

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

長嶋 賢*

**Research and Development concerning Superconducting Maglev and
Research on applying its Technology to the Conventional Railway System**

Ken NAGASHIMA

RTRI is advancing the fundamental research and development concerning superconducting maglev. The topics of this issue are characteristics of maglev vehicle dynamics, experimental production and evaluation of REBCO high-temperature superconducting coils. RTRI is also promoting the applied research based on maglev technology to the conventional railway system. The topics of this issue are the LIM-type eddy-current rail brakes and the flywheel energy storage system.

キーワード：浮上式鉄道，超電導リニア，在来方式鉄道，超電導磁石，地上コイル

1. はじめに

車両の浮上と案内を車載超電導磁石で行うという、現在の超電導磁気浮上式鉄道に採用されている画期的なアイデアは、アメリカ、ブルックヘブン国立研究所のJ.R. パウエル博士とG.R. ダンビー博士によって提案された。公式には1966年に“High-Speed Transport by Magnetically Suspended Trains (磁気浮上列車による高速輸送)”と題するアメリカ機械学会での二人連名の発表の中でこのアイデアがはじめて言及された¹⁾ので、2016年はそれから50年目となる記念すべき年といえることができる。本稿では、このパウエル、ダンビーの初期の提案を紹介した後、リニアモーターカー実用化の現状ならびに最近の動向を紹介し、鉄道総研における浮上式鉄道に関する基礎研究、並びに関連技術の在来方式鉄道への応用展開について述べる。

2. 浮上式鉄道に関する動向

2.1 「超電導磁気浮上」の提案から50年

ブルックヘブン国立研究所では、2016年3月に上記の「超電導磁気浮上」提案50周年を記念して、パウエル博士の子息によって“Powell and Danby’s Grand Idea: 50 Years of Maglev History”と題する講演が行われた^{2) 3)}。

この講演によると、パウエル博士は1963年にも超電導を用いた輸送システムの提案をしているが、この時の提案は超電導体を軌道側に用いたため、そのシステムは

* 浮上式鉄道技術研究部 部長

高価になりすぎて実用的ではなかったとのことである。

その後、1966年にダンビー博士と共同で行った提案では図1に示したような基本コンセプトを示した。ここでは、①超電導コイルを車両に搭載し、軌道側には常電導コイルを設置する、②電磁誘導により浮上する（電磁誘導浮上支持方式＝EDS, ElectroDynamic Suspension System）、③車両の案内にヌルフラックス（車両側の超電導コイルから軌道側の短絡コイル（回路）への鎖交磁束がゼロとなるような構成。図1の案内コイルは地表面に対して垂直に設置してある。）を適用する、の3点が骨子となる、実用的な超電導磁気浮上式鉄道を提案している。その後、1971年に「正式に」この超電導浮上システムとリニア同期モータ（LSM, Linear Synchronous Motor）の組み合わせを発表したとされている。

図1の車両は地上側に配置するコイルと車載の超電導コイル（磁石）間に働く電磁力によって浮上、案内されるが、この電磁力は地上コイルの起磁力と車載コイルの起磁力の積に比例する。

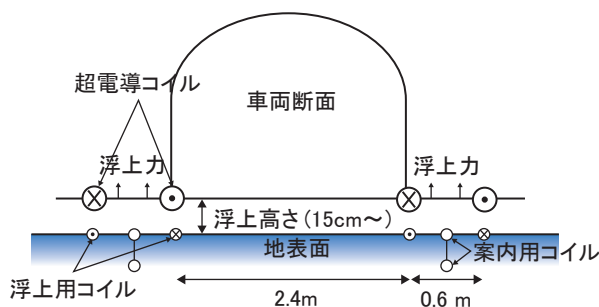


図1 パウエル-ダンビーの基本コンセプト

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

そして、地上コイルの数は車載コイルにくらべて圧倒的に多く、目的地まで切れ目なく沿線に配置する必要があるため、これの起磁力を小さくし、その分車載コイルの起磁力を大きくする方が全体システムとしては経済的である。超電導コイルは電気抵抗が無いため、ジュール損を伴わずに起磁力を大きくできる（図1ではコイル断面積で表現）。同時に地上からの浮上高さも大きな値（15cm以上）を確保できる。

