

# 車体曲げ振動の実態を探る

瀧上 唯夫

車両構造技術研究部  
(車両振動研究室 主任研究員)

相田 健一郎

同  
(同 研究員)

富岡 隆弘

同  
(同 研究室長)



たきがみ ただお



あいだ けんいちろう



とみおか たかひろ

## はじめに

鉄道車両の振動は、乗客の乗り心地に特に大きな影響を与える要因になっています。このうち、上下方向の振動は図1に示すように、「剛体振動」と「車体曲げ振動」に分類することができます。図1 (a) (b)の「剛体振動」は、車体が全体としてサスペンションの上で揺れるもので、もし自分の乗った列車が別の列車と併走している場合などに注意深く観察すれば、目で見えることもできるでしょう。一方で、鉄道用の車体は金属でできており硬そうに感じますが、実は図1 (c)に示すように車体自体が変形する「曲げ振動」が発生しています。図では様子がわかるように変形を強調しており、実際には目で見ることではでない程度の振動ですが、これが「ビリビリ」と表現されるような振動として体感され(このことから曲げ振動は「びびり振動」とも呼ばれます)、乗り心地に影響を与えるため、その低減が求められています。

振動低減対策を検討するためには、まず車体がどのように振動しているかを知ることが重要です。特に、曲げ振動

は剛体振動と比較して、人間が上下振動に対して敏感な条件で発生することが知られており、本稿では、種々の車両を対象に振動測定試験を実施し、車体の振動がどのような特徴を持っているのか、特に曲げ振動に着目して探ってみたいと思います。

## 固有振動モードとは

### 1自由度系

図2に示すように、ばねの先端におもりがついたモデルを考えます。このモデルは運動する対象が1個のおもりのみのため「1自由度系」と呼びます。おもりをひっぱって離れた場合、おもりは上下に振動を繰り返し、次第に振幅(「振幅」と呼びます)が小さくなって、最後には停止します。

このとき、振動の1往復にかかる時間(「周期」と呼びます)は、実はひっぱる強さによらずおもりの重さ(「質量」とばねの硬さ(「剛性」)によって決り、質量が小さい(軽い)ほど、また剛性が大きい(硬い)ほど短くなります。ひっぱる強さによらないというところがミソで、振動する対象そのものが固有に持っている特徴という意味で、その周期を「固有周期」、その逆数(1秒間に何回振動するかで表したものを、単位はHz)を「固有振動数」と呼びます。また、どれぐらい早く振動が小さくなっていくかを表す指標としては「減衰比」があり、これが小さければ振動はいつまでも継続し、大きければすぐに振動が収まることになります。

