

車内快適性の評価・対策



小美濃 幸司
Koji Omino
人間科学研究部 部長
[専門分野] 人間工学

社会の少子高齢化が進む中、車内の快適性を向上して利用促進を図るため、振動と車内騒音の改善策について検討しました。乗客の感覚特性に合致した車内振動と車内騒音の評価手法、振動に対して乗り心地を向上する複数運動モードに対応した制振制御、制御性に優れた車体傾斜機構、および車内騒音に対してつり床などの新たな床構造などの騒音低減対策を提案しました。制振制御技術と車体傾斜機構の一部の要素技術については在来線特急列車にすでに活用されている、あるいは活用が予定されています。

はじめに

本研究では、快適性に影響する主要因となっている振動と車内騒音を対象とすることにしました(図1)。まず、乗客の感覚特性に合致した振動に起因

する乗り心地評価法を開発し、その評価を向上する複数運動モードに対応した制振制御について検討しました。その中で、乗り物酔いの観点から、新しい車体傾斜機構についても検討しまし

た。次に、車内騒音について感覚特性に合致した評価法を開発し、その評価に基づいた新しい車内騒音低減対策を検討しました。

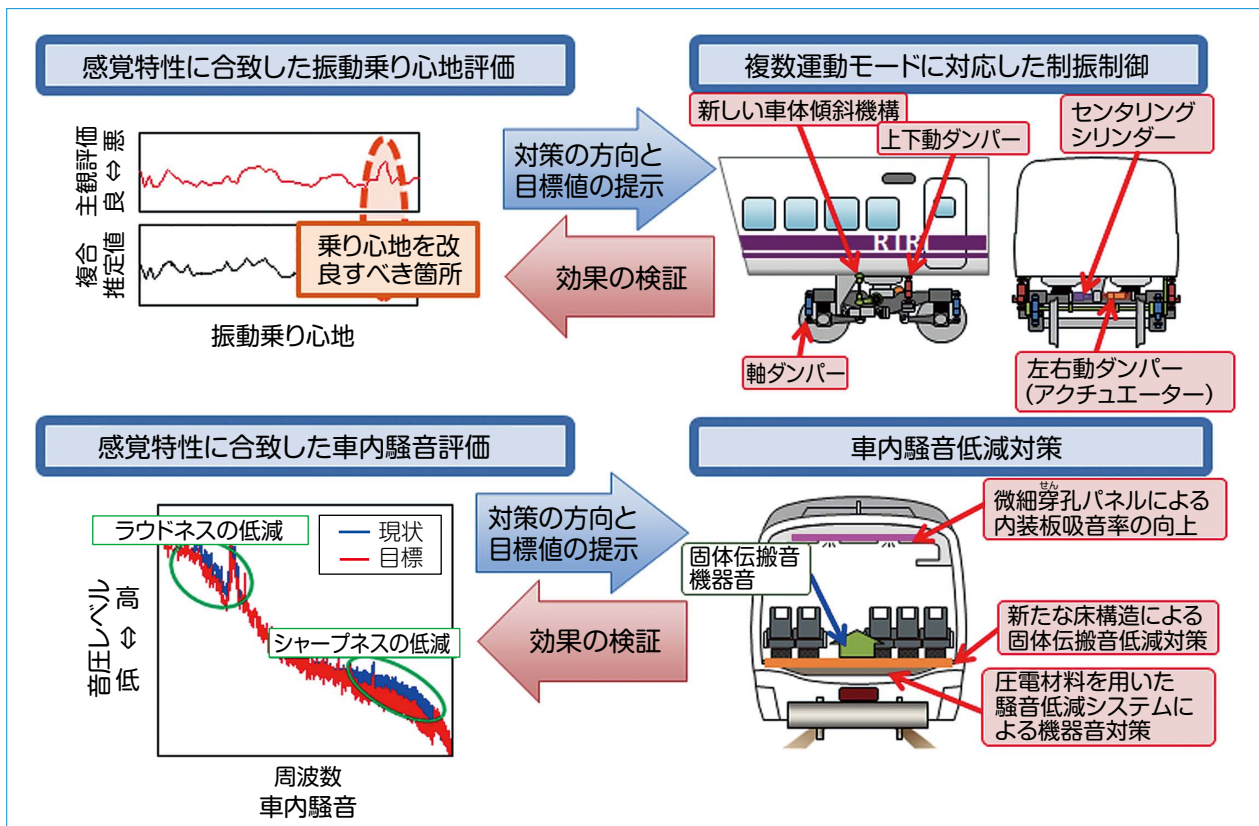


図1 「車内快適性の評価・対策」の研究概要

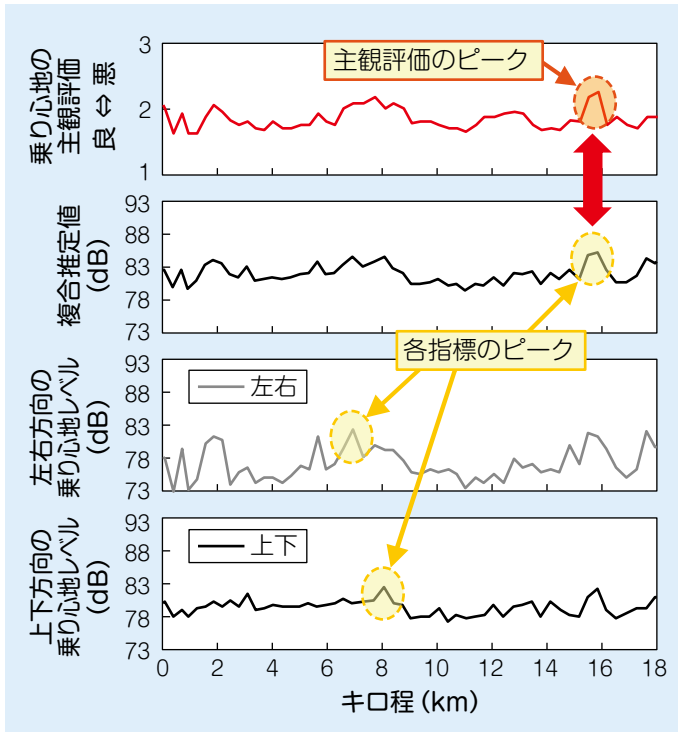


図2 振動に対する乗り心地主観評価値、複合推定値および方向別乗り心地レベル

感覚特性に基づく振動と車内騒音の評価法

振動と車内騒音を対象に、乗客の感覚特性に合致し、具体的対策の検討や評価の場面で活用しやすい評価手法を提案しました。

