

- 鉄道一般
- 車 両
- 施 設
- 電 気
- 運 転・輸 送
- 防 災
- 環 境
- 人 間 科 学
- 浮上式鉄道

# 吊手棒で車内をつないで 乗り心地を向上する

鉄道車両の振動は、乗り心地の観点からその低減が求められます。鉄道総研では車体の曲げ振動に着目し、「箱（構体）」部分の設計変更ではなく、新たなコンセプトとして車内設備を活用した振動低減手法の検討を進めています。ここでは、吊手棒で車体の左右側面間・天井間を「つないで」変形を抑制することで、曲げ振動を低減して乗り心地を向上するための検討、および実用化に至る経緯について紹介します。



**瀧上 唯夫**  
Tadao Takigami  
車両構造技術研究部  
車両振動研究室  
主任研究員  
[専門分野]振動工学,  
制御工学, 車体弾性振  
動, 振動解析



**富岡 隆弘**  
Takahiro Tomioka  
車両構造技術研究部  
車両振動研究室  
室長  
[専門分野]機械力学,  
振動工学, 車体弾性振  
動, 車体構造

## 車両振動と乗り心地との関連

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ており、その低減が求められます。車両における振動はあらゆる方向に発生し、そのうち左右・前後については近年、新技術を導入したサスペンションや列車制御などにより乗り心地の向上が先行して進められてきましたが、上下振動の低減についても、種々の検討が行われています。

上下振動は図1に示すように「剛体運動（振動）」と「曲げ振動」に分類され

ます。剛体運動は車体全体がサスペンション上で揺れる運動で、感覚的には「ゆらゆら」などと表現されるように、比較的周波数が低いのが特徴です。一方、曲げ振動は車体そのものが変形するもので、「ビリビリ」と表現されるような振動として体感されるため、「びりびり振動」とも呼ばれ、一般に、剛体運動より高い周波数で発生します。

ところで、鉄道車両の乗り心地は前後、左右、上下に分けて評価されるのが一般的ですが、ここで着目する上下方向については、人間は剛体運動より曲

げ振動が発生しやすい周波数領域の振動に敏感であることがわかっています（詳しくは後述の「[乗り心地レベル](#)」参照）。走行中に発生する振動は、速度や軌道の状態に依存するため、実際に発生する剛体運動と曲げ振動の大小関係は一概には言えないものの、同程度の大きさの場合、曲げ振

