旅客の乗車で車体振動が変わる

富岡　隆弘
車両構造技術研究部（車両振動　主任研究員）
とみおか　たかひろ

はじめに

鉄道車両は，速度向上，省エネルギ，地盤振動軽減，軌道構造物の建設費や軌道保守費の低減などの観点から軽量化が進められてきました。その結果，車体の質量に対し乗車しているお客様（以下，乗車試験のための人員も含め旅客といいます）の質量の割合が大きくなっています。例えば最近の通勤形車両では，モータのない付随車の場合，車体の質量が13～15トン程度なので，定員乗車（約160名）における旅客質量は車体質量の70％程度になる計算です。

質量は振動特性と密接に関係します。そこで本稿では車体の振動が旅客の乗車でどのような影響を受けるかについて，最近の知見を紹介します。

車体の振動と乗り心地

鉄道車両の乗り心地に車体の振動が大きく影響することは誰もが実感としてわかることだと思います。車体の振動は上下・左右・前後あらゆる方向に生じますが，以下では上下振動に限定して話を進めます。

一般に鉄道車両の車体は空気ばねにより4カ所で台車に支えられて走行します。そのため，車体の上下振動としてまず，空気ばねの上で車体が一体となって上下に振動するものが挙げられます。これを剛体振動といいます（図1（a））。実際には，車体はわずかに変形する性質（弾性といいます）を持っており，そのために車体の変形を伴う振動も生じます。車体の上下方向の曲げ変形に伴う振動を，車体上下曲げ振動といいます（図1（b））。

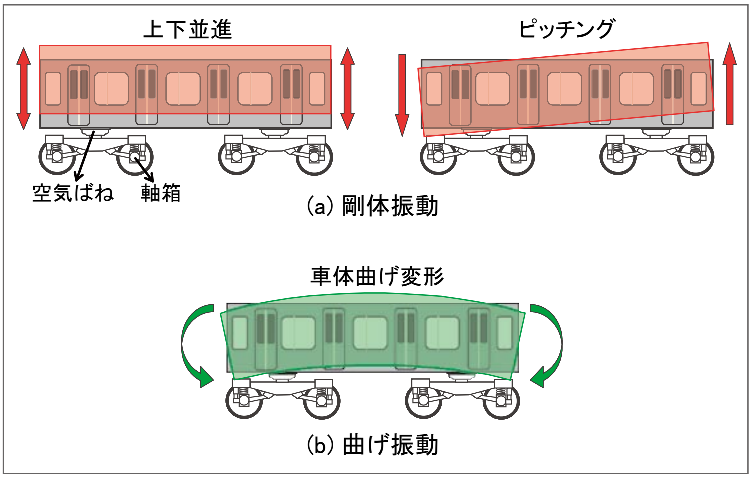


図1　車体上下振動の模式図

車体上下曲げ振動は，車体の構造と質量によって決まる特定の振動数で顕著になります。振動が顕著になる状態を共振といい，その「特定の振動数」を「固有振動数」といいますが，固有振動数は車体の剛性（変形しにくさ）および質量との間に次のような関係があります。

$$\text{固有振動数} \propto \sqrt{\text{剛性} / \text{質量}}$$

すなわち，固有振動数は剛性の平方根に比例し，質量の平方根に反比例します。この関係式は，車体の質量が増加すると固有振動数は低下することを表しています。

最近，この車体上下曲げ振動が問題とされることが新幹線，在来線ともに増えてきました。これは軌道や車両の改良により左右方向の振動が低減されたため，相対的に上下曲げ振動が目立つようになった，ということもあります。しかし，最近の車両では以前のものに比べ体感される車体上下振動全体における曲げ振動の影響が増大しているというデータがあることや[1]，一般に車体を軽量化すると剛性が低下することから，軽量化（およびそれに伴う車体構造の変化）がその一因となっている可能性は否定できません。

また，主要な車体上下曲げ振動の固有振動数は，新幹線，在来線を問わず5～15Hz程度であり，上下加速度に対する人間の感度が比較的高いとされる周波数（人が敏感に感じる周波数）となっています。そのため振動乗り心地を向上するには車体上下曲げ振動の低減が重要となります。

