

# 天井骨組補強と吊手棒を活用した車体剛性向上手法

瀧上 唯夫\* 富岡 隆弘\* 相田 健一郎\*

## Improving the Rigidity of Railway Vehicle Carbodies Using Ceiling Frames and Rails for Hand Straps

Tadao TAKIGAMI Takahiro TOMIOKA Ken-ichiro AIDA

In this study, the authors have investigated how non-structural members of the carbody influence on the rigidity and the vibration characteristics of a railway vehicle. Additional ceiling frames and/or rails for hand straps have been attached to a test car, which is corresponding to a certain commuter type vehicle but is not equipped with interior or under floor equipments. Excitation tests of the test car have been performed on the rolling stock test plant, and the results have shown that the proposed reinforcing components have a large affect on the natural frequencies, vibration shapes and response accelerations of the carbody. The rails for hand straps have then been installed to another test car with interior panels and seats, and stationary excitation tests have been conducted in order to investigate the vibration characteristics of the carbody.

キーワード：乗り心地，車体剛性，内部骨組，天井骨組補強，吊手棒，固有振動モード

### 1. はじめに

近年の鉄道車両の軽量化やそれにとともなる車体構造の変化，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るようになってきた。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<sup>1) 2)</sup>。

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，構体の構造を現状から大きく変更することなく，車体剛性の向上をめざした検討を行っている。既報<sup>3)</sup>では，このようなコンセプトで設計・製作した「剛性試験車体」を活用し，内部骨組により構成したリング状の構造（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。一方，ここで提案したインナーリングは試験車体への取付けを想定して設計したため，その構成要素である部材の形状・寸法や取付数を，やや極端とも言える設定とした。そのため，質量増が大きいほか，既存の車内設備との位置関係を考慮していないなど，試験的要素が強く，実用上の観点からはさらに検討が必要な部分があった。

本報告では，補強部材の軽量化と実用性の向上をめざ

し，インナーリングの構成部材のうち，特に剛性向上効果が高かった天井骨組補強に着目し，質量増を抑えるとともに，天井風道等の車内設備設計の制約をなるべく緩和するため，断面を薄型化した新たな補強部材を製作した。さらに，天井骨組補強の一部を，同様の効果が期待できる吊手棒に置き換えた場合について，剛性向上効果の確認を行った。

また，前述の「剛性試験車体」は内装や腰掛等の車内設備を装備しておらず，より営業車に近い条件における剛性向上効果を確認するため，これらの車内設備を有する別の「振動試験車体」に吊手棒を取付けて，定置加振試験を実施した結果についても述べる。

### 2. 内部骨組による剛性向上効果

#### 2.1 剛性試験車体の概要

本報告の前半で検討対象とする剛性試験車体は，内装品の設置などの目的で車内に取り付けられている内部骨組などの非構造部材を積極的に利用して，車体の剛性向上をはかることをコンセプトとして設計・製作した。一方，車体全体としての強度を主に担うとされる外部構体については，営業運転に供されているステンレス鋼製軽量車体（以下，ベース車体と呼ぶ）の設計をそのまま利用した。内装や腰掛等の車内設備は装備していないが，屋根上の空調機は振動特性への影響が顕著であると考えられることから，質量と構体への固定位置を実物と一致させたダミー質量を取り付けている。

\* 車両構造技術研究部（車両振動）

特集：鉄道車両技術

2.2 インナーリングによる剛性向上

剛性試験車体の設計時に盛り込んだ具体的な剛性向上策については既報<sup>3)</sup>で報告したが、取り付けた補強部材の概略を、その質量とともに表1にまとめた。なお、表中の質量欄で“+”を付したものは、部材そのものの質量ではなく、ベース車体の同様の部材からの増加分を示す。補強部材は大きく分けて、同表(A)の欄に示した車体長手方向、および(B)に示した周方向の部材から構成されている。補強部材のうち(A)欄に示したものは、(A-1)蛍光灯受、(A-2)幕板受と呼ばれる既存部品を活用し、板厚を増加させるなどにより、剛性を向上させたものである。図1(a)は、この条件にベース車体相当の戸袋内柱を取付けた状態であり、内装がないことを除いてベース車体に最も近いと考えられるため、「通常条件」とよぶ。なお、(A)欄の補強部材は、後述の(B)欄の部材と異なり着脱は考慮しておらず、車体に溶接で取付けているため、本報告における加振試験は、常に取付けた状態で実施している。したがって、本試験車体とベース車体との比較は行わないこととし、以下、補強部材の質量について論ずる際は、この通常条件を基準とす

