リニアモーターカー —JR マグレブのほかに開発されているさまざまなリニア式鉄道—

Maglev and linear drives

—Various Linear Motor Cars except for JR-MAGLEV—

古関 隆章

Takafumi KOSEKI

◎1992年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了，博士（工学）

◎研究・専門テーマは，電気鉄道，軌道系交通システムへの電気駆動技術の応用．電気学会，日本機械学会，日本精密工学会，日本 AEM 学会，日本鉄道電気技術協会 IEEE，VDE の会員．

◎正員，東京大学准教授 大学院工学系研究科電気工学専攻
（〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 /
E-mail : takafumikoseki@ieee.org）

1. はじめに

本稿では，日本を代表する高速磁気浮上システムである JR マグレブ（JR-MAGLEV，中央新幹線のために開発されてきた超電導誘導反発式磁気浮上リニア同期推進の高速磁気浮上鉄道方式，ElectroDynamic Suspension：EDS 方式）以外の磁気浮上鉄道について概観する．

2. 磁気浮上方式とリニアモーター推進方式の組合せ

従来の車輪，レールの組合せは，車両の重量を支える支持（浮上），車両をレールに沿って走らせる案内（ガイドランス），そして，車輪の回転トルクを並進力に変換することで推力や制動力を発生する推進／制動の三つの機能を同時に果たす優れたシステムであった．磁気浮上は，このうち支持と案内力を電磁力で代替することで，非接触による高速性，静音性，そして保守作業の手間を劇的に軽減する

という技術的長所を狙うものである．また，最後に残る推進／制動の機能をリニアモーターにより実現することで，電気制動の利用率を高めるとともに，回転から並進への変換のための機械的要素を省略し，省スペース化を図ることができる．さらに，鉄道的高速化や勾配設定などの技術的制約となっていた鉄車輪・鉄レール間の粘着力への依存をなくすことで，高速化や自由度の高い鉛直勾配を含む路線の設計を可能とするという利点が得られる．一方，浮上のためのエネルギーが必要であること，リニアモーターは回転形モーターと比べて力率，効率が低くなりがちであること，非接触という特長を生かすと車上への電力供給が難しくなること，そして，すでに大きな広がりを持つ在来鉄道ネットワークとの技術的互換性を欠くことが技術的問題点となる．これまで実用を目指して開発されてきたシステムの方式の組合せを表 1 に示す．

非接触でものを運ぶという考え方はすでに 19 世紀の終わりにあった^①．1877 年にサー・ジョン・ソーニー（Sir John Thorny）がアメリカでこの浮上支持に関わるアイデアで特許の申請をし，これがホバークラフトなどで知られる空気浮上の技術が研究されるきっかけとなったといわれている．1960 年から 1970 年代に，この高度な制御技術を要しない空気浮上を用いた高速鉄道の実験的研究がイギリス，イタリア，アメリカなどで行われたものの実用化には至らなかった．これは，スカート用ゴムの磨耗の問題とともに浮上重量 1t 当たり約 10kW もの大きなエネルギー消費を伴い効率が悪かったことと，周囲環境への騒音やほこりの巻き上げなど環境面からも好ましくない性質を持つものであったからと考えられる（その後，オーチス社によって消費エネルギーの少ないタイプが低速用途に開発され，現在小規模な構内旅客輸送に実用化された例もある）．

これに対し，比較的高度な制御を要するものの，磁気力を用いて，静かでエネルギー効率のよい非接触支持・案内を用いる磁気浮上方式のアイデアが出されたのも比較的早い．

表 1 磁気浮上方式とリニア推進の組合せ

システム	支持方式	案内方式	推進方式	電機子の配置	速度領域	現状
エムバーン（西独）	ゴムタイヤと永久磁石	ゴムタイヤ	リニア同期モーター	地上側	40km/h	博物館入り
リニアメトロ（日本） スカイレール（カナダ）	鉄車輪・鉄レール	鉄車輪・鉄レール	リニア誘導モーター	車上側	70km/h	各国で商用運転中
バーミンガム市ピープル・ムーバ（イギリス）	電磁吸引浮上	制御電磁石	リニア誘導モーター	車上側	70km/h 未満	博物館入り
リニモ（日本）	電磁吸引浮上	制御電磁石	リニア誘導モーター	車上側	100km/h	日本で商用運転中
トランスラピッド（ドイツ）	電磁吸引浮上	制御電磁石	リニア同期モーター	地上側	400km/h 台	中国で商用運転中
スイスメトロ（スイス）	電磁吸引浮上	制御電磁石	ホモポーラリニア同期モーター	地上側	500km/h 以上	博物館入り
JR マグレブ（日本）	電磁誘導浮上	電磁誘導案内	超電導磁石界磁リニア同期モーター	地上側	500km/h 以上	日本で試験運転，中央新幹線として建設中

