

浮上式鉄道における編成車両の運動特性

渡邊 健* 星野 宏則*
鈴木 江里光* 米津 武則*

Vehicle Motion Characteristics of a Maglev Train Set

Ken WATANABE Hironori HOSHINO
Erimitsu SUZUKI Takenori YONEZU

Superconducting magnetically levitated (Maglev) trains differ from conventional wheel-on-rail trains with respect to vehicle dynamics in two major aspects. One difference is that the primary suspension of the Maglev train is formed by electromagnetic springs with no physical contact between bogie and guideway, with spring stiffness that varies with the speed of the vehicle as well as the load on the bogie; the other is that the Maglev train consists of articulated bogies. This paper focuses on the vehicle dynamics of Maglev vehicles as a train set, and reports results of computations and experiments by a Maglev vehicle dynamics model experimental apparatus (MAGMOX), both using models of several car bodies and bogies.

キーワード：超電導磁気浮上式鉄道，編成車両の運動，模型試験，車両運動，連接台車，運動シミュレーション

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道車両(以下、浮上式鉄道車両)には、車両運動を考える上で重要な、一般的な在来方式鉄道とは大きく異なる特徴が2点ある。1つは磁気ばねによる台車～地上間の1次支持系を採用している点であり、もう1つは連接台車方式を採用している点である。

本論文では、編成車両としての浮上式鉄道車両の運動特性に着目し、計算機シミュレーションによる車両運動解析結果、および新たに車体と台車を追加して編成車両の運動再現が可能となった浮上式車両模型実験装置(以下、模型実験装置)による試験結果を報告する。

2. 浮上式鉄道の車両運動上の特徴

2.1 磁気ばね

鉄車輪・レールによる在来方式鉄道の1次支持系はコイルばね等を用いた軸ばねであるが、浮上式鉄道車両の1次支持系は、車上の超電導磁石(以下、SCM)とガイドウェイ側壁に取り付けられた地上コイルの電磁気的な相互作用により発生する磁気ばねである。この磁気ばねは、非接触であることに加え、車両の走行速度や台車の負担荷重等により、剛性が変化する特徴を有している。通常のばねは、ある方向に変位または角変位が生じるとそれと同方向にのみ復元力・モーメントが生じるが、磁

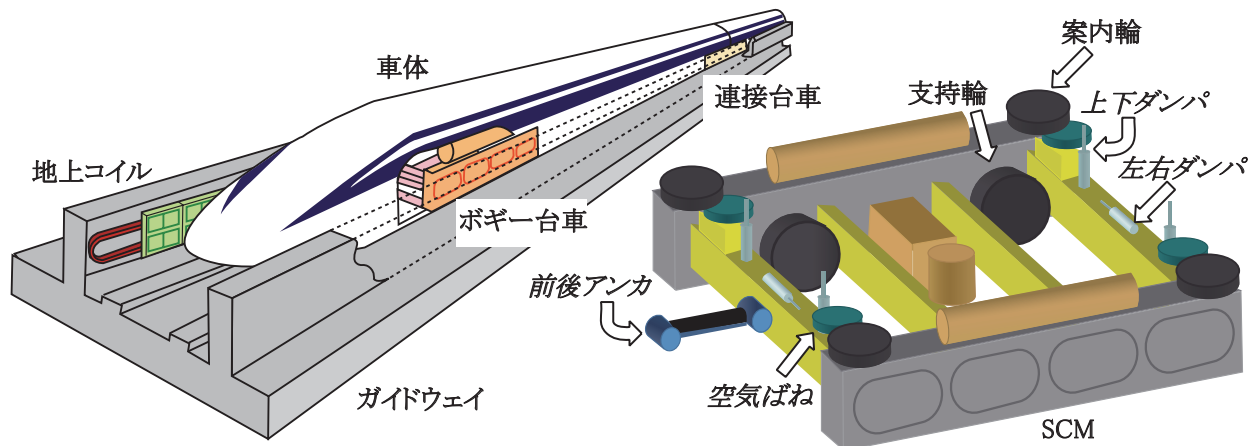


図1 浮上式鉄道車両と台車

* 浮上式鉄道技術研究部(電磁力応用)

