

乗り心地向上をめざして 鉄道の車体振動特性を解明する



楨田 耕伸
Yasunobu Makita
車両技術研究部
車両振動研究室
研究員



秋山 裕喜
Yuki Akiyama
前 車両構造技術研究部
車両振動研究室
副主任研究員



瀧上 唯夫
Tadao Takigami
車両技術研究部
車両振動研究室
上席研究員



相田 健一郎
Kenichiro Aida
車両技術研究部
車両振動研究室
主任研究員

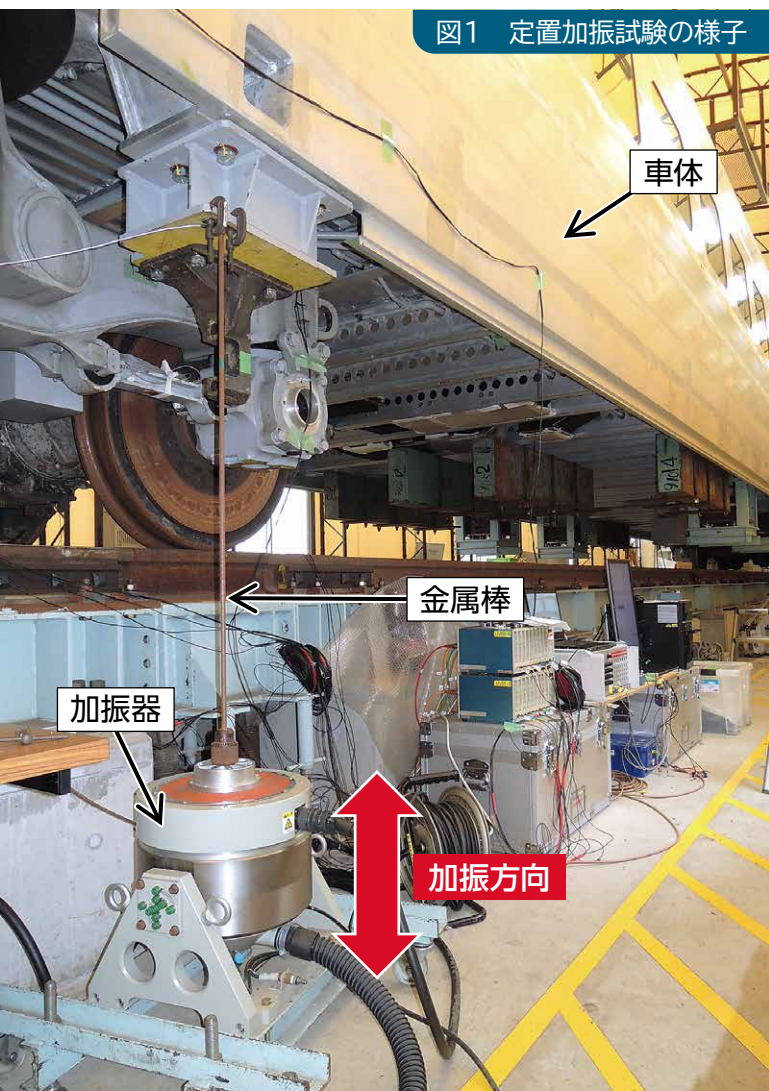
はじめに

鉄道車両で走行中に発生する車体振動は、乗り心地に影響を与える要因の一つであることから、その低減が求められています。車体振動はあらゆる方向に生じますが、上下方向の振動に着目すると、**「車体弾性振動」**^{※参照}が人間の感

