

超高速磁気浮上列車用 リニア シンクロナス モータの特性

The Characteristics of Linear Synchronous Motor for High Speed Levitated Trains

速度 300km/h 以上で浮上走行する超高速列車の推進手段として、車上超電導磁石を界磁磁束に利用するリニア シンクロナス モータ (LSM) が最近注目されている。本稿は、この LSM のコイル構成と諸特性の検討結果及び案内用地上コイルが不要になる、経済効果の大きい推進案内兼用方式について述べる。

1.6m の回転子径をもつ鉄心なしの回転形試験機を用いて、300km/h の高速運転に成功するとともに、LSM の定常特性計算値が実測値と一致することを確認した。

牧 直樹* Naoki Maki
奥田宏史* Hironori Okuda
中村 清* Kiyoshi Nakamura
辰己 保** Tamotsu Tatsumi

1 緒 言

将来の輸送機関として高速・大量輸送、低騒音及び安全・経済性を満足する速度 300～500km/h の超高速磁気浮上列車の開発、研究が世界各国で活発に進められている⁽¹⁾⁽²⁾。フランス、西ドイツ及びアメリカでは既に数キロメートルの実験線をつくり、浮上走行試験を実施中であるが、主に磁気吸引浮上方式(あるいは空気浮上方式)とリニア インダクション モータ(以下、LIM と略す)推進とが検討されてきた。しかし、最近磁気反発浮上方式、リニア シンクロナス モータ(以下、LSM と略す)推進が注目され、盛んに検討され始めた⁽³⁾⁽⁴⁾。我が国では日本国有鉄道を中心に、回転及び直線試験装置を用いて各種推進、浮上方式の開発研究が行なわれており、ひき続き 7km 実験線の建設が計画されている⁽⁵⁾。

この超高速磁気浮上列車の推進手段である LSM と LIM は、表 1 に示すようにほぼ相対する特徴をもつ。LIM には次に述べる大きな技術課題がある。

(1) 端効果による特性悪化とその補償法
(2) 二次平板導体の温度上昇と強度
(3) 空隙保持対策

これに対して、LSM の技術課題は比較的解決が容易なので、LSM 推進と磁気反発浮上方式の組合せ⁽⁶⁾は有力な推進浮上システムと考えられる。

しかし、この LSM には鉄心がないために磁束分布が通常の鉄心付回転機と大きく異なり、非正弦波誘起電圧及び三次元電磁力が発生する⁽⁷⁾。また、地上電機子コイルを適当な長さのセクションに分割して順次給電するために、列車位置により誘起電圧がゼロと一定値の間を変動するセクションわたり現象が発生する。これにより LSM の特性向上には次のことが要求される。

(1) 推進、浮上、案内システム全体からみた最適コイル構成
(2) 電機子コイル仕様とセクション長の最適選定
(3) 電源、給電、制御及び運転方法の最適化

そこで本稿は、(1)、(2)につき超高速磁気浮上列車に適した LSM のコイル構成と特性についての理論考察、及び回転形試験機による実測結果について述べる。

2 コイル構成

図 1 は超電導磁石を用いる磁気反発浮上及び LSM 推進による超高速磁気浮上列車の概要とコイル構成例を示すものである。車上には超電導磁石が対向して垂直に設置され、この超電導磁石を浮上、推進及び案内作用に利用する。列車の走行に伴う超電導磁石と浮上用導体(アルミニウムなど電気良導体のシート、あるいはコイル ループ)に発生するうず電流と

表 1 LSM と LIM の比較 LSM は LIM と相対する特徴をもち、技術課題も比較的解決が容易である。

項 目	リニア インダクション モータ(LIM)			リニア シンクロナス モータ(LSM)		
	特 徴	利 点	技 術 課 題	特 徴	利 点	技 術 課 題
駆 動 方 式	非 同 期 駆 動	動 作 が 安 定	端 効 果	同 期 駆 動	端 効 果 が 小	同 期 維 持
二 次 側	平 板 導 体	構 造 が 簡 単	温 度 上 昇 と 強 度	超 電 導 界 磁	特 性 向 上	超電導体の交流損失
鉄 心	あ り	コイル取付けが容易	磁 気 吸 引 力	な し	推進案内兼用方式が可能	三 次 元 電 磁 力
空 隙	小 (1～2cm)	磁束の有効利用	空 隙 保 持	大 (5～10cm)	空隙保持が容易	特 性 維 持
駆 動 周 波 数	高 周 波 (50～200Hz)	—	大 容 量 高 周 波 電 源	低 周 波 (10～30Hz)	フィーダの電圧降下が小	大 容 量 周 波 数 変 換 装 置
適 合 励 磁 方 式 (適 合 浮 上 方 式)	車 上 一 次 (磁気吸引浮上)	地上設備が小	高 速 集 電	地 上 一 次 (磁気反発浮上)	集 電 が 不 要	セクションわたり現象

