

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

浮上式鉄道車両の運動を再現する

超電導磁気浮上式鉄道（以下、浮上式鉄道）車両の運動の再現や、振動を抑える方法の研究に関しては、計算機シミュレーションと、車両模型実験装置による実験を中心に進めてきました。ここでは、一般の鉄道車両と違った特性を持つ浮上式鉄道車両の振動を抑える方法の研究の一例として、車体～台車間の2次支持系の振動制御や、台車～地上間の1次支持系の振動制御の計算機シミュレーション結果と、模型実験による検証結果を紹介します。

浮上式鉄道車両と一般の鉄道車両の違い

鉄道車内の快適性にはさまざまな要素がありますが、振動に対する環境、つまり乗り心地は重要な要素の一つです。鉄車輪とレールからなる一般の鉄道車両において車両の振動を抑え、乗り心地を向上させるためにさまざまな研究開発が行われています¹⁾が、浮上式鉄道車両でも振動を抑える研究開発を行っています^{2)~5)}。

鉄道車両の振動を抑えるためには、車両に加わる外乱に対して車両がどの

ように動くのか、その運動の特性を把握する必要があります。ここでは、はじめに車両の運動の特性を把握するうえで必要な、浮上式鉄道車両と一般の鉄道車両の構成の違いについて説明します。

図1は鉄車輪とレールからなる一般の鉄道車両と浮上式鉄道車両がどのように支持されているのか¹⁾²⁾を示した図です。図1に示したように、台車より下のばね・ダンパー（振動を減衰させるもの）を1次支持系、台車より上のばね・ダンパーを2次支持系と呼びます。2次支持系は、浮上式鉄道車両も一



鈴木 江里光
Erimitsu Suzuki
浮上式鉄道技術研究部
電磁システム研究室
主任研究員
【専門分野】浮上式鉄道の車両運動



米津 武則
Takenori Yonezu
浮上式鉄道技術研究部
電磁システム研究室
副主任研究員
【専門分野】浮上式鉄道の車両運動



渡邊 健
Ken Watanabe
浮上式鉄道技術研究部
電磁システム研究室
室長
【専門分野】浮上式鉄道の車両運動

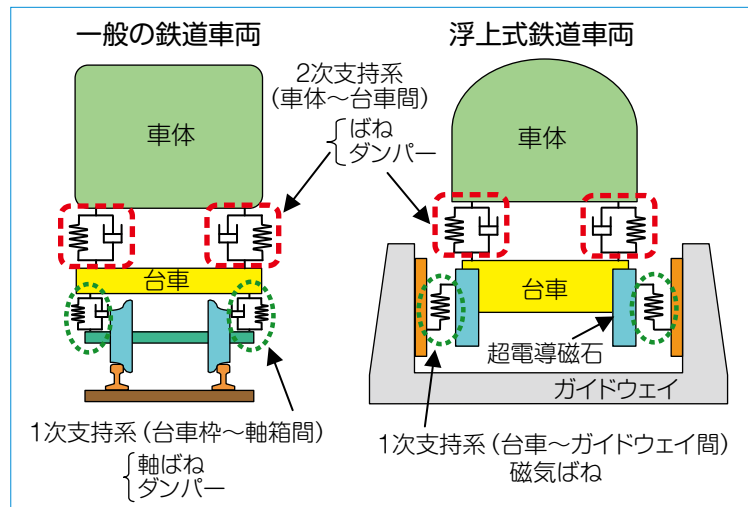


図1 一般の鉄道車両と浮上式鉄道車両の支持系

般の鉄道車両と同じく、車体と台車とのばね・ダンパーで構成されています。一方、1次支持系は、一般の鉄道車両の場合は台車枠～軸箱間のばね・ダンパーで構成されますが、浮上式鉄道車両の場合は台車～ガイドウェイ間の「磁気ばね」が1次支持系に相当します。

「磁気ばね」は、浮上式鉄道車両特有の構成要素です。浮上式鉄道車両は、ガイドウェイの側壁に取り付けた地上コイルと台車に取り付け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します。この電磁力は、車両が高速で走行することで発生し、これをばねと見なし「磁気ばね」と呼びます。

