

超電導リニア車両の運動を 模型装置で検証する

米津 武則
浮上式鉄道技術研究部
(電磁力応用研究室 研究員)

渡邊 健
同
(同 主任研究員)

鈴木 江里光
同
(同 主任研究員)

星野 宏則
同
(同 主任研究員)



よねづ たけのり



すずき えりみつ



わたなべ けん



ほしの ひろのり

はじめに

車両の乗り心地の向上などにとって、超電導リニアの車両が外乱に対してどのような動きをするのか、その特性を知ることは非常に重要なことです。そのための一つの方法として、鉄道総研では超電導リニア車両の縮尺模型を作り、試験を行っています。

ここでは、鉄車輪とレールからなる一般の鉄道車両と超電導リニア車両は車両の運動特性を把握する上でどこがどう違うのかを説明しながら、超電導リニア車両の模型の製作のねらいを述べ、模型で試験を行うとどんなことがわかるのか、具体例を挙げて説明します。

超電導リニア車両と一般の鉄道車両の違い

車両の運動特性を把握する上で、超電導リニア車両は、一般の鉄道車両とは大きく異なる点が2つあります。一つは、「磁気ばね」と呼ばれるもので、もう一つは「連接台車方式」と呼ばれるものです。

まず、「磁気ばね」について説明します。超電導リニア車両は、ガイドウェイ側壁に取り付けられた地上コイルと車両の台車に取り付けられた超電導磁石との間に発生する電磁力に支えられ、地上と非接触で推進する車両です。この電磁力をばねに近似したものを磁気ばねといいます。超電導リニア車両は一両約20トンもの重量があり、これを支える磁気ばねが柔らかいものでは走行中に大きく揺れたり、地上設備に接触したりして走行できなくなってしまいます。磁気ばねはある程度硬いばねである必要があります。

図1は鉄車輪とレールからなる一般の鉄道車両と超電導リニア車両がどのように支持されているのかを示した図です。超電導リニア車両の磁気ばねは、一般の鉄道車両の台車枠～軸箱間のばねや振動を減衰させるダンパに相当します。これを、1次支持系と呼びます。超電導リニア車両も一般の鉄道車両と同じく、車体と台車の間にばねとダンパを備えています。これを2次支持系と呼びます。ばねやダ

ンパによって外乱による振動を抑えながら、安定して車両が走行できるようになります。

次に、「連接台車方式」について説明します。図2のように、超電導リニア車両では、車体を載せる台車は、先頭部を除いて車体と車体が接続する部分に配置する方式をとっています。この方式を連接台車方式と呼びますが、超電導リニア車両では、客室内床面を下げられることにより車体断面を縮小できるため、空気抵抗を小さくできる、台車を貫通路の下に配置できるため超電導磁石の磁界から乗客を遠ざけられる、などの利点があります。2次支持系は、図2のように、台車4隅の空気ばねと車体～台車間の前後アンカ、および上下・左右方向ダンパで構成されており、空気ばねおよびダンパがそれぞれ直上の車体と結合するため、隣り合う車体間に作用する力は、車体間の連結器に加え、台車経由でも伝わります。このように、連接台車方式では、車体間の力の伝わり方が一般の鉄道車両で用いられているボギー台車方式とは異なるため、超電導リニアの車両運動の検討においては、1両単位ではなく、編成全体として考えることも必要となってきます。

