

模型装置による浮上式車両運動の検証

浮上式鉄道技術研究部 電磁力応用研究室

主任研究員 星野 宏則

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、一般的な在来方式鉄道車両と異なる特性を有する浮上式鉄道車両の運動特性を検証するために導入した浮上式鉄道車両模型実験装置(MAGMOX)の概要を紹介し、それを用いた試験例として編成車両における車両運動の検証結果を報告する。また浮上式車両の乗り心地向上策を提案し、それについて MAGMOX による検証結果と計算機シミュレーションの計算結果を紹介する。

2. 浮上式鉄道車両模型実験装置 MAGMOX¹⁾

2.1 概要

これまで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の解明や振動制御適用による乗り心地向上効果など、計算機シミュレーションによる検討が行われてきたが、新たにシミュレーション計算結果の検証のため、浮上式鉄道車両模型実験装置 MAGMOX (MAGlev MOdel vehicle dynamics eXperiment apparatus) を製作した。以下 MAGMOX の概要を記す。

台車部には 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式平行リンクモーションベース（応答周波数 50Hz まで）を採用した。車体は梁構造のアルミ製である。車体～台車間をコイルばね、小型油圧ダンパ、小型アクチュエータで結合して実車の 2 次支持系を模擬する。

現在 MAGMOX は縮尺の異なる 2 種類のシステムがある。編成車両運動検証用の MAGMOX-12(縮尺 1/12) と 1 車体の詳細な運動を検証するための MAGMOX-6(縮尺 1/6) である。2 つのシステムは車体と 2 次支持系部分は異なるが、台車部は共通で同じモーションベースを使用する。図 1 に MAGMOX-12 の外観を、図 2 に MAGMOX-6 の外観を示す。

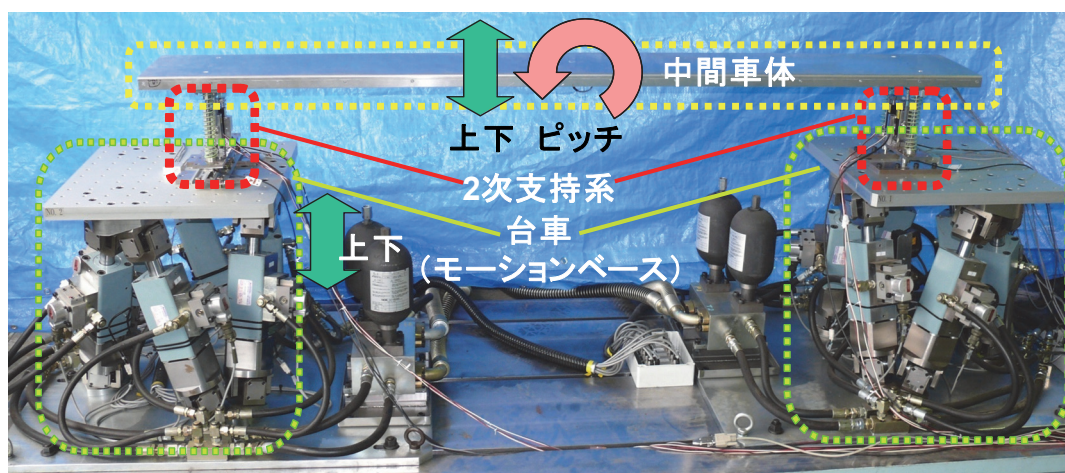


図 1 MAGMOX-12 の外観

2.2 MAGMOX-12

MAGMOX-12は縮尺1/12で、主に編成状態における車両挙動の検証を行う。2.5車体(2車体と半車体)+3台車までの試験が可能である(図3)。

MAGMOX-12では2次支持系の艤装空間スペースの関係で運動方向を上下方向のみに拘束しており、そのため装置としては車両挙動確認は上下ピッチ系に限定される。平行リンクモーションベースの応答周波数は50Hzまで可能であるが、相似則により、実車に換算すると約14.5Hzまでの運動再現が可能である。

2.3 MAGMOX-6

MAGMOX-6は縮尺1/6で、1車体+2台車での車両挙動の検証を行う。

MAGMOX-12と異なり運動方向は拘束なく6自由度すべての方向に動くことが可能となっている。そのため、1車体に限定されるが詳細な車両運動の検証を行うことができる。相似則により実車換算で約20Hzまでの運動再現が可能である。

