

新幹線型試験車体の三次元弾性振動モード特性

○ [機] 秋山 裕喜 [機] 瀧上 唯夫 [機] 槇田 耕伸 (鉄道総研)

Vibration Mode Characteristics of Shinkansen Type Test Vehicle Carbody
Considering Three-Dimensional Elastic Deformation

○Yuki Akiyama, Tadao Takigami, Yasunobu Makita (Railway Technical Research Institute)

Reducing elastic vibrations of railway vehicle carbodies is required to improve ride comfort. Elastic vibrations with natural frequencies of around 10Hz are known to have large impact on ride comfort. Therefore, vibration reduction methods targeting around 10Hz has been studied. Furthermore, vibration reduction methods for high frequency are also desired along with speed-up. To study these methods efficiently, it is important to understand vibration characteristics, such as natural frequencies and vibration mode shapes. This paper introduces the excitation test results using the newly developed exciter which can be switched between horizontal and vertical direction depending on the installation direction. Then the elastic vibration modes are shown, which have three-dimensional deformation lower than 45 Hz, identified from the excitation test results.

キーワード：車体，弾性振動，高周波，三次元，新幹線

Key Words :Carbody, Elastic Vibration, High-Frequency, Three-Dimensional, Shinkansen

1. はじめに

鉄道車両のさらなる快適性向上を目指し，乗り心地に大きな影響を与える車体の弾性振動低減手法が検討されている．従来は，10Hz 近傍にみられる車体を 1 本の弾性はりとして扱ったときの 1 次の曲げ振動が主な対象であったが，近年では，高周波振動を考慮した乗り心地評価法が提案¹⁾されるなど，より高い周波数の振動が着目されている．

振動低減手法を検討するためには，車体の振動モード(固有振動数や振動形状)を把握することが最初のステップとなる．これまでに，車体各面の面外方向に加速度センサを設置し，車体の三次元的な弾性振動特性を把握する取り組みが行われてきた²⁾が，周波数が高くなると面外だけでなく，面内方向の変形を含めた三次元的な振動形状を示すと考えられることから，多点で効率よく 3 方向(前後，左右，上下方向)の加速度を測定する手法が必要となった．

これまでに，著者らは，3 方向の加速度を簡便に測定するために導入した無線式加速度センサ (LORD 製 G-Link-200-8G) を用いて，鉄道総研の所有する新幹線型試験車両の振動を測定した結果を示してきた³⁾．しかしながら，振動モードを把握するために用いられる加振器は，車体を上下方向に加振することを目的に導入されたものであり，三次元的な振動特性を把握するためには左右方向にも加振可能なデバイスが必要とされていた．

本報告では，新たに開発した水平・垂直対応の起振器を用いて，新幹線型試験車両を左右および上下方向に加振する試験を行い，その結果から同定した三次元的な変形を伴う弾性振動モードを示す．

2. 試験概要

本章では，振動モード特性を把握するために実施した加振試験の概要について示す．

2.1 対象車体

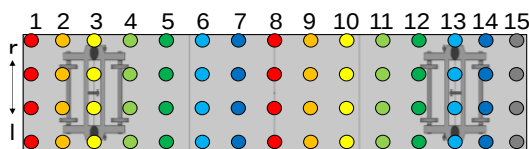
本報告で対象とするのは，図 1 に示す新幹線型の試験車体とした．この車体は，アルミニウム合金製のダブルスキン構体を有しており，営業車両と同様の構造およびスケールである．また，内装材や腰掛が設置されており，それらの影響についても考慮している．ただし，床下機器は省略されており，ダミーウェイトにより総質量を営業車両と近い条件としている．

