

## 特集 磁気浮上技術

### 超電導磁気浮上式鉄道(JR-Maglev)

#### Superconducting Magnetically Levitated Transport System(JR-Maglev)

高橋 潔<sup>\*1</sup>

Kiyoshi TAKAHASHI

Keywords: superconducting magnet, levitation, guidance, maglev.

#### 1 はじめに

浮上式鉄道の実用化を目指して、山梨実験線では1997年から走行試験が続けられている。超電導磁気浮上方式を利用するこのシステムは、地上を500km/hで疾走する将来の大量輸送機関を目指して40年以上に亘る技術開発が重ねられてきており、既に輸送システムとして技術上の完成域に達している。現在では連続走行試験(Fig. 1)によりシステムの信頼性・耐久性の確認と、実用線建設のためのコスト削減にむけた技術開発が進められている。電磁誘導浮上方式(Electrodynamic Suspension System: EDS)が本システムの大きな特徴であり、本稿ではその特性等について紹介する。



Fig. 1 Maglev train (MLX01).

#### 2 基本構成

超電導リニアの基本的なシステム構成を Fig. 2 に示す。車両編成は車両断面積を抑えるため連接台車方式を採用し、台車両側に超電導磁石を搭載する。U字形ガイドウェイの側壁にはリニアモーター用の推進コイル(二層)と浮上と案内を兼用する浮上案内コイルが三

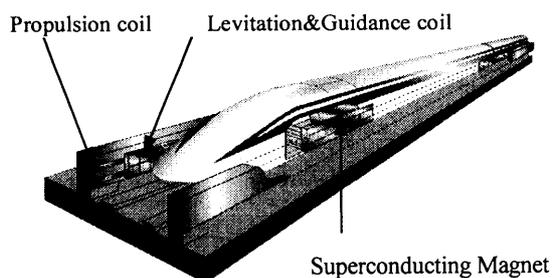


Fig. 2 Basic structure of JR-Maglev.

層構造で設置されている。車両は低速時には支持車輪タイヤで走行し、浮上開始以降は左右の浮上案内コイルと車上の超電導磁石間に働く電磁力によって安定した浮上走行が可能となる。

##### 2.1 超電導磁石

強力な磁場を発生する超電導磁石(Fig. 3)は、浮上案内コイルとの間でEDSを構成するとともに、推進コイルによりリニア同期モータを構成する車上の最重要装置である。この超電導磁石には、極ピッチ1.35mによる4極の超電導コイルが内装されている。超電導コイルはNbTi合金の超電導線材を使用し、起磁力は700kATである。

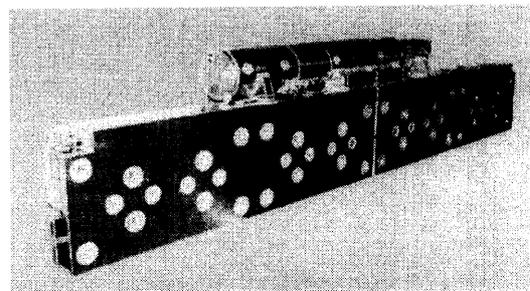


Fig. 3 Superconducting magnet.

連絡先: 高橋 潔, 〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38,  
(財) 鉄道総合技術研究所浮上式鉄道開発本部,  
e-mail: t-kiyosi@rtri.or.jp  
<sup>\*1</sup> 鉄道総合技術研究所

## 2.2 地上コイル

### 2.2.1 推進コイル

推進コイルは、セクション毎に設置されるき電区分開閉装置を介して変電所からの三相電源 U・V・W 各相に直列接続される。コイル配置については、超電導磁石に与える 3 次高調波を低減するため、240 度二層隔極配置(コイルピッチ 0.9m)方式が採用されている。推進コイルの構造(Fig. 4)は、電気用アルミニウム導体をレーストラック状に巻いたコイルをエポキシ樹脂でモールドし、接続ケーブルが嵌合できる口出し部が設けられている。

