

車体上下振動を低減して 乗り心地を向上する

走行中の鉄道車両に発生する振動は、乗客の乗り心地に影響を与えており、快適性向上の観点から、車体振動を低減することが重要な課題になっています。ここでは、そのなかでも車体の上下方向の振動に着目し、その発生メカニズムを整理したうえで、振動低減の考え方、方針について説明します。また、これらの方針の種類ごとに、具体的な振動低減対策について、おもに鉄道総研が開発した手法を中心に実例を交えて紹介し、その効果を検証した結果について示します。



瀧上 唯夫
Tadao Takigami
車両構造技術研究部
車両振動研究室
室長
【専門分野】 振動工学、
制御工学、車体弾性振
動、振動解析



秋山 裕喜
Yuki Akiyama
車両構造技術研究部
車両振動研究室
副主任研究員
【専門分野】 機械力学、
振動工学、車体弾性振
動、振動解析



相田 健一郎
Ken-ichiro Aida
車両構造技術研究部
車両振動研究室
副主任研究員
【専門分野】 車体構造、
車両振動

はじめに

走行中の鉄道車両に発生する振動は、乗客の乗り心地に大きな影響を与える要因となっています。このうち、左右方向の振動については、20年ほど前から制御技術の導入が本格的に進み、乗り心地が飛躍的に向上しました。これにより、近年は上下方向の振動低減が重要な課題になっています。

ここでは、車体上下振動の発生メカニズムについて整理したうえで、振動低減の考え方、具体的な低減手法について実例を交えて紹介し、その効果の検証結果を示します。

車体上下振動発生メカニズム

車体上下振動が発生する原因（加振源）にはさまざまなものがありますが、軌道変位（レール・構造物の凹凸）、および輪軸の回転による影響が大きいと考えられています。

これによる振動発生メカニズムを模式的に表したのが図1です。なお、軌道変位にはさまざまな種類がありますが、ここでは高低変位のみが対象です。図1 (a) は軌道変位により発生した輪軸の上下方向の振動が軸ばねを介して

台車枠に、さらにまくらばねを介して車体に伝達することで車体が上下に振動するもので、加振源、伝達経路ともに上下方向の動きのみが関係しています。

(b) は輪軸の上下振動が、軸ばねを介して台車枠のピッチング振動を引き起こし、けん引リンクやヨーダンパーなどを介して、前後方向の加振力として車体に伝達し、車体に振動を発生させます。このとき、前後台車のピッチングが同位相（同じ方向）であれば、車体は前後に振動しますが、逆位相（逆の方向）であれば、車体を強制的に曲げる力が働き、床面で見ると上下方向の振動が発生します。

(c) は、(a) (b) と異なり、加振源は輪軸が回転することによるものです。輪軸は質量分布ができる限り均一となるよう製作、管理されていますが、回転にともない、わずかなアンバランスに起因して遠心力が発生します。これによる加振力は前後・上下方向に加わりますが、下部がレールと接触しているため上下方向よりも、前後方向の振動が顕著となります。これが、前後方向の軸箱支持装置を介して、台車枠の

前後振動を発生させます。この後の振動伝達は (b) と同様です。

このように発生した上下振動のうち、一般に、1～2Hz程度の周波数の振動は車体がまくらばねの上で全体として揺れる「剛体振動」、数Hz以上の周波数の振動は車体そのものが変形する「弾性振動」に分類されます。人間は上下方向については、4～8Hzの振動を敏感に感じるとされており¹⁾、仮に剛体・弾性振動による振幅が同程度であれば、後者の対策を行ったほうが、より乗り心地向上効果が高いといえます。よって、以下ではおもに弾性振動の低減対策について考えていきます。

振動低減の考え方 (方針)