それでは，軽量化により目立つようになった車体

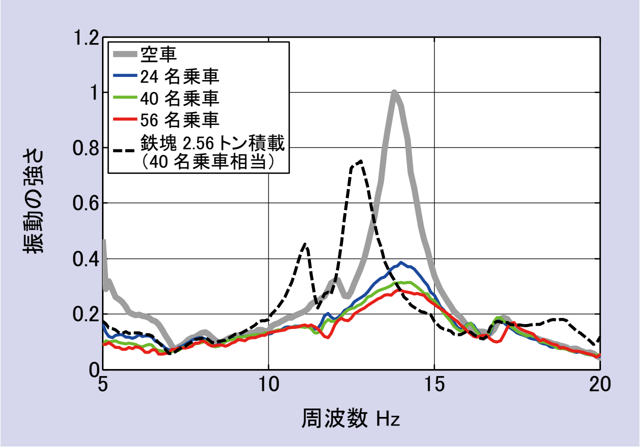


図２　高速試験車両の定置加振試験結果
（車体中央床面における振動加速度の周波数に対する分布，
空車時の最大値が１となるよう正規化して表示）

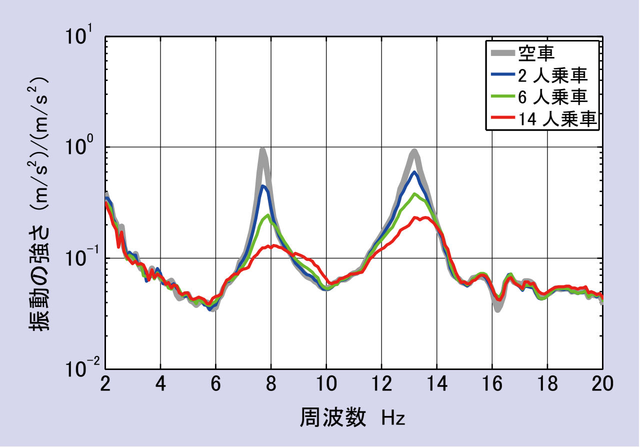


図３　通勤形車両の定置加振試験結果
（車体中央付近のロングシート直下の床面に
おける振動加速度の周波数に対する分布）

上下曲げ振動は，旅客が乗車するとどうなるのでしょうか？

旅客によって車体の振動はどう変わる？

従来の車両設計においては，旅客の影響として質量増加だけを考慮しています。また，車両の試験で旅客の影響を模擬する必要のあるときは，旅客人数分の質量に対応した鉄塊や大型の水槽（水タンク）を積載する，というのが一般的です。これらは「旅客が乗車すると車体の固有振動数は低下する」と想定していることになります。

旅客による車体振動への影響が実際にどのようなものか調べるため，いくつかの実車振動測定試験を行いました。

(1) 高速試験車両の定置加振試験

高速試験車両を対象に，車両を定置した状態で加振器により上下に加振し，車体の振動加速度を測定する定置加振試験を行って，旅客乗車と鉄塊積載時の車体振動を比較しました。ここでは加振点は台車付近の車体下面としました。

図２に測定結果を示します。これは周波数ごとの車体中央部の床面における上下振動の強さ（単位加振力あたりの応答加速度の大きさ。ただし空車時の最大値が１となるよう正規化して表示）を図示したものです。この図で灰色線は空車（旅客・鉄塊なし）の場合を示します。その14Hz付近にあるピークが車体上下曲げ振動によるもので，ピーク周波数は車体上下曲げ振動の固有振動数に対応します。このように5～15Hz程度の周波数領域に卓越した単一のピークを持つ（この周波数領域には固有振動数がひとつだけ）のがこの車両の特徴です。

さて，図２の青，緑，赤の線はそれぞれ24，40，56人が着席した場合で，それぞれの場合の旅客の体重の合計は1.54トン，2.55トン，3.71トンでした。この図で注目していただきたいのは，旅客が乗車するとピーク周波数（固有振動数）はほとんど変化せずに（むしろ若干高い周波数側にシフトしているようにも見えます），ピークの高さが大きく低下していることです。この結果は旅客を車体の質量増加分と考えた場合，上記の関係式では説明がつきません。また，乗車人数の増加とともにピークの高さが減少することと併せて考えると，旅客の影響は「車体の質量増加」ではなく，「車体への振動減衰効果の付与」というべきものであることが明らかになりました。

