

浮上式鉄道の研究開発と 関連技術の在来方式鉄道への応用

岩松 勝*

R & D of Superconducting Maglev and Applications of its Technology to Conventional Railway System

Masaru IWAMATSU

2011 and 2012 are milestone years about superconducting Maglev system. 2011 was 100th anniversary that superconductivity was discovered in 1911 by Heike Kamerlingh Onnes in Holland. Then, the designation of the construction of the Chuo-Shinkansen is presented to Central Japan Railway Company from Minister of Land, Infrastructure and Transport in May, 2011 and aims to come to practical use in 2027. Moreover, the research and development of the linear motor was started in 1962 by Railway Technical Research Institute of the Japanese National Railway. This year is 50th anniversary. This report describes the recent research trends on the major components of the superconducting Maglev system with looking back to the history. In addition, the outline is introduced about some research attempts in which application of superconducting and linear motor technology to the conventional railway system has been examined.

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

2011年と2012年は、超電導磁気浮上式鉄道（以下、超電導リニア）において節目の年である。2011年は、オランダのカマリン・オンネスが超電導リニアのキーテクノロジーの一つである超電導現象を発見してから100年であった¹⁾。そして、2011年5月に中央新幹線の建設主体の指名が国土交通大臣から東海旅客鉄道株式会社（以下、JR東海）へ出され²⁾、いよいよ超電導リニアが夢から現実になる時が近づいた。さらに、（公財）鉄道総合技術研究所（以下、鉄道総研）の前身である国鉄鉄道技術研究所においてリニアモーターカーの研究開発を始めたのが、今からちょうど50年前の1962年であった³⁾。

本報告では、このような節目の年に当たり、超電導リニアに関する歴史を振り返りながら最近の研究開発成果について概説するとともに、超電導リニア技術の在来方式鉄道への応用に関する研究開発成果を概説する。

2. 浮上式鉄道の研究開発の歴史と最近の基礎研究の動向

浮上式鉄道の推進・浮上・案内方式とキーテクノロジーである超電導磁石と地上コイルについて、開発の歴史を

振り返りながら最近の動向について紹介する。

2.1 推進・浮上・案内方式

東海道新幹線の開業を目前に控え、技術者の次なる目標として東京・大阪間を1時間で結ぶために、前述の通り、鉄道総研の前身の国鉄鉄道技術研究所においてリニアモーターカーの研究開発が始まった。検討はまさに白紙の状態からであり、どのような方式が最適なのかが議論された。1962年の研究開始時は、高速鉄道の非粘着駆動方式としてのリニアモーターの適応性が検討されている。図1は、その際に試作された1号機であり、この装置をもとに実用化第一号として国鉄大井工場の車輪旋盤送込用運搬車に採用されたことはあまり知られていない⁴⁾。その後の記録としては1966年から1967年にかけて松平精所長のもとで行われた超高速鉄道研究会での検討が秀逸である⁵⁾。研究会での議論の内容を詳細に説明することは紙面の都合で避けるが、350km/hでの非接触駆動の車輪方式と500km/hでの完全非接触駆動の2方式を柱に検討が進められていた。報告では、超高速鉄道の社会的経済的な効果から始まり、動力、空気抵抗、騒音、集電、軸受といった今でも研究が行われているような課題について言及されており、完全非接触を実現するのに空気浮上や永久磁石による磁気浮上の検討結果が報告されている。超電導を用いた磁気浮上方式については、研究会の中では単なる言葉として“超電導”については触れられ

