リニアモーターカー実用化の動向

特集解説

正 員 正 田 英 介 (東京大学工学部電気工学科)
 正 員 北 野 忠 美 (運輸省国有鉄道改革推進部)
 正 員 水 間 毅 (運輸省交通安全研究所)
 正 員 藤 原 俊 輔 (鉄道総合技術研究所)

1. はじめに

リニアモーターで推進される軌道交通機関——リニアモーターカー——の開発が始まって以来 20 年を超えたが、最近ではテレビや新聞の報道をにぎわしているように、ようやく各所で実用化や本格的な実験線の建設の段階に入ろうとしている。

その背景には、リニアモーター、浮上制御、超電導磁石、GTO インバータなどの要素技術の確立と、長年にわたる走行試験や博覧会などを通じてのデモンストレーションによるシステム技術の成熟がある。

リニアモーターカーといっても浮上式から鉄車輪支持まで、低速から超高速まで幅広く、その適用性や実用化への到達度もシステムによって異なる。以下では、このような内外の実用化の現状と動向について紹介しよう。

2. 開発の動向

リニアモーターカーと総称される交通機関はリニアモーターの形式と車両支持の方法によって図 1 のように分類される。共通の特徴は非接触推進に伴う急こう配登坂能力や高加減速性能、車両の小形・軽量化にある。初期にはエアクッション方式の研究・開発も行われたが、環境性と保守性の限界から現在ではオーチス社のピーブルムーバーがアメリカのデューク大学の構内で試用されているに過ぎず、この方式も実用システムではロープで駆動する方式に置き換っているの、以下

図 1 リニアモーターカーの種類

図 2 磁気浮上鉄道の基本的な方式

では磁気浮上式と車輪支持式に限定して解説する。

(1) 国内 我が国独自で開発されているリニアモーターカーには三つの方式があるが、それぞれ異なる適用領域を目標としており、互いに相補的な関係にある。個別のシステムの開発の状況や技術的な特徴については、第 3 章以降に詳述するので、各方式の位置付けを中心に現状を展望しよう。

JR グループが鉄道総合技術研究所を中心に開発している超電導磁気浮上鉄道は、最高速度 500 km/h 以上の大都市間の超高速輸送システムを実現しようとするもので、東京-名古屋-大阪を結ぶリニアエクスプレス構想⁽¹⁾などが適用の対象として想定されている。超電導磁石による誘導反発方式により百数十 km/h 以

Recent Development in Practical Application of Linear Motor Cars. By Eisuke Masada, Member (Faculty of Engineering, University of Tokyo), Tadami Kitano, Member (National Railways Restructuring Promotion Department, Ministry of Transport), Takeshi Mizuma, Member (Ministry of Transport, Traffic Safety & Nuisance Research Institute) & Shunsuke Fujiwara, Member (Railway Technical Research Institute).

キーワード: リニアモーター, 磁気浮上, 超電導, 鉄道

上の速度領域で受動的に 10 cm 程度の高さに浮上する。超電導磁石はまた地上次リニア同期モータ(以下 LSM と略記)の界磁としても働き、その強い磁界によって超高速走行時の大きな空気力学的な抵抗に打勝つだけの推力が与えられる。基本的な技術要素は全長 7 km の宮崎実験線において既に確立され、山梨県に計画されている新実験線で実用規模車両による長距離走行に基づいた実用性実証試験や列車運転制御などのシステム技術の検証が地上設備の施行方法の開発と共に進められることになる。

HSST は日本航空が実用化開発を続けてきた常電導電磁吸引制御方式の磁気浮上鉄道で、静止時でも浮上し車上次リニア誘導モータ(以下 LIM と略記)で推進されることから、空港アクセス、都市近郊輸送、都市内ピープルムーバーなど幅広い適用分野が期待されている。電磁石電流の能動制御で一定に保たれる浮上高さは 1 cm 程度であり、エネルギー効率があまり高くとれない LIM とその制御装置を車上に装備するので、最高速度は 300 km/h 以下に抑えられよう。1985 年の筑波万博以降各地の博覧会場でデモンストレーション走行を続けており、軌道長が数百 m と短く、速度も数十 km/h 以下に限られてきたが、200 万人以上の一般乗客に浮上走行を体験させ、高い運転信頼度も記録している。特に横浜博では時速 60 km/h 以下に限定されているが浮上式としては我が国最初の営業システムとしての認可を運輸省から与えられている。今後、名古屋実験線で 100 km/h 走行までの本格的な実用化試験が行われることになる。

車輪支持・インバータ駆動の在来形鉄道車両の電動機を LIM で置き換え、操舵機能をもつ台車と組合せて車高の低い、急こう配登坂や曲線部走行能力に優れた車両を実現しようとする開発も行われている。運輸省と地下鉄協会は地下鉄のトンネルの断面積を小さくして建設費を低減するために、モノレール協会では環境性や適用性の高い都市内交通機関を実現するために、それぞれ大阪南港実験線や埼玉博場内輸送機関で本格的な実用化試験が行われた。前者は既に大阪市営地下鉄 7 号線と都営地下鉄 12 号線への採用が決まっており、建設が進んでいる。

(2) 国 外 初期にはアメリカでリニアモーターカーの開発が行われたが中断され、現在はヨーロッパ諸国とカナダでのみ実用化が進められている。

Transrapid System⁽²⁾は西ドイツの研究技術省の資金で Thyssen Henschel 社など 7 社が協力して開発している最高速度 400~500 km/h の磁気浮上鉄道である。Düsseldorf から北に 200 km ほど離れた Emsland

