

圧電材料を用いた車内騒音低減システムの開発

山本 克也* 朝比奈 峰之*
永野 克幸** 中山 耕介**

Development of a System to Reduce Interior Noise of Railway Vehicle Using Piezoelectric Material

Katsuya YAMAMOTO Mineyuki ASAHINA
Katsuyuki NAGANO Kousuke NAKAYAMA

In the speed-up of the railway vehicle, reducing the interior noise of the vehicle is important to ensure the comfort for passengers. We have developed a panel-type noise reduction system as a new countermeasure for interior noise of railway vehicle with consideration on the particularity of the railway vehicle. In the noise reduction system, vibration plates with piezoelectric material are arranged in a plane, and the noise transmitted through the vibration plates is reduced by a control circuit. In the case that the noise reduction system was applied to a deck of the Shinkansen, the interior noise was reduced by about 3dB in the target frequency range.

キーワード：車内騒音，圧電，騒音低減システム，透過音，騒音解析

1. はじめに

高速化が進む鉄道車両において、車内環境の快適性向上への要求はますます高くなっている。一方で、車両の軽量化が進み、乗り心地あるいは車内騒音にとっては不利な状況となっている。車内騒音の対策は、これまで質量則を根拠としたパッシブ対策¹⁾が主な方法であったが、さらなる重量追加は困難と言える。パッシブ対策に対するアクティブ騒音制御手法の研究開発は、1970～80年代にブームを迎え、それ以降様々な分野への実用化が図られている。移動体においては、自動車や航空機等に適用する試みが報告され、一部が実用化^{2) 3)}されているものの、鉄道車両では一部試験例⁴⁾があるのみである。このように鉄道車両における実用化が遅れている原因は、鉄道車両は他にない特殊な条件を考慮する必要があり、既存の手法をそのまま適用するのでは成立しないためと考える。

そこで本論文では、騒音低減システムの適用に関し他の移動体と比較することで、鉄道車両の特殊性を整理し、その上で鉄道車両に適した騒音低減システムを提案する。また、新幹線車両のデッキ部に適用し、デッキ部騒音の低減効果の検証を行い、本騒音低減システムの有効性を示す。

2. 移動体における騒音低減システムの適用

2.1 車内騒音の分類⁵⁾

走行中の鉄道車両では、車体と台車の様々な箇所騒音が発生し、複雑な経路を通り車内に伝播することがわかっていく。

この騒音源は、車輪がレールの上を転動する際に発生する「転動音」、台車内のモータやギヤあるいは床下機器から発生する「機器音」、パンタグラフや車両間の連結部の隙間等で発生する「空力音」の三つに分類される。また、車内騒音を騒音源から車内への伝播経路別に「固体伝播音」と「空気伝播音(透過音)」に分類することがある。固体伝播音は、車輪の転動時に発生する振動や台車自体の振動エネルギーが、車体と台車間の空気バネやダンパ、リンク、構体を伝播し、床板あるいは内装から車内に放射される騒音である。一方空気伝播音は、騒音源において発生した騒音が車体周囲の車外音となり、構体と内装(窓も含む)を透過して車内に侵入する騒音である。明かり区間では、騒音源近くの車外音が大きく、距離が離れるに従い小さくなるのに対し、トンネル区間では、騒音がトンネル壁面で反射し車両周囲がほぼ一様な騒音レベルとなるため、側面、天井、窓等広い範囲で透過音が増大する。

2.2 鉄道車両の特殊性

「アクティブノイズコントロール」あるいは「能動騒音制御」(以下「騒音低減システム」と言う)と聞いて思い浮かぶイメージは、「制御用スピーカから逆位相の音を

* 車両構造技術研究部(車両振動)

** 西日本旅客鉄道(株) 鉄道本部 車両部

特集：車両技術

加え、‘波の重ね合わせの原理’で打ち消し合って音を小さくする」というのが一般的である。しかし近年の研究開発では、様々な形態が提案されている。

鉄道車両に適用可能な騒音低減システムを検討するにあたり、まず鉄道車両以外の主な移動体における実用例を調査した。自動車ではロードノイズの低減策として、オーディオスピーカを制御スピーカとして兼用し、運転席や助手席の騒音低減を実現している。これは上記の‘逆位相の音で打ち消しあう’という音場制御の手法である。次に、航空機では小型機のプロペラ音対策として内装板にアクチュエータやスピーカを取り付け、フィードフォワード制御により機内騒音を低減している⁶⁾ものがある。鉄道車両においても試験を実施した例はあり、座席に内蔵したスピーカにより乗客耳元の定常音を低減する方法や、電話ボックスの天井に制御スピーカを取り付け、内部の騒音低減を試みている。また海外では、客室や寝台車における音場制御が試されているものの、いずれも実用化までは至っていない。