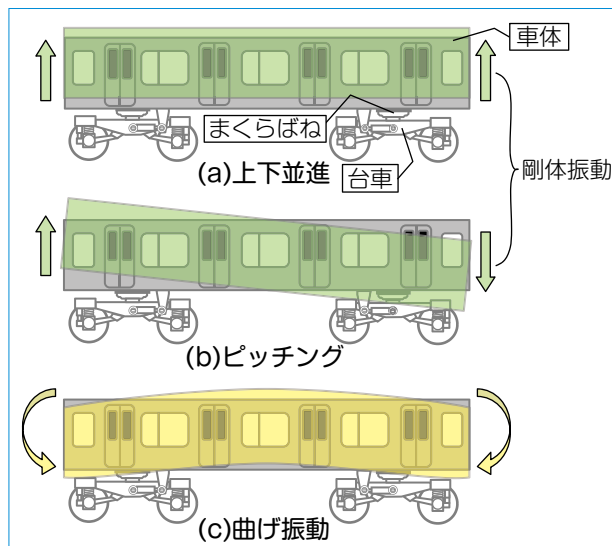


図1 車体上下振動の模式図

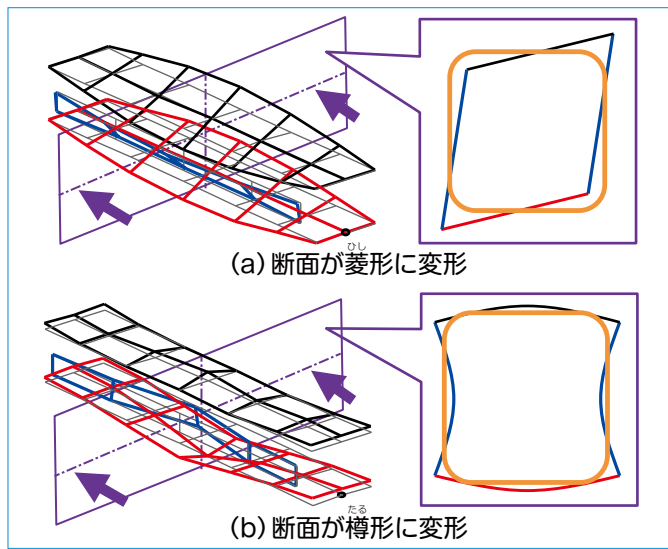


図2 振動形状の測定例と断面のイメージ

動を低減することが、乗り心地の向上により重要であることがわかります。

### 車体曲げ振動の実態と低減の方針

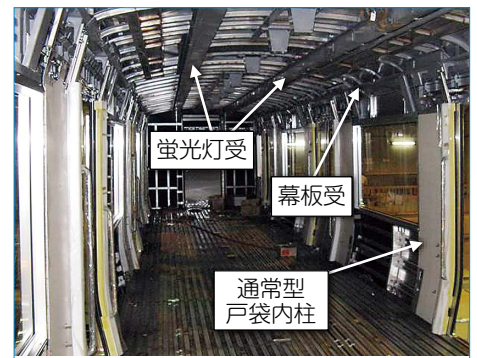
前節では、曲げ振動のイメージをわかりやすく表現するため、図1(c)では車体が「はり」のように変形させた状態を示しましたが、筆者らのこれまでの振動測定によると、実際の車体にはもっと複雑な3次元的な変形が生じます。特にステンレス鋼製車体では、床、屋根、側といった車体を構成する各面が、独立に振動する傾向を有することが確認されており<sup>1)</sup>、後ほど述べる図2はその一例です。

さて、乗客の乗り心地は床や腰掛の上下振動に影響を受けますので、車体、特に床面を長手方向に見たときの、上下の方向への変形を抑えるのが最も直接的な方法です。(ただし、これは必ずしも容易ではありません。)一方、筆者らは車体断面の形状変化に着目し、車体の「周方向」の面外変形を抑えることで、「長手方向」の曲げ振動を抑制する方策について検討を行いました。

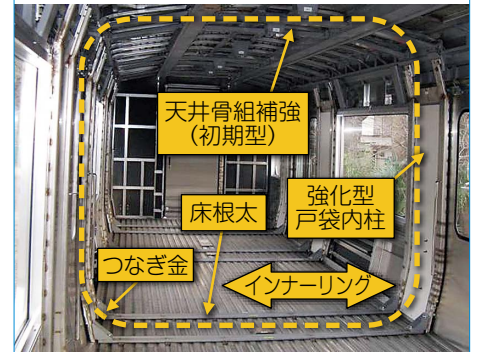
通勤形車両で測定した振動モード(☞参照)の測定例を図2に示しますが、車体床面が上下方向に変形するのに伴い、車体の中央断面もそれぞれ菱形、樽形に変形していることがわかります。

したがって、このような変形に抵抗する補強部材などを追加することで、これらの振動モードに対応する振動の低減が期待できると考えたわけです。

さらに、車体の振動特性は主に強度部材である箱の部分(「構体」と呼びます)の設計に依存しますが、一方で構体と完成車体では、振動特性が大幅に異なることが確認されています。図3(a)は内装などを取り付ける前の車内の様子を示していますが、構体には、蛍光灯受や幕板受け、戸袋内柱など、強度部材としては考慮されていない内部骨組が取り付けられます。その他、内装や種々の車内設備、床下機器なども車体振動特性や乗り心地に大きな影響を与えていることが徐々に明らかとなってきました<sup>1)</sup>。構体設計の変更には生産ラインの見直しや構体荷重試験の実施が求められるのと比較して、これらの「非構造部材」を有効に活用でき



(a) 通常条件



(b) インナーリング取付条件

図3 通勤車両の車体内部(内装取付前)とインナーリング取付状況

れば、大規模な設計変更を伴わず、車体の剛性を向上させるとともに、振動低減対策にもなり得ると期待できます。

そこで、筆者らはまず構体の内側に図3(b)に示すようにリング状の内部骨組(「インナーリング」と名付けました)を取り付け、車体の床・側面・天井を「つないで」変形を拘束することで、車体の剛性を向上できることを確認し、さらに補強部材の軽量化や、既存の車内設備の有効活用など、実用性を向上させる取り組みを進めてきました<sup>2)</sup>。以下では、その取り組みと営業車での実用化に至る経緯について紹介します。

