

最近の海外における磁気浮上式鉄道の研究開発動向

笹川 卓* 饗庭 雅之**

Recent Trend of Overseas Research and Development of Maglev

Takashi SASAKAWA Masayuki AIBA

In the domestic market, the magnetic levitation type railway has already reached the stage of commercial operation or construction. If you turn your eyes to the outside of the country, you can see Maglev business lines running or under construction. Also there are various Maglev Research and Development activities in the practical use stage or only in the planned stage. Here, we will introduce these trends of development of various Maglev including the medium or low speed ones and those aiming at high speed. Finally, we will also touch on research trends.

キーワード：磁気浮上，海外，研究開発，動向，EMS，EDS

1. はじめに

国内では磁気浮上式鉄道は既に営業運転または建設中の段階に至っているが、目を国外に向けると既に営業線で運行中または建設中のもの、実用化技術を開発中で実験線での試験を実施または計画中のもの、基礎研究開発や構想段階のもの、など様々な段階にある。ここではこれらの動向を中低速リニアから高速を目指したものまで含め、幅広く紹介する。方針として営業運転中のものは全て紹介し、構想段階のものは最近の動きを中心に紹介する。研究動向についても逐次紹介する。

2. 磁気浮上式鉄道の概要

磁気浮上式鉄道は非接触走行による軌道/車輪等のメンテナンスの削減や静音化、リニアモータとの組み合わせによる高加減速度の高速走行や急勾配駆動などを目指して研究開発されてきた。ここでは各種磁気浮上方式について簡単にまとめる。なお磁気浮上し完全非接触走行となる場合、現実的な推進方式は必然的に（シンクロナスまたはインダクション）リニアモータ駆動方式が前提となる（過去ジェット推進方式が用いられた例はある）。

2.1 種々の磁気浮上方式^{1) 2)}

新しい材料や各種物性の向上、革新的な周辺技術の出現とともに各種磁気浮上方式が提案されてきた歴史がある。鉄と電磁石の吸引力を利用する EMS（電磁吸引支持方式）方式の原型は、電磁鋼板等の実用的な軟磁性材料の出現した 20 世紀初頭には既にアイデアが提案され、

実用的な EMS 方式の鉄道は制御理論と半導体電力変換素子の技術が進展する 1970 ～ 1980 年代頃に現在の形に近いものが現れた。

車上界磁磁石と地上側の電気コイル（または電導性シート）に誘起される誘導磁界の相互作用を磁気支持力に利用する電磁誘導浮上方式（EDS）のうち現在につながるものは、NbTi 等の実用超電導線材が現れた 1960 年代初頭に提案されている。超電導バルクを用いたピン止め浮上方式は、新規高温超電導材料の発見が相次いだ 1990 年代前後に磁気浮上式鉄道もその対象として提案されている。そして強力な永久磁石である Nd 磁石の発明とともに、永久磁石を車上界磁としてもちいる EDS の一種であるインダクトラック磁気浮上方式³⁾ が、同じく 1990 年代に提案されるに至った。

上記の方式のうち現在営業線があるものは EMS 方式のみであり、超電導 EDS 方式については国内で営業線が建設されつつある段階である。これら以外の方式については、基礎研究または実証試験の段階と位置付けられる。なお磁気浮上以外の浮上方式としては、幾多の空気