2.2 測定条件

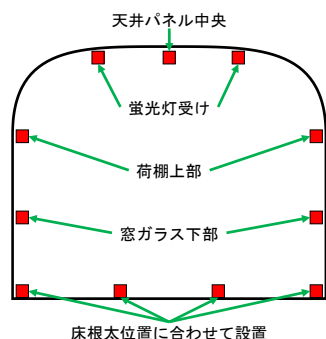
図 2 に加速度の測定点を示す．(a) と (b) にそれぞれ示すように長手方向に 15 点，断面方向に 11 点の合計 165 点の加速度を測定した．ただし，センサ数の都合から，図 2 (a) に同色で示した断面は 1 度に測定したが，異なる色の断面については，加速度センサを移設しながら測定した．



図1 新幹線型試験車体



(a) 長手方向（同色断面を1度に測定）



(b) 断面方向

図2 測定点

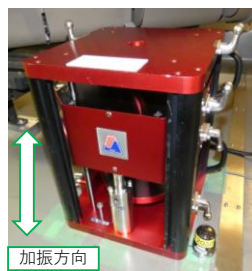
断面方向の測定位置は、内装部材の局所的な変形の影響を受けにくくするため、内装部材が車体の主構造（構体）に取り付けられる位置を中心に設定した。

計測のサンプリング周波数は 256Hz として、エイリアスを防止するため、カットオフ周波数 104Hz のローパスフィルタを適用して収録した。なお、上述の加速度の信号に加えて、後述する加振器に組み込まれたロードセルの荷重をあわせて記録した。

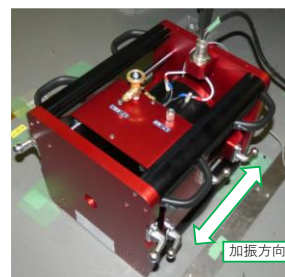
2.3 加振条件

加振には、図3に示す新たに開発した垂直・水平対応の起振器を用いる。この起振器は電磁アクチュエータによって可動部の質量を駆動することで、その慣性反力を対象（ここでは床面）に加えることができる。この起振器の寸法は、高さ 37cm、幅 34cm、奥行 28cm、最大加振力は 500N である。また、内部にロードセルを設置しており、後述する実験モード解析に用いる伝達関数の入力とする加振力に相当する荷重を測定可能である。

加振点は、図4に示す4点として、上下と左右方向を起振器の設置方向を変えることで別々に加振した。そして、そのときの 165 点の 3 方向加速度（合計 495 チャンネル）を測定した。



(a) 垂直（上下方向）



(b) 水平（左右方向）

図3 垂直・水平対応起振器

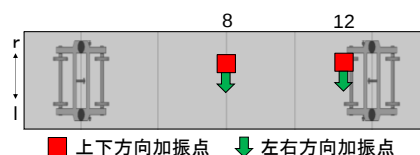


図4 加振点

3. 対象車体の振動モード特性

3.1 実験モード解析手法の概要

加振試験の結果から、車体の固有振動数とモードベクトル（振動形状）を求める実験モード解析を行う。これまで、著者らのグループでは、車体の実験モード解析は、加振試験の時系列データを用いる手法を適用してきた⁴⁾。しかしながら、従来の加速度測定点は 52 点（1 方向測定のため 52 チャンネル）程度であったのに対して、今回は、495 チャンネルと約 10 倍の規模の測定となっている。そこで、より少ないデータ数で実験モード解析を行うため、周波数領域のデータに対して適用可能な部分空間同定法⁵⁾による実験モード解析を行う。部分空間同定法とモード特性（固有振動数とモード形状）を導出する方法の詳細はスペースの都合から割愛するが、以下に簡単な手順を示す。

- ① 加振試験により得られた加振力を入力、各測定点の加速度を出力として周波数応答関数（FRF）を求め、それらを並べた行列を作成する。
- ② 上述の行列から QR 分解と特異値分解を使用して状態空間モデル（状態方程式）のシステム行列を得る。
- ③ 状態空間モデルのシステム行列から固有振動数とモードベクトルを導出する。

3.2 実験モード解析結果

(1) 概要

上述の手法で実験モード解析を行い、得られた対象車体のモード特性（固有振動数とモードベクトルから求めた振動形状）を図5と図6に示す。これらの図では、以下の情報を示している。