### ☞ 振動モード

振動する物体は、振動しやすい周波数(「固有振動数」と、それに対応する「形状」が決まっており、これらは一般に外から働く力には依存しません。これらの両者の組合せを固有振動モードと呼びます。使用される文脈により「固有」が省略される場合や、形状のみに着目して使われることもあります。本文の図2は実際の車両の固有振動モードの形状を示しています。図中では表記を省略しましたが、(a)(b)それぞれに対応する固有振動数があり、周波数によって振動しやすい形状が変化すると言えます。

なお、固有振動数は振動する物体が変形しにくい(剛性が高い、硬い)ほど、また質量が小さい(軽い)ほど高くなる特徴を持っています。したがって、有効な補強などを施して剛性を向上させると、固有振動数は上昇することになります。

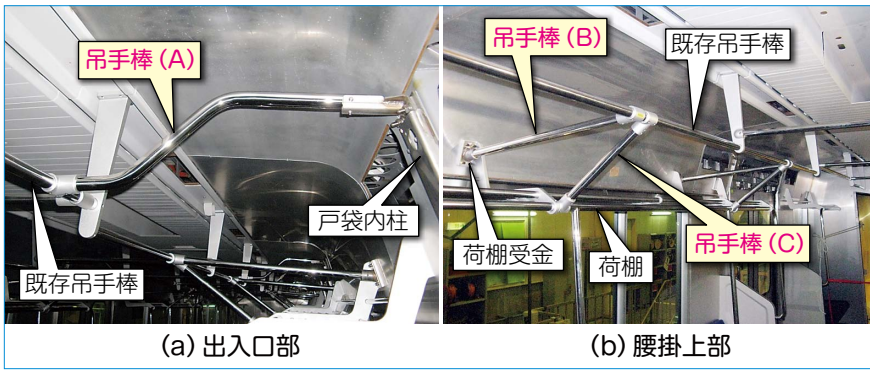


図4 剛性向上機能付き吊手棒取付状況

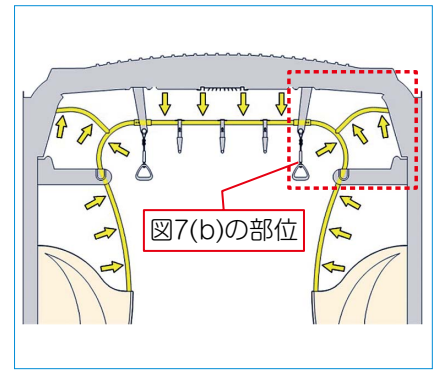


図6 内装ロールバー (黄色矢印)

### 試験車体による効果検証

図3 (b) に示したインナーリングは先に述べた「周方向の変形を抑制する」ためには非常に効果がありましたが、質量が1t以上と非常に大きいなどの課題もありました。

そこで、振動解析や

試験車両を用いた加振試験などにより、補強に有効な部位を特定して部材の一部を省略して軽量化を図るとともに、元々車内に装備されている部材を有効に活用する手法などを検討、提案してきました。そして、最終的に吊手棒を活用し、左右の側面・天井をつなげる働きを持たせることで、剛性向上・振動低減をめざした「剛性向上機能付き吊手棒」を試作しました。設計にあたっては、既存の通勤形試験車体(内装、腰掛などを施工済み)に対して「後付け」可能とするなど、次のステップでの実用化を意識したものとしています。

試験車体への吊手棒の取付状況を図4に示します。図中の吊手棒(A)は、既存の長手方向の吊手棒と戸袋内柱をつなぎ、吊手棒(B)(C)は長手方向吊手棒と腰掛上部に配置された荷棚付近をつなぐもので、いずれも車体左右(まくらぎ)方向に取り付けています。吊手棒(A)は出入口付近に設置するため、乗客が荷棚にアクセスすることを考慮し、湾曲させたデザインとしました。質量増は合計70kg程度と、前