2.4 台車(モーションベース)制御

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次支持系を構成するコイル・ダンパ・アクチュエータ下部に荷重計測器を設置し、その出力から相互作用力による台車運動への影響分をフィードバックできるように台車の運動方程式を立て、それをリアルタイムに解くことで台車変位を算出する台車制御を行っている(図4)。この制御を導入することで車体-台車間のアクチュエータによる相互作用力を模擬できるようになり、乗り心地向上のための振動制御則の検証等が可能となる。

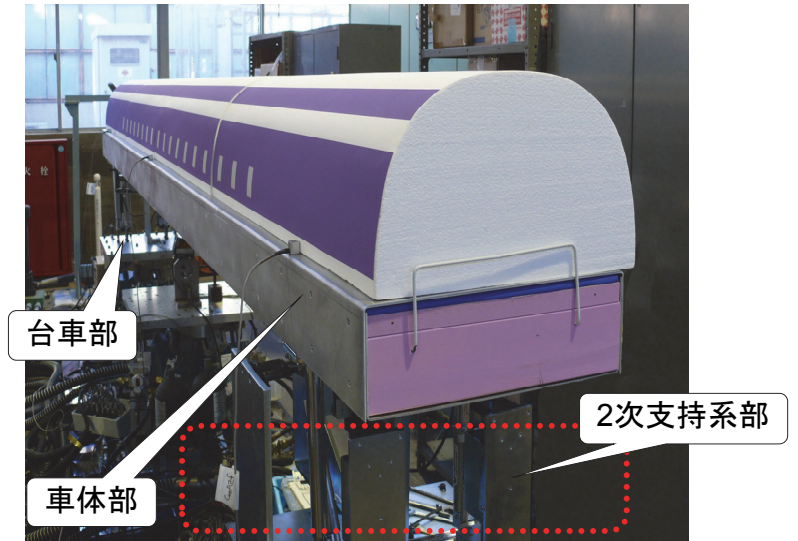


図2 MAGMOX-6の外観

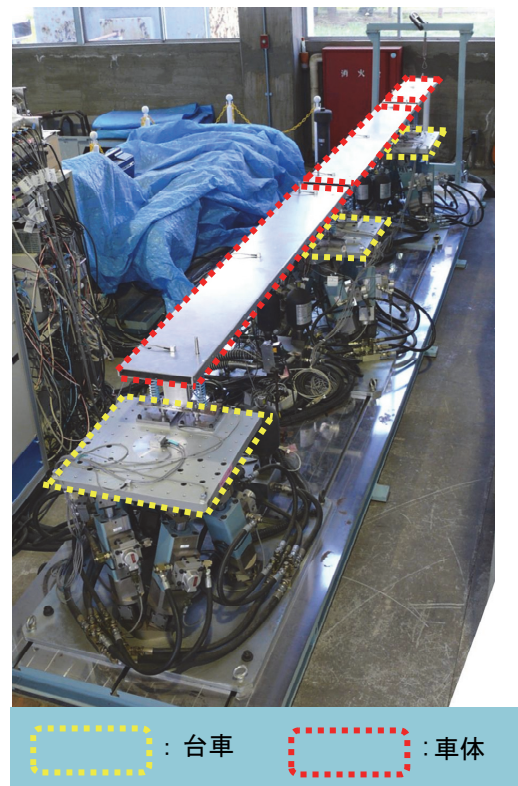


図3 MAGMOX-12 編成状態(2.5車体+3台車)

