

# 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

The superconducting Maglev system has advanced successfully since the Maglev cars commenced running on the Yamanashi test line. Further, the deliberations about the commercial service of the Chuo-Shinkansen have extensively been done by the government council. The Railway Technical Research Institute is now promoting the fundamental research based on the latest report of 2009 submitted by the Maglev Technology Practically Evaluation Committee. This report describes the recent research trends on the major components of the superconducting Maglev system such as superconducting magnets and ground coils. 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，交通政策審議会，実用技術評価委員会

### 1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道（以下，超電導リニア）の実用化に向けて，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の調査審議が，国土交通省交通政策審議会陸上交通分科会鉄道部会中央新幹線小委員会<sup>1)</sup>にて進められている。東海旅客鉄道株式会社（以下，JR 東海）が超電導リニアにより首都圏と中京圏を2027年までに実用化する計画は着実に進んでいる。

実用化に先立ち，山梨実験線を当初計画であった42.8kmとするため，JR 東海が建設費を負担して未施工区間の建設と既存設備の更新を現在進めている。建設終了後の新型車両<sup>2)</sup>を用いた走行試験は2014年度から3年間で予定されている<sup>3)</sup>。

（財）鉄道総合技術研究所（以下，鉄道総研）は，2009年7月に国土交通省超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会（以下，評価委員会）が取りまとめた実用技術評価と今後の技術開発の方向性への提言<sup>3)</sup>に基づき基礎研究を実施している。

本報告では，超電導リニアに関する最近の研究開発成果と2005年から取り組んでいる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。本号では，その一部について詳細に報告しているので参考にされたい。

### 2. 浮上式鉄道の基礎研究

超電導リニアに関するコスト低減技術や，耐久性向上ならびにメンテナンス技術などに関する基礎研究を実施している。

#### 2.1 車両運動解析

在来方式鉄道車両と異なる特性を持つ浮上式鉄道車両を対象として，連接構成の長大編成における車両運動解明，最適な乗り心地向上策の提案，浮上式鉄道固有のシミュレーションとなる機械・電磁気系の連成シミュレーションに取り組んでいる。

車両運動を模擬するために模型試験装置を製作し，実走行の運動を再現させるとともに，振動を低減させるために先頭台車の振動をフィードフォワード制御する予見制御を行い，その効果を確認している。詳細は本号の特集論文「浮上式鉄道における編成車両の運動特性」を参照していただきたい。

また，機械・電磁気系の連成シミュレーションにおいてはマルチボディダイナミクスソフトウェアを用いることにより，効率的に車両運動モデルを構築することが可能となり，電磁力計算プログラムと連成させて，今後，地震などの異常時に起こる大変位の挙動を詳細に計算できるように取り組んでいる。

さらに，超電導リニア車両は在来方式鉄道と比較して軽量であり，かつ誘導反発磁気浮上では1次支持系に減

\* 浮上式鉄道技術研究部 部長

特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

衰要素がほとんどないため台車振動が減衰しにくく、車体の高周波振動が発生しやすい特徴がある。車体の高周波振動は、在来方式鉄道の速度向上時にも発生する可能性があることから、車両構造および人間科学関係の研究と連携しながら乗り心地の改善ならびに評価方法について検討を進めている。

2.2 超電導磁石と冷凍技術

超電導リニアのキーテクノロジーの一つである超電導磁石は、在来方式鉄道の車輪に相当し、高い信頼性が求められる。また、超電導を維持するためには極低温状態を保持するための冷凍技術も重要である。現在、超電導磁石の検査診断技術、高温超電導機器の開発、ならびに冷凍システムの開発に取り組んでいる。

2.2.1 超電導磁石の検査診断技術

超電導磁石は、断熱構造とするため真空容器の外槽により超電導コイルをおさめた内槽を覆った構造となっている。その構造と極低温という特殊な環境から解体検査や既存の非破壊検査手法の適用は難しい。このため、極低温の環境でも適用可能な非破壊検査技術の開発を進めている。

1点目は、外槽に取り付けた振動加速度センサにより、超電導磁石内部や超電導磁石と台車枠との取付の異常の有無を共振周波数のずれや振動モードの差異で判定しようという試みである。超電導磁石と台車枠との取付の異常についてはシミュレーションを用いて検証を行い、共振周波数が変化することを確認している<sup>4)</sup>。今後、超電導磁石の加振試験を行い、異常判定手法の妥当性を検証する。