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所日立工場

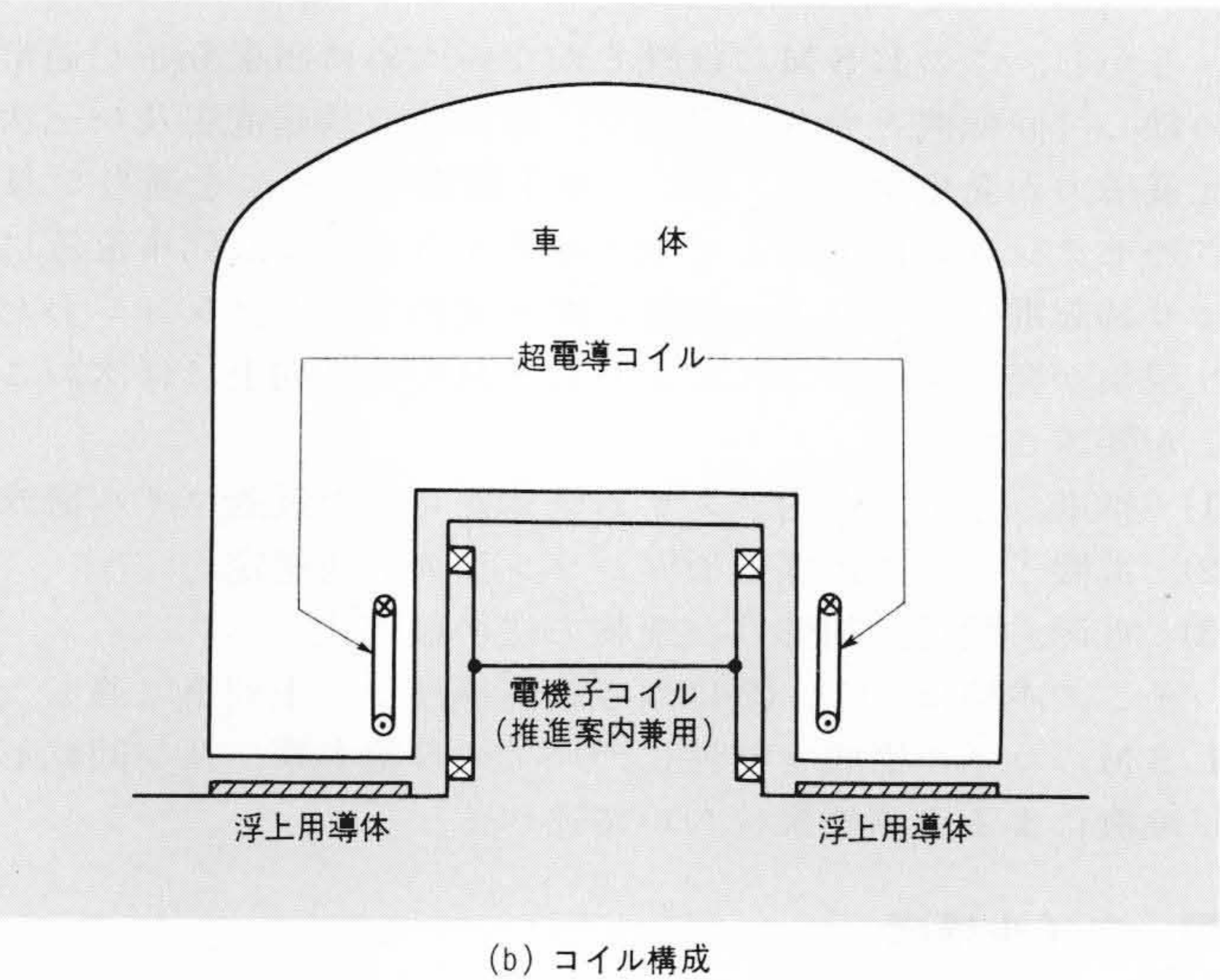
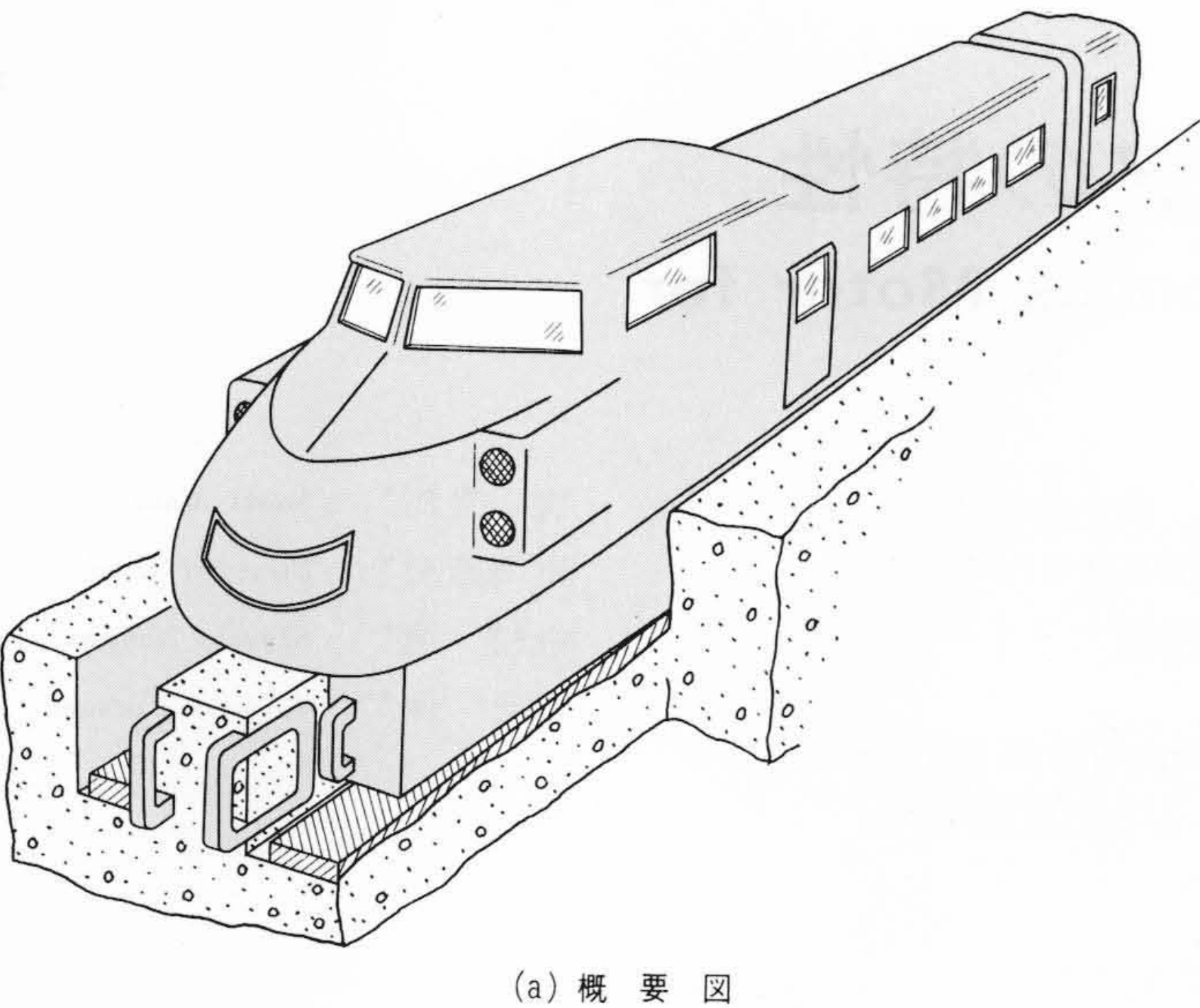


図1 超高速磁気浮上列車の概要図とコイル構成 車上及び地上コイル数の低減と、超電導磁束の有効利用に考慮が払われている。

の相互作用により浮上力が得られる。推力は超電導磁石の進行に同期して、電機子電流を外部電源から通流することにより得られる。案内力は、車両が左右方向に変位したときだけ左右一対の電機子コイルから成る短絡回路に発生する、循環電流に基づく磁気誘導反発力により得られる。

電機子コイルには地上への取付けやすさを考慮して、図2に示すような120度ピッチの三相一層集中巻矩形コイルを用いる。また、電機子コイルから構成される各セクションを、列車が通過するときだけフィーダ、切換開閉器を介して給電することにより所要電源容量の低減を図る。最適セクション給電法は、電源の皮相電力、電源電流の脈動、サイクロコンバータの設備容量、切換開閉器数などを考慮して決定される。

3 推進案内兼用方式

推進案内兼用方式は、図3に示すように左右に配置された一対の電機子コイルを並列接続して、短絡回路部を形成する点が特徴である。車体が左右方向に変位すると、左右電機子コイルの誘起電圧 e_l 、 e_r に差を生じ、この差電圧により短絡回路に循環電流 i_c が流れて、超電導磁石との相互作用により案内力が発生する。左右電機子コイル電流 i_l 、 i_r は、推力と