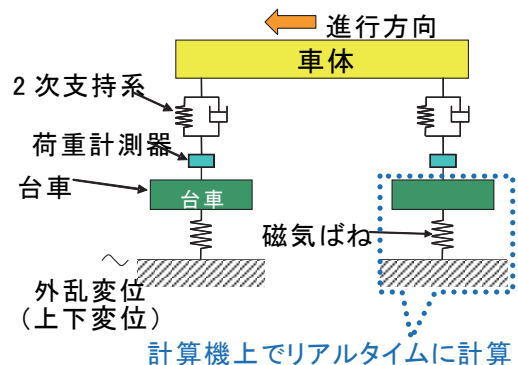


図4 相互作用力を考慮した台車制御

3. MAGMOX による編成車両検証試験例

浮上式車両の車体間には、在来鉄道車両と同様の連結器が取り付けられており、推力や制動力等の前後力を伝達している。連接台車方式の浮上式車両では、車端部の台車直上の床面は客室部に比べて一段高くなっており、連結器についても同様に客室床面よりも高い位置に取り付けられている。ここでは MAGMOX-12 の編成運動試験例として連結器取り付け高さと同様に客室床面よりも高い位置に取り付けられている。ここでは MAGMOX-12 の編成運動試験例として連結器取り付け高さと同様に客室床面よりも高い位置に取り付けられている。ここでは MAGMOX-12 の編成運動試験例として連結器取り付け高さと同様に客室床面よりも高い位置に取り付けられている。

MAGMOX-12 の車体間を繋ぐ連結器については、現車同様、回転運動の影響を避けるためボールジョイント構造のものを採用した。連結器取り付け位置が車両運動に与える効果を検証するため、図 5 に示すように、連結器取り付け位置を 4 通り選択可能とし、車体ピッチングの回転軸の高さが変わるようにした。連結器を取り付けない状態も含め、5 通りの状態を選択できるようにした。連結器の取り付け位置が④の場合について、連結器部外観を図 6 に示す。

試験結果を図 7 に示す。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る。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る。

4. 乗り心地改善のための振動制御特性検証

4.1 浮上式車両における振動制御則

浮上式車両の乗り心地改善のため以下の二つの振動制御則について検討している²⁾。

(1) LQ(最適線形) 制御

LQ 制御とは、重み付けした状態量と出力の 2 次形式を含む評価関数を定め、この評価関数を最小化する制御則を求めるフィードバック系の制御である。今回は状態量を車体中央上下加速度と車体～台車間相対変位、制御出力をアクチュエータ制御力として評価関数を決定した。

(2) 最適予見制御

最適予見制御とは、予見フィードフォワードと最適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車両に比べて高いため、より大きな制振効果が期待できる(図 8)。

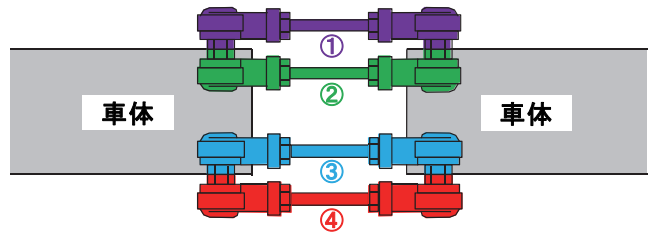


図 5 連結器取り付け高さのイメージ

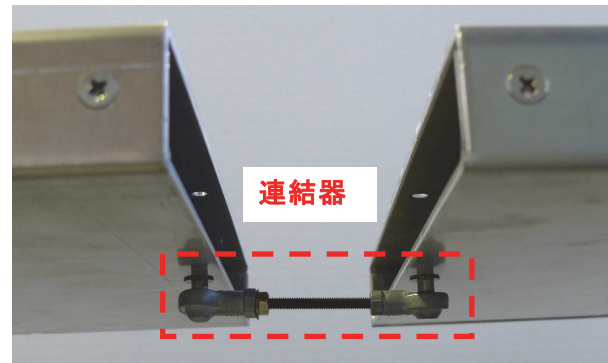


図 6 連結器部外観(連結器取り付け位置=④)

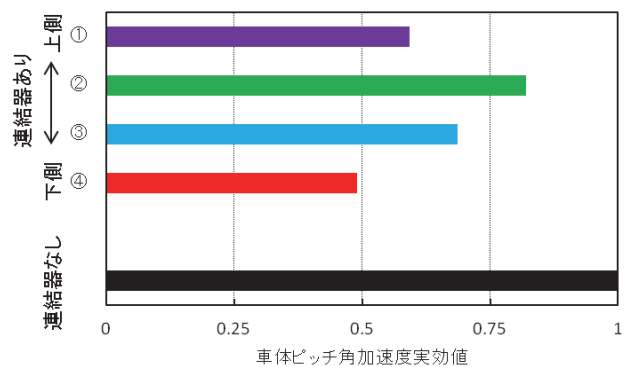


図 7 連結器高さと車体ピッチ角加速度 (角加速度ピーク付近 8.6~9.9Hz の実効値を正規化)

