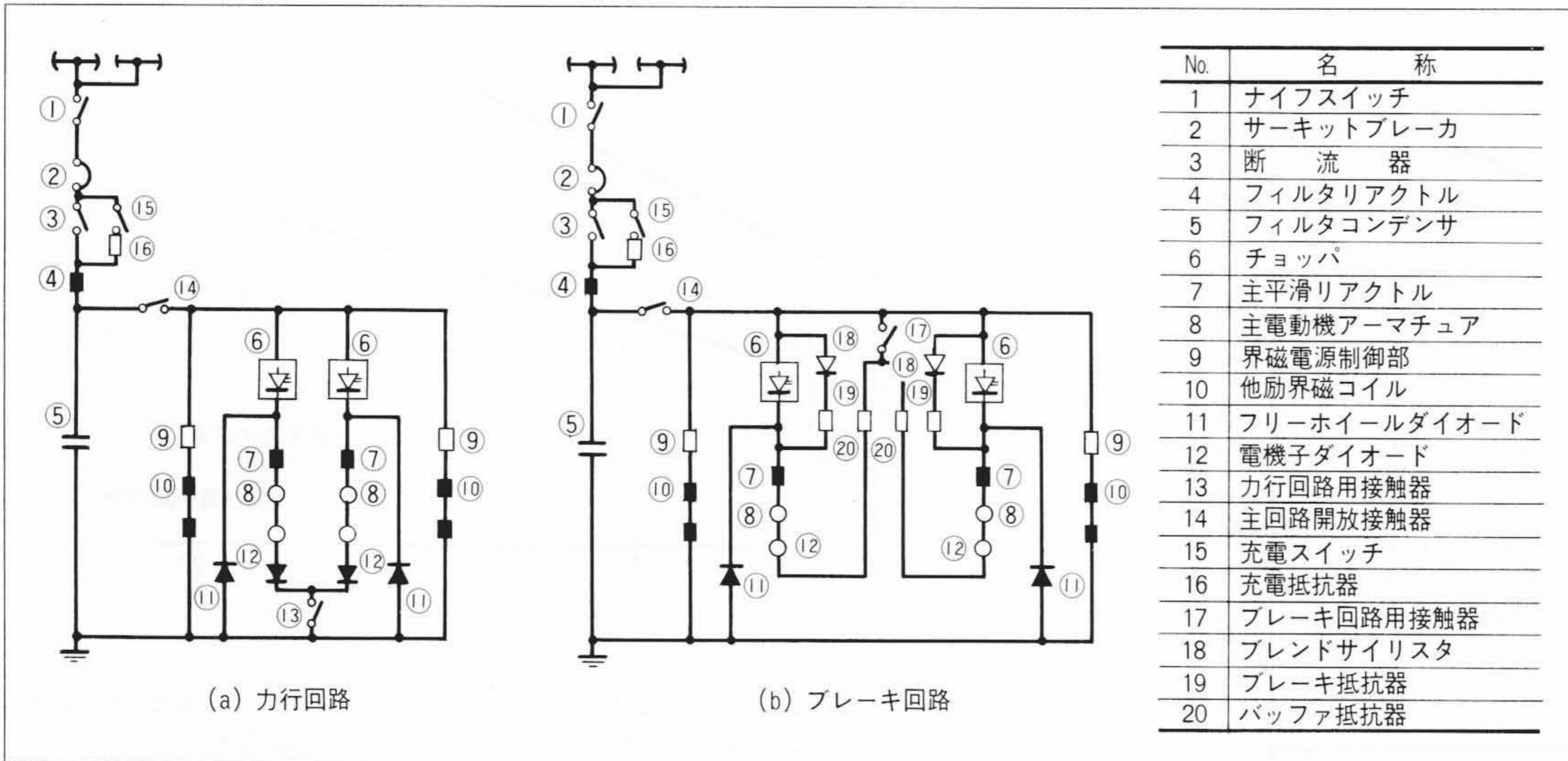
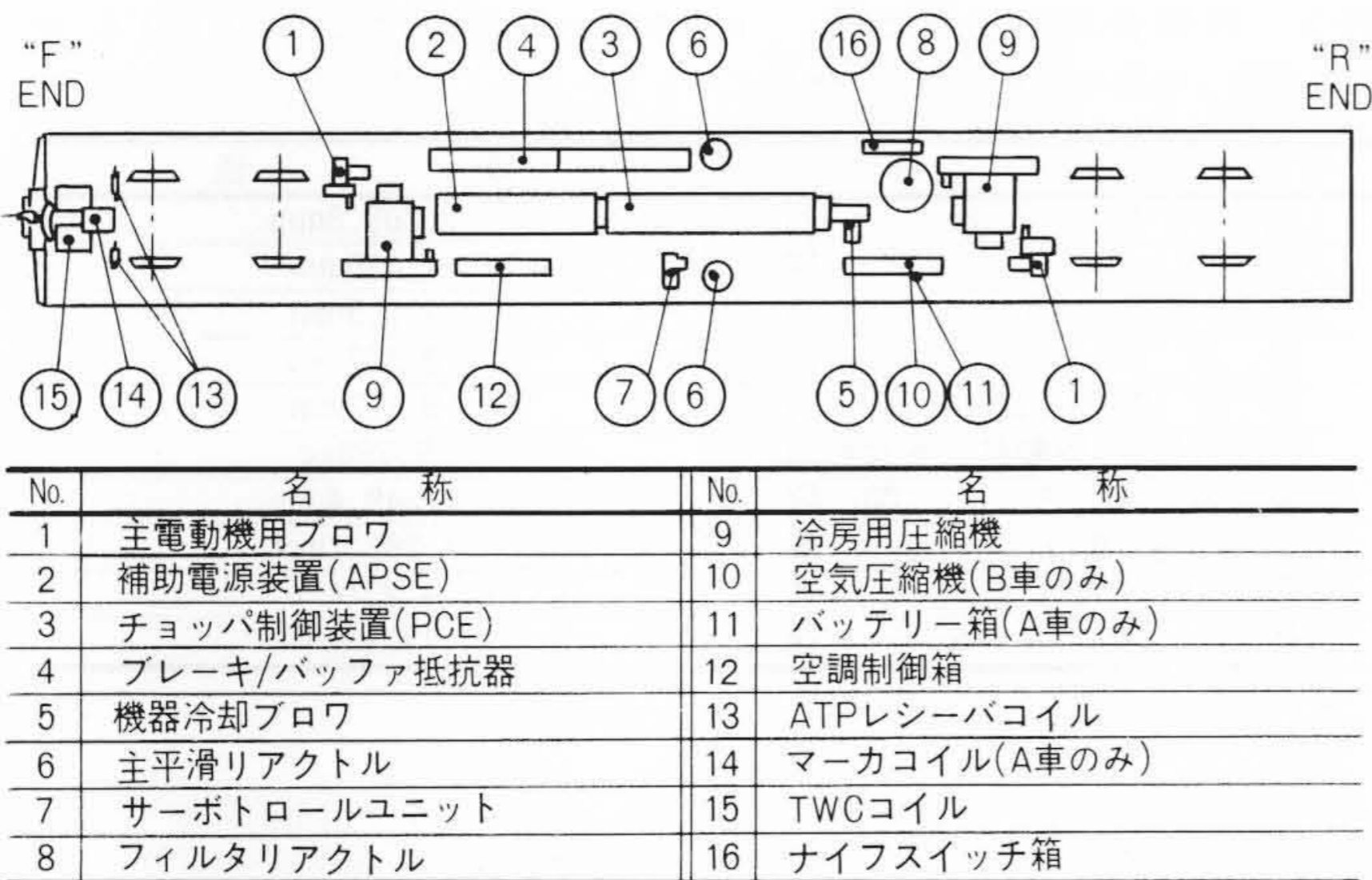


