

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

長嶋 賢*

Recent Status of Fundamental Research on Superconducting Maglev and Research on Application of the Maglev Technology to the Conventional Railway System

Ken NAGASHIMA

RTRI is advancing the fundamental research on superconducting maglev. The topics of this issue are the experimental evaluation of REBCO high-temperature superconducting coils, the numerical analysis of magnetic spring's effects on maglev vehicles, the development of a system for collecting the sensor data of the ground coils, and so on. RTRI is also promoting research on the application of the maglev technology to the conventional railway system. The topics of this issue are the non-contact power supply system and the flywheel energy storage system.

キーワード：浮上式鉄道，在来方式鉄道，超電導磁石，地上コイル，非接触給電，フライホイール蓄電装置

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道の技術開発については、1990年の運輸大臣通達（当時）に基づき、JR東海と鉄道総研が共同で作成した「超電導磁気浮上方式鉄道技術開発基本計画」により推進されてきた。本基本計画の開発期間は2016年度をもって終了する予定であったが、より一層の保守の効率化や快適性の向上等のための技術開発を推進するため、以下の変更が2017年3月に国土交通省により承認された¹⁾。一つは、今後「低コストかつ効率的な保守体系の検証」、「高温超電導磁石の長期耐久性の検証」、「快適性の向上」の3つの重点開発課題について技術開発を進めることである。もう一つは技術開発期間を2022年度まで6年間延長することである。

これを踏まえ、鉄道総研の浮上式鉄道技術研究部は引き続き2022年度末まで本基本計画に基づいて浮上式鉄道の技術開発に取り組むこととなった。あわせて、これまでと同じく浮上式鉄道の研究開発で培った技術（超電導技術、低温技術、リニアモータ技術等）をベースにした在来方式鉄道への応用研究も引き続き実施して行く。

本稿では、浮上式鉄道に関する研究開発の現状と、関連技術の在来方式鉄道への応用展開に関して解説する。今年度は2005年に当時の浮上式鉄道開発本部を改組して現在の浮上式鉄道技術研究部が発足してから12年目にあたるが、過去の経緯の振り返りも含めて述べてい

2. 鉄道総研における浮上式鉄道の基礎研究

2.1 地上コイルに関わる研究

浮上式鉄道用地上コイルは、数が莫大で、長期間の屋外使用となる。本号論文「浮上式鉄道用地上コイルのリサイクル・リユース手法の検討」ではこの地上コイルのLCAあるいはリサイクルやリユースの検討もしているが、通常の運用の中では、前項にもある通り、「低コストかつ効率的な保守体系」が求められるのは当然である。本号論文「浮上式鉄道用地上コイルのセンサデータ収集システムの開発」では、現在鉄道総研が開発を進めている、センサデータ収集システムの性能試験結果を述べている。

今回、高速走行に向けて無線センサの改良を行い、速度248km/hで走行する新幹線車両から、インフラ側（駅のホーム）に設置した無線センサを起動させ、データを受信する試験に成功した。この結果を敷衍すれば、速度500km/hで走行する浮上式鉄道車両に搭載してセンサデータを収集することも期待できる。本システムは浮上式鉄道用地上コイルの状態監視用に開発したが、「在来方式鉄道への応用展開」として今後、幅広く、新幹線車両等を使った沿線センサのデータ収集への活用も検討していきたい。

2.2 高温超電導コイルの開発

鉄道総研ではこれまで、高温超電導線材による超電導コイル（高温超電導コイル）にも取り組んできた。当初から、磁場中で高い臨界電流密度が期待でき、低コスト化も期待される希土類系（REBCOともいう）高温超

