

リニアモーターカー「リニモ」の磁気浮上システム

岩谷 満 (いわや みつる)

尾崎 覚 (おざき さとる)

田村 浩明 (たむら ひろあき)

特集 1

1 まえがき

2005年のビッグイベント、日本国際博覧会（略称：愛知万博）は最終入場者数2,200万人余りを数え、好評のうちに閉幕した。この博覧会のもう一つの大きな話題は、動くパビリオンともいわれ、同博覧会の主要アクセスとして、日本で初めて実用化された磁気浮上式鉄道・愛知高速交通株式会社東部丘陵線（愛称：リニモ）の開業であった（図1）。リニモは愛知万博開幕直前の3月6日に開業し、万博開催期間中に1,969万人を輸送し、万博閉幕後も地域の足として活躍している。

富士電機は中部エイチ・エス・エス・ティ開発株式会社（CHSST社）の支援の下、リニモの主幹機器である磁気浮上ユニットを開発し、製作・納入した。本稿では、HSST（High Speed Surface Transport）開発の経緯を背景に、リニモの磁気浮上系の概要を紹介する。

2 HSSTと開発の経緯

HSSTは、日本航空株式会社が空港用高速アクセスとして1970年代に開発を開始した常電導磁気浮上式のリニアモーター駆動の輸送システムである。1975年の浮上実験成功から、1985年の国際科学技術博覧会（科学万博-つく

図1 万博会場駅に進入するリニモ第9編成



ば'85)での展示走行などを経て、1989年に愛知高速交通株式会社東部丘陵線での実用化を目的としたCHSST社が設立された。1991年からは実用化に向けた本格的な実験車両HSST-100S型を用いて、名古屋市大江の実験線で走行試験と改良を重ねてきた。さらに1995年からはリニモの原型となるHSST-100L型が完成し、長期走行試験を開始した。この実績に基づいて1999年に東部丘陵線導入機種選定委員会から最適との評価を得て、採用が決定した。

表1にHSST開発の流れを示す。

3 リニモの概要

表2にリニモの主要諸元を示す。

リニモは名古屋市営地下鉄東山線の藤が丘駅から万博会場駅を経て愛知環状鉄道株式会社八草駅（愛知万博開催期

表1 HSST開発の歴史

年	主要記事
1972	日本航空株式会社が研究開発に着手
1975	実験1号機 (HSST-01) で浮上実験成功
~	
1985	科学万博-つくば'85でHSST-03運行
1988	埼玉博覧会でHSST-04展示走行
1989	中部エイチ・エス・エス・ティ開発株式会社設立
1991	大江実験線完成、HSST-100S試験開始
1995	HSST-100L完成、走行試験開始
1999	東部丘陵線への導入答申
2002	リニモ第1編成完成
2004	東部丘陵線完成、全線走行開始
2005	東部丘陵線開業、愛知万博開催



岩谷 満

日本航空株式会社および中部エイチ・エス・エス・ティ開発株式会社でHSST技術、特に浮上技術の開発に従事。現在、伊藤忠商事株式会社HSSTプロジェクトチーム主幹技師。



尾崎 覚

パワーエレクトロニクス制御の開発、車両用電機品のエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機システムズ株式会社産業・交通システム本部交通・特機統括部車両技術部長。電気学会会員。