特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

気ばねは、例えば、左右方向に変位した場合、左右方向の復元力に加え、ローリング方向とヨーイング方向のモーメントも発生する。このような特性を連成と呼び、前後・上下・ピッチング系でも発生する。浮上式鉄道車両の場合、特に左右・ローリングの連成が強く、低速での曲線通過時に車両運動に与える影響が大きい¹⁾。

また、在来方式鉄道車両の1次支持系では、一般的に振動減衰のための軸ダンパが取り付けられているが、浮上式鉄道車両の1次支持系にはパッシブな減衰要素はないため、磁気ばねに起因する振動加速度ピークが大きいという特徴もある。このピークは500km/h走行時に4～5Hz付近に存在し、上下方向の乗り心地へ与える影響が大きい。

2.2 接続台車方式

浮上式鉄道車両は、磁気シールド効果向上や低重心化による車両運動特性向上・空気抵抗低減等のため、先頭台車を除き、車体間に台車を配置する接続台車方式を採用している(図1)。この接続台車方式では、車体～台車間の2次支持系は、台車4隅に配置した空気ばねと車体～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(図1中斜体)、空気ばねおよびダンパはそれぞれ直上に位置する車体と結合するため、隣接車体間に作用する力は、車体間の連結器に加え、台車経路でも伝達される。このように、接続台車方式では、車体間の力の伝わり方がボギー台車方式とは異なるため、浮上式鉄道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が多い。

3. 編成車両の運動シミュレーション

3.1 計算モデル

編成状態の浮上式鉄道車両を対象とした車両運動シミュレーションについて報告する。

図1に示す通り、浮上式車両で採用している接続台車方式では、先頭車および後尾車の片端はボギー台車、もう一端は接続台車に接続され、中間車は両端とも接続台車に接続されている。接続台車側は空気ばねを介して車体と2点で結合しているが、ボギー台車側は4点結合になる。

表1 計算諸元例¹⁾

項目	数値
車体長(中間車)	24.3m
台車長	5.4m
車体質量(中間車)	14ton
台車質量	6ton
空気ばね上下ばね定数(1個)	0.2MN/m
上下ダンパ減衰係数(1本)	5kNs/m
上下磁気ばね定数(台車当たり)	5MN/m
ピッチング磁気ばね定数(台車当たり)	10MNm/rad

このため、先頭車と中間車の車両運動特性は若干異なるものになる。

計算モデルについては、線形領域で考えた場合、前後・上下・ピッチング系と、左右・ローリング・ヨーイング系に分けて考えることができる。今回は、前後・上下・ピッチング系を対象として編成車両モデルを構築した²⁾。

計算モデルの概要を図2に、計算諸元例を表1に示す。なお、本計算モデルでは、車体・台車は剛体とした。また、編成両数は可変で、中間車はすべて同一諸元とした。

3.2 計算機シミュレーション結果

前出の計算モデルを用いた浮上式編成車両の計算機シミュレーション例として、5両編成車両における連結器取り付け高さと同車体ピッチング角加速度の関係、および車体間ピッチングダンパによる乗り心地改善効果の検討例を報告する。以下の例では、走行速度はすべて500km/hとして検討を行った。

3.2.1 連結器取り付け高さと同車体ピッチング角加速度との関係

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。接続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。5両編成の計算モデルを用いて、この連結器の取り付け高さを変化させた場合について、車体