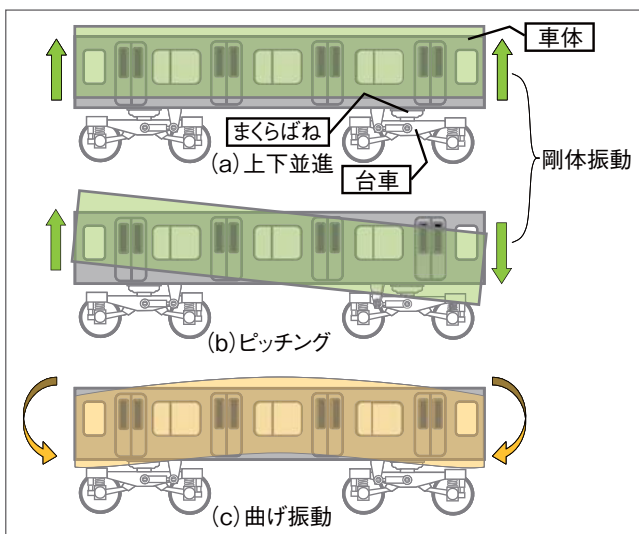


図1 車体上下振動の模式図

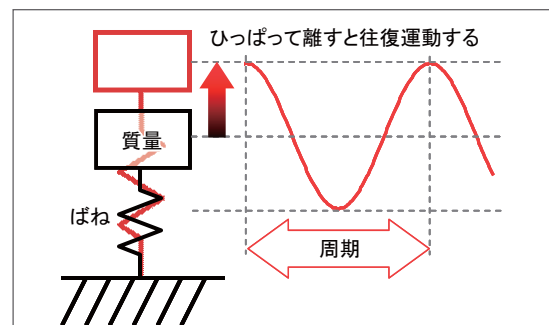


図2 1自由度系の振動

減衰比も、ひっぱる強さにはよらない「固有」の量です。

図2のおもりを車体の質量、ばねを車体を支えるまくらばね(サスペンション)のばね定数と考えれば、ここから得られる固有振動数は図1(a)の上下並進振動のものに対応します。

### 「はり」の曲げ振動

次に、もう少し複雑な例として、図3に示す「はり」が曲がる振動を考えます。この場合も、同じ長さのはりで考えれば、固有振動数(または周期)は、はりの質量と剛性によって決まり、質量が小さい(軽い)ほど、剛性が大きい(曲がりにくい)ほど、固有振動数は大きく(周期は短く)なります。

さて、図2のばね・おもりと図3の違いは、はりには固有振動数が複数あるということです。はりはおもりと違って長さを持つので、図3(a)~(c)に示すように、曲がりやすい形状が複数あり、それぞれが別の固有振動数と対応しています。つまり、ある周波数では(a)、別の周波数では(b)、また別の周波数では(c)と言ったように、特定の周波数で振動しやすい形状が決まっているという特徴があるわけです。詳しい説明は省略しますが、はりの固有振動数は「飛び飛び」の値を取り、それぞれの値の比が決まっていることが知られており、一般に固有振動数の低い方から順に1次モード、2次モード、などと呼ばれます。なお、図3では1~3次モードまでを示していますが、理論上、モードは無限に存在します。

### 固有振動モード

ここまでに見てきた「固有振動数」「減衰比」「振動形状」は既に説明したとおり、外から加える力によらず決まっているものです。これらのセットを「固有振動モード」と呼び、これがわかれば、その対象そのものが持っている振動の特

徴を把握できることとなります。走行中の振動は、もちろん軌道の条件(凸凹)や走行速度などにも左右されますが、車体そのものの特徴を把握し、「振動しにくい」車体を設計することが重要であり、振動モードに着目しているのはそのためです。

## 車体の振動モードの推定

### 加振試験

図1(c)では、車体の曲げ振動を便宜的に図3(a)の「はり」の形状のように表現しました。車体曲げ振動の検討の歴史は古く東海道新幹線開業前から行われており、実際にそれ以来、この「はりモデル」を用いてさまざまな検討が行われてきました。たとえば、サスペンションのチューニングにより曲げ振動を小さくするような問題を検討する際は、この「はりモデル」でもある程度は対応できます。しかし、車体はいわゆる「箱型」であるため、実際にはもっと複雑な形状で振動しています。したがって、はりモデルによる検討には限界があり、特に車体そのものの構造を検討対象とする場合は、「3次元」の構造物としての車体の詳細な振動形状を把握することが必要になってきます。

また、一口に鉄道の車体と言っても、材料として鉄鋼・ステンレス鋼とアルミ合金で製作された車体では製作方法や構造が異なるほか、出入口や窓の数、大きさによっても、振動の特性が違ってくと予想されます。

そこで鉄道総研では、鉄道事業者や車両メーカーの協力を得たうえで、実際に新幹線、在来線特急・通勤車両、もしくは先頭車・中間車など構造が異なる種々の車両を対象に、振動測定を実施し、振動モードを調べる試験を実施しています。図4は、その加振試験の状況を示す写真で、「動電型加振器」と呼ばれる装置を車体の床下に固定して上下方