に全長約 31 km の眼鏡形状の実験線が建設され、2 両編成全長 54 m 車重 120 トンの実用規模の実験車 TR-06 の走行試験が 1983 年から続けられており、最高速度 413 km/h を記録したほか、走行性能や実用化への成熟度、運用方法などについて広範な試験が行われてきた。走行試験が将来のユーザと想定される西ドイツ国鉄と Luft Hansa の 2 社に工業装置の試験法人である IABG が加わって行われている点にも特徴がある。このシステムは常電導電磁吸引浮上で地上次 LSM によって推進される。浮上高さは 1 cm で、左右案内磁石と支持磁石は独立に装備され、後者は LSM の界磁も兼ねている。軌道は単線であるが、二つのループと高速分岐装置、35 % こう配部と実用線に必要な要素が備えられていて、実用システムにおける連続走行が模擬できるようになっている。ガイドウェイもコンクリート桁と鋼桁の両方があり、高架形と地上設置形など浮上レールの取り付けを含めた施工性や製造手法の評価も行われている。TR-06 の試験で明らかになった車両の空気力学的な走行抵抗と着地時のスキッドの問題点を改善した実用線プロトタイプ車 TR-07(図 3, 9 ページ参照)も本年初めから走行試験に入っている。今年末までには、周辺技術の評価と合せて、実用システムの成熟度が確認され、実用線の建設段階に進む計画である。その建設地は、9 月中旬に決まるが、Hamburg-Hannover 間約 150 km が候補になっている。アメリカ Florida 州の Disney World と Orland の間にデモンストレーションシステムを建設しようとする動きもある。

Transrapid と同じ原理のピープルムーバー、M-Bahn も西ドイツの AEG 社で実用化されている。こちらは速度数十 km/h 程度の低速システムであるから、浮上系は簡単な構成として経済性を高めている。すなわち、支持磁石は永久磁石として、荷重に応じてギャップ長を機械的に調整する方式を採用し、この調整装置の一部と左右案内にゴム車輪が使われている⁽³⁾。西ベルリンの地下鉄 Dreiecke 駅と Kemper Platz 間の一部複線を含む 1.6 km のデモンストレーション線が作られ、1983 年から走行試験が続けられていたが、ようやく 1989 年 7 月から西ベルリン公共交通網の一部として一般の利用に供せられるようになった(図 4, 9 ページ参照)。ラスベガス市でも同じようなピープルムーバーとしての建設が開始されており、フランクフルト空港拡張後のターミナル間旅客輸送システムへの採用も決まっている。

フランスでは U 形 LIM を用いた STARLIM(図 5)の最高速度 150~200 km/h 程度の都市近郊交通機

図 5 STARLIM の概念図

関としての実用化が検討されている⁽⁴⁾。U 形 LIM の交通機関への応用はフランス国立交通安全研究所が中心になって独仏協力プロジェクトなどとして研究されてきており、大形の回転試験装置による要素試験も 300 km/h 相当の速度まで行われている。STARLIM の適用性については、フランス国鉄や MATRA 社も参加して、マルセイユと郊外のエクス間などが研究され、VAL に匹敵する経済性が示されているのが注目される。交通安全研究所では、既に LIM の要素試験が完了し、Transrapid などでは浮上技術の実用性は十分に確立しているとの立場から、実用線計画が決定すれば、運用開始前の試験のみで営業に進めるとしている。ヨーロッパにも HSST と同じ概念で Transrapid とピープルムーバーの中間の速度領域での磁気浮上鉄道の位置付けが確立しつつあるのは注目すべきであろう。

イギリスではホバートレイン計画が中止された後、イギリス国鉄の R&D センターが中心となって 70 年代の後半から低速のピープルムーバーにのみ磁気浮上鉄道の需要が存在するとの立場から開発が進められた。その結果、バーミンガム空港と隣接する国鉄駅の間 600 m を結ぶ世界最初の恒久的な実用磁気浮上鉄道が 1984 年に実現した(図 6、9 ページ参照)⁽⁵⁾。このシステムは電磁吸引浮上、車上一次 LIM 推進で、台車に直接車室を取り付けてサスペンションをもたない。浮上レールを成層して磁気抗力を低減している点に特徴がある。イギリス国内では残念ながらその後の実用化計画はなく、磁気浮上鉄道の開発は中止されている。

カナダでは、リニアモータ推進が永雪や急こう配に強い点に着目して LIM と操舵台車とを組合せた鉄車輪支持の軽量輸送機関(LRT)の開発が進められた⁽⁶⁾。1986 年以降、バンクーバーのスカイトレインやトロント、デトロイトなどの都市内交通機関として実用されている。スカイトレインでは、レールの波状摩耗や走行騒音などの問題もあったが解決された。リニアモーターカーの中では最も実用が進んでおり、一種のハイブリッドシステムではあるが、リニアモータの交通

機関への適用性を具体的に実証した点で意義が大きい。

3. 超電導磁気浮上鉄道開発の現状と展望

3.1 超電導磁気浮上鉄道

このシステムは図 1 および図 2 にも示されているように、車両に超電導磁石を搭載し、浮上および推進の界磁として用い、浮上は誘導反発方式(EDS)で推進の方式は空心のリニア同期モータ(LSM)である。この方式の特徴は十分な浮上力を得るには車両がある程度の速度になっていることが必要で、浮上、案内には制御が不要、かつ車両と地上の間隔を大きく取ることができる点である。

