

特集：浮上式鉄道技術と関連技術の在来方式鉄道への応用

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* 笹川 卓**

Research and Development of Maglev and Application of Related Technologies to Conventional Railways

Ken NAGASHIMA Takashi SASAKAWA

Regarding the development of fundamental technology for maglev and the application of the maglev technology to the conventional railway system, here are some of the development results within RTRI. Besides, regarding the utilization of maglev for the future, the information reported at WCRR2019 and other latest information inside and outside Japan are introduced.

キーワード：浮上式鉄道，在来方式鉄道，高温超電導磁石，地上コイル，状態監視，レールブレーキ

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道の技術開発は、1990年の運輸大臣通達（当時）に基づき、東海旅客鉄道株式会社（以下、JR東海）と鉄道総研が共同で作成した「超電導磁気浮上式鉄道技術開発基本計画」にもとづいて推進されてきた。

2020年度からスタートした鉄道総研の「基本計画－鉄道の未来を創る研究開発－RESEARCH2025」¹⁾にも、「浮上式鉄道の研究開発は、引き続き超電導、リニアモータなどの技術を在来方式鉄道に応用することを軸に研究活動を行い、あわせて必要な技術力を維持するための研究開発を基礎研究として行う。」と記載されている。

以下では、最近の鉄道総研の研究開発活動を含む世界における浮上式鉄道に関する研究開発の動向と、鉄道総研における関連技術の在来方式鉄道への応用開発について述べる。

2. 最近の浮上式鉄道関連の研究動向

2.1 世界鉄道研究会議（WCRR）における発表

鉄道総研は2019年10月20日から5日間にわたり、東京国際フォーラムにて第12回世界鉄道研究会議WCRR2019を開催した²⁾。WCRRは世界の鉄道技術開発状況を概観し、今後進むべき方向性について議論することを目的として設立された。鉄道研究に関する国際会議として世界最大の規模を誇るもので、今回は20年ぶりの日本開催となり、海外37か国から424人、日本から569人が参加した。詳細は鉄道総研の機関紙Ascentに掲載されているが³⁾、この中で、浮上式鉄道関連の発表は8つ開催されたオーガナイズドセッションの一つ“Maglev and Other Fixed Guideway Transport”とインタラクティ

ブポスターセッション“Maglev and Rolling Stock”の中で発表された。この内容を以下で簡単に紹介する。

2.1.1 オーガナイズドセッション“Maglev and Other Fixed Guideway Transport”

本セッションでは筆者が座長を務めた。そこで、日本の浮上式鉄道関連の状況を概観する講演として日本から2人、浮上式鉄道への高温超電導体の適用に関する講演としてドイツから1人、昨今話題となっているハイパーloopに関する講演としてスペインから1人の講演者を招聘した。ハイパーloopは米国の実業家イーロン・マスク氏の提唱ではじまった高速輸送システム構想であり、最高速度1200km/hを目指して走行抵抗低減のため真空（または減圧）チューブ内を走行するものである。このシステムを開発している企業は複数ある。

セッションの冒頭で行われた「日本のリニアモータ駆動都市交通“Linear Motor Powered Urban Transportation in Japan”」と題する東京大学大崎教授による講演では、日本の中低速浮上式鉄道であるリニモ（愛知高速交通東部丘陵線）と、浮上式鉄道ではないがリニアモータを用いたリニアメトロの技術と商用運転の結果がレビューされた。これらリニアモータ駆動の都市交通システムは、良好な運用・経済性、環境への配慮、乗り心地等のメリットがあるとされた。今後の少子高齢化、地球環境問題などの問題を考慮すると、これらシステムの更なる改善、世界におけるシステムの普及と促進等に積極的に取り組むことが重要であることが述べられた⁴⁾。

「超電導リニアによる中央新幹線の進展“Progress of the Superconducting Maglev Chuo Shinkansen”」と題するJR東海北野氏による講演では、超電導磁気浮上式鉄道（超電導リニア）による中央新幹線プロジェクトの進展、建設の進捗状況、高温超電導マグネットの長期耐久性検証、車上電源のためのワイヤレス給電システム、乗客の快適

