

車体剛性向上機能を持つ吊手棒の開発 (既存車両への取付を考慮した設計とその効果)

瀧上 唯夫* 富岡 隆弘 相田 健一郎 (鉄道総研)
今岡 憲彦 谷口 宏次 (東急車輛) 牧野 一成 (鉄道総研)

Development of Rails for Hand Straps Improving Rigidity of Carbodies (Their Design for Attaching to an Existing Vehicle)

Tadao Takigami*, Takahiro Tomioka, Ken-ichiro Aida, (Railway Technical Research Institute)
Norihiro Imaoka, Koji Taniguchi, (Tokyu car corporation)
Kazunari Makino, (Railway Technical Research Institute)

The authors have been developing rails for hand straps (RHSs) to improve rigidity of railway vehicle carbodies. In this study, three types of RHSs have been attached to a test vehicle, which is corresponding to a certain commuter type vehicle. Excitation tests have been performed on the rolling stock test plant, and the results have shown that the proposed RHSs have an effect on vibration characteristics of the carbody. Stress in the RHSs has also been measured to evaluate their strength, and it has been verified that the stress is less than the critical value for the material.

キーワード：車体剛性，曲げ振動，乗り心地，吊手棒，固有振動モード

(Rigidity of carbody, Bending vibration, Ride comfort, Rails for hand strap, Natural mode of vibration)

1. はじめに

近年の鉄道車両の軽量化やそれにとまなう車体構造の変化などを背景として、乗り心地の観点から車体の上下曲げ振動が注目されるようになってきた。最近では、優等列車だけでなく、在来線通勤車両などの一般的な車両に対しても、車体曲げ振動低減のための取組みが進められている。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する一方、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を有することが確認されている⁽¹⁾⁽²⁾。

筆者らは、従来強度部材として考慮されていなかった非構造部材を活用した試みとして、車室内にリング状内部骨組を取り付けることにより、車体の剛性を向上できることを確認した⁽³⁾。また、その知見を踏まえて、これまでに取り付ける内部骨組の軽量化の検討や、既存の吊手棒の有効活用など、実用性を向上させる取組みを行ってきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

一方、これまでの検討は内装等を有しない「構体相当」の試験車体を対象としており、既存の車内設備等との位置関係を考慮する必要がなかった。また、これまでの振動測定により、構体と完成車では振動特性が大きく異なることが確認されており⁽⁶⁾、実際の車両で同様の効果が得られるかについては、別途確認が必要である。

そこで、本報告では内装等を有する、完成車相当の別の

試験車体を対象とし、既存の車両への取り付けを考慮したうえで、剛性向上機能を有する吊手棒を新たに試作した。ここでは、車両試験台における加振試験を実施して、提案する吊手棒が車体曲げ振動特性に与える影響と、強度上の問題がないかを調査したので、その結果について報告する。

2. 剛性向上機能付き吊手棒

〈2・1〉 対象車両 本報告で検討対象とした剛性向上機能付き吊手棒は、ステンレス鋼製車体を持つ比較的新しい既存の通勤形車両をベースにした試験車体への取り付けを想定して設計した。実用性を考慮し、現状からの大きな設計変更を不要とするため、既存車両に対して「後付け可能」な設計となっている。対象とした試験車体の外観を図1に示す。この試験車体は、既報^{(3)~(5)}までの「構体相当」の車体とは異なり、内装、腰掛、荷棚、吊手棒等の車内設備を有しており、屋根上の空調装置をダミー質量とした点、照明等の電装品、床下機器を省略している点を除き、ほぼ「完成車相当」の車体である。

〈2・2〉 剛性向上機能付き吊手棒 今回新たに設計・試作した剛性向上機能付き吊手棒の車体への配置を図2(a)に示す。配置は車体前後で対称のため、半車体分のみを示した。図中の黒色で示した吊手棒(A)~(C)の3種類が今回新たに設計したもので、いずれも車体のまくらぎ方向に取り付ける。灰色で示した個所(吊手棒、荷棚等)は、既存の車両にもともと装備されているものである。なお、図2のf2c等

の記号で示した位置は、3.3 節で後述する振動加速度評価点である。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あり、それぞれの車体への取付状況を図 3 に示す。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。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。