上記の振動発生メカニズムを踏まえ、車体上下振動低減の考え方についてまとめると、おおむね以下のように分類されます。

①加振源をなくす

加振源自体をなくせば、振動が発生しなくなるという考え方です。ここでは、軌道変位や輪軸質量アンバランスをゼロに近づけることに相当します。

②伝達経路で絶縁する

加振源があっても、振動伝達経路で絶縁することで、車体への加振力伝達を抑制し、振動を発生させにくくするというものです。

③車体そのものを改良する

加振されても、振動が発生しにくいように、車体の特性を改良するというものです。車体の減衰を大きくする、剛性を向上させることなどが考えられます。

④他のものを振動させる

車体に別の物体を付加し、それを振動させる（エネルギーを移動させる）ことで、元の車体の振動を低減させるというものです。

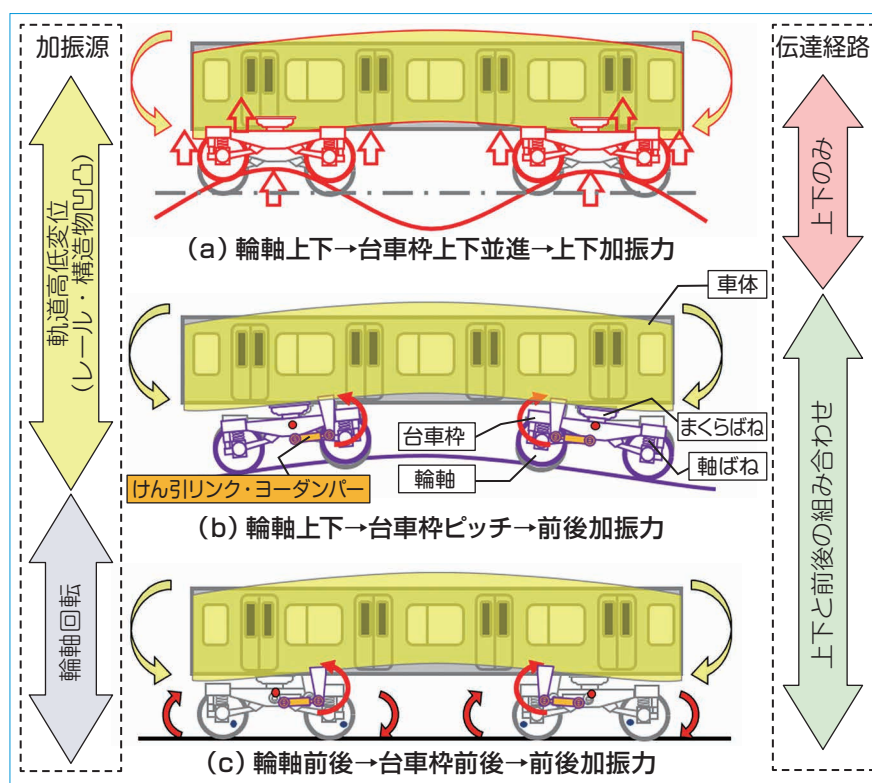


図1 車体上下振動の発生メカニズム (加振源と伝達経路)



図2 変位依存性緩衝ゴムと一本リンクへの取付状況

振動低減手法の実例紹介

前節で述べた方針のうち、①はもっとも根本的な対策ですが、完全にすることは現実的には困難であるため、②～④について、これまで鉄道総研で開発した手法を実例を交えて紹介します。

変位依存性緩衝ゴム²⁾

方針②「伝達経路で絶縁する」の例として、「変位依存性緩衝ゴム」を紹介します。これは、図1 (b) および (c) のように前後方向に伝達する加振力を抑制することを目的に、同図の台車・

車体間の橙色で示した位置に取り付けられるけん引リンク、ヨーダンパーに適用することを想定したものです。このような加振力を抑制するためには、結合を柔らかくすることが有効ですが、一方でけん引リンク、ヨーダンパー本来の機能を維持する観点からは、むやみに柔らかくすることはできません。

そこで、図2に示すとおり、リンクやダンパーを車体・台車に固定するゴムブッシュとよばれる部品について、固定用ピンと防振ゴムの間に微小隙間を設ける構造を考案しました。この緩

