

浮上式鉄道の技術開発と在来方式鉄道への応用

高橋 潔*

R & D on Superconducting Maglev and New Applicable Attempts on Conventional Railway System

Kiyoshi TAKAHASHI

Eleven years have passed since test operations commenced at the Yamanashi Maglev Test Line, and running tests have been smoothly ongoing as scheduled. The Maglev Technology Practicality Evaluation Committee already acknowledged in March 2005 that the key technology has been established for commercial services with Superconducting Maglev System. Japanese Government approved alteration of the master plan for further development of the foregoing system in January 2007, and authorized for the extension and renewal of the current test facility. This paper introduces recent researches, as conducted at Railway Technical Research Institute for reliability and durability improvement on major components of the Superconducting Maglev System such as ground coils and superconducting magnets. In addition, we have introduced several attempts in which superconducting and linear motor technology applicable to new applications on the conventional railway system.

キーワード：浮上式鉄道，超電導リニア，山梨実験線，超電導技術応用

1. はじめに

宮崎実験線を引き継ぐ超電導磁気浮上式鉄道（以下：超電導リニア）の技術開発として、山梨実験線プロジェクトは1990年にスタートした。振り返れば日本経済のバブル期と奇しくも重なり、現在まで18年が経過した。この間の山梨実験線における超電導リニアの技術開発を集約すると、鉄道総研と東海旅客鉄道株式会社（以下：JR東海）が共同で実施してきた8年間の技術開発成果に対して^{1) 2)}、2004年度末に超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会（国土交通省主催，以下：評価委員会）から『技術開発は大きく前進し、超電導磁気浮上式鉄道について実用化の基盤技術が確立したと判断できる』との総合技術評価を受けた。その後も山梨実験線では長期耐久性検証等の走行試験が続けられており、走行試験開始以来11年が経過して現在に至っている。

一方、JR東海が建設費を負担して山梨実験線の一般区間（未施工区間）の建設と既存設備の更新を行うことを表明したことを受けて、2007年1月に山梨実験線の延伸および更新に関する「超電導磁気浮上式鉄道技術開発基本計画」と「超電導磁気浮上式鉄道山梨実験線建設計画」それぞれの変更が、国土交通大臣から事業三者（鉄道総研、JR東海、鉄道・運輸機構）に対して承認された。これで、1990年当時に計画した山梨実験線の規模

（42.8km）の実現と更なる実用化に向けた技術開発が進められることとなった。

今回の延伸・更新計画では、既設区間の両端を建設して当初計画の42.8km規模の走行区間を完成させ、同時に既設区間設備も最新の技術開発を反映させた設備に更新する。建設終了後の全線を使った走行試験は2014年度から3年間で予定されている。

また、建設と並行して進められる技術開発の課題は次の3点である。

- ① 更なる長期耐久性の検証
- ② メンテナンスを含めた更なるコスト低減
- ③ 営業線適用に向けた設備仕様の検討

現行設備（基盤技術レベル）に関する長期耐久性の検証については、建設工程との兼ね合いとなるが、今後も走行試験は可能な限り継続される計画である。コスト低減に向けた技術開発については、超電導磁石、地上コイルや電力変換器等全ての技術開発要素に関して進められる。営業線設備仕様の検討では、長大編成車両による高速走行の確認、環境対策設備の仕様や保守体系等の確立に向けた試験が計画されることになる。

2. 浮上式鉄道の基礎研究

鉄道総研では2005年度以降、国立研究所にて超電導リニアに関する基礎研究を続けている³⁾。その主なものは超電導磁石や地上コイルに関した信頼性向上、耐久性評

* 浮上式鉄道技術研究部 部長

特集：浮上式鉄道技術とその応用

価やコスト低減技術に関する研究である。また、今後超電導磁石や地上コイルに関する保全技術の開発にも力を入れる考えであり、詳細を以下に説明する。

2.1 超電導磁石

超電導リニアの基幹装置の超電導磁石は、超電導コイルを内包した4磁極分の内槽容器を真空容器の外槽で覆った構造をしている。外槽内部の補修は容易に行えず、基本的に超電導磁石には高い信頼性が要求される。超電導磁石に関する性能評価では、極低温における基礎現象の解明⁴⁾、耐振性能の評価手法、非破壊診断手法の開発や信頼設計に寄与する要素技術の開発を通して超電導磁石の性能向上を目指している。

2.1.1 信頼性・耐久性の向上

走行中の超電導磁石は推進コイルや浮上コイルからの電磁力により絶えず振動に晒されており、営業線使用条件下で15年相当の耐久性が要求される。この振動環境に対する超電導磁石の耐久性能を検証するために、走行試験の実績を補完する手段として、機械加振法により加速試験を行う耐久性試験方法を開発した⁵⁾。山梨実験線で走行試験に供した超電導磁石を使って、耐用年数期間の走行を効率よく評価するための加振方法の改良を進めている。