* 浮上式鉄道技術研究部長

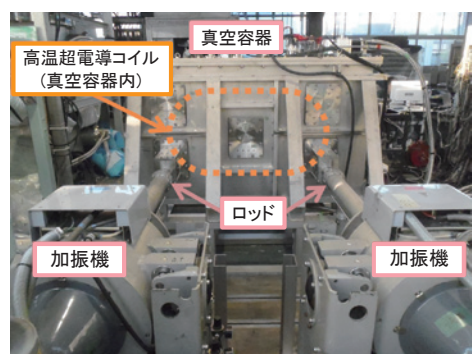
図1 超電導コイル巻線機²⁾

図2 超電導コイル機械加振試験装置

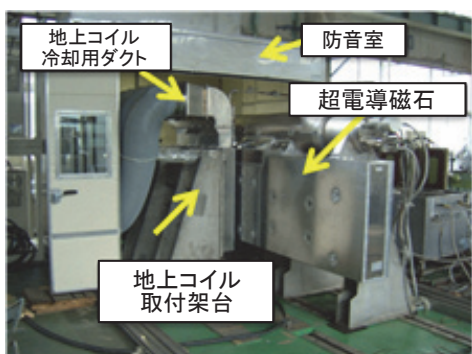


図3 地上コイル評価用電磁加振装置

電導線材の適用について主に研究開発を進めてきた。まずは自分たち自身でコイル設計に必要なデータを得るため、線材の通電特性を評価する装置の開発から着手した。

その後、希土類系線材は従来のいわゆる低温超電導コイルと同様の手法で製作するとコイルを成形する時点で性能劣化等の問題があることが判明したため、コイル製作工程の見直しを検討すべく、超電導コイル巻線機を新規に導入し、開発を進めてきた。図1は本号論文「実機大希土類系高温超電導コイルの機械加振試験」で性能評価した「実機大希土類系高温超電導コイル」を研究員が巻線している様子であるが、この巻線機は担当研究員が設計した最新のもので、長径1mを超える異形（レーストラック形）コイルが巻線できる²⁾。また、巻線後のコイルの成形には、熱可塑性樹脂を使用した鉄道総研独自の手法を考案、評価試験を繰り返して性能劣化のないコイル製作手法を確立した。

上記の本号論文では完成した高温超電導コイルに通電し、磁界を発生させた状態で外部から機械的に強制振動させる機械加振試験を実施し、10G(98m/s²)の振動加速度を与えて発熱と耐振動性の評価を行った結果を報告している。このような試験を機械加振試験と呼ぶが、これを実施するために図2の様な専用装置を設計・製作した。試験の結果、開発した高温超電導コイルは所期の性能を有していることが確かめられた。

製作した「実機大希土類系高温超電導コイル」は、今後、図3の地上コイル評価用電磁加振装置の超電導磁石が内蔵している従来の低温超電導コイルと置き換えて、地上コイルの耐久性確認試験や性能確認試験に役立てて行く予定となっている。なお、ここで紹介した研究開発は一部、国土交通省の国庫補助金を受けて実施したことを付記する。

2.3 車両運動シミュレータによる解析

これまで、鉄道総研では浮上式鉄道車両の車両運動特性を明らかにするために高精度な浮上式鉄道車両運動シミュレータを開発してきたが、本号論文「浮上式鉄道車両の案内系の磁気ばね特性」では高温超電導磁石の導入を想定したシミュレーションを実施した。具体的にはギャップ（超電導コイル～地上コイル間距離）や、超電導磁石起磁力等が変わった場合に、車両に働く案内系の磁気ばねが受ける影響等について検討し、結果を述べている。この車両運動シミュレータは今回のような高温超電導磁石の適用性検討の他、地上コイルの負荷条件の検討、振動乗り心地を含む快適性の向上に資する検討、システムの効率向上に資する検討等、適用範囲が非常に広い。

今後、浮上式鉄道に関する研究を効率的に進めるツールとして、本シミュレータを拡張していきたいと考えている。

3. 浮上式鉄道関連技術の在来方式鉄道への応用研究

3.1 リニアモータ型レールブレーキ

リニアモータを在来方式鉄道のブレーキに使用するという試みは、本項で紹介する「浮上式鉄道関連技術の在来方式鉄道への応用研究」の中で最も早期に形になった

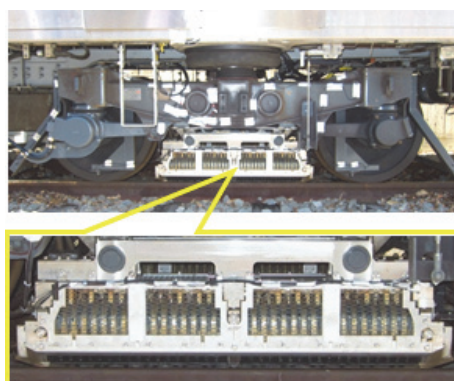


図4 所内試験線走行用レールブレーキプロトタイプ

研究開発テーマである。2012 年度に、図 4 の様に、鉄道総研の所内試験線で営業線仕様の台車にプロトタイプを搭載し、所期のブレーキ性能を実証することができた。

リニアモータ型レールブレーキの特長は、従来の渦電流式レールブレーキで問題となるレール温度上昇を抑制できることである。本ブレーキは車両が持つ運動エネルギーの一部をリニアモータ（車両に搭載するリニア型電機子）で電力回生できるので、レール側と車両側双方でエネルギー消費することになり、車両側でエネルギー消費する分だけ、レール温度上昇を抑制できる。また、回生エネルギーがブレーキシステムの電源となるため、停車時等の緊急時にもブレーキの電源が確保でき、非常用ブレーキとして役立つことも特長として挙げられる。

所内試験線での試験時には速度 160km/h 以下での実用化を想定していたが、最近ではより高速領域での適用を視野に入れ、さらに小型軽量化する方向で研究開発を進めている³⁾。