一方，図２の破線は同じ車両の床上に鉄塊2.56トン（40人乗車相当）を積載したときの結果で，この場合はピーク周波数が低い方へ移動しています。また，ピーク高さは若干の低下が見られますが，それほど大きな変化ではありません。これは鉄塊の積載による影響は質量付与効果が主であることを表しており，車体曲げ振動に関しては減衰付与効果となる旅客の影響を鉄塊積載で模擬することは，不適切であることがわかります。

(2) 通勤形車両の定置加振試験

次に，ステンレス鋼製車体をもつ通勤形車両の定置加振試験を行いました。ステンレス鋼製通勤形車両の車体曲げ振動は，上記の高速試験車両や後述する新幹線と異なる特徴を持つことがわかっています。すなわち，屋根，床，側面が独立して変形する傾向が強く，5～15Hzの周波数に複数の固有振動数をもつ（振動の強さと周波数の関係をグラフにすると，ピークが複数ある）という特徴です。ここでは，そのような複数の固有振動数に対応するピークが旅客の乗車でどのような変化をするのかに注目して試験を行いました。なお，この試験では台車の軸箱（車軸を保持する軸受を納めたもの，図１参照）を加振点としました。

図３に測定結果を示します。図２と同様に車体の上下振動の強さを周波数に対して示したものですが，この場合の縦軸は，加振点の加速度1m/s²に対する床面中央窓下（中央部の腰掛け直下）の加速度，としています。灰色線は空

車の場合で，8Hz付近と13Hz付近にピークを持つことがわかります。これらはそれぞれ異なる形状で車体が曲げ変形する振動（異なる振動モードといいます）に対応します。

この図の青，緑，赤の線はそれぞれ2，6，14人が中央付近の腰掛けに着席（通路を挟んだ両側に同人数乗車）した場合を示しています。この図から旅客の乗車により2つのピーク高さがいずれも低下していることがわかります。この結果から，前項の高速試験車両に対する試験結果と同様の影響が，複数の振動モードに対しても現れることが示されました。また旅客の乗車により，それぞれのピーク周波数が高周波数側にシフトする（固有振動数が高くなる）ことが前項の高速試験車両の場合よりもはっきり確認できましたが，これは，旅客の乗車により車体の固有振動数は低下する，という従来の想定とは逆の現象です。なお，2〜14名という比較的少人数の乗車でもピーク高さの低下が大きいことから，人体による振動減衰性能は大きいと推察されますが，これは試験に使った車両が試験用の車両で，内装の一部を取り外してあったことなどが影響している可能性もあります。

（3）新幹線車両の走行試験

以上は定置した車体を強制的に加振した場合の振動応答についての試験結果でしたが，実際に走行している車両の振動に対する影響を調べるため，新幹線の走行試験を行い，旅客乗車時と鉄塊積載時の車体振動を比較しました。