4.2 MAGMOX による振動制御特性確認

今回は、MAGMOX-12(1 車体+2 台車構成)において、模型の車体部を 3 車体 4 台車からなる編成の中間車体 (2 両目) と仮定し、先頭台車の振動情報を用いた制御システムを構築した LQ 制御と最適予測制御の 2 方式を模型実験装置に適用し、振動制御特性を確認した。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。試験結果 (中間車体上下加速度 PSD) を図 9 に示す。同図より、制御則の適用により車体振動加速度が効果的に低減されることがわかる。また最適予測制御は LQ 制御よりも制振効果が大きい。

4.3 計算機シミュレーションによる振動制御特性確認

前項と同様な検討を計算機シミュレーションで行った。計算モデルは浮上式鉄道車両の上下・ピッチ系運動を模擬した 3 車体・4 台車で、その他各種条件は MAGMOX と同等とした。LQ 制御と予測制御を適用した場合と誘導集電により発生する電磁力を利用した振動制御³⁾を適用した場合の計算機シミュレーション計算結果を図 10 に示す。振動制御適用により車体上下振動加速度 PSD を効果的に低減できることを確認した。

4. まとめ

浮上式模型実験装置 (MAGMOX) の概要を紹介し、編成車両における連結器による車両運動への影響および振動制御を適用した場合の車両運動の検証結果を報告した。

なお、本研究は国庫補助を受けて実施した。

参考文献

- 1) 渡邊健他：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. 3，2011
- 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

先頭台車の振動情報を後方車体の制御に利用

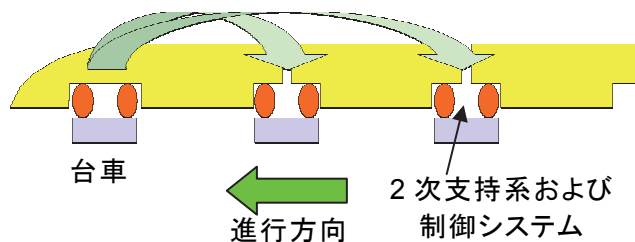


図 8 予測制御

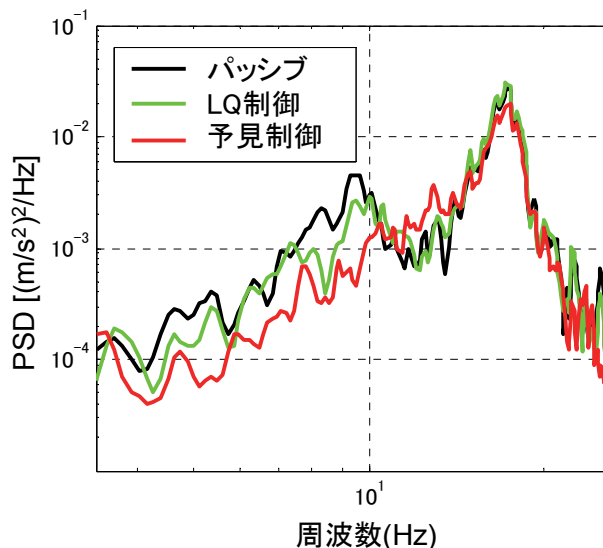


図 9 振動制御による振動低減効果 (MAGMOX)

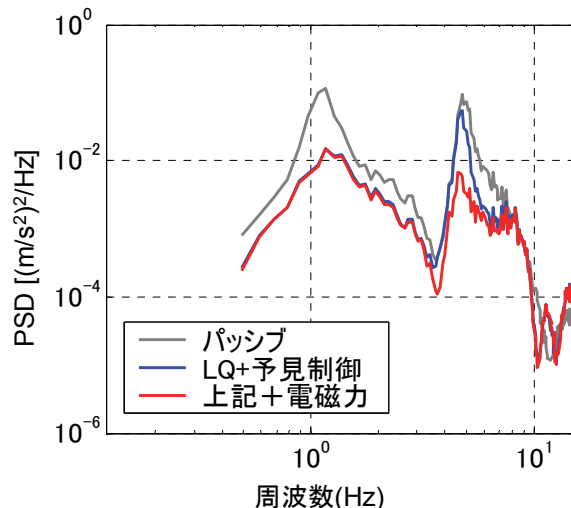


図 10 振動制御による振動低減効果
(計算機シミュレーション)