

## S1-4-5

### 山梨リニアにおける浮き床構造による

#### 乗り心地向上と車内騒音の低減

[機] ○角田 裕樹 [機] 菅沢 正浩 [機] 林 孝一 北村 洋介

(東海旅客鉄道(株))

Improvement in Riding Quality and Noise Reduction by "Floating Floor Panels" for JR-Maglev  
Hiroki Tsunoda, Masahiro Sugawara, Koichi Hayashi, Yosuke Kitamura (Central Japan Railway Company)

The higher the running speed, the larger the vehicle vibration. At speeds of around 500km/h, high-frequency band vibrations in a frequency range of over 20Hz are more apparent. The frequency curve of riding quality standard (ISO2631-1) indicates that humans are not sensitive to vibrations with a frequency of over 20Hz, however the feeling test results obtained through using a vehicle dynamic simulator show that riding quality is influenced by vibrations in a frequency range of over 20Hz. And, that higher-frequency vibration causes low frequency internal noise. With further increases in speed the new problems of high frequency vibrations and low frequency internal noise occur.

To solve these problems, "floating floor panels" that are mounted on rubber devices were newly designed. The rubber devices are installed between floor frames and floor panels to cut off vibrations and noise from underbody parts. Running tests by using the "floating floor panels" were carried out on the Yamanashi Maglev Test Line and its effectiveness was verified.

キーワード：浮き床、高周波振動、車内騒音、快適性

Keyword: Floating Floor Panels, high frequency vibrations, internal noise, riding comfort

### 1. はじめに

山梨リニア実験線では、1997年4月の走行試験開始以来8年が経過した。この間に高速走行試験、高速すれ違い試験、信頼性耐久性確認試験、異常時試験等、様々な試験を重ね、2005年3月には、国土交通省主催の超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会において「実用化の基盤技術が確立した」との評価を得た。現在は、技術のさらなるレベルアップに取り組んでおり、超電導リニアの完成度をさらに高めていく段階となっている。

車内の快適性の向上は、より高いレベルの課題の一つである。リニア車両の振動は、速度の向上とともに大きくなり、500km/hに近付くと、特に20Hz以上の高周波域の上下成分(以下、ビビリ振動)が大きく感じられるようになる。乗心地に関する従来の周波数曲線(ISO2631-1)では、20Hz以上の領域は人間の感受性が低いものとして扱われているが、車両運動総合シミュレータ<sup>[1]</sup>によりこの周波数域の振動を体感すると、この領域の振動が乗心地に与える影響は比較的大きいものであることが分かった。また、これより高い周波数領域の振動は騒音として聴感にも影響を与える。

リニア車両の超高速化に伴い、高周波振動及び車内騒音の低減という新たな課題が浮かび上がったこととなる。

これらの改善に向け、我々は客室の床板と床フレームの間に支持ばねをはさんだ「浮き床構造」により、床下からの振動と騒音を客室内に伝搬させない構造を検討した。そして、現車による走行試験でその効果を確認することができた。

本稿では、リニア車両の振動・騒音特性の分析と、これらを低減する最適な浮き床構造の検討経緯、試験の内容、及び振動・騒音低減結果について述べる。

### 2. 超高速域での車両振動特性とその体感

#### 2.1 リニア車両振動特性

リニア車両の構成は、大きく「地上コイル(従来鉄道のレールとモータに相当)」「磁石・台車」「車体」に分けることができる。「地上コイル」と「磁石・台車」の間には磁気バネ要素がある。「磁石・台車」と「車体」の間には空気ばねとダンパ(左右方向はセミアクティブダンパ)を設置しており、車体の振動を抑制している。また、山梨実験線の地上側構造物の特性に起因する11Hz(500km/h走行時)の外