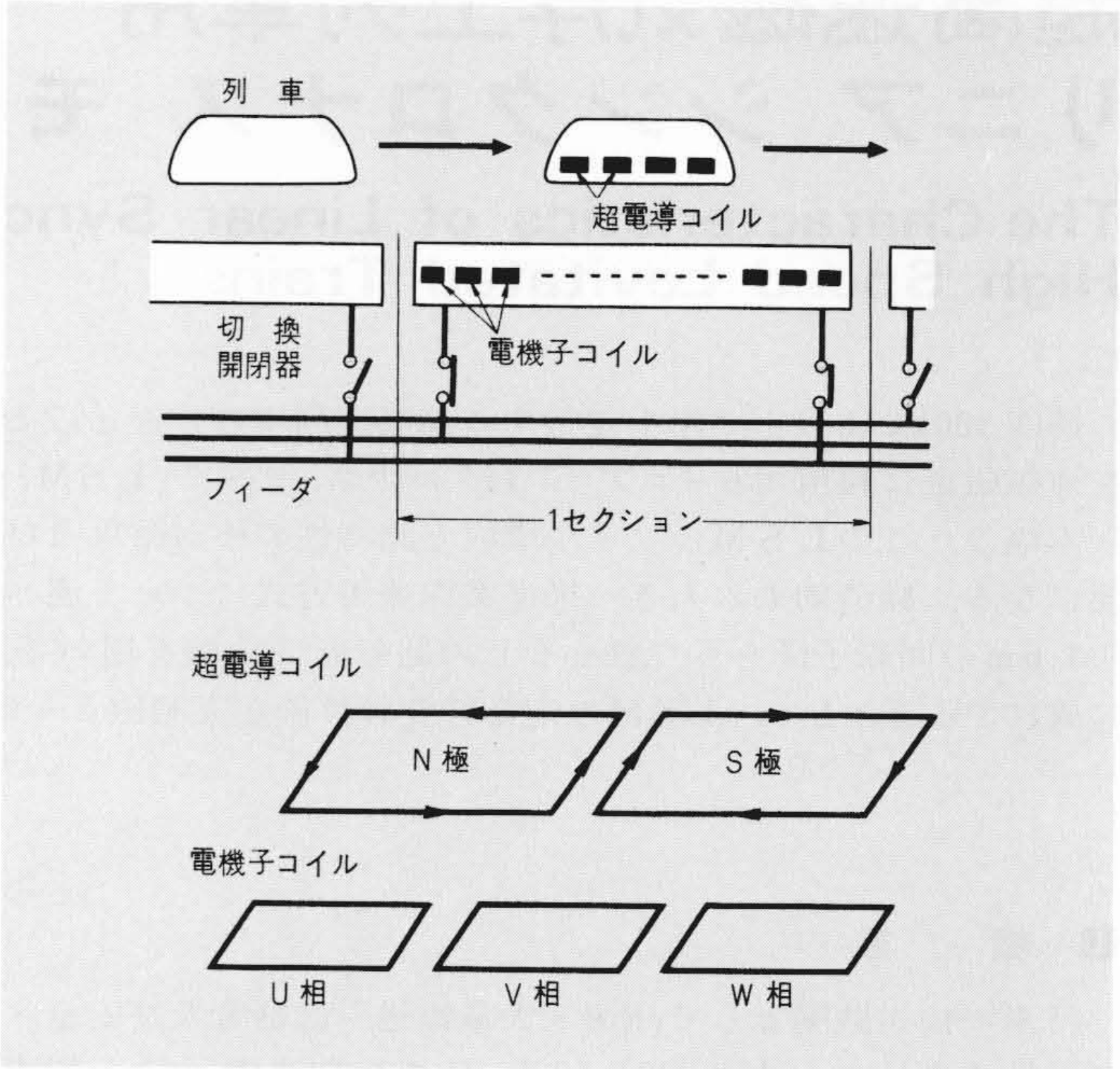


図2 電機子コイル配列とセクション給電法 電機子コイルに120度ピッチの一層集中巻を採用するが、その最適仕様選定により、電磁力の脈動はかなり小さくなる。

なる外部通電電流 i_p と案内力となる循環電流 i_c が重畳して流れることになり、電機子コイルだけで推進作用と案内作用を兼用する。

この推進案内兼用方式は、従来考えられている案内コイル別置方式と比べて案内用地上コイルが不要となり、且つ軌道へのコイル取付けが簡単になるなどの大きいメリットをもつ。他方、循環電流に基づくコイル温度上昇は、循環電流の大きさ、位相及び発生時間の短さより無視できる。

4 特性

4.1 電圧・電流特性

表2に示す設計諸元を用いて、列車速度500km/h、一定正弦波電機子電流におけるLSMの誘起電圧、インピーダンス電圧及び端子電圧波形を求めると図4に示すようになる。セクションあたりに関係なく、一定正弦波電機子電流を通流するには、図4に示す端子電圧波形を外部電源(一般にサイクロコンバータが使用される)から供給すればよい。

誘起電圧及び端子電圧の基本波を用いて計算した、LSMの効率、力率特性に及ぼす誘起電圧の影響を図5に示す。定格運転時には効率、力率ともにほぼ90%と良好であるが、低

表2 LSMの設計諸元 列車長10mを想定したが、列車長が2倍の20mのときには、極数、セクション長をそれぞれ2倍とする。更に、編成列車の場合には編成数に比例して増加させる。

項 目	超 電 導 コ イ ル	電 機 子 コ イ ル
極 数	8 (左右各4)	32 (左右各16)
長 さ (m)	1.9	1.3
幅 (m)	0.5	0.8
ピ ッ チ (m)	2.4	1.6
左右コイル間隔 (m)	1.5	1.0
起 磁 力 (kAT/ループ)	500	10

速時及びセクションわたり時には誘起電圧が定格時よりも減少し(これを比誘起電圧と呼ぶ)、特性が悪化する。特に比誘起電圧が5%に低下すると、効率、力率ともに30%程度に大幅に減少する。

LSMでは、電機子起磁力が界磁起磁力に比べて一けた以上小さいので、LIMにおけるような端効果はほとんど生じない。しかし、列車が2セクション上を通過するときだけ、皮相電力が増加(力率が低下)する一種の端効果が発生する。このセクションわたり現象は給電法により異なるが、皮相電力増加への影響は平均で10%以下に抑えることができる。

4.2 電磁力特性

図6は列車速度500km/h、上下及び左右変位5cmにおいて、列車に発生する推力、案内力及び上下偏倚力波形である。一

定電機子電流を通流するために、セクションわたりに関係なくほぼ一定の電磁力が得られる。案内力、推力の脈動率は10%以下と小さく、その脈動周波数はそれぞれ駆動周波数の3倍及び6倍調波となる。上下偏倚力(不安定化力)は非常に小さく無視できる。また、案内力8.0tは車体重量を10tとすれば、0.8gに相当する。案内力は左右変位量に比例するので、案内ばね定数は1.6t/cm一定になる。

図7は推力、案内力及び磁気制動力に及ぼす速度の影響を示すものである。循環電流による磁気制動力が小さいために、推力は速度に関係なくほとんど一定となる。案内ばね定数は、速度200~500km/hにおいてほぼ一定値1.6t/cm、浮上の始まる100km/hにおいて0.85t/cmと定格値の1/2以上の値が得られる。磁気制動力に対する案内力の比は速度に比例して増加

