

リニアモータ方式の小断面地下鉄電車の開発

Development of Linear Motor Driven Railcars for Smaller Cross Section Tunnel Subways

地下鉄のトンネル建設費を低減するために、トンネル断面積を小さくし、急こう配路線と急カーブ路線を走行できる鉄車輪支持によるリニアモータ駆動の電車を開発し、国内で最初の試験走行に成功した。その結果、このリニアモータカーの開発当初に設定した目標は達成され、実用化への見通しが得られた。このリニアモータカーの研究開発の背景と、この電車を実現させた主要要素技術であるリニアモータ、リアクションプレート及びインバータについて述べる。

安藤正博*	Masahiro Andô
磯部栄介**	Eisuke Isobe
辰巳 保***	Tamotsu Tatsumi
秋浜雄一****	Yûichi Akihama
安波政弘****	Masahiro Yasunami

1 緒 言

現在、大都市では大量輸送機関である地下鉄が発達しているが、更に、地下鉄の混雑緩和のためにバイパスの役目をする建設費の安い地下鉄で、かつ現在の地下鉄網の間を縫う、きめ細かな補助交通機関の役割をするコンパクトな地下鉄のニーズが高まりつつある。また、人口50万人前後の地方中核都市でも公共交通機関として、建設費が安く、採算性の良い地下鉄の要求がある。

このコンパクトな地下鉄を実現するには、トンネルの建設費を安くするという発想で、次の方法が考えられた。

- (1) トンネル断面積の縮小によるトンネル建設費の低減
- (2) 急こう配路線が計画できることでトンネル長さを短縮することによる建設費の低減
- (3) 急カーブ路線が計画できることでルート建設費の低減

すなわち、トンネルの断面積を小さくできる電車、急こう配路線を走行できる電車、急カーブを低騒音で走行できる電車を研究開発すれば、上記(1)、(2)、(3)の条件を満足でき、建設費を安くできると考えた。

次に、どのような技術的な方式を採用すればトンネル断面積を小さく、急こう配・急カーブ路線を走行できる電車が可能かを検討した。

2 開発すべき地下鉄電車の技術方策

- (1) トンネル断面積を小さくできる電車

トンネル断面積を小さくするために、単に電車客室内の天井高さを低くすることだけでは、乗客が圧迫感を受けてサービスの低下を招く。そこで天井高さを現状のままにし、床下の高さだけを低くする低床形電車の開発が必要となる。このためへん平形状で減速歯車装置などが不要で、かつデッドスペースの小さいリニアモータを採用する方式が適切となる。その結果、従来の回転モータを採用した地下鉄電車(以下、回転モータカーという。)の標準の床面高さ約1.2mに対して、リニアモータを採用するリニアモータカーの床面高さは0.7mとなり、トンネル断面積比は回転モータカーを100とすれば、リニアモータカーは円形トンネル形状で50、箱形トンネル形状で60程度とすることができる。

- (2) 急こう配路線を走行できる電車

リニアモータカーは、鉄車輪と鉄レールの間に生じる粘着力によらず、リニアモータの直接推進力で電車を駆動する非

粘着駆動方式をとっているため、8～9%程度の急こう配走行ができる。したがって、地下鉄を建設するに当たっては、トンネルのルート長を短縮することができ、建設費が安くなる。回転モータカーは特殊な場合を除き、通常3.5%程度のこう配が限度で、地下トンネルが長くなる。

- (3) 急カーブを低騒音で走行できる電車

リニアモータは、回転モータのように電動機の回転力を減速歯車装置などを介して電車の鉄車輪に伝達する必要がなく、鉄車輪はただ単にリニアモータカーの自重だけを支えて、案内走行するだけである。減速歯車装置と駆動装置が不要なため、リニアモータカーの鉄車輪は左右別々に回転する独立車輪構造や、カーブに合わせたセルフステアリング構造にすることが容易である。リニアモータカーはこれらの構造を採用することにより、急カーブでも鉄レールとの摩擦で生じるきしり音を発生せず低騒音走行ができる。したがって、急カーブを走行できるリニアモータカーの地下鉄は、一般道路の交差点直下にトンネルを建設でき、ビルなどの建築物の地下構造物に制限を受けることがなく、ルートの建設費が安くなる。

なお、リニアモータカーの停止ブレーキは、リニアモータの一次側とリニアモータの二次側に相当する地上のリアクションプレートの間に生じる電気ブレーキ力を主としている。したがって、リニアモータカーの鉄車輪の外周踏面形状をフラット状に偏摩耗させることが少なく、そのためリニアモータカーの走行中に鉄車輪のフラット面で鉄レールを打つ音の発生も少なく、低騒音で走行できる電車となる。

3 リニアモータカーの概要

試作したリニアモータカーの外観を図1に、主要諸元を表1に示す。このリニアモータカーは、試験用で研究開発費の制約から1両で走行できるように構成した。すなわち暫定的に電車の床上に機器室を設け、その中に補助電源装置と空気圧縮装置を搭載している。今後、実用化の際は2両を固定編成とし、1両目の床下にリニアモータを制御するインバータを取り付け、2両目の床下に補助電源装置と空気圧縮装置を取り付ける。なお、2両の全部の台車(4個)にリニアモータを取り付けるオールリニアモータカーとする。今回、国内で最初の試運転に成功した鉄車輪支持によるリニアモータカーの主要寸法を図2に示す。客室出入口は片側2箇所に両開

* 日立製作所システム事業部 ** 日立製作所機電事業部 *** 日立製作所日立工場 **** 日立製作所水戸工場



図1 リニアモーターカー 我が国で最初に完成した鉄車輪支持によるリニアモーターカーで、日立製作所の工場内試験線で走行試験中の実況を示す。

き扉を設け、車端寄りの片方を運転室に、他方の車端寄りを機器室にしている。

4 リニアモータ

リニアモータは、構造が最も簡単な片側励磁式誘導電動機とし、ステータに相当するリニアモータ一次側のコイルとコア(以下、コイルとコアの組合せをリニアモータという。)は電車の台車に取り付けられ、ロータに相当するリニアモータ二次側のリアクションプレート(以下、リアクションプレートという。)は軌道の鉄レール間に設置される。リニアモータとリアクションプレートの関係を図3に示す。なお、リニアモータとリアクションプレート間の空間距離(以下、空隙という。)は、15mmである。このリニアモータの1時間定格出力は70kWで、その主要諸元を表2に示す。リニアモータは、台車の軸