乱成分と車体の一次曲げ固有振動が一致しないよう、車体の剛性をより高く設定する等の工夫をしており、10Hz 近傍以下の周波数領域の車両振動は、左右方向においては新幹線並みに低いレベルを実現している。しかし、500km/h のような超高速域では、高周波領域上下方向成分のビビリ振動が大きくなり、乗り心地に影響を与えていることが体感上わかっている。図1にリニア車両の客室床面の振動加速度を周波数解析した結果を示す。高周波の領域で大きい振動が発生していることがわかる。

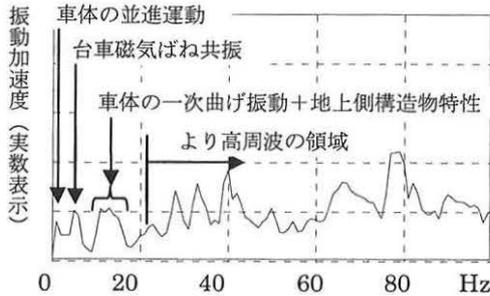


図1 リニア車両床面の上下振動状況 (M4 中間車中央部 トンネル内 500km/h)

## 2.2 車両運動総合シミュレータによる体感調査

リニア車両において超高速域で体感されるビビリ振動は、どの周波数領域の振動であるかを把握するため、当社所有の車両運動総合シミュレータによりリニア車両の振動を再現し、体感によりビビリ振動の周波数域を割り出すこととした。(当シミュレータは、上下左右前後方向の運動とそれぞれの軸回りの回転運動を再現でき、また、上下左右前後方向については 40Hz までの高周波振動も再現することができる装置である。)

リニア車両の振動を再現したところ、床面振動加速度及び体感上、実走行時の振動状況を模擬でき、500km/h 走行時に感じられるビビリ振動もほぼ再現できた。そして、再現したリニア車両の振動から、①周波数 30Hz 以上の上下成分を除いた場合、②周波数 20Hz 以上の上下成分を除いた場合、③周波数 10Hz 以上の上下成分を除いた場合、の振動を体感したところ、周波数 20Hz 以上の上下成分を除いた場合に、これまで感じられていたビビリ振動が抑制され、乗り心地が大きく向上することが判明した。

この領域の振動は、従来鉄道では軌道不整及び車輪歪・車軸質量不平衡等での発生はあるが、顕著には見られない振動である。乗り心地に関する評価として用いられている周波数毎の重みをつけた乗り心地フィルター (ISO2631-1) (図2 参照) では、20Hz 以上の領域は人間の感受性は比較的低いものとして扱われている。これは、従来鉄道の速度領域では 20Hz 以上の上下振動成分が小さく乗り心地上の関与が小さかったためであるが、実はこの領域の振動低減も乗り心地向上に有効な手段であることがわかった。

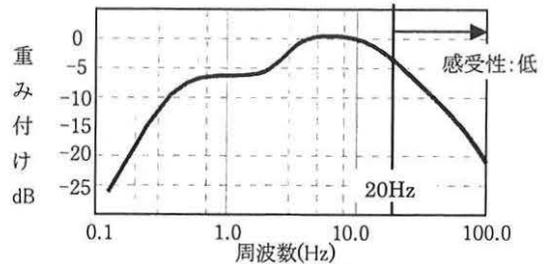


図2 ISO2631-1 乗り心地フィルター

## 3. リニア車両車内騒音特性

超高速で走行するリニア車両にとって車内騒音の主体は、速度の6乗に比例して大きくなる空力音である。これまでの調査により、主な空力騒音源は台車付近にあり、それがガイドウェイ内を伝播して車体底部から車内に侵入してくるルートと、トンネル壁面に反射して車体の側や天井から侵入してくるルートが存在することがわかっている。車体底部から車内に侵入してくる騒音の伝播経路のうち主体的な一つとして、車体の底部外板が音響加振され、それが構体構造を固体伝播して客室床面に伝わり、床面から音として車内に放射される経路がある。