じやすい周波数域で発生し、乗り心地に影響を与える事例が多くあります。このことから、車体弾性振動を低減するための研究開発が進められてきました。

車体弾性振動を効率よく抑えて乗り心地をよくするためには、車体がどのように振動しているかを解明する必要があります。鉄道総研では、振動低減策を提案するとともに、車体弾性振動の測定やその特性の調査に関する技術開発も進めてきました。ここでは、まず鉄道総研がこれまで実施してきた、車体弾性振動の特徴を把握する手法を示します。次に、これまでに明らかとなっていない、高い周波数領域における車体の振動を把握するための新たな試験方法を示します。最後に、その試験方法を使った試験により確認できた車体弾性振動の新たな知見について紹介します。

図1 定置加振試験の様子

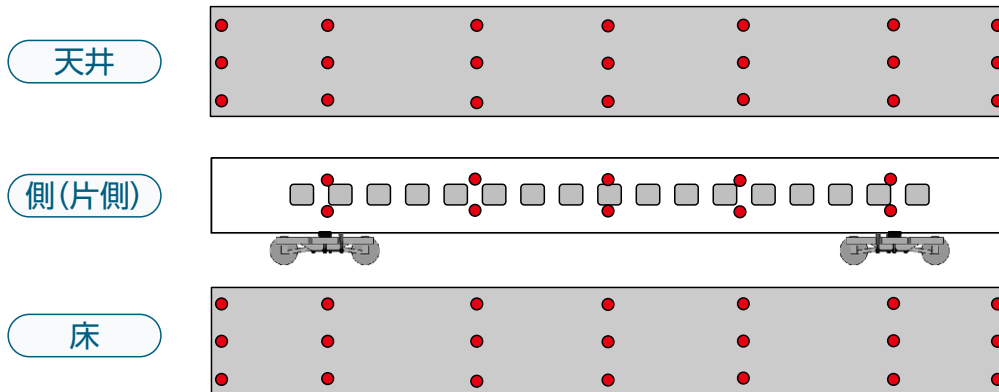


従来の振動特性調査手法

鉄道総研ではこれまでに、車体弾性振動における振動特性を把握する手法を開発し、新幹線

※ 車体弾性振動

車体で起こる振動のうち、車体に変形をともしない振動を「車体剛体振動」、車体に変形をともし振動を「車体弾性振動」とよびます。目で確認することが難しいほど微小な振動であり、「ビリビリ」と表現されるような振動として体感できることから「ビリビリ振動」ともよばれています。



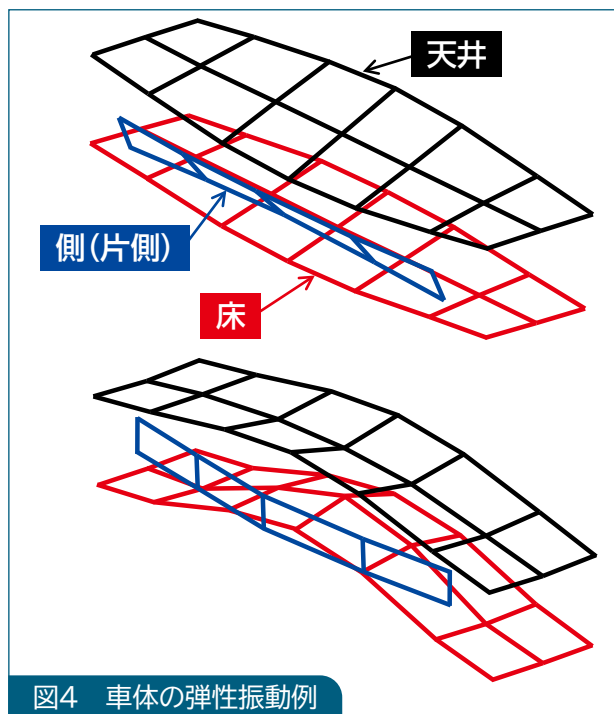
や特急、通勤車両など、さまざまな構造の車両を対象として、振動しやすい周波数や車体の振動形状などの特徴を調べてきました¹⁾。ここでは、その手法(以下、“従来法”とよびます)の一例について説明します。

