

車体剛性と乗り心地を向上する吊手棒の開発

瀧上 唯夫* 富岡 隆弘* 相田 健一郎*
秋山 裕喜* 佐藤 裕之* 今岡 憲彦**

Development of Rails for Hand Straps
Improving Carbodies' Rigidity and Ride Comfort

Tadao TAKIGAMI Takahiro TOMIOKA Ken-ichiro AIDA
Yuki AKIYAMA Hiroyuki SATO Norihiko IMAOKA

The authors have been investigating how non-structural members of the carbody influence on the rigidity and the vibration characteristics of a railway vehicle. Rails for hand straps (RHSs) are utilized to improve the carbodies' rigidity and ride comfort in this study. Firstly, the prototype of the proposed RHS is designed for a test vehicle, and attached to the carbody. Excitation tests of the test car have been performed on the rolling stock test plant. The RHSs designed based on the prototype are then adopted for a newly designed commercial commuter vehicle. The results of the vibration measurement in running conditions have shown that the proposed RHSs have favorable effects on the natural frequencies and accelerations of the carbody.

キーワード：乗り心地，車体剛性，内部骨組，吊手棒，固有振動数

1. はじめに

近年の鉄道車両の軽量化やそれにとまらぬ車体構造の変化，乗客の快適性に対する要求の高まりとともに，乗り心地の観点から車体の上下曲げ振動が注目されている。在来線通勤車両で主流のひとつとなっているステンレス鋼製の軽量車体は，車体の軽量化，製造工程の省力化，走行時のエネルギー消費軽減などに貢献しているが，一方でこれまでの振動測定により，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があることがわかっている^{1) 2)}。

そこで鉄道総研では，従来強度部材として考慮されていなかった，内部骨組などの非構造部材を活用した車体剛性，乗り心地の向上をめざした検討を行っており，既報³⁾では，内部骨組により構成したリング状の補強構造（以下，「インナーリング」）が車体剛性に大きく寄与することを確認した。この成果を踏まえ，補強部材の軽量化など，実用性の向上をめざした検討を進め⁴⁾，株式会社総合車両製作所（以下，J-TREC）と共同で，車体剛性を向上させる働きを持たせた吊手棒を開発し，試験車体においてその効果を確認した⁵⁾。

そして，その機能を有しつつ，機能性やデザインなども考慮して実用性をさらに向上させた吊手棒が，J-

TRECが開発した新設計の通勤形車両に「内装ロールバー」の一部として採用された。本報告では，これまでの一連の取り組みの概要と，最終的に採用された車両を対象に，営業線で実施した振動測定により，乗り心地向上効果を検証した結果について述べる。

2. 非構造部材による剛性向上手法検討の経緯

2.1 インナーリングによる剛性向上³⁾

車体の剛性はその主構造である構体設計に依存するところが大きい，筆者らのこれまでの振動測定によると，同一車種でもぎ装前の「構体」と「完成車」では固有振動数や減衰特性が大きく異なり，構体以外の内部骨組，車内設備や内装，床下機器等の「非構造部材」が振動特性に大きな影響を与えているとの知見が得られた。

このような知見を踏まえ，車室内に「内部骨組」によるリング状の補強構造（インナーリング）を構成して，車体剛性を向上する手法を提案した。これによる剛性向上効果を確認するため，通勤形車両相当の「剛性試験車体」（内装，床下機器を装備しない「構体」相当）を対象として，図1に示す通り，試作したインナーリングを取り付けた。インナーリングは屋根部の「天井骨組補強」，側部の「強化型戸袋内柱」，床部の「床根太」，およびこれらを相互に結合する「つなぎ金」から構成されており，車体各面の面外変形の抑制と側面からの荷重に対する強

