

# 鉄道・旅客輸送分野における リニアドライブ技術の現状

古関 隆章\* (東京大学)

Current status of linear drives applied to rail-guided public passenger transport  
Takafumi KOSEKI (The University of Tokyo)

## 1. まえがき

軌道交通分野でのリニアモータ応用は主として、車輛やホーム柵のドアの駆動用と車輛駆動用に分類できる。

リニアモータの特長は、直接並進力を発生することができるため、駆動機構の部品点数を削減し、信頼性や保守性の向上につなげることができる。この一般産業用上の利点に加え、鉄道システムにおいては、加減速性能の本質的制約となる、鉄車輪・鉄レールの粘着問題から自由な推進、制動系を設計できるという長所がある。

一方で、その駆動制御のためにはパワーエレクトロニクスの発達が不可欠であったため、1873年に始まる電気鉄道の歴史の中ではその実用化に向けた歴史は比較的浅く、実際の応用が進んだのは1980年代以降の30年のことと考えてよい。

本稿では、鉄道車輛やホーム柵のドア駆動用および磁気浮上や鋼索などの特殊鉄道分野を中心にリニアモータ技術のこれまでの応用の経緯を概観する。

## 2. ドア駆動用のリニアドライブ応用

ホームドアと鉄道車両側引戸へのリニアモータ応用は、リニアモータの技術をもつ各電機メーカーで1980年代以降研究開発が行われてきたと考えられるが、東日本旅客鉄道(株)のシステムへの応用を中心に富士電機の製品<sup>(1)</sup>が市場に供給され実用化の実績を持っている。

リニアモータ駆動を都市交通用の鉄道車両側引戸に応用した事例としては、E331系車輛(京葉線)E231系車輛(2000年6月から宇都宮線、高崎線、常磐快速線、成田線、湘南新宿ライン)が挙げられる。車輛用でDC100Vを駆動電源とし、推力40N(最大500N)、ストローク650mm、最大速度0.36m/sとの仕様が公開されている。

一方、新幹線ホーム安全柵としても導入が行われ、駅設備のため上記よりは扱える電力の大きなAC200V三相交流システムを電源とし、推力50N(最大200N)、ストローク1530mm、最大速度0.65m/sという仕様が公開されている。いずれのケースも、空気配管が不要となることから、省メンテナンス、高信頼性高速応答が導入のメリットとして謳われている。これに加え、直接駆動の制御応答のよさを生かし、人間とのインタフェースとしての安心、安全

な制御手法を組み込むことが可能であるという点も重要な付加価値であろう。

なお、車両用ではないが、このような引戸の自動駆動システムは、三洋昭和パネルシステム、イワキ金物、三協立山アルミなどの他の製造者からも商品として供給されている。

## 3. 車輛駆動用リニアドライブ方式の分類と支持方式との組み合わせ

<3・1>車輪の3機能と応用 伝統的な鉄車輪・鉄起動のシステムにおいては、車輪は支持・案内・推進/制動の機能を担う重要な役割を果たしてきた。リニアモータの導入により代替される機能は、このうち3番目の推進/制動に限定されるが、並進力を直接発生するダイレクト駆動のため、前述のとおり粘着から開放され、駆動全体系的小型化、急勾配・急曲線への対応などの長所が見込める上、制動も完全な電気ブレーキとなるため、基本的に回生制動を用いることになる。リニアモータ自体の効率は良いとはいえないため、総合的な省エネルギー効果は主張できないものの、種々の車輪系や磁気浮上との組み合わせでその技術的特長が発揮できる。このため、特殊鉄道としての鋼索鉄道(例:広島スカイレール)、建設費の大きな都市鉄道(リニア地下鉄、リニアメトロ)、非接触による静粛性や超高速における性能において長所を発揮しやすい磁気浮上鉄道<sup>(2)</sup>