3.2 開発の経緯

この方式の原理は 1967 年に提唱されたが、我が国では 1970 年前後から当時の国鉄で開発が始められ、目標として高速、大量輸送、低公害、安全が掲げられた。この後、浮上、案内、推進の基本的特性確認のために定置の試験装置や小規模の走行設備での試験を行い、解析との突合せを行ってきた。これらの結果を集成して 1977 年には、高速走行の特性を把握するため、宮崎に 7 km の逆 T 形ガイドウェイの実験線を建設し、無人実験車 ML 500 の実験を始めた。この車両(図 7)は重さ 10 トンで、超電導磁石は浮上用と推進・案内用とが独立したもので進行方向に 4 極並べ、合計 16 個を搭載していた。推進のための電源設備はサイクロコンバータで 0 ~ 33 Hz の可変電圧、可変周波数の電力を供給するものであった。この車両が 1979 年 12 月には 517 km/h の速度を達成し、安定して 500 km/h の走行が可能であることを実証した。

次の段階としてガイドウェイを U 字形とし、車両の断面をより実用的な箱形とする 3 両編成の MLU 001 が製作されたが、この段階から主要な開発要素については運輸省の補助金によって開発が進められることとなった。この車両の超電導磁石は浮上と推進・案内を兼用するもので、磁石個数は 1 両あたり 8

図 7 宮崎実験線 ML-500

個に減少した。この車両は連結状態の走行特性を得ることを目的の一つにしており、安定な走行することが確認された。また1982年から有人の乗り心地試験をはじめ、1987年2月に有人で400.8 km/hを記録した。

1987年4月からは2台車で車体を支えるボギー方式の車両 MLU 002(図8, 9ページ参照)の走行を開始し、現在に至っている。この車両はそれ以前の車両が全長にわたって超電導磁石を配置していたのに対し、台車部分に超電導磁石を集中した点に特徴がある⁽⁷⁾。

3.3 各種試験の結果と現状

次にこれまでに得られた主な結果を示す。

(1) 電磁力特性と運動特性 宮崎実験線車両の走行中の浮上の様子は図9のようなもので約10 cmのギャップがある。また推力は電機子コイル電流に比例するが、最大推力は約81 kN、最大加速度は約0.3 gで、これらの電磁気的な特性はほぼ計算どおりの結果である。またガイドウェイに人為的な不整を付けて車両の応答を求め、シミュレーションによる結果と一致することを確認した⁽⁸⁾。浮上に伴う走行抵抗を減らす方式として、図10のように側壁にヌルフラックスの浮上コイルを配置する方法があり⁽⁹⁾、この方法について約40 mの区間に浮上コイルを配置して走行実験を行ったが結果はほぼ予測どおりであった。

(2) 超電導磁石 超電導磁石は、これまで①重量を極力軽くする、②超電導コイルと地上コイルの間隔を極力小さくする、③クライオスタットの熱侵入を極力小さくし、ヘリウム冷凍機の負荷を軽くする、ということを目標として開発を進めてきた。MLU 002

図9 MLU 001での平均浮上高さ特性

図10 側壁にコイルを配置する方法

図11 試作地上電機子コイル

では銅比1の線材を使用して定格起磁力700 kAのコイルとしている⁽¹⁰⁾。また磁石の励磁消磁の作業を容易にし、冷凍機に対する負荷を小さくできるように、励磁速度を向上させるために超電導コイル、永久電流スイッチの開発を進めてきた。更に実用車を想定した超電導コイルを試作し、走行状態を模擬した電氣的、機械的負荷を加えて、長期的な試験を行っている。

(3) 地上コイル 実用を想定した場合、地上に連続して配置される推進用の電機子コイルは出力が大きくなるので、電圧も比較的高く設計する必要がある。また多数にのぼるコイルを屋外に暴露して敷設するので、信頼性を高く、耐候性をもたせる必要がある。しかし他方、建設費を低減するために構造、製作方法を単純にするという考慮が必要である。これまでエポキシ注型による、相電圧10 kV、19 kVコイルの試作を行ってきた(図11)。浮上コイルについては電圧が問題になることはなく、構造を単純にするための試作を行ってきた。

(4) ブレーキ設備 大量で高密度な輸送を計画する場合には、ブレーキの能力と信頼性を高めることが必要となる。通常はLSMによるエネルギーを回生するブレーキが使用され、電力変換設備の異常時には発電ブレーキが使用できるが、車両単独で使用できるブレーキの開発も進められ、宮崎の実験線で摩擦ブレーキの試験⁽¹¹⁾、空力的な方法の試験⁽¹²⁾が行われ、特性が確認された。

(5) 電力変換装置 これまで宮崎実験線で周波数変換はサイクロコンバータ(c/c)によって行ってきた。当初は商用電源から電動発電機で120 Hzまであげて、これをc/cによって最高33 Hzまでの可変周波電力を得ていたが、その後循環電流方式のc/cを開発し、商用電源から直接変換できるようになった⁽¹³⁾。

更に現在はこの分野の技術の発展に伴い、GTOインバータの開発も進めている。

(6) その他 分岐その他鉄道システムとして必須のパーツについて、それぞれ宮崎の実験線などで開

図 12 新実験線のイメージ図

発を進めている。

3.4 今後の開発課題と計画

宮崎の実験線では基本的な特性を把握し、またシステム構成の要素の確認実験を行ってきた。

現在、40～50 km の新実験線建設の場所の選定がなされ、その計画(図 12)が具体化されつつあるが、大規模な実験線において確認すべき項目として、

- (1) 長期間連続高速走行による安定走行、各種機器の信頼性、耐久性の確認
- (2) 最小曲線半径、最急こう配、トンネル断面などの構造基準の確認
- (3) 複数列車制御システムの試験、確認
- (4) 運営コストの把握と運転保安システム、保守基準などの確立