1902年アルバートソン (A. C. Albertson) によりアメリカでの特許出願が行われ、1910年代に磁気浮上列車のアイデアもフランス人エミール・バシェレ (Emile Bachellet) によって出されているが、それに必要な制御電源の基本技術が当時はなかったためアイデアのみで終わったものと思われる。

実用を視点においた検討は、ドイツ人技術者ヘルマン・ケンパー (Hermann Kemper) によって行われた。1922年から1938年にかけて制御電磁石による浮上に関して三つの重要な特許が申請され、1936年には現在でも適用できる形での設計法がまとめられた。

3. EMS + 地上電機子リニア同期モータ推進：トランスラピッド

3.1 EMS の原理

トランスラピッド (Transrapid) の場合には、図1のように支持磁石を、モータの界磁として兼用する形のリニア同期モータを用い、脱線しないための案内に、別の電磁石を用いる。普通に磁石を鉄の近くへ持っていくと、吸引力が働く。この力を利用して、たとえば鉄と磁石の間に一定のギャップを持たせ重量物を吊り下げるのが最も簡単なアイデアである。磁石の吸引力は鉄に近づくほど強くなり、逆に遠ざかるほど弱くなるので、どこかに必ず重力と吸引力の等しくなる平衡点が存在する。しかし、平衡点よりも少しギャップが短くなると磁石の吸引力が強くなるために磁石はくっついてしまいギャップはゼロになってしまうし、逆に少しでも長くなれば磁石はもはや重力を支えられなくなり下に落ちてしまう。

ペンの上端を指でつまんでぶら下げ振子を構成すると、ペンは鉛直に下がった位置で止まる。これは「安定な」平衡である。ペンを少しずらしてみても、重力の作用により何度かの振子運動の後、必ず最後にペンは鉛直に下がった位置で止まる。一方、ペンの下端をつまんで、ペンを鉛直に立てた倒立振子を構成することも可能で、これももう1つの平衡点になっている。しかし、手が何もしなければこのペンは倒れてしまう。ペンが鉛直の位置から少しずれると重力がこのペンをさらに倒す方向に作用するからである。このような平衡点是不安定であるという。上記の磁石のつりあいの点もこのような不安定な平衡点となっている。秋田祭りの竿灯は、倒立振子として不安定な竿が倒れようとする、下にいる人間が視覚その他の「センサ情報」に基づき、倒れる方向に少しだけ動き操作入力を与えて、竿が倒れるのを防ぐ。これを能動制御と呼ぶ。不安定なシステムは、出力信号をセンサで検出し、その信号をもとに、比較的小さな操作入力を与えることで安定に動作させる。

図1 Transrapid の浮上、案内磁石とリニアモータの関係

その性能は、制御のソフトウェアに大きく依存する。竿灯は熟練者が行えば、たとえ突風などの「外乱」があっても、あまり揺れることもなく、鉛直近くに立っている状態を維持できる。一方、同じことを素人がやれば、脚力などアクチュエータの出力はさほど変わらないにもかかわらず、右左に振動的になったり、うまく状態を維持できずに倒れてしまう。これは能動安定化制御器設計の重要性を示している。

電磁石の場合、ギャップ長の情報をセンサで検知し、巻線電流の値を適切に調整することで安定浮上が可能となる。これは、常にアクティブ制御を必要とする一方、通常の電気機械でよく用いられる常電導の材料で構成が可能なこと、吸引力を用いているので磁路が閉じているという特長があり、電磁吸引浮上方式 (EMS: Electromagnetic Suspension) と呼ばれる。トランスラピッドを含む、磁気浮上の最も一般的な方式である。トランスラピッドはこのEMSと、その浮上用電磁石を界磁磁石として用いる地上電機子形のリニア同期モータ (LSM) により、400km/hの商用最高速度を実現する高速磁気浮上軌道交通である。