そこで、自動車および航空機に続き鉄道車両でも実用化するためには、鉄道車両特有の条件を考慮する必要があり、「車内空間の大きさ」と「制御対象系の状態変化」への対応が特に重要である。

表1に、各移動体の車内規模と制御対象系の状態変化の多さを示す。ここでの制御対象系の状態とは、車内空間の状況と内装など振動・騒音の伝播経路の状態を言う。新幹線の客室は大よそ長さ20m×幅3.3m×高さ2.2mと大きな空間であり、さらに乗客数とその乗車位置が停車駅毎に変化する。また、内装振動は走行速度、走行区間（トンネル区間、明かり区間、橋梁区間等）で逐次状態が変化する。それに対し、自動車は路面状態やエンジン回転数等多くの状態変化があるものの、車内の空間は小さい。また、航空機は機内の規模は鉄道車両と同程度かそれ以上であるが、巡航時の状態変化は小さい。これらを考えると、鉄道車両は車内空間が大きく、かつ状態変化が多い点等で、能動騒音制御の適用にとって非常に厳しい条件と言える。

3. 鉄道車両に適した騒音低減システムの検討

3.1 騒音低減システムの形態

前節における議論を踏まえ、鉄道車両に適した騒音低減システムの形態を検討した。

第一に、車内空間が大きい場合、制御用スピーカを設置し逆位相の制御音を印加しても、一般に騒音低減は特定範囲に限定され、全体的な騒音低減は見込めない。自動車で音場制御が実現できるのは、比較的車内空間が小さく、運転席と助手席の耳元付近に制御範囲を限定できるからである。

しかし、車内空間に内装から入射される固体伝播音と

透過音の音響エネルギーを低減することができれば、いかなる大きさの空間においても全体の音響エネルギーを低減することができ、乗客の有無や乗車位置の変化にも影響を受けず、一定の騒音低減が望める。よって、内装板と車体構体間の隙間に透過音を低減するシステムを取り付け、車内全体の音響エネルギーを抑制する方式が、鉄道車両に適していると考えられる。

次に、騒音・振動の伝播経路の一つである内装板の振動状態について考察する。特に山岳地帯が多い日本のような線区では、明かり区間とトンネル区間の車両状態の変化を無視することはできない。図1は、新幹線車両の内装板1枚に振動加速度センサーを取り付け、走行中の振動状態を明かり区間とトンネル区間で比較したものであるが、振動の腹と節の位置および振動レベルが変化し、最大振動範囲も移動することがわかる。さらに、新幹線では内装板は1両あたり最大40枚取り付けられており、たとえ同品質に製造されていても、1枚1枚の取り付け状態にばらつきがあることを考えると、内装板の振動状態が均一であるという前提には無理がある。