* 車両構造技術研究部 車両振動研究室

** 株式会社総合車両製作所 生産本部技術部（商品開発）

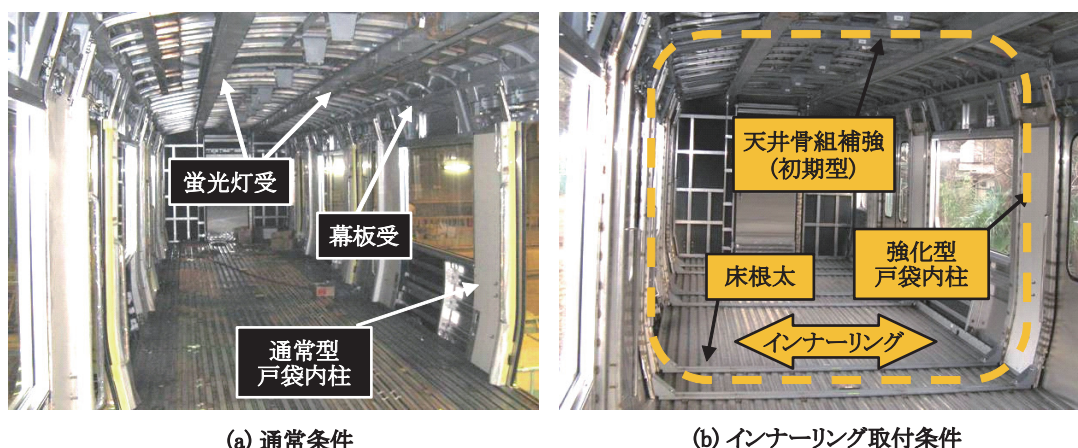


図1 剛性試験車体内部とインナーリングの取付状況

表1 天井骨組補強の諸元

項目	単位	(a) 初期型(軽量化前)	(b) 薄型(軽量化後)
断面形状	[mm]		
断面積	[m ²]	1.11×10^{-3}	5.31×10^{-4}
断面2次モーメント	[m ⁴]	2.92×10^{-7}	3.76×10^{-8}

度向上をねらったものである。

この状態における車体の振動測定結果については、以下の各節の条件における結果とまとめて後述する。

2.2 効果的な部位の特定と補強の軽量化

前節で説明したインナーリングは、取り付けによる車体の剛性向上効果に大きく寄与することを確認できたものの、取付前と比較して1t以上の質量増となったため、実用化をめざすにあたっては軽量化が不可欠であった。

詳細は割愛するが、インナーリングを構成する補強部材について、種々の組合せ条件で加振試験、および有限要素モデル（FEM）を用いた振動解析を実施した結果、車体の剛性向上への寄与が大きいのは、「天井骨組補強」であることがわかった³⁾。

そこで、筆者らは、天井骨組補強の形状変更や取付数削減による軽量化について検討し、表1に示すとおり断面を薄型化した形状の新たな天井骨組補強（以下、薄型天井骨組補強）を提案した。

2.3 吊手棒への着目

前節の天井骨組補強は、左右の側構体間、および側構体と屋根構体を結合し、相対変形を拘束することで、剛性向上効果を発揮すると考えられる。

そこで、もともと車内に装備されている吊手棒の取付方法を工夫することでその効果を代替させ、さらに軽量

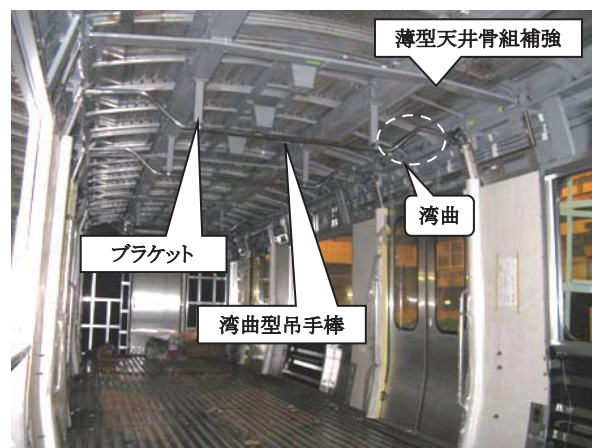


図2 薄型天井骨組補強と吊手棒取付状況（剛性試験車体）

化をはかる手法を検討した。図2に、前節の薄型天井骨組補強と吊手棒の取付状況を示す。吊手棒は、乗客が荷棚に手荷物を載せる際の利便性を考慮し、側構体近傍では上部に向かって湾曲したデザインとした。

2.4 車両試験台加振試験

前述の「剛性試験車体」（構体相当）を対象として、車両試験台における加振試験を実施し、前節までに示した各条件における振動特性を加速度パワースペクトル密度（PSD）で比較した結果を図3に示す。