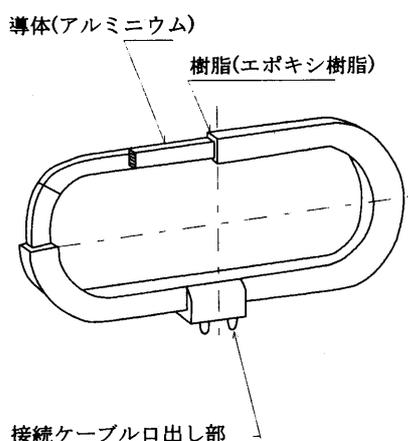


Fig. 4 Propulsion coil.

### 2.2.2 浮上案内コイル

浮上コイル導体は、アルミニウム巻線による上下の単位コイルを 8 字にヌルフラックス接続した構造を持ち、左右案内用ヌルフラックスケーブル用口出し部が設けられている。実際の浮上コイルはコイルピッチが 0.45m のため、2 つのコイルを一体成形して製作されている(Fig. 5)。

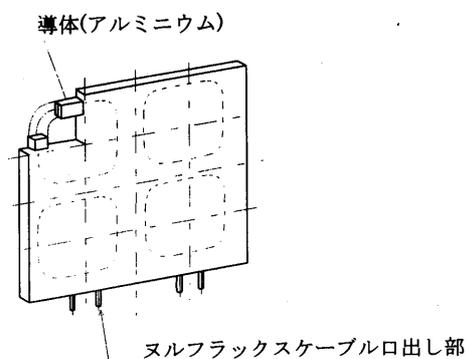


Fig. 5 Levitation coil.

## 3 浮上・案内兼用方式について[1]

Fig. 6 に浮上案内兼用方式のコイル配置とその接続方法の概念を示す。上下 2 段の各コイルを 8 字状にヌルフラックス接続して閉回路を構成したものが浮上コイルである。次に案内機能を実現するためにガイドウェイ内で相対する左右のコイルは上下を結ぶ点で左右間をヌルフラックス接続されて閉回路を構成する。Fig. 7 において、ガイドウェイ内で左右方向の変位のない中心位置で、且つ上下方向は超電導コイル中心と浮上コイル中心とが一致する高さを台車の基準位置とする。この基準位置から台車の鉛直方向の変位を上下変位、進行方向に対して横向きの変位を左右変位と呼ぶ。

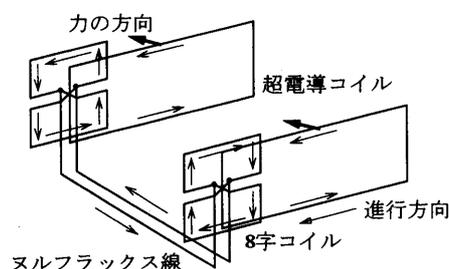


Fig. 6 Principle of levitation and guidance system.

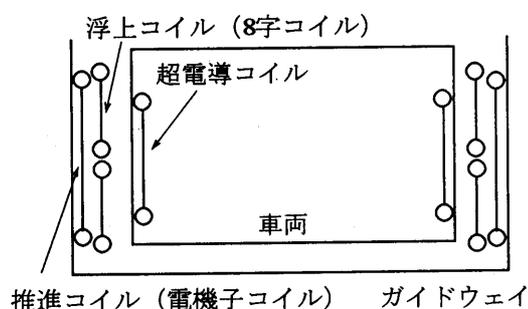


Fig. 7 Coil arrangement.