3.2 非接触給電技術

浮上式鉄道では車上電源の供給方法としても使われている非接触給電技術を、ハイブリッド気動車や蓄エネルギー機構を有する車両の駅停車時等の電力供給に使用する目的で、開発を開始した。レールの影響をできるだけ排除するため、車載集電コイル（図 5）を鉄道総研が発案した 8 の字形状コイルとし、給電ケーブルもそれに合わせた図 6 に示すような構成で低損失化を図り、所内試験線での給電試験を 2014 年度に実施した⁴⁾。

本号掲載論文「鉄道車両用非接触給電装置におけるレール損失の評価」では、レールにおける損失や、輪軸經由の損失の影響を評価した。その結果、8 の字形状コイルを用いた場合、一般的な矩形形状コイルと比較してレールにおける損失ならびに輪軸とレールで構成される

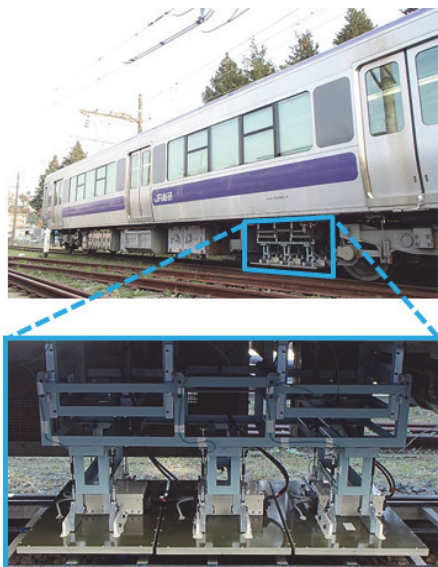


図 5 試験電車の車両床下に設置した集電コイル

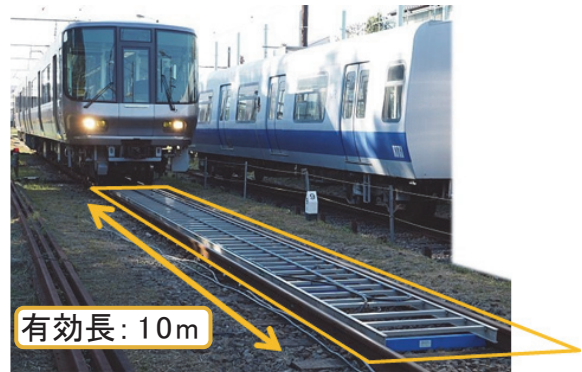


図 6 所内試験線のレール間に敷設した給電ケーブル

閉回路由来の損失が大幅に低減できることがわかった。

今後は更なる効率向上と、集電コイルの小型軽量化を進め、使用条件を明確化しながら実用化を目指す予定である。

3.3 超電導フライホイール蓄電システム

超電導フライホイール蓄電システムについては、鉄道総研考案の超電導磁気軸受を組み込んだ実証機を製作し、図 7 にあるように山梨県甲府市の米倉山太陽光発電所に設置して 2015 年度から実証試験を実施している。本実証試験は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成を受けて進められた。

今年度は、超電導磁気軸受のさらなる性能向上を図る開発を行った。その結果、本号論文「鉄道用フライホイール向け大荷重対応超電導磁気軸受の開発」で述べているように、新たに試作した超電導磁気軸受は、従来のおよそ 4 倍に相当する約 150kN の荷重が支持できることを実証した。これは以前より性能向上した希土類系高温超電導線材を使用し、2.2 で述べた鉄道総研独自のコイル製作手法により、研究者が図 1 の巻線機で製作した超電導コイルを適用することによって得られた成果である。

一方、図 7 の実証機の方は、今年度は質量 4000kg の鋼製フライホイールを導入した他、回転軸周りにいくつかの改良を施して、安定浮上回転を確認した。今後も引

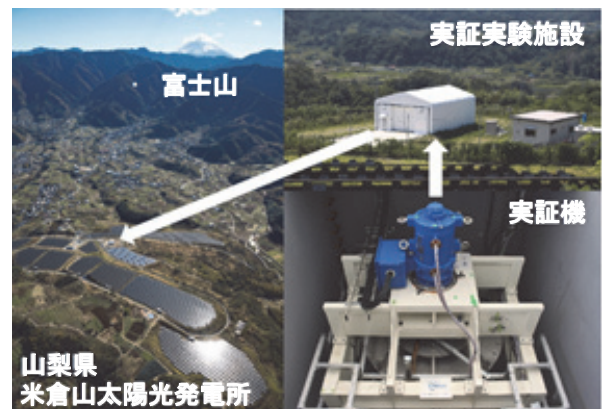


図 7 超電導フライホイール蓄電システム実証機

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

き続き太陽光発電出力平滑化のための実証試験を実施する予定である⁵⁾。

鉄道総研としては、これまで得られた知見を総合して、回生失効対策等に向けた、鉄道用の超電導フライホイール蓄電システムの実用化に向けた開発を進めていく。

3.4 磁気ヒートポンプシステム

磁気ヒートポンプは磁気熱量効果という原理を使うヒートポンプである。現在の冷房システムの主流である、蒸気圧縮式冷凍とは異なり、温室効果ガスである代替フロン等は全く使わず、高効率が期待されるため、昨今世界的にも注目されている。