表1 リニアモーターカーの主要諸元 我が国で最初に試験運転に成功した鉄車輪支持によるリニアモーターカー(1両)の主要諸元を示す。

項番	項 目	諸 元
1	車 種	2軸ボギー電動客車
2	軌 間	1,067mm
3	電 気 方 式	DC750V(回生時825V), 架空線式
4	自 重	18.2t
5	車 両 寸 法	最大寸法: 幅2,460×長さ12,000×高さ3,045(mm)
6	車両性能	最高運転速度 70km/h
	加 速 度	3.0km/h・s
	減 速 度	常用3.5km/h・s, 非常4.5km/h・s
7	台 車	ボルスタ付き空気ばね台車, 車輪径520mm
8	リニアモータ	70kW×2台/両
9	制 御 装 置	インバータ制御, 電圧形 PWM方式
10	制 動 装 置	電気指令式電空協調ブレーキ方式
11	運 転 盤 装 置	押しボタン方式
12	電 動 発 電 機	6 kVA, AC200V, 二相, 60Hz
13	蓄 電 池	アルカリバッテリー, DC100V, 10AH
14	電 動 空 気 圧 縮 機	水平対向4気筒2段圧縮単動 1,200l/min
15	集 電 装 置	ばね上昇空気下降式シングルアームパンタグラフ

注: 略語説明 PWM(Pulse Width Modulation)

間距離1,700mmのピッチで車軸に支持され、1軸目は球面ころ軸受で車軸に対して1点支持し、2軸目は円筒ころ軸受で車軸に対して2点で支持されている。その結果、車軸とリニアモータの相対位置は2軸目は直角に固定され、1軸目は曲線通過に応じて必要な動きができる構造となっている。また、リニアモータとリアクションプレートの間に生ずる吸着力によるたわみを抑えるため、リニアモータの長手方向に2本のはりを通し、十分な剛性強度を確保している。コイルは2層重ね巻きで、コイルピッチを小さく目にしてコイルエンドは極力短くしている。