信頼性向上に向けた要素技術開発として、高温超電導を応用した電流リードの開発を進めている。超電導磁石には、極低温状態のコイルを励磁や消磁する際に常温空間にある外部電源と接続するためのケーブル(電流リード)が必要となる。この電流リードには熱侵入と通電時のジュール発熱が共に少ない特性が求められる。高温超電導材の特性を生かし、現在の電流リード構造の大幅な簡素化を目指した取り組みを進めている⁶⁾。

2.1.2 コスト低減に向けて

超電導磁石のコスト低減に向けた取り組みについて紹介する。現在の超電導磁石にはニオブ・チタンのコイル線材が用いられ、超電導コイルは内部で液体ヘリウムに漬けられて4.2K(約-269°C)の温度で超電導状態を維持している。超電導磁石内部は低温容器として複雑な構造をしており、高温超電導線材でコイルが構成できれば、冷却方式等の簡素化を通じて超電導磁石の信頼性の向上や製造コストの低減が期待される⁷⁾。

酸化物超電導体が発見されてから20年が経過し、この間様々な高温超電導物質が発見され研究が進められているが、現在最も有望視され実用化研究が精力的に進められているのが希土類系(RE系)高温超電導線材である。

超電導磁石へこのような酸化物超電導体を応用する場合には、磁界中での臨界電流密度(Jc)が優れている必要がある。線材開発状況においてはビスマス(Bi)系線材が先行しているが、RE系線材によるJc性能の向上と

長尺化の開発が急展開で進んでいる。そこで、RE系線材を使用した超電導磁石の製作技術の研究を開始した。詳細は本号の「高温超電導線材通電特性試験装置の開発」で紹介するが、線材の温度、印加磁場等を変えながら臨界電流密度Jcを測定可能な試験装置を開発し、現時点で入手可能なRE系線材の磁場中の臨界電流特性等を取得した。この基礎データを基にレーストラック型小型超電導コイル(短軸外径175mm×長軸外径325mm)を試作し、超電導磁石の構成方法の研究を進めている。

2.2 地上コイル

リニアモータを構成する地上コイルは本システムに於けるもう一つの特徴的な設備である。地上コイルはガイドウェイ全線に敷設され長期屋外使用される設備のため、信頼性・耐久性の要求仕様は厳しく、且つコスト低減の必要性も高い設備である。

2.2.1 信頼性・耐久性の向上

営業線レベルでは30年以上の安定使用可能なコイル開発を目指しており、モールド樹脂材料の特性取得から手がけて、地上コイル性能評価手法の研究を進めている⁸⁾。

地上コイルは鉄心を持たない空芯コイルであるため、車上の超電導磁石との間に作用する電磁力を保持するために巻線コイルをモールド樹脂で一体成形されている。従って、樹脂材料は電気絶縁機能と同時にリニアモータの推進力や浮上力を支える機械的性能を兼ね備える必要がある。このような用途は非常に特殊であり、樹脂に対する機械的性能の定量的評価方法が確立していない状況にある。

そこで推進コイルのエポキシ樹脂の耐疲労性の評価を行う必要性から、エポキシ樹脂の強度評価の基礎となるS-N線図データや、累積損傷予測の推定方法に関する基礎データを取得してきた。

一方、実機コイルを使った耐久性評価や経時変化調査を行う必要があるため、長期屋外課通電試験装置、地上コイル用電磁加振試験装置⁹⁾や促進耐候性試験装置などの独自の試験・評価装置を開発し、実機コイルをそのまま使用して加速試験環境下で総合評価を行うことを目指している。

2.2.2 コスト低減に向けて

山梨実験線の地上コイルシステムは、超電導磁石の熱侵入問題への配慮から電磁力の高調波成分を極力低減する目的で、推進コイルは二層構造を、浮上コイルはピッチを小さくしたコイルを採用して三層に重ねた複雑な構造となっている。走行試験結果から、超電導磁石の安定性が十分実証されたので、二層配置としていた推進コイルは従来の1/2に小型化したコイルを単層に配置し、浮上コイルと合わせて二層化とすることにより、製造コストと取り付けコストの大幅な削減が可能となる見通しと

なった。

地上コイル構成の簡素化を更に進める目的で、鉄道総研では同一のコイルにて推進、浮上、案内を機能させる推進・浮上・案内兼用方式 (PLG方式:combined Propulsion, Levitation and Guidance system) についての研究を進めている¹⁰⁾。このコイルシステムについては、超電導磁石の安定性が前提となるのは同様であるが、宮崎実験線当時に既に原理確認が行われ、山梨実験線に一部仮設して走行試験によって発生する電磁力特性の検証も済んでいる。現在では、高耐圧化に対応した耐衝撃性や絶縁性能の向上に関する研究を進めている。