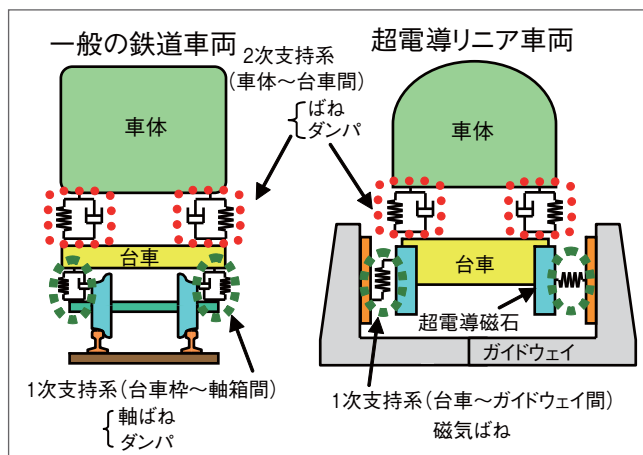


図1 一般の鉄道車両と超電導リニア車両の支持系

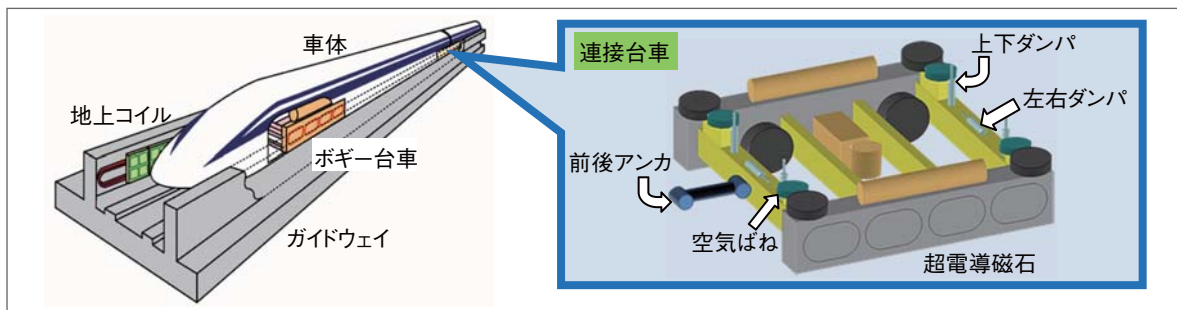


図2 超電導リニア車両と台車

車両運動を把握するために検討すべきこと

超電導リニア車両と一般の鉄道車両との違いがおわかりいただけたかと思いますが、ここでは、鉄道車両の運動特性を把握するために、どういった検討を行えばよいのかを説明します。

まず、車両運動の原因となる外乱とはどのようなものなのでしょう。超電導リニア車両の場合、ガイドウェイ側壁に取り付けられている地上コイルの取り付け位置などに誤差があると、磁気ばねをとおして、振動が外乱として車両に作用します。この地上コイル取り付け位置の誤差に関しては、コイル自体の製作誤差、ガイドウェイの敷設誤差、ガイドウェイや地上コイル樹脂の経年劣化による誤差などいくつかの要因が考えられます。在来方式鉄道車両の場合、レールの変形などに起因する軌道変位にあたります。また、車両の走行に伴う、車体表面の圧力変動によって生じる空気力も外乱として作用し、車両運動に影響を与えます。このように、車両運動に影響を与える外乱には地上側からくるものと空気力によるものがあります。

このような外乱に対して、鉄道車両がどのような運動特性になるのかを知ることは、鉄道車両の乗り心地などを考える上で重要です。

鉄道車両の運動特性を把握する手段として、プログラムを作って計算機上でシミュレーションを行うという方法があります。しかし、そのシミュレーションに用いる車両モデルやばね定数などの各種パラメータが本当に正しいのかを把握するためには、実際に試験を行って確かめる必要があります。

実際に試験線や営業線で実車両を走らせて台車・車体の加速度などを測り、運動特性を把握する試験も行われています。これを現車試験と呼びますが、現車試験では、実施方法や計測方法などの種々の困難さが伴うほか、不確定な外乱が避けられません。現車試験に加えて、不確定な要素をできるだけ除いた状態で、各パラメータの影響など基本的な特性を効果的に把握する試験も必要であり、そのためには、定置で車両の運動特性を把握する試験を行える装置が必要です。

一般の鉄道車両における各種定置試験

ここでは、一般の鉄道車両の運動特性を把握するために、ど

のような定置試験が行われているのか、その例を紹介します。

定置試験を行うには、実物の鉄道車両を用いて試験を行う場合と、縮尺模型を用いて試験を行う場合があります。

実物の鉄道車両を用いて試験を行う場合、車両試験台と呼ばれる装置があります。車両試験台は、軌条輪と呼ばれるレールに相当する回転円盤上に台車の車輪を載せて、走行している車両の状態を定置で再現する装置です。試験速度などの試験条件を厳しめに設定することにより、現車試験では実施できないような限界領域での試験が可能となります。車両のいろいろな面での限界を知ることにより、より高性能な車両の開発ができます。