表1 剛性試験車体の剛性向上策

(A) 長手方向部材 (溶接にて取付)			
記号	項目	内容	質量
(A-1)	蛍光灯受 (強化)	・軽量穴廃止 ・一部(リング化構造部)板厚増	+ 120kg
(A-2)	幕板受 (強化)	・軽量穴廃止 ・一部(リング化構造部)板厚増 ・全長にわたり溶接で一体化	+ 140kg
(B) 周方向部材 (ボルトにて取付)			
記号	項目	内容	質量
(B-1)	天井骨組補強 (新規追加)	・2本の蛍光灯受間に取付 ・蛍光灯受・幕板受間に取付	510kg
(B-2)	戸袋内柱 (強化)	・戸袋内柱(戸先)の板厚増 ・戸尻側に柱を追加	+ 480kg
(B-3)	床根太 (新規追加)	・床波板上に補剛部材追加	210kg
(B-4)	リング化構造 (新規追加)	・相互間を「つなぎ金」で結合 ※(B-1)～(B-3)の位置を合致	30kg

る。一方、表1(B)は、剛性試験車体で新規に設計したもので、車室内に内部骨組によるリング状の補強構造(以下、「インナーリング」)を構成するものである。インナーリングは、図1(b)に示すように、屋根部の(B-1)天井骨組補強、側部の(B-2)強化型戸袋内柱、床部の(B-3)床根太と呼ばれる部材、および(B-2)と(B-3)を結合する(B-4)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をねらったものである。また、補強部材と車体、もしくは部材相互間の結合方法を工夫することで、屋根・側間、もしくは床・側構体間の相対的な角度変化を抑制する設計とした。インナーリングの構成部材をすべて取付けた図1(b)の状態を、「リング補強条件」と呼ぶ。なお、図1(b)の「強化型戸袋内柱」は、ベース車体に取り付けられている「通常型戸袋内柱」の剛性を向上させたものであり、ボルトにより固定する設計としたため、相互に換装が可能となっている。また、天井骨組補強、床根太もボルトにより着脱可能な構成としており、各部材の有無による振動特性の変化を把握できるようにした。取付個所は各側引戸の両側戸袋部とし、(B-1)～(B-3)の長手方向の位置を合致させることで、リング状の構造を構成している。

2.3 軽量化と実用性向上

(1) 対策の方針

前節で説明したインナーリングは、すでに車体の剛性向上効果に大きく寄与することを確認している<sup>3)</sup>。振動特性を調査した結果については、後述の3章でまとめて述べる。一方で、これまでの検討では、その効果を明確にするため、補強部材の形状・寸法や取付数を、試験的にやや極端ともいえる設定としたため、リング化補強条件の車体は、通常条件と比較して約1.2tの質量増となっており、実用化をめざすにあたっては軽量化が不可欠であると考えられる。なお、質量増の部材ごとの内訳については、前述の表1に示してある。

本研究は、最終的には車体の振動低減による乗り心地

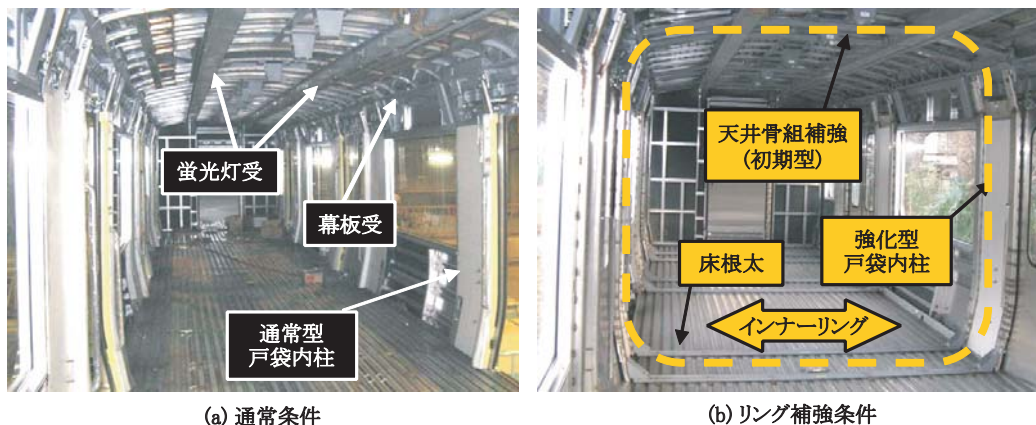


図1 剛性試験車体の車内状況

の向上をめざしたものであるが、ここでは最初のステップとして、車体全体として一本の「はり」としての振動特性に近づけ、振動低減策の検討の見通しをよくするとともに、固有振動数を向上させることを目的とする。