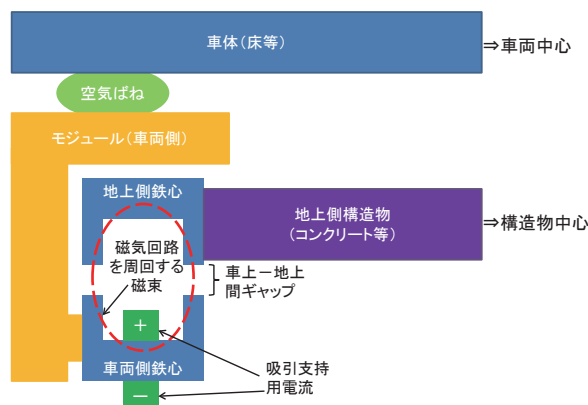


図1 EMS方式（吸引支持用電流を制御して安定浮上）

* 浮上式鉄道技術研究部

** 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

力学的な方式が検討されたものの、空港内等で使用される小規模なものを除き実用化されたものはない。図1では例としてEMS方式の概念図を示す。

2.2 磁気浮上式鉄道の概観

次に国内の例も含めEDSとEMSに限定して、磁気浮上式鉄道の状況について概観を示す(図2)。推進方式としてリニアシンクロナスマータを用いたものは高速向き、リニアインダクションモータを用いたものは中低速向きと位置付けられている。なお磁気浮上式ではないが、地下鉄リニアなど鉄車輪方式リニアについては国内で7路線、海外では10路線以上がすでに運行中である^{4) 5)}。

なお超電導を利用したEDS方式については、「鉄道」ではないが米軍が兵器開発用の試験装置(全長640m)を建設し、ジェット推進で最高速度1,018km/hを達成している。浮上体は旧国鉄ML-500と同様の跨座型である。

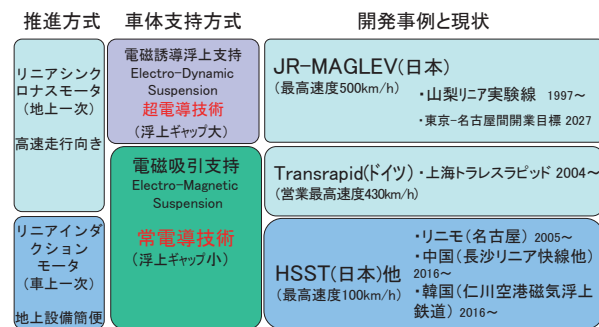


図2 磁気浮上式鉄道概観

3. 営業線として運行中または建設中のもの

現在海外において磁気浮上式鉄道が実際に運行されているのは、中国と韓国の2カ国のみである(英国でピープルムーバー、旧西ドイツでMバーンが運行されていたが、既に運行停止)。北米や欧州では営業線および建設中のプロジェクトは見られない。表1に現在の営業線一覧をまとめた(大学構内での運行など小規模なものは除く)が、21世紀に入ってやっと磁気浮上式鉄道が実用化のフェーズに入ったことがわかる(図3も参照)。

表1 海外の磁気浮上式鉄道営業線一覧

名称	営業開始年	浮上方式	推進方式	最高速度	営業距離
上海トランスラピッド	2004	EMS	リニア同期モーター	430km/h	30.5km
仁川空港マグレブ	2016	EMS	リニア誘導モーター	80km/h	6.1km
長沙リニア快線	2016	EMS	リニア誘導モーター	100km/h	18.6km
北京S1線	2017	EMS	リニア誘導モーター	80km/h	10.2km

3.1 高速向けのEMS方式

ドイツの技術を元に、全長30.5km、最高速度430km/hで上海トランスラピッドが2004年から運行中である。このシステムは推進系としてリニアシンクロナスマータを用いている。現在のところ延伸計画は無い。10年以上にわたるその運行実績が文献6)で報告されている。なお開発元のドイツ本国ではトランスラピッドの研究開発は終了しエムスランド試験線も既に撤去されている。

3.2 中低速向けのEMS方式

中国や韓国では現在日本のリニモ(HSST)と同様のEMS浮上とリニアインダクションモータを組み合わせた方式に力を入れており、新規路線の開業や計画が相次いでいる。

長沙リニア快線は全長18.6キロ。長沙南駅と長沙黄花空港を結び、最高速度は100km/hで2016年に運行を開始した。この路線は中低速の磁気浮上式鉄道としては現在世界最長である。さらに北京市郊外の磁気浮上式鉄道路線(S1線)についても建設が終了し、2017年12月に部分開業した。全長10.2km、最高速度は80km/hである。