車両試験台は、鉄道総研が保有する試験設備（全景を図4(a)に示す）で、レール断面形状を模擬した軌条輪と呼ばれる装置が回転し、これに接した供試車両の車輪が回転することで走行を模擬するとともに、軌条輪が変位することで車両に加振力を与える装置である（同図(b)）。

加振信号は3～30Hzでほぼ平坦な周波数成分を含むバンドランダム波とし、左右の車輪に周波数特性がほぼ同一で独立な信号を、全軸同相で入力して加振した。

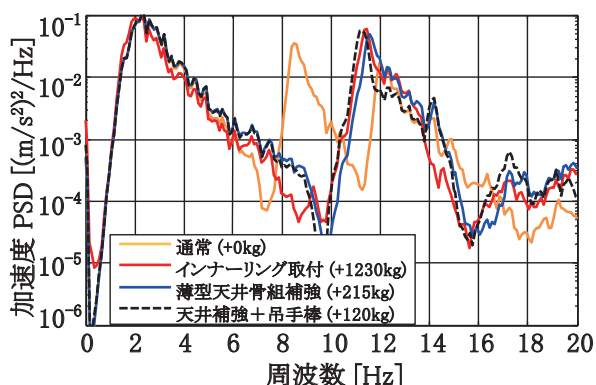


図3 台車直上床上加速度 PSD
(剛性試験車体・車両試験台)



(a) 全景 (b) 車輪と軌条輪
図4 車両試験台加振試験の状況

図3のPSDは、(a) 通常条件(図1(a)に対応)、(b) インナーリングを側引戸付近16断面に取り付けた条件(図1(b)に対応)、(c) 薄型天井骨組補強のみを同様に16断面に取り付けた場合、(d) 薄型天井骨組補強の半数を吊手棒に置き換えた場合の4条件について示した。また、凡例中には通常条件に対する質量増もあわせて示している。

以上より、天井骨組補強と吊手棒を組み合わせることで、インナーリングをすべて取り付けた場合の質量増1.2tを、100kg程度と大幅に抑制しながら、振動特性の観点からはインナーリングとほぼ同等の剛性向上効果が得られることが確認できた。

3. 実車両への適用に向けた検討

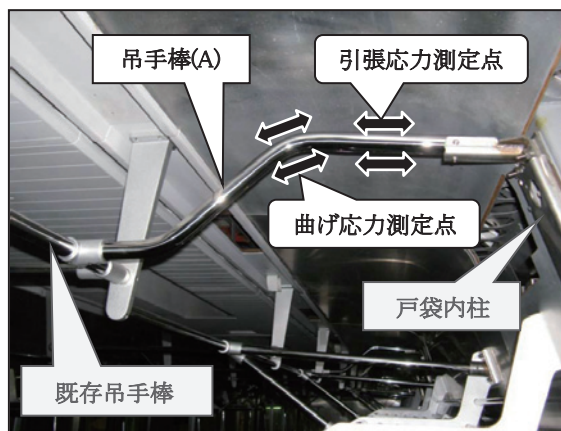
前章で検討対象とした剛性試験車体は、「構体」に相当する試験車体であり、主に剛性の向上(固有振動数の上昇)効果の評価を行ったが、本章では、以下の課題を踏まえて実車両への適用について検討した。

- 剛性試験車体では考慮しなかった吊手棒と内装等の車内設備との干渉を考慮する必要がある。
- 構体と完成車とは振動特性が異なるため、実際の営業車両相当の車体で評価する必要がある。
- 剛性の向上だけでなく、振動の減少や周波数上昇による人間の感度低下など、乗り心地について評価を行う必要がある。

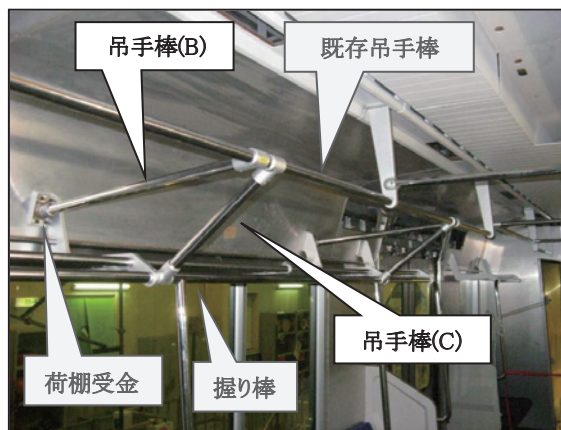
3.1 振動試験車体(完成車相当)への適用

本章では前述した剛性試験車体とは別に鉄道総研が保有する「振動試験車体」を検討対象とする。振動試験車体は内装や腰掛等の車内設備を装備した「完成車」相当の試験車体であり、より実用性の高い「後付け」可能な吊手棒を設計、試作して効果の検証を行った。