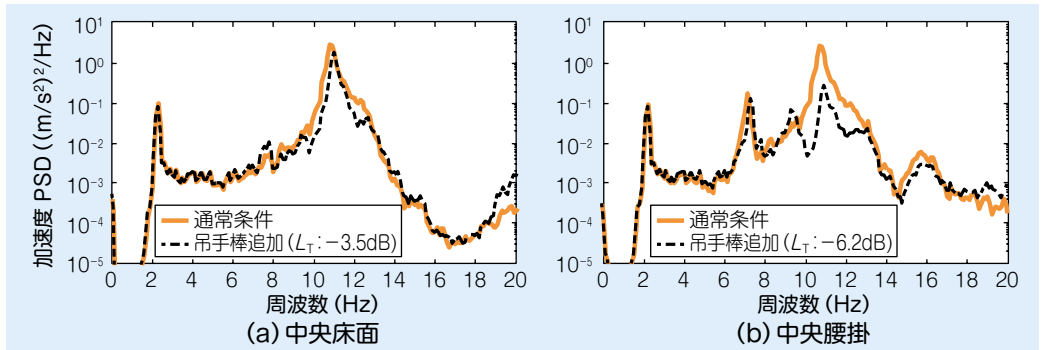


図5 吊手棒の有無による振動加速度PSD (振動試験車体・車両試験台)

節のインナーリングと比較して大幅に軽量化されました。

これらの吊手棒による振動特性の変化を調査するため、鉄道総研保有の車両試験台における加振試験を実施しました。車両試験台は軌条輪と呼ばれるレールを模した円盤の上に車両の車輪を据え付け、これを回転させながら軌道の凹凸を再現して車両に振動を発生させる装置です。ここでは、仮想的な軌道条件として全車輪に同一の信号波形を入力して車両を上下に加振し、車体の振動加速度を測定しました。車体

中央の床面および腰掛部の加速度から周波数ごとの振動の強さに相当するパワースペクトル密度 (PSD) を計算した結果を図5に示します。

これによると、吊手棒の追加により、概ね10~13Hzの周波数帯域で振動が大幅に低減しています。グラフの凡例には、吊手棒が現状相当の場合に計算した乗り心地レベル ( $L_T$ , 参照) を基準とし、剛性向上機能付き吊手棒を取り付けた場合の  $L_T$  の増減をあわせて示しました。なお、ここでは車体曲げ振動に着目した加振を実施し、剛体運動

#### 乗り心地レベル ( $L_T$ )

鉄道車両の乗り心地評価に広く利用されている指標で、値が小さいほど乗り心地がよいと判断されます。測定した振動加速度から、周波数ごとのパワー(振幅の2乗に相当)を表すパワースペクトル密度(PSD)を計算し、周波数に対する人間の感じやすさに応じた「重み」付けを行った後、知覚できる最小の限界値との比をとってデシベル(dB)で表現したものです。重みを右図に示しますが、上下振動では一般に剛体運動が発生する1~2Hz付近より、曲げ振動が発生する10Hz付近の方が値が大きく、人間がより敏感であることがわかります。