* 浮上式鉄道技術研究部長

** 浮上式鉄道技術研究部 上席研究員

性の追求, 新型車両の導入などの最新状況が報告された⁵⁾。

「高温超電導体を用いた浮上式鉄道による輸送」“Maglev Ground Transportation with High-Temperature Superconductors (HTS)” と題するドイツ ATZ 社の Werfel 氏による講演では、ドイツで開発され、上海で「上海磁浮」あるいは「上海トランスラピッド」として実用化された常電導磁気浮上式鉄道トランスラピッドと日本の超電導磁気浮上式鉄道の 2 種類についての技術的な考察が述べられた。また、浮上式鉄道において低温超電導磁石を高温超電導磁石に置き換えることのメリットと開発課題、JR 東海で開発した Bi2223 高温超電導線材を用いた高温超電導磁石や、鉄道総研で開発中の REBCO (希土類系) 高温超電導線材を用いた高温超電導磁石についての言及があった。

最後に、液体窒素で冷却した高温超電導バルク体を搭載したデモンストレーション車両が永久磁石を配置した軌道上を走行するシステムについての紹介があった。この方式では永久磁石軌道が発生する磁界を高温超電導バルク体が捕捉することで、車両の走行速度によらず安定に浮上できる。2000 年に中国の成都で初めて人間が搭乗する実験が行われた後、ドイツのドレスデンでは“SupraTrans”として、ブラジルのリオデジャネイロでは“Maglev Cobra”として同様のデモンストレーション実験が行われている。また、このシステムが減圧チューブの中を走行することによって、貨物の高速輸送を可能とするシステムの検討が中国で行われている。デモンストレーション実験の殆どで ATZ 社が設計した高温超電導バルク用真空容器が使われていることなどが述べられた⁶⁾。

「長距離移動のための真空管高速ハイパーラップ磁気浮上 (ハイパーラップ) 輸送システムの最適特性」“Optimal characteristics of an evacuated-tube high-speed Hyperloop maglev (hyperloop) transport system for long distance travel” では、複数あるハイパーラップ開発企業の一つであるスペインの Zeleros 社からの報告があった。この報告では他のハイパーラップ情報の例と同様に、システムの浮上推進の原理等については明らかにされなかった。しかし乗客の安全面やインフラのコスト面を考慮するとチューブ内の圧力は 10kPa (0.1 気圧) が適切であることが示された。また航空機や鉄道との比較で、ハイパーラップの消費エネルギー、目的地への到達時間等の予測が示された⁷⁾。

本セッションではこの他に鉄道総研の研究者から「すれ違い通信とウェイクアップ受信機を使用した超電導磁気浮上式鉄道の地上コイル状態監視システム」“Condition Monitoring System for Ground Coils of Superconducting Maglev using Opportunistic Communications and Wake-up Receivers” の発表があった。これは超電導磁気浮上式鉄道の膨大な数の地上コイルを、すれ違い通信を用いて効率的に評価する状態監視手法の開発と実験的検証を報告したものである⁸⁾。最後の 1 件も鉄道

総研の研究者からの発表で、「鉄道用フライホイール蓄電システムで大荷重を支持する超電導磁気軸受の開発」“Development of a Superconducting Magnetic Bearing Capable of Supporting Large Loads in a Flywheel Energy Storage System for Railway Applications” であったが、これは浮上式鉄道のために開発した高温超電導コイル技術に応用した蓄電システムに関する報告であった⁹⁾。

2. 1. 2 インタラクティブポスターセッション “Maglev and Rolling Stock”

本セッションでは減圧チューブ輸送に関して、中国から 2 件の発表があった。

「チューブ式超高速列車の空気力学に関する研究」“Study on aerodynamics of ultra-high-speed train for tube transportation” と題する中国鉄道科学研究院からの発表では、かならずしも浮上式鉄道とせず、典型的な高速鉄道車両を解析モデルとしていた。内容はチューブの断面形状、車両・トンネル断面積比、チューブ内圧力と空力抵抗の関係を数値解析で検討した結果であった¹⁰⁾。