実物の車両を用いて実物大の試験を行うことができれば最良ですが、試験を行う際にいろいろな問題点があります。装置が大掛かりになる、条件変更、設計変更が簡単でない、などです。定置試験を行う技術が確立されている場合には、実物大で試験を行うことができますが、まだ現象が解明されていない未知のものを扱う場合、まず、縮尺模型で試験を行います。例えば、東海道新幹線建設の際に問題になった輪軸が左右に振れて蛇がくねるような運動（蛇行動）では、当初は、模型で試験を行っていました。はじめは1/10模型によって試験を行った後、1/5模型に発展し、現在では実物車両が搭載できる車両試験台ができています。

このように、まず縮尺模型で簡単な現象から検討を行い、段階を踏んで複雑な現象の検討に発展させていく、といったことが必要です。実物の車両を模擬した縮尺モデルを考え、短い準備期間で試験できる縮尺模型があれば、実際の車両を製作する前の設計変更、車両運動特性の解明に効果的です。

模型試験を行う際には、実物相似の模型を製作できるかどうか、実物の現象を十分に再現できるかどうか、などが課題です。

車両のどのような特性を把握したいのかによって、どのような模型装置を用いればよいのか、使い分ける必要があります。トンネル走行中の車両に加わる空気力、車体の曲げ振動、地震による脱線後の車両の動きなど、いろいろな現象を解明する目的でそれぞれ模型が作られ、試験が行われていますが、目的によって、製作する模型も異なります。

超電導リニア車両縮尺模型 (MAGMOX)

鉄道総研では、MAGMOX (MAGlev vehicle MOdel eXperiment apparatus: 超電導磁気浮上式鉄道車両模型実験装置) と呼ばれる超電導リニア車両の縮尺模型を製作しました^{1),2)}。

MAGMOXを製作した目的は、地上コイルからの外乱に対して超電導リニア車両の車体の動きがどういった特性になるのかを把握する、ということです。例えば、前述の2次支持系の部分に振動制御装置を導入した場合、車体の運動特性をどれだけ改善させることができるか、といった研究に用います。1970年代に、超電導リニア車両の推進特性を検証し、電力変換器の制御方式の検討に役立てるために、模型装置を製作して検証したことがありますが、MAGMOXは、そういった電磁気的な特性よりも、台車～車体間の2次支持系などの機械力学的な特性の解明がねらいです。

一般の鉄道車両の場合、前述のような軌条輪を用いることで定置試験が行えますが、超電導リニアの車両の場合は、磁気ばねの再現は定置試験では難しいため、磁気ばねは機械ばねとして計算機上で計算し、機械力学的な諸現象の解明に特化することにしました。

図3に、超電導リニア車両のうちの4台車と3車体の部分を模擬した場合のMAGMOXのイメージを示します。アクチュエータにより振動台を6自由度で加振できるモーションベースと呼ばれる装置で台車運動を再現しています。

このモーションベースの振動台部分が台車に相当します。車体はアルミ板の梁で模擬しています。図4に、製作したMAGMOXの外観を示します。図4 (a) は、超電導リニア車両のうち、2つの台車と1つの車体の部分を模擬した1/12縮尺の模型です。図4 (b) は、3つの台車、2つの車体と1つの半車体を模擬した1/12縮尺の模型で、連接台車方式である超電導リニア車両の編成車両としての特性、例えば、車体間に作用する力の解明などに用います。図4 (c) は、2つの台車と1つの車体の部分を模擬した1/6縮尺の模型です。