図４に，走行中の車体中央付近の窓側席直下床面の上下加速度パワースペクトル密度を示します。これは振動加速度のパワーを周波数に対して図示したものです。なお

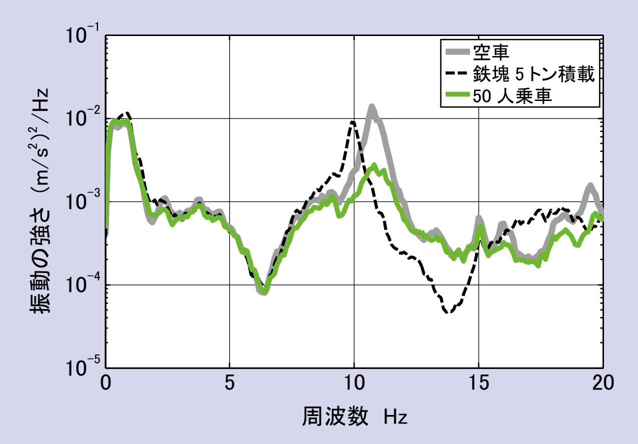


図４　新幹線車両の走行試験結果
（中央付近の窓側席直下の床面における振動加速度パワーの周波数に対する分布）

図２〜４は，試験の条件が異なるために表示の仕方（縦軸の単位）が異なっているものの，振動の強さを周波数に対する分布で表しているという点では同様の見方ができます。図４の灰色線は空車の場合，緑線は50人が乗車（車内にほぼ均等に着席）した場合，破線は5トンの鉄塊を全座席の足下の床面に均等に積載した場合をそれぞれ示しています。この図の11Hz付近にあるピークが車体上下曲げ振動に対応したものですが，旅客が乗車するとピーク周波数はほとんど変わらずに高さが低下するのに対し，鉄塊積載の場合はピーク周波数が低周波数側へシフトし，ピーク高さの変化は少ないことがわかります。これは定置加振試験と同様の結果です。旅客を模擬するために鉄塊を積載することは緑線を破線で模擬していることになり，車体上下曲げ振動に対しては不適切であることがここでも示されました。

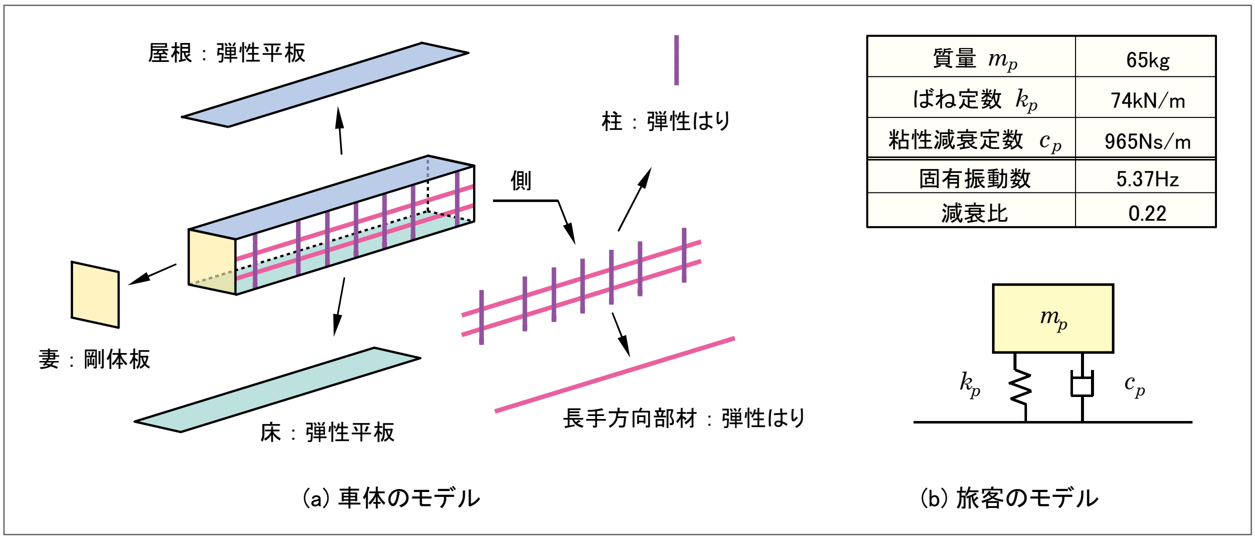
旅客の影響をモデルで表す

前節で述べた3条件の実車の振動測定試験から，車体上下曲げ振動に対する旅客の影響は，車体質量が増える効果ではなく減衰付与効果であること，複数の振動モードに対して振動低減効果があること，そして比較的少人数の乗車でも振動低減効果があること，がわかりました。この効果がどのようなメカニズムによるものかを知り，さらにはそのメカニズムをうまく活用できれば，軽量で有効な制振デバイスを実現できる可能性があります。そのためには，実車で見られた現象を表現できる簡単な物理モデルを構築し，それによる数値的な検討を行う必要があります。

そこで車体を箱形の構造物とし，そこに一人の人間をばねとダンパで支えられた一質点として表した人間モデルを分布させる，という方法で実車の測定結果を表せるか調べました。紙面の都合で，ここでは前節の（2）で述べた，通勤形車両の定置加振試験相当の数値計算例を紹介します。