「減圧チューブ内の高温超電導浮上式鉄道における発熱状況」“The Heat Generation Condition of High Temperature Superconducting Maglev in the Evacuated Tube” と題する中国中車からの発表は、浮上式鉄道がチューブ内を走行した場合のチューブ内および車両周囲の温度分布を数値解析で検討した結果についての報告であった。論文の中の車両およびガイドウェイの図は明らかに常電導磁気浮上式鉄道トランスラピッドタイプの構造に酷似しており、本文中にはタイトルにある高温超電導磁石についての説明が無いため詳細は不明であった¹¹⁾。

本セッションにおいて鉄道総研における高温超電導磁石の開発を報告する「浮上式鉄道向け希土類系線材を用いた高温超電導磁石の開発」“Development of High Temperature Superconducting Magnet Using REBCO Coated Conductor for the Maglev” の発表があったが、これについては後述する¹²⁾。

2. 2 中国の動向

世界で初めて 2002 年に上海で 430km/h の高速浮上式鉄道「上海磁浮」の営業を開始した中国ではその後、中低速浮上式鉄道としては 2016 年に「長沙磁浮快線」が、2017 年に「北京 S1 線」が営業を開始するなど、浮上式鉄道の実用化に積極的である。

最近では中国中車を中心として 600km/h の高速浮上式鉄道を開発する動きがある。これについては 2019 年には試験車両の完成が、2020 年の 6 月には試験車両の試運転の成功が報じられた。ただし、試運転の成功は浮上走行の確認に過ぎず 600km/h の確認ではなかった。報道された内容では軌道構造、車両形状から、システムは上海で実用化された常電導磁気浮上式鉄道トランスラピッドタイプと

思われるが、これに中国で独自の工夫を加えた永久磁石と電磁石を併用した磁気浮上方式である可能性がある。永久磁石の併用によりエネルギー消費量の削減や常電導電磁石の温度上昇の低減、軽量化を図るアイデアと見られる。

一方で中国中車と上海交通大により浮上式鉄道用の高温超電導磁石の開発も行われている。これは REBCO 線材を用いた高温超電導磁石であり、熱容量媒体として比熱の高い固体窒素 (SN₂) を用いて冷凍機無しで一定時間運用可能な磁石を目指しているところは鉄道総研の過去の開発例を参考にしていると考えられる¹³⁾。中国内にはその他にも中国航天科工集团公司 (CASIC) の最高速度 4000km/h を目指した浮上式鉄道の開発計画もある。超電導磁石と減圧チューブを適用する想定とのことである。この計画が、2.1.1 項で述べた Werfel 氏の講演における成都の研究開発とどういふ関係を持つのか詳細は不明である。

2020 年は定期的に開催されてきた MAGLEV 国際会議 (MAGLEV 2020) が中国長沙市で開催予定であったが、新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の影響で 2021 年に開催延期となった。この学会で中国の情勢が明らかになると思われる¹⁴⁾。

意外な影響としては、中国で COVID-19 のピークが過ぎた 4 月 17 日に浙江省政府が上海市から浙江省の省都の杭州市を經由して寧波と結ぶ浮上式鉄道の建設計画を発表したことがある。路線距離は 400 キロメートル程度であるが、新型コロナウイルスのために大きく落ち込んだ経済を巨額の投資でこ入れするものとされている。

3. 鉄道総研における浮上式鉄道の基礎研究と在来方式鉄道への応用研究

鉄道総研における浮上式鉄道の基礎研究と在来方式鉄道のイメージを図 1 に示す。超電導磁気浮上式鉄道の開発で培ってきた技術は、可能な限り図の矢印で示した在来方式鉄道に適用可能な技術に転換して行こうとしている。

3.1 浮上式鉄道の基礎研究

基礎研究において現在最も力を入れているのは、地上コイルの状態監視技術と高温超電導磁石の開発である。

地上コイルの状態監視に関しては、部分放電の検出技術の開発に注力している。浮上式鉄道の地上コイルには車両の浮上と案内に用いられる浮上・案内コイルと車両の推進に用いられる推進コイルの 2 種類があるが、車両の通過時に高電圧が印加される推進コイルは絶縁異常の兆候として部分放電という現象を生じるので、これに着目して効率的に絶縁診断する手法の検討及び検証を行っている。本号論文「車上からの地上コイルの部分放電検出手法」では、宮崎実験線における走行確認試験や展示車両を用いた検出試験の結果について報告している。