図1 車上一次形リニア誘導モータ  
Fig. 1 Short stator linear induction motor

での実用化を目指した技術開発が行われてきた。

<3・2>電機子をどちらに持つか？---車上一次と地上一次



図2 カナダ，バンクーバのスカイトレイン  
Fig. 2 Skytrain in Vancouver, Canada

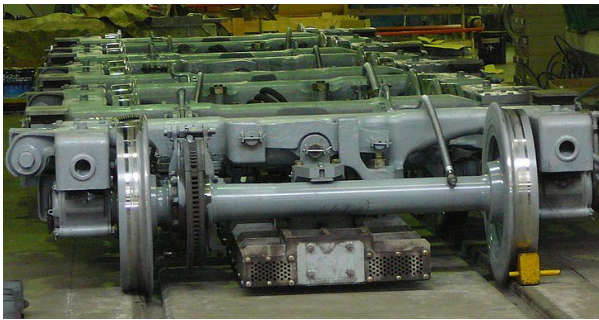


図3 大阪市のリニアメトロの台車  
Fig. 3 A bogie of a linear metro in Osaka

リニアモータの選択としては、誘導形モータか同期形モータかという大きな分類がある。二次側を完全に受動的な要素で構成でき、比較的簡易な制御で駆動できる誘導形モータ（LIM: Linear Induction Motor あるいは Linear Asynchronous Motor）は、早期に導入が進み、比較的安価なシステム構成が可能であるが、ギャップ長に対する性能の感度が高く、十数 mm 程度の大きなギャップ長を要するために高い力率・効率をあきらめざるを得ないということ、リニアモータ特有の端効果による高速駆動時の特性劣化が顕著であることから、中低速の都市交通分野を中心に導入が行われている。この場合、地上側に安価な二次レールを配置し、車輻側に電機子（一次側）を配する車上一次形（Short stator type）によるシステム構成が一般的である。そのために、車上に比較的大きな駆動電力を伝達する必要から、接触形集電を用いることになるため、この観点からも高速システムへの応用は難しい。

一方、高性能を要する高速磁気浮上鉄道では、本質的に力率、効率がよく、高速時でも高い性能が維持できる同期形リニアモータ（LSM: Linear Synchronous Motor）が用いられている。この場合には、車輻への電力伝送を小さく抑えるとともに、車輻の構成を簡単化することで、小型軽量化が見込める地上一次方式（Long Stator Type）、すなわち、電機

子を地上に並べ、車輻には界磁磁石を配する方式が採用されている。磁気浮上を含む支持・案内方式との組み合わせでさまざまなシステム構成が可能だが、これまでに開発されてきた主要な方式の分類を表1で概観する。

表1 実用化に向けた開発実績のある各種支持・案内・推進方式  
Table1. Various combination of suspension, guidance and linear drive technologies

System	Suspension	Guidance	Propulsion	Armature	Speed range	Status
M-Bahn	Rubber wheel	Rubber wheel	LSM	Wayside	40km/h	scrapped
Linear metro, skyrail	Iron wheel	Iron Wheel	LIM	Onboard	70km/h	Commercial operation
Birmingham people mover	EMS	EMS	LIM	Onboard	<70km/h	scrapped
Linimo	EMS	EMS	LIM	Onboard	100km/h	Commercial operation
Transrapid	EMS	EMS	LSM	Wayside	400km/h	Used in China
Swissmetro	EMS	EMS	Homopolar LSM	??	500km/h	scrapped
JR-Maglev	EDS	EDS	Superconducting LSM	Wayside	>500km/h	Being constructed

磁気浮上との組み合わせでは、3つの車輪の機能の2つを兼用する方式が一般的で、Linimo や Swissmetro が浮上・案内兼用であるのに対し、Transrapid や JR-Maglev では浮上・推進が兼用される。また、この浮上・推進兼用方式では、界磁磁石の強さを浮上の機能の要求から速度によらず



図4 電磁吸引形磁気浮上リニア誘導モータ推進のLINIMO  
Fig. 4 LINIMO, a Japanese Maglev with electromagnetic suspension and linear induction drives.





図5 ドイツの開発した電磁吸引浮上，城電導リニア同期モータ推進の高速磁気浮上鉄道 Transrapid 07（エムスランド試験線にて）

Fig. 5 German Transrapid 07 at Emsland test track, Electromagnetic suspension and ordinary-conducting linear synchronous drives.