また、コイルエンドを、冷却風道とコイル保護を兼ねたステンレス製カバーで覆い、カバーの長手方向の両端に金網を

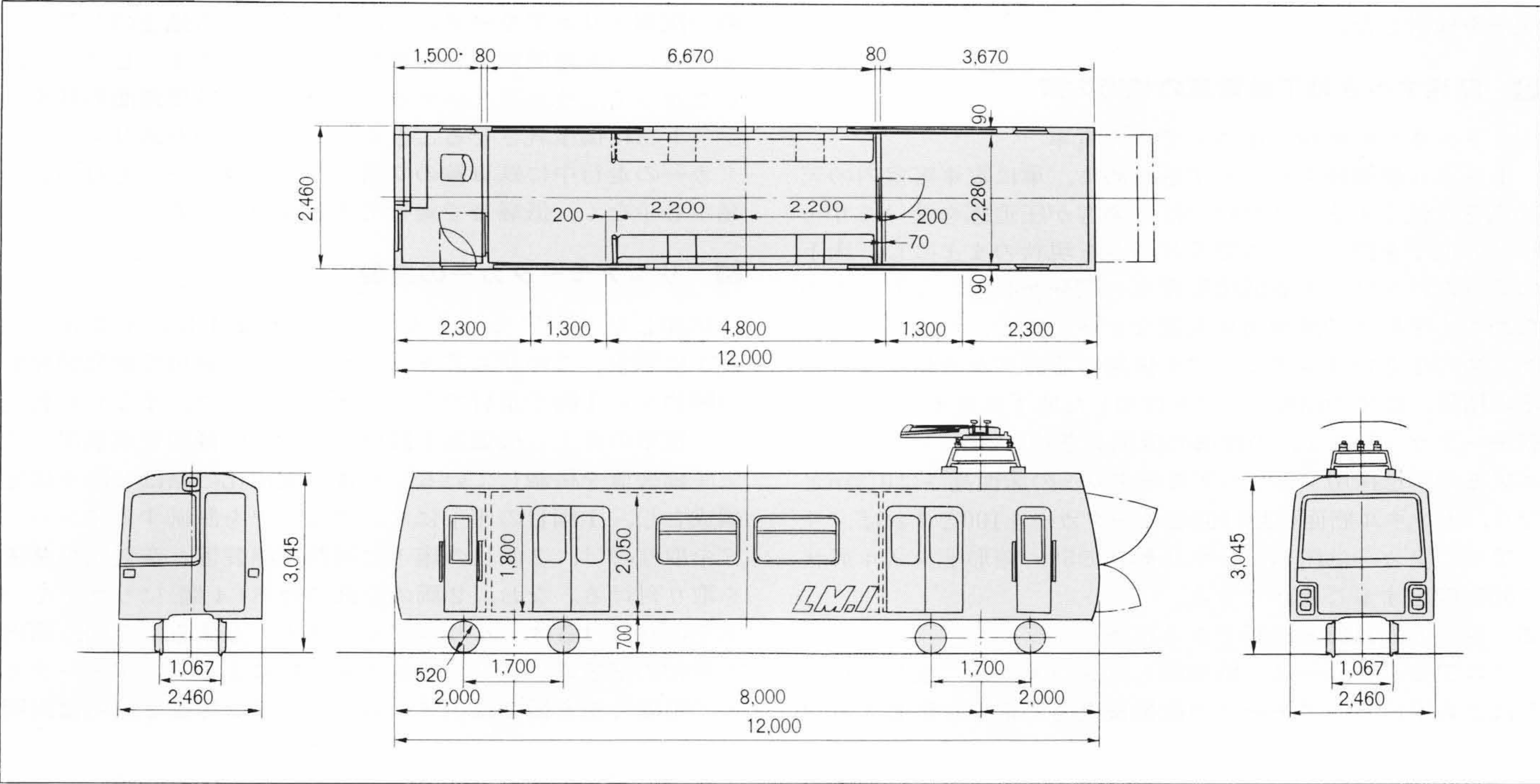


図2 リニアモーターカーの主要寸法 長さ12m, 幅2.46mは、社団法人日本地下鉄協会が発表している標準小形地下鉄システムB方式車両基本仕様による。

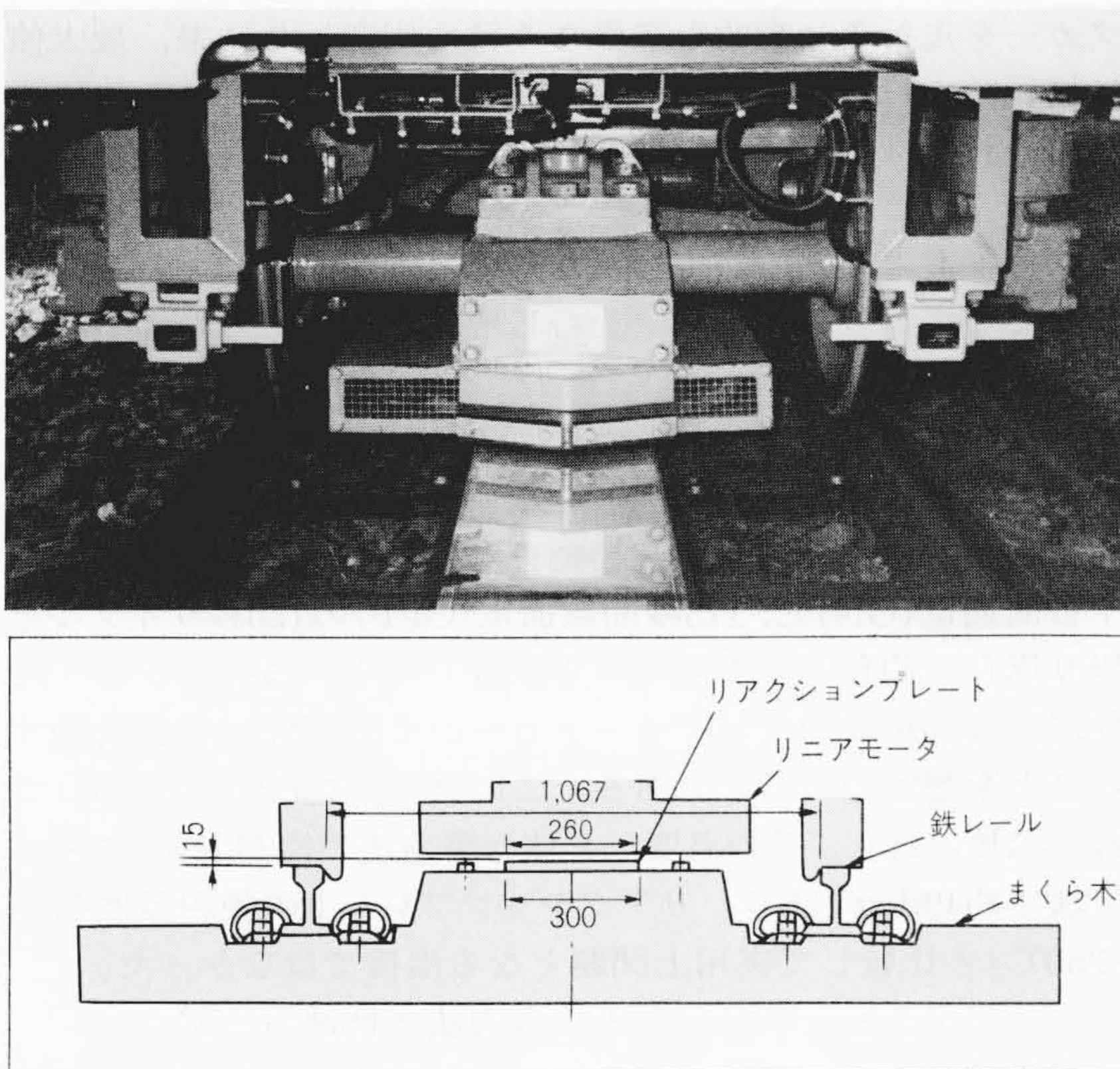


図3 リニアモータとリアクションプレート リニアモータは台車の車輪軸に取り付けられ、リアクションプレートは鉄レール間の位置でまくら木に取り付けられている。

表2 リニアモータの主要諸元 1時間定格出力70kWリニアモータとリアクションプレートの主要諸元を示す。

項番	項目	諸元
1.	リニアモータ(一次側)	誘導電動機形、平板状片側式構造
(1)	定格電圧	AC550V
(2)	1時間定格電流	275A
(3)	極数	8極
(4)	極ピッチ	270mm
(5)	周期速度	38.9km/h
(6)	最大推進力	1,270kg
(7)	最大制動力	1,430kg
(8)	吸着力	2,920kg(起動時)
(9)	絶縁	H種
(10)	コア寸法	幅260×長さ2,400×高さ120(mm)
(11)	コイル最大幅寸法	610mm
(12)	重量	1,250kg
2.	リアクションプレート(二次側)	アルミニウム板(1050)と鉄板(SS41)の複合板
(1)	厚さ寸法	アルミニウム板5mm+鉄板25mm
(2)	幅・長さ寸法	300mm×2,495mm
3.	空隙	15mm

張り、走行風を取り入れる構造としている。以下、この70kWリニアモータの主な試験結果について述べる。

リニアモータとリアクションプレートの空隙を、15mm、20mm、25mmと変化させ、リニアモータカーを力行、惰行、ブレーキの運転パターンで走行させて、各速度のリニアモータ電圧、電流、推進力、ブレーキ力、吸着力及びリニアモータに加えらるる振動加速度をそれぞれ測定した。

(1) 速度と推進力・吸着力の関係¹⁾

空隙15mmでの速度と推進力・吸着力の関係を図4に示す。同図の実線は、このリニアモータを設計する際に算出した値で、また速度に対応して推進力・吸着力の測定値をプロットしている。この結果から、平均起動推進力は設計値の約95%であることが分かった。なお、ブレーキ力のほうも設計値の約95%の値が測定されている。電流の測定値をプロットして