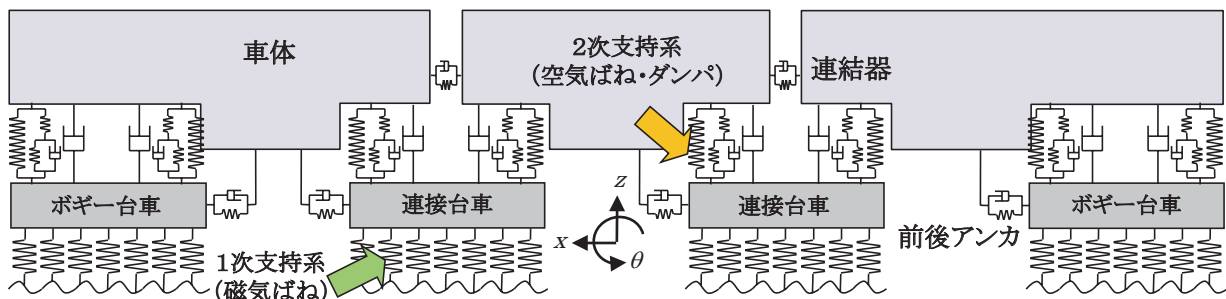


図2 前後・上下・ピッチング系計算モデル(3両編成の例)

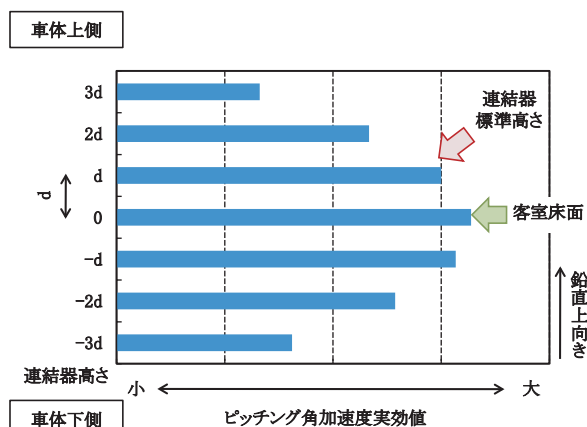


図3 中間車ピッチング角加速度実効値の比較

ピッチング角加速度との関係を調べた。

連結器の取り付け高さは、客室床面高さと同じにした場合を基準として、取り付け位置を上下させ、正弦波外乱に対する周波数応答により、3両目中間車のピッチング角加速度の実効値により評価を行った。ここで、車体加速度の周波数応答は、走行速度500km/h相当の台車間の時間遅れを加味した0.5～80Hzの上下正弦波外乱を、ガイドウェイ高低変位とし、磁気ばねを介して台車に入力し算出した。結果の例を図3に示す。

同図では、客室床面と標準取り付け高さの間の距離をdとして表した。同図より、連結器取り付け高さを客室床面と同じとした場合、ピッチング角加速度の実効値が最も大きく、床面高さよりも遠ざけるほど実効値が小さくなる傾向が見られた。

現車では貫通路や台車内の機器配置等の関係で、連結器取り付け高さの変更は難しいが、計算機シミュレーション上では、客室床面高さから離すほどピッチングの特性が改善されるという結果となった。

3.2.2 車体間ピッチングダンパによる乗り心地向上効果

在来鉄道車両では車体間の相対角変位を抑えるための車端ダンパが取り付けられており、高速走行時の乗り心地向上等の効果が得られている。現状の浮上式鉄道車両では、車体連結部の艤装空間や構造的な制約により、車