- 固有振動数（Hz を付した数値）
- モード名（後述する規則に従い客観的に命名した数値の羅列と、主観に基づき特徴を一言で表したもの）
- 振動形状（i：上側から斜めに見た俯瞰図、ii：特徴的な変形形状が確認できる方向（断面）から見た図、図6では側面の変形を特に強調するため、側面のみを上側から斜めに見た図）

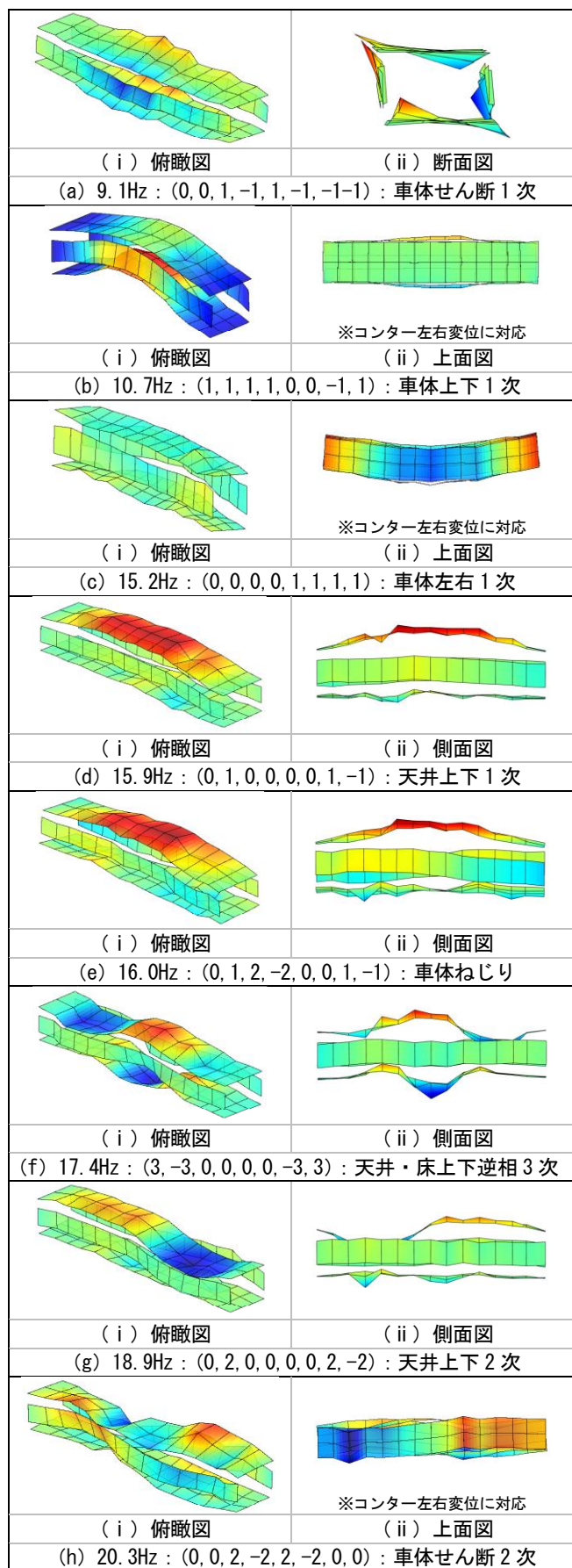


図5 同定されたモード特性 (その1)

(コンターは注記がないものは上下方向変位に対応)