振動試験車体への吊手棒の取付状況を図5に示す。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連結するもの、吊手棒(B)(C)は長手方向吊手棒と、それぞれ荷棚を車体に固定する受金もしくは荷棚先端の握り棒を連結するもので、いずれも車体左右(まくらぎ)方向に取り付ける。吊手棒(A)は荷棚の前後端に設置するため、出入口付近の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た。また、吊手棒(B)(C)も、もともと荷棚に段差が設けられ、手荷物がその前後にわたって置かれることがない位置に配置した。各吊手棒の配置を示す平面図を図6に示す。ただし、前後対称に配置したため、半車体分のみを示している。吊手棒(A)～(C)の取付数は(A)16本、(B)(C)が各12本で、質量増は合計70kg程度である。灰色部分は既存の車体にもともと装備されているものであり、赤色のマークは、後節で振動を評価する測定点である。



(a) 既存吊手棒・戸袋内柱間の結合



(b) 既存吊手棒・荷棚間の結合

図5 振動試験車体への吊手棒取付状況

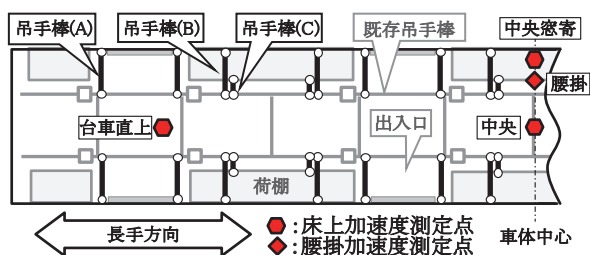


図6 吊手棒の配置（振動試験車体）

3.2 車両試験台加振試験

図5に示した吊手棒の有無による振動特性の変化を調査するため、車両試験台における加振試験を実施した。3～30Hzでほぼ平坦な周波数特性を持つランダム波を全輪軸に同時に入力する「バンドランダム加振」条件における車体床の上の測定点（図6の赤色マーク）における上下加速度PSDを図7に示す。

図7によると、測定点にもよるが、通常条件のPSDには7.2, 8.2, 9, 10.8Hzなどにピークが認められる。吊手棒を追加した条件では、これらのピークが高周波側にシフトしており、車体剛性を向上させる効果が得られていることがわかる。

ピーク高さについては、床測定の7.2Hz付近はほとんど変化せず、11Hz付近ではやや低減している。腰掛測定点については、概ね10～13Hzの周波数帯域で大幅な低減が見られる。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 ）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 の増減をあらわして示した。 L_T は加速度PSDに人間の感覚に基づ

く周波数フィルタを適用し、周波数方向に積分した感覚補正パワーを、基準値に対してdB表示したもので、値が小さいほど振動に関する乗り心地がよいと評価される。なお、ここでは車体曲げ振動に着目しているため、ここで示した L_T 値は曲げ振動と関連が大きいPSDの5～20Hz成分を用いて計算した。したがって、通常の乗り心地評価に用いられる L_T とは厳密には異なる。

同図によると、床の中央付近では3dB程度、腰掛では6dB以上低減している。振動モードとの関連で各ピークの高さの増減にばらつきはあるものの、ここで示した測点では、前節まで主眼としてきた剛性向上のほか、吊手棒によって振動が低減する傾向が確認できた。

なお、詳細については割愛するが、乗客が吊手棒にかまった状態で振動を受けることを想定した荷重試験を別の実験として、図5に示す位置で吊手棒に発生する引張応力、および曲げ応力を測定し、強度上問題がないことも確認した⁵⁾。

4. 営業車両への適用

4.1 内装ロールバーと吊手棒の構成⁶⁾

前章までの検討結果を踏まえ、非構造部材、特に吊手棒を活用して車体剛性・乗り心地を向上する、という手法を取り入れた吊手棒が、J-TRECが開発した新設計車両“sustina”の第1号車に採用された。