1/12縮尺の模型は上下・ピッチ方向の運動特性の把握のために

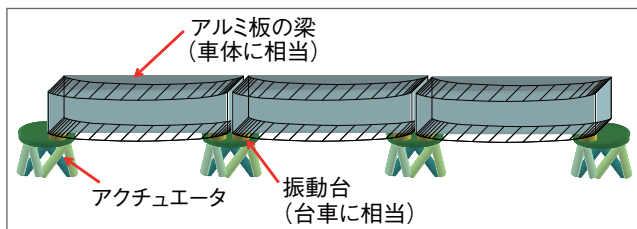


図3 超電導リニア車両の縮尺模型 (MAGMOX) のイメージ

製作したものであり、上下・ピッチ方向以外の動きは拘束しています。1/6縮尺模型は、上下・ピッチ方向以外にも、左右・ロール方向などの自由度も持っており、図4 (a) に比べて、実物の超電導リニア車両に近い動きができるようになっています。まず、図4 (a) のMAGMOXで上下・ピッチ方向の運動特性の検証試験を行った後、図4 (b) のMAGMOXで編成車両の運動特性の検証試験、図4 (c) のMAGMOXで自由度を拡張した検証試験を行うというように、目的に応じて、段階的に試験を行っています。

図5は図4 (a) のMAGMOXの機械力学的な構成を示したものです。計算機上で台車の変位をリアルタイムに計算しています。外乱としてはガイドウェイ上下変位を入力していますが、前側の台車と後側の台車の外乱に時速500kmに相当する時間差を設けることによって、超電導リニア車両の走行を模擬しています。また、車体から2次支持系を通して伝わる力を荷重計測器によって計測し、台車の動きにフィードバックすることによって、超電導リニア車両における台車と車体の間の力のやりとりを模擬しています。