一定に保つ必要があるため，同期形モータの動作として，必然的に弱め界磁をしない方式になる．このことは低速から最高高速まで加減速度が一定で，モータの端子電圧が速度に比例する駆動系となることを意味している．また，リニアモータの特徴として，場所により地上側のモータ要素の構成を変化させることで局所的にモータ特性を変化させることもできる．地上一次方式では，界磁である車輛の正確な連続位置検知が特に重要となる．

#### 4. 車上一次形リニア誘導モータ (LIM)

<4・1> 鉄車輪支持方式 スカイトレインとリニアメトロ支持・案内 世界で最も早くリニア誘導モータが都市鉄道に本格的に導入されたのは，鉄車輪による支持・案内と組みあわせる方式として設計され，1985年カナダにおいて路線長 6.8km 6 駅の路線として実現した Scarborough 線である．その実績が図 2 に示す 1986 年の Vancouver 市の SkyTrain に引き継がれ，1 時間当たり 22,500 人の輸送量を持つ路線長 30km 20 駅の本格的な都市鉄道として商用運転が行われている．最高勾配 6.25%での旅客輸送が可能都市鉄道として Bombardier 社が世界的に都市鉄道分野の市場に進出している．2002 年には Vancouver 市 Millenium 線としての 20km の拡張が行われ，1 時間あたり 60 列車 26000 人の輸送量を持つ高頻度都市交通として機能している．このようにリニアモータは全自動運転との相性がよく高頻度運転にも適している．

日本におけるリニアメトロの検討は 1976 年頃開始され，1982 年に 330m の長さの試験線での実車試験が開始された．1987 年に大阪南港に 1.85m の環状試験線が建設され，地下鉄への実用化を意図した本格的な性能試験と技術開発が 1988 年まで行われた．その成果は，図 3 の大阪市交通局 7, 8 号線，都営大江戸線，神戸海岸線，福岡市七隈線の営業運転に生かされてにいたっている．さらに横浜市，仙台市へとミニ地下鉄としての応用が広がりつつある．これらの状

況を反映し，車上一次式リニア誘導モータの鉄道への応用技術に関する国際規格化も IEC で進められるにいたっている．

<4・2> 電磁吸引形磁気浮上方式との組み合わせ イギリス国鉄は市場調査の結果，低速の市内交通に磁気浮上鉄道の可能性があるとし，小型低速の磁気浮上鉄道システムの開発に注力した．その成果が生かされ，電磁吸引浮上，車上一次形リニア誘導モータによる磁気浮上鉄道として最も早く商用運転を実現したのは，イギリスの Birmingham の駅と空港を 1984 年に結んだ people mover システムである．その後残念ながらこのシステムは 1995 年に廃止となり，現在は車輪式の都市交通に置き換えられている．

同じく空港アクセスのための中速域の磁気浮上車としてドイツからの技術導入を行った日本航空が 1975 年に HSST として開発を始めた電磁吸引方磁気浮上車上一次形リニア誘導モータの磁気浮上鉄道システムは，1985 年のつくば博，86 年の Vancouver での Expo，88 年岡崎葵博，埼玉博，89 年の横浜博と，博覧会における会場内の輸送システム，デモの実績を重ねた．その間，アメリカやメキシコなどへの



図6 Transrapid の浮上，案内，推進機能要素と上海高速磁気浮上鉄道

Fig. 6 Suspension, guidance and thrust functional components of the Transrapid and Shanghai Maglev in China.

導入の可能性も議論されたが、最終的に名古屋鉄道の支援も得て、2005年に図4の愛知高速交通東部丘陵線(Linimo)として、愛知万博に合わせ国内初の実用線として開業。最高速度100km/h営業運転を行っている。韓国でも、これと類似の磁気浮上鉄道が大田広域市のエキスポ科学公園の国際博覧会の路線を延長する形で最高速度110km/h程度の営業運転を行うにいたっている。