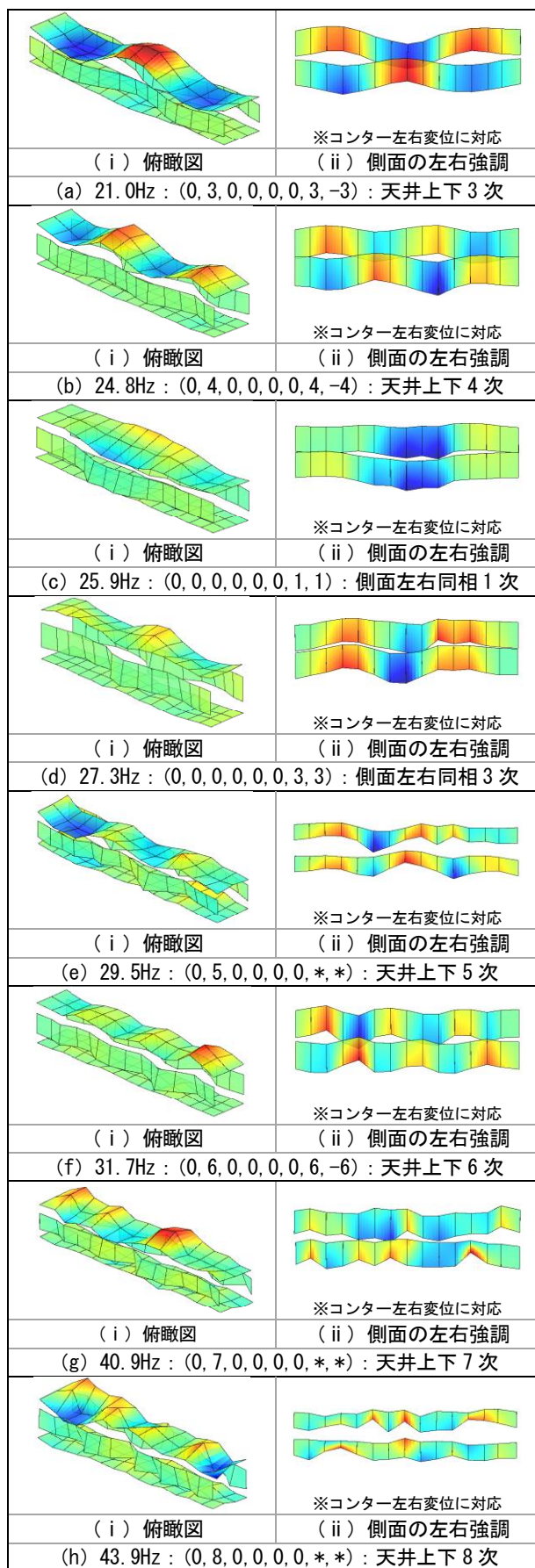


図6 同定されたモード特性 (その2)

(コンターは注記がないものは上下方向変位に対応)

(2) モードの命名規則

数値の羅列で記したモード名は、

- 床、天井、右側面、左側面の上下変形の腹の数
- 床、天井、右側面、左側面の左右変形の腹の数

に基づき命名したものである。ここで、一例として、図 5 (f) に示したモードに着目する。このモードの床、天井、右側面、左側面の上下と左右方向の変位をそれぞれコンターで表示したものを図 7 に示す。ここで、コンターは座標軸プラス方向に変位した場合を暖色系、マイナス方向に変位した場合を寒色系で表し、変位が大きい位置の色を濃くしている。図 5 (f) の俯瞰図と図 7 を組み合わせることにより、以下のように判断できる。

- 床の上下方向の腹の数は 3 つ
 - 天井の上下方向の腹の数は、床とは逆位相で 3 つ
 - 右側面と左側面の上下方向は 0
 - 床と天井の左右方向は 0
 - 右側面の左右方向の腹の数は、床とは逆位相で 3 つ
 - 左側面の左右方向の腹の数は、床と同位相で 3 つ
- 以上の結果から、床と逆位相となる面についてはマイナスを付して、(3,-3,0,0,0,-3,3) と命名した。上述の規則に従い命名したものを図 5 と図 6 に示しているが、高周波のモードで判断が難しいものについては*で表している。