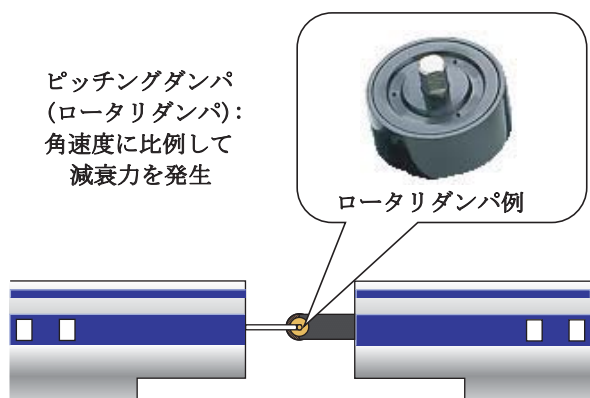


図4 ピッチングダンパのイメージ

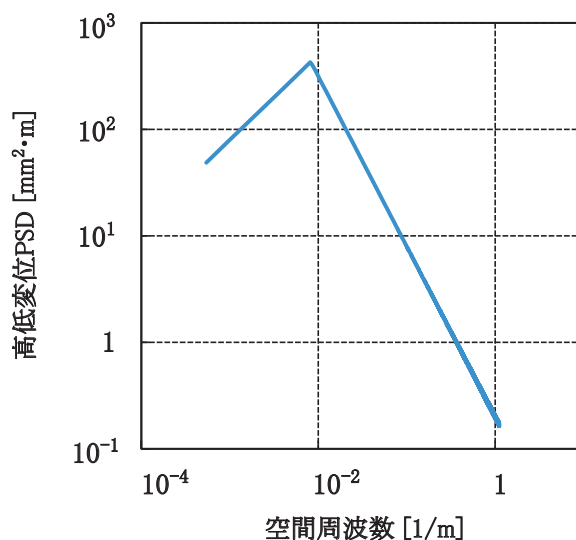


図5 模擬ガイドウェイ高低変位 PSD

端ダンパは取り付けられていない。しかしながら、高速走行時の車体間の相対角変位を抑制することは、編成車両の運動特性向上には有効であるため、本項では、前後・上下・ピッチング系の運動に着目し、車体の相対ピッチング角速度に比例して減衰モーメントを発生させるダンパ(ピッチングダンパ)の装着を仮定して、その効果を検討した。ピッチングダンパのイメージを図4に示す。

計算機シミュレーションでは、5両編成の計算モデルを用いて、図5に示すPSD(パワースペクトル密度; Power Spectral Density)を有する模擬ガイドウェイ高低変位を外乱として入力し、時間歴応答波形から車体端部の上下加速度PSDを求めた(図6)。ピッチングダンパの効果は、3両目車端部の上下加速度から算出した乗り心地レベルで評価した。

ピッチングダンパの減衰係数が上下乗り心地レベルに与える影響を検討した結果の例を図7に示す。同図より、ピッチングダンパ装着により、上下乗り心地レベルが、

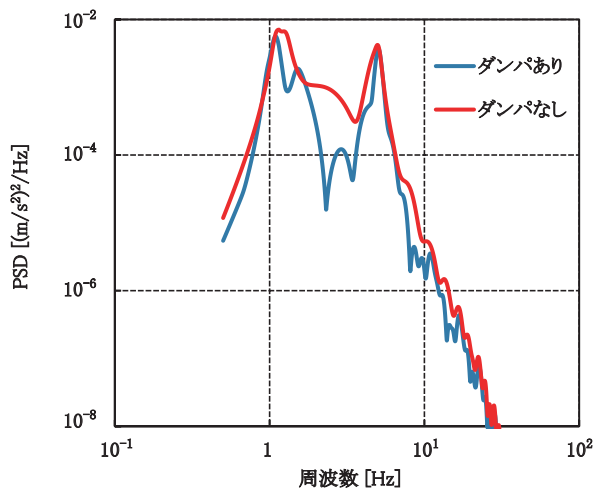


図6 車端部上下加速度 PSD の比較例

(ピッチングダンパ減衰係数: 1.0×10^2 (MN・m・s/rad))