(1) 加振器による定置加振試験

車両を停車させた状態で、振動を発生させる装置(以下、“加振器”とよびます)を使って車体を振動させ、車体各部の振動加速度と加振力を測定する試験を「定置加振試験」とよびます(図1)。地上に設置した加振器と車体の底面を金属棒で接続して車体を上下に加振し、その時の振動加速度と加振力から車体の振動特性を把握してきました。図2に、振動加速度の測定点の一例を紹介します。床や天井、側の各部(図の例では合計50点程度)に加速度センサーを設置して、各面に垂直な方向の振動加速度を測定しています。なお、対象車両に応じて振動加速度の測定点数を変更します。

(2) 試験結果による車体の振動形状の把握

定置加振試験の結果から把握した車体弾性振動の形状の一例として、鉄道総研が所有する新幹線型試験車体(図3)の10Hz前後における振動形状を図4に示します。床の上下方向の変形形状を赤色、側(片側)の左右方向の変形形状を青色、天井の上下方向の変形形状を黒色で表しています。試験車体は図4のような形状の変形をとまなう振動をしており、営業車両でも同様の形状で振動していることを確認しています。この図から、車体がどのように振動しているかがわかり、この情報を参考に振動低減策を検討してきました。なお、上下方向の振動については、4~8Hz付近の振動を人間が感じやすいこ



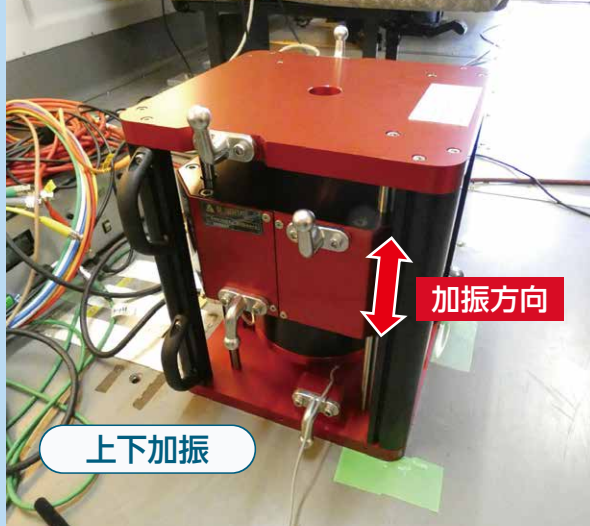


図5 加振器 (水平垂直対応)

とから、振動低減に関する検討も4～8Hzやそれに近い周波数の振動を対象としてきました。

(3) 課題

一方で、高速化などともなう、より高い周波数における車体振動が増加する傾向にある²⁾ことから、高い周波数領域での車体の振動特性も着目されることが増え、30Hz程度までの特性を把握することが求められています。これを実現するためには、従来法では対応が難しく、以下の課題が判明しました。

- ①従来法では、車体の各面に垂直な方向の振動加速度のみを測定対象としていたが、面に水平な方向にも大きく変形する特性が存在することがわかった。このような振動形状を確認するためには左右方向の加振を行う必要があるが、図1で使用している加振器では、これを実現するのが難しい。
- ②高い周波数領域では、振動の「腹（振幅が極

大となる箇所)」の数が多し複雑な振動形状で振動することがわかった。そのような振動形状を把握するには、振動加速度の測定点を増やす必要があるが、試験に要する時間や人員が増加する。

高い周波数領域まで対応可能な振動特性調査手法

前章で判明した課題を解決するため新たに検討した、加振器を車内に設置して車体を加振する方法を紹介します。この方法で使用する新たに製作した加振器(図5)は、設置する向きによって加振方向を変えられ、車体を上下方向にも左右方向にも振動させることができます。質量は58kgであり、2名で移動や設置が可能な加振器です。また、測定に使用する加速度センサーやデータを収録するシステムについても新たな方法を使用しました。従来は、測定用のパ