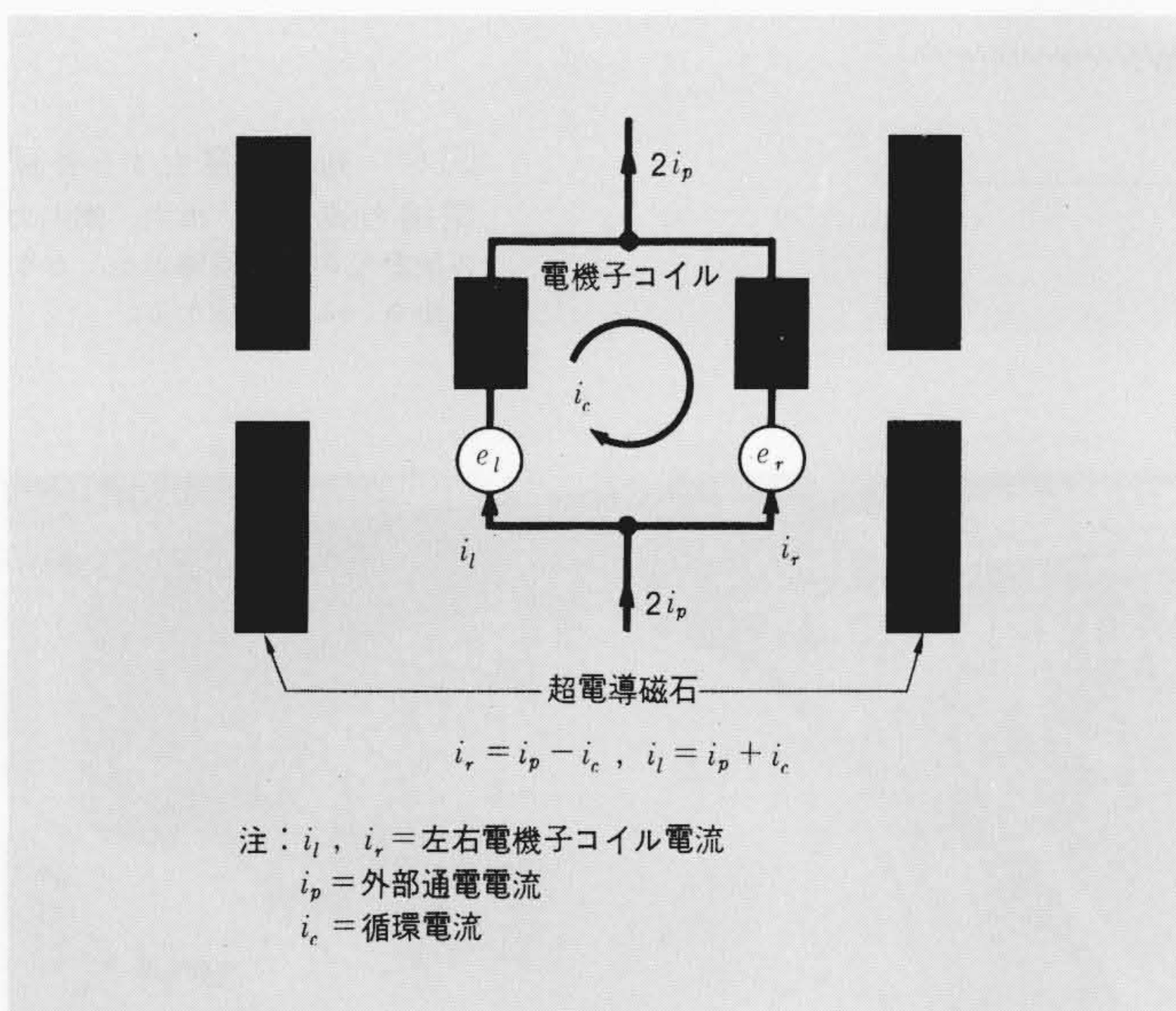


図3 推進案内兼用方式の電機子コイル接続 超電導磁石に対向する左右電機子コイルを、それぞれ並列接続する様子が一相について示されている。

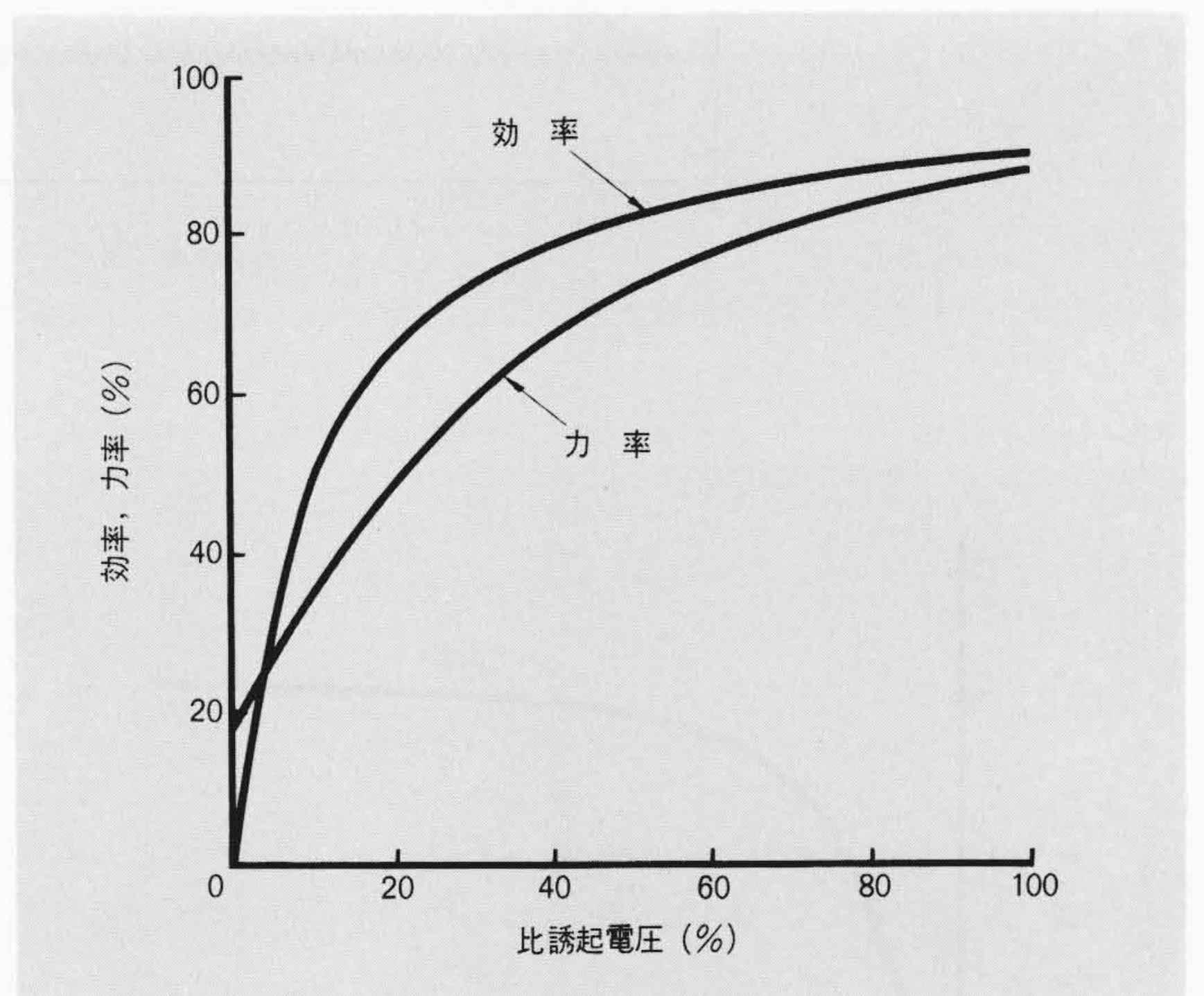


図5 LSMの効率、力率に及ぼす誘起電圧の影響 誘起電圧の低下により、効率、力率が大幅に減少する様子が分かる。

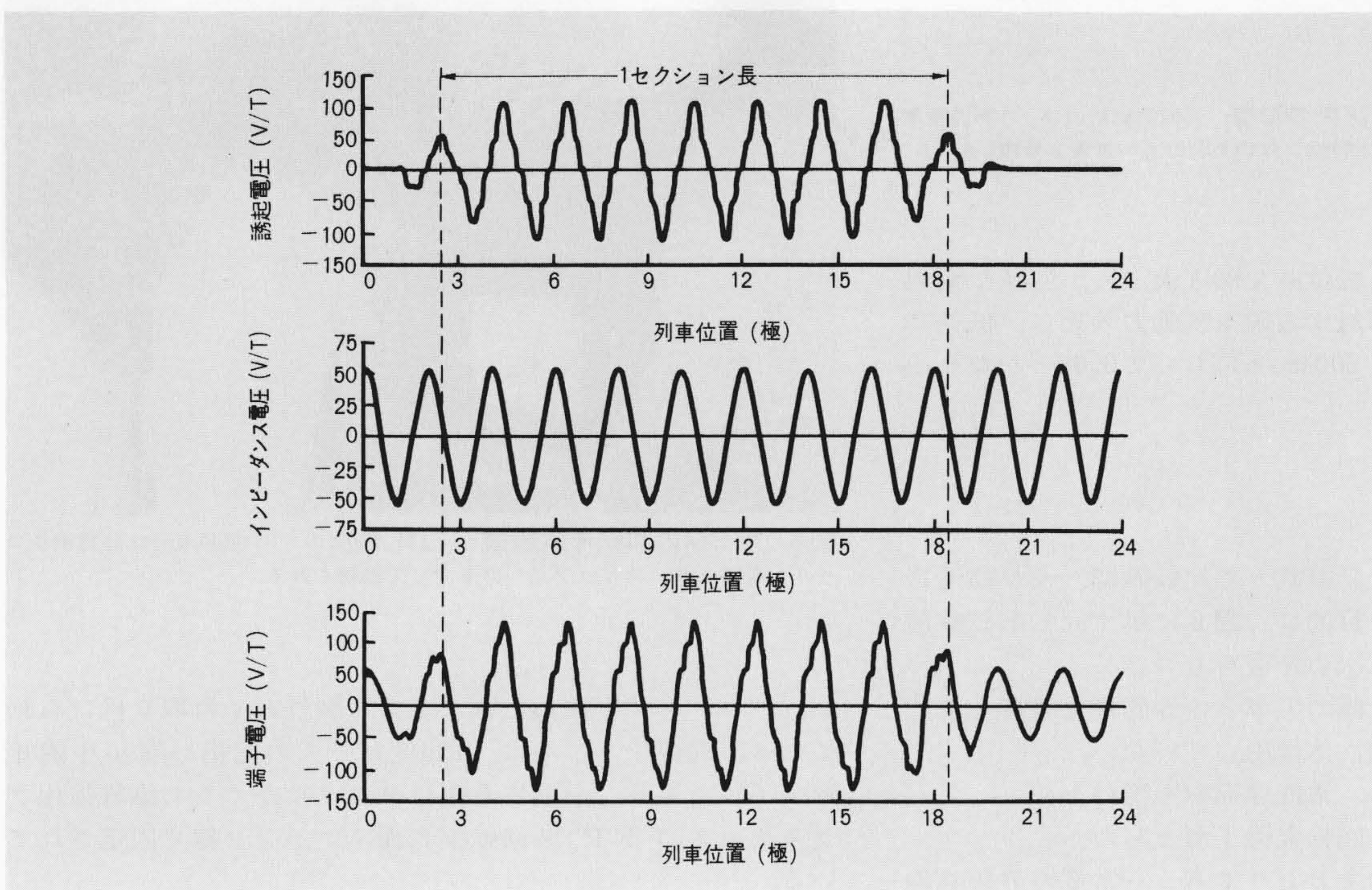


図4 1セクションの各種電圧波形 列車がセクションに進入するにつれて誘起電圧が増加し、退出するにつれて減少する様子が示されている。

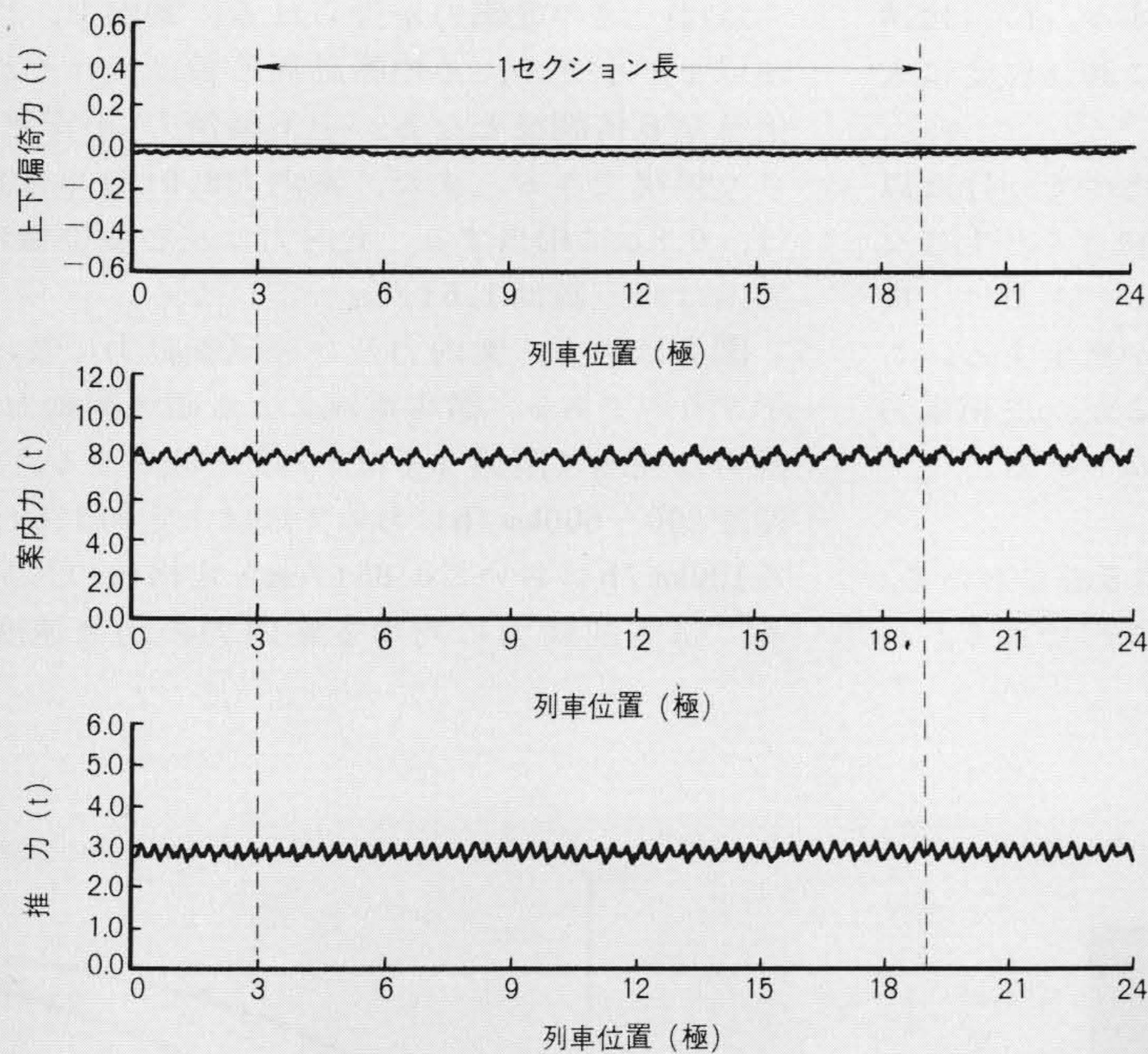


図6 列車に発生する各種電磁力波形 推力、案内力の脈動及び上下偏倚力が、かなり小さいことが分かる。