* 浮上式鉄道技術研究部 部長

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

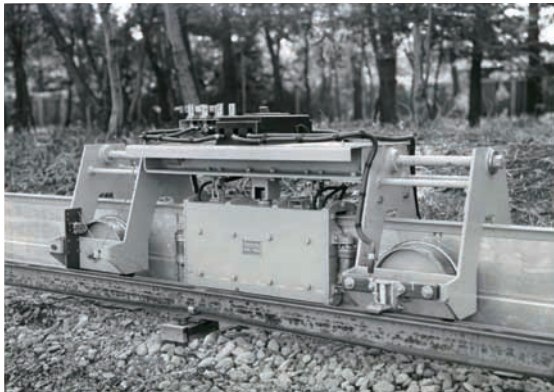


図1 最初のリニアモータ駆動試作1号機

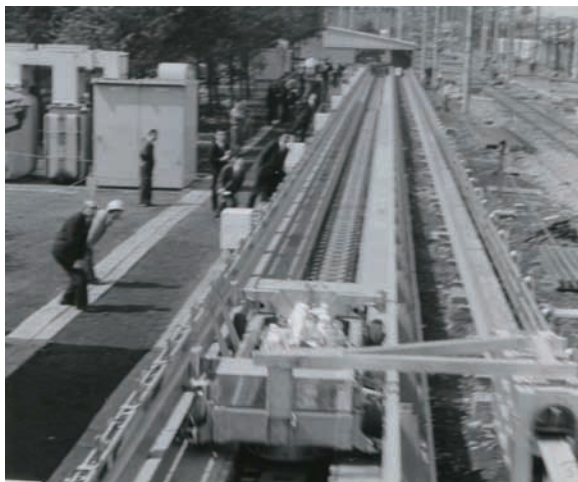


図2 世界初の電磁誘導浮上で走行したLSM200

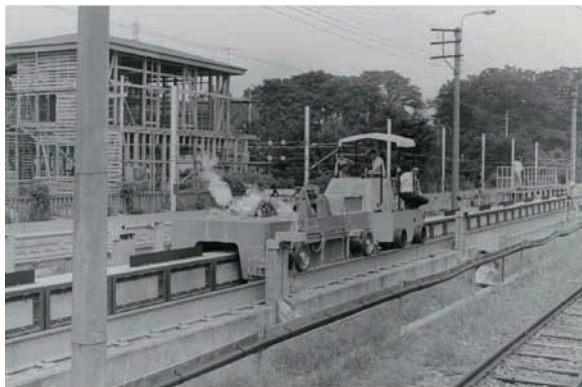


図3 完全非接触浮上走行に成功したML100A

ているが、超電導磁石を用いた浮上・案内方式の原理は、同年に米国のパウエル博士とダンビイ博士が米国機械学会誌で発表するまで待たなければならなかった⁶⁾。国鉄は、1970年にこの米国で考案された超電導磁石を用いる電磁誘導浮上方式を採用することを発表し、現在の超電導リニアの基本思想が確立したこととなるが、浮上方式の検討段階では空気浮上に傾斜していたとの報告も残っている⁷⁾。

表1 浮上式鉄道開発の歴史

車両	導入年	推進方式	浮上方式	案内方式
LSM200	1972	リニア同期モータ	電磁誘導方式 (対向浮上)	機械式 (ローラー、シュー)
ML100	1972	リニア誘導モータ		電磁誘導方式 (推進コイル のヌルフラック クス接続)
ML100A	1974	リニア同期モータ		
ML-500	1977			
ML-500R	1979			
MLU001	1981	リニア同期モータ	電磁誘導方式 (側壁浮上)	電磁誘導方式 (浮上コイル のヌルフラック クス接続)
MLU002	1987			
MLU002N	1993			

2年後の1972年には延長220mの走行路(以下、ガイドウェイ)が研究所内に設置された。ガイドウェイの側面に推進コイルが、底面には浮上コイルが敷設されて、超電導磁石を内蔵した実験車が走行した。これが、超電導磁石を用いたリニアモータ推進による電磁誘導浮上走行の世界初の成功である。図2に示すこの実験車は、リニア同期モータ(Linear Synchronous Motor)と軌道の長さになみLSM200と名付けられた。さらに1972年秋には現在も鉄道総研に展示されているML100と呼ばれる実験車が公開走行している。これらの実験車は浮上していたものの、案内方式は接触式であり、推進方式も現在と異なっていた。そのような点で現在の超電導リニアの原型となった実験車は、図3に示す1974年に地上一次リニア同期モータ推進、超電導磁気浮上案内に成功したML100Aということになるであろう。開発された車両と推進・浮上・案内方式を表1にまとめる。

