

# 浮上式車両の乗り心地改善のための振動抑制に関する研究

浮上式鉄道技術研究部 電磁力応用  
主任研究員 鈴木 江里光

## 1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道（以下、浮上式鉄道）の車両運動特性解明や振動抑制手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試験を中心に進めている。本発表では、振動抑制手法の一例として、先頭台車の振動情報を用いて制振効果を向上させる2次支持系の制御と、付加的な電磁発生力を用いた1次支持系の振動制御を組み合わせた制振システムについての計算結果を報告し、模型実験による検証結果を紹介する。

## 2. 計算機シミュレーションによる乗り心地改善策の検討

### 2.1 計算モデル

本章では、連接方式の浮上式鉄道車両を模擬した3車体・4台車から構成される上下・ピッチ系の14自由度計算モデル(図1)に対し、1次・2次支持系の各々に振動制御を適用した場合と、これらを連携させた場合について、制振効果を調べた結果を報告する。図1に示す計算モデルでは、1次支持系は非接触の磁気ばねを模擬した上下およびピッチの線形ばねのみとして、各磁気ばねを台車前後に配置し、磁気ばねの連成は値が小さいため省略した。また、2次支持系は空気ばねを模擬した上下方向の線形ばねおよびダンパから構成されるものとした。なお、今回は基礎的な検討に的を絞って、車体・台車ともに剛体とした。外乱は、ガイドウェイの地上コイル上下敷設誤差（以下、高低変位）のみとし、空力的な影響は無視した。この高低変位は、各台車の磁気ばね取り付け位置の前後2点から、走行速度に応じた時間遅れを与えて入力した。

### 2.2 振動制御システム

浮上式車両の車体上下振動加速度の主な振動ピークである1~2Hz近傍の車体上下剛体モードと、4~5Hz近傍（500km/h走行時）の台車上下剛体モードを低減することを目標とし、1次支持系と2次支持系の振動制御システムを構築した<sup>1)</sup>。

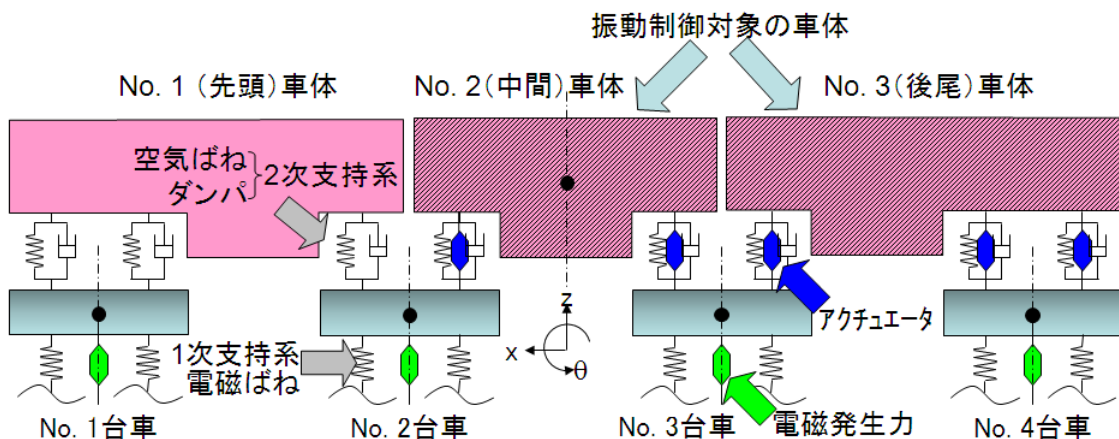


図1 計算モデル

### 2.3 予見制御を用いた 2 次支持系の振動抑制

2 次支持系の振動制御には理想的なアクチュエータを想定し、予見制御を適用した<sup>2)</sup>。予見制御とは、フィードフォワードとフィードバックからなる制御方式であり、前方車両の振動情報を後方車両の振動制御に利用するもので、走行軌道が決まっている鉄道車両で有効性が高い制御方式である。特に浮上式鉄道車両は車両運動の再現性が在来方式鉄道に比べ