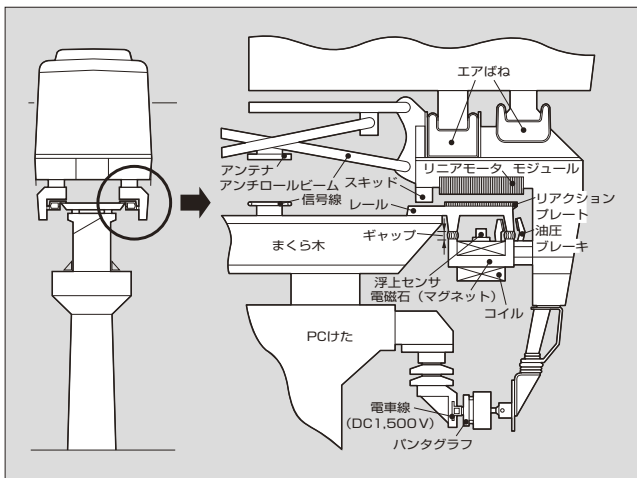
田村 浩明

鉄道車両用パワーエレクトロニクス機器の開発・設計に従事。現在、富士電機システムズ株式会社機器本部神戸工場パワエレ技術部。

表2 リニモの主要諸元

編成・定員	編成	3M (Mc1+M+Mc2)
	車体寸法	列車長 (先頭車 + 中間車) 幅 高さ 43.3m (14.0m×2+13.5m) ×2.6m×3.45m
	質量	空車：17t/両、満車：27t/両
主要装置など	定員	編成：244人 (座席定員104人)
	車体構造	アルミ合金製半張殻構造
	車体支持装置	ペアモジュールによる可撓 (かとう) 台車方式
	浮上案内装置	浮上・案内兼用U形常導電磁石 (10台/1両) (標準浮上高さ8mm, 省電力浮上高さ6mm)
	推進装置	VVVFインバータ制御リニアインダクション モータ方式
制動装置	常用	電気 (回生/逆相) ブレーキ, 油圧ブレーキ
	非常用	油圧ブレーキ
車両制御	保安装置	ATOによる無人運転 ATCによる車上信号, 速度制限
	監視・制御	TIMSによる車上機器の集中監視・制御
電源	電気方式	DC1,500V
	最高速度	100km/h
走行性能	加速度	最大4.0km/h/s
	減速度	常用 (最大) : 4.0km/h/s 非常用 : 4.5km/h/s
	最大登坂 こう配	60% (大井実験線の最大登坂こう配は70%)
	最小通過曲線	75m

図2 浮上系の構成



間中は万博八草駅) までの9駅8.9kmを17分で結んでいる。沿線には半径75mの急カーブや1,000分の60の急こう配などがあるが、通常の鉄輪式鉄道には実現困難な線路条件も浮上式鉄道であるリニモには可能である⁽¹⁾。

4 磁気浮上システムの概要

リニモは電磁石によってレールとの間に発生する吸引力を利用して浮上する常導電磁石式磁気浮上方式を採用している。通常の鉄輪式鉄道車両の台車に相当する浮上モジュールは浮上力を発生する電磁石と浮上量を管理するための浮上センサの各2群とその制御装置から構成されてお

図3 磁気浮上システムのシステム構成

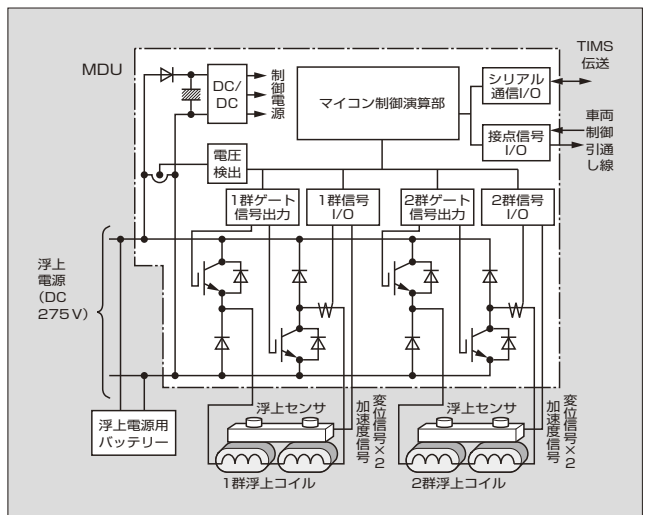
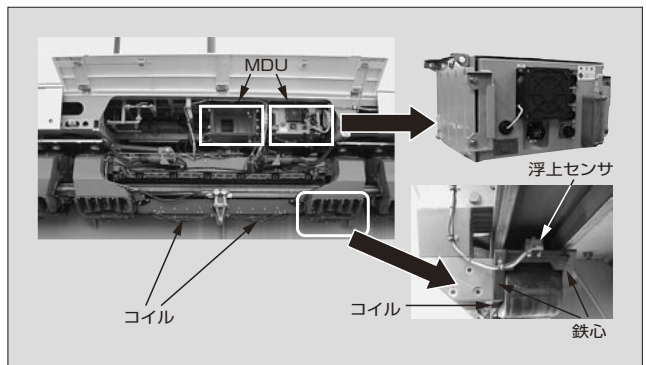