振動に起因する乗り心地については、従来の評価法では前後・左右・上下の方向別に扱ってきましたが、それらの振動を総合して、乗客の体感により近い乗り心地を推定する「複合振動乗り心地推定値（複合推定値）」を提案しました¹⁾。まず、前後・左右・上下方向の床面の振動加速度に対して方向毎に人間の感度を反映した重み付けフィルターをかけた上で、それらを合成した値をもとに乗り心地の評価を算出するものです。新幹線による走行試験において振動の主観評価と複合推定値との関係を調べたところ、両者の変化は極めて類似しており、良好な推定が行われていることがわかりました（図2）。なお、複合推定値を車両分野や軌道分野の技術者にも活用してもらうために、

乗り心地に関する人間、車両、軌道に関連する情報を一元表示するプログラム¹⁾も同時に開発しています。

乗り物酔いについては、曲線区間の前後で生じる減速と加速の酔いへの影響を検証し、営業列車で通常起こり得る前後加速度の特性範囲では酔いの発生は促進されないことを確認しました。また、乗り物酔いの指標であるMSDV-y（☞参照）が任意の長さの振動データに適用可能であることを確認し（図3）、これまで振動データ長を30分として適用してきましたが、この長さを最低20秒以上であれば適用可能として処理する方法をまとめました。

次に、車内騒音に対する印象評価や不快度評価実験を実施し、音質指標のラウドネス、シャープネス、トーンリティーを用いる車内騒音の不快度推定式を提案しました。この推定式は、従来使用されている騒音レベルと比較して、より高い精度で乗客の車内騒音に対する不快度を推定でき、高いレベルの音環境の検討に有効です。ここでは、