この他にも広東省清遠市、新疆ウイグル自治区ウルムチ、四川省の成都市一徳陽市間、天津、湖北省武漢などで、磁気浮上式鉄道路線の建設計画がある。清遠市や、ウルムチに関しては既に着工したとの報道もある。

韓国では当初の計画からは2年余り遅れて、2016年2月より仁川(インチョン)国際空港と永宗(ヨンジョン)新都市をつなぐ6.1キロ区間で都心型リニア(中低速EMS方式)の運行を開始した。この「仁川空港マグレブ」は毎日午前9時から午後6時まで、15分間隔で仁川国際空港と龍遊駅を約15分で結んでいる。最大速度は80km/hである。



図3 海外および国内で運行中の磁気浮上式鉄道(上海は高速浮上式鉄道、他は中低速浮上式鉄道)

3.3 中低速磁気浮上式鉄道の試験線と高速化計画

中低速磁気浮上式鉄道に関して、中国には1km程度

の小規模な試験線が複数存在する（上海临港中低速磁浮試験線 1.7km, 唐山中低速磁浮試験線 1.5km, 中車株机中低速磁浮試験線 1.6km など）。また 2017 年 8 月に中国中車傘下の大連機車車両は、西安交通大学と共同で速度 120km/h を記録した。速度 200km/h の中速タイプも開発されることになっており、そのための全長 3km の試験線が建設される予定である。このように中国では試験線も活用しながら中低速磁気浮上鉄道（EMS）に関し、複数のメーカー及び大学が活発な研究開発活動を行っている。中低速システムで採用されるリニアインダクションモータは端効果により高速域の効率・力率が低下するとされており、この課題をどう克服して行くのか注目される。

なお中国では磁気浮上式鉄道の国内での規格化も着実に行われている⁷⁾。上海トランスラピッドの運行が 2004 年に開始された高速磁気浮上式鉄道の分野でまず規格化が行われ、現在は中低速磁気浮上式鉄道にもその範囲が広げられている。なお駆動系として本方式とも共通点の多い鉄輪式を対象としたリニアインダクションモータの国際規格はすでに存在しているが⁸⁾、磁気浮上方式そのものの国際規格化の動きはまだ見られない。

4. 次世代高速磁気浮上式鉄道の開発構想と計画

3 章までは営業線や実際に敷設された実規模・実速度の試験線の動向等を紹介した。ここからは高速磁気浮上式鉄道に限定して、研究開発段階もしくは構想段階のものを紹介する。なおその中に減圧（真空）トンネルの利用を想定しているものはいくつかあるが、減圧方式鉄道全般については文献 9) を参照されたい。

4.1 米国の動向（ハイパーループその他）

米国の実業家イーロン・マスク氏の提唱で始まったハイパーループという高速輸送システム構想がある。最高速度 1,200km/h を目指し走行抵抗低減のため真空（または減圧）チューブ内を走行する。当初は空気浮上も検討されたが、現在は磁気浮上方式に絞って開発がおこなわれている。2017 年 12 月には全長 500m の試験線での走行試験の結果、浮上体（無人）が最高速度 386km/h を達成している。採用が予定されている磁気浮上方式の一つは、先に述べたインダクトラック方式という永久磁石を車上界磁に利用したシステムである。現在いろいろな建設構想（ドバイ、ポーランド、インド等）が発表されているが、その技術の詳細は明らかにされていない。なお同氏はトンネル掘削事業も手掛けており、ハイパーループ構想との関係が注目される。真空チューブ鉄道は過去幾度も提案されて来たが、その現代版であるハイパーループの帰趨が注目される。韓国はこのハイパーループ

構想に積極的に関わっており、蔚山科学技術院（UNIST）で製作したハイパーループ（U-Loop）向け車両模型が最近公開されている。

これとは別にアメリカでは Maglev2000 という旅客・貨物輸送を目的とした EDS 方式の超電導磁気浮上式鉄道の構想があるが、現在具体的なプロジェクトは進捗していない模様である。またワシントン・ボルチモア間 60km に日本の中央新幹線と同様の超電導リニアシステムを導入する計画が進んでいる。