図4 磁気浮上システムの製品外観



り、1両あたり最大28トンの車両を10台のモジュールで浮上させる。図2に浮上系の構成を示す。

4.1 システム構成と諸元

磁気浮上システムのシステム構成を図3、製品外観を図4に示す。

1台の浮上モジュールには、二つの浮上コイルと鉄心、浮上センサから構成される浮上ユニット2群が搭載されている。浮上ユニットを制御するマグネットドライバユニット (MDU) は、1両あたり10台、1編成3両で合計30台が車体床下にぎ装されており、MDU1台で浮上モジュール1台 (2群の浮上ユニット) を制御する。

2群の浮上ユニットは1台のMDUの中でおのおの独立に制御されるが、制御周期を互いに半周期ずらすことで、電源負荷を軽減するようにしている。

4.2 MDUの制御技術

表3に浮上コイルとMDUの主要諸元を示す。

(1) マグネット電流の制御

直列に接続された二つの浮上コイルは、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) を使用した2象限動作のチョッパにより制御される。図5にIGBTのスイッチングモードを示す。

(2) 浮上センサ

浮上センサはレールからの距離を検出する変位センサと、鉛直方向の加速度を検出する加速度センサから構成される。

変位センサはレール中央の下部と浮上ユニットの上部に設けられた浮上センサ上部との間のギャップ量を計測することで、レールからの浮上量を間接的に検出している(図2参照)。変位センサは高周波磁束がレールに誘起する渦電流の大きさがレールとの距離に比例することを利用してギャップ量を非接触で検出する。なお、変位センサはレール継目のすきまで浮上量を誤検知することを避けるため、二組のセンサを一定の間隔を隔てて設置し、そのうちの最小値をギャップ検出値として制御に使用する。

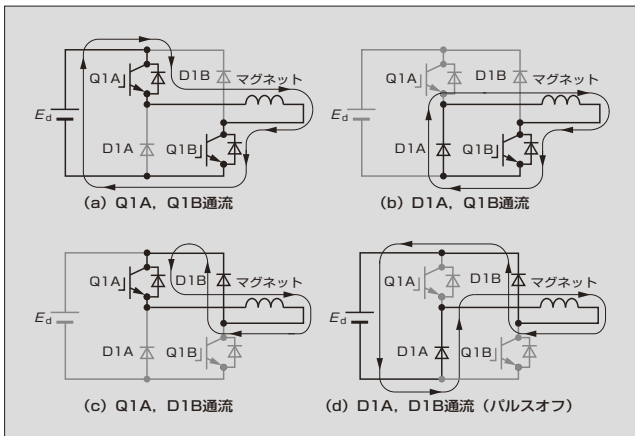
(3) MDUの浮上制御アルゴリズム

吸引式の磁気浮上では、電磁石の励磁電流が一定であれば、浮上量、すなわち電磁石とレールとのギャップと吸引力が反比例(ギャップ小:吸引力大, ギャップ大:吸引力小)の関係にあり、外乱などでギャップが変動するとそれを助長する方向に働く。このため、浮上モジュールが落下やレールへ吸着しないよう適切な制御を施す必要がある。MDUでは、変位センサで検出したギャップ量が指令したギャップ値に一致するよう高速でPID(比例, 積分, 微分)制御を行い、吸引力を制御している。さらに、加速度センサで検出された浮上モジュールに生じている加速度情報に基づく補償制御を行って、制御の安定性を確保してい

表3 浮上コイルとMDUの主要諸元

	項目	仕様	
浮上コイル	起磁力	8,700AT	
	定格電圧	DC280V	
	定格電流	DC28.6A	
MDU	搭載方式	つり下げ式	
	主素子	IGBT (600V, 300A)	
	制御方式	2象限チョッパ制御	
	出力電流	定格	45A
		短時間耐量	50A (10min)
		瞬時耐量	150A (10s)

図5 MDUチョッパのスイッチングモード



(2) する。

HSSTでは車体と軌道系の各種構造物との相互作用で共振モードが発生することが判明している。そこで、大江実験線で観測された以下の共振モードに対する周波数選択型の補償制御を行っている。

- (a) けた振動: 十数 Hz
- (b) まくら木振動: 70 ~ 75 Hz
- (c) レール振動: 125 Hz 近傍

また、これらの制御系のダイナミクスは車両の走行速度に大きく依存していることから、車両制御伝送システム経由で得られる車両速度情報に基づいて制御パラメータのゲインスケジューリングを行って、最適な制御特性を実現している。

