

内装ロールバーによる車体剛性と乗り心地の向上

Improving Rigidity of Carbodies and Ride Comfort by Interior Roll-bar

■ 今岡 憲彦 Norihiko IMAOKA

当社の開発した「sustina」第1号車両では、自動車などによる側面衝突への車体強度向上策として、内装ロールバーを装備した。この内装ロールバーは、車体の左右側面間、さらに荷棚、腰掛袖仕切りとの間を吊手棒でつなげる形で構成されている。この構成は、車体剛性向上を目的として当社と（公財）鉄道総合技術研究所（以下、鉄道総研）との共同研究により開発した剛性向上棒の構成と同一であり、内装ロールバーも剛性向上棒と同様に車体剛性向上と乗り心地向上に寄与すると考えられる。本報では、定置加振試験と本線走行試験の結果から、内装ロールバー装備の効果を明らかにする。

1 はじめに

当社の開発した「sustina」は、軽量化、省エネルギー化、メンテナンスコスト低減などを図った次世代のステンレス車両である。「sustina」第1号車両となる、東急電鉄殿向け5050系5576号車は2013年5月に営業を開始した。

この「sustina」第1号車両には、車内の吊手棒を活用する形で車体左右側面間をつなぐ内装ロールバーを装備しており、車体の側面強度を向上させるために重要な役割を果たしている。鉄道車両は、通常使用時に車体側面へ著大な荷重が加わることはないが、過去に踏切へ侵入した自動車などとの衝突事例を考慮すると、乗客・乗員の安全確保のために車体の側面強度向上は必要であると言える。

ところで、この内装ロールバーを構成する吊手棒は、車体の左右側面間をつなぐ他に、荷棚、さらには腰掛の袖仕切りへとつながっている。これは内装デザインの関係もあるが、車体の剛性向上を目的として当社と鉄道総研が共同開発した、剛性向上棒の構成に近づける目的もある。図1に内装ロールバーを図示する。

剛性向上棒は、東急車輛技報第60号の「軽量ステンレス鋼製車体の剛性向上に関する検討^①」において、「直線型吊手棒」、「湾曲形吊手棒」として解説を行っている。剛性向上棒の開発目的は、車体剛性の向上を狙ったものであるが、剛性向上棒を付けた車両で本線走行を模擬した加振試験を行うと、乗り心地が向上する効果も得られている^②。

そこで、「sustina」第1号車両に装備した内装ロールバーも、剛性向上棒と同様に車体剛性向上効果、および乗り心地向上効果があると考えられるため、その効果を実車での試験により確認した。本報では、「sustina」試作車両を用いた定置加振試験の結果と、「sustina」第1号車両を用いた本線走行試験の結果を示し、内装ロールバー装備による効果を明らかにする。

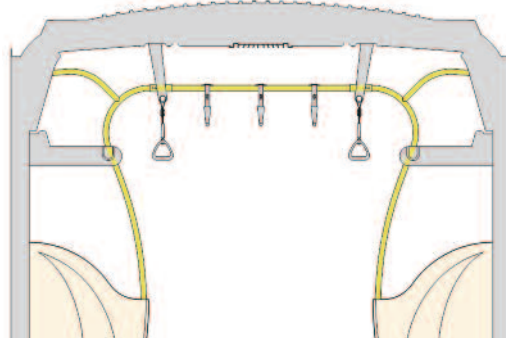


図1 内装ロールバーと、それを構成する吊手棒

2 「sustina」試作車両での定置加振試験

「sustina」試作車両の概要については、本誌の「「sustina」国内第1号車両の開発」にて記述している。本報では定置加振試験に関わる事項について解説を行う。

今回、「sustina」試作車両を対象に、内装ロールバーの有無による車体剛性の相違を、試験により評価した。本章ではその評価方法と結果について記す。

2.1 試験条件

車体の剛性を評価するには、JIS E 7105で規定する垂直荷重試験の車体中央変位量を用いる方法、同じくJIS E7105で規定する曲げ固有振動数測定試験で曲げ固有振動数を測定する方法などが考えられる。今回は、車両走行中に生じるさまざまな振動モードごとに評価を行うため、車体加振試験を行った。

車体加振は、車体直下の試験場床上に設置した動電形加振器を使い、加振棒を介して車体を上下加振する方法（定置加振）を採った。この加振方法は、これまでの鉄道総研との共同研究で多くの測定実績があり、また測定場所の制約が少なく、比較的容易に車体を加振できる方法である。図2に加振器と加振棒の設置状態イメージを示す。

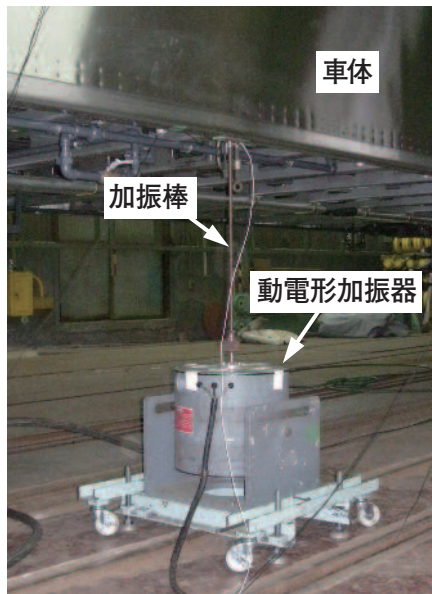


図 2 動電形加振器・加振棒設置状態

定置加振試験では、車体を上下加振する際に、車体各所へ設置した加速度センサで振動加速度を測定すると共に、車体と加振棒の間に設けたロードセルで加振力を測定した。加速度センサの設置位置を図 3 に示す。また、加速度センサの設置状況を図 4、図 5 に示す。