詳細は割愛するが、表1の補強部材について、種々の組合せの条件で加振試験を実施した結果、車体を「はり」としての振動に近づける効果は、(B-1)天井骨組補強による寄与が大きいことがわかった<sup>3)</sup>。そこで、筆者らは、天井骨組補強の取付数削減による軽量化、あるいは、既存設備である吊手棒の活用など、実用化を考慮した検討を実施してきた<sup>4) 5)</sup>。本報告では、これらの検討結果を踏まえ、さらなる軽量化と実用性の向上をめざし、天井骨組補強の断面形状の見直しと、客室スペースの有効活用についても考慮した吊手棒の設計を行った。

### (2) 薄型天井骨組補強

前報<sup>3)</sup>で使用した天井骨組補強（以下、初期型天井骨組補強）は、表2(a)に示す断面形状としていたが、今回はこれを薄型化して同表(b)の形状とした（以下、薄型天井骨組補強）。断面積と上下方向に関する断面2次モーメントの値を同表に示した（ただし、曲げR部の影響を無視した概算値である）。この薄型化は、質量増を抑制するとともに、設置スペースを削減して、風道や天井板などの設計の制約を緩和するために実施したものである。また、従来型は蛍光灯受相互間、幕板受－蛍光灯受間（2本）の3ピース構造としていたが、薄型は軽量であるため、両幕板間に固定する1ピース構造とし、蛍光灯受には下部からビスにて固定する取付方法に変更した。

### (3) 湾曲型吊手棒

前節の天井骨組補強は、左右の側構体を結合することによって相対変形を拘束するとともに、補強部材が蛍光灯受を介して屋根構体と結合されることにより、屋根の面外変形を拘束する効果を有すると考えられる。

そこで、既存の車内設備である吊手棒にその効果を代替させ、さらに軽量化をはかる手法を検討した。ただし、従来型の吊手棒の固定方法のままでは、天井骨組と同様の効果が期待できないことから、ここでは取付方法を変更し、両端を戸袋内柱上部に固定することで、左右の側を直接結合する構造とした。中間部は蛍光灯受から下部

に伸ばしたブラケットに固定しており、上下方向の曲げ剛性を確保している。また、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。前節で説明した薄型天井骨組補強と、湾曲型吊手棒の車内への取付状況を図2に示す。

## 3. 剛性試験車体の車両試験台加振試験

### 3.1 試験条件

補強部材の取付条件による車体の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。車両試験台は鉄道総研が保有する試験設備（全景を図3(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。

車体の補強条件は、(a)天井骨組補強と吊手棒をいずれも取り付けない場合（通常条件）、(b)インナーリングを取り付けた場合（リング補強条件）、(c)天井骨組補強を16本取り付けした場合、および(d)天井骨組補強16本のうち8本を吊手棒に置き換えた場合（天井骨組補強8本と吊手棒8本の組合せ）の4条件とした。

### 3.2 試験結果

加振試験により得られた車体加速度から、振動モード解

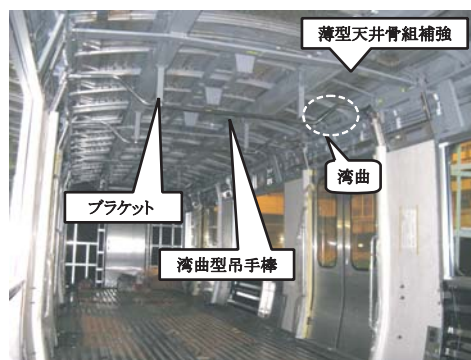


図2 薄型天井骨組補強と湾曲型吊手棒取付状況

表2 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	-		
断面積	[m <sup>2</sup> ]	1.11 × 10 <sup>-3</sup>	5.31 × 10 <sup>-4</sup>
断面2次モーメント	[m <sup>4</sup> ]	2.92 × 10 <sup>-7</sup>	3.76 × 10 <sup>-8</sup>