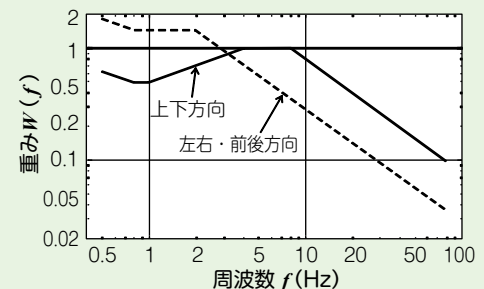




図7 新設計吊手棒の取付状況

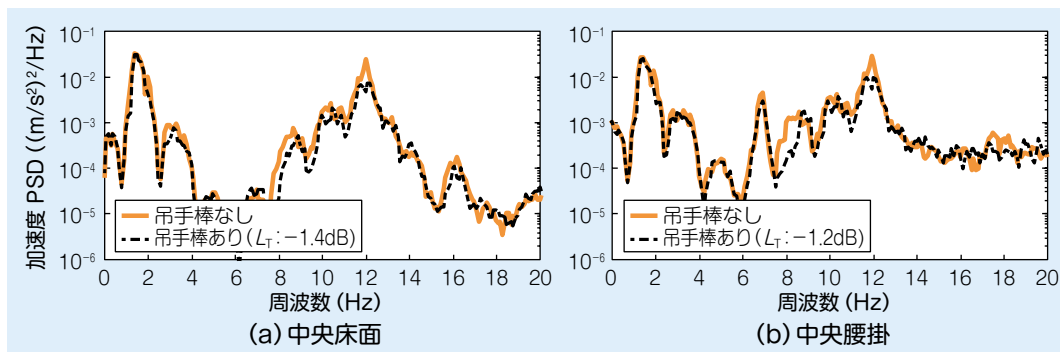


図8 新設計吊手棒の取付有無による振動加速度PSD(営業列車・走行時)

については検討の対象外としていることから、本来の乗り心地レベルとは厳密には異なりますが、PSDの5～20Hz成分(通常は0.5から80Hz)を用いて計算した値を示しています。これによると、床上の中央付近では3dB程度、腰掛では6dB以上 $L_T$ が低減しており、吊手棒によって振動が低減し、乗り心地が向上する傾向が確認できました。

### 営業車両への適用

前節までに検討を進めた、車内をつないで車体断面の変形を抑制するという考え方を取り入れた吊手棒が、(株)総合車両製作所が開発した新設計車両“sustina”の第1号車に採用されました。この車両は、車体剛性・強度の向上を目的とした「内装ロールバー」(図6)を備えています。内装ロールバーは、車体の左右側面間、さらに荷棚、腰掛け袖仕切との間を吊手棒でつなげる形で構成されており、赤破線枠で囲った部分が従来車両の構成と大きく異なります。車体への取付状況を図7に示します。同図(b)の拡大図は、

図6の破線枠で囲った部分に対応し、以下では「新設計吊手棒」と呼びます。

走行時の性能を検証するため、振動測定を実施しました。評価区間(延長2km)を等速(約83km/h)で走行し、計測した上下加速度からPSDを計算した結果を図8に示します。図の黒色破線は新設計吊手棒を取り付けた場合(営業列車と同じ条件)、だいたい色実線は吊手棒の側構体への結合部(図7(b)の右上端)と、荷棚との接続部(同図下端)の結合ボルトを取り外し、拘束を解除した条件の測定結果を示します。ただし、図8の凡例および、以下では、それぞれの条件を便宜上「吊手棒あり/なし」と表記します。

PSDの1.4Hz付近のピークは、車体の剛体運動によるもので、原理的に吊手棒による効果は得られないため、PSDは吊手棒の有無で変化していません。曲げ振動に対応するピークは7～12Hz付近にいくつか存在し、特に12Hz付近のピークは、図示は省略しますが、車体の長手方向に3つの腹を持つ振動モードに対応し、振動が大幅

に低減されています。

図8のPSDの凡例には、乗り心地レベル「吊手棒なし」条件を基準として、「吊手棒あり」条件の $L_T$ の低減値を示しました。今回の測定条件では、 $L_T$ に対する低周波領域、すなわち車体剛体運動の寄与が大きく、 $L_T$ の評価では顕著な低減は見られませんが、12Hz付近のピーク値は1/3程度まで減少しており、車体曲げ振動に関連

した乗り心地の向上効果が得られることを確認しました。

### おわりに

鉄道車両の乗り心地に影響を与える車体曲げ振動を低減するため、吊手棒により車体の左右側面間、および天井を「つないで」拘束することにより、車体断面の変形を抑制し、振動を低減する手法を提案しました。

提案手法は営業列車にも導入され、効果が得られることを確認しましたが、今後も本手法の性能向上をめざすほか、その他の手法も含め、より乗り心地のよい車両を実現できるよう検討を進めて行く予定です。【RRR】

### 文献

- 1) 相田, 富岡, 瀧上ほか: 様々な鉄道車両の車体固有振動モード特性の比較, J-Rail2010講演論文集, pp.325-328, 2010
- 2) 瀧上, 富岡, 相田ほか: 車体剛性の乗り心地を向上する吊手棒の開発, 鉄道総研報告, Vol.28, No.7, pp23-28, 2014