加振信号は5～50Hzでほぼ平坦な周波数特性を持つランダム波（一般に、バンドランダム波と称す）としている。振動加速度と加振力の測定結果を使い、車体全体のモード解析を行って、5～20Hzの周波数帯域で車体固有振動モードを同定した。



図 4 加速度センサ 屋根測点設置状況

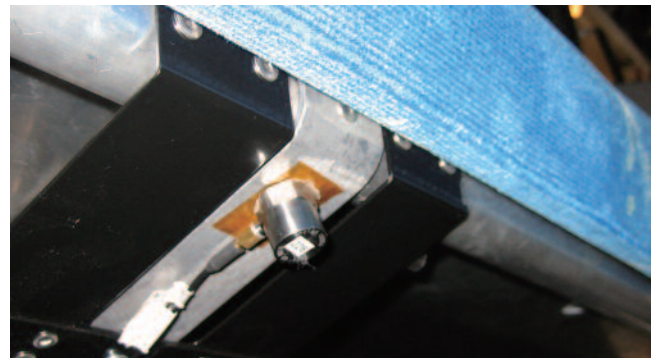


図 5 加速度センサ 腰掛測点設置状況

なお、定置加振試験の際には、空気ばねを設置した加振試験用の仮台車で「sustina」試作車体を支持し、本線走行状態に近い支持条件となるようにしている。一方、屋根上クーラは設置せず、ほぼ同形状のダミーカバーを載せた状態とした。床下機器も設置していない。