図6 無線式測定システム



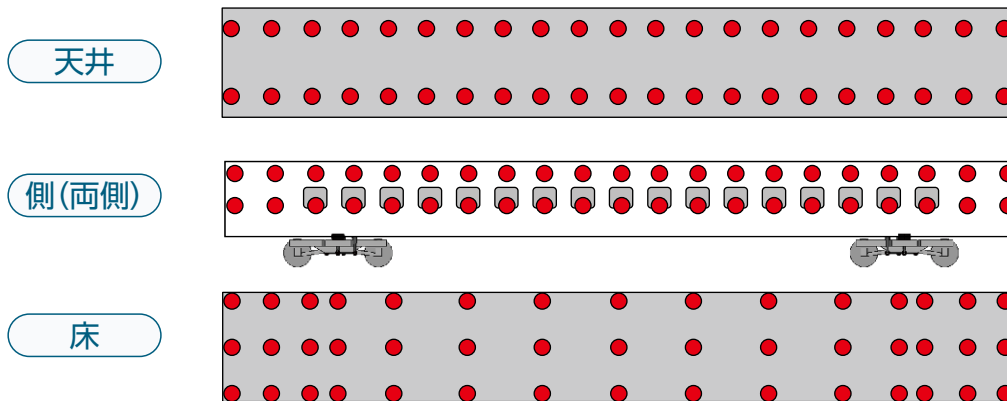
LAN (USB)



無線式3軸加速度センサー

受信機

測定用ノートPC



ソコンから振動加速度を測定するセンサーまで有線で接続していましたが、図6のようにパソコンとセンサーが無線で接続されるシステムを導入しました。これによって試験に要する時間や人員をそのままに、より多くの測定点で振動加速度を測定できる方法を確認しました。

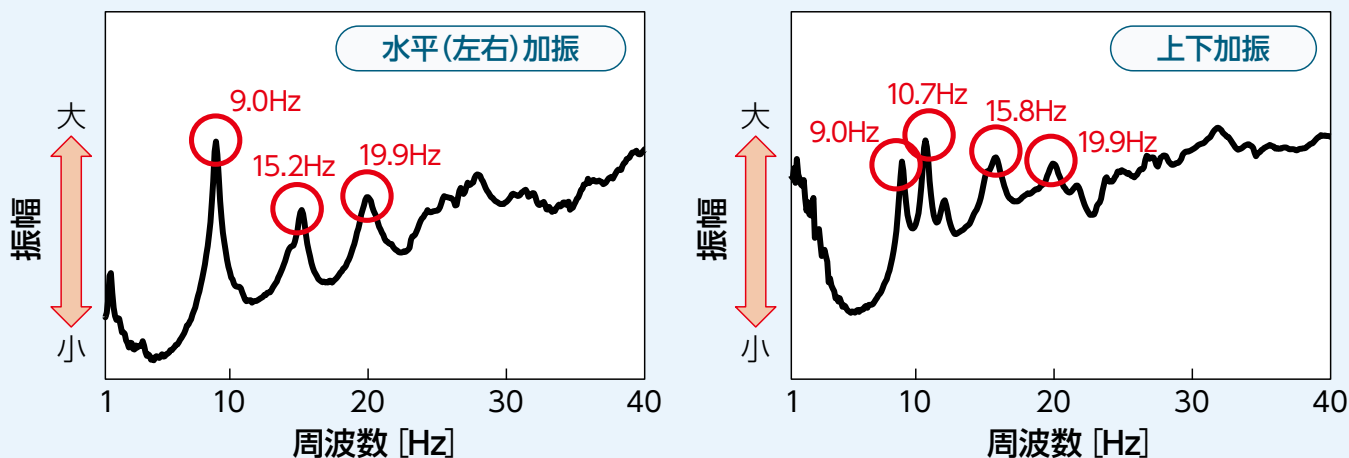
この新しい加振器と測定システムを使い、図3に示す試験車体を対象に定置加振試験を行いました。加速度測定点は、床45点(3点×15点)、両側各42点(2点×21点)、天井42点(2点×21点)の計171点とし、各測定点に無線式加速度センサーを設置して、前後・左右・上下方向の振動加速度を測定しました(図7)。なお、測定点が多いことから、床・天井・右側・左側の各面ごとに無線式加速度センサーを設置のうえ、それぞれの状態で上下および左右方向に加振し、各試験で得られたデータをつなぎ合わせ