表1 各移動体の状態

	制御対象系の状態変化	車内規模
鉄道	大 (トンネル・明かり, 乗客有無・位置)	大
自動車	大 (路面状態, エンジン回転数)	小
航空機	小 (巡航時)	大

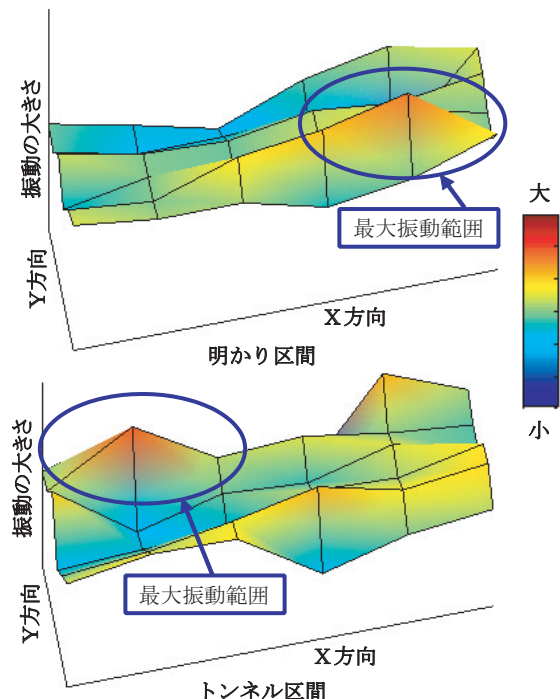


図1 明かりとトンネル区間における内装板振動状態の変化

一般に振動状態が変化する制御対象物への対処として、次の二つの方法が考えられる。第一は、制御対象物の振動状態および周囲の音場の特性を逐次同定し、直ちに最適な制御力を与える方法である。第二は、状態変化の影響を受けないシステムを構成する方法である。第一の方法の場合、コンピュータによるデジタル信号処理システムによる多入力多出力制御か、制御対象物に独立型の制御装置を取り付ける分散制御システムが考えられるものの、現時点ではハードウェアの演算速度、制御手法、コストの面から解決すべき課題が多い。小規模なシステムで効率的な制御を行うことを目指しても、制御対象物の正確なモニタリングが不可欠であるため、結果的に大規模なセンシングと高度な同定手法を用いることになり、実現性という点で困難と考えられる。そこで、第二の考えを前提とした手法を次節において提案する。

3.2 圧電材料を用いた騒音低減システムの構成

これまで提案されている壁面透過音制御は、境界壁面に圧電材料を貼付し振動制御する手法⁷⁾や、多数の動電型スピーカを平面状に配列する方法⁸⁾などである。第一の手法では、アクチュエータや圧電材料などの加振源を制御対象物の振動の腹などに的確に取り付けることが肝要であるが、図1のように内装板の振動状態が変化する鉄道車両において、振動の腹の位置に応じて制御点を移動させることや、あるいはあらゆる位置で加振できるような、全面に加振源を設置しておくことは不可能である。また、第二の手法のように動電型スピーカで内装面を構成するのも現実的ではない。

そこで、内装板に入射する音響エネルギーを抑制する

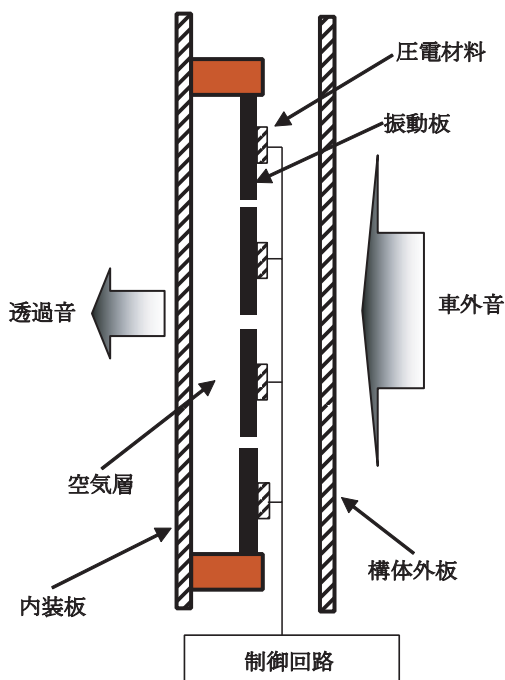


図2 圧電材料を用いた騒音低減システム断面図

ことで、透過する音響エネルギーを低減する騒音低減システムを開発した。

騒音低減システムは、圧電材料を貼付した小面積の平板（以下「振動板」という）を平面状に配列したパネル（以下「騒音低減パネル」という）である。図2に騒音低減システムを内装板に適用した場合の断面図を、図3に外観図を示す。ここで、騒音低減システムは、内装板（以下、一般化するために「制御対象板」という）の入射音側に取り付けられ、さらに制御対象板の振動状態の影響を受けないように、空気層を設ける。各振動板の圧電材料は互いに接続され、一つの制御回路に接続される。制御回路から、振動板の振動を抑制する制御力を印加することにより、振動板の透過音が低減する。その結果、制御対象板と騒音低減パネル間にある空気層内の音響エネルギーが抑制され、制御対象板への入射音響エネルギーが小さくなり、制御対象板の透過音を低減することができる。ここで、制御回路では、圧電材料の電気-機械エネルギー変換特性を利用し、振動板の剛性を向上させる制御を行う。この制御方法は各振動板のパッシブな遮音性能を向上させるもので、厳密には前述の「アクティブ制御」とは異なるが、圧電材料を用いた振動・騒音制御手法において「セミアクティブ制御」と呼ばれ、安価なアナログ回路で構成できる。