があり、実用的なシステムを完成するために総合的な開発を進めていく計画が立てられている。

4. HSST YES '89 線の営業運転と今後の動向

平成元年 3 月から 10 月まで、横浜博覧会会場内において、HSST が営業運転された。HSST が一般の人の前に始めて登場したのは昭和 60 年に開催された筑波の国際科学技術博覧会であったが、今回は従来とは異なり鉄道事業の免許を受けて初めて公共輸送に供する鉄道(常電導磁気浮上式鉄道)として営業運転されたものであった。

4.1 常電導磁気浮上式鉄道とその営業運転

日本で営業運転されている鉄道は鉄道事業法および鉄道営業法において、その営業から施設の建設、車両の製作などまで一定の基準のもとで運輸省の監督を受けているが、常電導磁気浮上式鉄道も鉄道の種類の一つとして位置付けられており、同様の監督を受けることとなっている。従来の筑波などでの運行については、最高速度やその装置構成などから、公共輸送機関としての鉄道としては認知されていなかったが、設計最高速度 60 km/h という今回のシステムについては、公共輸送機関としての鉄道といえる程度のレベルに完

成度が高まってきたこともあって、初めて鉄道事業免許の対象とされたものである。

運輸省の鉄道事業監督においては路線や事業内容を免許する行為に始まって、施設関係の工事施行認可や車両の確認という行政行為があるが、初めての磁気浮上式鉄道であったことから、これを契機に幾つかの省令などの整備が行われた。

今回整備された省令は鉄道事業法施行規則および特殊鉄道構造規則(モノレール、新交通システムなどの技術上の基準)であり、前者は手続き規定であるが、後者については施設、車両の認可、確認基準であると共に事業者の維持基準である。浮上式鉄道については、これまで定められたものがなかったことから、このタイプについてその時点で得られる各種データに基づき 60 km/h 程度までの速度に限定して基準の考え方が整理され、「おおむね 60 km/h 以下の速度で走行する常電導吸引型磁気浮上・リニアインダクションモータ推進方式」の浮上式鉄道に限った規定として従来の省令に追加されている。

なお、技術上の基準である特殊鉄道構造規則の整備にあたって、このタイプの浮上式鉄道は今後とも多くの改良、開発が予想されることから、浮上関係、モータ関係の規定を概念的なものとして細かい数値規制はせず、各装置の能力と使用条件を勘案したうえで一定の判断を行うことを求める形に整理されている。そのため、この規則の適用においては、個々の装置の能力の限界判断が重要な要件となっている。

また、鉄道の主要施設については運輸省の完成検査が行われることになっているが、今回の施設については特殊かつ複雑な測定、検査が予想されたことから、本来の検査責任機関である関東運輸局の検査に先立って運輸省の研究機関である交通安全公害研究所による試験が実施されている。

4.2 HSST の開発の経緯

HSST は昭和 49 年に日本航空で高速空港アクセス用輸送機関として研究が開始されたものであり、51 年には川崎市東扇島の 1,300 m の実験線で 1 号機(無人)を用いた試験走行が開始された。52 年には有人機として完成した 2 号機を用いた 100 km/h 程度でのデモンストレーション走行が行われ、また 53 年には 1 号機に補助加速装置を付加して最高速度 307.8 km/h の走行が記録された。これらの状況もあって 54 年には運輸省の委託により、実験線が曲線やこう配を含んだ全長 1,600 m のものに改良され、種々の走行データが収集された。実験線は 56 年に閉鎖されたが、それまでに得られた資料などをもとに運輸技術審議会に

において「常電導磁気浮上式鉄道技術開発指針」がまとめられ、57年には同審議会から運輸大臣に建議がなされ、基礎開発段階から実用化開発の段階へ踏み出すことになった。

59年には実用サイズの3号機が完成したが、これには現在のHSSTの特徴であるモジュール機構が採用されている。モジュールは、リニアモータ、浮上案内用電磁石、ブレーキ装置などを一つの構造体に組込んだ車体支持装置(在来鉄道における台車にあたるもの)であり、58年より(社)日本鉄道技術協会が(財)日本造船振興財団の補助を受けて、学識経験者、メー

カ、運輸省関係者による研究会を実施して実用化されたものである。3号機は前述の筑波博やカナダのバンクーバ国際交通博で展示走行(30~40 km/h)され、現在も岡崎市の岡崎公園内で展示走行されている。

3号機において車体サイズなどで実用サイズのものが完成したわけであるが、本来の鉄道車両では備えられているモータ制御装置などが地上に置かれているなど、まだ実用レベルのものではなかった。63年に完成した4号機ではこれらの装置も車体に装着され、初めて鉄道車両としての形が完成した。これは同年3月から5月まで埼玉県で開催された埼玉博覧会で展示走