上述のようにコイル間はヌルフラックス接続されているため、台車が基準位置を走行する限り浮上コイルに電流は誘導されない。これにより車輪走行中は支持車輪の高さを調整し台車基準位置を維持しているため、走行抵抗の一部の磁気抗力が発生せず、走行に必要なエネルギーを抑制することができる。

浮上走行に遷移するには支持車輪を格納し、台車が車両重量により基準位置から下向きに沈み込むことになる。基準位置から上下変位が生じると 8 字の結線された上下単位コイルを鎖交する磁束が変化するため電

流が誘導され、超電導磁石に対して浮上力が発生する。この状態での浮上力発生の様子を Fig. 8 に示す。車両重量に均衡する浮上力が発生するまで台車は基準位置から下方変位して安定浮上状態となり、この時の基準位置からの変位を均衡変位と呼んでいる。

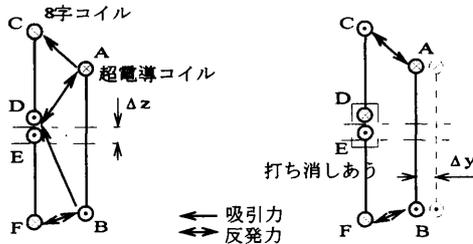


Fig. 8 Force directions generated from levitation and guidance circuits.

左右の案内力発生原理も浮上の場合と同様で、左右のコイル間がヌルフラックス接続されているため、台車が左右の基準位置を走行する限り電流は誘導されない。走行中に左右変位が生じるとヌルフラックス回路に案内電流が誘導され超電導磁石が近づいた側の浮上案内コイルからは基準位置へ押しもどす反発力が発生する(Fig. 8)。

4 浮上・案内特性[2]

山梨実験線で実際に得られている浮上特性について説明する。ここでいう浮上特性は、前述した下向きの均衡変位の速度特性を計測してまとめている。各走行速度毎に台車～ガイドウェイ間の上下変位を測定し、基準位置からの均衡変位として整理した結果を Fig. 9 に示す。同図は負担質量 20ton の台車のもので、実測値と計算値は良い一致を示し、計画通りの浮上特性が得られている。

台車～地上間の上下変位

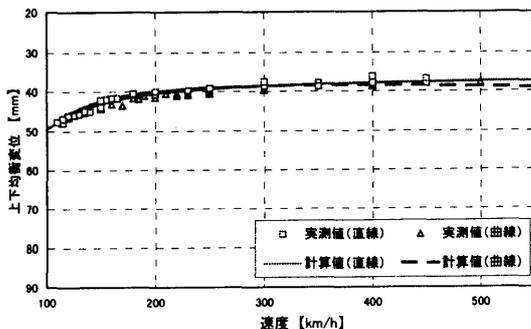


Fig. 9 Levitation characteristics.

次に左右案内特性は、浮上特性の場合と同様に台車～地上側壁間の空隙寸法を測定して基準位置からの左右変位として整理して求めた。案内力の速度特性を把握するには、曲線区間を走行中の車両の左右変位に着目する必要がある、Fig. 10 にその結果を示す。山梨実験線の曲線区間は半径 8000m, カント角 10 度を有しており、台車の曲線のバランス速度である 420km/h より低速で通過した際には曲線の内側に、高速で通過する際には外側に台車の定常変位が生じる。Fig. 10 より、曲線中の左右定常変位の実測値と計算値とは比較的良好一致を示しており、案内力についても計画通りの特性が得られている。

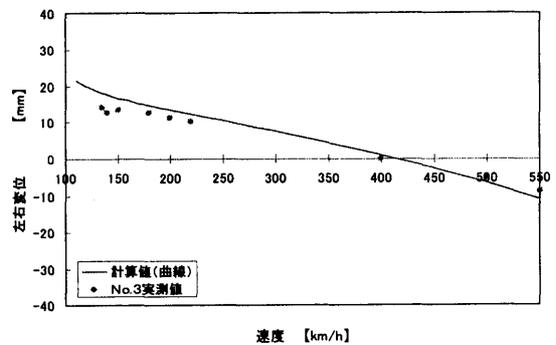


Fig. 10 Guidance characteristics.