磁気浮上方式は、電磁気特性など非線形性が強く、車両運動特性の研究も宮崎実験線用車両も見据えた研究テーマとして行われてきた⁸⁾。現在ではマルチボディダイナミクス的手法を取り入れ、大変位時の非線形領域まで含めた解析に取り組んでいる。詳細は本号の特集論文「浮上式車両の大変位挙動解析のための電磁力連成モデルの構築」を参照していただきたい。

2.2 超電導磁石

車両を完全非接触で支持するための浮上方式は、超高速鉄道研究会資料においても空気浮上方式に多くの頁が割かれ、磁気浮上方式が本命ではなかったことを感じさせる。しかしながら、空気浮上方式はその後の検討において騒音やすれ違い時の問題等もあり、当時の技術陣は技術的な飛躍度が高く、日本は地震の多く地盤が軟弱なことから、浮上高さや側壁との距離を大きくとる必要であるとの理由で超電導磁石を用いた磁気浮上方式を採用した。最初に製作された超電導磁石は、図4に示す超電導磁気浮上特性基礎試験装置と呼ばれるもので、浮上力特性の測定に活用された⁹⁾。その後、各実験車に搭載さ

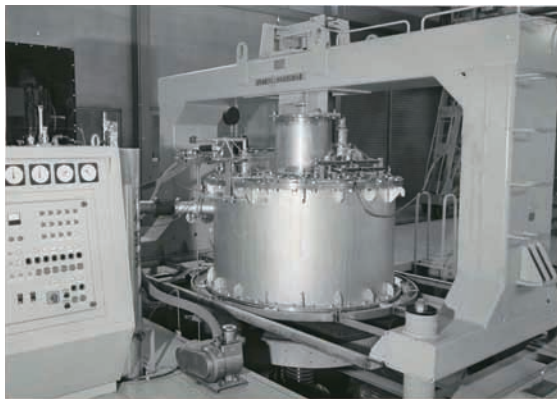


図4 超電導磁気浮上特性基礎試験装置

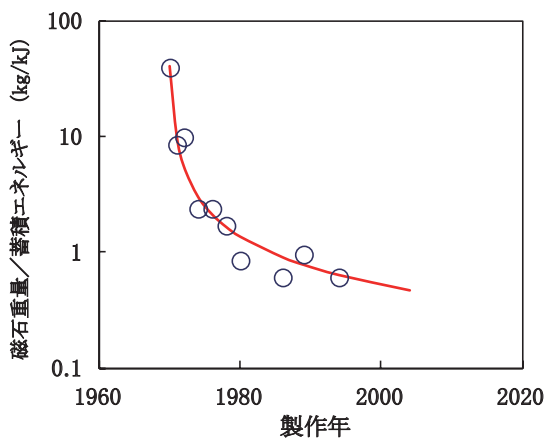


図5 超電導磁石の性能向上

れる種々の超電導磁石が作られるが、初期の超電導磁石は浮上だけを受け持つタイプやML-500のように推進用と浮上用に別々の超電導磁石を持つタイプなどがあった。現在のような形状となって推進にも浮上にも供するタイプとなったのはMLU001以降である。

超電導磁石の開発での目標の一つは軽量化である。ML100においては、超電導磁石の重量2tonで超電導磁石を含む車両重量3.5tonを支えていた。車両重量の半分以上が超電導磁石の重量という状態であった。