このあたりの事情を、論文では「車上の超電導コイルには損失なく数百 kA の電流を流し、地上コイルへの通電電流は数 kA だけに限定することによって通電にともなう損失を小さくできる。車上にだけ超電導コイルがあればよいので、コストも、必要な冷凍能力も少なく済む。」という様な表現で記述している。

1966年当時には超電導コイルはまだ世の中で一般的ではなかったが、ブルックヘブン国立研究所で粒子加速器や核融合の研究を専門とし、超電導技術に精通する物理学者であったパウエル、ダンビー両博士ならでの提案であった。

この提案が日本の超電導磁気浮上式鉄道開発のきっかけとなったことから、鉄道総研は、1997年4月に浮上式鉄道山梨実験線の走行試験開始を記念して、「特別国際講演会」を開催し、パウエル博士を招待した。講演会ではパウエル博士より、「超電導磁気浮上式鉄道システム発明の経緯」と題する講演が行われた⁴⁾。

2.2 リニアモーターカーの実用化の進展

ここ1年ほどの間にリニアモーターカーの実用化の動きがまた活性化している。2015年12月には仙台市で、鉄輪を用いてリニア誘導モータ（LIM, Linear Induction Motor）で推進する、いわゆるリニアメトロ方式の地下鉄東西線が開業した⁵⁾。

日本国内ではリニアメトロとして7路線目である。また、2016年2月には長らく開業が延期されてきた韓国の仁川空港磁気浮上式鉄道が開業し⁶⁾、2016年5月には中国の長沙市で長沙磁浮快線も試験営業運転を開始した⁷⁾。韓国、中国とも超電導を使わない、電磁吸引支持方式（EMS, ElectroMagnetic Suspension System）とLIMによる推進を組み合わせた「常電導浮上式鉄道」である。

現在営業しているリニアモーターカーを表1にまとめた⁸⁾。これによると、6カ国、21路線で実用化されていることがわかる。路線距離は合計すると446kmとなる。図2には国別の営業距離の比率を示す。中国と日本、カナダが大きな数字となっているのがわかる。方式別に見ると、最も多いのがリニアモーターカーでも鉄輪支持とLIM推進を組み合わせた方式で、16路線、総距離383kmである。続いてEMSとLIM推進を組み合わせた、

速度100km/h程度のいわゆる中低速型の常電導浮上式鉄道が3路線、総距離33kmとなった。2015年度まではこの方式は日本のリニモ1例だけであったが、2016年に韓国、中国でも開業したため日中韓の3国で運用されることになった。中国では既に同様の方式を北京でも着工しており、近い将来開業する予定とされている。

現状、実用化例としては唯一であるが、EMSとLSM推進を組み合わせた最高速度430km/hの高速型常電導浮上式鉄道（トランスラピッド）が上海で1路線、距離にして30kmが続く形となっている。