2点目は、図1のように超電導磁石の内部の温度を連続的に測定可能な光ファイバ温度センサの開発<sup>5)</sup>を行っている。従来の方式では熱電対や極低温用の温度センサ等を用いた点測定であったが、本方式が適用可能となると分布測定が可能となり、異常箇所の同定に威力を発揮すると考えている。超電導磁石を模擬したクライオスタットに光ファイバ温度センサを実際に組み込み、温度域の異なる複数点の同時測定が可能であることを実証した。今後は、測定精度の向上や即応性などに取り組む。

3点目は、ファイバスコープを用いた内視鏡による超電導磁石内部の検査手法の開発である。熱侵入の少ない内視鏡構成と極低温に対応した内視鏡部品を製作した。現在、観察対象冷却温度については12Kまで可能であることを確認した。

2.2.2 高温超電導機器の開発

本号調査報告「世界の高温超電導線材の現状」でも述べるように、液体窒素温度 (-196℃ : 77K) 付近でも超電導となる希土類系高温超電導線材 (以下、RE系線材) の開発が急速に進んでいる。このRE系線材は高磁場環境でも臨界電流が大きいなど優れた特性を有する。そこで、RE系線材を超電導コイルなどに適用し、超電導磁石

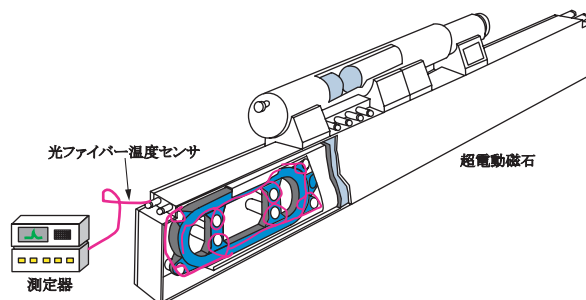


図1 光ファイバを用いた超電導磁石内部温度測定

の更なる高性能化を目指している<sup>6)</sup>。

詳細な報告は、本号の特集論文「希土類系高温超電導磁石の保冷特性評価試験」、「冷凍機無しで超電導を長時間維持する希土類系高温超電導磁石」、「希土類系高温超電導線材を用いた浮上式鉄道用超電導磁石の構成」に譲るが、希土類元素のひとつであるイットリウムを含む高温超電導線材を用いて、超電導磁石に外部から結合する配管や配線がない小型超電導磁石を製作した。この超電導磁石ではコイル温度50Kで1Tの磁場を発生させることができ、コイル温度50K以下を冷凍システムなしで8時間以上保持できることから永久磁石のような運用が可能となっている。さらに、車載冷凍システムを搭載しないことから高圧ガス保安法の適用を受けないといったメリットも有している。現在は、長時間の運用では磁場の減衰が大きいことから改善を図ることとしている。

2.2.3 超電導機器用冷凍システムの開発

超電導機器を運用する場合には、極低温状態を保持するための冷凍システムが必須である。現在は、将来的に高温超電導線材の活用が主流になることを見越して、50Kレベルの冷凍システムの開発を中心に行っている。

極低温用の冷凍機にはいくつかの種類があるが、低温領域で可動部が少ないパルス管冷凍機の開発を行っている。大型の超電導機器では、一箇所に冷凍機を配置することは効率的ではないと考えられることから、複数の冷凍機を配置することで効率良く冷却できるか検討している。2台の冷凍機の運転モードを変化させた場合の冷凍能力について、最適なモードを見出すことに成功している。

さらに、新しい冷凍システムとして磁気冷凍にも取り組んでいる。原理等は後述するが、理論的には大幅な効率向上が期待できるシステムである。

2.3 地上コイル

リニアモータを構成する要素の一つが地上コイルであり、在来方式鉄道にはない超電導リニア固有の機器である。地上コイルは路線全線に敷設され長期間屋外で課電して使用される電気機器であることから、高い信頼性・耐久性のほかに、コスト低減やメンテナンス性が求められる。現在、地上コイルの診断・保守管理手法、性能評

価手法ならびに低コスト化につながるPLGコイルに関する研究を中心に行っている。

### 2.3.1 診断・保守管理手法

地上コイルの内部欠陥を検出する手法として、UHF帯の電磁波を検出するセンサを用いて欠陥に起因して発生する部分放電現象をとらえる手法を開発中である。また、一個のプロープに複数の振動子を備えたフェーズドアレイ超音波探傷法を適用することにより、地上コイルの内部構造を連続的に把握することが可能となった。出荷検査等に有効活用できる見通しを得ている。