3.2 開発の経緯²⁾

3.2.1 黎明期

トランスラピッドの研究開発では、前述の1934年から1977年の期間が、黎明期と位置づけられるが、磁気浮上鉄道に向けた具体的検討は、第二次世界大戦後の電気工学の技術や優れた磁性材料の発達を待って再開されることとなった。

1969年から1972年の期間、ドイツ連邦科学研究省 (BMFT) のプロジェクトとして高速軌道交通の研究が行われ、1970年にトランスラピッド01として小規模な電磁吸引浮上のデモ装置が発表された。1972年にMBB社 (Messerschmitt-Bölkow-Blohm) が南ドイツの660mの軌道で、初めての人間を運べる規模 (座席数4) の電磁吸引浮上 (EMS: ElectroMagnetic Suspension) 方式の磁気浮上試験車両を発表、リニア誘導モータ推進で最高速度90km/hのデモを行った。この戦後の開発の黎明期には、さまざまな方式が試みられ、1972年には数社の研究組合がエアランゲンに900mの環状試験線を設け、現在のJRマグレブで用いられているような超電導磁石を用いた電磁反発式磁気浮上 (EDS: ElectroDynamic Suspension) 方式のEET01という車両の試験を行っている。また、1974年には、ティッセン・ヘンシェル社とブラウンシュバイク工科大学が共同で、EMS方式と地上電機子式のリニア同期モータを組み合わせた方式の実験を行っている。また、MBB社が、無人のKOMETという試験車をロケットで加速し400km/h以上の高速を実現し、高速におけるEMSの性能評価を行った。

ティッセン・ヘンシェル社は1975年、1976年とカッセル市でそのEMS方式の浮上案内・地上電機子式リニア同期モータによる推進方式の実用化研究、デモを着実に進めた。これらの成果を受けて、ドイツ連邦科学研究省 (BMFT) は、1977年にドイツの磁気浮上鉄道の開発をこの方式に一本化することを決定し、エアランゲンの超電導EDS方式の開発は中止となった。

3.2.2 1978年～1991年：エムスランド試験線における集中的技術開発期

この重要な決定を受けて1978年に磁気浮上鉄道トランスラピッド研究組合が設立された。北ドイツのエムスランドに建設された試験線を用いた集中的な実用化研究が1991年まで行われる。1988年には、実用化を想定した長期連続運転試験が開始され、乗客を乗せた412.6km/hの当時の世界速度記録をトランスラピッド06が達成した。この年、静音化、軽量化、高速化を図った図2のトランスラピッド07車両が、ハンブルグの国際交通博IVA88で展示された。1989年12月15日にはこのトランスラピッド07が436km/hの有人運転速度記録を更新した。1991年にドイツ鉄道が大学などの中立専門機関と協

力して、東西統一の成ったドイツにおける磁気浮上高速鉄道トランスラピッドの技術的成熟を認定する報告書をまとめた。

3.2.3 1992年～1999年：ドイツ国内／中部ヨーロッパでの実用化と国際展開を模索した時期 1992年7月15日に統一ドイツ連邦交通省は1992年連邦交通計画を発表、ハンブルグと、統一ドイツの首都であるベルリンの300kmを結ぶトランスラピッドの路線建設すると発表した。1993年にはトランスラピッド07で450km/hが普通の運転状態で可能なことが実証されるとともに、磁気浮上ベ

図2 Emsland 試験線における Transrapid 07

ルリンハンブルグ線運用会社が、ベルリン-ハンブルグ線の私的部門での運行と財務の計画書を政府に提出するところまで、実用化計画が具体化した。これを受け1994年9月23日に連邦政府がベルリン-ハンブルグ磁気浮上高速線の実現を決め、路線計画の具体的な手続きに必要となる磁気浮上計画法が連邦議会を通過し成立した。同10月13日にシュペーリンに磁気浮上鉄道計画会社が設立され、路線計画の具体的な作業が開始された。1996年5月9日、6月13日にトランスラピッド要求法が連邦議会両院を通過した。