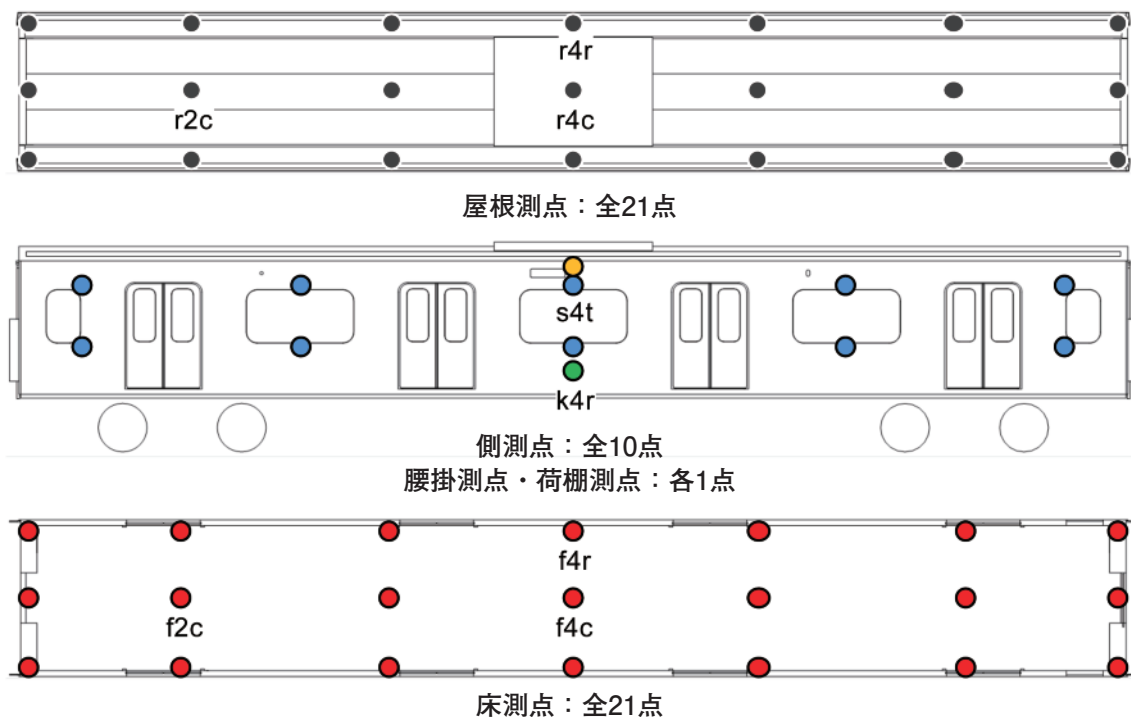


図 3 「sustina」試作車両 加速度センサ設置位置

2. 2 試験結果

2. 2. 1 固有振動モード

内装ロールバーが有る状態での「sustina」試作車両の固有振動モードのうち、代表的なモード5つについて図6に示す。

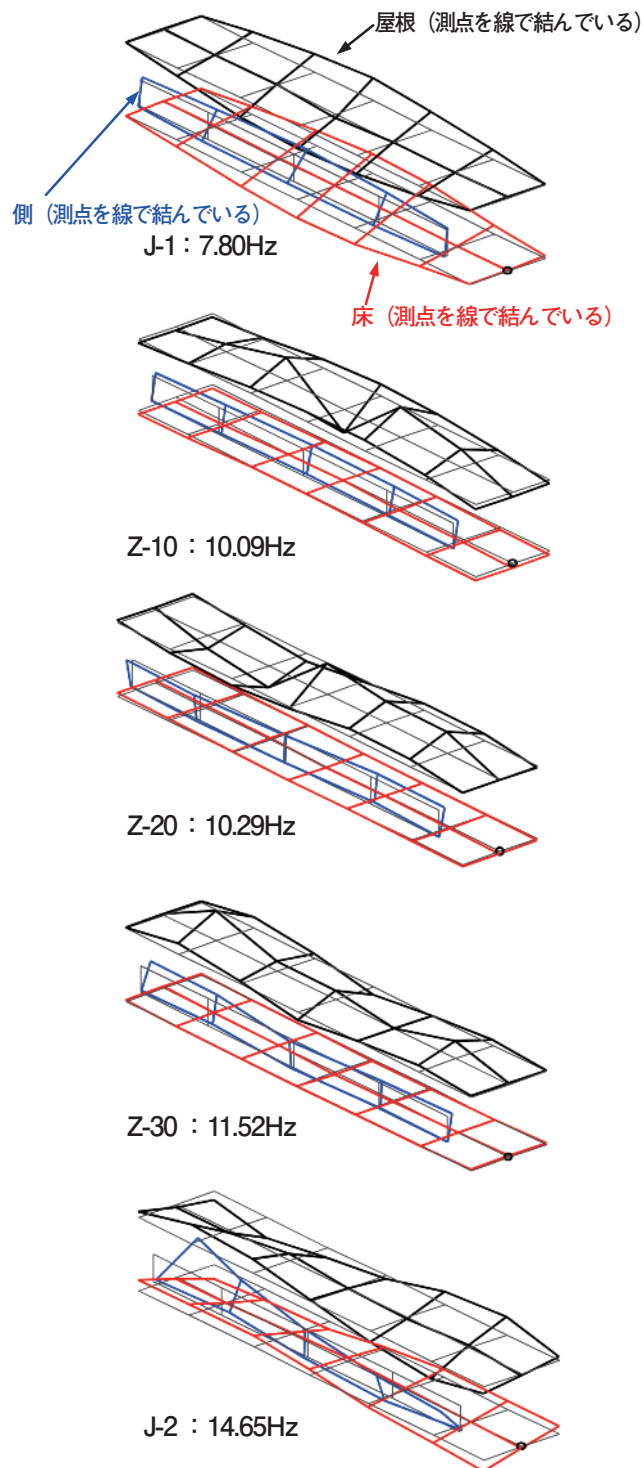


図6 「sustina」試作車両 主要固有振動モード
(内装ロールバー有り)

固有振動モード図に示したJ-1などの記号は、車体振動モードの特徴を記号化したものである。最初の英文字がモード形状を略号で示す。車体断面にせん断変形を生じるようなねじり変形モードの場合はJとする。上下曲げ変形モードのうち、屋根と床が同位相の場合はS、逆位相の場合はA、屋根だけが変形するなどして位相関係が不明な場合はZと表現する。ハイフン以降の数字が1桁の場合は振動モードの腹の数、2桁の場合は10の位が屋根の振動モードの腹の数、1の位が床の振動モードの腹の数を示す。

ところで、図6のZ-10は、屋根中心線上の振動形状だけから判断するとZ-30となる。しかし、屋根上クーラ位置に設置したダミーカバー上のr4cだけ振動するモードが試験で得られ、またZ-10では、そのr4cだけ極端に位相がずれていることから、車体全体の振動モード評価のためにZ-10として整理した。

過去の研究で、ステンレス車両のような構造の車体は、床、屋根、側の面体がそれぞれ独立して振動する特性であることを明らかにした³⁾。今回の測定結果から、「sustina」車体も他のステンレス車両と同様の振動特性であると言える。

2. 2. 2 周波数応答関数

「sustina」試作車体に取り付けた測点のうち、代表的な位置での周波数応答関数 (FRF) を図7に示す。

床測点のうち、車体中心線上にあるf2cとf4cの結果 (図7(a), (b)) を見ると、内装ロールバーが付くことで8Hz付近のピークが10.3Hz付近へシフトしていることがわかる。このシフトしたピークに関連する振動モードは、Z-10とZ-20であった。一方、車体側面近傍にあるf4rの結果 (図7(c)) を見ると、内装ロールバーの有無による違いはほとんど無かった。

屋根測点のうち、車体中心線上にあるr2cとr4cの結果 (図7(d), (e)) を見ると、f2c, f4cのように、内装ロールバーが付くことで8Hz付近のピークが10.3Hz付近へシフトしていることがわかる。このシフトしたピークに関連する振動モードは、床測点と同じくZ-10とZ-20であった。一方、車体側面近傍にあるr4rの結果 (図7(f)) を見ると、内装ロールバーが付くことで10Hz付近にピークが生じている。振動モードから見ると、内装ロールバーが無い時には9Hz付近のわずかなピークで生じる振動モードであるので、車体剛性の向上に伴う影響であると言える。ところで、車体中央付近のr4cについては7.2Hz付近に大きなピークがある。このピークに内装ロールバーの有無は影響がなく、また、この振動モードは前述の通り屋根上クーラ位置のダミーカバーにのみ存在する特徴的な振動モードであるので、本報では評価しない。