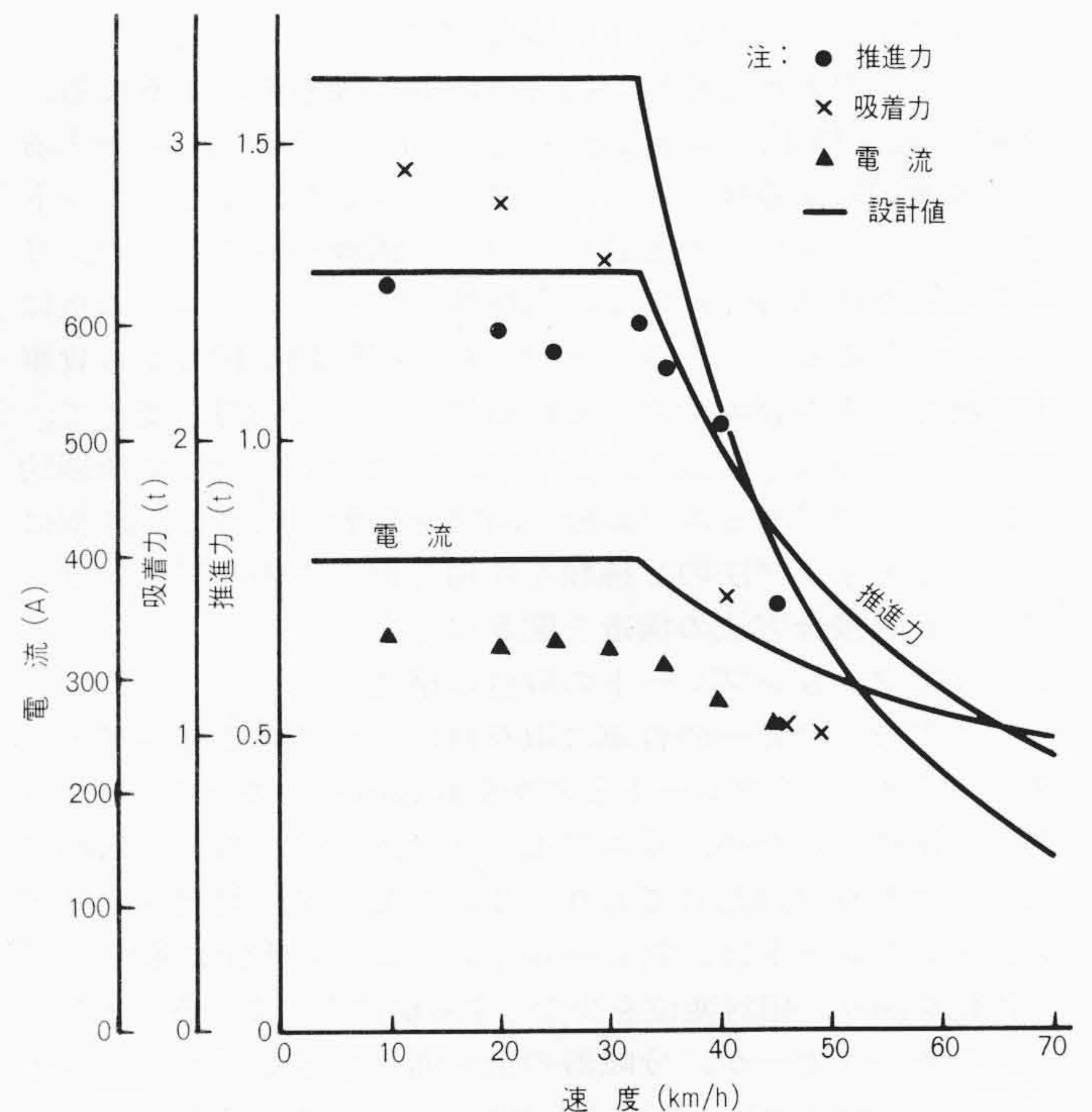


図4 リニアモータの速度と推進力・吸着力の関係 定格電圧AC550V、空隙15mmでの速度に対しての推進力、吸着力、電流の測定値をプロットし、設計値(実線)との差が分かる。

みると、設計値の約80%であった。

吸着力は、力行時の条件で設計値の約75%であった。以上のように、リニアモータの設計時に算出した速度に対応する推進力、吸着力と今回の試験結果から、実用リニアモータの詳細設計の基礎データを得ることができた。

(2) 空隙と推進力・吸着力の関係¹⁾

空隙を15mm、20mm、25mmと変化させて、リニアモータカーの速度に対応して、力行時の推進力がどのような関係にあるかを測定した。その結果、空隙15mmに対して20mmの推進力は約80%に低下しているが、20mmと25mmではほとんど差がない結果が得られた。

他方、吸着力は空隙15mmに対して、25mmのときは大幅な低下が見られた。

(3) 振動加速度

空隙15mmでリニアモータに加わる振動加速度を測定し、リニアモータカーの速度に対して鉄レール継目部及び連続部に区分して検討した結果、上下方向振動加速度は片振幅で継目部で3g以下、連続部で1g以下であった。左右方向振動加速度は継目部で2g以下、連続部で0.6g以下であった。前後方向は継目部、連続部ともに1g以下であった。

5 リアクションプレート

リアクションプレートは、誘導電動機のロータに相当するもので、そのロータ部分を半径方向に切り開いて、鉄レール間に長手方向に敷きつめたものである。その材質は、リアクションプレートに誘導電流を流れやすくするために、上面材質として電気抵抗の小さい純アルミニウム板(5mm)を使用している。また、リアクションプレート上面に誘導電流を生じさせるために、磁束を通しやすくする材料が必要であり、リアクションプレート下面の材質に鉄板(25mm)を使用している(リアクションプレートの主要諸元は表2を参照)。

(1) リアクションプレートの接合方法

アルミニウム板と鉄板の接合方法は、接着剤による接着、爆発圧着法(以下、爆着法という)、リベット接合などがあるが、接着剤による接着は耐候性に不安があり、またリベット方式はアルミニウム板と鉄板の線膨脹係数が異なるため、リニアモータの誘導加熱による温度変化で、アルミニウム板に変形を生じる問題がある。そのため、昭和49年10月から貨車操車場で使用され実績のある爆着法と、更に発想を変えて、アルミニウム板と鉄板を接合せず、温度変化に対して積極的に動くようにアルミニウム板の両端をU形に成形し、鉄板にかぶせたキャップ法の2種類を採用した。このリアクションプレートの接合方法の構造を図5に示す。

(2) リアクションプレートの取付け構造

リニアモータカーの台車に取り付けられているリニアモータとリアクションプレートとの空隙15mmの寸法をできるだけ正確に維持するため、リニアモータは鉄レールの上を転動する車軸に取り付けられており、リニアモータに対向するリアクションプレートは、鉄レールと同一まくら木上に取り付け一体化を図り、相対変位を少なくする構造としている。また、リニアモータカーが、分岐器の上を通過できるようにリニアモータの下面は鉄レール面より30mmの寸法を確保している。そのため、リアクションプレートの上面は、鉄レール上面より15mm高くなるように取り付けられている。

鉄レールとリアクションプレートを同一のコンクリートまくら木上に取り付け一体化する構造は、スラブ道床あるいは碎石道床どちらの道床にも適用できるようにしている。

(3) 空隙の変動試験²⁾

リニアモータとリアクションプレート間の静的な空隙15mmに対して、測定した結果は平均14.5mmであった。リニアモ-

タカーを走行させ動的な空隙を連続に測定した結果、最大値は惰行時の17.8mm、最小値は力行時の11.2mmであった。また、力行時は惰行時に比べて平均0.4mm程度空隙が小さくなっている。これはリニアモータの吸着力により、リアクションプレートにたわみが生じたためであるが、このたわみの影響による空隙変動は小さく、むしろ鉄レールそのものの不整による影響が大であった。

(4) リアクションプレートの温度上昇試験²⁾

温度上昇試験は、リニアモータカーが走行しないように外力で強制的に止めておき、起動をかけるロック起動試験で、7秒間通電(ON)し、113秒間無通電(OFF)の120秒サイクルを繰り返し、飽和温度を測定する試験である。このサイクル条件は、4両編成のリニアモータカーが2分間隔で起動通過することを想定したものである。この結果、約60回(2時間)で飽和温度に達し、その温度上昇値は爆着法で約33deg、キャップ法で約49degであり、リアクションプレートの使用温度限界(250℃)と比較して実用上問題となる温度ではなかった。

(5) リアクションプレートの接合方法と推進力・電流

爆着法、キャップ法のほかに、一部試みとしてアルミクラッド法、踏切部分を考えた鉄板だけ、キャップ法で鉄板だけをラミネートさせる方法、銅と鉄板のクラッド法などを試作した。これらの各種リアクションプレートによる推進力・電流を測定した結果、代表的な爆着法及びキャップ法とほぼ同一の値であった。これに対して、鉄板をラミネートさせる方法では、同一推進力に対しては若干電流が減少した。