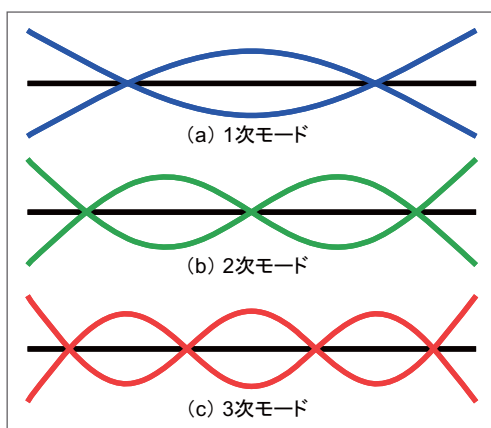


図3 はりの曲げ振動

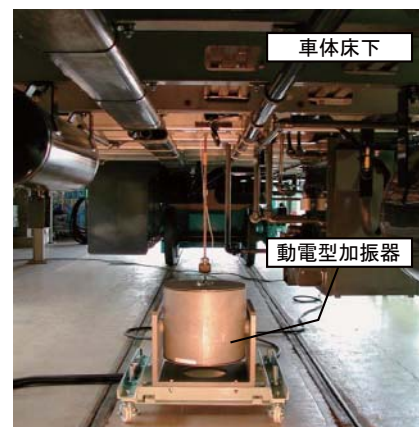


図4 加振器による加振試験実施状況

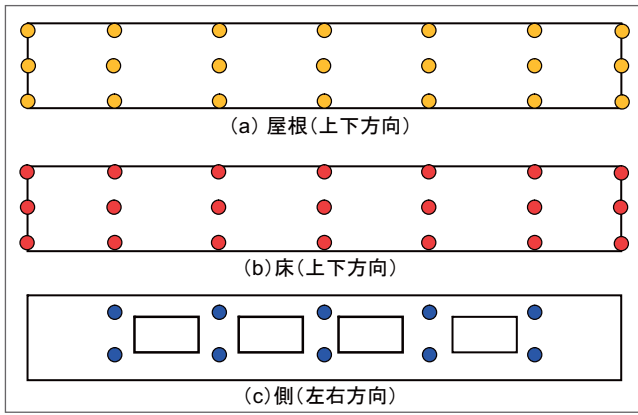


図5 加速度測定点の例

表1 振動測定を実施した車両の概要

	①新幹線車両	②特急車両	③通勤車両
車種	中間電動車	中間電動車	中間付随車
材料	アルミニウム合金	アルミニウム合金	ステンレス鋼
車体長さ	24.5m	20.0m	19.5m
扉数	2	2	4

向の振動を発生させ、そのときの振動を車体に貼り付けた加速度センサで計測します。図5は、加速度測定点の例です。

図2の1自由度系なら1点、図3の「はり」の1次曲げを対象とする場合は3点程度で振動を測定すれば変形の様子が把握できますが、ここでは車体の3次元的な振動を詳細に把握するため、50点程度の測定点を設けています。

**振動モードの実例**

代表的な車種として①新幹線車両、②特急車両、③通勤車両の車体について振動測定を行った事例について紹介します。これらの車体の特徴を表1にまとめてあります。振動モードは、それぞれの車体に対して行った試験で測定した振動加速度データから、「実験モード解析<sup>1)</sup>」と呼ばれる手法を用いて推定します。前節でははりの振動モードが無限に存在すると説明しましたが、車体も同様で、実際に推定を行うと、多数(一般に数十個以上)のモードが得られます。このうち、固有振動数が乗り心地に影響を与えやすい周波数にある、減衰比が小さい(振動が収まりにくい)という特徴を持つものが重要であるため、それに基づいて代表的な振動モードを抽出します。①～③の車体で得られた振動モードの実例を図6に示します。車種ごとに若干測定点が異なりますが、いずれも細線が変形前、太線が変形後、すなわち振動モード形状を表し、線の交点がセンサを設置した位置に対応します。各モード形状の左下のHz、%で表された数値は、そのモードに対応する固有振動数と減衰比です。なお、(1)～(6)の数字