表 1 HSST 開発状況

項 目	HSST-01	HSST-02	HSST-03	HSST-04	HSST-05
1. 開発時期および走行場所	走行期間 1975年12月 1981年3月 走行場所 横浜市杉田 川崎市東扇島	走行期間 1978年2月 1981年3月 走行場所 川崎市東扇島	走行期間 1984年7月 現在 走行場所 筑波博 バンクーバー 岡崎市	走行期間 1988年1月 1988年7月 走行場所 埼玉博会場	走行期間 1989年1月 現在 走行場所 横浜博会場
2. 車両概要 寸法(長さ×幅×高さ) 自重 満車重量 客席数	4.2m×2.6m×1.1m 1.0t 満車重量 0	6.84m×2.0m×1.75m 1.8t 2.4t 6~8席	13.8m×2.95m×3.0m 12.3t 18.0t 50席	19.4m×3.0m×3.6m 19.8t 27.0t 70 席	36.5m×3.0m×3.6m 39.5t 54.0t 160 席 (2両編成列車)
3. 性能実績 最高速度 曲率半径 カント角度 こう配 縦曲率半径	307.8 km/h 280 m 8.5度 1.1% 3,970m	110 km/h 280 m 8.5度 1.1% 3,970m	60 km/h 250 m 1.15度 0.3% 0m	43 km/h 150 m 2.3度 0% 0m	55 km/h 0 m 0度 0% 0 m
4. 車体支持方式 形式 二次サスペンション	車両本体がモジュールに 相当 なし	フレキシブル台車方式 コイルばね	6モジュール独立懸架方式 エアばね	8モジュールフレキシブル 台車方式 エアばね	同左
5. 電気方式 電気方式 電車線 集電器	三相交流VVVF(0~600V) 銅平角線 ばね挟圧式	同左 同左 ばね挟圧式	(推進用) 三相交流VVVF (40~550V) 浮上用 210 VDC 銅平角線 ばね挟圧式	750 VDC アルサス剛体トロリー 押し圧式カーボンブラシ	同左 同左 同左
6. 浮上案内 浮上エアギャップ 電源 チョッピング周波数	13 mm バッテリー (164 V) 2 kHz	8~10 mm バッテリー (120 V) および 直流変換器 2 kHz	11 mm 地上置き直流電源装置 (210 VDC) 2 kHz	9 mm 車載変換器 (PSU) (280 VDC) 2 kHz	同左 同左 同左
7. 推進 リニアインダクション モータ 電源	3,400 N×1 (250 km/h以上の場合は 補助ロケット使用) 地上置き VVVF 208 kVA, 三相, 0~600 V 0~350 Hz	3,000 N×1 同左	1,860 N×6 地上置き VVVF 380 kVA 5~100 Hz	2,646 N×8 車載 VVVF 770 kVA 5~65 Hz	2,646 N×8×2 車載 VVVF 770 kVA 5~65 Hz
8. ブレーキ 電気ブレーキ 機械ブレーキ (挟圧式)	発電ブレーキ 空気圧ブレーキ	発電ブレーキ 油圧ブレーキ	逆相ブレーキ 油圧ブレーキ	逆相ブレーキ 油圧ブレーキ	回生ブレーキ 逆相ブレーキ 油圧ブレーキ
9. 軌道 構造 軌道全長	単桁方式(モノレールタイプ) 地上置き 1,600 m	単桁方式(モノレールタイプ) 地上置き 1,600 m	複桁方式 地上置き 350 m('85 筑波) 450 m('86 バンクーバー) 180 m('87 岡崎)	単桁方式(モノレールタイプ) 高架(桁高 4.5 m) 桁長 12 m, 16 m 330 m	単桁方式(モノレールタイプ) 高架(桁高 4.5 m) 桁長 12 m, 16 m 568 m

行されたが、今回の横浜博覧会会場で走行された5号機のプロトタイプともなったものである。5号機は平成元年1月に完成しているが、基本的に4号機を改良した片側運転台の車両であり、2両を編成して一列車としたものである。

現在まで開発された施設、車両などの概要については表1に示す。また、HSST-05号機の外観を図13(9ページ参照)に示す。

表1で見るとおり、HSST 4号機、5号機は約20mの車両長をもち、本来、30～50 km/hで運行するシステムというよりは、近郊都市間を200 km/h程度で運行するものとして開発されたが、運行線路が短いことから車両の制御機器などは低速対応である。

4.3 各種試験結果

4.1節で述べたように、今回のHSSTには交通安全公害研究所の試験が実施されているが、これは研究・開発のためというよりも、安全確認のための試験であり、従来モノレール、新交通システムの実用化の初期に行われていたものである。

主な試験としては、橋りょうおよび軌道構造物、電気設備などの基本的な鉄道施設の確認試験および車両(浮上系、推進系など)、信号保安設備の性能や雑音に対する耐性、異常時動作試験等であり、元年2月に12日間にわたり実施された。

橋りょうおよび軌道構造物については、応力、変位、振動加速度とも小さく列車の走行に必要な強度などを有することが確認された。車両については、ほぼ計画値どおりの加速性能、制動性能が確認され、浮上制御、横方向の位置制御とも良好であった。異常時を想定した試験としては停電時浮上走行確認試験、モジュール落下滑走試験、ベアマグネット故障走行試験を行ったが、いずれも安全性が確認された。図14に、ベアマグネット故障走行試験測定波形例を示すが、浮上ギャップ変動なども全線走行試験時に比べて大きな変化はなく、マグネット電流についても過大なものは

みられていないのがわかる。信号保安系については、雑音レベルは小さく十分なC/Nが確保されており、速度検出機能、ATS機能とも正常であることが確認された。電力系については、高調波、中性点接地地絡に関する試験を行い安全性に問題がないことが確認された。また、環境に対する影響として車内における漏れ磁界や電波雑音を測定した結果も特に異常はみられなかった。

