

未来の減圧トンネル超高速鉄道技術の可能性

～総論～

正員 古関 隆章^{*a)} 正員 岩松 勝^{**} 正員 高橋 聖^{***}
正員 吉澤 佳祐^{**} 正員 森下 明平^{****}

Possibility of super-high speed railway technologies in a decompressed tunnel in future
---Introduction---

Takafumi Koseki^{*a)}, Member, Masaru Iwamatsu^{**}, Member, Sei Takahashi^{***}, Member,
Keisuke Yoshizawa^{**}, and Member, Mimpei Morishita^{****}

The five papers describe technical discussions held at the committee for investigation on drive- and control-system of high speed railway in a decompressed tunnel, which started its activity in May 2012, for two years. This paper explains general framework of the committee, members, possible railway types among rail- and wheel-systems and different types of maglevs as an introduction of the following four reports.

キーワード：磁気浮上，超電導，リニアモータ，減圧トンネル，高速鉄道
(Keywords, magnetic levitation, superconducting, linear motor, decompressed tunnel, high-speed railway)

1. はじめに

減圧トンネル利用高速鉄道の駆動・制御システムに関する調査専門委員会（委員長 古関隆章）は、既存鉄道システムの条件を越える大深度地下鉄や減圧トンネルなど新しい環境の下で運転される次世代高速鉄道システムに関する技術の確立を目指し、土木学会、機械学会の関連研究部署と連携しつつ、電気工学の観点からその駆動と制御技術の調査検討を行なうことを目的として、平成24年（2012年）5月に発足した。大学、鉄道関連の中立的協会や技術研究所、鉄道技術関係のメーカー等の計18名にて構成し、以来10回の委員会と2か所の現地調査（鉄道総合技術研究所の研究設備、宇宙航空研究開発機構調布の風洞試験設備）を実施した。

本委員会では、下記の委員構成で
古関 隆章 東京大学 （委員長）

岩松 勝	鉄道総合技術研究所（副委員長）
中村 英夫	日本大学理工学部
藤江 恂治	タマナレッジ
林田 守正	交通安全環境研究所
綱島 均	日本大学生産工学部
大橋 俊介	関西大学
小泉 聡志	東芝
森下明平	工学院大学
岩滝 雅人	日立製作所
出井 和徳	三菱電機
牧島信吾	東洋電機製造 交通事業部開発部
八木 誠	日本信号
磯部 栄介	日本地下鉄協会
高橋 聖	日本大学理工学部（幹事）
工藤 希	交通安全環境研究所（幹事 途中退任）
吉澤 佳祐	鉄道総合技術研究所（幹事補佐）

次に記す検討を進めた。

- (1) 国内、海外の磁気浮上、リニアドライブおよび減圧トンネルを応用した高速鉄道技術開発の調査
- (2) 我が国の高速鉄道に資する技術要素、特に安全に関する技術と新しい考え方の調査
- (3) 土木学会における減圧トンネル技術先行調査・検討事例の調査

a) Correspondence to: Takafumi KOSEKI. E-mail: takafumikoseki@ieee.org

* 東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 〒113-8656
東京都文京区本郷7-3-1 Department of Electrical Engineering and Information Systems, School of Engineering, The University of Tokyo

** 鉄道総合技術研究所 Railway Technical Research Institute
*** 日本大学理工学部 Faculty of Science and Technology, Nihon University

**** 工学院大学 Kogakuin University

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
Trans rapid	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

- (4) 鉄道総合技術研究所における減圧トンネル応用高速鉄道技術先行調査事例の調査
 (5) 上記に基づくモデル路線を想定した技術的課題の抽出と解決の見通しの議論

本シンポジウムでは、その検討内容を報告し、未来の減圧トンネルにおける超高速鉄道の可能性と技術的課題を、電気工学の立場から議論する。

2. 未来の高速鉄道：鉄軌道か磁気浮上か？

高速鉄道の技術的可能性としては、今年開業50年を迎えている新幹線に代表される鉄軌道技術と、中央新幹線としての建設が進められている磁気浮上技術の双方の可能性がある。そこで、双方を検討対象に同一条件での検討をすることとしたが、機械系の専門家からのご指摘で、減圧下、あるいは450km/h領域での軸受けの耐久性などに関しては確かな知見が得られていないということなので、その部分には問題が無いという仮定に基づく仮想的な検討となった。さらに、比較的駅間の短い区間を想定した超高速鉄道の場合、到達時分に対する影響は最高速度よりも（特に低速領域における）加減速性能が本質的に大きい。このため、技術的検討の主要部分は、日本での研究開発の実績のある地上電機子形リニア同期モータ駆動、誘導反発浮上方式のシステムを中心に行うこととした。