また、図 2(a)の条件のほかに比較対象として、吊手棒(A)を、既報⁷⁾で剛性向上効果が確認されている吊手棒(D)に置き換えた条件(図 2(b))についても振動特性を調査した。車体への取付状況を図 4 に示す。吊手棒(D)は左右の戸袋内柱どうしを直接連結する構造となっており、図 2(a)の条件の吊手棒(A)とは、振動により吊手棒に対するまくらぎ方向の力が発生した際、その伝達経路が異なる。すなわち、吊手棒(A)では、既存の吊手棒(長手方向、まくらぎ方向)を介して反対側の吊手棒(A)に伝達されるのに対し、吊手棒(D)では 1 つのパーツとして直接力が伝達されると考えられる。そこで、両者を取り付けた条件における剛性向上効果の差異について、傾向を確認するのが目的である。ただし、吊手棒(D)は、

既存の吊手棒と干渉するため、図 2(b)の破線で示した吊手棒は取り外したうえで、吊手棒(D)を取り付けた。

以下、吊手棒(A)~(D)をいずれも取り付けない場合を「【N】現状条件」(既存の吊手棒は設置)、図 2(a)の状態を「【P】部分型取付条件」、図 2(b)の状態を「【W】全長型取付条件」のように記号を付して呼ぶ。

3. 車両試験台加振試験

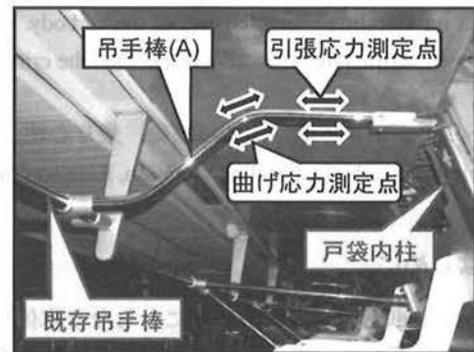
〈3・1〉 試験条件 車両試験台は鉄道総研が保有する試験設備で、レール断面形状を模擬した軌条輪と呼ばれる装置が回転し、これに接した供試車両の車輪が回転することで走行を模擬するとともに、軌条輪が変位することで車両に加振力を与える装置である。

加振方法は左右それぞれの車輪に 3~30Hz でほぼ平坦な周波数特性を持つ無相関のランダム波を同時に入力する「バンドランダム加振」と、走行時に計測した軸箱加速度を再現する「実軌道模擬加振」とした。

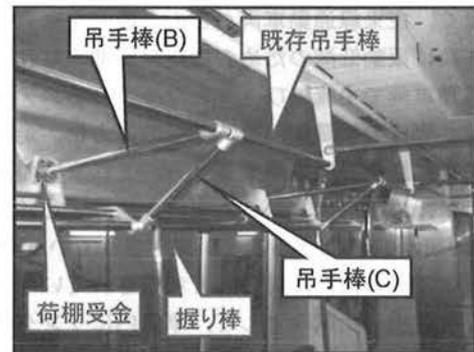
加振時の振動は車体(床 21 点、屋根 21 点、側 10 点)に設



図 1 試験車体の外観

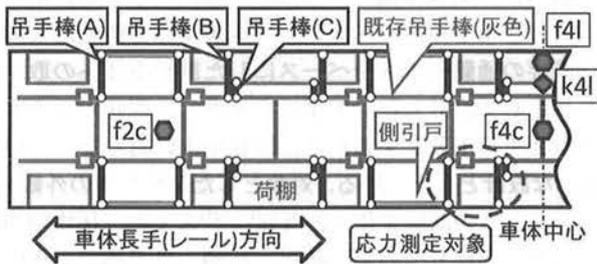


(a) 戸袋内柱連結用の吊手棒(A)

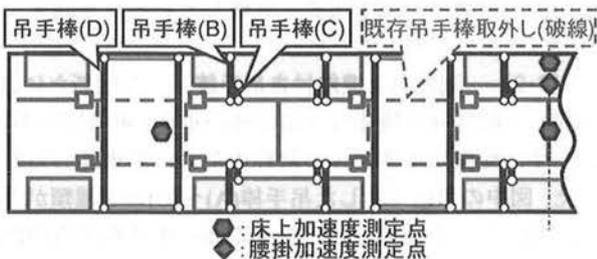


(b) 荷棚握り棒および受金連結用の吊手棒(B)(C)

図 3 吊手棒の取付状況(【P】部分型取付条件)