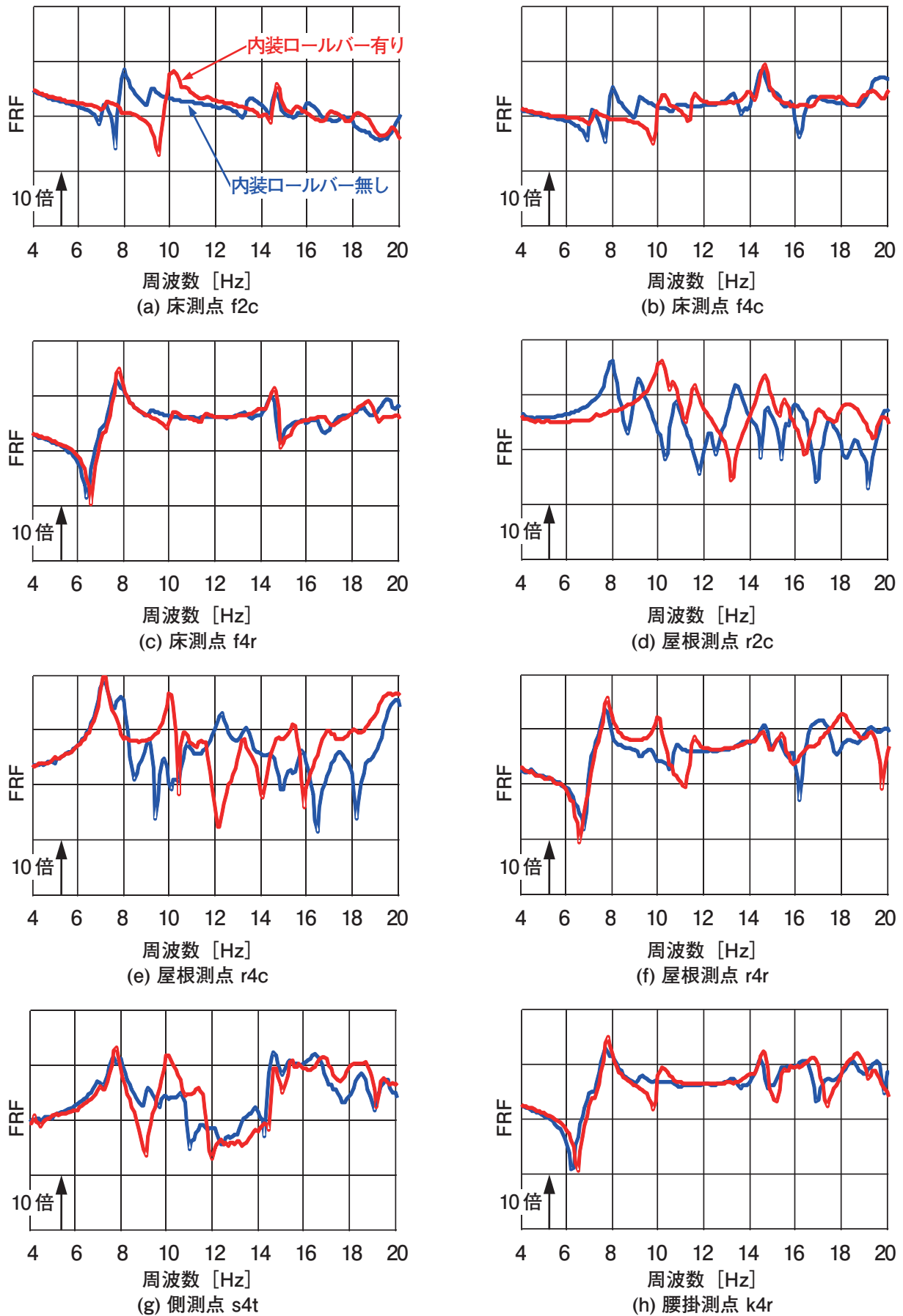


図 7 「sustina」 試作車両 周波数応答関数 (主要な測点)