(a) 全景 (b) 車輪と軌条輪  
図3 車両試験台加振試験の状況

特集：鉄道車両技術

析を実施した結果を、図4に示す。左列 (a) が通常条件、中列 (b) がインナーリングを取付けたリング補強条件であり、右列 (d) は薄型天井骨組補強と湾曲型吊手棒を取り付けた条件である。紙面の都合上、条件 (c) の結果は省略する。

図中のZ-10などの記号は振動形状の特徴を表したもので、最初の文字はSが屋根と床が同位相（方向）、Aは逆位相で変形していることを表し、Zはその判別が難しいか、または屋根と床の振幅が著しく異なる場合を示す。その後の2桁の数字は、10の位が屋根、1の位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、J-1は車体中央断面がひし形に変形するモード、J-2はねじりモードである。これらのモードは、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。なお、振動形状は変形をわかりやすく表現するため振幅を規格化しており、異なる振動モード間では振動の大きさを直接比較できないことに注意が必要である。上述の記号に続く数値は各モードの固有振動数、モード減衰比である。

次に、床上（台車直上）で測定した振動加速度からパワースペクトル密度（PSD）を計算した結果を図5に示す。PSDは、振動モード解析の結果を示した (a) (b) (d) のほか、天井骨組補強を16本取り付け付けた条件 (c) についても結果を示してある。

振動モード解析結果（図示しない条件 (c) も含む）、および図5に示したPSDから、補強部材の取付けによる効果をまとめると、以下ようになる。

- (b)～(d)のいずれの補強条件も、屋根が主体となって振動するモード (Z-10, Z-20, Z-30等) の固有振動数が大幅に上昇した。
- ステンレス鋼製車体の特徴である、車体各面の独立変形を伴う振動が抑制される傾向が認められ、特にZ-10モードは、屋根中央部（クレーン取付のため外板がない特殊な測定点）を除いて、車体が「はり」としての振動形状に近いS-11モードとなった。
- 車体断面にせん断変形を生じるモードについては、振動形状の変化はほとんど見られなかった。リング補強条件 (b) では「つなぎ金」による床・側間の角度変化抑制効果の影響でJ-1モードの固有振動数がやや上昇したが、(c) (d) ではほとんど変化しなかった。J-2モードは変化量がわずかであった。
- J-1モードや図4 (b), (d) の (3) に示したA-31モードのように、リング補強条件 (b) による固有振動数上昇が、条件 (d) の効果を上回る振動モードが存在し、図示しない測点によっては加速度PSDに差が見られた。