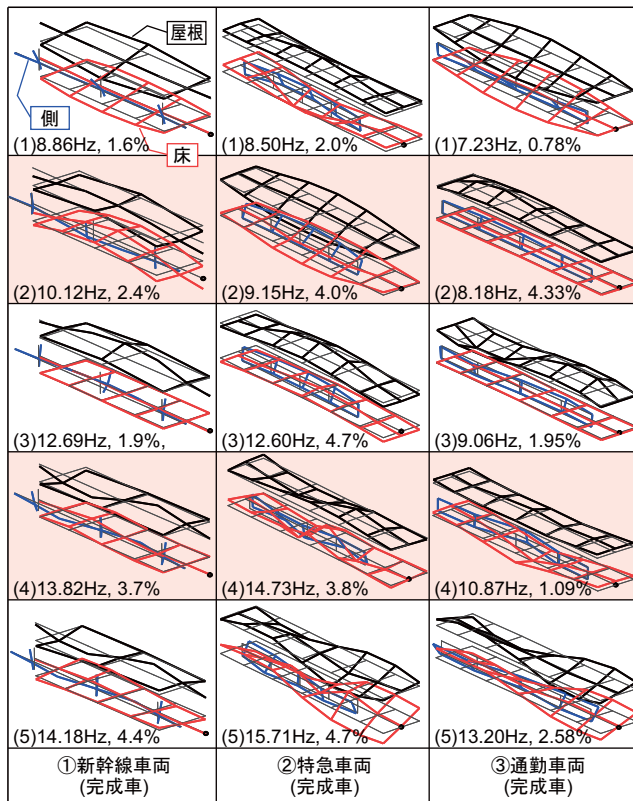


図6 振動モードの実例 (完成車)

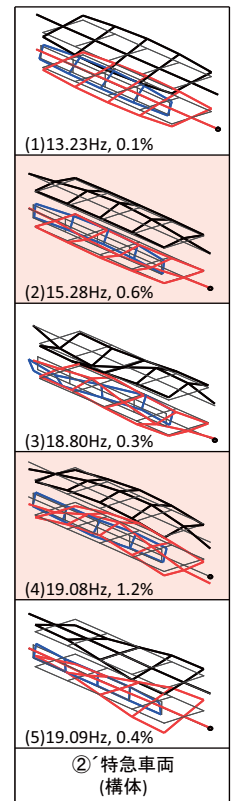


図7 振動モードの実例 (構体)

はそれぞれの車種での固有振動数の順を示しており、異なる車種間では同じモードを表すものではありません。また、形状は変形の状態がよくわかるようにデフォルメを施しています。したがって、たとえばひとつのモードの屋根・床間の相対的な変形の大きさの傾向を把握することはできませんが、異なる車種・モード間では変形の大きさは比較できないことに注意してください。