この車両は、車内設備として、車体剛性・強度の向上を目的とした「内装ロールバー」（図8）を備えている。内装ロールバーは、車体の左右側面間、さらに荷棚、腰

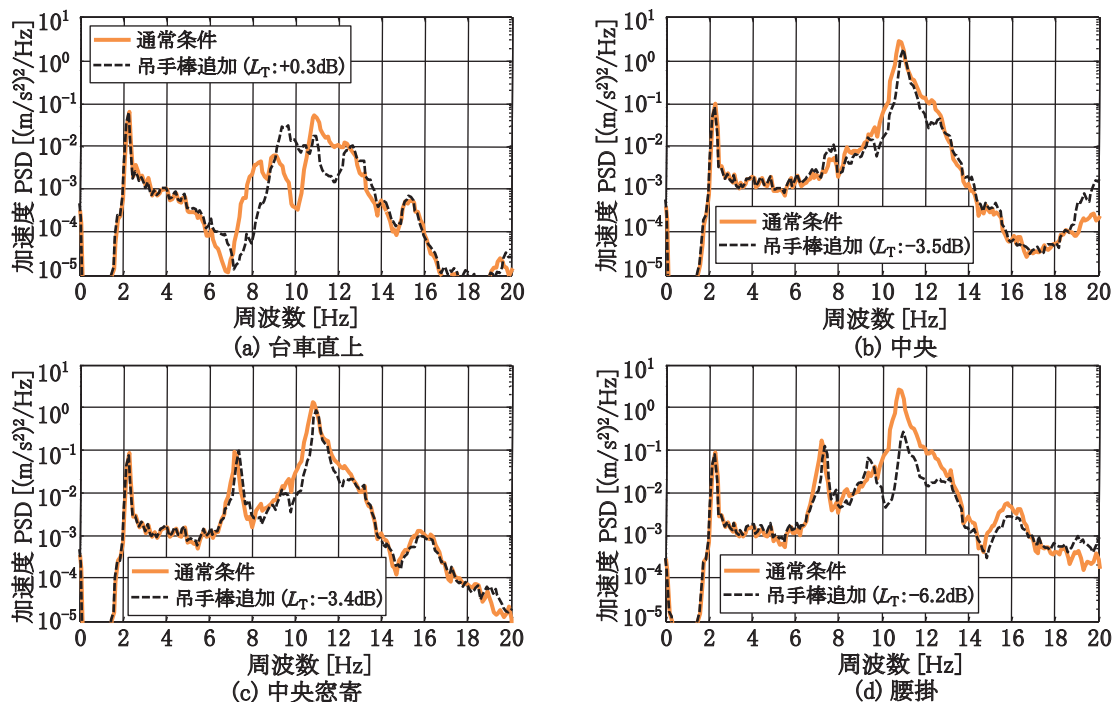


図7 吊手棒の有無による加速度PSDの比較（振動試験車体・車両試験台）

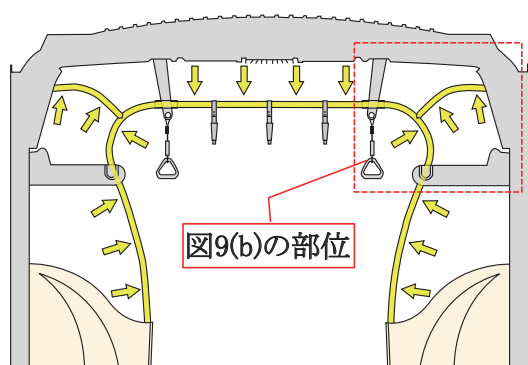


図8 内装ロールバー（黄色矢印）

掛袖仕切り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通常車両の構成と大きく異なる。この部分は、断面方向からみると図5に示した吊手棒（A）（C）をあわせたような構造となっているが、平面図（図6）の吊手棒（A）に対応する位置に取り付けられており、平面図（B）（C）の位置には、新たな部材は取り付けられていない。車体への取付状況を図9に示す。同図（b）の拡大図は、図8の破線枠で囲った部分に対応し、以下、「新設計吊手棒」と呼ぶ。