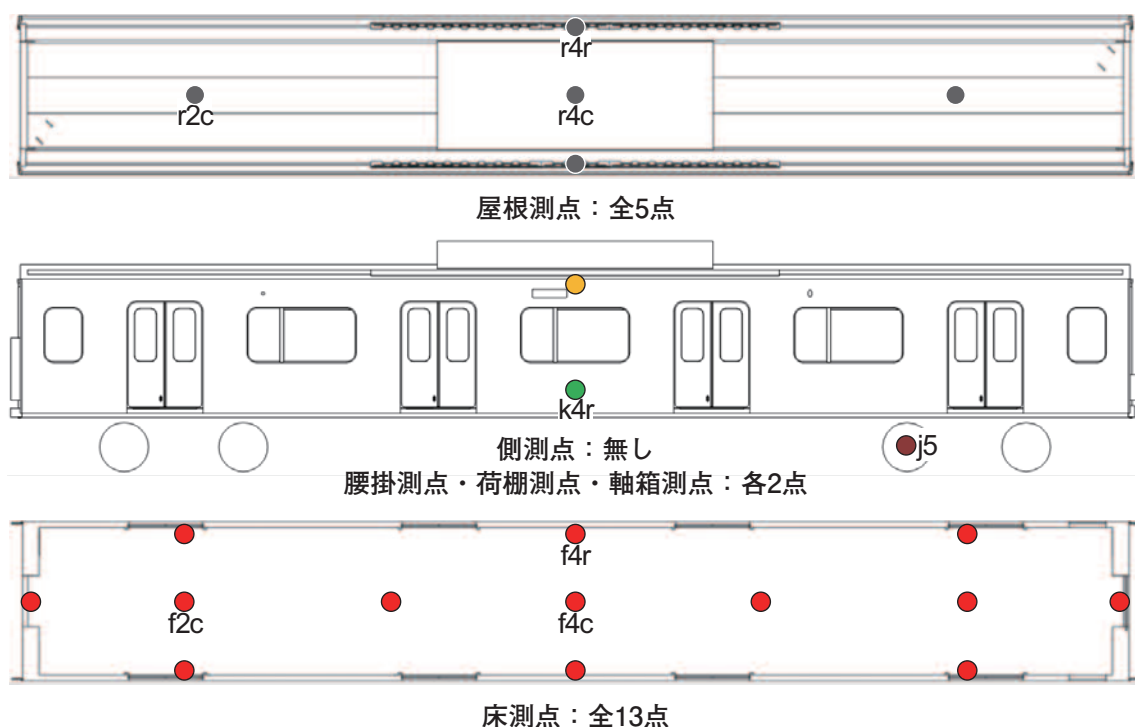


図 8 「sustina」第1号車両 加速度センサ設置位置

側測点であるs4tの結果(図 7(g))では、r4rと同様に内装ロールバーが付くことで10Hz付近にピークが生じている。s4tもr4rと同様に車体剛性向上の影響と言える。

腰掛測点であるk4rの結果(図 7(h))では、6～8Hzの範囲の線が高周波数側へわずかにシフトしており、また10Hz付近に小さなピークが生じている。車体剛性向上の影響と言えるが、他の測点よりは影響が小さい。

2. 3 「sustina」試作車両における内装ロールバーの効果

一般的に、同じ振動モード同士で比較すると、剛性が増した方が固有振動数は大きくなると考えられる。その視点から前節で示した試験結果を評価すると、Z-20モードの車体振動に対して内装ロールバーによる剛性向上効果が大きい。8Hz付近の固有振動数は10.3Hz程度になる。

一方、内装ロールバーが有ることで振動が大きくなる場所も存在することが確認できた。

3 「sustina」第1号車両での本線走行試験

「sustina」試作車両に対する定置加振試験により、入力加振に対する応答振動加速度がどう変化するか掴むことができた。さらにそれを基にして車体剛性への効果を見ることができた。しかしながら、実際に乗客が感じる乗り心地への影響度合いに関しては、本線走行時と同じ周波数特性を持った入力加振に対する応答振動を見る必要がある。そこで「sustina」第1号車両の本線試運転の際に、内装ロールバーの付け外しを行い、乗り心地に対する効果を確認した。

3. 1 試験条件

スケジュールの都合上、「sustina」第1号車両の本線走行試験は東急田園都市線で行った。全走行区間の中に86km/h等速区間を設定し、内装ロールバーの有無による振動の違いを、同一区間、同一速度で評価できるようにした。なお等速区間の走行速度は、事前に車体の曲げ弾性振動を励起しやすいと想定する速度を算出し、それを基に設定した。

本線走行試験では、加振信号に相当する振動を記録するために「sustina」第1号車両の台車軸箱に加速度センサを設置したほか、定置加振試験と同様に車体各所へ加速度センサを設置し、振動加速度を測定した。なお、準備時間・施設の制約があり、定置加振試験よりも測点を減らしている。加速度センサの設置位置を図 8に示す。また、加速度センサの設置状況を図 9、図 10に示す。