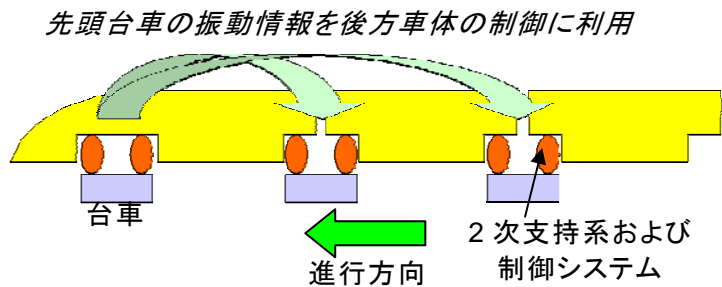


図 2 予見制御の概念

て高いため、より高い制振効果が期待できる。今回は、3 車体 4 台車からなる編成において、先頭台車の振動情報を用いた制御システムを構築した (図 2)。また、図 1 で示すように、振動制御の対象は中間および後尾車体である。ここで、予見制御で用いるフィードフォワード係数およびフィードバック係数は、式(1)に示す評価関数を最小にする最適レギュレータ問題を解くことで求

$$J = \sum_{k=-M_R+1}^{\infty} \left[ q_1 \underbrace{\{ \ddot{z}_{c2}(k) + \ddot{z}_{c3}(k) \}}_{\text{中間・後尾車体の上下加速度}} + q_2 \sum_{i=3}^6 \underbrace{L_{0i}^2(k)}_{\text{車体と台車の相対変位}} + r \sum_{j=1}^5 \underbrace{u_j^2(k)}_{\text{制御入力}} \right] \quad (1)$$

離散時間の  
予見ステップ数

中間・後尾車体  
の上下加速度

車体と台車  
の相対変位

制御入力

められる。ただし、 $q_1$ 、 $q_2$ 、 $r$ は、それぞれ、車体上下加速度、車体～台車間相対変位、制御入力に対応する重み係数である。

### 2.4 電磁発生力を用いた 1 次支持系の振動抑制

浮上式鉄道車両の乗り心地改善のため、以前から各種振動制御システムの導入が試みられてきた。しかしながら、これらの制振システムは、主に車体～台車間の 2 次支持系の特性改善に重点を置いたもので、周波数が高い台車上下剛体モードに対する振動低減効果は小さかった。近年、車上電源用誘導集電装置の付加的な電磁発生力を用いた台車～地上 (ガイドウェイ) 間の 1 次支持系の振動制御システムが提案され、現車試験等により台車上下剛体モードの振動に対する効果が確認されている<sup>3)</sup>。この電磁発生力を用いた制御システムでは、1 次支持系に起因する振動ピークは低減可能だが、2 次支持系に起因するピークの低減は難しいため、アクチュエータ等による 2 次支持系の振動制御との連携によって、より幅広い周波数帯域の振動低減が可能となる。本発表で 1 次支持系の振動制御には、最大発生力制御方式を用いた。この方式は、台車速度の符号のみに注目し、式(2)の通り、発生力の絶対値はそのまま、台車速度 (加速度を積分した値) と反対方向に制御力を出力するスカイフック制御の一種である。

$$F_{control} = -\text{sign}(\dot{z}_b) \times F_{max} \quad (2)$$

ここで、 $F_{control}$  は制御力、 $\dot{z}_b$  は台車上下速度、 $F_{max}$  は 1 台車あたりの最大電磁発生力である。本発表では  $F_{max}$  は 2kN とし、全台車に適用した。