この騒音低減システムの特徴は次の通りである。

- ①制御対象板と騒音低減パネル間に空気層を設けて取り付けることにより、制御対象板の振動や透過音特性の同定が不要である。
- ②制御対象が音響エネルギーであるため、制御力および消費電力が小さい。
- ③オペアンプを使用した簡単なアナログ制御回路で制御可能である。
- ④騒音低減パネルおよび制御回路ともに大量生産が可能であり、量産効果による低コスト化が図れる。

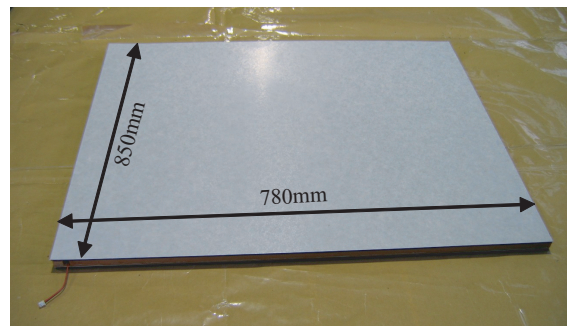


図3 騒音低減パネル外観

4. 新幹線車両デッキ部への適用効果の解析

近年新幹線車両では、客室の他にデッキにおける静粛性も求められている。そこで、本騒音低減システムを新

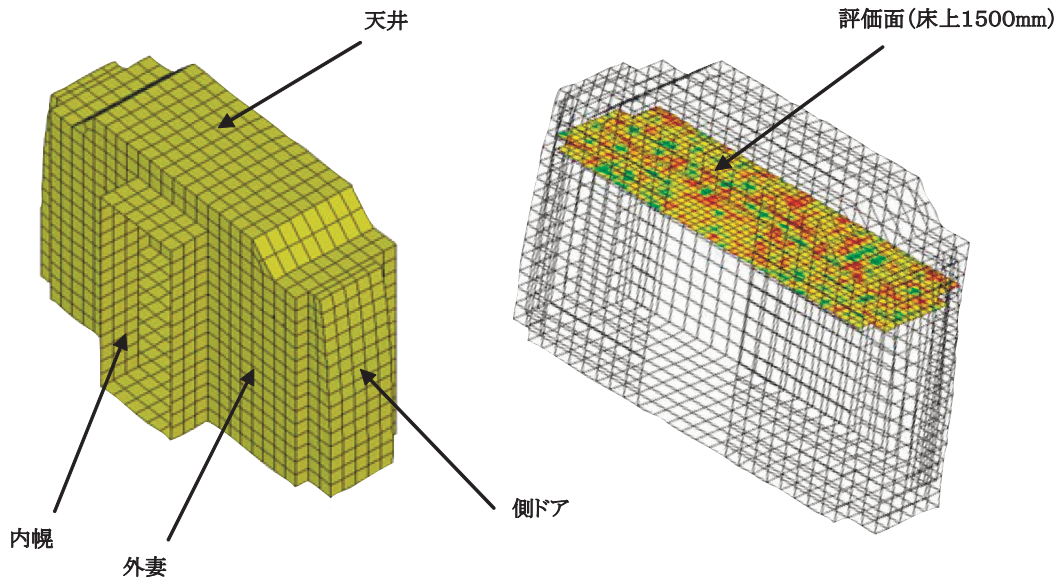


図4 デッキ部解析モデル

幹線車両のデッキ部に適用した場合の騒音低減効果を数値解析を用いて予測した

4.1 デッキ部騒音解析の概要

騒音対策において、対策範囲と騒音低減効果を予測することは重要である。新幹線車両のデッキ部は天井、床、外妻（連結面側妻壁）、客室仕切壁（客室側妻壁）、側ドア、客室仕切戸、貫通路（内幌）等で構成されている。その中で、外妻は面積が広く、かつ台車や連結部の車外音が透過するため、外妻からの入射音を抑制することでデッキ全体の騒音低減が可能と考えられる。そこで、デッキ部内装板振動データを使用した3次元放射音解析を実施し、外妻からの入射音を低減させた場合のデッキ内騒音低減効果を予測した。

デッキ部内装振動データは、走行中の内装板振動状態

を実測し、振動速度の周波数特性を求めた。この振動速度データを内装板からの入射空気粒子速度としてデッキ部の3次元モデルに入力し、空間内の音響モードを加味した騒音分布を計算した。次に、外妻部の内装板振動を10dB低減した場合のデッキ部騒音分布を求め、騒音変化量を評価した。