図11 主回路つなぎ
主回路の力行及びブレーキ回路についての簡略つなぎを示す。回生ブレーキ付き他励界磁チョッパ制御で、発電ブレーキ抵抗器も設けてある。



注：略語説明 ATP(Automatic Train Protection)
TWC(Train to Wayside Communication)

図12 床下機器配置 搭載機器が多いため、狭いスペースの中で3列に配置した。

電機子及び他励界磁チョッパ制御方式、特性曲線の一例を図13に示す。

(2) フィルタリアクトル及び主平滑リアクトル
コイル外部をガラステープで絶縁し、ワニス処理した外装(円筒形)自然冷却方式

(3) チョッパ装置
ブロワによる強制冷却方式であり、ゲート制御部だけ運転室内に分割設置。

6.4 高圧補助回路

ヒータ、ブロワ、エバポレータファン及び空気圧縮機用電動機の電源としては、DC-DCコンバータによりライン電圧(750V)を安定した電圧(650V)に変換して使用し、補機の安定した性能確保を図っている。

6.5 ATC装置

下記3種のサブシステムがあり、3種類の車上子により地上側との信号授受を行なう。地上信号に対する比較判定回路は、フェイルセーフの点で多くの配慮がなされた一重系とした。

- (1) ATO(Automatic Train Operation)：列車速度調整及び自動停車
- (2) ATP(Automatic Train Protection)：適正な列車間隔