以上のように試験の結果、特に大きな問題となるものはみられず運行の安全性が確保されることが確認された。

4.4 今後の開発課題と計画

HSSTは5号機において、鉄道事業を初めて実施したわけであるが、本来HSSTはもっと広範な適用範囲を有するシステムであるといわれている。

エイチ・エス・エス・ティ(昭和60年に日本航空から開発などの事業を継承した企業であり、現在の開発主体)が掲げている開発イメージによると、HSSTには300型、200型、100型の3タイプ(それぞれ運行速度を300 km/h、200 km/h、100 km/h程度とするもの)があり、都市間交通、都市圏交通、都市内交通への適用が考えられている。各々、浮上、推進の原理は共通であるが、連続高速運行を行うものや通勤輸送のような運行を行うものなど、要求される能力も異なるため求められる浮上装置やモータなどの性能も異なることになる。実用化のためにはその各々にプロトタイプの車両が試作され、試験が繰返されることが必要と考えられるが、その意味では、近年製作された3～5号機の車両の適用範囲と実際に行われた試験は直接的に関連したものとはなっていない。例えば、今回の営業運転は都市内交通の速度であり、適用された省令も都市内交通を意識したものであるが、車両は高速タイプ、着座のみ定員乗車という状態である。そのため、一般的な都市交通的な走行条件、使用条件(急曲線走行、積み込み乗車など)での試験は行っておらず(行え

図14 ベアマグネット故障走行試験測定波形例

図 3 TR-07 (Thyssen-Henschel 社提供)

図 8 宮崎実験線 MLU-002

図 4 M-Bahn

図 13 走行試験中の HSST-05 号機

図 6 Birmingham System

図 16 リニアモータ地下鉄 (50 mR 走行中)

図 18 大阪市交通局試験車

ず), また, 高速形としての直接的な試験は当然不可能であったが, 今回の線路条件(直線, 平たん), 使用条件を考えたうえで, 安全上の問題はないと判断されたものである。

なお, 今回の運輸省の基準は一般的にこのような原理, 方式で浮上鉄道が実現可能であろうところから, 今回の HSST の鉄道事業を契機に整備されたものであり, 必ずしも 5 号機の構造などに対応した整理とはなっていないことは注意すべきである。

これらのことを考えると, 都市交通に適用される新しい HSST 車両の開発はぜひ望まれるものであり, また, 今回の 5 号機については 200 km/h 運行を意識した試験の実施が期待される。

前者については, 62~63 年度に学識経験者やメーカなどに運輸省関係者も加わり, 施設, 車両の設計など, 技術的な検討も実施され, また, 元年度からは開発主体が愛知県, 名古屋鉄道などと組んで車両の試作や走行試験を実施することになっており, 運輸省もその安全性評価を行うための委員会を構成している。

一方, 後者については, アメリカのラスベガスにおいて約 7 km の路線を 200 km/h 程度で運行する事業が開発主体を中心に日本の有力企業が参加して進められており, その中で種々の確認試験などが実施される計画となっている。

これらの計画が順調に進めば, 数年後にはより完成された HSST が出現することも考えられ, 常電導磁気浮上式鉄道についてはその実用化の最終的な段階がくとも予想される。

5. リニアモータ地下鉄の走行試験と実用化

5.1 リニアモータ地下鉄とは

リニアモータ地下鉄とは, 車両の推進はリニアモータを利用し, 車体の支持・案内には従来鉄道と同様に鉄車輪と鉄レールを用いる方式である。

この方式は, 台車に装架されたリニアモータ一次側コイルと軌道側に設置された二次側導体(リアクションプレート)との間に発生する磁気力により車両を推進・制動する方式(図 15 参照)で, ①非粘着駆動のため急こう配が走行でき, 操舵台車などを利用して急曲線もスムーズに走行できるため, 路線設定の自由度が拡大する, ②リニアモータが扁平形状であることを利用して車両の低床化を図り, 車内の居住性の低下を招かずに車両断面寸法の縮小化が可能となる, ③モータの回転力を車輪に伝達する必要がないので減速装置などが不要となり, 低騒音化が可能となる, などの特色を有している。

図 15 リニアモータ地下鉄の構造

従って, 路線設計の自由度が増すことによる利便性の向上, 車両断面の低減化による建設費の低廉化といったリニアモータ地下鉄の長所が, 地下鉄建設に対する低コスト化の有力な手段としてクローズアップされてきた。

5.2 開発の経緯

リニアモータ地下鉄の開発の歴史は, (社)日本鉄道技術協会が昭和 56 年度から 3 か年で実施した「リニアモータ方式による小断面地下鉄電車の研究」(LIM-1, 日立水戸工場内試験線)に始まり, その成果を受けた形で, 運輸省が昭和 60 年度から 3 か年で実施した「地下鉄の低コスト化に関する研究開発」において「リニアモータ駆動小形地下鉄の実用化研究」と題して, 大阪南港の試験線で試験車(リニア地下鉄)による走行試験を行った(産官学共同プロジェクトで, (社)日本地下鉄協会と運輸省が事務局)。更にこれらの成果を基に, 大阪市交通局は大阪南港の試験線で, 東京都交通局は馬込検車場内の試験線で, それぞれ独自の試験車を製作して走行試験を行った。

一方, 同様な方式を新交通システムに利用しようとするリニアモータ新交通システムの開発(リムトレイン)も昭和 61 年から進められ, 昭和 63 年 3 月~5 月に開かれた, 埼玉博覧会で公開試乗が実施された。

表 2 に, これらのリニアモータ地下鉄システムの概要を示す。図 16 に(9 ページ参照)運輸省の行った試験車を示す。

5.3 リニアモータ地下鉄走行試験結果と現状

リニアモータ駆動小形地下鉄を実用化していくためには, 各々の技術開発要素の試験ばかりでなく, 鉄道システムとしての安全性, 経済性にかかわる試験を行い, その安全性, 経済性を確認しておく必要がある。