1998年には、経済性評価の結果、ドイツ国鉄がベルリン-ハンブルグ線を買取り、運営を行うことが決められた。1998年には各地域の具体的路線計画が完了し、292kmのルートの公開決定が開始された。同5月に国際的なマーケティングのためのトランスラピッドインターナショナル社が設立された。同時にアメリカへの展開の準備も進められた。1999年にはベルリン-ハンブルグ線の具体的路線計画に対する公聴会が行われた。また、実用線に導入されるプロトタイプ車両としての3両編成、乗車定員351名のトランスラピッド08が完成し、エムスランド試験線での運行が開始された。同11月には、中国における適切な実用路線の選定のため、中国科学院との提携も開始された。

3.2.4 2000年～2010年：中部ヨーロッパでの実用化の頓挫と上海での商用運転の時代 2000年2月5日連邦政府、ドイツ鉄道、産業複合体はベルリン-ハンブルグ線計画の中止を発表した。同2月28日に連邦政府とドイツ鉄道は中止されたベルリン-ハンブルグ線に変わるドイツ国内の適用可能路線の議論を開始し、五つの候補を挙げて具体的検討を行うと発表した。

これと並行し、2000年のハノーファ万博の一環として、エムスランド試験線も協力展示の一つとなった。同6月30日に上海市の浦東地区と国際空港を結ぶ30kmの路線共同建設についてトランスラピッド・インターナショナル社と上海市でフィージビリティ調査の合意が成立した。7月2日には中国の朱首相、上海市長を含む中国要人がラインハルト・クリムトドイツ連邦交通相とともにトランスラ

ピッド08に試乗した。これらを受け、翌2001年1月の建設契約の締結となり3月から建設作業が開始され、当初計画からやや遅れた2003年5月に上海線の営業運転が開始された。2003年11月12日には、営業運転最高速度500km/hを記録したものの、その後は最高速度430km/h程度で運転されている。2003年12月29日から、計画ダイヤによる定期商用運行が続けられている。

この中国での実用化と併行して、アメリカでの応用の計画や、ドイツ国内でのミュンヘン空港線を中心とした計画の議論もあったが、アメリカでの応用についての具体化は進んでいない。また、ミュンヘン線は2008年3月27日に中止が正式に発表され、その後ドイツとしての磁気浮上鉄道の具体的実用化の計画は皆無である。2006年9月22日のエムスランド試験線での衝突事故で失われた試験車両の後継であるトランスラピッド09車両の試験が、ミュンヘン線計画中止の発表後も、2008年7月から行われたが、その試験も2009年6月で終了した。ベルリンのトランスラピッドインターナショナル社も2008年5月に閉鎖となり、トランスラピッドのマーケティングはティッセンクルップ（ThyssenKrupp）社に引き継がれている。

一方の、上海での運行は今日まで成功裏に続けられ、2010年5月には、中国の航空機メーカーによるトランスラピッド形中国製車両の完成や、中国による南方への延伸計画なども報道されているが、その将来は未定である。

4. 半浮上+地上電機子リニア同期モータ推進：M-Bahn⁽¹⁾

地上電機子形リニア同期モータの界磁磁石に永久磁石を用い、その永久磁石の吸引力を車重の支持に使うものの、支持力の約数パーセント程度の鉛直方向の力は小さな車輪で負担し、特殊なリンク機構で負荷重量変化により磁気ギャップ長を調整することで、電気的な浮上力の能動制御をすることなく永久磁石のみによる磁気浮上（機械的接触を伴う支持との併用のため半磁気浮上とも呼ばれる）を実現した。図3の都市交通システムM-Bahnは、技術の歴史上興味深い存在といえる。1989-1991年にベルリンの壁に沿って商用運行がなされた。1990年の東西ドイツの統一、そして東西ベルリンの統合に伴い、技術デモとしての役割を終え、統一ベルリン市の地下鉄ネットワーク拡充のために撤去された。その後、フランクフルトの空港への導入や、現日本大学綱島教授が神戸製鋼の社員時代に担当者として日本への導入も積極的に検討されたものの、現在では博物館の展示および技術史の記述としてその痕跡をとどめるのみとなっている。

図3 西ベルリン市 ベルリンの壁の脇を商用運転していた M-Bahn (1989年12月撮影)