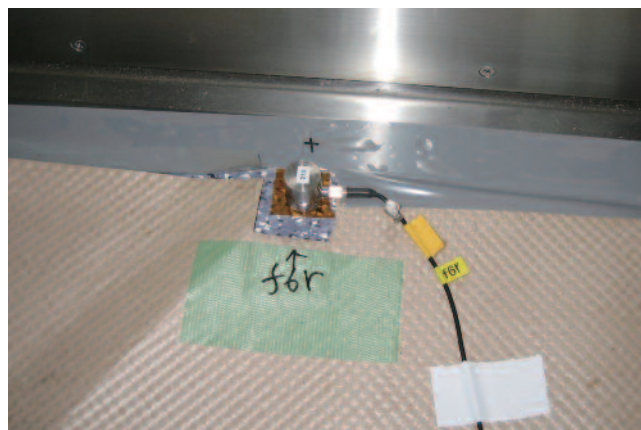


図 9 加速度センサ床上設置状況

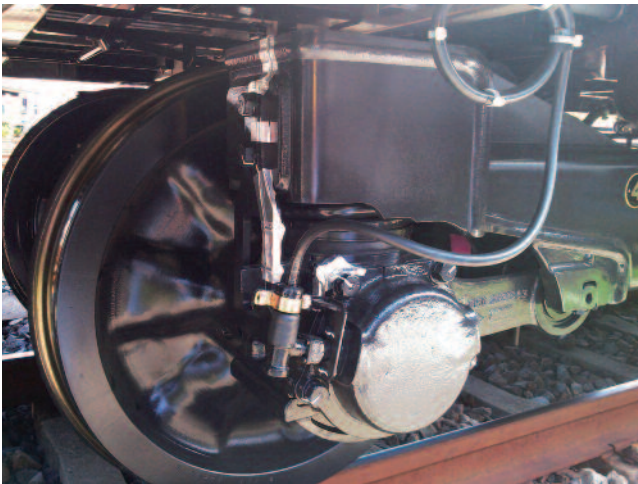
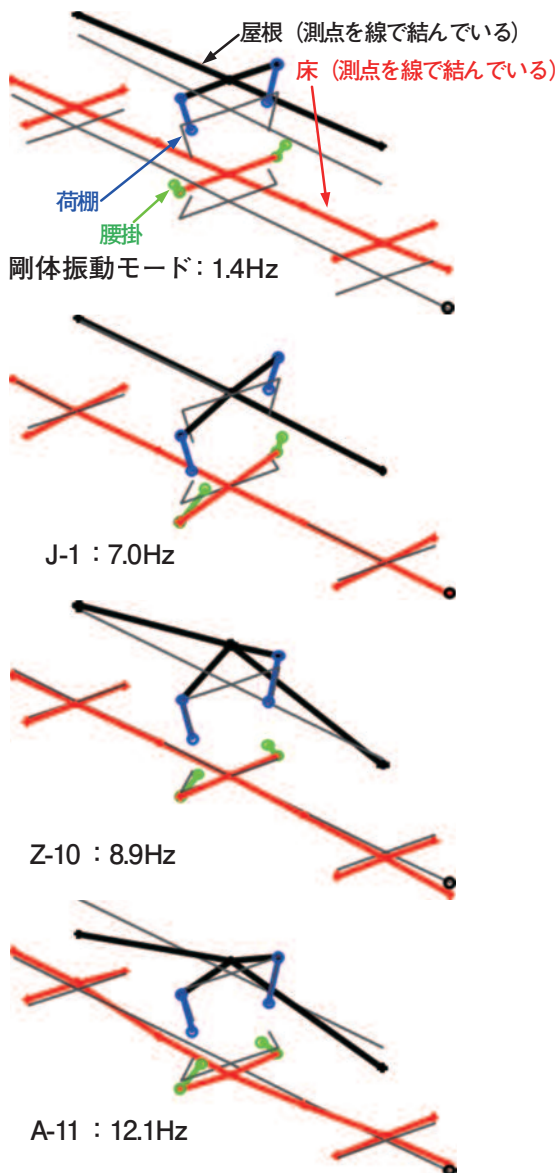


図 10 加速度センサ軸箱設置状況

図 11 「sustina」第1号車両 主要固有振動モード
(内装ロールバー有り)

3. 2 試験結果

3. 2. 1 固有振動モード

「sustina」第1号車両に内装ロールバーが有る状態での固有振動モードのうち、代表的なモード4つについて図 11に示す。

定置加振試験で見られなかったモードに、剛体振動モードがある。これは車体前後の台車のばねが同位相で上下振動するモードであり、あたかも車体を剛体と見なした時のように上下振動する。そのため、内装ロールバーの有無と関係ないモードであるので、本報では評価しない。

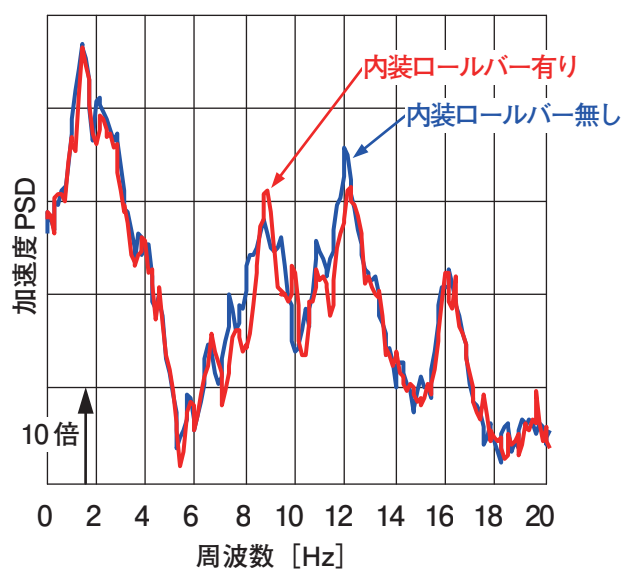
振動モードJ-1と振動モードZ-10は、「sustina」試作車両の定置加振試験結果よりも小さな固有振動数となっている。この原因は、屋根上機器および床下機器の有無による車両質量の相違が大きいと考えられる。振動モードA-11は定置加振試験では見られなかったモードであるが、床の振幅に比べて屋根の振幅の方が大きいので、定置加振試験で測定した振動モードZのうちの1つが、本線走行試験で振動モードAに変化したと考えられる。