また、地上コイルの異状を自己診断するセンサの開発を行っている。地上コイルに通電される駆動用電流を非接触集電することにより電源を確保し、MEMSセンサや無線モジュールの制御を自ら行い、異状データを送信するシステムの検討を進めている。さらに、沿線に膨大な数が敷設される地上コイルを効率的に管理する手法としてICタグを用いた手法<sup>7)</sup>を開発している。それぞれの地上コイルに保守に必要な情報が入力されたICタグが取り付けられ、保守用車から読み取り可能なシステムを目指している。詳細は本号の「RFIDを利用した車載型地上コイル保守支援装置の開発」を参考にされたい。

### 2.3.2 性能評価手法

地上コイルの耐久性や性能を評価する手法の開発の一環として、巻線コイルを一体成形するために用いるエポキシ樹脂の曲げ疲労試験を実施し、疲労強度における周波数依存性を評価している。長期間屋外で暴露され、さらに課電された状態で使用される樹脂の疲労評価はあまり行われていない。試験の結果、疲労強度に対して周波数依存性は顕著ではないことを確認した。

また、車両通過時に電磁力を受ける推進系地上コイルのケーブル接続部の加振試験を進めている。実際に模擬した振動を与える試験装置により、ケーブル加振部の動的挙動や接続部界面の面圧挙動を把握している。

さらに、図2のような地上コイルの締結部の耐振性向上のためにFRPブッシュを開発した<sup>8)</sup>。地上コイルは前述のように巻線コイルを樹脂で一体成形しており、樹脂をボルト締結しようとするとき圧縮変形による軸力低下を起因とした緩みが問題となり、それは保守点検コストの増大につながる。開発したブッシュは、圧縮変形を低減しつつ地上コイル用モールド樹脂との界面の応力集中の緩和を可能とした。振動試験を実施し、動的耐久性においても優位性を確認している。

### 2.3.3 PLGコイルの開発

地上コイルの更なるコスト低減を目指して、同一のコイルで推進・浮上・案内を兼用したPLG方式(Combined Propulsion, Levitation and Guidance system)について研究を進めている。原理検証等は既に終了しており、き電特性の検討や低渦電流損失線材の適用等を実施した。低

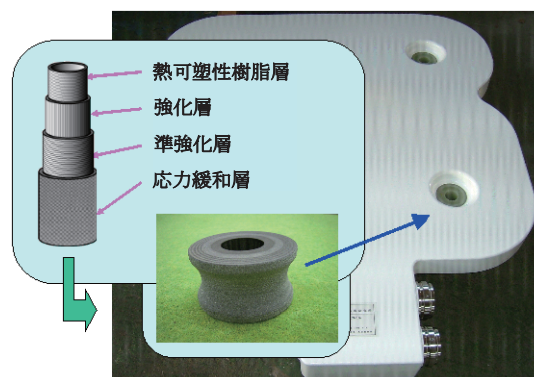


図2 積層型FRPブッシュ

渦電流損失線材を適用することにより、従来の素線分割方式と比較して1/3～1/5まで渦電流損を低減できる見通しを得た<sup>9)</sup>。今後は、本システムの最終段階として敷設施工性の検証を行うこととしている。

## 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。特に超電導に関しては、高性能な高温超電導線材の量産化、スマートグリッドなどへの超電導送電の導入などの話題もあり、種々の産業分野への展開が進むことが期待されている。その概要を紹介する。

### 3.1 超電導フライホイールの開発

電気鉄道の分野では、更なる省エネを進めるために電気機器の効率向上や回生失効対策が進められている。その中でも、エネルギー蓄電は地上、車上問わず求められており、フライホイール蓄電装置もその中に位置づけられている。

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。試験では2000kgのフライホイールを3600rpmで回転させることに成功した。フライホイールの形状を変えることにより目標の蓄積エネルギーである36MJを達成できる可能性も確認した。

さらに、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を製作し、完全非接触の状態での回転体を支持できることを確認した<sup>10)</sup>。今後、実用規模の超電導磁気軸受の開発とそれを適用した蓄電装置の基本仕様の作成を目指す。詳細は、本号「冷凍機冷却型超電導フライホイール用試験装置の開発」を参考にされたい。