ここでは, その一例として, 運輸省の行ったリニア地下鉄での走行試験結果について述べることにする。

5.3.1 評価項目

(1) 経済性 評価項目としては, 建設費, 動力

表 2 リニアモータ地下鉄システムの概要

		LIM-1	リニア地下鉄	リムトレイン	大阪7号線	東京12号線
車 両	車両寸法 (L×W×H)	12.5×2.46×3.09	12×2.47×3.05	12×2.5×3.0	15.8×2.5×3.12	16.5×2.5×3.0
	車両重量 (t)	18.2	15	15	約25	26.5
	定 員 (人/両)	70	64	105	90/100	88
	編 成	1M	2M	2M	2M	2M
リ モ ー タ	出 力 (kW)	70×2	65×4	65×4	100×4	120×4
	定格周波数 (Hz)	20	20	22	21	20
	標準空隙 (mm)	15	12	11	12	12
V V F イ ン バ ー タ	出力容量 (kVA)	650	1,330	1,240	1,640	1,450
	定格入力電圧 (V)	DC 750	DC 1,500	DC 750	DC 1,500	DC 1,500
	定格出力電圧 (V)	AC 550	AC 1,100	AC 550	AC 1,100	AC 1,100
	出力周波数 (Hz)	2~45	0~50	0~40	0~50	0~40
	冷却方式	自然風冷	強制風冷	自然風冷	自然風冷	自然風冷
試 験 期 間		昭和56~58年度	昭和60~62年度	昭和62~63年	昭和63年度	昭和63年度
試 験 場 所		日立・水戸工場	大阪南港	埼玉博覧会	大阪南港	東京馬込検車場
試 験 実 施 主 体		日本鉄道技術協会 日立	運輸省 日本地下鉄協会	日本モノレール 協会	大阪市交通局	東京都交通局 日本地下鉄協会

費および保守費を選び、リニアモータ駆動方式特有の事項を中心に検討し、回転形モータ駆動方式との比較を行った。走行試験では、主回路の消費電力量を測定し、既存のシステムとの比較を行った(他はシミュレーション、机上検討による)。

(2) 安全性 重点事項として、①鉄道システムとしての特性・能力に関するもの(小断面トンネル、急曲線走行、急こう配走行)、②新しい要素技術に関するもの(リニアモータ、小径車輪付きステアリング台車、リアクションプレートおよび軌道構造)、③上記に関連する事項(リニアモータの空けき、および車両下部の限界ならびに運転保安設備に対する軽量車両の影響、非粘着のリニアモータ駆動等の影響)を選び、これらに基づき安全性にかかわる走行試験を実施した。その概要を表3に示す。

5.3.2 走行試験結果とその評価

試験線は、全長2km弱で最小曲線半径は50m、最急こう配は60%である。最高速度70km/h走行が可能である。

(1) 経済性 走行試験では、試験線の直線1kmを90秒で走行するパターン(平均速度40km/h、加速度3.0km/h/s、減速度3.5km/h/s)を設定し、主回路の消費電力量を求めた。試験結果と在来鉄道の消費電力量を図17に示す。

これらの結果を基に、車両規模と定員を同一にしたリニアモータ地下鉄と回転形地下鉄の消費電力量を比較すると、リニアモータ地下鉄のほう約30%(補機

表 3 安全性にかかわる走行試験の概要

(1)トンネルの小断面化に対する安全性 車両限界と建築限界の離隔距離、電車線離隔距離、事故・故障時の異常事態処理
(2)急曲線走行の安全性 脱線、転覆に対する安全性、ステアリング台車の操舵性能
(3)急こう配走行の安全性 こう配での起動・加速性能、ブレーキ性能
(4)リニアモータの空陸 リニアモータ・リアクションプレートなどのたわみ、動的空けき
(5)車両の安全性 起動・加速性能、ブレーキ性能 リニアモータの強度、リニアモータおよび床下機器の温度上昇、 リニアモータからの漏れ磁束 台車の強度、振動・動揺による乗り心地
(6)リアクションプレートおよび軌道の安全性 軌道強度、リアクションプレートの締結
(7)信号保安系の安全性 軌道回路特性、列車検知特性、自動車列車制御装置の特性、情報伝達系の特性
(8)電力系の安全性 電力系の高調波特性、き電系の特性

も含めて)増加するという結果になった。

(2) 安全性

① トンネル小断面化に対する安全性 内径4mのトンネルを想定して定めた車両限界と建築限界の離隔距離については、問題ないことを確認し、電車線下面とパンタ折り畳み高さの離隔距離の設定値(150mm)で、脱線復旧作業が行えることを確認した。

図 17 リニアモータ地下鉄と他の鉄道の消費電力量

② 急曲線走行の安全性 試験線における半径 50 m の曲線通過時の脱線係数は最大 0.7、輪重抜け割合は最大 0.55 で、脱線転覆に対する安全性は問題がなかった。

③ 急こう配走行の安全性 80% 上りこう配で満車の故障車を空車の健全車で推進押上が可能であると推定された。

④ リニアモータの空げき リニアモータの空げきは、12 mm で安全上問題ないことを確認できた。

⑤ 車両の安全性 起動・加減速性能、ブレーキ性能ともほぼ計画値に近い値が得られた。

⑥ リアクションプレートおよび軌道の安全性 まくら木応力などの測定結果から、吸引力が加わっても強度上問題ないことがわかった。

⑦ 信号保安系の安全性 リアクションプレート布設による軌道回路数への影響は極めて小さく、列車検知は従来の鉄道と同様に行えることを確認した。

⑧ 電力系の安全性 走行に伴う変電所における異常な高調波電流、電圧の発生はみられなかった。

5.4 今後の開発課題と計画

5.4.1 今後の開発課題

開発課題として考えられる項目には、電力消費量の低減化、保守方式の確立などがあげられるが、実用上特に障害となる課題はなく、技術の発展に伴う改良という形で更に開発が進むものと思われる。