### 2.5 計算結果

各制御方式の制振効果確認のため、乱数を用いて作成した模擬ガイドウェイ高低変位を計算モ

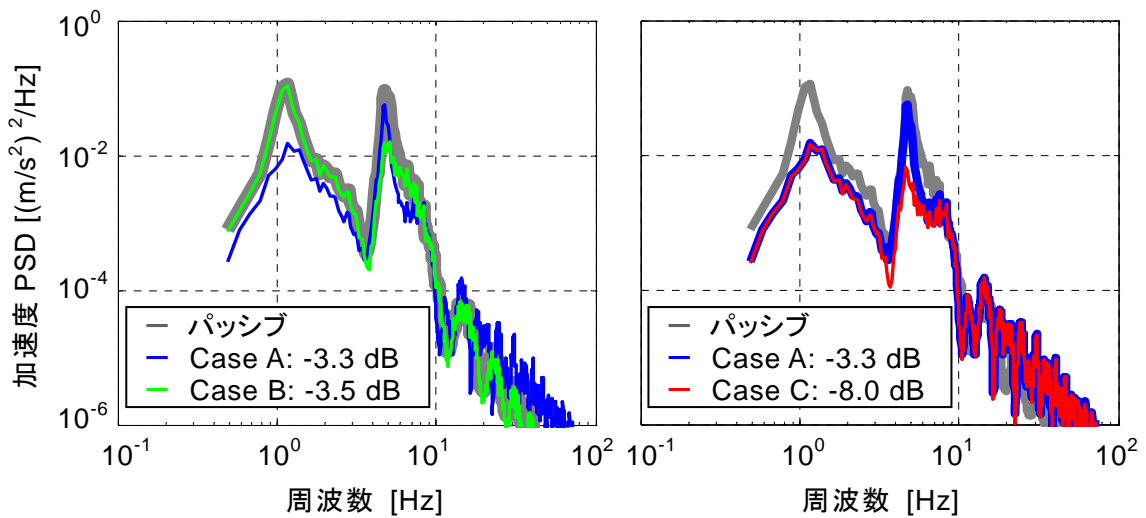


図3 振動制御計算結果（中間車体上下加速度 PSD, 500km/h）

デルに外乱として入力し、時刻歴シミュレーションを行った。振動制御には、2次支持系の予見制御のみ（Case A）、1次支持系の最大発生力制御のみ（Case B）、そして Case A と Case B を組み合わせた方式（Case C）を用いて効果を検証した。

図3に中間車体上下加速度 PSD（パワースペクトル密度）の計算結果例を示す。2次支持系に起因する1~2Hz付近の振動ピークは制御なし（パッシブ）の場合に対し、Case A, Cは同等に約1/7に低減し、Case Bはほとんど低減していない。また、1次支持系に起因する4~5Hz付近の振動ピークはパッシブの場合に対し、Case Aは比較的低減が少なかったが、Case B, Cはそれぞれ約1/6, 1/15に低減した。同図凡例には、パッシブを基準とした乗り心地レベルの低減量を併記した。Case AとBが同等の乗り心地レベルとなり、Case Cはそれぞれの乗り心地レベル低減量の合計よりも大きい結果となり、これらの方式を組み合わせることで、より大きな乗り心地向上効果が得られることが分かった。

### 3. 車両模型振動実験

#### 3.1 模型実験装置の概要

在来方式鉄道と大きく異なる浮上式鉄道の車両運動特性を解明し、振動制御適用による乗り心地向上効果の検証等のため、1/12縮尺の浮上式鉄道車両模型実験装置（以下、模型実験装置）を製作した。台車には6自由度（前後・左右・上下・ロール・ピッチ・ヨー）の運動が可能な油圧モーションベースを用い、曲げ振動再現可能な車体はアルミ製とし、車体～台車間はコイルばねを用いた2次支持系で結合した。実験装置外観を図4に示す。

#### 3.2 台車（モーションベース）制御システム

模型実験装置において2次支持系の振動制御を行うためには、現車と同様な車体～台車間の相互作用による連成振動の再現が必要となる。このため、模型実験装置では2次支持系下部に相互作用力を測定するロードセルを設置し、相互作用力と模擬ガイドウェイ高低変位のみを外乱入力とした台車の運動方程式をリアルタイムで解き、その変位情報を用いて台車を制御している。

#### 3.3 振動制御基礎実験

模型実験装置を用いて予見制御に関する基礎的な効果確認実験を行った。実験では、外乱として、乱数を用いて作成した模擬ガイドウェイ高低変位を実車換算 500km/h 走行相当の時間遅れ