図6 に浮上制御系の制御ブロック図を示す。

4.3 保護技術

磁気浮上鉄道では浮上機能を安定かつ確実にすることが最重要である。このため、リニモ特有の運用環境を踏まえ以下の保護対策を行った。

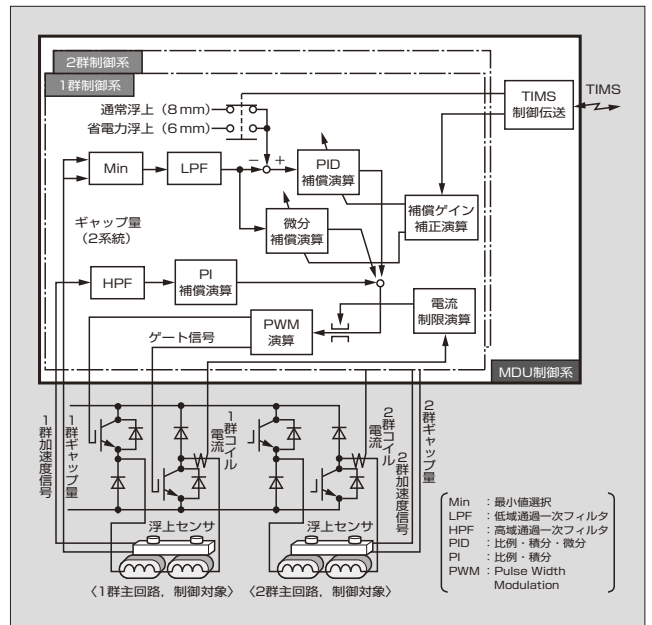
(1) IGBTの過負荷耐量

リニモの場合、両端駅における折返し時を除いて、常時浮上していること、また愛知万博開催期間中の利用者の集中による連続的な過負荷を考慮して、チョッパ用IGBTの過負荷耐量はコイルの連続定格に比べても十分大きなものとした。

(2) ブレーカのトリップ抑制

浮上用電源としては架線から供給されるDC1,500Vを補助電源装置で降圧したDC275Vが供給される。浮上用電源には配電系の保護協調のためブレーカが設けられているが、ATO(Automatic Train Operation)による自動(無人)運転を基本とするリニモでは、手動操作が必要なブレーカのトリップ発生は、運行に重大な支障を生じるお

図6 MDU浮上制御系の制御ブロック図



それがある。このため、MDUでブレーカ特性に基づいた電流制限を行って、ブレーカのトリップを抑制するようにしている。

(3) 停電時の運転継続

浮上走行中に架線停電が発生した場合、浮上状態を停車まで維持する必要があるが、リニモはこの間の浮上電力を供給するためのバッテリーを装備している。有限なバッテリー電力の消費を低減するため、架線停電の発生により車両制御伝送システム経由で与えられた省電力浮上モード指令または浮上電源電圧低下の検知に基づいて、浮上量(ギャップ値)を通常の8mmから6mmに切り替えて消費電力の低減を行う。さらに、MDU制御電源の停止による制御不能と制御停止時にコイルに蓄積された磁気エネルギーの還流による過電圧を回避するため、コイルの励磁電流を制御して浮上電源の下限値まで制御を継続できるようにしている。