(3) 考察

図 5 と 6 に示した特徴的なモードについて考察を行う。

- 図 5 (a) に示したモードは、車体の断面に着目するとひし形にせん断変形するモードである。
- 図 5 (b) は、車体を 1 本の弾性はりともみなしたときの上下方向の 1 次の曲げに相当するモードである。
- 図 5 (c) は、車体を 1 本の弾性はりともみなしたときの左右方向の 1 次の曲げに相当するモードである。
- 図 5 (d) と (g)、図 6 (a), (b), (f) にそれぞれ示した天井上下方向の 1 次、2 次、3 次、4 次、6 次のモードでは、側面が天井と同一の腹の数を有する形状で変形していることがわかる。このとき、右側面と左側面は逆相で変形しており、天井の変形にあわせて側面が変形する様子がみとれる。
- 図 5 (e) は、俯瞰図では図 5 (d) に示したものと類似しているが、側面から見た図に着目すると右側面と左側面が逆相で上下方向に変形しており、ねじり振動のモードであると判断できる。なお、図 5 (a) と (h) に示したせん断変形を伴うモードでは車端部の変位は小さいが、ねじりのモードは車端部の変位が大きい点の特徴である。
- 図 5 (h) に示したモードは、車体断面が 2 か所でひし形にせん断変形するモードである。
- 図 6 (c) と (d) は、右側面と左側面が同相で左右方向に振動するモードである。このモードでは側面の変形に伴い、天井と床の側寄りが変形している様子が確認できる。

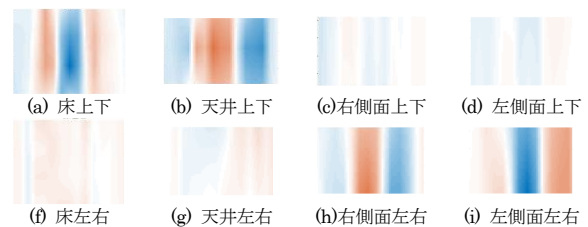


図 7 モード命名用コンター図

4. まとめ

従来対象とされてきた 10Hz よりも高い周波数における車体の三次元的な変形を伴う弾性振動特性を把握する取り組みの一環として、本報告では、新たに開発した水平・垂直対応の起振器を用いて、新幹線型試験車両の加振試験を行い、三次元的な変形を伴う弾性振動モードを同定した。今回の測定により、新たに得られた知見を以下にまとめる。

- 複数のモードが上下と左右方向で連成して振動していることが明らかとなった。特に、9.1Hz と 20.3Hz で観測された車体断面がせん断変形を伴う変形をするモードは側面の上下(床の側寄りの上下(面外)方向に対応)と床と天井の左右(面内)方向が連成して振動していることから、上下だけでなく、左右方向に対する振動低減策を行うことで、効率的に振動低減効果を得ることができると考えられる。
 - 20~40Hz の周波数では、天井と側面の変形が大きなモードが主体であることが明らかとなった。床については、天井および側面の変形に伴って振動するものと推察される。そのため、20Hz 以上の周波数の振動の低減が求められる事例では、床面だけではなく、振幅が大きくなる天井や側面に制振デバイス取り付けすることで、効率的に振動低減を実現できる可能性が示された。
- 今後は、得られたモード特性を考慮して、40Hz 程度までの弾性振動を低減可能な手法の開発、それに活用できる数値解析モデルの構築に取り組む計画である。

参 考 文 献

- 1) 中川千鶴，他：高周波振動を考慮した乗り心地評価法，鉄道総研報告，Vol.26, No.1, pp.33-38, 2012.
- 2) 相田健一郎，他：様々な鉄道車両の車体固有振動モード特性の比較，第 17 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2010) 講演論文集，pp.325-328, 2010.
- 3) 秋山裕喜，他：無線式加速度センサによる車体三次元弾性振動測定，第 26 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2019) 講演論文集，pp.158-161, 2019.
- 4) 富岡隆弘，瀧上唯夫，相田健一郎：鉄道車両の振動モード解析への線形予測モデルの適用，日本機械学会論文集 C 編，Vol.75, No.753, pp.1295-1303, 2009.
- 5) McKelvey, T., Akcay, H. and Ljung, L.: Subspace-based multivariable system identification from frequency response data, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 41, No.7, pp. 960-979, 1996.