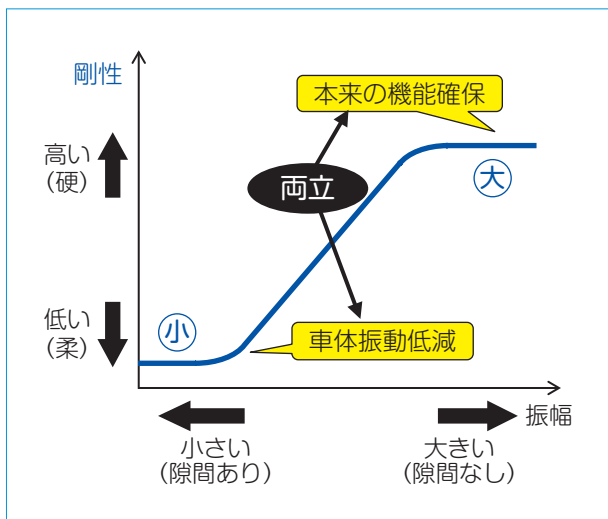


図3 変位依存性緩衝ゴムの特性変化

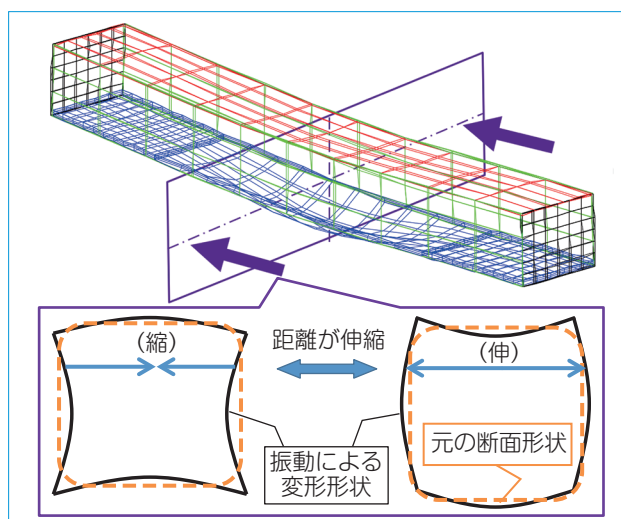


図4 車体弾性振動発生時の断面形状イメージ

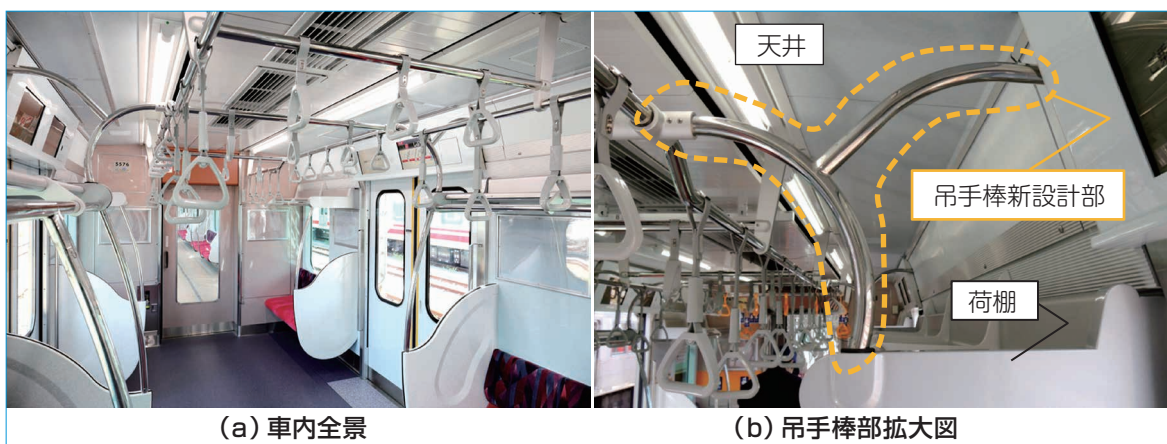


図5 新設計吊手棒

衝ゴムの剛性は図3に示すとおり、比較的小振幅の変位は隙間により吸収される一方、大振幅の領域では隙間が消失するため現製品と同等の剛性を実現しており、振動抑制と本来の機能確保との両立をはかりました。