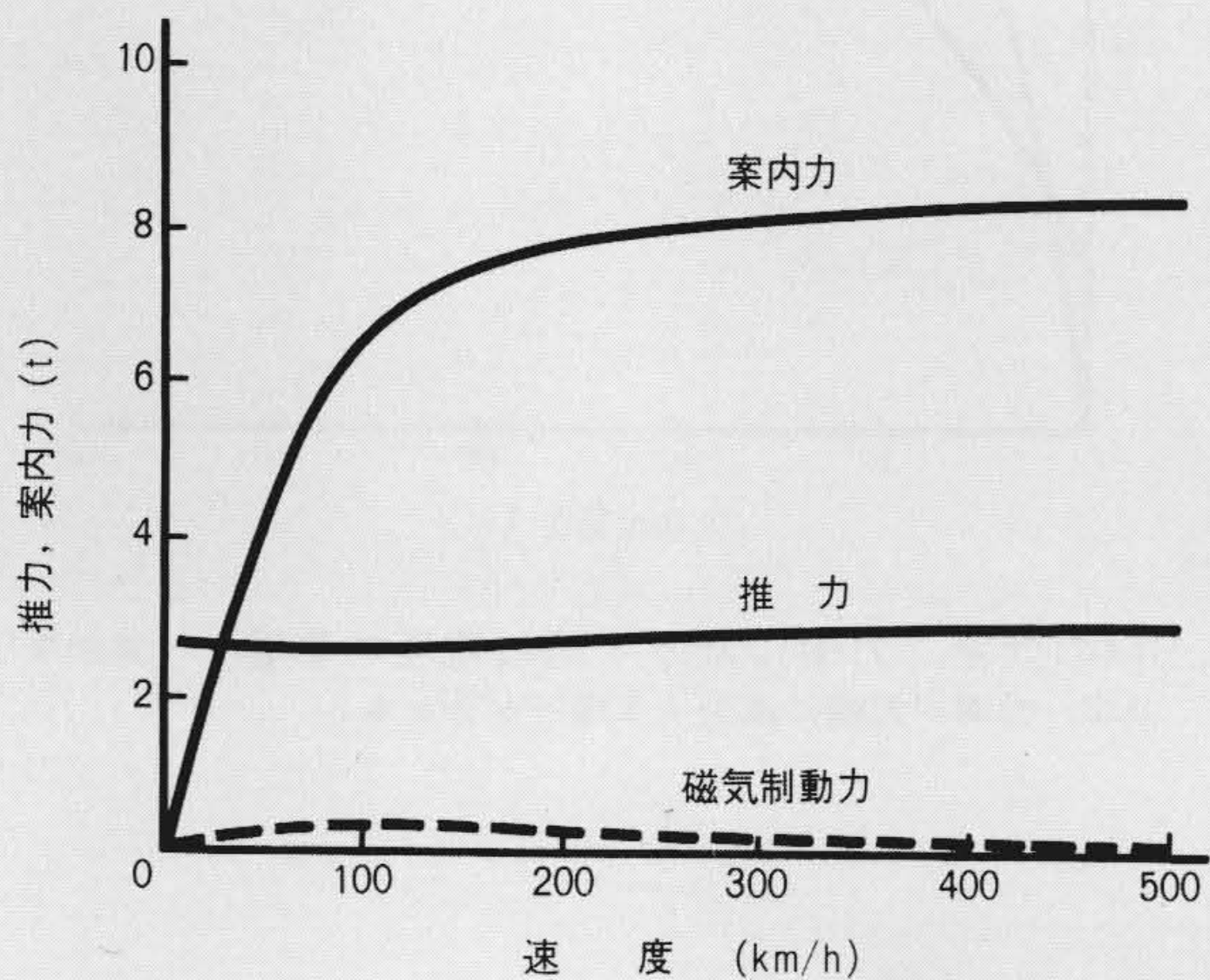


図7 推力、案内力に及ぼす速度の影響 磁気制動力は、外部通電電流がゼロのときの負推力であり、推力特性には磁気制動力の影響を考慮している。

し、500km/hにおいて5cm変位時で80と大きく、良好な案内特性を示す。また、推力に対する磁気制動力の比は、低速時には幾分増加するものの、500km/hにおいて0.03とかなり小さい。

5 試験

5.1 試験機

LSM定常特性の把握と計算式との比較確認、及び高速特性と過渡特性の実験検討を目的に、図8に示す回転形試験機を製作した。この試験機は次の特徴をもつ。

- (1) 電機子コイル仕様は、極力実車との等価性を維持した。
- (2) 界磁、電機子ともに磁性体は用いていない。
- (3) 実験を容易にするため、常電導界磁を用いた。
- (4) 高速回転を得るため、回転電機子形とした。