図3にリニア車両客室内の騒音特性を示す。主な周波数領域は 100Hz~200Hz と比較的低周波領域である。

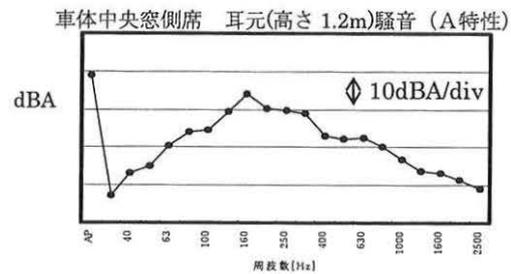


図3 リニア車両の車内騒音状況 (M4 中間車 トンネル内 500km/h)

## 4. 高周波振動、車内騒音低減方策

### 4.1 ビビリ振動の加振源

図4に、リニア車両の 500km/h 走行時の車体側面下部の圧力変動特性を示す。20~60Hz の周波数域で大きな圧力変動を示している。

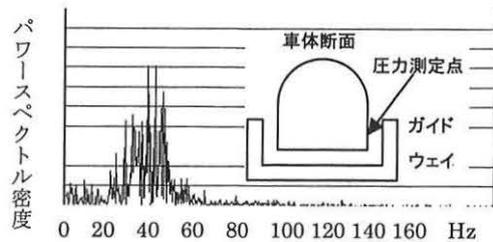


図4 車体側面下部圧力変動 (M4 中間車中央付近 北側面下部 トンネル内 500km/h)

圧力変動のレベルは前方台車に近い位置ほど大きく、前方台車で発生した空気の乱れがガイドウェイ内を伝播し、その下流にある車体を加振していると考えられる。(図5参照) 前述の騒音源も同じようなメカニズムと考えられ、ビビリ振動の加振源も車内騒音の加振源もガイドウェイ内の空気の乱れによる空力加振である可能性が高い。

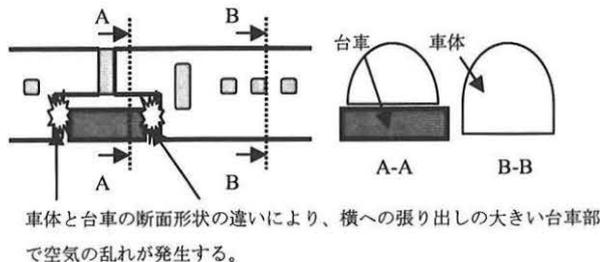


図5 台車部での空気の乱れの発生

先述したように、軌道不整等により発生する振動は、磁気ばねや空気ばね等により抑制されているが、空力加振のように車体に直接作用する振動は、構体構造を通してそのまま客室床板に伝播してしまう。これが、超高速域で感じられるビビリ振動の発生原因と考えている。(図6参照)

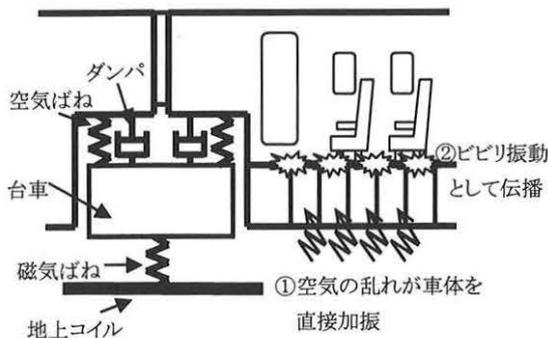


図6 ビビリ振動の伝播

#### 4.2 浮き床による振動及び騒音抑制の検討

車体が直接空力加振されている以上、従来の空気ばね等で振動を吸収することはできない。そこで、従来剛結合している床板と床フレームの間に振動抑制デバイスを挿入し、床板を構体構造に対し振動絶縁する浮き床構造を検討することとした。図7にその概念図を示す。

デバイスには、①20~40Hz領域の上下振動を抑制し、②前後左右振動は現状非悪化とし、③積車時のたわみは乗客通行性(座席部床板~通路部床板間段差抑制)を考慮して数mm程度に抑えることが必要で、また、④不燃性(または難燃性)、⑤クリープが小さくメンテナンスフリー、⑥軽量低コストであることが求められる。