6 インバータ

リニアモータカーのインバータは、VVVF (Variable Voltage Variable Frequency: 可変電圧・可変周波数) インバータで、その主回路結線を図6に示す。このインバータは、回転形誘導電動機制御用インバータと同様に、U相、V相、W相を設け、各相120度位相をずらしてPWM (Pulse Width Modulation: パルス幅変調) 制御を行ない、VVVFの三相交

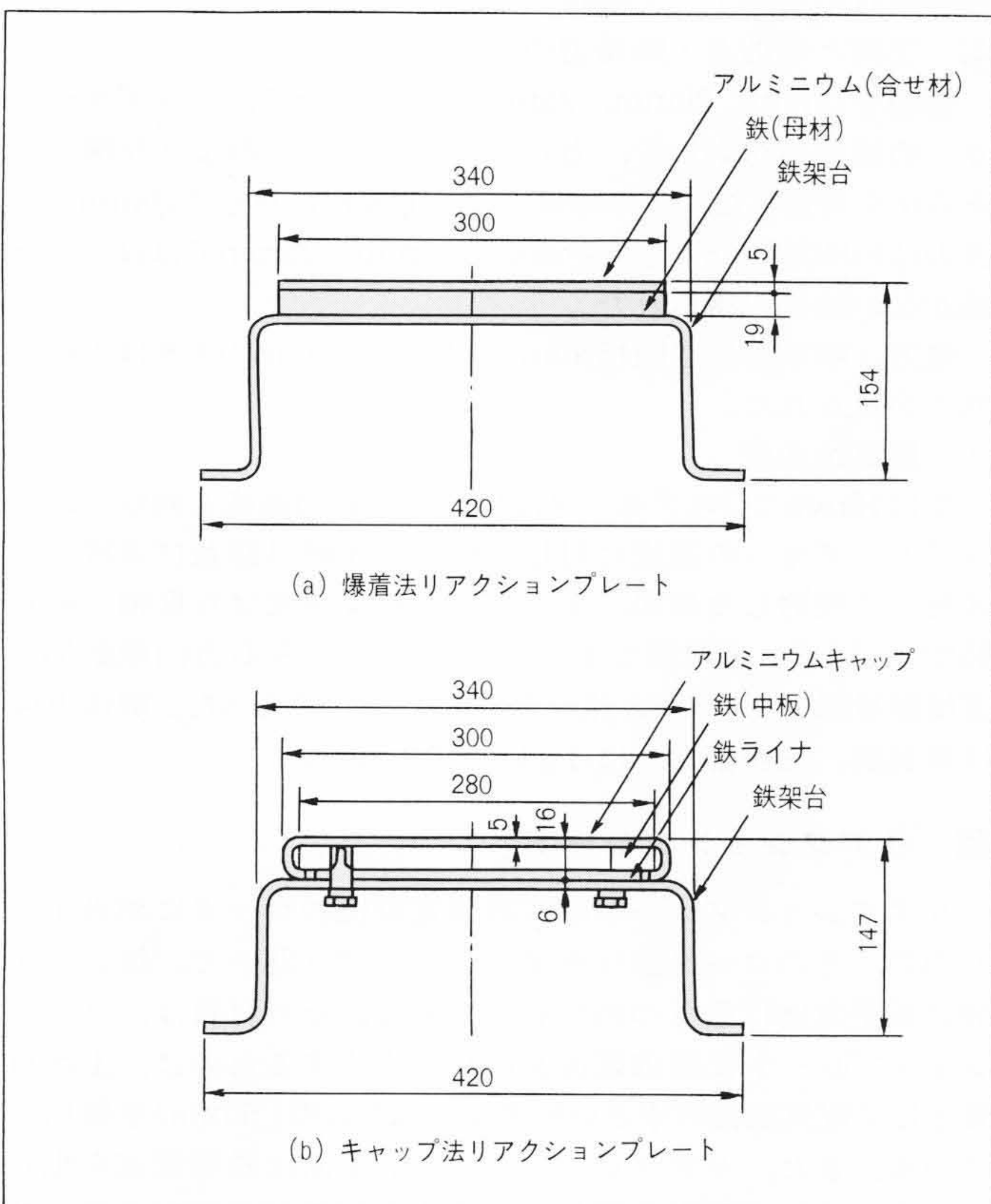


図5 リアクションプレート接合方法の構造 (a)はアルミニウム(合せ材)と鉄(母材)を爆着法で合わせており、(b)は鉄(中材)をアルミニウムキャップで囲んでいる。