4.2 中国中車の 600km/h 級磁気浮上式鉄道

中国には中低速だけでなく、高速の磁気浮上式鉄道開発構想もある。上海トランスラピッドの改良も検討されていたが、それとは別に独自の知的財産権を持ち、設計上の最高速度が 600km/h 以上に達するとされる高速リニア輸送システムが 2016 年から開発されている。その詳細は不明だが、そこで採用が予定されている「永磁電磁混合悬浮系統」とは、直訳すれば“永久磁石電磁石併用の磁気浮上方式”となる。「海外の同類の高速リニアと比べ、エネルギー消費量を 35% 削減し、電磁石の温度上昇を 40 度下げ、単位当たりペイロードを 6% 以上向上する」とのことである。この計画は国家重点研究開発計画先進レール交通重点特別プロジェクトの一環として実施されるとともに、2014 年に中国南車と中国北車の合併で誕生した世界最大の鉄道車両メーカーである中国中車が開発の中心となっていることでも注目される。2021 年までに試験車両の製作と 5km の試験線が建設される予定である。

4.3 中国航天科工集団の 4,000km/h 磁気浮上式鉄道

2017 年 8 月に中国航天科工集团公司（CASIC）が「高速飛行列車」を計画していることが明らかにされた。この「高速飛行列車」計画には、超電導電磁石を用いた磁気浮上方式とハイパーループと同じ減圧チューブが利用されるとのことである。計画は、まず第 1 段階の「速度 1,000km/h」で地方都市間に飛行鉄道網を形成し、続いて「速度 2,000km/h」で大都市間にも飛行鉄道網を形成する。第 3 段階で最終目標の最高速度 4,000km/h を達成する予定になっているという。

4.4 韓国の SUMA550

韓国では最高速度 550km/h を目標にした超高速磁気浮上式鉄道「SUMA550」の試験車両の開発が終了したと報じられている。トランスラピッドと同じ EMS とリニアシンクロナスモータを組み合わせた方式である。跨座型のガイドウェイで低速浮上走行する動画も公開されている。

5. 種々の浮上方式の研究開発動向

最後に研究室レベルのものも含めて、磁気浮上式鉄道の研究開発動向について触れる。

表2は、磁気浮上（案内）方式を原理の観点から分類したものである（文献1）、2）も参照）。超電導バルク体によるピン止め浮上を利用した方式に関しては、“Maglev Cobra”がリオデジャネイロ国立大学キャンパス内の有人線で運行を継続している。また人が乗れる規模のレールトラック状の試験装置（全長45m）が、西安交通大学内に設置されている。同装置は減圧輸送方式の試験も想定して0.1気圧まで減圧可能な仕様となっている¹⁰⁾。高性能永久磁石の材料の一つである希土類を豊富に産する中国では、本方式の研究が盛んである。

またEMSにおいては、車上の浮上高さ制御用コイルとしての常電導コイルに永久磁石を組み合わせたタイプのものが、“混合型磁浮”という名称で中低速磁気浮上式鉄道を対象として中国・韓国を中心に研究されている。その目的は、永久磁石界磁を使用して車上常電導コイルのジュール損失を削減し浮上効率を向上することである。原理は、日本でも過去に非接触搬送機を対象として研究された零パワー方式磁気浮上¹¹⁾と同一である。

IEEE, Maglev, LDIA等の主要な文献上でも、近年は原理的に新しい磁気浮上方式の提案は見当たらない。表2に掲げたものに対する、改良や改善に関する発表がほとんどと考えられる。