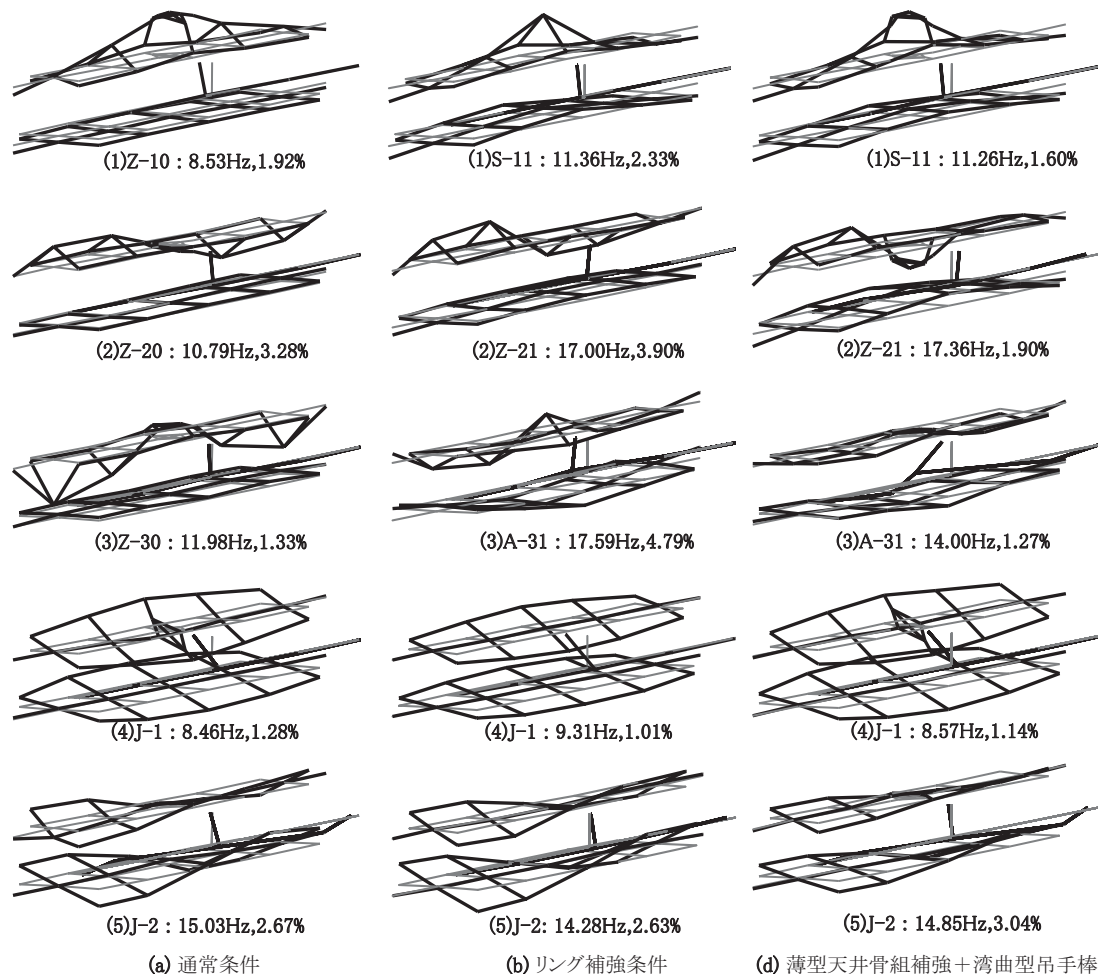


図4 剛性試験車体の振動モード比較

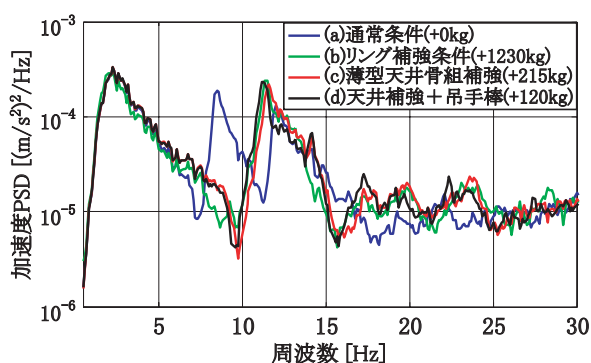


図5 剛性試験車体の床上（台車直上）加速度 PSD

が、図5の床上（台車直上）加速度 PSD に関しては条件 (b) ~ (d) の差異が小さく、一部のモードを除いて、ほぼ同等の剛性向上効果が得られると判断できる。

- 図5の加速度 PSD について、通常条件では7Hz付近と12Hz付近に明瞭なピークが認められるが、条件 (b) ~ (d) では11Hz付近のピークが残るのみである。したがって、条件 (d) でも、車体を「はり」としての振動に近づける目的について、一定の効果が得られた。

条件 (b) におけるインナーリングは質量増が約1.2tであるが、条件 (c) における薄型天井骨組補強は合計約215kg、また、半数を吊手棒に置き換えた (d) は約120kgと、質量増を大幅に抑えることができる。さらに、車端付近は妻構体近傍のため、もともと屋根構体の面外変形や側構体の相対変形が小さく、補強部材による効果が小さいと予想される。したがって、車端付近の薄型天井骨組補強については、たとえば2本分を取除いても、剛性向上効果に大差はないと推察され、さらに軽量化の余地がある。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。

## 4. 振動試験車体の定置加振試験

### 4.1 試験条件

前章までに検討対象とした「剛性試験車体」は、内装パネル、腰掛、荷棚、天井風道等の車内設備（以下、内装等と呼ぶ）を装備していない、いわゆる構体相当の試験車両である。これらの内装等は強度部材としては考慮されていないが、減衰付与効果があることが明らかになっており、剛性についても一定の寄与をしているものと考えられる。したがって、補強部材による剛性向上効果は、最終的には内装等を装備した完成車相当で確認する必要があると考えられる。