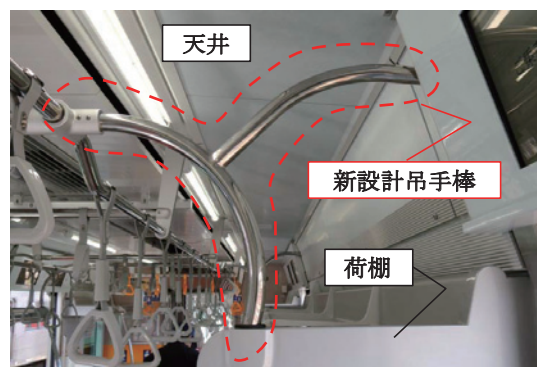
4.2 走行時振動測定

実際の走行条件における車体の振動が、新設計吊手棒によりどのように変化するかを検証するため、走行時の振動測定を実施した。評価区間（延長2km）を等速（約83km/h）で走行し、図7と同様の測定点で計測した上下加速度からPSDを計算した結果を図10に示す。図の黒色破線は図9に示したとおり新設計吊手棒を取り付けた場合（営業車両と同様の条件）、一方、橙色実線は吊手棒の側構体への結合部（図9（b）の右上端）、および荷棚との接続部（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す。なお、図10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」「吊手棒なし」と表記する。また、「吊手棒あり」条件のPSDピーク周波数における車体の振動形状を推定した結果を図11に示す。図中の細線を基準の位置とし、太線が車体各面の変形形状を表す。

PSDの1.4Hz付近のピークは、車体全体が剛体としてまくらばね（空気ばね）上で運動することによるもので、図11（1）の形状に対応する。これについては、原理的に吊手棒による振動特性の変化は得られないため、PSDは吊手棒の有無で変化していない。7Hz付近のピークは図11（2）のように、車体断面が菱形に変形する振動モードに対応する。このピークは図10（c）中央窓寄、および同図10（d）腰掛のように、車体の左右（まくらぎ）方向の中心線上より離れた窓寄りで見られるが、吊手棒の取り付けにより、やや振動が低減する傾向が認めら



(a) 車内全景



(b) 拡大図

図9 新設計吊手棒の取付状況

れる。8.9Hz付近のピークは「吊手棒なし」条件の8.5Hz付近のピークとほぼ同一の形状であることがわかっており、吊手棒の取り付けにより固有振動数が上昇する効果が得られた。ただし、振動の大きさはほとんど変化していない。12Hz付近のピークは、車体の長手方向に3つの腹を持つ振動モードに対応し、吊手棒の有無により固有振動数はほとんど変化していないが、振動は大幅に低減していることがわかる。

図10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なかったが、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は得られた。

5. おわりに

本報告では、吊手棒を活用した車体剛性向上手法を提案し、試験車体を対象とした車両試験台試験、および新設計の通勤形車両を対象とした走行時振動測定により、その効果の検証を行った。その結果、吊手棒による剛性向上効果（固有振動数の上昇）と合わせて、乗り心地が向上（振動が低減）する傾向も確認できた。一方、振動