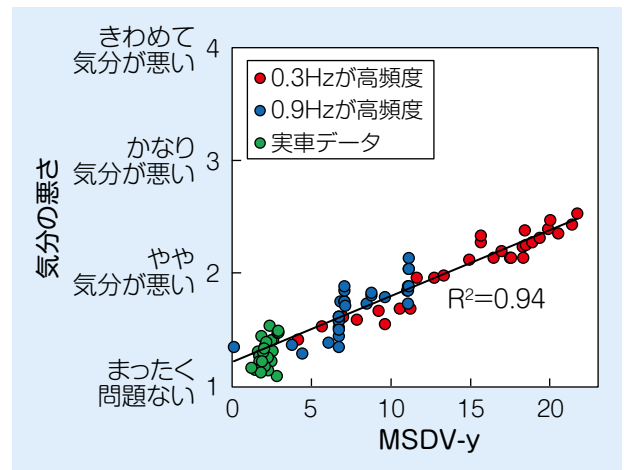


図3 MSDV-yと不快感の散布図

後述する「感覚特性に基づく車内騒音低減対策」において、その目標値の設定に活用されています。

複数運動モードに対応した制振制御

上下・左右など複数運動モードの振動低減や、新しい車体傾斜機構による傾斜制御性能向上により、乗り心地の向上や乗り物酔いの低減を実現する手法の開発を行いました。

振動に対する乗り心地の向上のうち、左右方向の振動低減策は開発が比較的進んでいたため、上下方向の振動低減策を中心に研究を行いました。在来線の軌道不整が大きい線区においては、レールの継ぎ目落ちに起因する上下振動が乗り心地に大きな影響を与えていたため、この振動を低減する「空気ばね台車向け可変減衰上下動ダンパーによる制振システム」を開発しました（図4、図5）。走行試験などにより本

☞ MSDV-y

MSDVは船酔い指標の1つであり、その算出方法はISO2631に示されています。MSDV-yはこのMSDVを鉄道に応用したもので、鉄道固有の特徴である左右の振動加速度に配慮した乗り物酔い指標となっています²⁾。

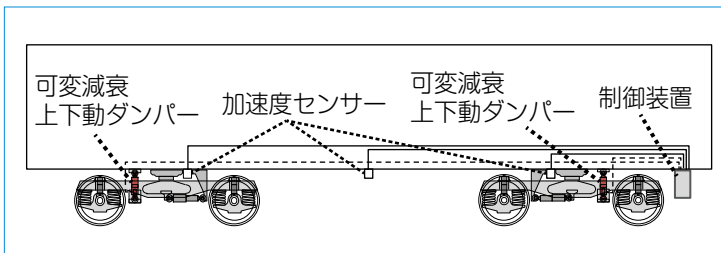


図4 可変減衰上下動ダンパーによる制振システムの構成

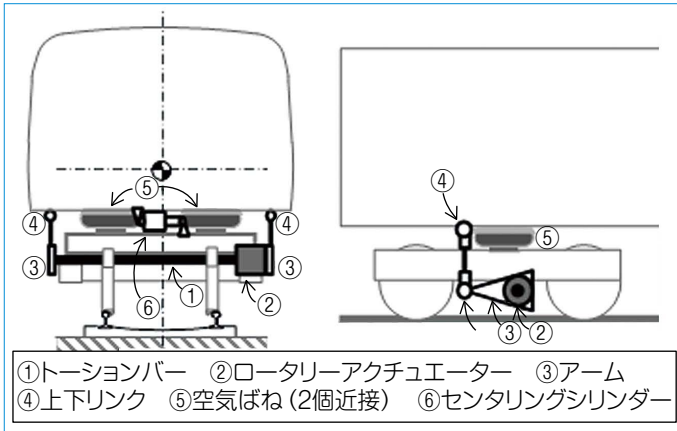


図6 アンチローリング装置を活用した車体傾斜機構

システムの優れた振動低減効果を実証され、実用化のうえ営業列車に採用されました。さらに、この可変減衰上下動ダンパーを活用した上下制振制御装置と、左右制振制御装置を組み合わせることで新幹線相当車両に適用することにより、良好な振動低減効果が得られることを、車両試験装置における実走行模擬加振試験により確認しました。前述の複合推定値で評価したところ、左右と上下の制振制御を組み合わせることにより、体感として知覚できるレベルの乗り心地向上効果が得られることを確認しました。今後は新幹線向けに上下制振制御装置の性能向上などの研究開発をさらに進めていく予定です。

新しい車体傾斜機構については、アンチローリング装置を活用し、比較的単純な構造で最大傾斜角5°を実現する機構を提案しました(図6, 図7)。車体傾斜動作のシミュレーションを行い、前述の乗り物酔いの指標MSDV-yによる評価により、乗り物酔いを低減できる見通しを得ました。そこで構成要素の必要諸元を検討のうえ、傾斜機