鉄道総研では磁界制御技術や冷凍技術等、これまで浮上式鉄道の開発で培ってきた技術が適用できるため、開発を進めてきた。その中で、鉄道総研発案の「円環状ハルバツハ式磁気回路」を内蔵した図8のような試作機を2013年度に製作し、磁気ヒートポンプとしては現在でも国内最大能力である1kW（室温下）を達成した。本成果は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託業務で得られたものである。

その後、冷房時の温度差拡大を目指した研究を継続する中で実験結果とよく合う高精度なシミュレーション技術を開発してきた。最近では、鉄道車両用空調（室温で25kWが目標）への適用可能性を解析で検証し、蒸気圧縮式の従来機に比べて軽量かつノンフロンの空調機を提供できる可能性を示した⁶⁾。開発の鍵を握るのは磁気熱量効果を発揮する「磁気作業物質」の高性能化と磁気回路を含めた低コスト化、並びに高効率な熱交換技術であると考えている。

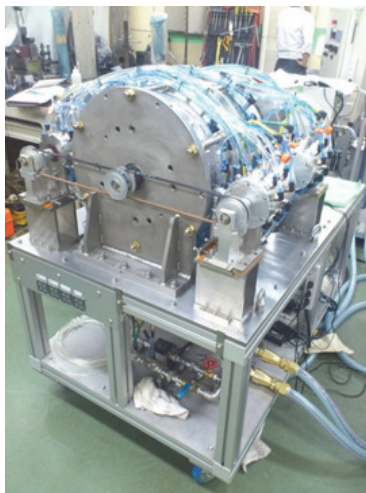


図8 1kW級磁気ヒートポンプ試作機

4. おわりに

本稿では浮上式鉄道技術研究部がこれまで上げてきた

代表的な成果について、振り返った。

「浮上式鉄道の基礎研究」テーマでは、地上コイルの効率的な保守に資するセンサデータ収集システムや高温超電導コイルの開発等で最近、特に大きな進展があったと考えている。

また、「在来方式鉄道への応用研究」についても、研究部発足の2005年時点では机上検討レベルであった4テーマが、しっかりと写真（図4～図8）で示すように形になってきたと実感している。どの成果にも鉄道総研の独自技術やアイデアが含まれている。残念ながら、いずれも実用化には至っていないが、このように所内線試験や実証試験の段階になったことによって、ここで紹介した研究テーマは全て次のステップへ踏み出し、新たな目標に向けて研究を継続している。

また、3.3で述べたように、「浮上式鉄道の基礎研究」の成果である高温超電導コイル製造法が、「在来方式鉄道への応用研究」で進めている超電導フライホイール蓄電システムの超電導磁気軸受に適用されて成果を上げている。開発した成果を情報共有し、効率的に研究開発を進めている良い事例と考えている。このような成功事例を今後増やしていきたい。

鉄道総研の基本計画「RESEARCH 2020」では基本方針「鉄道のイノベーションを目指すダイナミックな研究開発の実施」、「総合力を発揮した高い品質の研究成果の創出」等が示されている。浮上式鉄道技術研究部は、この基本方針に基づいて、今後共、今回紹介したようなイノベティブな研究をダイナミックに実践していく。

文 献

- 1) http://www.mlit.go.jp/report/press/tetsudo07_hh_000129.html (参照日 2017年12月1日)
- 2) 水野克俊：高温超電導コイル巻線機（研究開発七つ道具），RRR, Vol.73, No.12, p.48, 2016
- 3) 依田裕史，坂本泰明，浮田啓悟，笹川卓：高速車両に向けたリニアレールブレーキの小型軽量化の検討，鉄道総研報告，Vol.31, No.1, pp.41-46, 2017
- 4) 柏木隆行，浮田啓悟，坂本泰明，加藤佳仁：鉄道車両用非接触給電装置の電力供給性能検証，鉄道総研報告，Vol.29, No.11, pp.35-40, 2015
- 5) 清水秀樹，澤村秀次，小澤孝仁，宮崎和也，向山晋一，長嶋賢，山下知久，小方正文：超電導フライホイール蓄電装置実証機の状況 一米倉山2017，2017年秋季低温工学会講演概要集，Vol. 95, p.165, 2017
- 6) 宮崎佳樹，池田和也，脇耕一郎：車両空調を目指した磁気ヒートポンプの検討，2017年秋季低温工学会講演概要集，Vol. 95, p.68, 2017