また、鉄道車両の縮尺模型を作る際には、何のパラメー

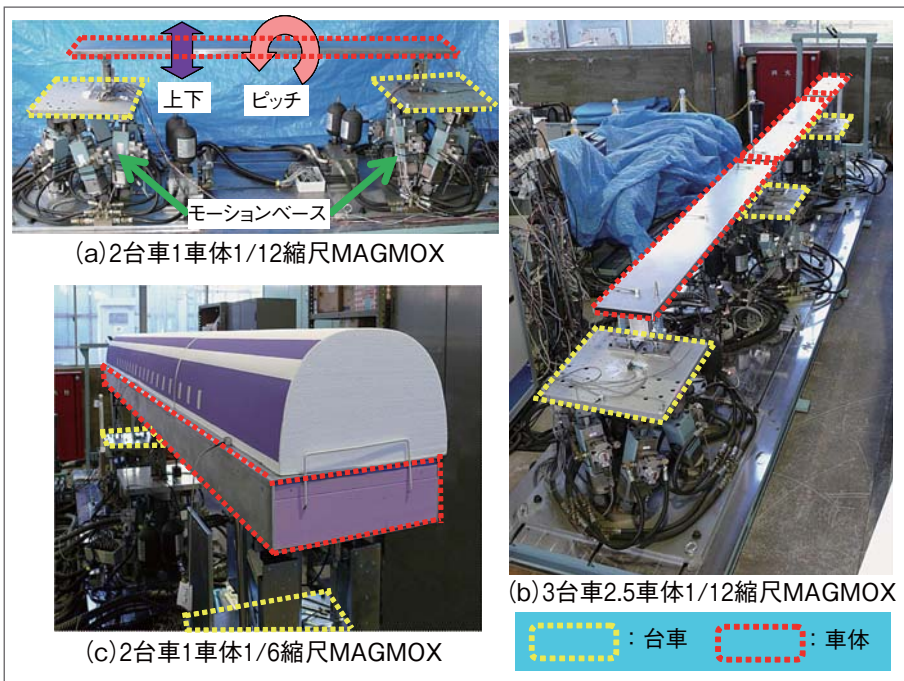


図4 超電導リニア車両の縮尺模型 (MAGMOX) の例

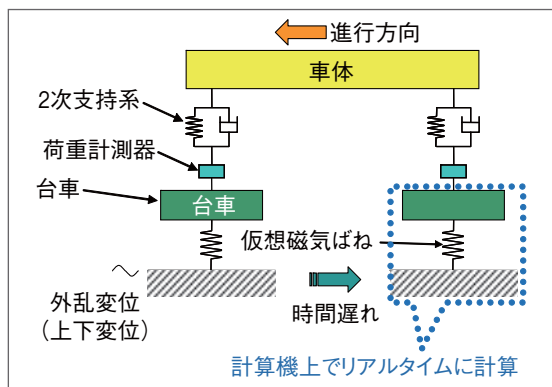


図5 MAGMOXの機械力学的構成

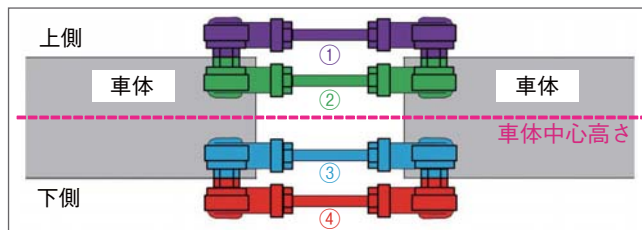


図6 連結器取り付け位置のイメージ

タを実物の車両と合わせるか、ということが重要ですが、MAGMOXでは、台車・車体の機械力学的な運動特性の解明を目的としているため、台車・車体の振動加速度を実際の車両と合わせるように設計しています。

MAGMOXによる試験結果例 ～車体・車体間の連結器の高さの検討～

MAGMOXを用いた試験結果の例として、図4 (b) のMAGMOXを用いて、編成車両の運動特性を検証した例を紹介します。

超電導リニア車両も、一般の鉄道車両と同じく、車体と車体の間には連結器があります。乗り心地向上のためには連結器などの各種部品をどの位置に取り付けばよいのかという検討は車両を設計・製作する時に行われています。しかし、車体には連結器以外にも色々な部品が備わっていて、高さを自由に変えられるわけではありません。MAGMOXでは、そのような制約がなく、ある程度の自由度をもって連結器の高さに関する検討を行うことができます。

車体～車体間に連結器をつけない場合と、車体間連結器を図6の①～④の高さにつけた場合の、計5通りについて、外乱としてガイドウェイ上下変位を与えた時、車体のピッチ方向の角加速度がどう変化するかについて、MAGMOXを用いて試験を行いました。①～④のように、連結器の取り付け位置を変えることで、車体ピッチの回転軸の高さを変えることができます。図7は、連結器取り付け位置を④にした場合のMAGMOXの連結器部分の例です。



図7 連結器部分の外観(連結器取り付け位置④の場合)

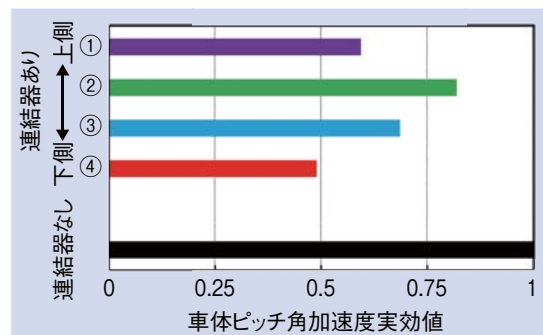


図8 連結器高さによる車体ピッチ角加速度の違い
(角加速度ピーク付近8.6～9.9Hzの実効値を正規化)

試験結果を図8に示します。連結器の高さがいずれの場合も、連結器なしの場合よりピッチ角加速度が小さくなっていることが分かります。また、連結器の取り付け高さが車体の中心から離れるほど角加速度は小さくなっています。ピッチ角加速度に関しては、連結器は車体の中心より離れた位置に設置したほうがよい結果になる、ということになります。

おわりに

超電導リニアの車両の運動特性を把握するには、一般の鉄道車両とは異なる、超電導リニア車両特有の性質を生かした定置試験装置が必要であることを述べました。超電導リニア縮尺模型MAGMOXを製作し、試験を行っています。試験結果の一例を紹介しましたが、MAGMOXを用いて試験を行うことによって、計算機シミュレーションや現車試験では検証が難しいような諸現象の解明を目指しています。

なお、本研究は国土交通省からの補助金を受けて実施しました。RRR

文 献

- 1) 鈴木江里光, 渡邊健, 星野宏則: 浮上式車両模型実験装置による車両運動の基礎特性試験, 鉄道総研報告, Vol.22, No.11, pp.5-10, 2008
- 2) 渡邊健, 星野宏則, 鈴木江里光, 米津武則: 浮上式鉄道における編成車両の運動特性, 鉄道総研報告, Vol.25, No.3, pp.23-28, 2011