ここで開発した緩衝ゴムを実際に特急車両に装着して走行試験を実施した結果、車体振動が低減して乗り心地向上効果があることを確認しました。

なお、方針②に該当するものとしては、このほかに、上下方向の振動伝達経路(図1(a))に起因する振動を低減することを目的とした「上下制振制御システム」³⁾などが実用化されています。

剛性を向上する吊手棒⁴⁾

方針③「車体そのものを改良する」

の例として、車内設備品の「吊手棒」を活用した手法を紹介します。

車体に弾性振動が発生し、たとえば図4上段に示したように弓なりに曲がる状態を考えます。このとき、中央付近の断面は、四角形に近い元の形状から変化し、床と天井、左右の側面の距離が、同図下段に示したとおり(微小ですが)伸縮していると考えられます。そこで、左右の側面を連結するように新たに設計した吊手棒が図5です。これにより、車体断面変形を抑える効果が得られ、結果的に乗客が直接感じる床面の振動を低減させることができました。

実際に通勤車両により営業線で走行試験を実施したところ、床面の振動加速度を低減する効果が得られ、その後、

一部形状などのデザインが変更されたものを含め、複数の車種で実用化されています。

床下機器の高減衰弾性支持⁵⁾

方針④「他のものを振動させる」に分類される対策として、動吸振器の原理を適用することを試みました。動吸振器は、制振したい対象に、付加的に質量を取り付け、これを適切な剛性と減衰を持った部材で支持することであえて付加質量を振動させ、対象構造物の振動を低減させるものです。

ただし、付加質量の追加は、車体質量の増加につながり、望ましくありません。そこで、もともと車体に取り付けられている比較的質量の大きい床下機器を付加質量として、これを防振ゴムで弾性支持することで、車体質量の

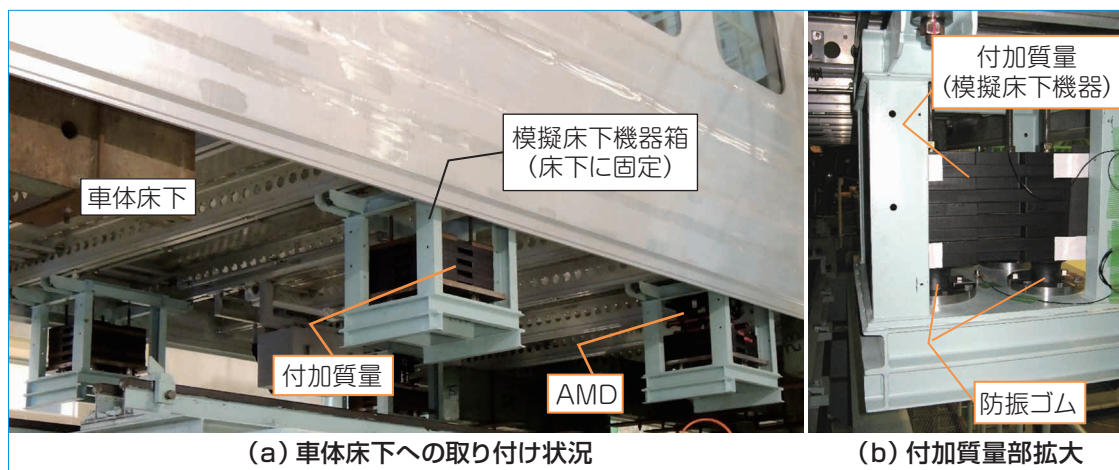


図6 模擬床下機器の高減衰弾性支持

増加をわずかに抑えることを考えました。

鉄塊で製作した模擬床下機器（合計質量約500kg）を、図6に示すように新幹線試験車体の床下に取り付け、実走行を模擬した加振試験を実施しました。なお、図6は次項で説明するアクティブマスダンパー（AMD）も合わせて取り付けた状態で撮影したのですが、本加振試験はAMDなしで行い、防振ゴムを用いた弾性支持によって、実際に車体の振動低減効果が得られることを確認しました。