機械の防振等に使用されている各種ばねのうち、これらの条件を満たすものを選定し、リニア車両用に改良を加え、以下の2つのタイプについて試験を実施することとした。

##### (1) 軟支持タイプ

20~30Hzを防振域とする仕様。ばねは比較的軟らかい。

##### (2) 硬支持タイプ

内部減衰の高いゴムで振動エネルギーを吸収する仕様。ゴムは比較的硬い。

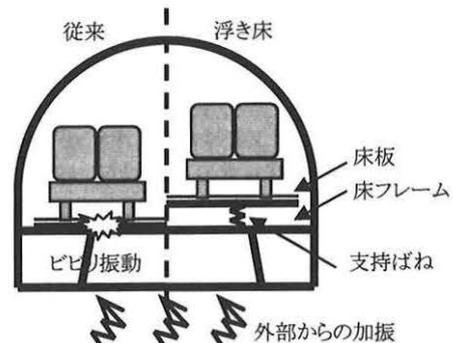


図7 浮き床概念図

#### 5. 浮き床の効果

##### 5.1 先行試験

上記の2タイプについて、車両運動総合シミュレータによる定置試験を実施し、さらに、山梨実験線車両の一部を浮き床に改造して先行現車試験を実施した。その結果、以下の結論を得た。

##### (1) 軟支持タイプ(防振域12Hz以上)

体感上、軟支持タイプは従来固定床よりも乗り心地が向上した。ビビリ振動の低減も体感できた。床板の上下振動データでも20Hz以上の領域の振動が従来より低減していることが確認できた。

##### (2) 硬支持タイプ(減衰域20~30Hz)

体感上、硬支持タイプは従来固定床より乗り心地が悪化した。床板の振動データでも従来より振動が増幅している。

なお、浮き床とすると、床フレームと床板の剛結合がなくなるため、床フレームの剛性は従来より低くなり床フレームの振動は大きくなる。軟支持タイプでは、床フレームの振動は大きくなるものの、それを上回る防振効果により床板の振動は従来固定床より低減できたが、硬支持タイプでは、床フレームの振動増分を吸収しきれず、従来より振動が増大する結果になった。

##### 5.2 山梨実験線車両への導入

先行試験の結果、軟支持タイプが乗り心地向上に有利であることから、軟支持タイプ浮き床を山梨実験線車両に展開することとした。先行試験では防振域を12Hz以上に設定したが、最適なばね定数をさらに模索するため再度車両運動総合シミュレータにより定置試験を実施した結果、支持ばねをより軟らかくし、さらに低い周波数域まで防振域とするほうが有利であることがわかった。床板を安定的に支持する必要点数や床板強度、積車時たわみ量等を勘案し、現車に展開する浮き床の防振域は8.5Hz以上となるよう調整することとし、以下の3種の支持ばねを適度に組合せて構成することとした。

- ・支持ばね1 ばね定数:1 (基準値) (横剛性:低)
- ・支持ばね2 ばね定数:1.5 (横剛性:低)
- ・支持ばね3 ばね定数:2.5 (横剛性:高)

なお、軟らかい支持ばねのみで構成すると横方向の剛性が不足し、床板全体が前後左右に変位することから、横剛性の高い「支持ばね3」を組み合わせる最適な構成を実現した。支持ばねの断面図を図8に示す。

最終形態で使用している支持ばねは1座席(定員2名)あたり6個で、重量は座席重量の1割以下に収めることができた。また、結果として理論上の浮き床の防振域は9.8Hz以上となった。これが現構成において実現しうる最も軟らかい構成である。