2.3 車両運動解析と乗り心地評価

超電導リニアの車両構成は、車両断面の縮小と低重心化のため連接台車方式が採用され、また電磁誘導による磁気ばね (1次ばね) により台車が非接触支持される点で、在来鉄道車両と異なる特徴を有している。このためリニア車両の運動解析は、誘導反発式磁気ばね特性の把握に加えて、リニア車両の車体や台車の動特性を評価するために必要な技術である¹¹⁾。

現行システムの基本仕様である地上～車上間の空隙設定に際しても、異常時の車両運動解析を基礎に検討された。山梨実験線では最大5両編成までの走行試験が行われたが、営業線では長大編成車両の運用が必要となるため、編成が長大化した場合の車両運動解析を深度化する研究を継続している。

また、超電導リニアで採用する誘導反発磁気浮上では、1次支持系に減衰要素が殆どないため台車の振動が減衰しにくい。且つ車体が軽量化されているため、従来の鉄道車両では見られなかった車体の高周波振動が顕在化してきている。このような車体の高周波振動は、軽量車体にとって乗り心地に大きな影響を与えることが懸念されてきており、従来から用いている乗り心地評価方法の修正も視野に入れた研究を進めている。

3. 在来方式鉄道への応用研究

鉄道総研では超電導技術やリニアモータ技術をベースに、超電導リニアの枠を越えた研究分野への取り組みを始めている。次に2005年度より開始した「在来方式鉄道へのリニア技術の適用」のテーマについて¹²⁾、その概要を紹介する。

3.1 フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受

地球環境問題の深刻化や世界規模の原油価格の高騰などを背景に、省エネやエネルギーの有効活用の取り組みが益々重要となっている。電気鉄道はエネルギー効率や温室効果ガス排出抑制の面で、既にその優位性は他の輸送機

関を圧倒しているが、電気鉄道における回生エネルギーの利用やピークカット対策等、更なる省エネ施策を進めるためには高密度なエネルギー蓄積媒体が必要である。

一般に、エネルギー蓄積媒体には高性能二次電池、電気二重層キャパシタ、フライホイールやSMES (超電導磁気エネルギー貯蔵) などが挙げられるが、単位重量当たりの蓄積エネルギー量と出力電力の大きさのバランスにおいて、フライホイールは着目すべき特長を有している。

一方、超電導を利用する電力貯蔵方式の一つに、フライホイールの軸受けに超電導磁気軸受けを使用する電力貯蔵用フライホイールの開発が国家プロジェクトとして進められてきた¹³⁾。鉄道総研においても、超電導技術を駆使して電力貯蔵用フライホイールを目的とする独自の超電導磁気軸受けの開発に取り組むこととした。

フライホイールでは低回転損失の実現が重要である。これまでの超電導磁気軸受けでは、非接触回転支持に永久磁石と超電導バルク体の組み合わせを用いるため、永久磁石の性能により実現できる載荷力密度には限界があった。そこで、さらに大きな載荷力の実現を目指して、我々は超電導バルク体と超電導コイルの組み合わせによる独自の超電導磁気軸受けを提案している。この超電導磁気軸受けが成立すれば、小型で高効率なフライホイール蓄電システムが実現できると考えている。詳細は本号の「フライホイール用高温超電導バルク体磁気軸受の基礎検討」を参照されたい。

3.2 SQUIDによる検査技術

超電導技術の応用として、高感度な磁気センサであるSQUID (超電導量子干渉計) を鉄道分野の非破壊検査に活用することを目指している。SQUIDは他の磁気センサに比べて測定精度が非常に高いのが特長であり、その特性を活かす鉄道分野の検査対象を検討した結果、未だ検出方法が確立されていないレール表面に発生する白色層の検出を目標として研究を進めることとした。

レール頭頂面には、車輪の空転や滑走等に伴って車輪／レール間のすべりにより発生する摩擦発熱の影響で白色層と呼ばれる熱変態組織が形成される場合がある。この白色層をき裂の起点とするレールシェリングが発生することが報告されており、白色層の厚さが20～30 μmを越えると、き裂の進展が速まる傾向がある¹⁴⁾。従って、白色層の早期検出が可能となれば、レール損傷の未然防止に寄与できると考えている。

SQUIDを使ってレールのような磁性体を測定する場合は直流成分の残留磁場の影響を受け易く、その影響の回避や耐ノイズ対策等を含めた測定手法や信号処理に工夫が必要となる。ノイズ除去の補償回路等を用いることにより、実験室の環境下であるが、昨年ようやく実際のレール頭頂面に形成された白色層の検出が可能となっ