て処理することによって、車体全体の振動形状を推定しました。

車両の三次元的な振動形状

車体は周波数ごとに特徴的な振動形状を示すことから、定置加振試験の測定データを周波数領域で解析し、30Hz程度までを対象に車体の三次元的な振動形状を把握します。図8にすべての加速度測定点で得られた、加振力に対する振動加速度の大きさを足し合わせたグラフを示します。横軸が周波数、縦軸が振動加速度の大きさを表し、波形が山状にピークが立っている箇所が振動しやすいことを示しています。ここでは、図8の○で示したピークの周波数に着目し、30Hz程度までの車体振動形状を推定した結果を図9に示します。それぞれ、9.0Hz、10.7Hz、15.2Hz、15.8Hz、19.9Hzの振動形状を示し

図8 試験車体の周波数特性



ており、左から^{ふかん}俯瞰図、上面図(車体を上から見下ろした図)、側面図、正面図であり、天井の変形形状を赤色、床の変形形状を青色、左右の側の変形形状をそれぞれ黄緑色、水色で図示しています。

図9(a)の9.0Hzと図9(b)の10.7Hzの振動形状は図4に示したものとほぼ一致しており、従来法でも確認はできていました。しかし、新しい試験手法によってより滑らかな形状が把握できたことに加えて、左右側面の上下方向、床と天井の左右方向など、従来は見る事ができなかった変形も確認できるようになりました。例えば、9.0Hzの形状は床や天井が面に対して水平な方向にも振動しており、車体の中央部で左右側面が上下逆、床と天井が左右逆方向に振動し、断面がひし形となるような振動をしていることがわかります。

図9(c)の15.2Hzの振動形状は、上下に力を加えただけでは確認することができないもので、左右に振動させたことで確認できたものです。図9(b)の10.7Hzの振動形状の上下と左右を入れ替えたような振動をしています。図9(d)の15.8Hzの振動形状は車体がねじれる形状、図9(e)の19.9Hzの振動形状は、図7(a)の9.0Hzの振動形状の振動の腹が2倍になった形状です。

以上のような詳細で三次元的な形状は、従来より高い周波数で発生する車体振動の低減対策を検討するうえで、非常に有益な情報となります。また今回の検討結果からは、乗客の乗り心地を向上するためにこれまでおもに検討されてきた上下方向の振動に着目した対策だけでなく、左右方向の振動を抑える対策を施す、もしくは床ではなくあえて天井の振動を抑制することがより効果的な対策につながる可能性があることなど、これまでにない振動低減対策案の可能性が示されたといえ、今後具体的な検討、設計を行い、効果を検証したいと考えています。