試験機の仕様は表3に示すとおりである。常電導界磁巻線

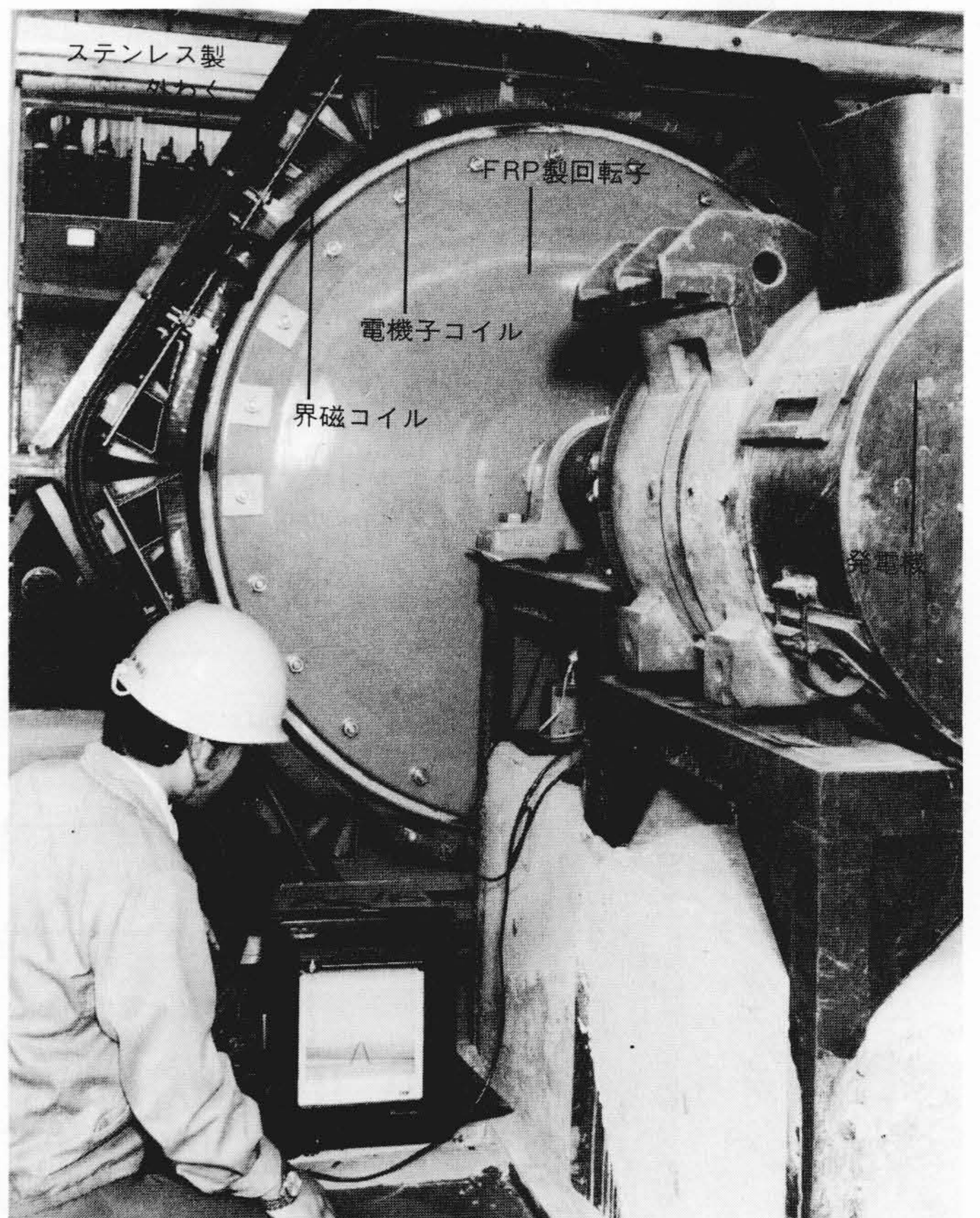


図8 LSMの回転形試験機 約1,500φのFRP製回転子上に電機子コイルが装着され、スリップリングを介して励磁される。

は、ハウジングを兼ねたステンレス製外わくに取り付けられている。電機子コイルは、120度ピッチの三相一層集中巻矩形コイルであり、全周に6極分9コイルがガラス繊維強化プラスチック(FRP)製回転胴表面にバインド線で固定されている。

図9は試験装置のブロック図を示すものである。電源には50Hz商用周波電源及び120Hz高周波発電機セットを用いた。サイクロコンバータには電源転流だけを行なう36アーム無循環式を採用した。この装置は磁気式位置検出器、零電流検知装置、一定電流制御装置及び一定速度制御装置を備えている。

5.2 基礎特性

電機子コイルに交流電流を流して測定した自己インダクタンスの実測値は4.72mHであり、計算値4.62mHとよく一致した。電機子コイルの相互インダクタンスは自己インダクタンスの約4%であった。

界磁コイルに鎖交する電機子反作用磁束には、直流分とほぼ3倍調波の交流分が発生するが、その大きさはいずれも界磁起磁力の2%以下であり、かなり小さい。

誘起電圧波形の実測値は、コイル断面の影響により計算値よりも幾分滑らかで且つ小さくなるが、両者はほぼ一致した。

5.3 運転特性

次に試験機の定常運転時における各部電圧、電流オシログラムを図10に示す。同図(a)は60km/hにおける各部電流波形であり、電機子電流波形がほぼ方形波であっても、電源電流波

表3 試験機の仕様 界磁コイル、電機子コイルともに一部分(2極, 4極)励磁によるアーチモータ運転が可能である。

項 目	仕 様
出 力	30 kW
極 数	6 極 (2 極, 4 極切換え可能)
回 転 速 度	定格: 85km/h (14.5Hz) 最高: 300km/h (50Hz)
界 磁 起 磁 力	4.5 kAT/コイル
電 機 子 起 磁 力	3.3 kAT/コイル