磁気浮上は非接触で支持、案内ができる点に特徴がある。推進・制動力の発生も電磁的に行おうとすると、リニアモータとの組み合わせが合理的な解となる。

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、車輪側に電機子（一次側）を配する車上一次形

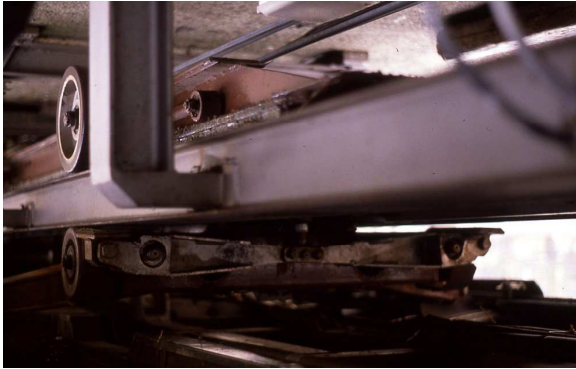
（Short stator type）によるシステム構成が一般的である。そのために、車上に比較的大きな駆動電力を伝達する必要から、接触形集電を用いることになるため、この観点からも高速システムへの応用は難しい。

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、車輪への電力伝送を小さく抑えたとともに、車輪の構成を単純化することで、小型軽量化が見込める地上電機子方式（Long Armature Type）、すなわち、電機子を地上に並べ、車輪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Table 1で概観する。

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。地上電機子方式では、界磁である車輪の正確な連続位置検知が特に重要となる。

3. 磁気浮上技術

<3.1> 磁気浮上高速鉄道の技術開発の経緯⁽¹⁾ 磁気浮上のアイデアは19世紀の終わりにアメリカやフランスで特許の形で公開されていたが、それを実現する技術的手段はなかった。本格的な技術的研究がドイツの研究者 Hermann Kemper によって1930年代に集中的に行われ、浮上制御の実験による実証もなされたが、それを実用化するためのエネルギー損失の少ない制御電源の構成は当時の技術は困難で



(a) Half magnetic levitation: combination of passive electromagnetic suspension by permanent magnets and rubber wheel



(b) Commercial operation of M-Bahn in Western Berlin



(c) Berlin's wall: M-Bahn as a technical demonstration to Eastern Berlin

図1 西ドイツの開発した半浮上、常電導リニア同期モータ推進の都市交通用磁気浮上鉄道 M-Bahn (西ベルリンの営業線にて)

Fig. 1 German M-Bahn with a half-magnetic levitation and ordinary conducting linear synchronous motor in revenue service at Western Berlin

あり、その研究開発は第二次世界大戦の中で中断した。1970年以後、ドイツ連邦共和国で、実用化を目指した磁気浮上高速鉄道技術の研究開発が再開され、Transrapid計画としてEmslandに本格的な試験線が建設され、約30年間にわたり国を挙げての力の入った研究が継続された。一方、それとは別に1960年代、国鉄の技術者は新幹線の次を担う新たな高速鉄道の技術開発に着手した。日本は、超電導技術を用いて、磁気ギャップを数cm以上大きく確保する、電磁吸

引浮上(ElectroMagnetic Suspension)と呼ばれるドイツの方式とは原理的に異なる、誘導反発浮上(ElectroDynamic Suspension)という方式を選択した。

<3.2> これまでの磁気浮上鉄道の開発⁽¹⁾

(1) Birmingham (イギリス)

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。

(2) M-Bahn (西ドイツ)

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社により開発されたFig.1のM-Bahnが営業運転を行っていた時期がある。本委員会では、このシステムの日本への導入をかつて担当していた綱島委員から話題提供があった。

(3) Transrapid (ドイツ、中国)

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Fig.2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



図2 ドイツの開発した電磁吸引浮上、常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. 2 German Transrapid 07 at Emsland test track, Electromagnetic suspension and ordinary-conducting linear synchronous drives.