日本の超電導磁気浮上式鉄道はこれまでの実用化例に

表1 実用化されたリニアモーターカー

国名	名称(地域)	開業年	距離(km)	推進/支持方式
カナダ	バンクーバー・スカイトレイン	1985	68.6	LIM/鉄輪
カナダ	トロント地下鉄スカボロー線	1985	6.4	LIM/鉄輪
アメリカ	デトロイトビーブルムーバ	1987	4.73	LIM/鉄輪
日本	長堀鶴見緑地線(大阪市)	1990	15	LIM/鉄輪
日本	大江戸線(東京)	1991	40.7	LIM/鉄輪
マレーシア	ラピッドKLクラナ・ジャヤ線(クアラルンプール市)	1998	29	LIM/鉄輪
日本	海外線(神戸市)	2001	7.9	LIM/鉄輪
中国	上海トランスラピッド	2002	30.5	LSM/EMS
アメリカ	エアトレインJFK(ニューヨーク市)	2003	13	LIM/鉄輪
中国	広州地下鉄4号線	2005	43.6	LIM/鉄輪
日本	七隈線(福岡市)	2005	12	LIM/鉄輪
日本	リニモ(名古屋市-豊田市)	2005	8.9	LIM/EMS
日本	今里筋線(大阪市)	2006	11.9	LIM/鉄輪
中国	北京地下鉄空港線	2008	28.1	LIM/鉄輪
日本	グリーンライン(横浜市)	2008	13.1	LIM/鉄輪
中国	広州地下鉄5号線	2009	31.9	LIM/鉄輪
韓国	エバーライン(龍仁市)	2013	18.49	LIM/鉄輪
中国	広州地下鉄6号線	2013	24.3	LIM/鉄輪
日本	東西線(仙台市)	2015	13.9	LIM/鉄輪
韓国	仁川空港磁気浮上式鉄道	2016	5.6	LIM/EMS
中国	長沙磁浮快線	2016	18.55	LIM/EMS

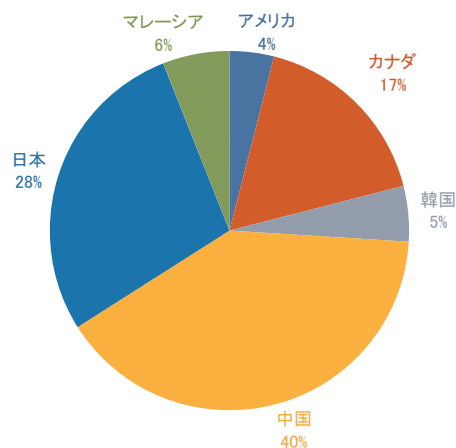


図2 リニアモーターカーの国別営業距離の比率

は無い、EDS と LSM 推進を初めて組み合わせた、時速 500km/h の高速型である。現在のところ、2027 年に東京 - 名古屋間 (286km) で営業を開始し、その後大阪まで延伸する計画となっている⁹⁾。

2.3 Hyperloop

スペース X やテスラモーターズの CEO として有名なイーロン・マスク氏が 2013 年の 8 月に提案した次世代交通システム “Hyperloop” が 2016 年の 5 月にアメリカ、ネバダ州の砂漠で初の公開実験を行ったことで注目を集めている¹⁰⁾。公開実験自体は、リニアモータを使ったもので最高速度も 186km/h に過ぎず、特に目新しいところはない。しかし、将来の計画としては減圧チューブにより走行抵抗を減らして、音速に近い最高速度 1200km/h を出すこと、軌道上の太陽光発電で走行に必要な電力を賄うとしたこと、非常に安価なシステムを、しかも短期間に開発すること、競争方式でアイデアを集めること、また提案者が有名人であること等、話題が多く、期待も集まっているようである。適用先としてもロサンゼルスとサンフランシスコ間、中東のドバイとアブダビ間、北欧のヘルシンキとストックホルム間など多くの候補地が取りざたされている。また韓国では 2016 年 7 月に蔚山 (ウルサン) 科学技術院 (UNIST) が Hyperloop 関連の技術開発を行うとする発表をしている。

この関係では開発会社も Hyperloop の公開試験を行った Hyperloop one 社の他に Hyperloop Transportation Technologies 社といった会社もあり、さらに車両の支持方式についても空気浮上方式から永久磁石のハルバッハ配列 (磁極の配列を工夫し発生磁界を強める工夫を行ったもの) を適用したインダクトラック方式まで複数の情報がある。WCRR や Maglev2016 等の国際会議でもプレゼンテーションがあったが、技術的なことについて具体的な発表はなく、わからないことが多い。現在は技術内容の詳細を検討している段階と考えられる。