アクティブマスダンパー（AMD）⁶⁾

本手法は、厳密には方針①～④には分類されませんが、アクティブ動吸振器ともよばれ、前出の動吸振器に類似した対策で、同様に車体に固定して用います。外観と構造は図7に示すとおりで、可動質量、コイルと磁石などから構成されます。コイルに電流を流すと可動質量が上下方向に駆動され、反力として制振力を車体に与えることができます。このような設計となっており、制振力は、車体に設置したセンサーで計測した振動状態に応じて適切な値を計算して決定します。このような制御を行うことにより、必要な質量を通常の動吸振器よりもはるかに小さくすることが可能となりました。

図6に示した通り、質量70kgの

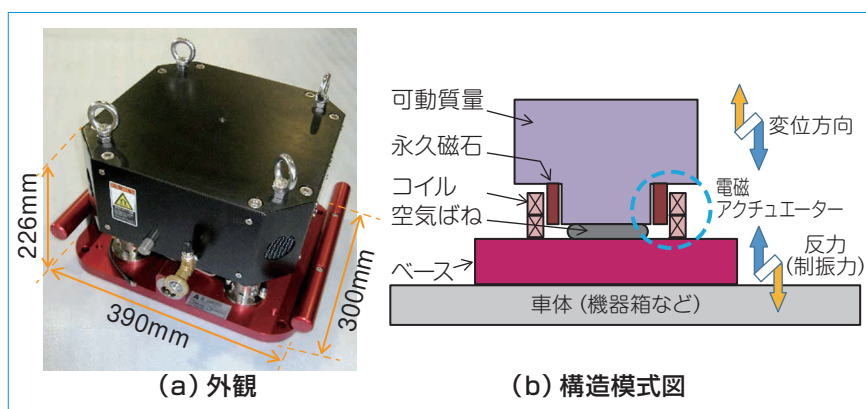


図7 アクティブマスダンパー（AMD）

AMD2台を車体床下の模擬床下機器箱内に設置して、新幹線試験車両の加振試験を行った結果、可動質量は前項目の模擬床下機器質量の1/4以下ですが、車体振動に対して十分な制振効果が得られることがわかりました。

おわりに

ここでは、走行中に発生する車体上下振動のうち、弾性振動に着目して、その発生メカニズムと低減の考え方、おもに鉄道総研が開発した振動低減デバイスの実例を紹介しました。すでに実用化されたものもありますが、所内試験や走行試験で効果が確認された手法については、引き続き実用化をめざした取り組みを進め、乗客の快適性向上に貢献したいと考えています。[RRR]

文 献

- 1) 鈴木浩明：人間科学からみた乗り心地の定量的評価，RRR，Vol.62，No.12，pp.6-9，2005
- 2) 相田健一郎，瀧上唯夫，秋山裕喜，富岡隆弘：輪軸の質量アンバランスによる車体上下振動を低減する，RRR，Vol.74，No.10，pp.8-11，2017
- 3) 菅原能生，小島崇：車内の振動を低減する，RRR，Vol.73，No.4，pp.8-11，2016
- 4) 瀧上唯夫，富岡隆弘：吊手棒で車内をつないで乗り心地を向上する，RRR，Vol.72，No.5，pp.20-23，2015
- 5) 相田健一郎，富岡隆弘，瀧上唯夫，秋山裕喜，佐藤裕之：床下機器の高減衰弾性支持による車体弾性振動低減，鉄道総研報告，Vol.29，No.2，pp.35-40，2015
- 6) 秋山裕喜，瀧上唯夫，相田健一郎：車体弾性振動低減のためのアクティブマスダンパの性能向上，鉄道総研報告，Vol.33，No.3，pp.41-46，2019