超電導磁石の性能を図5にその磁石の蓄積エネルギーと重量の比として示すが、着実に性能向上していることが分かる。2009年に鉄道総研では希土類系高温超電導線材を用いて超電導磁石を試作した。サイズが小さいことや超電導線材の性能の点で現状の超電導磁石に及ばないが、本号の特集論文「希土類系高温超電導線材を用いた超電導コイル製作手法の提案」にあるように製作手法を工夫することにより性能向上が見込めることも明らかになってきている。

2.3 地上コイル

地上コイルを電気機器ととらえて本格的に開発を開始したのは、1979年からである。リニアモータの研究開始から10年以上も経っているのは、宮崎実験線での地上コ

イルは既存の技術レベルで対応できたのが、宮崎実験線での設計・製作上の経験や走行試験により得られたデータなどを勘案して当時から想定されていた10数両編成の営業線用の地上コイルの仕様を検討したところ、使用電圧、耐用年数、個数、寸法などの点で宮崎実験線のそれとは大きく性能が異なっていることが明らかになったことによる¹⁰⁾。

宮崎実験線での初期の推進コイルは、図6に示すようにSMC(Sheet Molding Compound) モールド方式が採用されていた。営業線を想定した仕様で試作したところ、SMCモールド方式よりもエポキシモールド方式のほうが電気絶縁性能において優位な点があったことから、山梨実験線ではエポキシモールド方式が採用された。浮上コイルは、初期の宮崎実験線においては対向浮上方式用として図7のようなSMCモールド方式が採用された。山梨実験線に向けては、SMCモールド方式以外の方式も検討された。また、本号の特集論文「巻線コイルに圧縮成形を適用した低渦電流損失地上コイルの開発」では、システムのランニングコスト低減を目指した試みについて報告している。

地上コイルのコスト低減の一手法として、推進・浮上・案内の機能の一つに集約したPLG(Propulsion Levitation and Guidance)方式地上コイルも研究された。この方式は、コイル数の低減や取付方法の簡素化などによるコスト低減が見込める一方、高圧ケーブルの敷設などの課題もある。本号の特集論文「PLG方式地上コイルのケーブル配線施工性検証」では、実物大のガイドウェイを用いて施工性を検証した報告を載せている。



図6 宮崎実験線推進コイル



図7 宮崎実験線浮上コイル

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

3. 関連技術の在来方式鉄道への応用

2005年度から超電導リニアで培った超電導技術やリニアモータ技術を在来方式鉄道に適用すべく種々の研究を行ってきた。主な成果について紹介する。

3.1 超電導フライホイールの開発

鉄道総研が開発している超電導フライホイールは、超電導バルク体と超電導磁石を組み合わせた超電導磁気軸受を採用しているところに特徴がある。超電導化することによりフライホイールの重量を増加させることが可能となり、蓄積エネルギーを増加させることが可能となる。

システム構成の妥当性を検証するために超電導磁気軸受を低温容器に内包し、電磁力を介して外部とのエネルギー授受を非接触で行う装置により、ロータを毎分2000回転以上まで可能であることを実証している。また、図8のような回転体のダイナミクス解析を行い、上記の高速回転時の危険回転数の把握も行っている。

超電導フライホイールの開発に関連して、鉄道総研は山梨県と「超電導等を用いた電力貯蔵技術の研究の推進に関する協定」を締結し、フライホイールをはじめとする超電導関連技術等を用いた電力貯蔵技術により、効率的な再生可能エネルギーの利用を目指し、山梨県の進めるエネルギーの地産地消の推進に協力することになっている¹¹⁾。

3.2 在来方式鉄道における非接触給電

非接触給電による電力供給は、感電の心配がなく、また非接触であることから摩耗や接触に起因した騒音もなく、さらに保守が簡便であるといった特徴がある。一方、接触集電と比較してエネルギー密度が低く、設備コストが高価となるといった欠点もある。鉄道総研では、在来方式鉄道への非接触給電の可能性を検討しており、本号の特集論文「在来方式鉄道用非接触給電装置に用いるコイルの構成」において前述の課題に対応する構成について提案している。