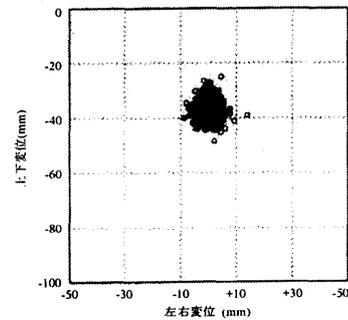


Fig. 11 Trajectory of vertical and lateral displacement.

車両の走行速度が十分大きくなれば誘起される電流は一定値に飽和し、浮上・案内特性は安定する。Fig. 11 には、横軸を台車～ガイドウェイ間の左右変位、縦軸を台車～ガイドウェイ間の上下変位として走行中の台車中心位置のトラジェクトリを示す。浮上開始直後から最高速度 500km/h までの走行中に生じる台車の変位をまとめたもので、500km/h の高速走行中においても、台車中心の動揺は振幅 10mm 程度の空間内に収まっている。このように車両はしっかりと電磁力に支え

られながら、ガイドウェイの中央を走行していることが分かる。

## 5 コイルシステムの簡素化

現在の山梨実験線の推進コイルには、超電導磁石の安定性確保のため電磁力脈動を抑制する必要があると考えられ2層配置方式が採用された。しかし高速走行時の超電導磁石の高い安定性が実証された現在では、超電導リニアの実用線で全線に敷設することになる地上コイルの簡素化は、建設費低減の観点から重要な課題となっている。

既に二層推進コイル配置はより簡単な単層推進コイル化へ変更することが可能と考えられているが、更にコイルシステムの簡素化を進めると、浮上案内コイルに駆動用電源を接続することにより推進力も得ることができる。この方式を PLG コイルシステム(Combined Propulsion, Levitation and Guidance system)と呼び、同一のコイルにて推進・浮上・案内を機能させることができるので、地上コイルの数量を大幅に減らし低コスト化への効果が大きい[3]。

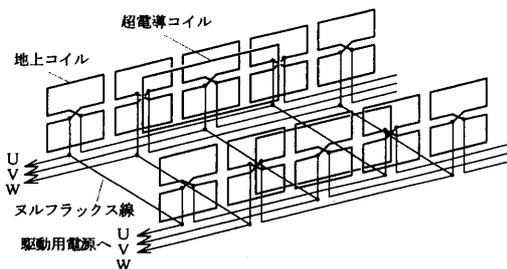


Fig. 12 Coil composition of PLG system.

Fig. 12 に示す通り、地上側には上下にマルチフラックス接続した 8 字コイルが側壁に配置され、さらにガイドウェイをはさんだ左右のコイルをマルチフラックスに接続するとともに、ガイドウェイに沿った前後を 3 相接続して駆動用電源に接続されるシステムである。山梨実験線の一部に仮設して、その特性が確認されている。

## 6 おわりに

超電導磁気浮上式鉄道の特徴である誘導反発式の磁気浮上方式について、走行試験結果を通じてその特性等について述べてきた。実測された浮上力ならびに案内力は計画通りの特性が得られていることが確認でき、

高速大量輸送システムに適した性能が実現できている。

超電導磁気浮上式鉄道の技術開発計画は、2004 年で最終年度を迎えており、山梨実験線では技術開発成果の最終とりまとめに向けた走行試験が続けられている。山梨実験線の設計速度(550km/h)を大幅に上回る最高速度 581km/h の走行実績が代表するように、これまで 8 年間の試験期間中の走行実験は予定どおり順調に進められてきた。これまでの成果をもって、超電導磁気浮上式鉄道の実用化に向けた基盤技術が確立できたものと考えている。

尚、超電導磁気浮上式鉄道の開発は一部国庫補助を受けて進められている。

## 参考文献

- [1] 藤原, 藤本, 浮上と案内を兼用する誘導反発磁気浮上の特性, 電学論, Vol.112-D, No.5, p.459-466, 1992.
- [2] 吉岡, 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.
- [3] 村井, 推進・浮上・案内を兼用するリニア同期モータの特性, 電学論, Vol.114-D, No.7/8, pp.746-752, 1994.