特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

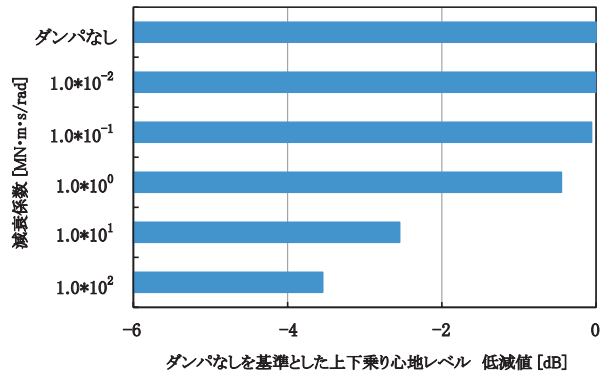


図7 車体間ピッチングダンパの効果

ダンパなしの状態に比べて最大4dB程度向上できることが確認できた。

4. 浮上式車両模型実験装置による編成車両の運動再現

4.1 浮上式車両模型実験装置

4.1.1 実験装置の概要

浮上式車両模型実験装置は、浮上式鉄道車両の走行中の運動を模擬し、計算機シミュレーション検証や振動制御効果確認等のために製作した^{3), 4)}。車体は1/12縮尺で、2.5車体+3台車までの構成が可能である。図8に模型実験装置の外観を示す。各台車・車体の諸元は文献³⁾に記載されているものと基本的に同一である。模型実験装置では、重力場での実験のため、加速度が一致するよう相似則を決定した。このため、周波数は現車の約3.4 ($\sqrt{12}$) 倍となり、例えば、5Hz付近に存在する1次支持系に起因する加速度ピークは、1/12縮尺の模型では約17Hzとなる。

2次支持系部については、改良を行うことにより車両運動再現性を向上させることができた⁵⁾。図9に改良後の2次支持系部の外観を示す。

本模型実験装置の特徴としては、台車の運動自体を6自由度の油圧モーションベース(スチュワート型平行リンク方式)で行うことにより、機械ばねでは難しい磁気ばねの連成による運動を再現したことで、また、2次支持系下部にロードセルを設置し、車体～台車間の相互作用力を測定して台車制御に用いることで、車体・台車の連成系の運動を再現したことが挙げられる。

この連成系の運動再現により、車体～台車間の相互作用力の変化が台車運動にリアルタイムで反映できるため、2次支持系へのアクティブサスペンションによる振動制御の適用が可能となっており、このための電磁アクチュエータ(シャフトモータ)をコイルばねと並列に取り付けてある。

なお、今回使用した1/12縮尺の車体では、2次支持系

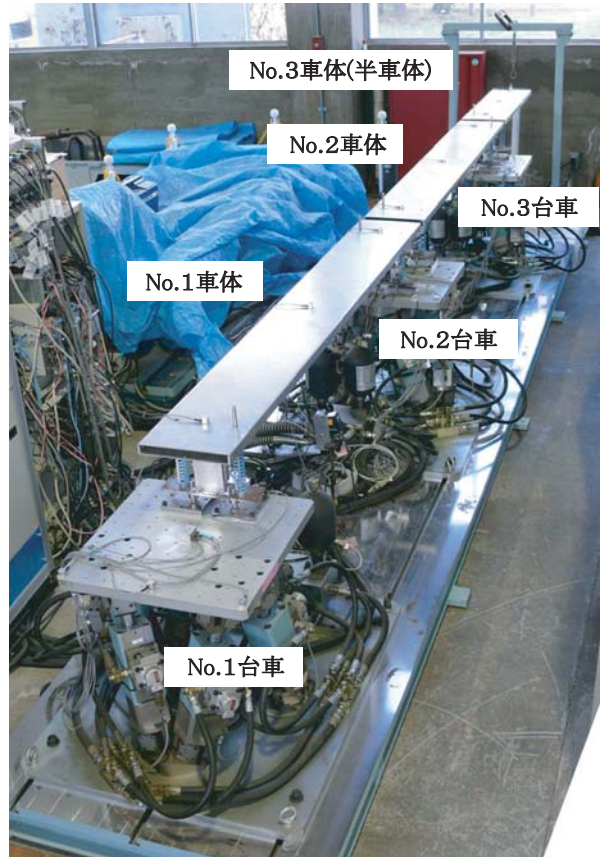


図8 浮上式車両模型実験装置外観(2.5両編成)