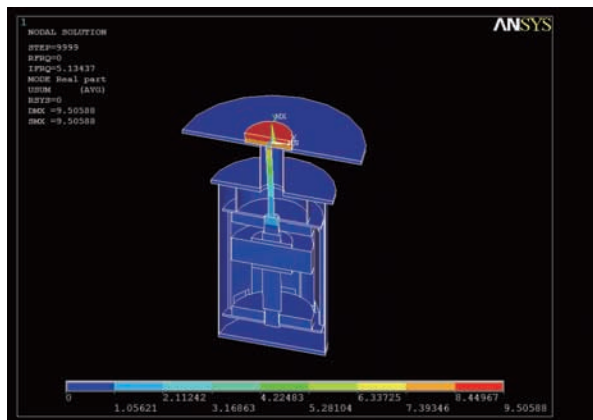


図8 回転体のダイナミクス解析

3.3 車両用空調向け磁気冷凍システムの開発

鉄道車両用の冷房装置の成績係数COP (Coefficient of Performance) は家庭用のそれと比べても低いものとなっている。鉄道車両の更なる省エネのために現行の気体冷凍に代わる磁気冷凍といわれる新しい方式での冷房装置の開発を行っている。

磁気冷凍とは、ある種の強磁性体材料(磁気作業物質)に磁場を印加・除去を行うことにより発熱・吸熱を行う効果を応用するものである。詳細は、本号の特集論文「円環状ハルバツハ配列磁気回路を用いた室温磁気冷凍試験機の特性」を参考にされたい。

4. おわりに

本稿を執筆するに当たり、改めて参考文献(3)を読み直した。その中に、当時の鉄道技術研究所の所長の弁として東海道新幹線の実験に追われる毎日であっても「その先を考えるグループがあってもよいではないか。」とのことで始まったのが「鉄研夢の会」と呼ばれる検討会であり、それが超電導リニアの研究開発の始まりであったと記されている。まさに研究開発開始から50年を迎え、実用化への道筋が描かれた今こそ、基本に帰って過去の検討を振り返り、“その先を考える”ことの重要性を痛感している。

なお、今回紹介した技術開発は、一部国庫補助を受けて実施していることを付記する。

文 献

- 1) Rudolf de Bruyn Ouboter, Scientific American, March, p.98, 1997.
- 2) 国土交通省 HP：中央新幹線の整備計画の決定について、http://www.mlit.go.jp/report/press/tetsudo03_hh_000034.html
- 3) 宇佐美吉雄：増補版 リニアモータ，出光書店，1978
- 4) 鉄道技術研究所講演会講演前刷集，pp.74-79, 1966
- 5) 超高速鉄道研究会：超高速鉄道研究会報告，鉄道技術研究所速報，No.67-1046, 1967
- 6) J. R. Powell and G. T. Danby, ASME Winter Annual Meeting, 66-WA/RR-5, 1966.
- 7) 植田哲也他：超電導体を利用した磁気浮上列車の可能性，日本鉄道技術協会誌，Vol.12, No.11, pp.6511-6514, 1969
- 8) 浮上式鉄道(超高速鉄道)研究グループ：浮上式鉄道(超高速鉄道)に関する研究(第4冊)，鉄道技術研究報告，No.981, pp.151-159, 1976
- 9) 宇佐美吉雄他：超電導磁気浮上，鉄道技術研究報告，No.947, 1972
- 10) 岩花武彦他：浮上式鉄道用地上コイルの開発(1)，鉄道技術研究所速報，No.82-1006, 1982
- 11) 鉄道総研 HP：グリーンイノベーションの推進～超電導等を用いた電力貯蔵技術の研究の推進に関する協定の締結について～，<http://www.rtri.or.jp/press/2011/20110606.html>