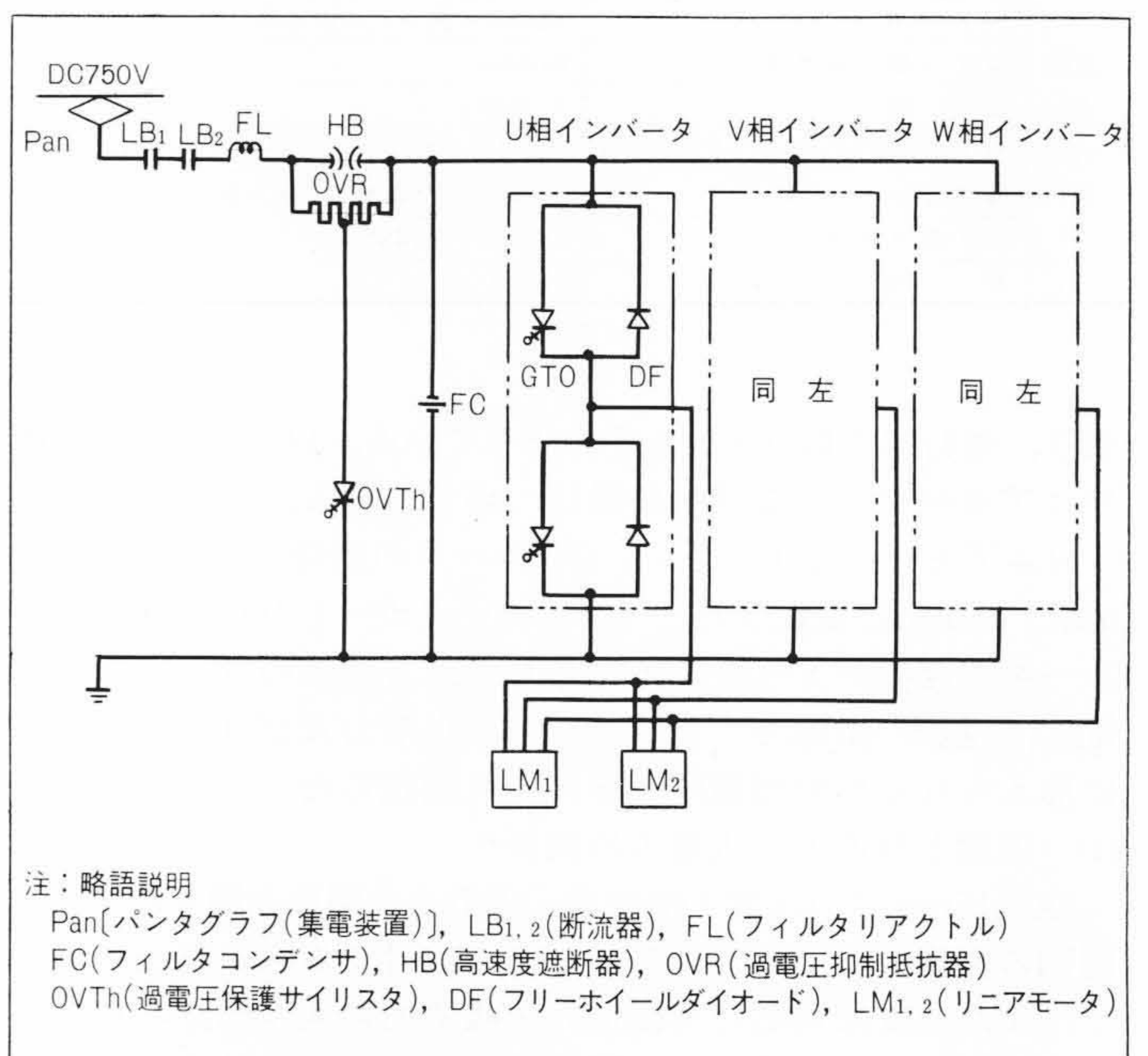


図6 リニアモータカーの主回路結線 リニアモータ2台(LM1, LM2)は永久並列に接続され、U, V, W 三相インバータで出力されるAC550V電圧が印加される。

表3 インバータの主要諸元 回転形誘導電動機制御用からリニアモータ制御用に改造した最大容量650kVA、GTO使用のVVVFインバータの主要諸元を示す。

項番	項 目	諸 元
1.	電 圧	定格DC750V(最高900V, 最低500V)
2.	容 量	最大容量 650kVA リニアモータ 70kW×2 制御
3.	インバータ方式	電圧形 PWM
4.	インバータ制御方式	VVVFインバータによる電力回生制動付き, 自動加減速制御方式
(1)	リニアモータ接続	力行, 回生時とも1S2P永久接続
(2)	力行時制御	低速範囲は定滑り周波数制御 高速範囲は定滑り率制御
(3)	回生時制御	定滑り周波数制御
(4)	電流制御	平均値制御
(5)	起動時制御	電流制御によるソフトスタート制御
(6)	回路遮断	正常時はインバータによる減流遮断, 異常時は高速度遮断器による1段減流遮断
(7)	半導体素子	フロン冷却によるGTOサイリスタ
(8)	インバータ周波数制御範囲	2~45Hz
5.	フィルタ方式	逆L形LCフィルタ Lは8mH, Cは6,000μF 共振周波数は25Hz

注: 略語説明 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)
GTO(Gate Turn Off)

流を出力するもので、出力側に70kWのリニアモータを2台並列に接続して制御を行なう。このインバータはスイッチング素子としてGTO(Gate Turn Off)サイリスタを使用し、低床形で、かつ小形・軽量化されている。

(1) インバータの仕様

70kWリニアモータ2台の速度制御を行なうため、インバータ周波数を2~45Hzの間で連続可変抑制をするが、特にリニアモータ電流の脈流抑制や直流架線に流出する高調波電流の抑制のため、パルス数をインバータ周波数に応じて45⇒27⇒15⇒9⇒5⇒3⇒1パルスの7段階に切り換えて制御を行なっている。このインバータの最大制御容量は650kVAで、その主要諸元を表3に示す。

(2) インバータ周波数の制御³⁾

インバータ周波数(f_{INV})は、電車の速度を周波数に換算した速度周波数 f_r と滑り周波数 f_s を、加算又は減算して制御するもので、

$$\begin{aligned} \text{力行時} & \dots\dots\dots f_{INV} = f_r + f_s \\ \text{回生ブレーキ時} & \dots\dots\dots f_{INV} = f_r - f_s \end{aligned}$$

で演算される。

この制御方式を検討するに当たって、昭和56年度に試作したリニアモータ等価試験装置による予備試験の結果から、低速域では滑り周波数一定制御、高速域では滑り率一定制御とすることが、リニアモータとして効率の良い最適制御であることが確認された。すなわち、滑り周波数は定格周波数(20Hz)以下では一定に制御し、定格周波数以上の高速域では滑り率一定制御とする方式である。この関係を図7に示す。このほかに、インバータ周波数にはリニアモータカーの加速度に応じた加速度補正が加えられ、リニアモータカーの速度の変化に追従できるように考慮されている。また、制御系の安定制御のために回転形誘導電動機の場合には、入力側のフィルタ回路定数と誘導電動機の定数との関連で発生する電流振動を抑制するため架線電流の振動成分を検出し、適正なゲイン特性をもたせたダンピング回路を設けている。また、電動機電流を制御パターン電流に対して補正するための滑り周波数補正回路なども設けている。しかし、このリニアモータ制御系