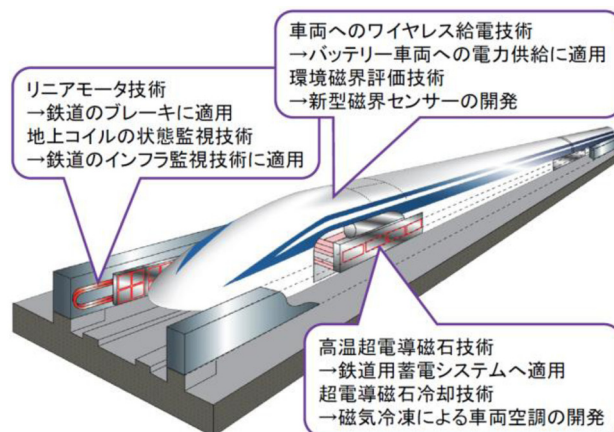


図 1 鉄道総研における浮上式鉄道の基礎研究と在来方式鉄道への応用研究のイメージ

高温超電導磁石については、前述のとおり中国でも浮上式鉄道向けの開発がはじまったようであるが、鉄道総研では、磁界中の高い臨界電流密度と低コスト化が期待される希土類系高温超電導線材に早い時期から注目し、この適用に関して集中的に研究開発を進めてきた。上述の中国の研究に先行して冷凍機なしで運用可能な高温超電導磁石の試作を行った¹⁵⁾後、超電導コイル巻線機を導入して開発を本格化した。その結果、巻線後のコイル成形に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。この技術を用いて実機と同等のサイズ、性能(起磁力)を有する高温超電導コイルを完成した。最近になりこのコイルを内蔵した超電導磁石を完成させ、本号論文「希土類系高温超電導磁石を用いた地上コイル電磁加振試験」にある地上コイルの電磁加振試験を実施した次第である。

3.2 在来方式鉄道への応用研究

応用研究としては「磁気熱量効果」という原理を使うヒートポンプの開発も進めている。この方式はある種の物質が磁場変化を受けたときに吸排熱する性質(磁気熱量効果)を利用するもので、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、高効率期待されるため、昨今世界的にも注目されている。この研究では磁界制御技術や冷凍技術等、浮上式鉄道の開発で培ってきた技術を適用している。既に鉄道総研発案の「円環状ハルバツハ式磁気回路」を内蔵した試作機を製作し、磁気ヒートポンプとしては現在国内最大能力である 1kW (室温下)を達成した。一方、実用的な空調技術としては冷凍能力だけでなく動作温度範囲を確保することも必要である。本号論文「車両空調への応用を目指した磁気ヒートポンプの動作温度範囲の拡大」では、磁気熱量効果のもととなる磁性材料の工夫により動作温度拡大を企図した実験結果について報告している。

リニアモータを加速ではなく減速の方に活用する方法も検討している。このリニアモータ型レールブレーキは、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特徴がある。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）で電力として回生できるので、レール側と車両側双方でエネルギーを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、停電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。

安全装置であるブレーキとして実用に供するにあたっては、基本的な機能と性能に加えて、不具合の有無などを自己診断するための状態監視方法を備えていることが求められる。特に電機子に関しては、レールとのギャップ（空隙）がどれだけあるかを知ることが重要である。本号論文「励磁用インバータによるリニアレールブレーキの状態監視方法」では特別な装置を追加せず、システムを構成するインバータを活用してギャップを推定する手法について報告している。

本号論文「低消費電力の無線技術を用いた地上設備状態監視システムの構築」は、浮上式鉄道の地上コイル状態監視に使える無線技術を、より広く鉄道インフラの状態基準保全（CBM）に役立てようという取り組みを報告したものである。労働人口の減少や新型コロナウイルスの感染拡大に伴い、省力化や効率化が求められている今後に有用な技術であると考えている。

本号論文「環境磁界測定を目的とした磁気光学プローブの試作および評価」は、直流磁界から交流磁界までの測定が可能で、環境磁界測定に有用な「ファラデー効果」を用いた磁気光学プローブの開発について報告している。この分野では2018年に、従来の40倍もの巨大ファラデー効果を示す磁気光学材料が見つかった¹⁶⁾ため、これらを適用すればさらなる性能向上が期待できる。