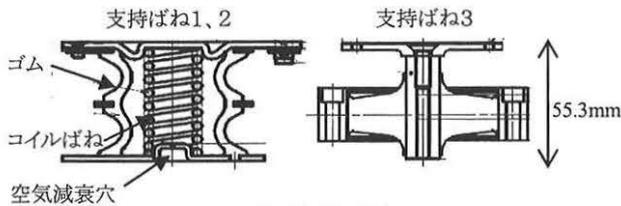


図8 支持ばね断面図

### 5.3 高周波振動低減効果

図9に改修前後の床板振動状況を示す。20~40Hzの領域で振動が大きく低減している。体感でも、ビビリ振動の低減が確認できた。

しかし、10Hz領域において若干の振動増幅が見られる。防振領域は単純なバネマス系で計算すると9.8Hz以上の領域となるが、現実の防振領域は15Hz以上にとどまっている。これは、床板に乗っている人間は単なるマスではなく、ダンピング要素を持っており、単純なバネマス系としては扱えないためである。

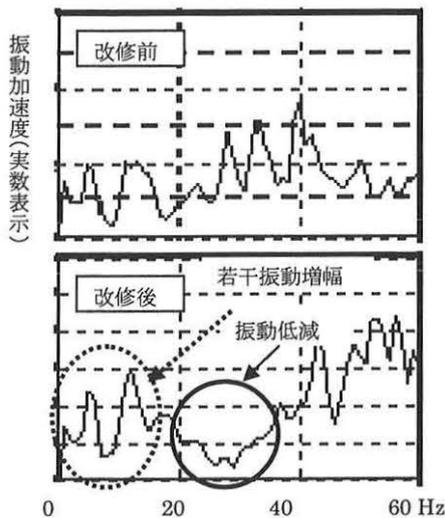


図9 上下振動低減効果

(M4 中間車中央部床板 500km/h)

### 5.4 車内騒音低減効果

図10に改修前後の車内騒音状況を示す。明かり区間で△

3dB(OA 値)という大きな騒音低減が実現できた。騒音対策としては、浮き床構造導入のほかにも、制振性能を有する高剛性床板を新たに開発して搭載しており、騒音低減効果にはこの効果も含んでいる。

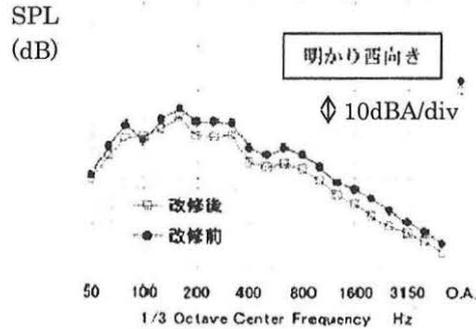


図10 騒音低減効果

(M4 中間車 通路側席耳元(高さ1.2m) 500km/h)

## 6. まとめ

リニア車両において課題となっていた超高速域での高周波振動(ビビリ振動)の低減について検討し、以下のことがわかった。

- ・ビビリ振動は、20Hz以上の高周波振動であると考えられる。これまで乗り心地重視されていなかった領域の振動であるが、この領域の振動も乗り心地考慮すべきである。
- ・浮き床構造によりビビリ振動が抑制でき、乗り心地を向上することができる。
- ・浮き床構造は、車体底部からの音響加振固体伝播成分も抑制でき、車内騒音の低減に有効である。

## 7. 今後の展開

浮き床化により、床板と床フレームの剛結合がなくなり、床フレームの振動が増大しているため、これが乗り心地に与える影響を検討し、床フレーム基本支持構造を含めた全体構造の最適化を図る。さらに、腰掛まで含めた総合的な乗り心地向上策を検討する。

また、床板支持ばねに減衰性能を付加し、更なる振動低減を可能とする高性能支持ばねを開発する。

騒音低減に向けては、質量則によらない高遮音内装材を開発し、側や天井からの透過音低減に努める。

今後も超高速車両の更なる車内快適性の向上に努め、リニア車両の完成度を高めていく計画である。

### 参考文献

- [1]林他、機械学会年次大会講演論文集、2003、211-212