の技術は 2003 年から中国で開業した、Fig. 3 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。一方、長年にわたり開発を進めてきたドイツでは、Emsland 試験線も撤去され、継続的な研究開発は行われていない。

(4) HSST (日本)

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 Fig. 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



(a) Structure of electromagnetic suspension and guidance magnets and linear synchronous motor



(b) Trainset at Pudong station

図 3 Transrapid の浮上、案内、推進機能要素と上海高速磁気浮上鉄道

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



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.

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) JR-Maglev (日本)

日本国有鉄道の研究チームは、1962 年にリニアモータ推進浮上式鉄道の研究を開始し 1972 年には超電導浮上走行に成功した。1977 年からは宮崎実験線で本格的な試験走行を通じた開発が進められ、1997 年からは、研究開発の主たる場が Fig. 5 の山梨実験線に移された、その後 1999 年 11 月には相対速度 1003km/h でのすれ違い走行試験が、2003 年 12 月には 3 両編成の車両で世界記録となる最高速度 581km/h の走行試験が行われたことが発表された。

これに伴い、下記のように国による技術評価が要所で行われてきた。

2000: 実用技術評価委員会 「実用化に向けた技術上のめどがたった」

2003: 実用技術評価委員会 「実用化のための基本的な技術の確立が着実に進捗している」

2005: 実用技術評価委員会 「実用化の基盤技術が確立した」

2009: 実用技術評価委員会 「(車上電力供給を除き)実用化の技術が成熟した」

2011: 実用技術評価委員会 「車上電力供給のための非接触電力伝送技術が確立した」

これらの過程を経て、2013/05/26 に交通政策審議会中央新幹線小委員会の答申「中央新幹線の営業主体及び建設主体の指名並びに整備計画の決定について」に基づき、国土交通大臣による中央新幹線整備計画⁽²⁾が決定された。2013



図5 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. 5 Japanese superconducting high-speed Maglev with linear synchronous drives and electrodynamic suspension at Yamanashi test track.

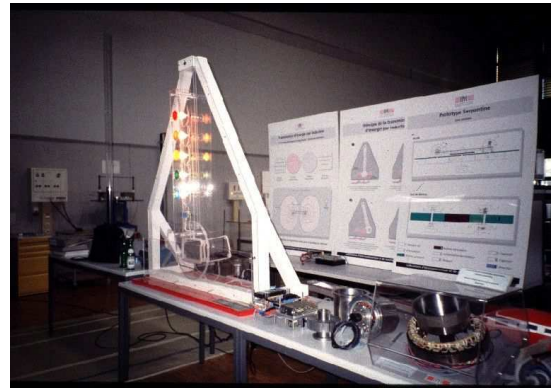
年夏からは42.8kmに延長された山梨試験線での走行試験が再開されるとともに、2027年の名古屋開業、2045年の大阪開業をめざした営業線の建設が着実に行われており、最終的には最高速度505km/hで東京-名古屋間が40分、東京-大阪間が67分で結ばれる計画である。

このように、JR-Maglevは、わが国が誇る近未来の高速鉄道として注目と期待を集めている⁽³⁾。本委員会の減圧トンネルでの超高速鉄道の検討も、この技術をベースに行った。

(6) Swissmetro (スイス)

ホモポー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Fig. 6に示されるように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。1992年にスイスメトロ株式会社が設立された。その後、スイス国内での連邦工科大学を中心とした要素技術の研究開発とスイス国内外でのマーケティングが盛んに行われた。しかし、国民投票でスイス政府としてはスイスメトロではなく従来型の鉄道網の充実に投資をするとの決定がなされたこともあり、2009年にスイスメトロ社は解散された。またほぼ同時に、プロジェクトのキーパーソンであったローザンヌ連邦工科大学の教授が定年退官となり、後継の残務が別の教授に引き継がれたものの2009年でスイスメトロのプロジェクトは事実上放棄されたと考えられる。このことは減圧トンネル自体の技術的困難が本質的理由ではないと思われる。すなわち、その不成功の原因は以下の点に求められると考えるほうが良いであろう。

1. シーズオリエンティドで始まった研究開発であったため、真にその技術を必要とする市場を探ることが困難であったこと
2. 最後までコア技術である、支持・推進方式がひとつに絞られず開発資源が分散されてしまったこと、



(a) Inductive contactless power transmitter



(b) Reduced vehicle model and a part of armature of a homopolar linear motor

図6 スイス ローザンヌ工科大学を中心に研究開発が行われたスイスメトロ
 Fig. 6 Swissmetro: developed at Swiss engineering alliance lead by Federal Technical Institute Lausanne.