付近の艤装空間の制約等のため、台車は上下方向のみ、車体は上下・ピッチング方向のみの運動に限定して実験を行っている。

4.1.2 編成車両への対応

編成車両の運動を再現するため、新たに車体と台車を追加製作した。今回新たに追加した車体は、先頭車の運動を再現するための片端ボギー・片端接続構造のものと、既存車体と同様の両端接続構造のものを製作した。その他、車体長を中間車の半分とした半車体も製作している。この半車体では、片端が接続構造で、もう片端は

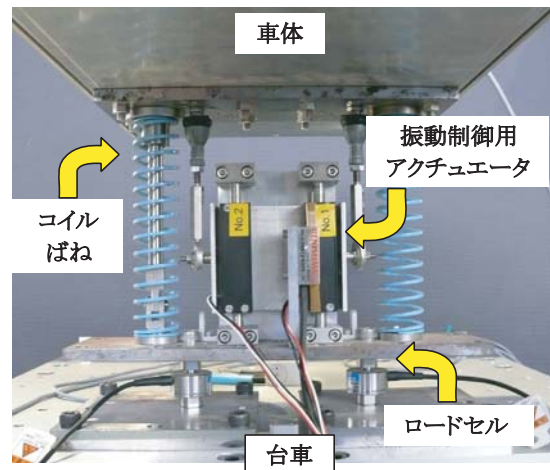


図9 2次支持系部外観

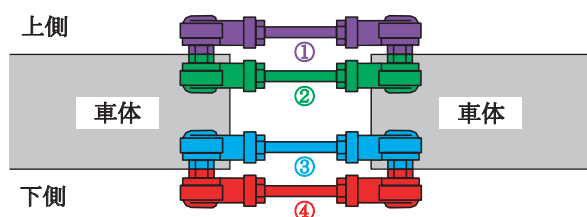


図10 連結器取り付け位置のイメージ

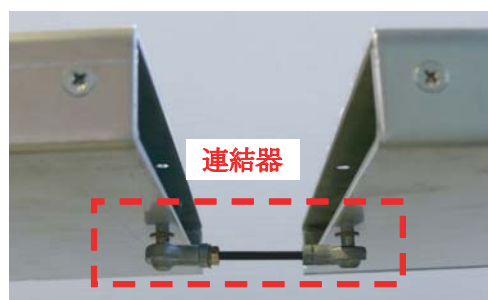


図11 連結器部外観（連結器取り付け位置=④）

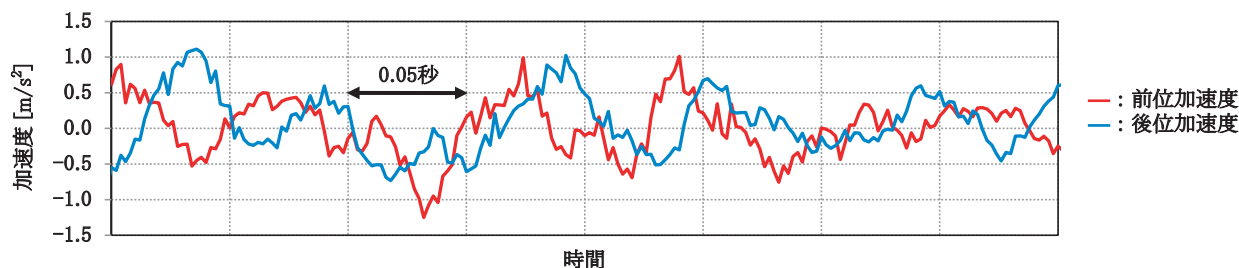


図12 No.1車体上下加速度時系列波形例（連結器取り付け位置=④）

ワイヤで吊り下げて自由端とした。

これら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を備えたものとした。また、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10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（⑤）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11に示す。