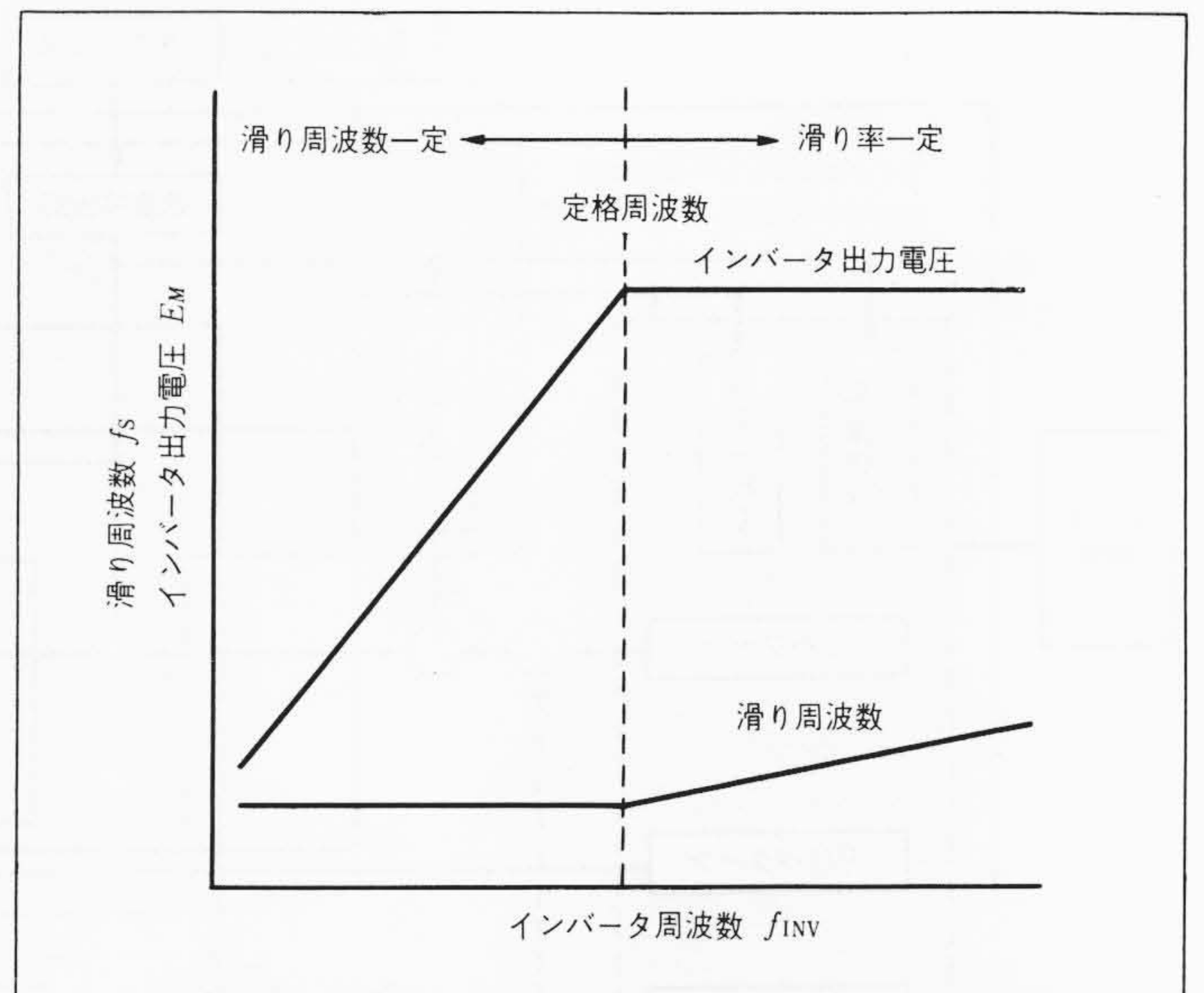


図7 インバータ周波数と滑り周波数、滑り率 インバータ周波数20Hzまでは滑り周波数一定、20Hz以上は滑り率が一定となるように制御する。

は、全体の制御時定数が回転形誘導電動機に比較して長いことから、特殊な補償回路を設けなくとも容易に安定性が得られることも、今回の走行試験で確認された。このリニアモータを制御するVVVFインバータ制御ブロックを図8に示し、そのブロック図で回転形誘導電動機の場合だけに必要な制御を点線で示している。

(3) リニアモータ電圧の制御

リニアモータ電圧 E_M は、制御電圧 V_C により制御される。この制御電圧 V_C は、インバータ周波数 f_{INV} 、パルス選択部のパルスモード、フィルタコンデンサ電圧 V_{FC} 、電圧・周波数 V/f パターンをそれぞれ入力として演算され、その結果としてPWM変調部でPWMのパルス幅を制御する。すなわち、制御電圧を大きくすればPWMのパルス幅が大きくなり、出力電圧も大きくなる。図7にはインバータ周波数 f_{INV} に対するインバータ出力電圧(リニアモータ電圧 E_M)の関係も示しているが、制御電圧 V_C は定格周波数以下では電圧・周波数 V/f が一定となるように演算され、定格周波数以上では架線電圧に対応する出力電圧がリニアモータ電圧となる。

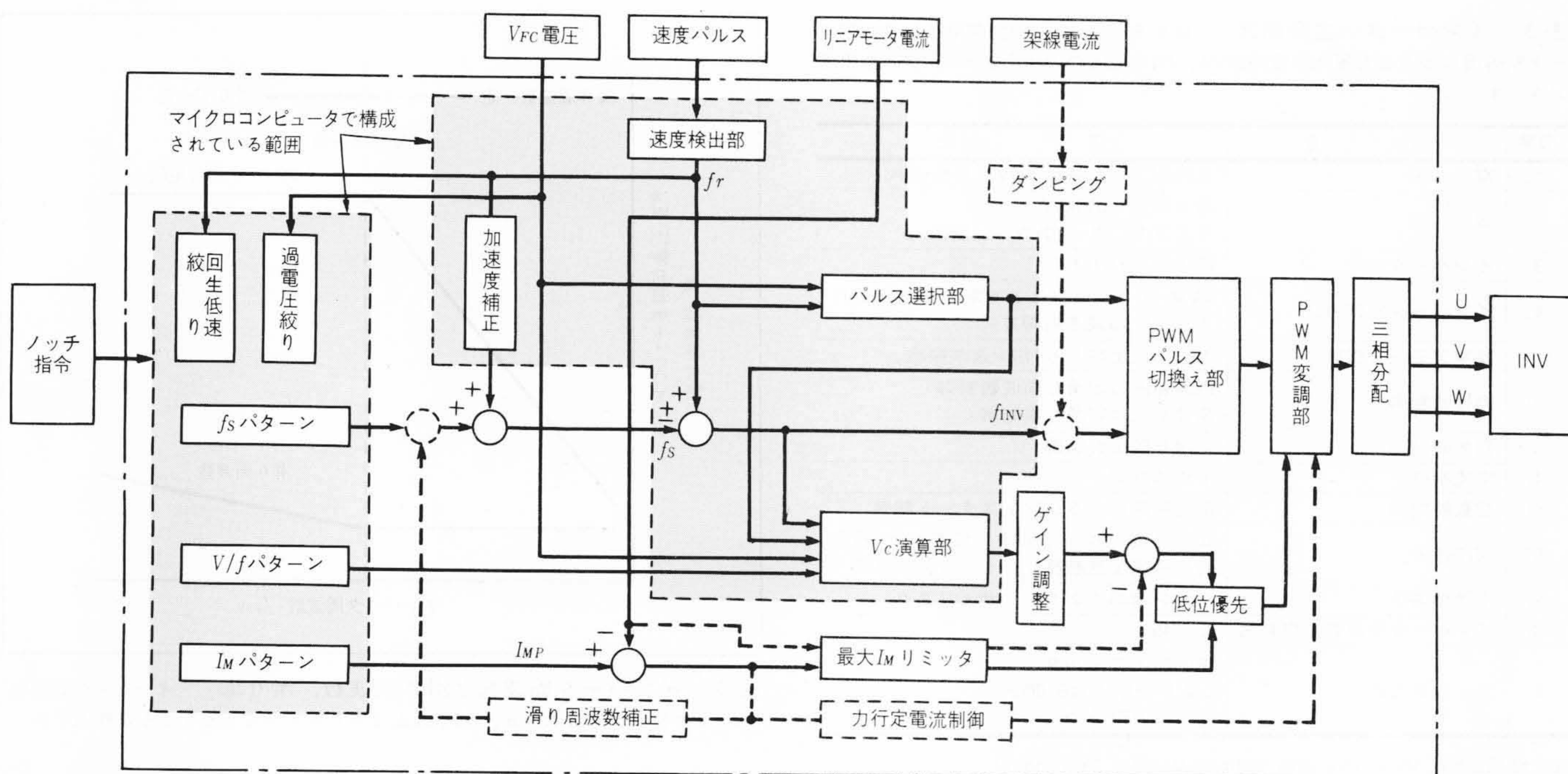
(4) リニアモータ電流の制御

リニアモータ電流 I_M は、マイクロコンピュータによって、運転台から指令されたトルク指令に応じて電動機電流パターン I_{MP} を演算し、このパターン I_{MP} に一致すべく制御される。すなわち、このリニアモータ電流が電動機電流パターンを超えると、その偏差に応じた最大電流値リミッタの出力によりPWM変調を制御し、電動機電圧を減少させる。これによりリニアモータ電流は電動機電流パターンに一致すべく制御される。