3. 大学発ベンチャー企業としての鉄道システムのプロジェクトには無理が感じられたこと、
4. 連邦鉄道・鉄道事業者との利害の対立があり、国民や関連する産業の合意を得ることが困難であったこと、さらに、同じ磁気浮上高速鉄道の推進者であるドイツのTransrapidの関係者とも連携や技術的互換性がなかったこと。

すなわち、減圧トンネルで超高速の磁気浮上鉄道を実現するという考え方は、本委員会の検討を先取りする画期的なものであったが、上記のとおり、リニアモータ推進方式のタイプを具体的に絞り込むことができなかったこと、それに伴い、地上から車上への電力供給方式の具体的設計ができなかったこと、スイス国内に大形の投資をして先進的な磁気浮上鉄道を新設するに見合う大きな公共交通市場が無かったことなどが災いし、広がりのある実用化にはいたらなかったのである。その結果、スイスメトロは、現在では技術史にその痕跡を残すにとどまっている⁽⁴⁾。

4. 委員会での議論

2年間にわたる委員会活動では、

1. 鉄道総研における先行検討事例,
2. 土木学会における検討,
3. 電気鉄道における電力マネージメントの考え方,
4. 電気鉄道における信号保安の考え方, 特に RAMS 規格から見た安全設計・交差誘導線利用の列車位置検知,
5. 既存磁気浮上交通システムの開発経緯と問題点紹介,
6. 電磁誘導形浮上方式の動的挙動の数値シミュレーション技術,
7. 電磁吸引形磁気浮上方式の制御の技術動向と新しい技術の研究,
8. リニアメトロの技術課題, 交通システムの評価と認証など, 各委員の専門分野に関係の深い話題提供をいただき, それらが将来の高速鉄道技術にどのような形で生かされるべきかに関しての意見交換を行った.

そして, 減圧トンネルの将来像を議論するため, ケーススタディの検討仕様を以下のものに絞り, 鉄道総合技術研究所のご関係者の全面的なご支援のもと, 数値計算に基づく具体像の把握に努めた. すなわち,

1. 路線長 60km, 駅数 2=中間駅無, 最高速度 性能の加減速度で出せる最高速度(磁気浮上の場合最大 700km/h を想定)
 2. 編成両数 3, 2 編成 運行間隔:5 分
- という条件で, このあとの講演で紹介されるシステム概念設計を行い, 比較を行うこととした.

さらに, トンネル断面積を縮小して建設コストの低減を狙う考え方(経済性重視), 車両空気抵抗が従来と同程度となるまで速度向上を実施する考え方(速達性重視)の2つのシステムのあり方を比較し議論する.

5. おわりに

本稿では, 総論として, 委員会の発足の経緯を紹介し, 高速化における鉄軌道と磁気浮上の技術の比較を簡単に行い, 主たる検討を磁気浮上システムにしぼったことを説明した. そして, これまでの磁気浮上技術開発の経緯を述べ, 委員会で議論したケーススタディに言及した.

これに続く以下の発表の中で技術的詳細の議論を続けた.

- (1) 新たな鉄道システム: 高速化の必要性と必要な技術 岩松 勝(鉄道総研)
- (2) トンネル減圧の効能と課題 高橋聖(日本大学)
- (3) 減圧トンネルの次世代高速鉄道システム概念設計例 森下明平(工学院大学)
- (4) 減圧トンネル高速鉄道のサブシステムと技術展望 吉澤 佳祐(鉄道総研)

この場をお借りして, 委員会活動に多大なご協力をいただいた鉄道総合技術研究所の皆様, 交通・電気鉄道およびリニアドライブ技術委員会のご関係者, 見学会を快くお引き受けくださった宇宙航空研究開発機構の皆様に衷心からの感謝を述べたい.

文 献

-
- (1) Ralf Roman Rossberg: Radlos in die Zukunft? Die Entwicklung neuer Bahnsysteme, Orell Fuessli Verlag, ISBN-10: 3280015030
 - (2) 国土交通省発表資料「中央新幹線の概要」
<http://www.mlit.go.jp/common/000224523.pdf>
 - (3) 週刊東洋経済 2014年05月31日号「リニア革命」
 - (4) <http://de.wikipedia.org/wiki/Swissmetro> (最も記述の詳しいドイツ語の Wikipedia)