構を試作して定置傾斜試験を行い、本機構が傾斜パターンへの高い追従性能を持つことを確認しました。さらに、実用化に向けて、フェールセーフを実現する車体支持装置のシステム構成を提案しました。

車内騒音低減対策

前述の車内騒音の不快感推定式に基づき、単なる音の大きさだけでなく、不快感に影響する音質も考慮して車内騒音環境を向上するための新たな対策手法の開発を行いました。

まず、新幹線車両の騒音特性を、周波数特性から①ピーク音②一部ピーク音③なだらかな音の3種類に分類し、それぞれ不快感評価式による評価値を求めました。評価値の低減目標量を①ピーク音は0.3、②一部ピーク音と③なだらかな音は0.5に設定し、そのためには200~400Hzと3k~10kHzの

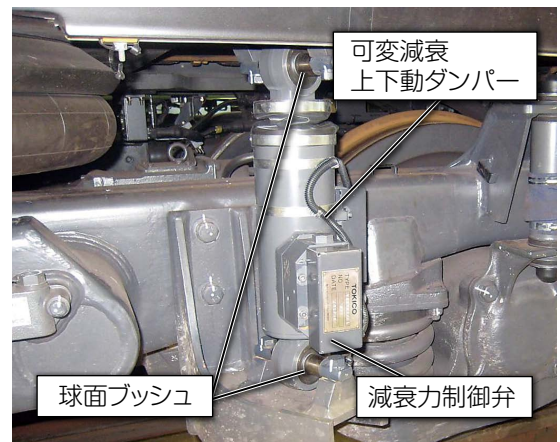


図5 可変減衰上下動ダンパー

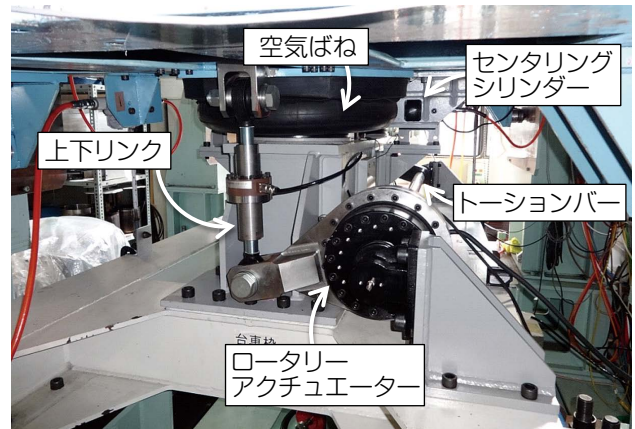


図7 トーションバーとロータリーアクチュエーター

音圧レベルをいずれも3dB以上低減する必要があります。具体的な騒音対策として、分割床板

つり床、微細穿孔パネル、圧電材料を用いた騒音低減システムの4つの手法を開発しました。分割床板は、床板を小面積の板に分割し、それぞれを弾性支持することで分割した板間に位相差を発生させ、固体伝搬音などの放射音をキャンセレーション効果により低減するものです³⁾。試験車両を用いた定置加振試験で検証したところ、50~150Hzにおいて従来の固定床や弾性支持床より、放射音の抑制効果が大きいことを確認しました。

つり床は、従来の床構体に固定されている床板を側構体からつり下げる構造であり、床板に入力する振動が小さくなることで、床板の放射音が小さくなります(図8)。試験車両の定置加振試験で検証したところ、200~400Hz