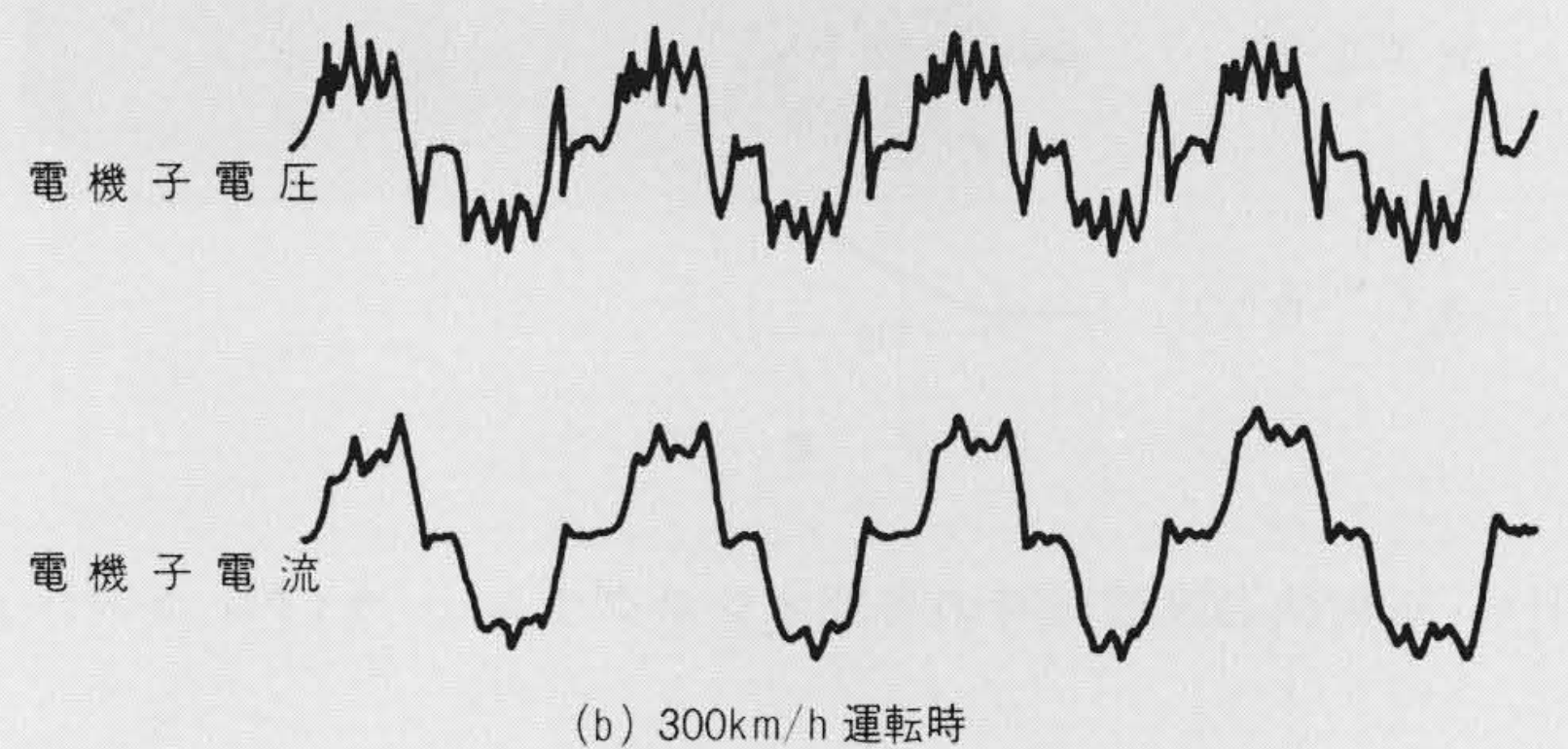
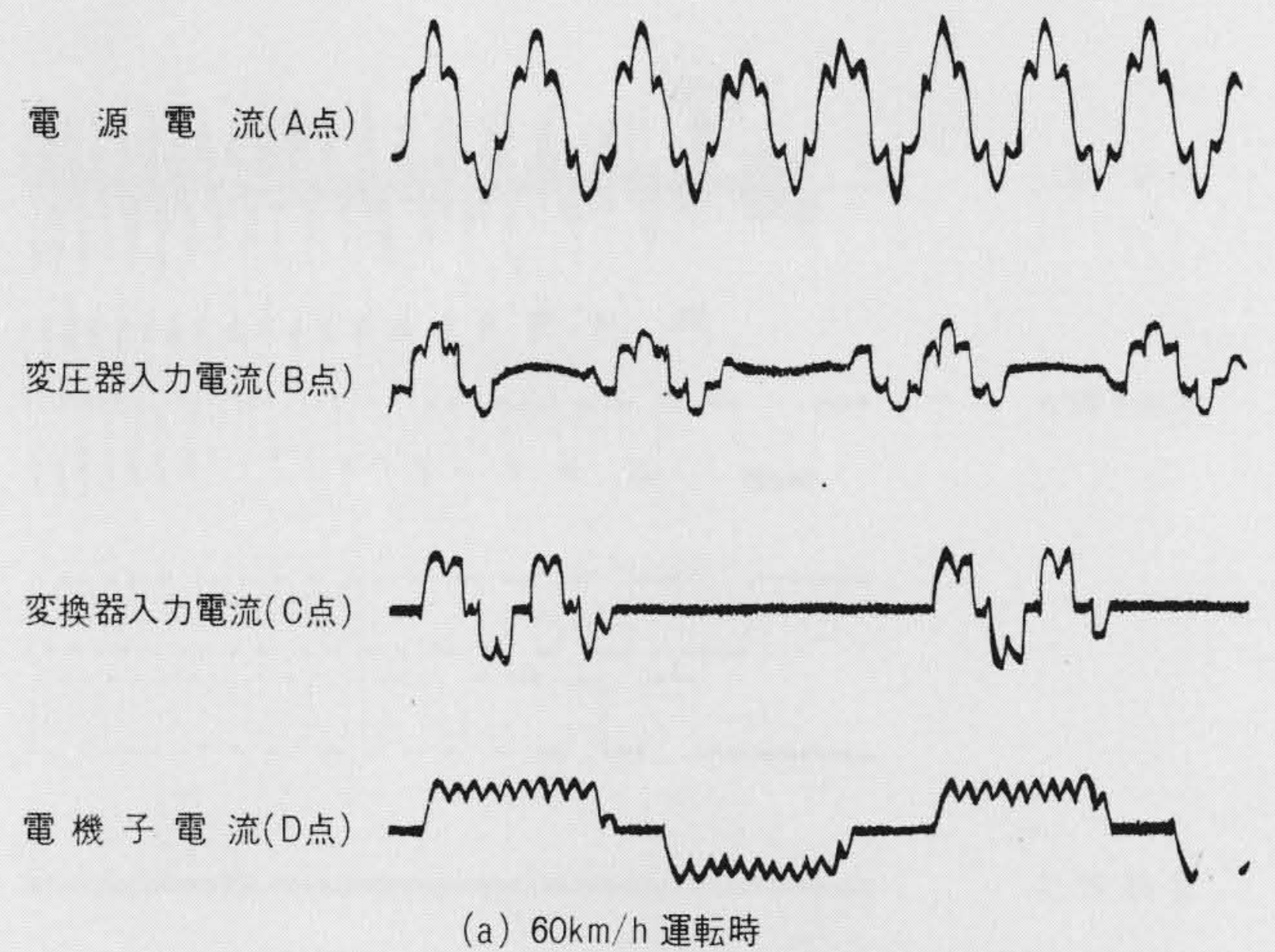
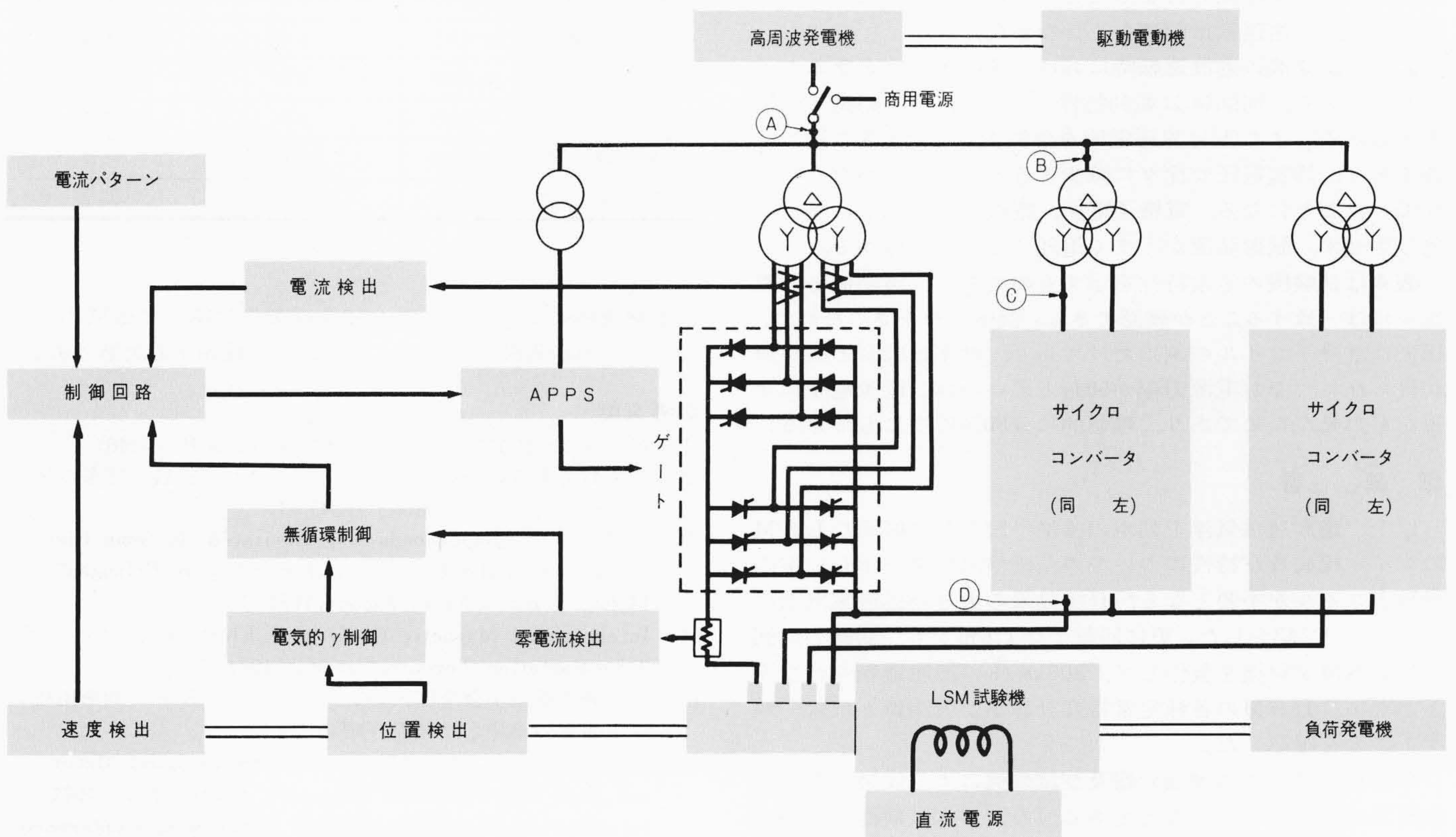