(5) 走行試験結果

リニアモータカー1両を設計・製作すると同時に、リアクションプレート660mを地上に設置し、リニアモータカーを走行させ各種走行試験を実施した。図9に走行試験を行なったときの代表的なオシログラムを示す。

このオシログラムから見るように、各電流・電圧及び周波数は安定に制御されており、回生ブレーキ投入時の電流の立上りなども良好で、かつ回生ブレーキと空気ブレーキとの協調も良好に制御されている。



注：通常の回転形誘導電動機の場合は、---→線で示す制御ブロックが必要となる。

図 8 VVVFインバータの制御ブロック 運転指令より f_s , V/f , I_M パターンを決定し、外部の V_{FC} 電圧、速度、リニアモータ電流を考慮して、最適な周波数、電圧、電流がインバータから出力されるリニアモータの推力、速度を制御する。

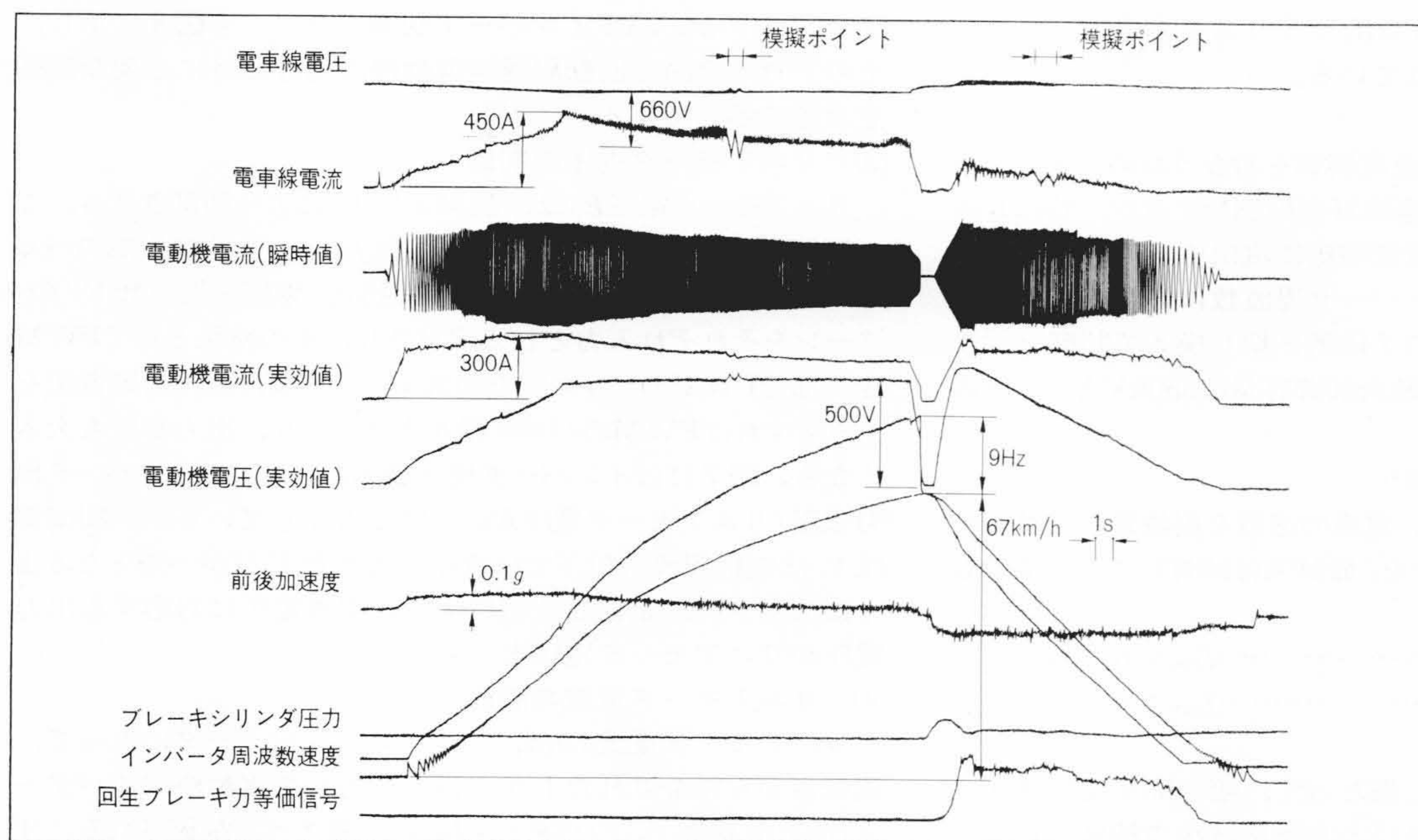


図9 速度67km/hのそれぞれの特性を示すオシログラム(一例) インバータから出力し、リニアモータに入力される電流、電圧及び周波数には異常な振動もないことが分かる。

7 結 言

建設費の安い地下鉄に適用する鉄車輪支持のリニアモーターカーを国内で最初に試験走行させ、今後のリニアモーターカーの製品化に必要な基本的な設計、製作の定数を得ること、及びリニアモーターカー実用化への見通しを得ることができた。

今後、運輸省が主体に、昭和60年度から3箇年計画で「地下鉄の低コスト化に関する研究開発(リニアモータ駆動小型地下鉄の実用化研究)」が開始され、リニアモーターカーの実用化に向けての研究開発が実施されることになっている。

この3箇年の実用化研究開発により、リニアモータ駆動小型地下鉄の実用路線が早期に実現することを切に期待したい。

最後に、昭和56年からの4箇年間で、このリニアモーターカー

の基礎的な研究開発に際して、社団法人日本鉄道技術協会の主催する開発委員会(委員長：東京大学教授 井口雅一工学博士)の各位をはじめとする関係各位から温かい御指導・御協力をいただいた。ここに深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 辰巳，外：リニアモータ方式による小断面地下鉄電車の研究報告書，社団法人日本鉄道技術協会，147～165(昭和59年 3 月)
- 2) 秋浜，外：リニアモータ電車用走行路の研究報告書，社団法人日本鉄道技術協会，33～50(昭和60年 3 月)
- 3) 庄山，外：リニアモータ方式による小断面地下鉄電車，昭和60年電気学会全国大会シンポジウム(S10-9～12)