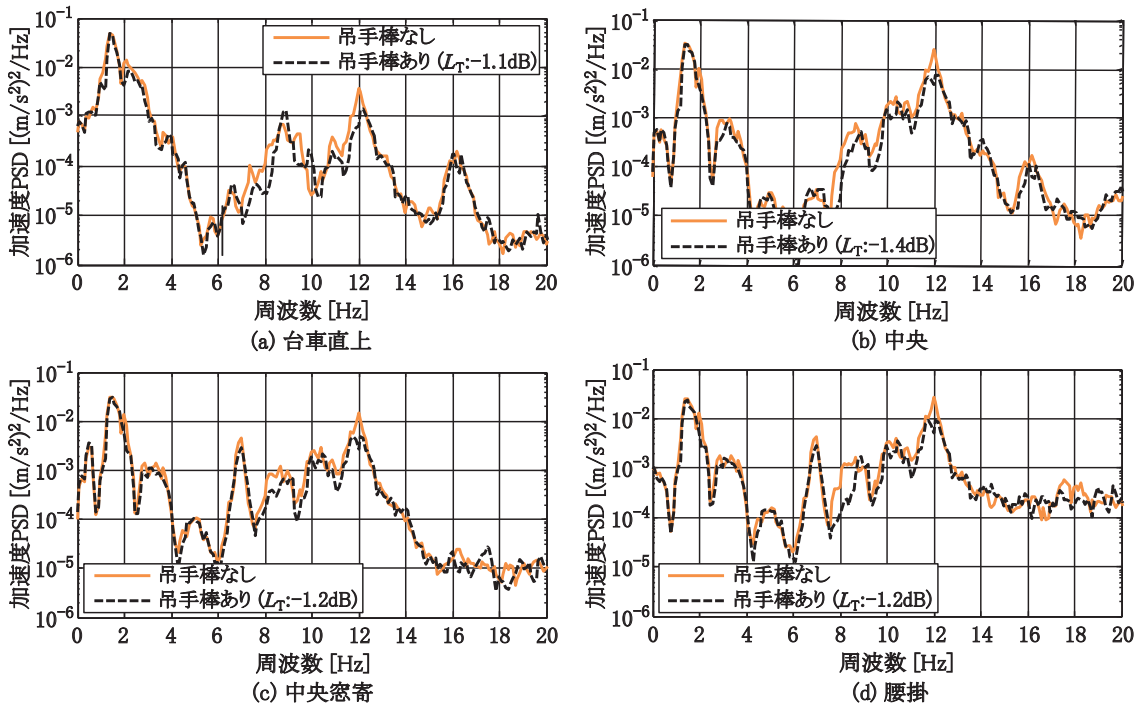


図 10 吊手棒の有無による加速度 PSD の比較（営業車両・走行時）

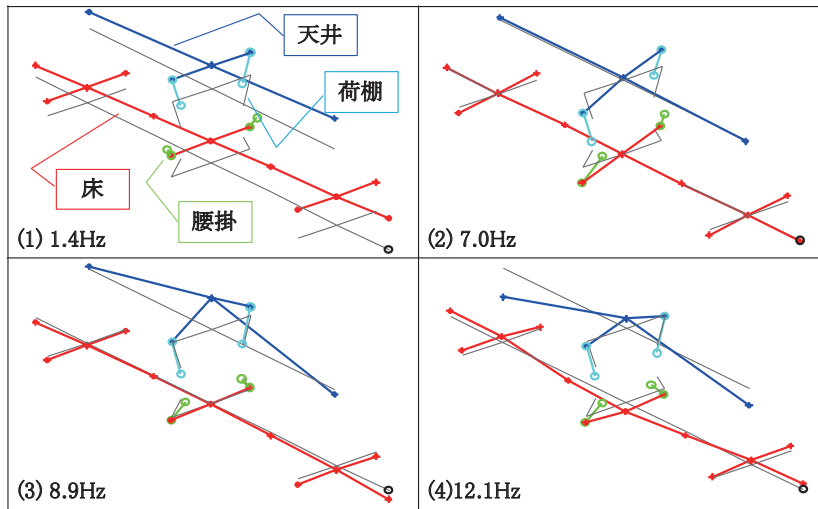


図 11 走行時の振動形状推定結果（営業車両・走行時）

モード（形状）により固有振動数上昇および振動低減の度合いが異なっており、現時点では設計時にこれらの傾向を予測し、振動低減の観点から最適化を行うことが今後の検討課題である。

謝 辞

走行時振動測定にあたってご協力いただいた、東京急行電鉄株式会社の関係各位に謝意を表します。

文 献

1) 瀧上，富岡：最近の軽量車両の固有振動モード特性，鉄道

総研報告，Vol.16，No.5，pp.23-28，2002

2) 相田，富岡，瀧上，谷口，今岡：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

3) 瀧上，富岡，相田：非構造部材を活用した車体剛性向上手法，鉄道総研報告，Vol.22，No.9，pp.11-16，2008

4) 瀧上，富岡，相田：天井内部骨組による車体剛性向上手法の検討，J-Rail2008 講演論文集，pp.81-84，2008

5) 瀧上，富岡，相田，今岡，谷口，牧野：車体剛性向上機能を持つ吊手棒の開発，J-Rail2010 講演論文集，pp.321-324，2010

6) 今岡：内装ロールバーによる車体剛性と乗り心地の向上，総合車両製作所技報，Vol.2，pp.26-33，2013