5.4.2 今後の計画

運輸省の研究を受けて進められた大阪市交通局、東京都交通局のリニアモータ地下鉄の走行試験も昭和 63 年度中に終了し、その結果、大阪市交通局は 7 号

線(平成 2 年に開催される「国際花と緑の博覧会」へのアクセス交通機関となる京橋からの 5.2 km の路線)において、東京都交通局は 12 号線(都心部の環状線と光が丘への枝線より構成されるが、一期分として光が丘～練馬間 4.8 km の路線)において採用を決定し、平成 2 年度には開業が予定され、リニア地下鉄の実用化の幕開けとなる。

図 18(9 ページ参照)に、大阪市交通局実用車両を示す。

今後、都市空間の有効利用の一手段としてのリニア地下鉄が更に発展していくためには、これら 2 事業者の営業路線がどのような成果をあげるかにかかっており、その推移を技術的側面も含めて見守っていきたい。

6. 終りに

以上、リニアモータカーの実用化の現状と動向について内外の状況をまとめた。リニアモータカーは、在来の鉄道とは全く異なる概念に基づく新しい交通機関であり、技術内容や適用性も鉄道と同じではない。その実用化は多少のレベルの差はあっても、まだその緒についた段階で、今後その新しい交通機関としての可能性が、どのように展開されていくか着目をしていただきたい。より高速で快適な交通機関の実現は絶えず人類の夢であり、車輪をもたない磁気飛行機ないし空飛ぶじゅうたんとしての磁気浮上鉄道の実用化に大いに期待していただきたい。同時に、これは新しいシステム技術の完成でその過程には困難が少なからず予想される。会員諸兄の暖かい御支援をお願いしたい。

(平成元年 11 月 16 日受付)

文 献

- (1) T. Doi, A. Seki & M. Uno: "The Linear Express", Proc. Int. Conf. on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, p. 23 (1989-7)
- (2) K. Heinrich & R. Kretzschmar: Transrapid Maglev System (1989) Hestra-Verlag
- (3) 梶野: 「M パーンの現状と将来」, 平元電気・情報関連学会連大, No. 1-67
- (4) J. P. Pascal: "The STARLIM Maglev," Proc. Int. Conf. on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, p. 111 (1989-7)
- (5) M. G. Pollard & E. E. Riches: "Birmingham Maglev: Development for the Future" Proc. Int. Conf. on Maglev Transport '85, p. 123 (1985)
- (6) M. A. Gibbon & J. H. Parker: "Operational Experience with a LIM-driven Transit System" Proc. Int. Conf. on Maglev & Linear Drives, p. 135 (1986-6)
- (7) 佐々木: 「新しい実験車 MLU 002 の概要」, 車両と機械 1, 4, 48 (昭 62-7)
- (8) 吉岡・宮本: 「ガイドウェイ狂い設定試験時の磁気浮上車の運動特性」, 機械学会講演論文集, No. 860, p. 33 (昭 6-12)
- (9) 藤原: 「浮上コイル側壁配置磁気浮上式の特性」, 電学論 D

- 108, 439 (昭 63-5)
- (10) 根本：「超電導磁石」，機械学会先端技術フォーラム，p. 19 (昭 63-3)
 - (11) 小田・熊谷：「浮上式鉄道緊急着地シミュを用いたブレーキ実験」，JREA，31，2，17648 (昭 63)
 - (12) K. Oda, M. Azagami & M. Yoshimura : "Development of Aerodynamic Brake of Maglev Vehicle for Emergency", Proc. Int. Conf. on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, p. 281 (1989-7)
 - (13) H. Ikeda : "Power Conversion System for Maglev Vehicle MLU 002", Proc. Int. Conf. on Maglev Vehicle System, p. 327 (1988-6)

正 田 英 介 (正員)

昭和 12 年 12 月 9 日生。40 年 3 月東京大学大学院数物系研究科電気工学博士課程修了。同年 4 月同大学工学部電気工学科講師，41 年同助教授，57 年同教授，現在に至る。主として，電気機器および制御システムの研究に従事。工学博士。52・53 年度電気学会東京支部評議員，59，60 年度電気学会編修理事。IEEE，VDE 会員。

北 野 忠 美 (正員)

昭和 26 年 4 月 6 日生。52 年 3 月大阪府立大学大学院工学研究科修士課程電気工学専攻修了。53 年 4 月運輸省入省。現在大臣官房国有鉄道

改革推進部保安課補佐官。リニアモータ駆動小形地下鉄の実用化開発，常電導磁気浮上式鉄道の技術評価に従事。現在は鉄道の事故などにおける運転上の問題点等の解明に従事。

水 間 毅 (正員)

昭和 30 年 5 月 30 日生。59 年 3 月東京大学大学院工学系研究科電気工学専門課程博士課程修了。工学博士。同年 4 月運輸省交通安全公害研究所入所。現在交通安全部主任研究官。リニアモータ駆動小形地下鉄の実用化開発，常電導磁気浮上式鉄道の技術評価，鉄道車両の電磁波障害等の研究に従事。

藤 原 俊 輔 (正員)

昭和 18 年 4 月 22 日生。43 年東京大学大学院工学系研究科電気工学修士課程修了。43 年日本国有鉄道入社。現在(財)鉄道総合技術研究所に勤務。この間，リニアモータ，磁気浮上に関する研究に従事。低温工学会会員。