走行中に浮上式鉄道車両に加わる外力には、地上コイル敷設誤差（地上コイルを敷設する際に基準位置との間に生じる位置ずれ）や車体に加わる空気力などがありますが、**図1**に示したような支持系は、外力による振動を抑えながら、安定した車両の走行を可能にしています。

車両の運動を把握するうえで、「磁気ばね」以外にも浮上式鉄道車両に特有な重要な要素がもう一つあります。それは、「接続台車方式」と呼ばれる車両構成です。一般の鉄道車両で主に用いられている方式は「ボギー台車方式」と呼ばれます。**図2**に5両編成の場合の接続台車方式とボギー台車方式の車両構成を示します。隣り合う2つの車体の接続部に配置され、2つの車体を支持する台車を接続台車と呼びま

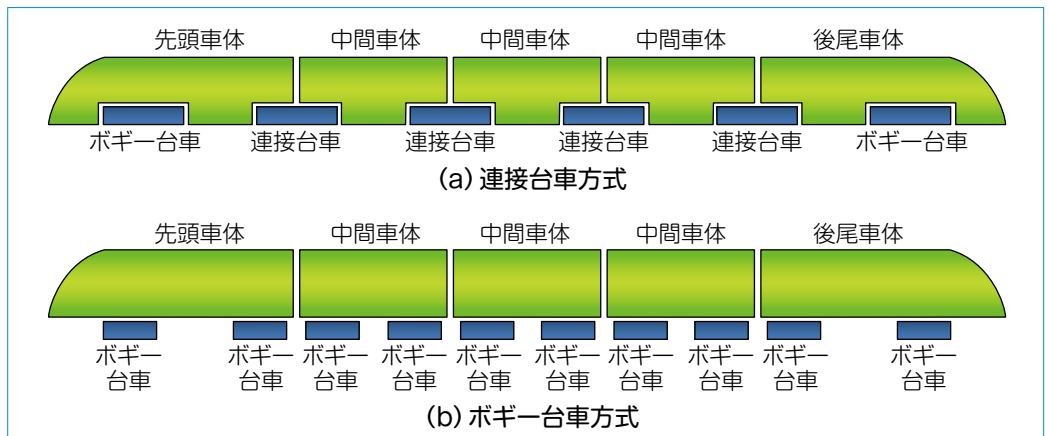


図2 接続台車方式とボギー台車方式の車両構成例(5両編成の例)

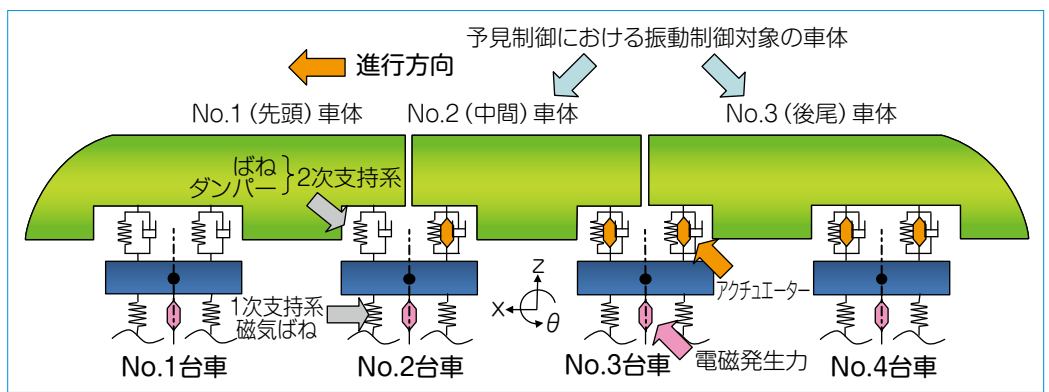


図3 浮上式鉄道車両の振動制御の対象(3両編成の例)