3. 2. 2 加速度パワースペクトル密度

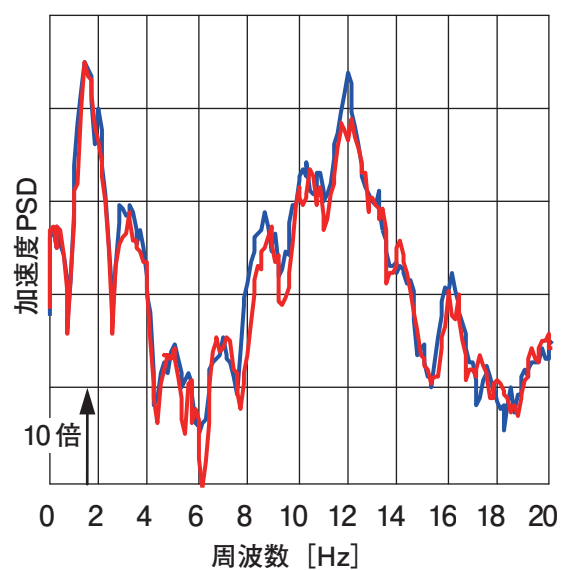
「sustina」第1号車両に取り付けた測点のうち、代表的な位置でのパワースペクトル密度 (PSD) を図 12に示す。

床測点と屋根測点の結果 (図 12(a)~(d)) を見ると、内装ロールバーが有ることによるピークのシフトはほとんど見られない。また、8Hz付近と12Hz付近のPSD値が小さくなっており、剛体振動モードの周波数帯 (1.4Hz付近) を除くと、最大ピークは低下する。腰掛測点の結果 (図 12(e)) も、床測点と同様の傾向を示している。12Hz付近のピークは、内装ロールバーが付くことで約1/3となる。

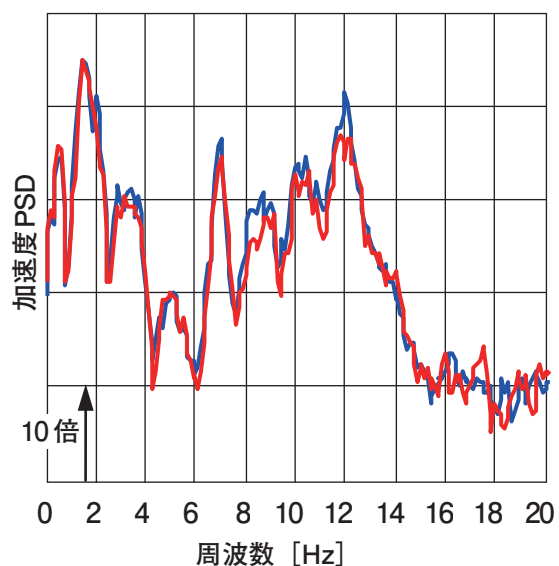
軸箱測点の結果 (図 12(f)) を見ると、違いがほとんど無い。加振信号 (条件) はほぼ同一であると言える。