5. EMS + 車上一次リニア誘導モータ推進 : Birmingham system, HSST-Linimo と韓国の磁気浮上鉄道計画

トランスラピッド 04 として技術開発され、これとは別に 1984-85 年にはイギリスのバーミンガム (Birmingham) 市の空港駅と国際空港ターミナル約 600m を結ぶシャトルとして商用運転の実績のあった、浮上・案内兼用の EMS と、車上一次形リニア誘導モータ (LIM) による推進をもつタイプの磁気浮上鉄道の技術がある。この方式は、地上設備の価格を相対的に小さく抑えられる一方で、車上に浮上およびモータの一次側を有するため、車上の設備が大きくなること、地上から車上へ大きな電力伝送を行う必要があること、LIM には端効果と呼ばれる高速運転で性能が著しく悪化すると特性があるため、最高時速百キロ程度の都市交通に適している。

日本で日本航空が 1972 年に開発を始め、2005 年の愛知万博で、愛知高速鉄道東部丘陵線リニモ⁽³⁾として藤が岡-八草間を結ぶ愛知県の地域鉄道として商用運転に入った図 4 の HSST もこの方式に属している。現在 1 日当たり 17 000 人程度を輸送する都市郊外交通としての役割を果たしている。同様な図 5 の磁気浮上鉄道の実用化が近年、韓国 (大田市や仁川市) および中国北京などで検討されている。

6. 車上一次リニア誘導モータ推進の みを用いたもの : リニアメトロ⁽⁴⁾

鉄車輪・鉄レールによる支持案内と前節で述べた車上一次 LIM による直接駆動方式 (リニアメトロ) は、車両

図 4 愛知高速鉄道 リニモ

図 5 韓国大田駅にある磁気浮上鉄道開通イメージのポスター

図 6 リニアメトロの車上一次形リニア誘導モータと車軸

限界は小さく、鉄車輪鉄レール間の粘着力に依存せぬ加速・制動が可能であるという長所をもち、最も実用化の進んだリニアモータ・カーといえる。日本では 1976 年ころから開発が行われ、1990 年の大阪市交通局 7 号線の開業以来、現在では、大阪市、東京都、神戸市、福岡市、横浜市と応用が広がっている。このリニアメトロは 1 時間あたり 15 000 人から 4 万人程度の輸送力を持つミニ地下鉄として活躍している。その海外市場への展開も重要視されるなか、図 6 に示されるような鉄道車両駆動用リニア誘導モータの国際規格化の作業も進められ、2011 年 5 月末に日本提案の国際規格 IEC62520 として成立した⁽⁵⁾。

7. スイスメトロ

スイスでは減圧トンネルの中で省エネルギーと磁気浮上／リニア高速駆動を両立させる高速磁気浮上鉄道としてスイスメトロを 1990 年頃から約 20 年間熱心に開発したが、その構想は実現することなく研究開発は打ち切られた。その関連技術については本特集の中野先生の記事「減圧トンネル超高速鉄道」(p.24-27) で詳しく紹介される。

8. おわりに : 磁気浮上鉄道の魅力 と問題点

以上概観したように、磁気浮上・リニア駆動の鉄道は決して新しい夢の技術ではなく、確実な技術の裏づけと合理性を持つシステム構成が可能で、軌道交通の基本技術として、非接触、静穏、高速という優れた技術的特長を有している。一方、すでに広く普及している在来鉄道との技術的互換性の欠如が、その導入実用化において大きな障害となることも事実である。すでに公共都市交通分野で一定の重要な役割を担っているリニアメトロや中央新幹線の実用化を契機に、磁気浮上・リニア駆動の鉄道への関心が高まり、実用技術として育てられることを願う。

(原稿受付 2011 年 11 月 1 日)

●文 献

- (1) Ralf Roman Rossenberg, [Radlos in die Zukunft?---Die Entwicklung neuer Bahnsysteme], (1983), Orel Fuessli Verlag (初期の技術的歴史についてはこの文献に拠った)。
- (2) ThyssenKrupp 社の Transrapid のページ,
<http://www.transrapid.de/>
- (3) 愛知高速鉄道東部丘陵線, <http://www.linimo.jp/>
- (4) 日本地下鉄協会リニアメトロ,
<http://www.jametro.or.jp/linear/menu.html>
- (5) Information on the new international standard on linear induction motors applied to railway traction, IEC Home page,
http://webstore.iec.ch/preview/info_iec62520%7Bed1.0%7Db.pdf