図7 シングルセンサオペレーションモードの管理アルゴリズム

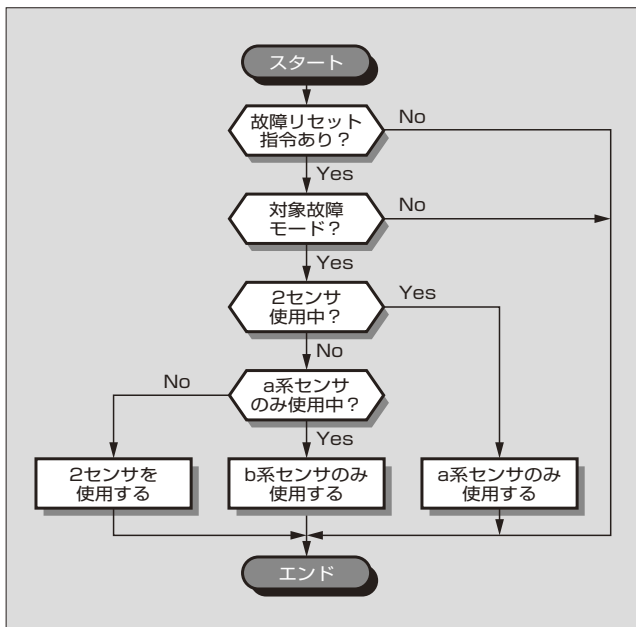
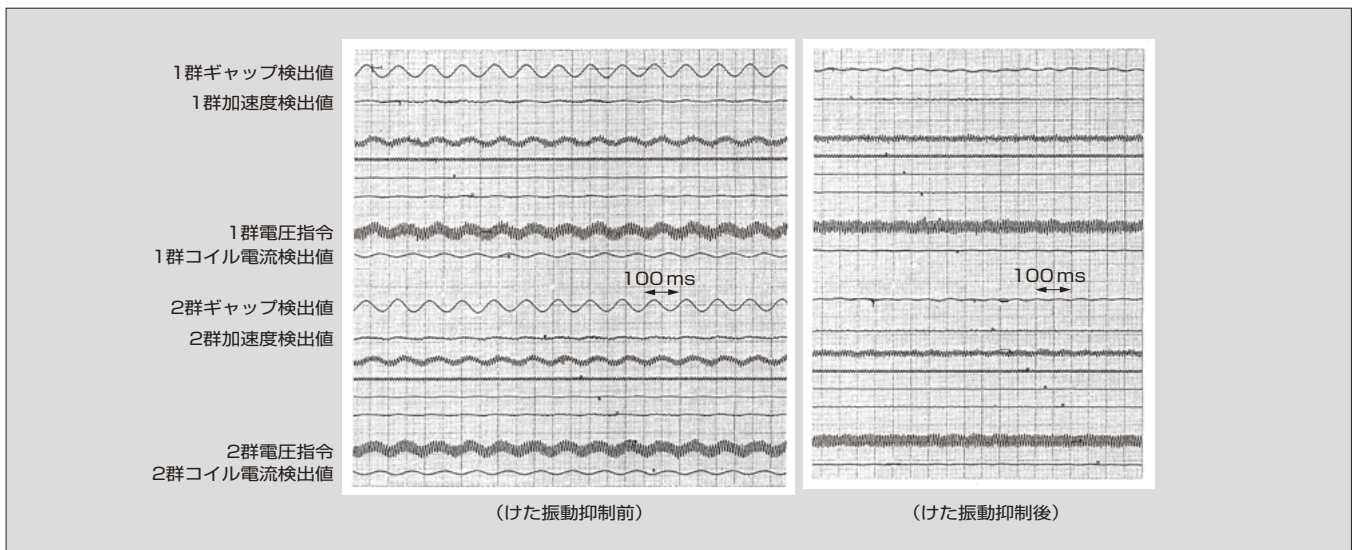


図8 満車試験データ (けた振動の抑制)



4.5 現車試験

リニモの浮上制御は、リニモの原型となった100L型車両およびリニモ第1編成（プロト編成）を使用した大江実験線での延べ1年有余にわたる浮上走行試験、および大江実験線での貴重なフィールドデータに基づき軌道特性を改善した営業線（東部丘陵線）での走行試験で磨きをかけた。

図8に車両質量が満車の場合のけた振動の発生状況と、その抑制制御を行った現車試験結果を示す。

現車試験では光シリアル伝送機能を利用して、MDU制御系の各種制御量を測定器端まで取り込むことで、一般車両に比べて厳しい電磁環境にあるリニモにおいても良好な試験評価を実施することができた。

5 あとがき

磁気浮上式鉄道として、わが国ではじめて実用化された

リニモの磁気浮上システムの概要を紹介した。

リニモにはじめて乗車されたお客様の多くが、藤が丘駅～はなみずき通駅間の地下区間走行中の静粛性に驚く。

今後、磁気浮上鉄道が普及し、騒音レベルのバロメーターの一つである「地下鉄の車内騒音」が死語になる時代もそう遠い話ではないかもしれない。

それを実現するためにも、HSSTの生命線ともいうべき磁気浮上制御品質と信頼性の一層の向上に努める所存である。

参考文献

- (1) 石本俊三ほか. 日本初の常電導磁気浮上鉄道の実用化. Maglev. 2004.
- (2) Morita, M. et al. The Characteristics of The Levitation System of Linimo (HSST System). Maglev. 2004.