この他にも、図1に記載通り、高温超電導磁石技術を鉄道用フライホイール蓄電システムへ適用して鉄道の回生失効対策に役立てる取り組みや、ワイヤレス給電技術でバッテリー電車へ電力を供給し、バッテリー搭載量を削減する技術への取り組みを実施している。

4. おわりに

本稿では最近の浮上式鉄道関連の研究動向について、WCRR2019での発表内容と現在鉄道総研が進めている研究を中心に報告した。また、最近浮上式鉄道の研究開発が活発な中国の動向についても述べた。中国では様々な場所で異なる内容の研究が同時に進行しており、実際にどのようなことが起きているのか全貌を知るのは難しいが、今後ともできるだけ注視していきたい。

浮上式鉄道技術研究部は浮上式鉄道開発本部の解散を受けて発足したのが2005年であったので今年で16年目となる。2020年は我々の研究開発活動も新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の影響を受けているが、実施している研究開発の内容はこのような状況下でますます必要となるものと考えているので、今後とも着実に研究成果を積み上げていく所存である。

関係各位のご支援、ご協力をお願いしたい。

文 献

- 1) https://www.rtri.or.jp/rtri/rtri_J_research.html (参照日：2020年10月4日)
- 2) https://www.rtri.or.jp/press/is5fli000000dg5u-att/20191120_002.pdf (参照日：2020年10月4日)
- 3) T. Uzuka : "Summary of WCRR 2019," Ascent, 2020年4月号, No.7, p.5, 2020.
- 4) H. Ohsaki : "Linear Motor Powered Urban Transportation in Japan," WCRR 2019, OS 08 1, 2019.
- 5) J. Kitano : "Progress of the Superconducting Maglev Chuo Shinkansen," WCRR 2019, OS 08 2, 2019.
- 6) F. N. Werfel : "Maglev Ground Transportation with High-Temperature Superconductors (HTS)," WCRR 2019, OS 08 4, 2019.
- 7) F. Lluesma, A. Arguedas, J. Vicen : "Optimal characteristics of an evacuated-tube high-speed Hyperloop maglev (hyperloop) transport system for long distance travel," WCRR 2019, OS 08 5, 2019.
- 8) M. Tanaka, N. Takahashi, R. Ikeda, H. Yoda, M. Iwai : "Condition Monitoring System for Ground Coils of Superconducting Maglev using Opportunistic Communications and Wake-up Receivers," WCRR 2019, OS 08 3, 2019.
- 9) Y. Miyazaki, K. Mizuno, M. Ogata, T. Yamashita, K. Nagashima, K. Miyazaki, H. Shimizu, H. Tsubouchi, H. Teshima : "Development of a Superconducting Magnetic Bearing Capable of Supporting Large Loads in a Flywheel Energy Storage System for Railway Applications," WCRR 2019, OS 08 6, 2019.
- 10) H. Li, Y. Xuan, X. Fang, L. Sun : "Study on aerodynamics of ultra-high-speed train for tube transportation," WCRR 2019, IP 02 8, 2019.
- 11) Y. Tao, J. Liu : "The Heat Generation Condition of High Temperature Superconducting Maglev in the Evacuated Tube," WCRR 2019, IP 02 9, 2019.
- 12) K. Mizuno, M. Tanaka, M. Ogata : "Development of High Temperature Superconducting Magnet Using REBCO Coated Conductor for the Maglev," WCRR 2019, IP 02 10, 2019.
- 13) F. Dong, Z. Huang, L. Hao, X. Xu, Z. Jin, N. Shao : "An onboard 2G HTS magnets system with cooling-powerfree and persistent-current operation for ultrahigh speed superconducting maglevs," Scientific Reports, Vol. 9, No. 11844, 2019.
- 14) <http://www.maglev2020.com/> (参照日：2020年10月4日)
- 15) 小方正文, 水野克俊, 荒井有気, 長谷川均, 笹川卓, 長嶋賢 : 「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」鉄道総研報告, Vol.25, No.3 pp.12-16, 2011
- 16) N. Kobayashi, K. Ikeda, Bo Gu, S. Takahashi, H. Masumoto, S. Maekawa "Giant Faraday Rotation in Metal Fluoride Nanoparticles," Scientific Reports Vol. 8, No. 4978, 2018.