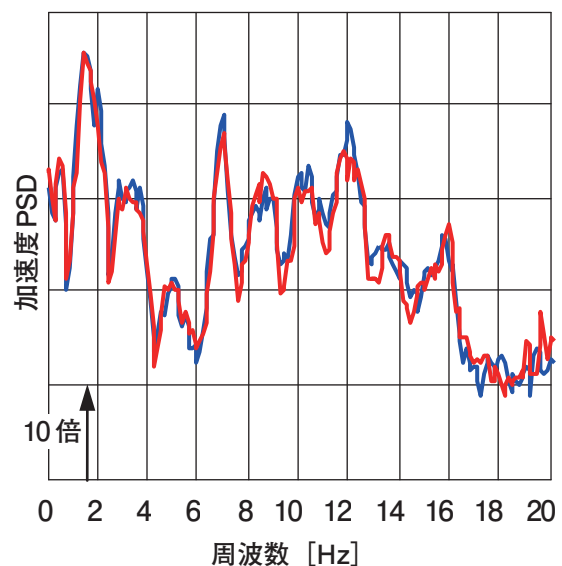
(a) 床測点 f2c



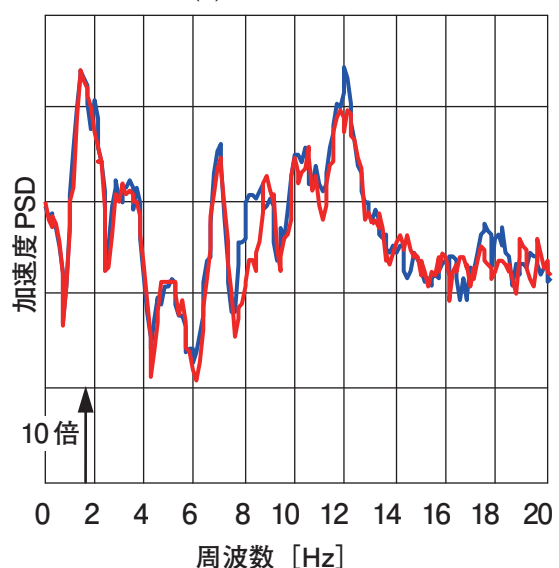
(b) 床測点 f4c



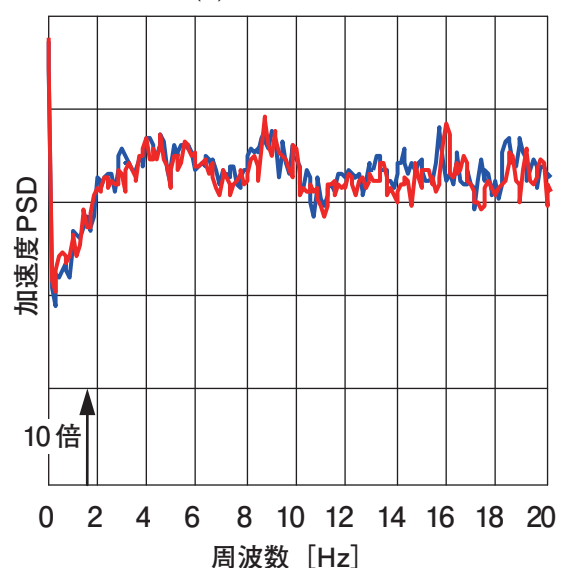
(c) 床測点 f4r



(d) 屋根測点 r4r



(e) 腰掛測点 k4r



(f) 軸箱測点 j5

図 12 「sustina」第1号車両 周波数応答関数 (主要な測点)

3. 2. 3 乗り心地レベル

前項の加速度PSDを使い、乗り心地レベル (L_T) を算出して評価する。

L_T は、鉄道の乗り心地評価に一般的に用いられるもので、その値から5段階の乗り心地評価を行うことができる。表1にそのランクを示す。数値が小さいほど乗り心地は良くなる。

表1 乗り心地レベル (L_T) と評価

ランク	乗り心地レベル(L_T)	評価
1	$L_T < 83 \text{ dB}$	非常に良い
2	$83 \text{ dB} < L_T < 88 \text{ dB}$	良い
3	$88 \text{ dB} < L_T < 93 \text{ dB}$	普通
4	$93 \text{ dB} < L_T < 98 \text{ dB}$	悪い
5	$98 \text{ dB} < L_T$	非常に悪い

腰掛測点k4rと床中心に位置する床測点f4c、それぞれの乗り心地評価と、内装ロールバーの有無による L_T の変化量 (ΔL_T) を表2に示す。 ΔL_T がマイナスの時は、内装ロールバーによる乗り心地改善効果があることを表している。

表2 内装ロールバーの有無による L_T の変化

位置	内装ロールバー	乗り心地評価	ΔL_T
腰掛 k4r	無し	非常に良い	-1.2dB
	有り	非常に良い	
床 f4c	無し	非常に良い	-1.4dB
	有り	非常に良い	

内装ロールバーの有無に関わらず、乗り心地評価は非常に良い、であるが、内装ロールバーが有ることで1.2～1.4dB程度の乗り心地改善効果が得られる。

ところで、k4rの12Hz付近のピーク減少率を基に考えると、 L_T の減少度合いは限定的である。 L_T の算出には0.5～80Hzの振動が関係するので、1.4Hz付近の剛体振動モードのピークが変化しないことが L_T への効果を限定的にした理由である。

3. 3 「sustina」第1号車両における内装ロールバーの効果

「sustina」第1号車両の本線走行試験により、内装ロールバーが有ることで乗り心地が向上する結果が得られた。

「sustina」試作車体の定置加振試験では、内装ロールバーが有ることで振動が大きくなる箇所が屋根などに存在して

いたが、本線走行試験では振動が大きくなるような傾向は見られなかった。

ところで、今回の本線走行試験では空車状態で測定を行った。乗車人員が増えるに従っての乗り心地への影響を確認する必要があるが、これまでの研究により、乗車人員の増加は車体への振動減衰効果の付与に相当することがわかっている⁽⁴⁾。これは、どちらかと言うと振動低減に寄与する効果であるので、乗車人員の増加による悪影響はほとんど生じないと推測できる。

4 まとめ

「sustina」の内装ロールバーによる車体剛性向上効果と乗り心地向上効果について、試験により確認を行った。

定置加振試験により、内装ロールバーが有ることで車体剛性が向上することを確認できた。また、本線走行試験により、内装ロールバーが有ることで乗り心地が向上することを確認できた。

鉄道総研との共同開発による剛性向上棒は、既存車への追加取り付けを考慮した構成となっていた。内装ロールバーでも既存車への追加取り付けが可能であるので、国内外を問わず、「sustina」以上に普及を図っていきたい。

最後に、振動測定や解析評価にあたり、多大なご協力をいただいた関係各位へ謝意を表す。

参考文献

- (1) 谷口宏次，他：「軽量ステンレス鋼製車体の剛性向上に関する検討」，東急車輛技報第60号，12-19，(2010)，東急車輛製造(株)
- (2) 瀧上唯夫，他：「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）」，J-RAIL2010講演論文集，321-324，(2010)
- (3) 相田健一郎，他：「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，143-146，(2007)
- (4) 富岡隆弘：「旅客の乗車で車体振動が変わる」，RRR Vol.66 No.7，18-21，(2009)，(財)鉄道総合技術研究所

著者紹介



今岡憲彦
生産本部
技術部（商品開発）主査