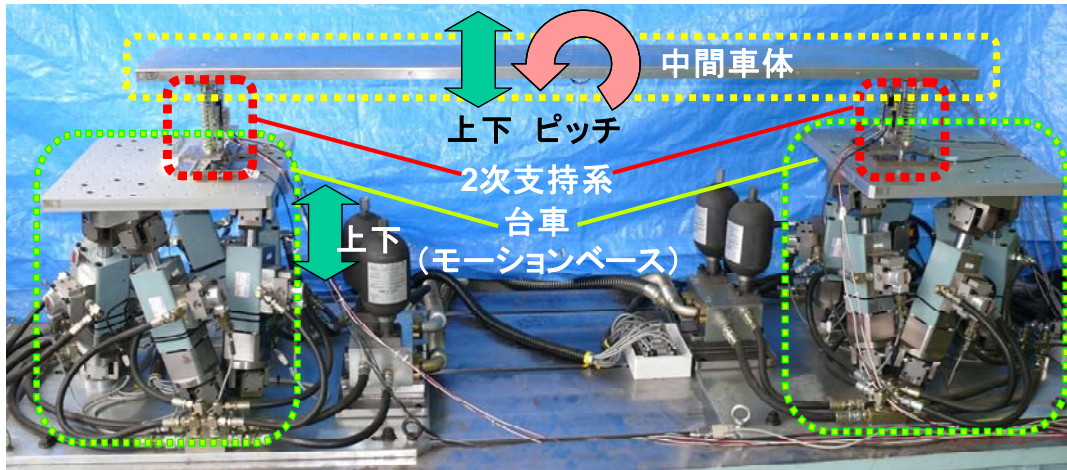


図 4 浮上式鉄道車両模型実験装置の外観

を持たせて前後台車に入力し、電磁アクチュエータを用いて予見制御およびフィードバックのみ（フィードフォワードゲインが 0）の LQ (linear quadratic) 制御を適用して、周波数領域で効果を比較した。

車体上下加速度 PSD の結果例を図 5 に示す。同図より、LQ 制御適用により、2 次支持系共振周波数の 3Hz 付近（現車約 1Hz に相当）のピークは約 1/3 に低減し、1 次支持系共振周波数の 17Hz 付近（現車約 5Hz に相当）のピークは約 1/2 に低減したことが確認できる。さらに、予見制御を適用することで、LQ 制御よりも振動低減効果が大きくなることが分かる。特に、3Hz 付近のピークはパッシブの約 1/4 に低減し、17Hz 付近のピークは約 1/4 に低減しており、予見制御による振動低減効果が確認できた。

また、各種制御方法の制振効果を定量的に評価するため、車体上下加速度 PSD の 1~34Hz（現車約 0.3~10Hz に相当）の帯域における実効値を算出し比較を行った結果、LQ 制御ではパッシブに比べて約 2dB 低減し、予見制御ではパッシブより約 4dB 低減することが確認できた。

#### 4. まとめ

計算機シミュレーションによる予見制御と電磁発生力を用いた振動制御についての制振効果の確認と、模型実験装置による予見制御適用時の制振効果について検証を行った。

なお、本研究は国庫補助を受けて実施した。

#### 参考文献

- 1) 星野宏則他：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, 2007
- 2) 鈴木江里光他：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, 2008
- 3) 坂本泰明他：零相誘導集電システムの開発, 鉄道総研報告, Vol. 19, No. 6, 2005

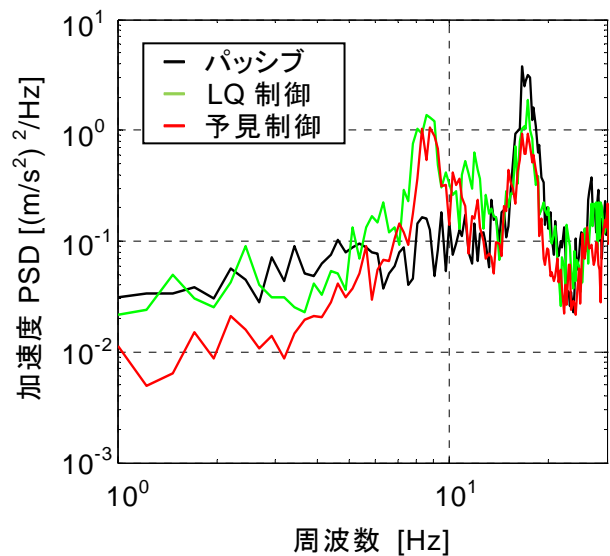


図 5 振動制御実験結果（車体上下加速度 PSD）