デッキ部3次元形状モデルは、図4の通り、外妻、側ドア、床、客室仕切壁、仕切戸、天井で構成し、内幌部は隣接車両との連結面までをモデル化した。なお、内幌部は本来、隣接車両との通行のため開口状態であるが、今回は全周波数で吸音率1（全吸音）である壁面とした。客室仕切戸については閉状態を前提とし、客室仕切壁と一体形状としている。また、評価面は乗客の立位状態を前提に床上1500mmに設定し、騒音低減パネルの騒音低減特性を考慮し250Hzを解析周波数とした。

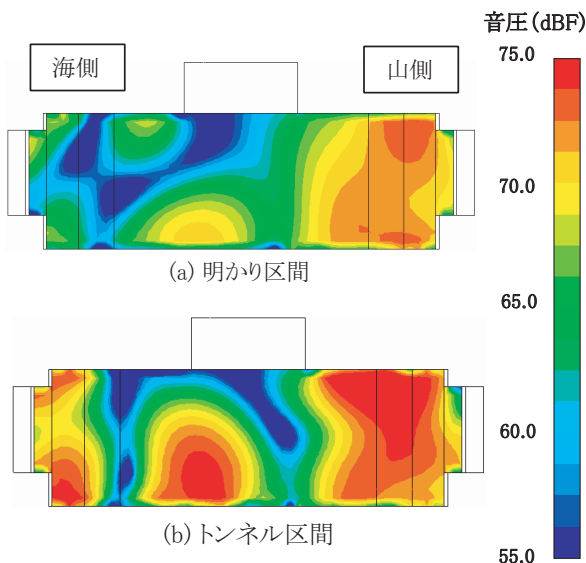


図5 デッキ部騒音分布解析結果

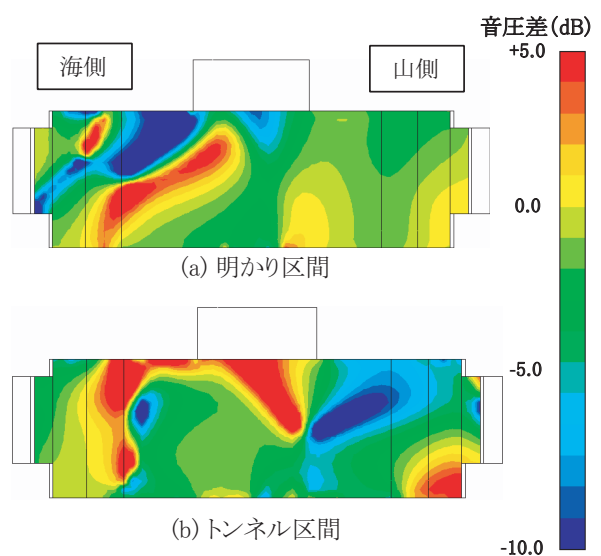


図6 騒音低減効果分布解析結果（音圧差）

4.2 デッキ部騒音解析結果

図5に250Hzにおける明かり区間とトンネル区間のデッキ部騒音分布を示す。全体的な傾向としては、両区間ともに山側の騒音レベルが高く、海側の方が比較的低い。これは、山側が防音壁やトンネル壁面に近い時のデータを使用したため、壁面の反射音等が側ドアなどから大きく侵入する影響が現れたものと考えられる。また、トンネルに入ると全体的に騒音レベルが高くなり、明かり区間と状態が変化することがわかる。

次に、外妻全面の振動速度が10dB低減した時の騒音分布を計算し、図5の騒音分布と差し引きした騒音変化量（音圧差）を図6に示す。ここで、騒音レベルが低減した場合は－値、増加した場合は＋値である。その結果、明かり区間及びトンネル区間ともに広い範囲で騒音低減できることが確認できた。騒音変化量が－5～－3dBの範囲が多いものの、一部範囲においては外妻からの入射音低減レベルと同等の－10dBの騒音低減効果が得られている。騒音低減効果の大小は、外妻からの入射音の寄与度に依存し、他部位からの入射音の影響が大きい範囲では、騒音低減効果は小さくなり、外妻からの影響が大きい範囲では、騒音低減効果も大きくなる。