## 特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

## 3.2 リニアモータ制御によるレールブレーキ

在来方式鉄道の更なる高速化のためには、気象条件などに左右されない安定したブレーキ力が必要とされている。渦電流型レールブレーキは非接触かつ高速域でも安定したブレーキ力が得られる一方、レール発熱の課題などのため日本国内では路面電車等での採用実績はあるものの普及していない。そこで、リニアモータ技術を応用することで、レール発熱の低減と主回路に依存しない独立した制動動作が可能となるレールブレーキを開発した<sup>11)</sup>。模擬試験により台車あたり12kNのブレーキ力と最大50%のレール発熱低減効果と制御電源のみによる独立した制動制御を実証した。また、このレールブレーキはブレーキ動作時に磁気吸引による上下力が発生する。実験により台車あたり2~4トンの軸重増加が期待でき、粘着力向上にも寄与できると考えている。今後は、台車搭載可能な開発を行い、鉄道総研構内での走行試験を計画している。詳細は本号「軌条輪を用いたリニアモータ型レールブレーキの性能試験」を参照いただきたい。

## 3.3 その他の応用

## 3.3.1 SQUIDによるレール探傷技術の開発

鉄道用レールには、白色層と呼ばれる効果層が発生することがある。白色層はレール頭頂面の剥離やレールシェリングの原因となることがあるが連続した測定方法が確立していない。そこで、SQUIDと呼ばれる高感度磁気センサを用いた連続検査システムの開発を行っている。白色層が測定できることを確認し、屋外用レール検査装置を製作した。今後、耐ノイズ性の向上を図り深度化を図る予定としている。

## 3.3.2 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<sup>12)</sup>。

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。磁気作業物質に対して強い磁場を効率的に作用させるような磁気回転型冷凍試験機を製作し、解析と合わせて評価を行っているところである。

## 3.3.3 電磁誘導を利用したベアリングレスモータ

2.3.3項で述べたPLGコイルシステムの原理を応用したベアリングレスモータの開発を行っている。従来のベアリングレスモータはいずれもアクティブ制御により実現する機構のものであり、5軸制御を行うためにインバータを5台必要とする複雑なものがほとんどである。開発中のモータは磁気軸受を制御する必要がないため、簡素で信頼性が高く、かつ、低コストの構成ができる可

能性がある。詳細は、本号「電磁誘導原理を利用したベアリングレスモータの電磁力特性」を参考にされたい。

## 4. おわりに

超電導リニアは、その実用化に向けて技術的な検証、整備方式の審議など着実に夢が現実のものに近づいている。その中で、鉄道総研は国土交通省超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会の提言を受けて、更なる信頼性の向上やコスト低減などを目指した基礎研究を継続して行っているところである。

また、在来方式鉄道への関連技術の応用に関しても、まだまだ発展途上ではあるものの技術の芽が出て育ちつつあるものと確信している。今後とも超電導リニアで培った技術開発を幅広く活用していくことも視野に入れながら、技術開発のポテンシャルを高めていきたい。

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) [http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/s304\\_sinkansen01.html](http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/s304_sinkansen01.html)
- 2) <http://jr-central.co.jp/news/release/nws000625.html>
- 3) [http://www.mlit.go.jp/report/press/tetsudo07\\_hh\\_000020.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/tetsudo07_hh_000020.html)
- 4) 脇耕一郎他:超電導磁石の構造力学解析,第80回低温工学・超電導学会講演概要集, p.174, 2009
- 5) Y. Tanaka et. al., "Experimental investigation of optical fiber temperature sensors at cryogenic temperature and in high magnetic fields", Physica C, Vol. 470, Issue 20, pp.1890-1894, 2010.
- 6) 小方正文他:希土類系高温超電導線材の浮上式鉄道用磁石への適用性評価,鉄道総研報告, Vol.24, No.1, pp.5-10, 2010
- 7) 鈴木正夫他:ITを活用した地上コイル保守管理手法の開発,鉄道総研報告, Vol.24, No.1, pp17-22, 2010
- 8) 鈴木正夫他:地上コイル耐振性締結部の開発,第13回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp265-266, 2006
- 9) 鈴木正夫他: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,第17回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp157-158, 2010
- 10) Y. Arai et. al., "Levitation properties of superconducting magnetic bearings using superconducting coils and bulk superconductors", Supercond. Sci. Technol., Vol. 23, No.115011., 2010.
- 11) 坂本泰明他:リニアモータ型レールブレーキの等価回路による特性評価,鉄道総研報告, Vol.24, No.1, pp23-28, 2010
- 12) 脇耕一郎他:ハルバツハ配列を用いた室温磁気冷凍機用磁気回路の設計と製作,第82回低温工学・超電導学会講演概要集, p.99, 2010