す。接続台車方式では、先頭・後尾車体の台車以外は接続台車となります。この接続台車方式は、車両の重心を下げて断面積を小さくできる、台車の超電導磁石を客室から遠ざけて磁界を低減できる、あるいは超電導磁石の数を減らせるなどのメリットがあります。浮上式鉄道車両で用いられている接続台車方式では、隣り合う車体間に働く力は、車体～車体間を結合する連結器に加え、台車経由でも伝わります。とくに乗り心地に影響が大きい上下方向の力は、主に台車経由で伝わります。このように、浮上式鉄道車両は車体間の力の伝わり方が一般の鉄道車両とは異なるため、浮上式鉄道の車両運動の検討の際は、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。

浮上式鉄道車両の振動制御

前章では、浮上式鉄道車両は運動を把握するうえで、一般の鉄道車両とは異なる要素が存在することを説明しました。ここでは、浮上式鉄道車両の乗り心地を向上させるために、どのような振動制御(☞参照)を研究開発しているのかについて説明します。

図3に、これから説明する浮上式鉄道車両用の各種振動制御の制御対象を示します。2次支持系に振動制御を適用する場合は**図3**中のアクチュエー

☞ 振動制御

対象物に取り付けたセンサーの情報をコンピューターに入力し、振動を抑えるために適切な力を計算して指令を制御装置に与えることで、振動の大きさを減らすことができます。

ター（[図3](#)参照）を用いて制御力を発生させます。1次支持系の場合は[図3](#)中の電磁発生力により振動を制御します。

まず、[図3](#)中のアクチュエーターを用いた2次支持系の振動制御について説明します。従来、車体～台車間の2次支持系の振動制御は車体・台車に設置した加速度計などのセンサーからの情報を基に制御力の指令を出すフィードバック制御（[図3](#)参照）を用いてきました³⁾⁴⁾。振動を抑える効果をさらに向上させるために、このフィードバック制御にフィードフォワード制御（[図3](#)参照）を加える方式を浮上式鉄道車両に適用することを新たに提案しました³⁾。この制御方式は「予見制御」と呼ばれます。ここで扱う[図4](#)に予見制御の仕組みを示します。予見制御は、編成前方の車両で得られた振動情報を後方の車両の振動制御に利用するもので、自動車などとは異なり決まった軌道を走行する鉄道車両でとくに有効な方式です。なかでも、浮上式鉄道車両は車両運動の再現性が一般の鉄道に比べて高いため、より高い制振効果が期待できます。[図3](#)に示したように、3両編成の場合は、先頭台車の振動情報を用い、後ろ2両、つまり、中間および後尾車体の振動を制御します。

次に、[図3](#)中の電磁発生力を用い

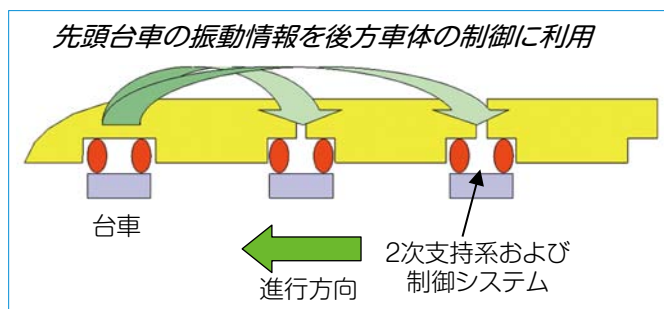


図4 予見制御の仕組み

た1次支持系の制御について説明します。1次支持系の振動制御方式としては、地上から車上に電力を供給するための装置である誘導集電装置を用いて電磁発生力を作り出す方式⁴⁾が過去に検討され、現車試験などにより制振効果が確認されています⁴⁾。

計算機シミュレーションによる 振動制御効果確認

これまで述べてきた振動制御を浮上式鉄道車両に適用した場合の振動制御効果を確認するために、計算機シミュレーションを行いました。計算対象は[図3](#)と同じ3両編成としました。何の制御も行わない場合、2次支持系に予見制御を適用した場合、2次支持系の予見制御に加えて1次支持系制御を適用した場合の3つの場合について、車体の上下方向の振動加速度の低減効果を確認しました。効果の確認には、周