特集：浮上式鉄道技術とその応用

た。現在では、信号処理の補償回路にさらに改良を加えて、屋外環境下で使用可能な白色層測定システムの構築を目指している。

感度が高すぎて扱いにくいという特徴を持った磁気センサーであるが、信号処理技術を駆使してこの扱いにくさを克服すれば、高感度を生かした新たな精密測定分野への展開が可能となる。その一例として超電導磁石の内部欠陥検出に応用することも視野に入れて研究を進めている。

3.3 リニアモータ制御によるレールブレーキ

リニアモータ技術を応用する分野として、過去にも研究実績のあるレールブレーキを研究対象とすることとした。レールブレーキの主要な方式である直流渦電流方式では、ブレーキ動作時の渦電流発熱によりレールの温度上昇を招くため日本では実用に至っていないが、ドイツのICE3では夏期の一部使用制限はあるものの、既に実用運転に供されており、非粘着ブレーキとして高速域で良好な特性を発揮している。この直流渦電流方式の欠点であるレールの温度上昇問題を解決できれば、レールブレーキも新たな非粘着ブレーキ装置としてその活用が期待される。

従来は直流で励磁していた車上の電機子を交流励磁し、レールを二次導体としたリニアインダクションモータ(LIM)を構成すると、電機子への交番電流を制御してレール発熱として捨てていた車両の運動エネルギーの一部を電力回生させることが出来るようになる。従って、このLIM方式によれば、レール発熱を抑えて所定のブレーキ性能を発揮するレールブレーキを構成できる可能性があり実現を目指している。詳細は本号の「リニア技術を適用した交流励磁レールブレーキの基礎特性」を参照されたい。

4. まとめ

長年の超電導リニアの技術開発は、2005年3月の評価委員会で“超電導リニア技術の基盤技術は確立した”との評価を受けたことで大きく前進し、さらに2007年には、山梨実験線建設計画で当初計画された規模への実験線の延長と、今後の技術開発を反映させた「超電導磁気浮上式鉄道技術開発基本計画」の変更が承認され、実用化レベルの技術検証に向けて新たな展開に入っている。

鉄道総研では2005年以降主として超電導リニアシステムに固有な超電導磁石と地上コイルを対象として、さ

らなる信頼性向上やコスト低減等を目指した基礎研究に取り組んできた。また、将来の営業線設備において重要なテーマとなる検査・診断技術の研究開発にも今後力を入れていく考えである。

一方、研究を開始して3年が経つ在来鉄道への応用テーマにおいては、独自の試験装置等を考案しながら目標とする機能の実現性についてそれぞれ原理検証を進めている。極力早い時期に実用化イメージの提案に繋がりたいと考えている。

尚、鉄道総研が行う超電導リニアの技術開発は、一部国庫補助を受けて進めている。

文献

- 1) 秋田雄志:浮上式鉄道の開発と現況, 鉄道総研報告, Vol.17, No.5, pp.1~4, 2003
- 2) 高橋潔:浮上式鉄道の技術開発状況と展望, 鉄道総研報告, Vol.19, No.6, pp.1~4, 2005
- 3) 高橋潔:浮上式鉄道開発の現況と展望, 鉄道総研報告, Vol.20, No.8, pp.1~4, 2006
- 4) 清野寛:超電導コイルの摩擦発熱の現象解明とその抑制, 鉄道総研報告, Vol.20, No.8, pp.5~10, 2006
- 5) 井上明彦 他:超電導磁石の耐久性検証, 鉄道総研報告, Vol.19, No.6, pp.15~18, 2005
- 6) 小方正文 他:超電導磁石への高温超電導バルク体電流リードの適用, 鉄道総研報告, Vol.20, No.8, pp.11~16, 2006
- 7) 五十嵐基仁 他:永久電流高温超電導マグネットの開発, 低温工学誌, Vol.39, No.12, pp.651~658, 2004
- 8) 鈴木正夫:地上コイル用モールド樹脂の環境劣化特性, 鉄道総研報告, Vol.20, No.8, pp.23~28, 2006
- 9) 田中実 他:地上コイル耐久性評価用電磁加振試験装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.20, No.8, pp.17~22, 2006
- 10) 饗庭雅之 他:推進・浮上・案内兼用地上コイルの耐久性検証, 鉄道総研報告, Vol.19, No.6, pp.19~24, 2005
- 11) 吉岡博 他:山梨実験線車両MLX01の車両運動特性, 鉄道総研報告, Vol.12, No.8, pp.21~26, 1998
- 12) 岩松勝:在来方式鉄道へのリニア技術の応用の取組み, 鉄道総研報告, Vol.20, No.8, pp.33~36, 2006
- 13) http://www.istec.or.jp/Web21/PDF/Past-pdf/J-pdf/05_05_all.pdf
- 14) 金鷹 他:レール表面に生じる白色層の実態分析, 鉄道総研報告, Vol.19, No.9, pp.17~22, 2005