本章では前述の補強部材のうち湾曲型吊手棒について、内装等を有する「振動試験車体」に取り付けて加振試験を実

施し、剛性向上効果の確認を行った。なお、ここでは前章までの車両試験台による加振とは異なり、加振器によって車体に直接力を加える、定置加振により振動測定を実施した。

振動試験車体への湾曲型吊手棒の取付状況を図6に示す。加振位置は車体まぐらより近傍のジャッキ受部とし、加振棒を介して動電型加振器により車体を上下に加振する。このときの加振力を加振棒先端に取り付けたロードセルにて測定するとともに、車体各点の振動を加速度ピックアップにより計測した。動電型加振器の設置状況を図7に示す。

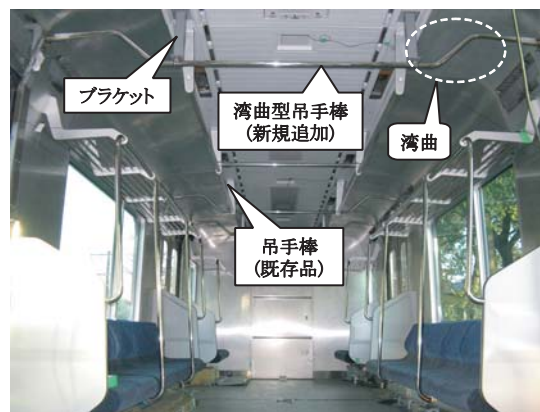


図6 振動試験車体への湾曲型吊手棒取付状況

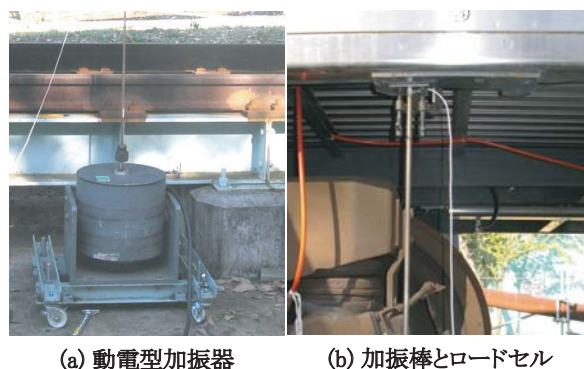


図7 定置加振試験の加振器設置状況

### 4.2 試験結果

湾曲型吊手棒の取付の前後で同一条件による加振を実施し、車体加速度から振動モード解析を実施した結果を図8に示す。(a) が吊手棒なし、(b) が吊手棒ありの場合の結果である。また、台車直上の測定点における床上加速度から PSD を計算した結果を図9に示す。定置加振試験結果より得られた知見をまとめると以下のようになる。

- 湾曲型吊手棒により、屋根主体のモード (Z-10, Z-20, Z-30 等) の固有振動数が1.5~2.5Hz程度上昇した。
- 床の長手方向中央部付近に振動の腹を持つモード (A-31) の固有振動数上昇は0.3Hz程度と小さかった。
- 断面がせん断変形するモード (J-1) への剛性向上効果はほとんどなかった。
- 車体の振動形状をはりに近づける効果は小さく、前節の天井骨組補強との組合せ時のように、PSD の