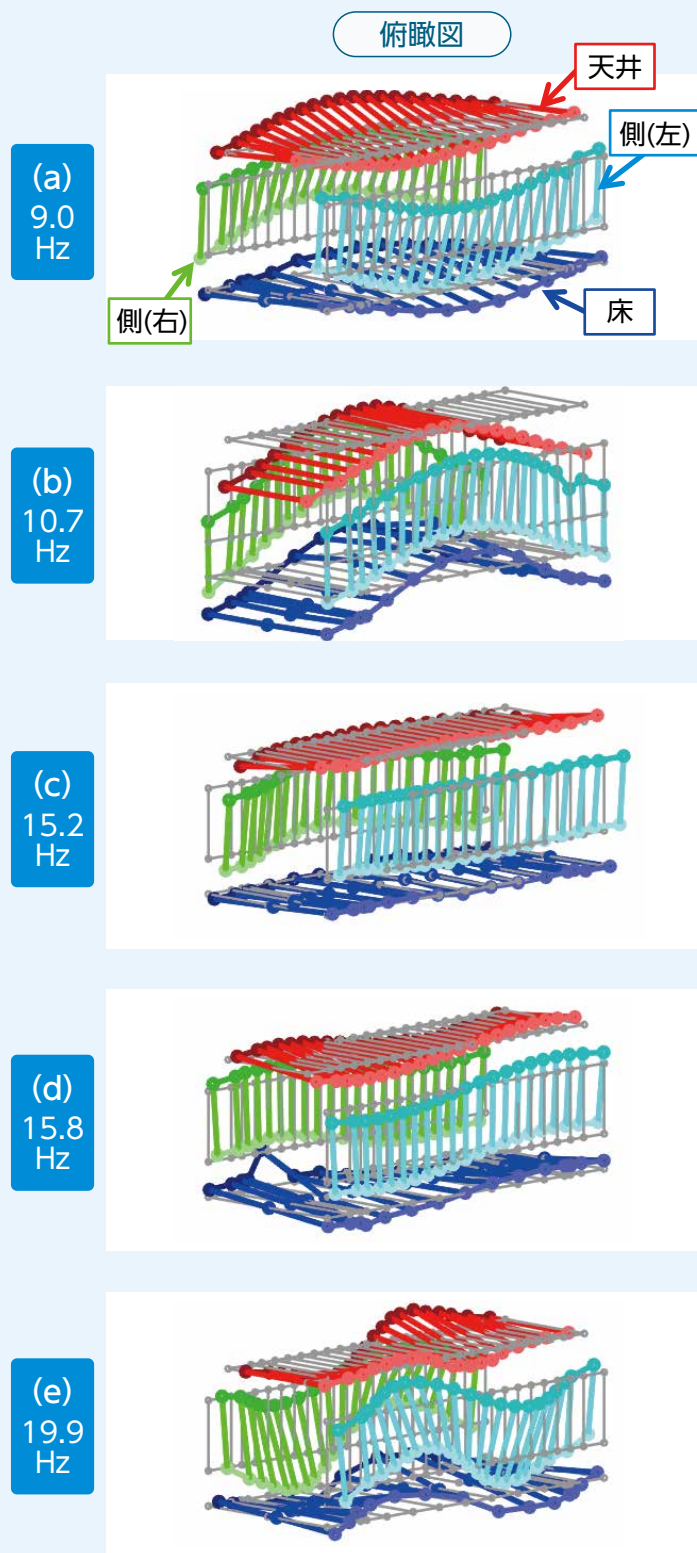


図9 試験車体の振動形状

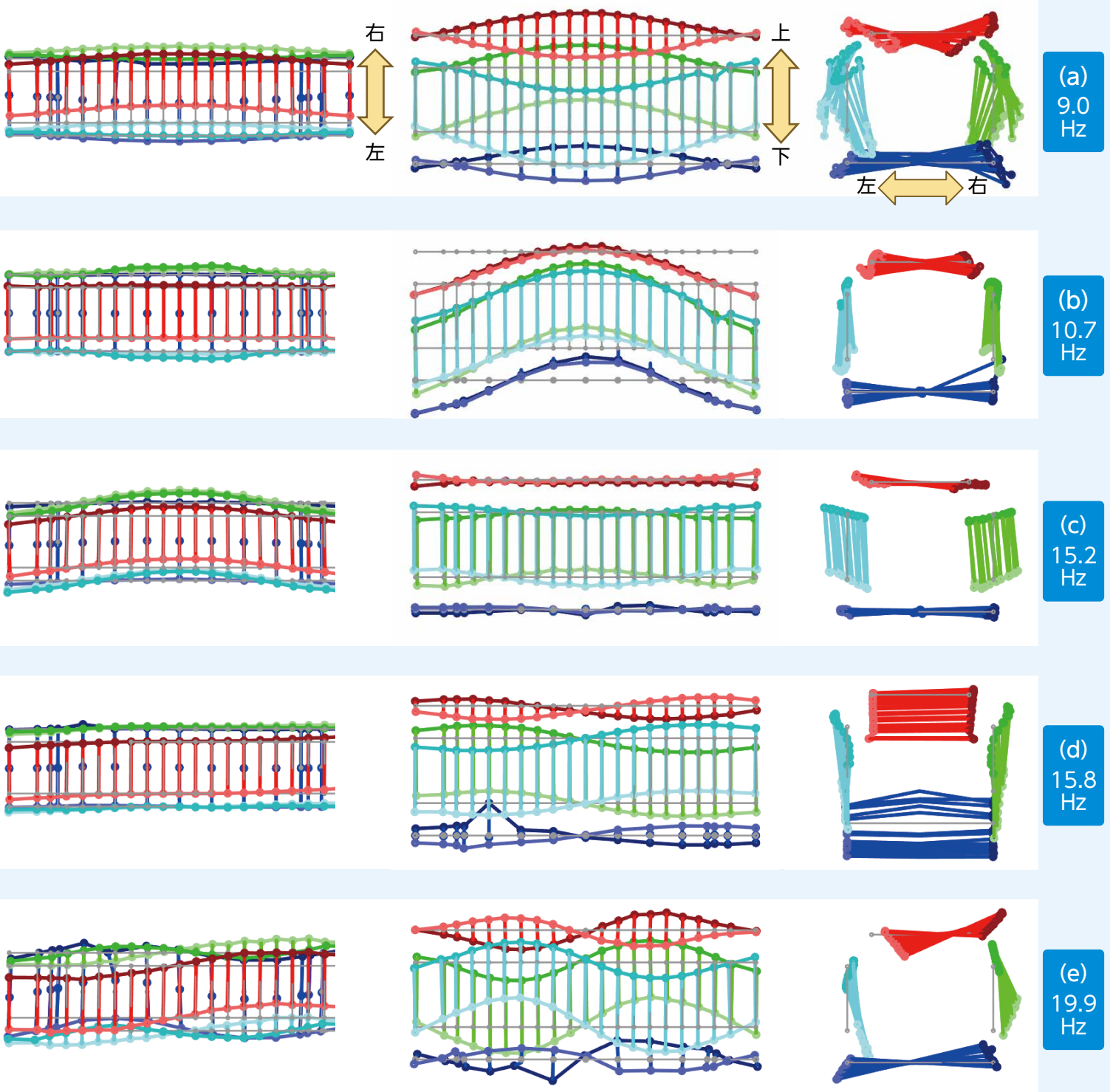
おわりに

ここでは、鉄道の乗り心地に影響を与える車体弾性振動に着目し、車体の振動特性を把握するための試験法について、従来法と新たに提案した手法を紹介するとともに、高い周波数領域

上面図（上から見た図）

側面図（横から見た図）

正面図（前から見た図）



までの振動特性の新たな知見を示しました。把握できた振動特性を参考に、それらの振動を抑えられるような装置や振動低減対策の開発を通して、鉄道の高速度化や乗客の快適性向上に寄与できるように研究を進めていきます。RRR

文献

- 1) 瀧上唯夫, 相田健一郎, 富岡隆弘, 車体曲げ振動の実態を探る, RRR, Vol.68, No.12, pp.6-9, 2011
- 2) 野口純, 林伸明, 長谷川晋一, 島宗亮平, 秋山裕喜, 相田健一郎: 設計時の乗心地向上検討に用いる車両振動解析モデルの構築(第2報), 第23回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2016)講演論文集, S5-1-4, pp.223-226, 2016