波数ごとの振動の大きさを表す指標であるパワースペクトル密度 (PSD) を用いました。[図5](#)に計算結果を示します。[図5](#)より、1～2Hz付近と4～5Hz付近の2箇所振動のピークがあることがわかりますが、このうち、4～5Hzは1次支持系に起因する振動ピークであり、1～2Hzは2次支持系に起因する振動ピークです。2次支持系に予見制御を適用することにより1～2Hz付近の振動ピークが低減でき、それに加えて1次支持系にも振動制御を適用することにより、4～5Hz付近の振動ピークも低減できています。以上のように、振動制御の適用により振動が抑えられていることがわかりました。

浮上式鉄道車両模型実験装置 (MAGMOX) による検証

振動制御の効果を計算機シミュレーションによって確認しましたが、ここでは、浮上式鉄道車両模型実験装置 MAGMOX (MAGlev MOdel vehicle dynamics eXperiment apparatus)³⁾⁵⁾を用いた振動制御効果の検証例について説明します。

[図6](#)にMAGMOXの外観を示します。3車体4台車による編成の中間車体(2両目)の運動を模擬するため、MAGMOXは1車体+2台車構成とされています。MAGMOXは[図3](#)に示したような現車の構成を模型に置き換え、実際の浮上式鉄道車両の運動を再現できるようにしたのですが、[図3](#)中の

アクチュエーター

振動する対象物が動く方向の反対方向に力をかけることによって振動を抑える装置です。制御装置内のコンピューターで力の大きさ、力をかけるタイミングの指令を計算し、これらに基づく指令に従って動かせます。

フィードバック制御

一般的に用いられる制御方式であり、制御系において、出力(制御量)を入力(目標値)側へフィードバック(出力側の一部を入力側に戻す)して両者を比較し、出力と入力の差を小さくする制御です。予期しない外乱が加わっても、フィードバック制御は有効に動作します。

フィードフォワード制御

制御方式の一種であり、出力に変動が起きる原因となるような外乱を予測し、事前に打ち消す制御方式です。通常はフィードバック制御に付加して用いられる制御方式です。

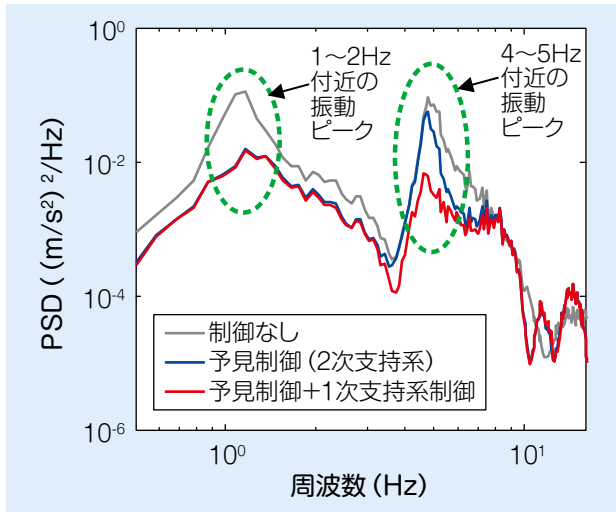


図5 振動制御による振動低減効果
(計算機シミュレーション結果) (車体上下振動加速度)

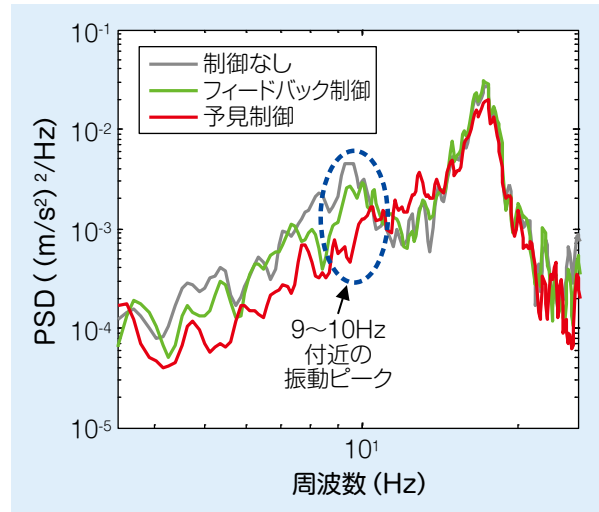


図7 振動制御による振動低減効果
(MAGMOXによる実験結果) (車体上下振動加速度)