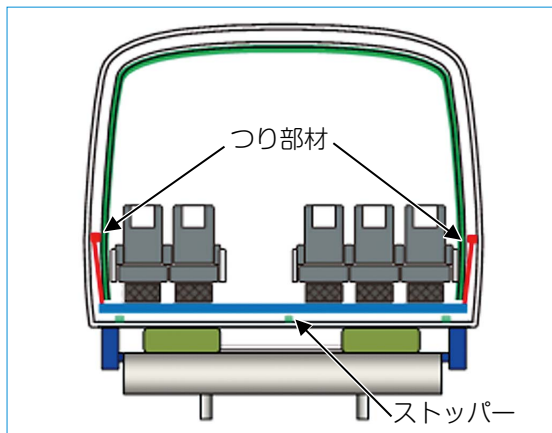


図8 つり床構造

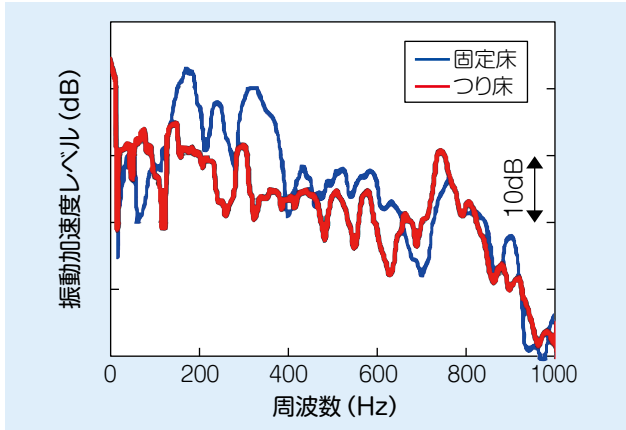


図9 固定床とつり床の振動特性の比較

において10dB以上の振動低減効果が確認できました(図9)。

微細穿孔パネルは、平板に直径数mm以下の微細孔を設けることで特定の周波数帯域の吸音率を向上させるものです。試験車両の天井パネルに適用した結果、200～400Hzにおいて0.6以上の吸音率が得られることを確認しました。

圧電材料を用いた騒音低減システム⁴⁾は、圧電材料を貼付した金属板(遮音板)に張力を加えることができる構造とした結果、制御対象周波数の調整が可能となり、さらに透過音の低減効果が向上しました。

これらの対策を車両に適用した際の車内騒音の低減効果を予測するために、内装板や床板の振動と吸音率の特性から車内の平均音圧レベルを求める手法と、車体の詳細な解析モデルを用いて構体および内装の振動特性を計算し、

車内の任意の位置における音響特性を一連の流れで解析できる手法を開発しました。その結果、目標の騒音特性を得るためには、台車上部をつり床にし、さらに天井パネルを微細穿孔パネルにすることで、また客室中央部の床板を弾性支持とするか天井パネルの吸音率を向上させることが有効なことが示されました。

成果の活用

振動および車内騒音の評価法として提案した複合推定値と車内騒音不快推定式は今後新しい対策の検討や評価に活用できるものと考えています。また、複合推定値の活用の際に便利なツールとなる一元表示システムについては、実用化を目指します。

制振制御技術はJR九州のクルーズトレインに装備され(図10)、車体傾斜機構の要素技術も在来線特急列車に

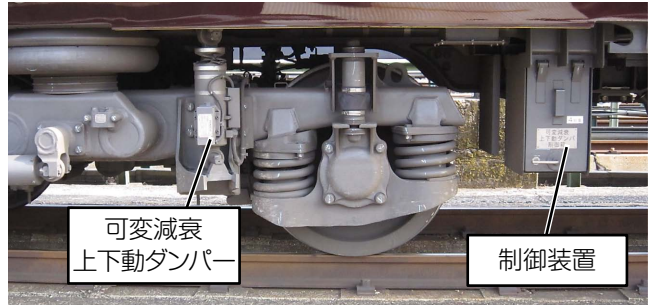


図10 クルーズトレイン「ななつ星in九州」外観(上:九州旅客鉄道(株)提供)と上下制振制御装置の床下取り付け状況(下)

採用予定です。今後、さらに新幹線向けに上下制振制御装置の性能向上を目指し、車体傾斜機構はその簡素な構造の特長を活かして実用に向けた研究開発を行っていく予定です。

また、車内騒音低減手法として提案した技術については、ここでの成果を活用して車内騒音を低減する新たな車体構造の開発を目指していきます。

RRR

文献

- 1) 中川千鶴：地点対応可能な複合振動乗り心地推定法、第275回鉄道総研月例発表会要旨集、2014
- 2) 鈴木浩明、白戸宏明、手塚和彦：低周波振動が列車酔いに及ぼす影響、鉄道総研報告、Vol.18、No.2、pp.9-14、2004
- 3) 朝比奈峰之、山本克也、秋山裕喜、佐藤裕之、間々田祥吾：分割床板による鉄道車両の固体伝搬音低減対策、第20回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2013)、pp.265-268、2013
- 4) 朝比奈峰之、山本克也、山本大輔、間々田祥吾、佐藤大悟：圧電材料を用いた騒音低減システムの実用車両への適用、鉄道総研報告、Vol.26、No.10、pp.23-28、2012