(a) 部分型取付条件



(b) 全長型取付条件

図 2 剛性向上機能付き吊手棒の取付状況

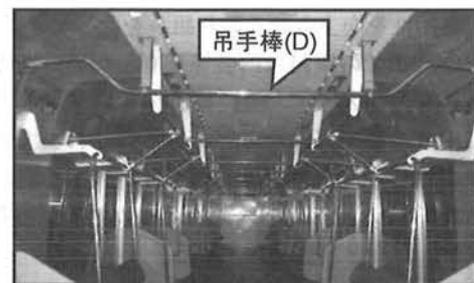


図 4 吊手棒の取付状況(【W】全長型取付条件)

置した加速度ピックアップにより計測した。後述する図 5 の線分が交差する点が、車体各面の加速度ピックアップを配置した点に相当する。そのほか、車体中央部の腰掛の加速度もあわせて測定した。

〈3・2〉 振動モード解析 条件【N】【P】【W】それぞれの車体に対するバンドランダム加振時の振動を計測し、腰掛を除く 52 点の加速度により振動モード解析を実施した。同定された固有振動モードのうち主要なものを図 5 に示す。

最左欄の Z-10 などの記号は、振動形状の特徴を表したも

(1) J-1	 7.23Hz, 0.78%	 7.39Hz, 0.74%	 7.38Hz, 0.76%
(2) Z-10	 8.18Hz, 4.33%	 9.55Hz, 2.96%	 9.86Hz, 2.74%
(3) Z-20	 9.06Hz, 1.95%	 11.00Hz, 1.53%	 11.05Hz, 1.54%
(4) A-31	 10.87Hz, 1.09%	 11.06Hz, 0.85%	 11.15Hz, 0.96%
(5) J-2	 13.20Hz, 2.58%	 13.26Hz, 1.94%	 13.22Hz, 2.43%
	【N】通常条件	【P】部分型取付条件	【W】全長型取付条件

図 5 吊手棒取付条件による振動モードの比較

ので、最初の文字は A が屋根と床が車体中央部で逆位相(方向)に変形するもの、Z はその判別が難しいことを示し、その後の 2 桁の数字は、1 つ目が屋根、2 つ目が床の腹の数を表す。また、J は車体断面にせん断変形を生じるモードであり、屋根と床の腹の数が常に同一であったため、数字は一桁とした。また、各モードの左下の数値は各モードの固有振動数、モード減衰比を表す。

図 5 によると、J-2 モードでは条件による固有振動数の差異がほとんどないが、それ以外は、いずれのモードも条件【N】に対して【P】【W】で固有振動数が上昇しており、今回取り付けた吊手棒が車体の剛性を向上させる効果を有することがわかる。【P】と【W】の固有振動数の比較では、ほぼ同一か、若干【W】が高い傾向がある。減衰比に関しては、追加した吊手棒により(2)Z-10 モードでやや値が小さくなっているのを除いて、同一モードでは極端な差はない。

〈3・3〉 加速度 PSD 次に、実軌道模擬加振時(走行速度 83km/h 相当)に測定した振動加速度のうち、代表的な測定点として、図 2 に示した床上 3 点、腰掛 1 点における加速度パワースペクトル密度(PSD)を計算した結果を、図 6 に示す。これによると、条件【N】(淡灰実線)では、総じて A-31 モードに対応すると考えられる 10.8Hz 付近のピークが卓越しており、吊手棒の取付によって【P】(黒破線)および【W】(濃灰実線)ではこのピークが高周波側にシフトしている。ピーク高さは、床測点では若干、腰掛では大幅に低減している。測定点(c)f4l, (d)k4l では、J-1 モードに対応する 7.2Hz 付近にもピークが存在し、同様に吊手棒によってピークが高周波側に移動している。ただし、このモードに対応するピーク高さは、床、腰掛ともにほとんど変化がない。(a)f2c では 9Hz 付近のピークが 11Hz 付近に移動しており、PSD の