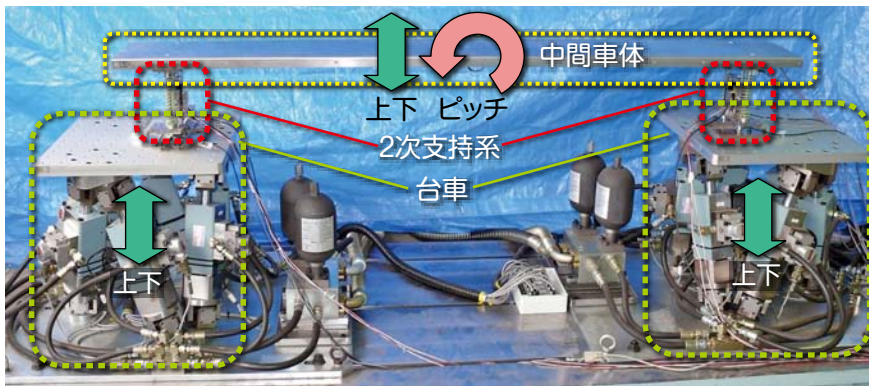


図6 浮上式鉄道車両模型実験装置 (MAGMOX) の外観

台車を油圧加振機に、車体をアルミ製の梁構造で、車体～台車間の2次支持系をコイルばねなどで置き換えています。また、MAGMOXは現車の1/12の縮尺としました。

ここでは、2次支持系制御のフィードバック制御と予見制御の2種類をMAGMOXに組み入れて実験を行いました。

図7に実験結果(中間車体上下加速度PSD)を示します。同図より、振動制御を適用することで車体振動加速度が効果的に抑えられ、9~10Hz付近の振動ピークが小さくなっていることがわかります。MAGMOXでは、現車と比較して、「加速度」(距離の二階時間微分)の大きさが同じ、「寸法」(距離)が1/12倍になるように設計して

いるので、MAGMOXでの「時間」は現車の $1/\sqrt{12}$ 倍に相当します。つまり、模型実験装置での「周波数」は現車の $\sqrt{12}$ 倍となり³⁾、MAGMOXの9~10Hzは現車では2~3Hzに相当し、2次支持系の振動ピークに対応します。また、図7より、予見制御では通常のフィードバック制御よりも大きな制振効果が得られていることがわかります。

文献

- 1) 菅原能生, 中川千鶴: 新幹線車両の振動を制御する, RRR, Vol.68, No.3, pp.6-9, 2011
- 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
- 3) 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
- 4) 星野宏則, 鈴木江里光, 渡邊健: 1次・2次支持系アクティブ制御による浮上式車両の振動低減, 鉄道総研報告, Vol.21, No.9, pp.5-10, 2007
- 5) 米津武則, 鈴木江里光, 渡邊健, 星野宏則: 超電導リニア車両の運動を模型装置で検証する, RRR, Vol.69, No.2, pp.2-5, 2012

まとめ

一般の鉄道車両とは異なる運動特性を持った浮上式鉄道車両の運動を再現し、その振動を抑える方法の研究の一例として、車体～台車間の2次支持系の振動制御や、台車～地上間の1次支持系の振動制御の計算機シミュレーション結果を紹介しました。また、浮上式鉄道車両模型実験装置(MAGMOX)を用いて振動低減効果の検証を行った例を紹介しました。

これら精密な車両運動シミュレーションと模型実験は、現車へ振動制御などを適用する際の事前検討として役立ちます。

本研究は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。

RRR