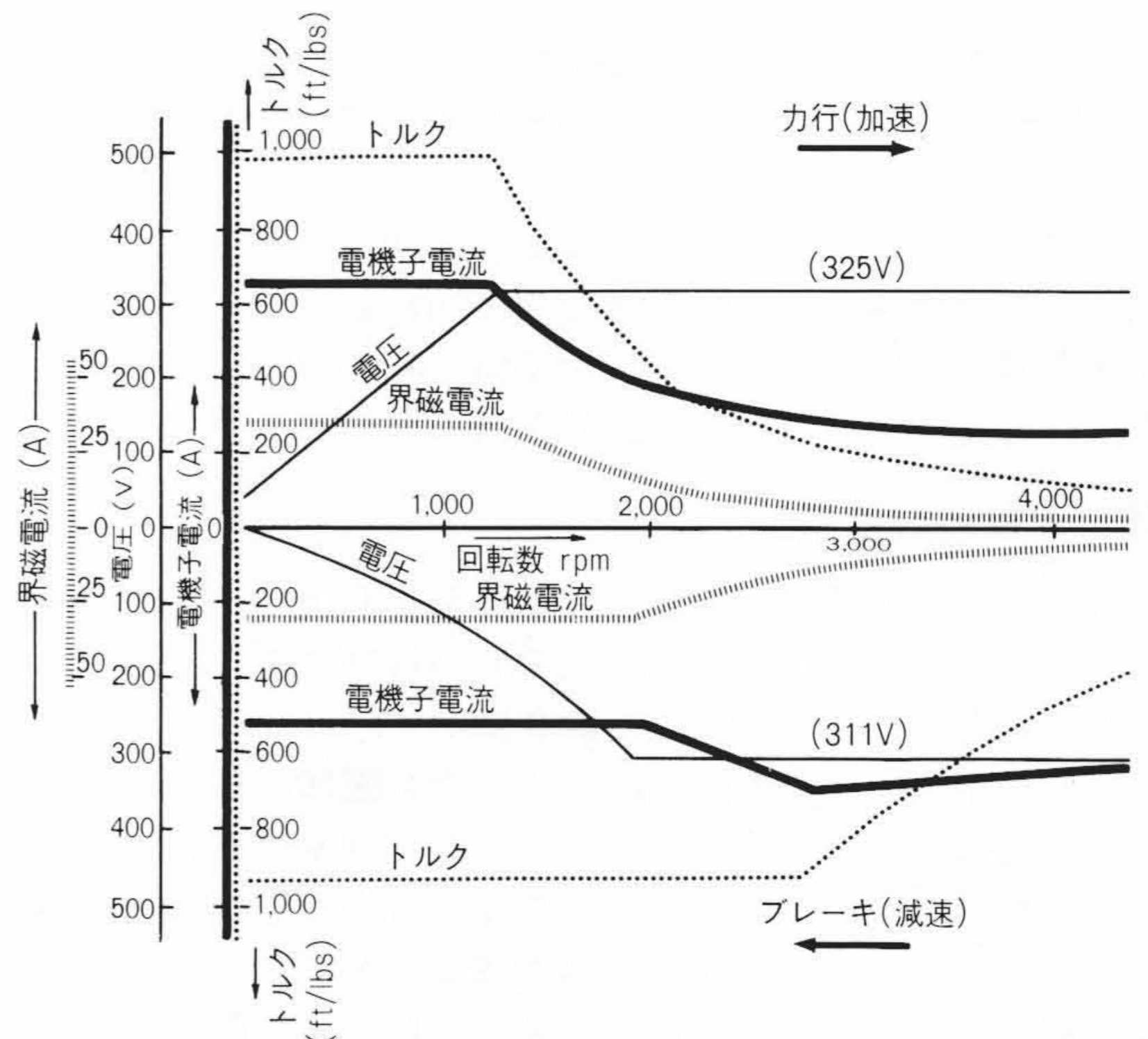


図13 136kW主電動機特性曲線 他励界磁直流電動機であり、最大加速電流は637A、最大ブレーキ電流は720A、常用最高車速112km/h時の回転数を4,239rpmとしている。

による安全走行

(3) ALS(Automatic Line Supervision)：司令室への列車情報(列車番号、行先、編成両数、停車中、発車準備完了など)の伝達

7 結 言

米国MARTA向け電車の仕様及び特徴について述べた。ステンレス製電車として超軽量の部類に属し、耐火性、快適性で高度の性能をもつこの電車は、1984年12月から営業運転を開始している。

今後、電車の軽量化、耐火性、快適性などがより強く要求される中で、この電車の設計、製作を通して得られた技術と経験は非常に貴重なものとする。

参考文献

- 1) 藤田, 外：軽量ステンレス車両構体の開発, 日立評論, 64, 12, 905~910(昭57-12)