また、旅客輸送だけでなく、貨物輸送も想定しているようである。貨物の超高速輸送にも一定の需要があるためであろう。この動きが早期の実用化に至るかは不明だが、成功した場合のインパクトは大きいので、今後とも注視していきたい。

3. 鉄道総研における研究開発

3.1 浮上式鉄道の基礎研究

鉄道総研では、国土交通大臣の承認を受けた「超電導磁気浮上方式鉄道技術開発基本計画」に基づいて浮上式鉄道の基礎研究を進めてきたが、2016 年度が基本計画の最終年度でありこれまでの成果のとりまとめをしている。

ところで冒頭で述べたパウエル博士、ダンビー博士の

超電導磁気浮上式鉄道の基本コンセプトを言い換えれば、車載超電導磁石の性能向上と地上コイルの簡略化がリニアシステム全体の低コスト化につながるキーテクノロジーとすることができる。この考え方は前節で述べた様な減圧チューブシステムにも適用できる考え方である。

鉄道総研ではこの考えをさらに新しい技術やアイデアによって推し進めようと、超電導磁石に関しては高温超電導コイルの開発を、地上コイルについては、単一コイルで推進・浮上・案内全ての機能を兼用できる PLG (Combined Propulsion, Levitation and Guidance System) コイルの開発を基礎研究の枠で実施してきた¹¹⁾。

PLG コイルは既に成功裡に開発を終了しているが、これは、推進機能と浮上案内機能をそれぞれ別コイルで構成している従来方式と比べ、構成の簡素化と所要コイル数の削減が可能となり、建設コストの大幅低減が可能である。図 3 に示すように実物大の模擬ガイドウェイを用いて施工性検証までを行い、現状のガイドウェイ構成から大幅な変更をしなくても PLG コイルの施工が可能であることまで確認している。

高温超電導コイルの開発については、冷却温度が高く設定できるため、コイルの周囲を取り巻く真空断熱容器が小型化・軽量化できるメリットがある。そうすると超電導コイルを地上コイルに近づけることができるので超電導コイルの起磁力を上げるのと同じ効果が得られる。その他にも液体ヘリウムなどの寒剤が不要になる、車載冷凍機の消費電力も低減されるなど多くのメリットがあるので、希土類系高温超電導線材の評価という基礎的な部分から開発を積み上げてきた。このたび図 4 の実機大高温超電導コイルの励磁に成功したが、その経緯は本号



図 3 PLG コイルを設置した実機大模擬ガイドウェイ



図 4 高温超電導コイル

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

論文「希土類系高温超電導線材を用いた起磁力 700kA 実機大コイルの開発」で述べている。今後は走行振動を再現した加振試験を行い、温度上昇などがなく、振動環境中でも安定励磁できることを実証していく予定である。

本号論文「地上コイル及び超電導磁石の設計における電氣的ギャップ縮小の効果」では、上記のような高温超電導コイルを導入して地上コイルとの電氣的ギャップが縮小できた場合に、以下の2つのケーススタディーを行った結果を述べている。

- ①地上コイルおよび超電導磁石の諸元は変更せず、鎖交磁束増大効果を電磁力特性の向上に用いる。
- ②地上コイルの諸元は変更せず、電磁力特性を現状以上に保ちながら超電導磁石の起磁力を低減させる。

高温超電導コイルの導入によるメリットをどのように活かすのが良いのか、数値シミュレーションでも検討中である。

3.2 在来方式鉄道への応用研究

浮上式鉄道関連技術の在来方式鉄道への応用研究ではリニアレールブレーキ、超電導フライホイール蓄電、磁気ヒートポンプ、鉄道車内磁界評価などの特徴ある技術が本号で紹介されている。