これによると、車種ごとの振動モードの特徴について、以下のような傾向が確認できます。

- ①新幹線車両は概ね「はり」もしくは均一な「箱」として、車体全体が変形しており、(2)は図(a)で説明したはりの「1次モード」に似た形状を示している。

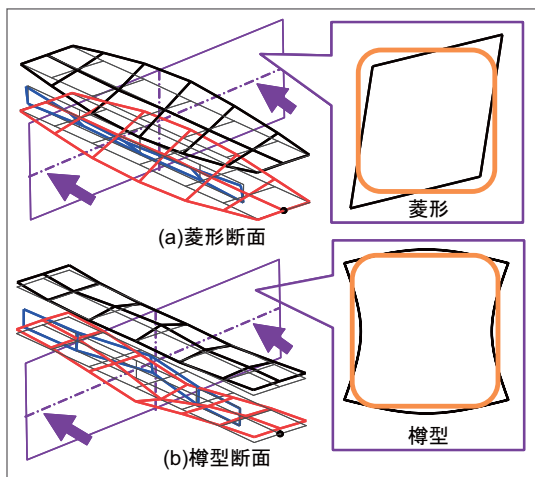


図8 振動形状と断面のイメージ



図9 試作した吊手棒

- ③通勤車両では(1) (5)などの一部のモードを除き、屋根・床・側の各面が独立に変形している傾向が見られる。また、固有振動数が狭い範囲に集中している。
- ②特急車両の振動形状の特徴は、概ね①と③との中間的な傾向を示している。

さて、図6はすべて営業車と同条件の「完成車」の結果ですが、②特急車両と同一の車体で、車内設備(内装、腰掛等)や床下機器を取付ける前の車体(「構体」と呼びます)に対して同様の振動測定試験を実施し、振動モードを求めた結果を図7に示します。類似した形状を示すモードと比較すると、

- 構体と比較して完成車の方が固有振動数が大幅に低い。
- 減衰比は完成車の値が非常に大きい。

ことがわかり、車体の振動は「箱」としての構体だけではなく、内装や床下機器など、様々な付属部品によって大きな影響を受けていることがわかります。

### 振動モード推定結果の活用

振動モードを推定すると、固有振動数、減衰比とともに得られる車体の振動形状に基づいて振動低減対策を検討することができます。たとえば図6③通勤車両のモード(1)は、図8(a)のイメージに示すように車体の長手方向の中央断面が「菱形」、モード(4)は図8(b)のように「樽型」になるように変形しています。このような振動を抑えるためには、この断面が元の形状(図8の橙色枠)を保つようにすることが効果的と考えられます。そのような対策の一例として、屋根と側を結合する効果を持たせた吊手棒(図9)を追加する手法を提案し、試験的に取付けて振動低減効果が得られることを確認しました<sup>2)</sup>。

そのほか、車体曲げ振動を低減する手法のひとつとして、「動吸振器」が提案されています。動吸振器は、低減したい振動とほぼ同じ固有振動数を持つおもりとばねを新たに

取り付けると振動が低減するというメカニズムによるもので、その設計のためには車体の固有振動数が必要となります。また、このときのおもり・ばねは元々車体の振動が大きい部位に取り付けるほど効果が大きくなるため、そのためには振動モード解析で得られた形状が有益な情報となります。たとえば、先ほどの③通勤車両のモード(1)、(4)にこの手法を適用する場合は、なるべく車体の中央に近い方が望ましく、特に(4)については車体の幅方向の外側(窓寄り)に取り付けた方が効果が高くなります。動吸振器のおもりとして床下機器を活用し、このような考えに基づいて配置位置を決定して加振試験を実施した結果、振動低減効果が確認できました<sup>3)</sup>。

### おわりに

走行中の車体が曲がりながら振動していることは、なかなかイメージしにくいと思いますが、乗り心地の向上のためにこの振動を抑えることは重要な課題になっています。ここでは主に、車種ごとに振動の特徴が異なること、振動特性は内装や床下機器に影響を受けていることを紹介しました。これを踏まえ、現在は本文中で紹介した吊手棒の活用をはじめ、振動形状の特徴に基づきながら、構体部分の大幅な設計変更をとまなわない振動低減対策を検討しています。ほかの対策を含め、成果が得られた時点で改めて紹介したいと思います。RRR

### 文献

- 1) 瀧上ほか1名：線形予測モデルを用いた車両の振動解析，鉄道総研報告，15-5，pp.35-40，2001
- 2) 瀧上ほか5名：車体剛性向上機能を持つ吊手棒の開発，J-Rail2010講演論文集，pp.317-320，2010
- 3) 富岡ほか2名：床下機器の高減衰弾性支持による鉄道車両の車体弾性振動低減，日本機械学会D&D2011講演論文集(CD-ROM)，講演番号435，2011