また、一部で騒音レベルが増加する範囲が見られるが、図5の騒音分布と比較すると、元々騒音レベルが小さい範囲とほぼ一致することがわかる。これは、内装振動低減前に外妻からと内装各部からの入射音が打ち消し合っている状態と考えられ、外妻からの入射音を低減することで打ち消し合いのバランスが崩れ、結果的に増加することになる。このように一部範囲の入射音を低減した結果、騒音の低い範囲において増音する現象は、パッシブ対策、アクティブ対策に関わらず発生するものである。ただし、増音領域が発生した場合においても、オーバーオール値への影響は小さいと考えてよい。

5. 新幹線走行時における騒音低減試験結果

5.1 試験設備概要

新幹線デッキ部の外妻に取り付け可能なように、騒音低減パネル大（幅780×高さ850mm）を2枚、小（幅640×高さ800mm）を2枚製作し、それぞれ実際の新幹線車両のデッキ外妻の海側、山側に取り付けた。騒音低減パネルの中央前方とデッキ中央の床1500mmに騒音計を設置し、デッキ内騒音を測定した。これらの仮設状況を図7に示す。なお、側ドアからの侵入音を抑制するために、側ドア前面には遮音材を設置した。

評価区間は300km/h等速走行時のトンネルおよび明かり区間で、制御ありとなしの場合の騒音を比較した。



図7 デッキ部外妻への騒音低減パネルの取付け状況

5.2 結果概要

図8に明かり区間におけるデッキ部騒音低減効果を示す。海側では、図8(a)の通り、150～180Hz、190～210Hz、230～250Hzにおいて最大約3dBの騒音低減が見られ、また、山側では、図8(c)の通り、200～220Hz、230～280Hzにおいて最大約4dBの騒音低減が見られた。デッキ中央では、図8(b)の通り、170～210Hz、280～290Hzで最大約2dB低減した。これら騒音が低減した帯域は、4枚の騒音制御パネルの騒音低減効果が現れたものである。210～280Hzの騒音低減効果が見られない帯域は、外妻からの入射音の寄与が小さく、側ドアや床板あるいは内幌からの入射音の寄与が大きいため、騒音低減効果が得られなかったことによると考えられる。なお、300～340Hzの騒音増加は、同帯域において海側上パネルの騒音が増加した影響によるものであるが、騒音レベルの低い帯域の増加であるため全体の騒音への影響は小さい。

次にトンネル区間における騒音低減効果を図9に示す。海側は、図9(a)の通り、170～200Hz、220～240Hzにおいて最大約2dBの騒音低減が見られた。また山側では、図9(c)の通り、200～220Hzで最大約1dB、230～280Hzで最大約3dBの騒音低減が得られ、デッキ中央では、図9(b)の通り、180～300Hzにかけ騒音が低減し、約220Hzで約4dB小さくなった。

このように、走行車両においてデッキ部騒音を低減することができたことより、本騒音低減システムの有効性を確認することができた。

特集：車両技術

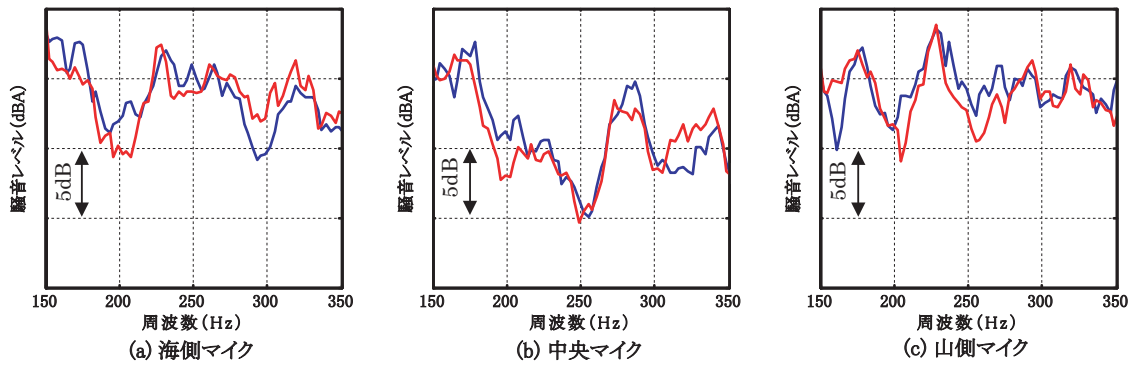


図8 明かり区間の騒音制御効果 (— 制御なし — 制御あり)