## 5. 常電導地上一次形リニア同期モータ(LSM)

<5・1>電磁吸引形磁気浮上方式との組み合わせ ドイツのTransrapidと上海Maglevドイツにおける磁気浮上の研究開発は比較的早くその歴史は第二次世界大戦前にさかのぼるが、本格的な開発が開始されたのは1970年のTransrapid01以後で、1977年に現在の方式である電磁吸引式磁気浮上と、その常電導浮上電磁石を界磁磁石として用いる地上一次形リニア同期モータ方式の組み合わせに方式を絞った。そして、Emslandに試験線を建設し、ドイツ国内での400km/hクラスの商用運転を目指す開発が1980-90年代に図5のTransrapid-07にいたるまで集中的に行われた。Berlin-Hamburg線など複数の国内計画が検討されたが、Munich空港線建設の断念を最後に、ドイツあるいはヨーロッパ内での具体的な実用線建設計画は現在存在しない。その技術は2003年から中国で開業した、図6の上海空港線に生かされ、上海Maglevとして短い路線長ながら最高速度430km/hの営業運転が行われている。

<5・2>特殊なもの 半磁気浮上・車輪支持方式とその浮上用永久磁石を地上一次形リニア同期モータの界磁磁石とする低速高架都市鉄道として、1989年からドイツAEG社M-Bahnが営業運転を行っていた時期がある。また、ホモポラモータを用いた減圧トンネル超高速磁気浮上鉄道Swissmetro計画が1990年代からローザンヌ工科大学の研究チームを中心に提案され、実用化に向けた検討が行われた。しかし、いずれも広がりのある実用化にはいたらず、技術史にその痕跡を残すにとどまっている。

## 6. 超電導地上一次形リニア同期モータ(LSM)

1963年に国鉄が着手し、1977年からの宮崎実験線、1997年からの図7の山梨実験線で、鉄道総研、JR東海を中心に研究開発が継続的に行われてきた。JR-Maglevは、地上に推進および誘導案内のコイルを配置し、車上に超電導磁石を浮上・案内磁石およびLSMの界磁磁石として配置する方式で、2003年に580km/hの世界記録を山梨で達成したとおり、高速性にその特長がある。中央リニア新幹線としての実用化の議論が本格化しJR東海を建設主体、営業主体として2027年の名古屋開業に向けた具体的作業が始まっている。

## 7. まとめ

リニアモータの軌道系公共交通への応用は、自動運転の技術と相性が良い、未来の発展の可能性があり、という特長から、本稿で述べたものに加えアメリカや中国での取り



図7 山梨試験線におけるJRが開発している超電導リニア同期モータ駆動電磁誘導磁気浮上高速鉄道  
Fig. 7 Japanese superconducting high-speed Maglev with linear synchronous drives and electrodynamic suspension at Yamanashi test track.

組みも関連国際会議で紹介されている。しかし、その応用は高速大量輸送か、小断面地下鉄を中心とする特殊な条件下での都市交通などの限定的な市場にとどまっている。これは、比較的大きなギャップ長と力率・効率の悪さというリニアモータ特有の技術的問題に加え、大きなネットワークを持つ既存の鉄道網との互換性のなさに帰するところが大きい。本稿で紹介した魅力的な公共交通のいくつかは、結果的に博物館入りしてしまっていることもその理由が大きい。

互換性のない軌道交通は、その導入時に議論を長くすると、保守的な慎重論が支配的となり実用化が難しくなるという一般の傾向を、これらの経験から読み取ることができる。幸い、JR-Maglevについては昨今迅速な意思決定が行われて、本格的な新幹線としての実用の議論が進んでいる。この前向きの流れを生かし、前述の困難を乗り越えて、現在進んでいるリニア中央新幹線の実用計画が、リニアドライブ分野の技術、軌道系公共交通の持続的発展のための刺激として、大きなインパクトと技術全般に退位する良い影響を与えることを期待する。

## 文献

- (1) 富士電機カタログ リニアモータ駆動ドアシステム  
[http://www.fujielectric.co.jp/products/electric\\_railways/pdf/WC31-13a.pdf](http://www.fujielectric.co.jp/products/electric_railways/pdf/WC31-13a.pdf)
- (2) Ralf Roman Rossberg: Radlos in die Zukunft? Die Entwicklung neuer Bahnsysteme, Orell Fuessli Verlag, ISBN-10: 3280015030