特集：鉄道車両技術

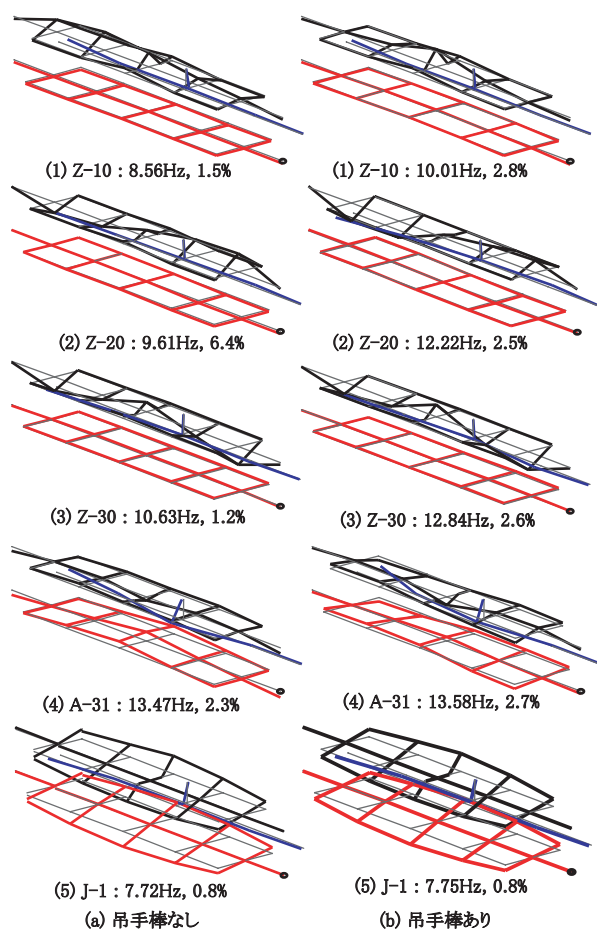


図8 振動試験車体の振動モード比較

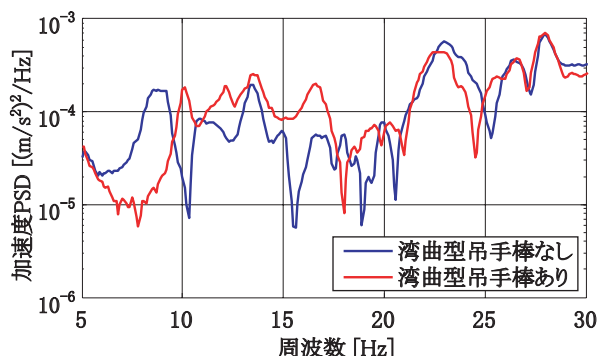


図9 定置加振時の床上(台車直上)加速度 PSD

ピーク数を減少させるには至らなかった。ただし、加振条件が走行時とは異なるため、輪軸位置からの加振に対する振動応答特性を確認する必要がある。

5. まとめ

本報告では、前報<sup>3)</sup>で剛性向上効果が確認された内部骨組によるリング状の構造(インナーリング)を軽量化し、実用性を向上させるための検討を行った。インナー

リングの構成部材のうち、特に剛性向上効果が高かった天井骨組補強に着目し、質量増を抑えるとともに、風道や天井板といった車内設備設計の制約をなるべく緩和するため、断面を薄型化した新たな補強部材を設計した。さらに、既存の車内設備である吊手棒を有効に活用し、一部の天井骨組補強を代替することでさらなる軽量化をはかり、構体相当の「剛性試験車体」を対象とした車両試験台加振試験を実施した。その結果、質量増をインナーリング取付時の約1.2tから100kg程度まで抑えながら、車体を一本の「はり」に近づける効果を得るとともに、一部のモードを除いて、インナーリング取付時とほぼ同程度まで固有振動数を上昇させることができた。

次に、内装や腰掛を有する、より営業車に近い「振動試験車体」に吊手棒を取付け、定置加振試験を実施した。その結果、振動モードによって固有振動数を上昇させる効果が認められ、天井骨組補強と組み合わせ時よりは小さいものの、一定の剛性向上効果が確認できた。

今後は、振動試験車体を対象として車両試験台加振試験を実施し、より走行時に近い加振条件での剛性向上効果を確認する計画である。また、剛性向上効果が大きい補強部材については、部材取付による変形の拘束効果が大きいと考えられるため、当該個所に減衰を付与できれば、振動エネルギーを効率的に散逸できるものと期待できる。したがって、補強部材を減衰部材に置き換えるなど、車体の振動を直接減衰させる方策について検討し、最終的には乗客が感じる振動を低減させ、乗り心地向上をめざした検討を進める予定である。

なお、本報告で用いた天井骨組補強、吊手棒の設計・製作に際して、東急車輛製造(株)殿にご協力いただいたことをここに記し、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, pp22-28, 2002
- 2) 相田, 富岡, 瀧上: 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, 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, pp11-16, 2008
- 4) 瀧上唯夫, 富岡隆弘, 相田健一郎: 天井骨組補強による車体剛性向上手法の検討, J-Rail2008 講演論文集, pp81-84, 2008
- 5) 谷口宏次, 市川聡, 富岡隆弘, 瀧上唯夫, 相田健一郎: 吊手棒を活用した車体剛性向上手法, J-Rail2008 講演論文集, pp77-80, 2008