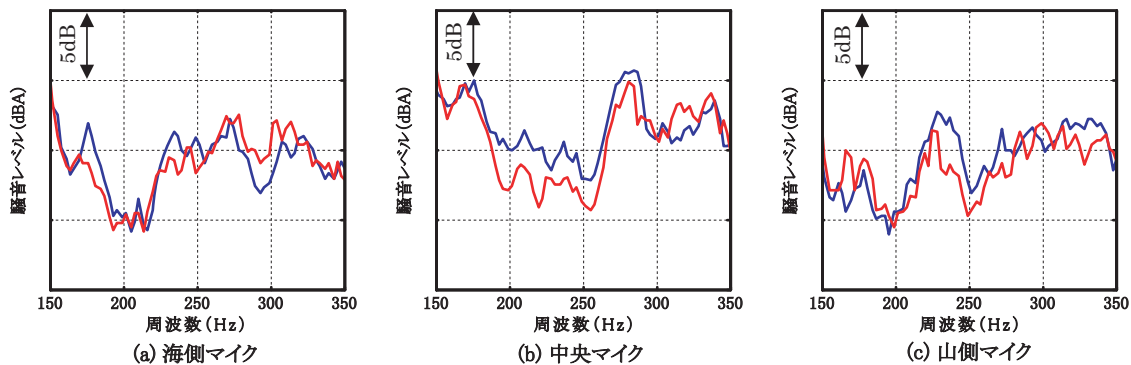


図9 トンネル区間の騒音制御効果 (— 制御なし — 制御あり)

6. 結論

鉄道車両の特殊性を考慮した新たな騒音低減システムを提案し、デッキ部騒音を対象にその有効性を検証した。

- (1) 鉄道車両の車内騒音は、騒音源が多くかつ伝播経路が複雑であり、客室および内装の振動状態が逐次変化する。そこで、圧電材料を用いた騒音低減パネルを新たに開発し、内装板に取り付けることで内装透過音を低減するシステムを考案した。
- (2) 新幹線車両のデッキ部において、外装に本騒音低減システムを取り付け、透過音を抑制することによりデッキ部騒音の低減を図った。事前にデッキ部の3次元放射音解析を行い、騒音低減効果を予測したところ、広い範囲で騒音低減効果が得られること、および当初に騒音が小さい範囲では増音する傾向があることを明らかにした。
- (3) 騒音低減パネルを試作し、新幹線のデッキ部外装に取り付けたところ、明かり区間、トンネル区間共に騒音低減効果を得ることができ、本システムの有効性を実証することができた。

今回は本騒音低減システムを走行車両に適用した初めての試験であったため、制御定数の設定等が手探り状態であった。今後は、振動板と圧電特性等の同定を行い制御定数の最適値を求めることで、さらに騒音低減効果の向上と帯域を拡大したシステム設計手法の確立を目指す。

文献

- 1) 吉村慎一郎, 秋山悟, 矢野弘, 大西博幸, 杉本明男: 新型新幹線電車の車内低騒音化, 日本機械学会第5回交通・物流部門大会講演論文集, pp.371-374, 1996
- 2) 寺井賢一, 木場政生, 橋本裕之, 田村忠司, 中間保利: シートオーディオシステムのアクティブ騒音制御, 松下テクニカルジャーナル, Vol.40, No.3, pp.126-132, 1994
- 3) P. Gardonio, "Review of Active Techniques for Aerospace Vibro-Acoustic Control", *JOURNAL OF AIRCRAFT*, Vol.39, No.2, pp.206-214, 2002
- 4) M.A.Botto, J.M.C.Sousa, J.M.G.Sa da Costa, "Intelligent active noise control applied to a laboratory railway coach model", *Control Engineering Practice*, Vol.13, No.4, pp.473-484, 2005
- 5) 山本克也: 鉄道車両の車内騒音の低減方法, 騒音制御, Vol.31, No.5, pp.368-373, 2007
- 6) 西村正治, 宇佐川毅, 伊勢史郎: アクティブノイズコントロール, コロナ社, p.138, 2006
- 7) Gabbert, U., Lefevre, J., Nestorovic, T., Ringwelski, S., "Analysis and design of smart structures to control vibration and noise", *Proceedings of the ASME IDETC/CIE*, Las Vegas, USA, Sep 4-7, 2007, Paper DETC2007-34423.
- 8) 伊勢史郎: 境界音場制御の原理のアクティブ騒音制御への応用, 騒音制御, Vol.27, No.4, pp.263-266, 2003