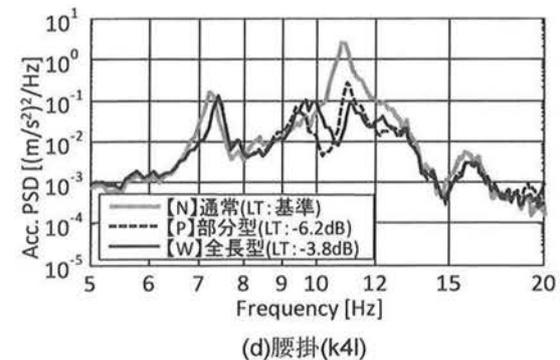
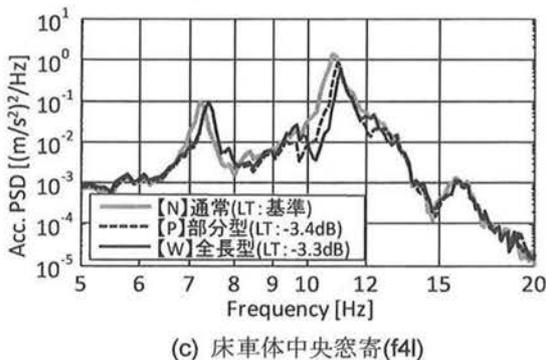
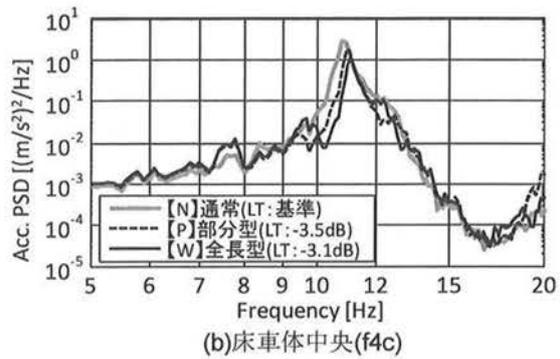
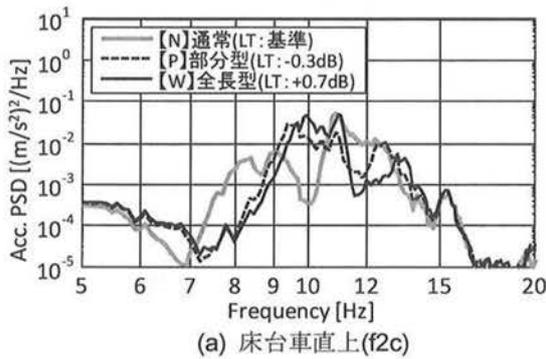


図 6 吊手棒取付条件による加速度 PSD 比較(実軌道模擬加振, 走行速度 83km/h 相当)

値は増加している。Z-20モードに関しては、固有振動数に対応する位置にピークが確認できるものの、大きさは卓越しておらず、J-2とともに、今回の加振条件では、乗り心地に与える影響は小さいと考えられる。

PSDグラフの凡例には、条件【N】の場合に計算した乗り心地レベル(L_T)を基準とし、条件【P】【W】の L_T の増減を合わせて示した。これによると、床上の(b)f4c、(c)f4lでは3.1~3.5dB、腰掛(d)k4lでは3.8~6.2dB程度低減していることがわかる。振動モードごとにピーク高さの増減にばらつきはあるものの、全体としては振動が低減する傾向が確認できた。また、紙面の都合上全ての測定点の結果を示せないが、床上測点では、もともと振動のパワーが小さい個所(図6(a)f2cなど)では、吊手棒による L_T 低減量が小さい一方、振動が大きい測定点では低減量が大きく、床上の場所による乗り心地のばらつきが平均化される結果となった。

腰掛については、今回の測定では空席の状態での測定しており、実際に乗客が着席した場合については別途検討が必要であるが、床上よりもさらに L_T 低減幅が大きく、着席した乗客に対する乗り心地の向上が期待できる。

条件【P】と【W】の比較では、前節の固有振動数上昇効果は【W】の方が若干高かったが、 L_T 低減量は、【P】の方がやや大きかった。2.2節で述べたように力の伝達経路が異なる可能性があるため、両条件の比較を行ったが、条件【N】との比較に対して両条件の差は小さく、現状車体に対して「後付け可能」な条件【P】でも、剛性向上および振動低減効果が得られることが確認できた。

〈3.4〉 発生応力 前節までに述べたように、吊手棒によって車体の振動特性に変化が生じることが確認できたが、これは、吊手棒が振動により発生した力を伝達していることを示すものと考えられる。そこで、振動発生時に強度上の問題が生じないかを確認するため、条件【P】の吊手棒にひずみゲージを貼付し、応力測定を実施した。