本号論文「超電導フライホイール蓄電システムの信頼性検証と鉄道への応用」では山梨県米倉山メガソーラー発電所に併設された実証実験施設に設置されたフライホイール電力貯蔵実証機の実証試験について述べている。試験の結果、回転軸の振動によりエネルギー貯蔵量は目標に到達しなかったものの、太陽光発電電力を平滑化する機能を確認できた。

また、図5の高温超電導コイルを含む高温超電導磁気軸受の性能は所期の目標を達成した。設計通りに冷却でき、設計通りにフライホイールロータを磁気浮上させ、フライホイールを高速回転させて特性に変化がないことを確認した。通算で3000時間以上フライホイールを浮上させ、励消磁と昇温冷却を繰り返しても問題なく、長期間の試験後に高温超電導コイルを分解して使用前の性能と比較したが、全く劣化が見られないという良好な結果を得た。

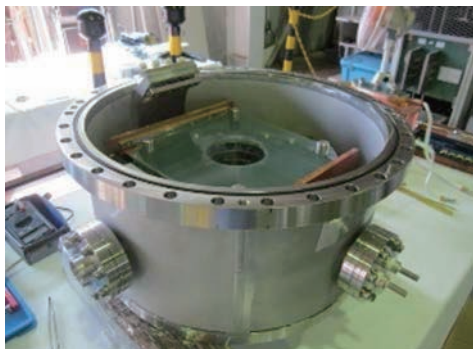


図5 高温超電導コイル

このコイルは前節で述べた浮上式鉄道用高温超電導コイルと全く同じ仕様の希土類系高温超電導線材を用いたもので、コイル形状こそ違うもののトンレベルの荷重や振動を常時受けるという用途は同じであり、双方の研究開発をさらに進めることによってこれまでに無い先端的な技術について知見の積み重ねがさらにできることを期待している。

超電導の応用としては、鉄道総研で、他に鉄道用超電導ケーブルシステムの開発が行われていることも付記しておく¹²⁾。

4. おわりに

超電導磁気浮上提案 50 周年にあたり、当時の提案内容を振り返った。リニアモーターカーの実用化は鉄輪支持 LIM 推進がこれまで主であったが、浮上式鉄道も増えつつある状況である。さらに Hyperloop 等の新しい動きもある。ただ、超電導磁気浮上の考え方は今振り返っても合理的であり、諸先輩方のご努力により実績も積み重ねてきている。超電導磁気浮上を中心とした研究開発を今後も進め、浮上式鉄道の基礎研究と在来方式鉄道への応用研究を関連付けながら部内の衆知を集め、知恵を部外にも求めて、効率的に研究開発を進めていきたい。

なお今回紹介した研究開発の一部は、国土交通省の国庫補助金あるいは、NEDO プロジェクトの助成を受けて実施したことを付記する。

最後に、超電導磁気浮上を発案された G.R. ダンビー博士が2016年8月2日に86歳で逝去された報に接した。ご冥福をお祈りする。

文 献

- 1) J.R.Powell and G.R. Danby, ASME Winter Annual Meeting, 66-WA/RR-5, 1966.
- 2) <https://www.bnl.gov/newsroom/news.php?a=11820>
- 3) <https://www.bnl.gov/video/index.php?v=514>
- 4) 財団法人鉄道総合技術研究所「鉄道総研のあゆみ－創立20周年－」p.659, 2006年
- 5) <http://www.kotsu.city.sendai.jp/touzaisen/pdf/panfu12min-2.pdf>
- 6) <http://www.railwaygazette.com/news/single-view/view/incheon-airport-maglev-starts-passenger-services.html>
- 7) <http://www.recordchina.co.jp/a137920.html>
- 8) 産業用リニアドライブ技術の応用展開調査専門委員会編、「最新！リニアモータ応用の状況 2015」p.33, 電気学会, 2015年
- 9) <https://saiyo.jr-central.co.jp/company/business/maglev.html>
- 10) http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha.pdf
- 11) <http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd79/rd7910/rd79100109.html>
- 12) <http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd49/rd4940/rd49400109.html>