図10 試験機定常運転時の各部電圧電流オシログラム (a)には商用周波電源、(b)には120Hz高周波発電機をサイクロコンバータの電源に用いた。A, B, C, D各点は図9における測定個所を示す。



注: (A)点~(D)点=電流測定個所 APPS=自動パルス移相器

図9 試験装置ブロック図 変圧器は、タップ切換により電圧調整可能になっている。

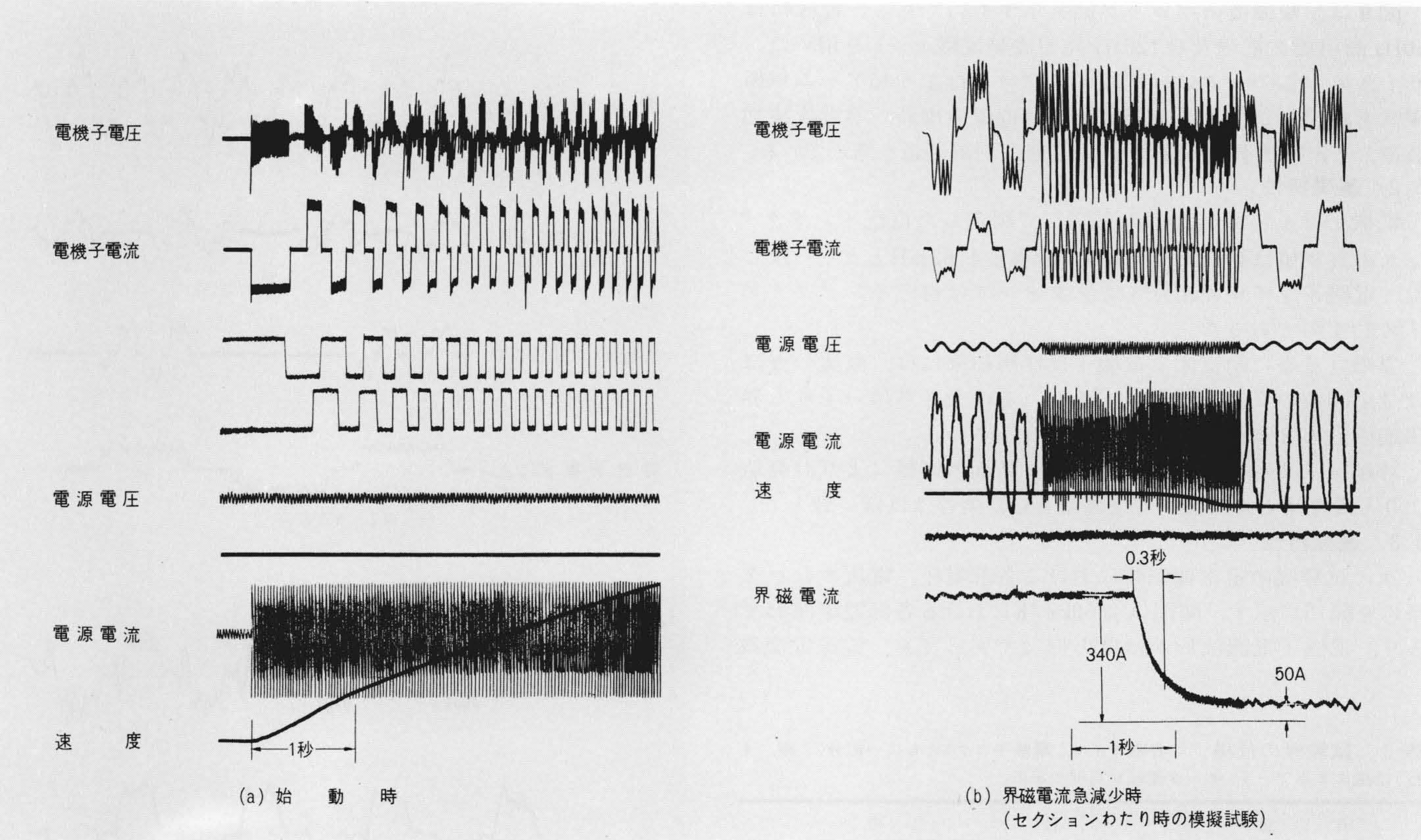


図11 試験機過渡運転時の各部オシログラム サイクロ コンバータ電源には商用周波電源を用いた。

形が比較的正弦波に近いこと、変換器入力電流及び変圧器入力電流が断続電流となる様子が分かる。また(b)は120Hz高周波発電機セットをサイクロ コンバータの電源として用い、300km/hの高速運転を行なったときの電機子電圧及び電流波形であり、高速運転は問題なく行なわれた。

図11は試験機の過渡運転時における各部オシログラムを示すものである。同図(a)は始動特性であり、円滑に始動する様子が分かる。また(b)は界磁電流を急減少させたときの過渡特性であり、誘起電圧が徐々に減少するセクションわたり時を模擬したことになる。電機子電圧、電機子電流ともに異常現象は生ぜず、制御装置がうまく追従することが分かる。

表4は試験機の定常特性を示すものであり、実測値と計算値がほぼ一致することが確認できる。機械損が小さいために、損失は電機子コイルの銅損だけであり、効率は93%と高い値が得られた。なお電源力率が50%と悪いのは、電源電圧に余裕をもたせたためであり、理想的には80%程度にもできる。

6 結 言

以上、超高速磁気浮上列車の推進手段として好適なLSMのコイル構成及び特性についての基礎検討結果を示し、案内用地上コイルが不要となる、経済効果の大きい推進案内兼用方式について紹介した。更に回転子径1.6mをもつ無鉄心の回転形LSM試験機を製作して、300km/hの高速運転を行なうとともに、LSMの各種定常特性計算値が実測値とほぼ一致することを確認した。

今後我々は、この理論考察及び試験機による成果を直線試験装置に生かしていく考えである。なお、本試験機は昭和47年度運輸省研究助成金を受けて製作したものである。

終わりに、超高速磁気浮上列車の開発に関して終始御指導をいただいた日本国有鉄道技術開発室、車輛設計事務所、鉄道

表4 定常特性の実測値と計算値の比較 計算は誘起電圧、端子電圧の基本波を用いて行なった。

項 目	実 測 値	計 算 値
相 電 圧 (V)	170	167
相 電 流 (A)	56	56
効 率 (%)	93	93
力 率 (%)	95	98
電 源 効 率 (%)	86	87
電 源 力 率 (%)	50	52

技術研究所の関係各位、及び試験機製作に関して御協力をいただいた運輸省関係の各位に対し、深く感謝する次第である。

参考文献

(1) 奥, 京谷, 佐貫「超高速新幹線」中央公論社(昭46)
(2) 昭和47年電気学会全国大会シンポジウム S.11「将来の超高速鉄道に関する技術開発」(昭47-3)
(3) C. Albrecht, "Superconducting Levitated Systems First Results with the Experimental Facility at Erlangen" ICEC-5 B2-1, Kyoto, Japan (1974-5)
(4) International Magnetic Conference Electromagnetic Transportation Toronto, Canada (1974-5)
(5) 昭和49年電気学会全国大会シンポジウム S. 8「列車用磁気浮上装置の現状と問題点」(昭49-3)
(6) P. Powell, T. Danby, "The Linear Synchronous Motor and High Speed Ground Transport" Proceedings 1971 Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (1971-8)
(7) 牧, 辰己「リニアシンクロナスモータの特性について」電気学会回転機研究会資料 RM-73-13 (昭48-10)