吊手棒には、上述のような車体振動に起因する動的な荷重のほか、一般には乗客が吊手棒や吊革につかまることによる準静的な荷重が作用する。本来は、これを模擬した状態で加振試験を行えば、これらの効果により発生する応力を同時に評価できるが、今回は試験の都合上、両者をわけて検討した。すなわち、まず車体を加振しない状態で、それぞれの吊手棒の中央部を直接、1人が可能な限りの力で押し下げ(以下、静荷重)、そのときのひずみを測定し、応力に換算した。次に、実軌道模擬加振を行って(以下、動荷重)ひずみを測定し、同様に応力に換算した。ひずみ(応力)測定は、車体中央付近(図2(a)の破線円で囲った個所)の吊手棒を対象とし、(A)は図3(a)の矢印で図示した位置、(B)(C)については図示を省略したが棒の中央部にひずみゲージを貼付して、引張および曲げ応力成分の測定を行った。

静荷重、動荷重(走行速度 83km/h 相当)による応力の観測値(曲げ応力は、最大となる表面の値)を表1に示す。吊手棒表面の材質 SUS304 の規格上の耐力は 205MPa、疲労限度は実力値で 220MPa であり⁽⁸⁾、表1に示した値の3倍以上であ

表1 吊手棒の最大応力

種別	引張応力 [MPa]		曲げ応力 [MPa]	
	静荷重	動荷重	静荷重	動荷重
吊手棒(A)	0.73	1.23	30.44	24.96
吊手棒(B)	1.33	0.83	67.73	1.20
吊手棒(C)	0.10	0.76	50.98	3.40

るため、安全率を見込んだ応力限界図にプロットした場合でも十分に余裕がある。実際の走行条件では、乗客が既存吊手棒に備え付けの吊革につかまることにより、検討対象の吊手棒に間接的に伝達される荷重についても考慮する必要があるが、直接力を作用させた今回の結果と比較して、これらの影響は小さいと考えられる。したがって、今回新たに追加した吊手棒に関して、静荷重・動荷重が同時に付加された場合でも、強度的に問題は無いと予想される。

4. おわりに

本報告では、構体の変更をとみなさない車体の剛性向上を目的として、既存の車両に追加することを想定した実用的な手法として、剛性向上機能付き吊手棒の取付けを提案した。内装等を装備する完成車相当のステンレス鋼製試験車体に試作した吊手棒を取付けて車両試験台による加振試験を実施した結果、曲げ振動の固有振動数が上昇するとともに、振動が低減する効果を有することを確認した。

ただし、ここで提案した吊手棒は、車体の剛性を向上させることを目的としたもので、直接的に振動を低減させるものではない。今回の試験条件では、実軌道模擬加振時の車体の振動が低減したが、一部の振動モードでは、吊手棒により減衰比が低下する現象も確認され、加振条件によっては、振動低減効果が得られない場合もあると考えられる。

今回のひずみ測定結果は、本文中で述べた強度の確認のほか、振動測定結果と合わせて剛性向上メカニズムの検討にも有用であると考えられる。今後は、この課題に取り組むとともに、将来的にはその知見を踏まえ、吊手棒に減衰機能を付与するなど、車体振動を直接低減する手法についても検討し、加振試験による効果の検証を行う予定である。

文 献

- (1) 瀧上唯夫、富岡隆弘：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, pp22-28, 2002
- (2) 相田健一郎、富岡隆弘、瀧上唯夫：車体構造の違いによる在来線車両の車体固有振動モード特性の比較、J-Rail2007 講演論文集、pp143-146, 2007
- (3) 瀧上唯夫、富岡隆弘、相田健一郎：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, pp11-16, 2008
- (4) 瀧上唯夫、富岡隆弘：内部骨組を活用した鉄道車両の車体剛性向上、日本機械学会論文集(C編)、Vol.76, No.765, pp1115-1123, 2010
- (5) 谷口宏次、瀧上唯夫ほか：湾曲型吊手棒による車体剛性向上効果、J-Rail2009 講演論文集、pp421-424, 2009
- (6) 相田健一郎、富岡隆弘ほか：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、投稿中
- (7) 今岡憲彦、谷口宏次ほか：完成車体における横方向吊手棒の車体剛性向上効果、J-Rail2010 講演論文集、投稿中
- (8) 金属材料技術研究所疲れ試験部編、機械構造用ステンレス棒用 SUS304(18Cr-8Ni)の疲れ特性データシート、No.33, 1983