図５に車体モデルと人間一人のモデルを示します。図中に示した人間モデルのパラメータは，多数の被験者を加振器で上下に加振して得られた結果をもとに定めた文献[2)]の値を用いました。

この車体モデルに実車試験と同様の条件で人間モデルを分布させて数値計算を行った結果を図６に示します。グラフの表示は対応する実測結果である図３に合わせてあります。図６と図３を比較すると，ピーク高さなどには多少の差異があるものの，8Hz付近と13Hz付近に卓越したピークを持つという特徴をよく表現できていることがわかります。人間モデルを分布させたときのピークの変化も定性的



質量 m_p	65kg
ばね定数 k_p	74kN/m
粘性減衰定数 c_p	965Ns/m
固有振動数	5.37Hz
減衰比	0.22

図５　車体上下曲げ振動と旅客の連成振動解析モデル

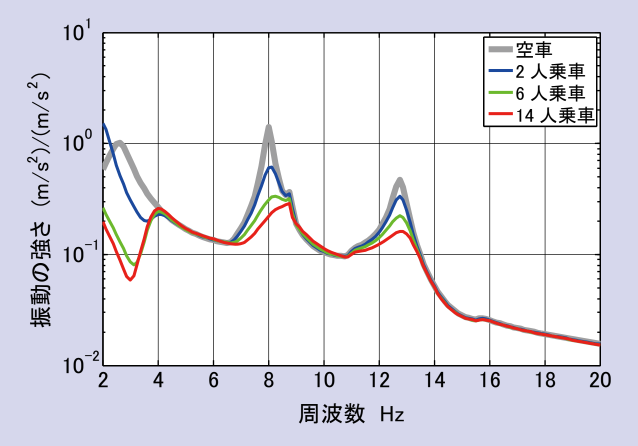


図６　解析モデルを用いた数値計算結果
（車体中央付近のロングシート直下の床面における振動加速度の周波数に対する分布）

には実測結果をよく模擬しているといえます。

詳細は省きますが，単一の卓越したピークを持つ高速試験車両（図２）の場合は，もっと単純に車体と旅客をそれぞれ１質点とした２自由度モデルで定性的な傾向を模擬できることが示されています。しかし，ピーク高さの低減量は２自由度モデルによる数値計算結果より実測の方が大きいこともわかっており，定量的な検討を行うためには人体の振動特性，とくに振動減衰特性をより詳細に表現できる物理モデルの構築と解析法の開発が求められます。

「人体」を模擬した制振の可能性

一般に，車両の振動乗り心地は車体床面で測定した加速度で評価しますので，旅客が乗車すれば車体振動が低減して数値的な乗り心地評価は良くなります。しかし旅客が振動を減衰させているわけですから，床面の振動が減少しても乗車している人の体感乗り心地が良くなっているとはいえない可能性があります。

一方，旅客による減衰付与と同様の効果をもつ別のものを車体に適用することができれば，旅客が感じる振動も低減できるはずです。鉄道総研では，そのような制振デバイスの開発を目指した研究を行っています。また，制振デバイスを設計する際，どのような形状や材質，質量とするべきかを決めるには定量的な検討が必要となることから，そのための物理モデルや解析法の開発にも取り組んでいます。本稿ではその内容に触れる余裕がありませんが，いずれ機会があればご紹介したいと思います。

おわりに

旅客が乗車すると車体の振動はどうなるか，について最新の知見をご紹介しました。旅客により車体の振動が変わるのは当たり前のことと思われるかもしれませんが，その変わり方についてはこれまでの「常識」と異なる現象が起きていること，人体による車体への振動減衰付与効果は大きいこと，など非常に興味深いテーマであることがおわかりいただけたら幸いです。RRR

文　献

1) 富岡隆弘：鉄道車両の車体曲げ振動の解析と低減技術，車両技術，No.231，pp.96-106，2006
2) 遠竹ほか2名：乗客質量と弾性車体との連成振動を考慮した鉄道車両の運動解析，日本機械学会論文集（C編），72-716，pp.1115-1121，2006