4.2 試験結果

模型実験装置を用いて、2次支持系の振動制御を行わないパッシブ系について上下・ピッチング系の編成車両運動再現試験を行い、計算機シミュレーション結果との比較を行い、編成車両の運動再現を確認した。

今回の試験においては、5両編成のうち先頭車を除く中間3両を模擬している。模型実験装置では、台車（モーションベース）を、2次支持系からの相互作用力とガイドウェイ高低変位を外乱とする上下1自由度系とみなし、リアルタイムで運動方程式を解いて上下変位を求め、台車を変位制御している。模擬ガイドウェイ高低変位は、文献3)に記載されているものを用いた。

連結器が前述の5通りの場合について試験を行い、外乱を与えた時の台車・車体加速度を測定した。なお、試験結果においては、図8のNo.1車体を評価した。

試験結果の一例として、連結器取り付け位置が④の場合のNo.1車体の前位、後位の上下加速度の時系列波形例を図12に示す。また、この時系列波形から求めたNo.1車体前位、および後位の上下加速度PSDの例を図13に

示す。図13より、1車体+2台車でいった結果⁵⁾と同様に、17Hz付近に1次支持系に起因する加速度ピークが現れていることが分かる。その他、5～9Hz付近に現われているピークは、2次支持系に起因する加速度ピークと車体ピッチングに起因する加速度ピークが合わさっているものと考えられる。

次に、編成車両としての車両運動特性を確認するため、車体間連結器の有無、および連結器取り付け位置が車体ピッチング角加速度に及ぼす影響を検討した。

連結器取り付け状態が④、⑤の場合について、ピッチング角加速度PSDを図14に示す。⑤（連結器なし）の場合、車体ピッチングに起因する加速度ピークが約8Hzに現れている。しかし、取り付け位置が④の場合、車体ピッチング角加速度のピークは低減され、ほとんど判別できないため、連結器の車体間拘束によるピッチング低減効果を確認することができたと考えられる。

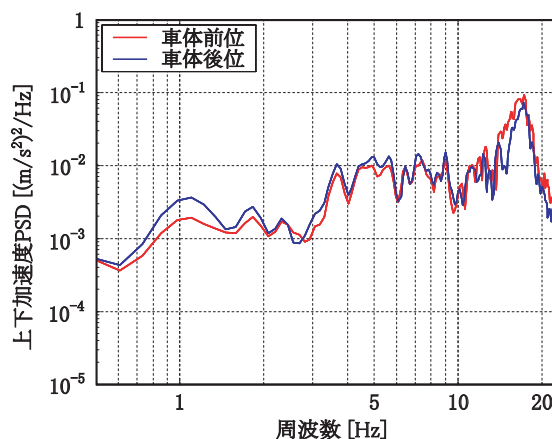


図13 No.1車体上下加速度PSD例（連結器取り付け位置=④）

特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

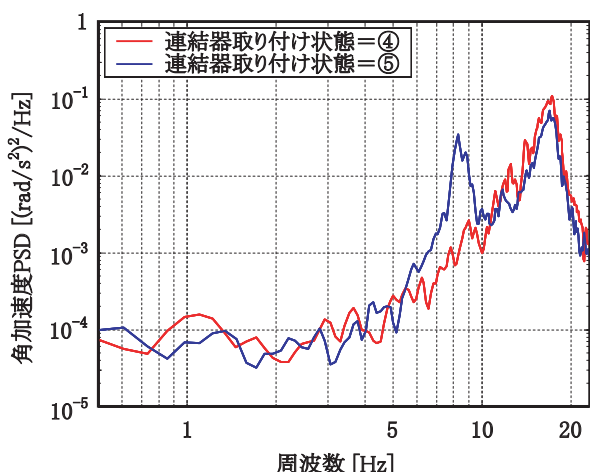


図14 No.1車体ピッチング角加速度 PSD 例

次に、連結器取り付け位置が、前述の約8 Hz付近の車体ピッチングに起因する角加速度ピークに与える影響を検討した。連結器取り付け状態①～⑤の場合について、No.1車体ピッチング角加速度PSDを上記ピークの近傍(8.6～9.9Hz)の範囲で積分して、角加速度実効値により比較を行った。結果の例を図15に示す。なお、同図は⑤(連結器なし)の場合の値で正規化してある。