表2 磁気浮上方式の分類と特徴および例

大分類	車上側	地上側	特徴	例
永久磁石反発浮上	永久磁石	永久磁石	必ず不安定な方向が存在	20世紀中盤に提案
EMS	(車上側の浮上制御用コイル)	(地上側)	(特徴)	(例)
	常電導コイル	積層鉄心	速度0でも浮上	トランスラビッド ⁶⁾ / HSST他多数
	常電導コイル＋永久磁石	積層鉄心	車上ジュール熱削減を企図	各種非接触搬送機 ¹¹⁾ / 中国で旅客用に検討中
	超電導コイル（または超電導コイル磁石＋常電導コイル）	積層鉄心	同上	1990年代に米で浮上部分の試作試験
EDS	(車上界磁)	(地上側)	(特徴)	(例)
	常電導磁石	短絡コイル／シート	実用上不可能	無
	超電導磁石	短絡コイル	ギャップ大（短絡コイルは揚抗比が大、シートは構造が単純）	JRリニア/Maglev2000
	永久磁石	シート	車上が簡単（短絡コイルは揚抗比が大、シートは構造が単純）	マグネブレン（MIT） インダクトラック ³⁾
超電導によるピン止め浮上	超電導バルク	永久磁石	無制御かつ速度0でも安定浮上	Maglev Cobra / 西安交通大学磁気浮上模型 ¹⁰⁾ / ホバーボード
ミックスドモード	超電導磁石／超電導バルク	強磁性体（積層）	無制御かつ速度0でも安定浮上	小規模試験装置

6. まとめ

画期的な新浮上方式の提案には新規な要素技術が必要と考えられ、冒頭で述べたように、磁気浮上式鉄道も技術として成熟化・産業化・普及のフェーズに入ったと考えられる。なお旅客用を中心に説明したが、インダクトラック、Maglev2000, Eurorapidなど貨物を対象とした構想もあることを付け加えておく。

実用化に関しては米国・欧州と東アジアの動向は対照的であり、欧米では磁気浮上式鉄道に対して国の積極的なサポートはないようであるが、アジアとりわけ中国では磁気浮上式鉄道の産業育成も念頭においた国家レベルの強力なサポートが見られる。

研究開発の進め方を見ても米国のハイパーループ（民間資金を基本としてベンチャー企業とボランティアが主体となって進めアイデアも公募で募る）と中国（国策と国営企業の活動が中心）では進め方が対照的である。

本稿では営業線の運行状況から夢物語のような話まで、海外の磁気浮上式鉄道に関する話題を広く紹介したが、本件に興味のある読者の参考になれば幸いである。

文 献

- 1) 正田英介他：磁気浮上鉄道の技術，オーム社，1992
- 2) 電気学会編：磁気浮上と磁気軸受，コロナ社，1993
- 3) R. Post, “Inductrack Demonstration Model,” UCRL-ID-129664, February 3, 1998.
- 4) 長嶋賢：浮上式鉄道に関する研究開発と関連技術の在来方式鉄道への応用展開，鉄道総研報告，Vol.31, No.1, pp.1-4, 2017
- 5) <https://ja.wikipedia.org/wiki/リニアモーターカー>（参照日：2017年12月1日）
- 6) “Application and Development of Maglev Transportation in China,” Proceedings of Maglev 2016.
- 7) “Standardization of Maglev Technology in China,” “Study on the Standardization of Changsha Urban Maglev Project,” Proceedings of Maglev 2014 and 2016.
- 8) IEC 62520:2011, Railway applications - Electric traction - Short-primary type linear induction motors (LIM) fed by power converters, 2011.
- 9) 長谷川他：減圧トンネルにおける鉄車輪方式と磁気浮上式の比較，鉄道総研報告，Vol.28, No.9, pp.47-50, 2014
- 10) Zigang, “A High-Temperature Superconducting Maglev-Evacuated Tube Transport,” IEEE ASC, Vol.27, No.6, September, 2017.
- 11) 森下明平，小豆沢照男：常電導吸引式磁気浮上系のゼロパワー制御，電気学会論文誌D，Vol.108-D, No.5, pp. 447-454, 1988 など