同図より、連結器位置がいずれの場合も、連結器なしの場合より値が小さくなっていることが分かる。また、連結器取り付け位置が車体中心から離れるほどピッチング角加速度の実効値は小さくなっている。この結果は、前述の計算機シミュレーション結果と傾向が一致している。

本模型実験装置で用いた連結器は艀装空間の制約から現車の連結器のパラメータを正確に再現したものではないため、模型試験結果が現車を想定した計算機シミュレーション結果と定量的に一致させることは難しいが、模型試験で定性的な比較検討は可能である。

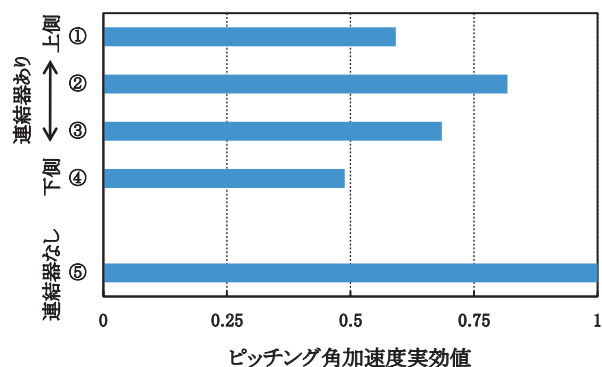


図15 No.1車体ピッチング角加速度実効値比較例

5. 結論

浮上式鉄道車両の編成としての車両運動に着目し、車体の上下およびピッチング方向の運動特性についての検討結果をまとめた。

- ・車体間ピッチングダンパ取り付けにより、乗り心地改善効果が得られることを車両運動シミュレーションにより検証した。
- ・車体間連結器の取り付け高さが車体ピッチングに与える影響について、計算機シミュレーション結果と模型実験装置の試験結果により検証した。

今回検証した上記2例は、いずれも、艀装空間や構造的な制約のため、現車試験では実施困難な例であり、このような試験条件の再現という観点から、計算機シミュレーションおよび模型実験装置による試験の有用性が示されたと考えられる。

6. おわりに

今後、模型実験装置を用い、編成車両における各種振動制御則による制振効果⁶⁾の検証、および新たに製作する大型車体模型を用いた前後・左右・ローリング方向への自由度拡張による検証試験を行う予定である。

なお、本研究は国土交通省からの国庫補助を受けて実施した。

文献

- 1) 吉岡博, 渡邊健:側壁浮上システムにおける車両運動特性, 鉄道総研報告, Vol. 8, No. 10, pp. 29-34, 1994
- 2) 吉岡博:磁気浮上車両の運動モデル, 鉄道総研報告, Vol. 2, No. 6, pp. 17-22, 1988
- 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) 渡邊健, 鈴木江里光, 米津武則, 星野宏則:模型実験装置による浮上式鉄道車両の運動模擬, 日本機械学会2009年度年次大会講演論文集, Vol. 7, pp. 195-196, 2009
- 5) Suzuki, E., Watanabe, K., Hoshino, H., Yonezu, T. and Nagai, M., "A Study of Maglev Vehicle Dynamics Using a Reduced-Scale Vehicle Model Experiment Apparatus", *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, Vol. 3, No. 1, pp.196-205, 2010.
- 6) Suzuki, E., Watanabe, E., Hoshino, H. and Nagai, M., "An Examination of Active Electromagnetic and Mechanical Suspension Control of Superconducting Maglev Vehicles", 日本AEM学会誌, Vol.17, No.2, pp.324-330, 2009.