

# 1317 内装振動データによる車内騒音分布解析と内装透過音低減の ANCシステムによる消音効果予測について

Analysis of Railway Internal Noise Distribution and Prediction of Sound Deadening Effect by an ANC System which Reduces Noise Transmitted Through Internal Panels

正○山本 克也, 田川 直人, 正 梅原 康宏 (財団法人鉄道総合技術研究所)  
角張 勲, 水野 耕, 寺井 賢一 (松下電器産業株式会社)

Katsuya Yamamoto, Naoto Tagawa, Yasuhiro Umehara (Railway Technical Research Institute)  
Isao Kakuhari, Ko Mizuno, Kenichi Terai (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.)

To analyze the noise distribution in railway vehicles, we simulated the noise distributed over a railway vehicle by using detailed vibrations data of the internal panel for a seat and the typical vibrations data of other areas. We also developed an active noise control (ANC) system that uses a ceramic loudspeaker to reduce the noise transmitted through internal panels. This paper introduces the above simulation, compares its results with the actual internal noise data of a high-speed vehicle, summarizes the new ANC system and predicts the effect to deaden the internal noise of railway vehicles.

Keywords: Internal noise, ANC system, ceramic loudspeaker,

## 1. はじめに

鉄道車両において高速化に対する取り組みは世界的に盛んに行われているが、それに伴う乗り心地や車内騒音を一定レベル以下に抑える手法の研究開発も行われている。

車内騒音に関しては、特に高速新幹線車両において、既存車両の振動・騒音源レベルを把握し、各振動・騒音源から車内の騒音評価点への伝達関数により予測する方法<sup>1)</sup>や、SEA法を用いた構体および内装の透過音解析をする手法<sup>2)</sup>が提案されている。

いずれも騒音源の特性と各部の振動伝搬経路および透過特性を正確に把握することが肝要であり、客室に侵入する騒音の特性を実験的および解析的に解析するものが主な取り組みであった。

そこで、車内騒音は客室空間を形成している内装板、窓、床、天井等の各パネル（以下総称して「内装」という）の振動による2次放射音であることに注目し、狭範囲の詳細内装振動実測データとその他範囲の代表点振動を元に、車内の3次元空間における車内音解析を行った。

また、内装の透過音を低減する具体的な手段として、薄型軽量の特徴とした圧電スピーカ<sup>3)</sup>を使用したアクティブノイズコントロール(ANC)システムを開発した<sup>4)5)</sup>。

鉄道車両におけるANCシステムが実用化された一例として、JR東日本のE2(MAX)のグリーン車で、座席の耳元に取り付けたスピーカにより、乗客一人一人の頭部付近の騒音を低減するシステムが実用化された実績がある<sup>6)</sup>が、特に鉄道の高速化が進むに従い、空力騒音の比率は速度の6乗に比例して増加するため、内装を透過する騒音を低減し、車両全体の騒音低減を実現できるシステムの開発に取り組んできた結果である。

本論文では、上記車内音解析手法の概要と結果、およびANCシステムの概要と消音効果について紹介する。

## 2. 内装振動データによる車内音解析

特急列車などは客室を内装により閉空間とすることで車内音の低減を図っている場合が多い。そのため、窓の開閉はできず、出入り台との間には仕切戸が設置されている。

よって、車内音の伝播経路を解析すると、台車付近から発生する騒音がアンカーおよび構体を伝搬し、内装を振動させることで車内に騒音を放射する固体伝搬音と、台車あるいは床下部から車外へ放射された騒音や高速走行時の空力音が内装を透過して車内に侵入する透過音に分けられる。いずれも最終的には内装の振動が媒介となり、車内に2次的に放射される。

そこで、走行中に実測した内装振動データを使用し、客室空間の3次元的な空間モードを加味した騒音分布の計算を行い、合わせて特定座席における周波数特性を解析した。

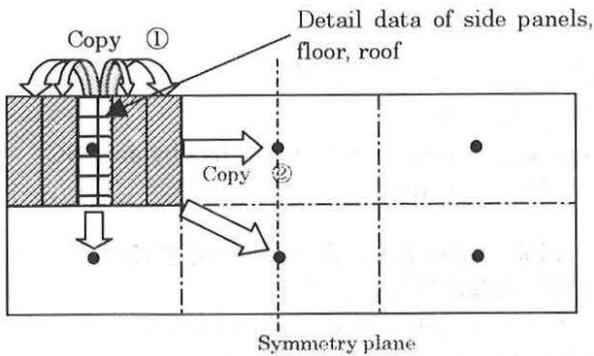
### 2.1 内装振動の測定

解析の入力データとなる内装振動を実測するにあたり、車内全体の内装振動を詳細に測定するのは現実的には不可能である。よって、1座席分の範囲(幅880mm)のみ詳細データを測定した。また、車両全体については、まず車両長方向に3分割し、さらに南北に分けることにより全体を6ブロックに分けている。

内装板(窓を含む)、天井、床はそのブロックの代表点を含む1座席分の範囲で振動加速度センサーにより約120~140mmピッチの振動データを測定した。また、表面は全体をほぼ同じピッチで測定した。

6つに分けた各ブロックは内装板、床、天井で構成され、それぞれ中心部のデータを代表データとした。

車内音分布を解析するにあたり、より精度の高い解析結果を得るためには、各内装からの放射音の位相データが必要となるため、位相を求める際の基準位置として最低1点の振



● Representative point of each blocks

Fig.1 Data distribution

動加速度センサーは固定する必要があるが、今回は内装板左上の2点を該当させた。

図1に内装振動データの分布に関するイメージ図を示す。

実測した振動加速度データは、積分して振動速度データに変換した後に周波数分析を行い、各周波数の振動速度データを客室へ放射される音の粒子速度データとして用いる。

車両全体への展開方法については、まず詳細データを測定したブロックには1座席幅のデータをコピーし、次に、詳細データを測定したブロックと各ブロック代表データの同一周波数における振動速度の比例計算を行い、その比率を掛けた詳細データを各ブロックにコピーした。位相に関しても同様に各ブロック代表データと、測定時に固定していた基準位置からの位相差を求め、それを詳細データと差し引きして付与した。

隣接するパネル間は結合されていないか、結合されていても、特定の位相関係を持って振動していないと仮定し、ブロック内における各内装データには任意の位相差を与えた。

## 2.2 車内空間モデル

図2に解析モデルを示す。本解析手法における必要な車両のモデルは、客室空間の3次元形状モデルである。車内に放射された騒音の空間的な影響を考慮し、座席および荷棚もモデル化している。

内装には振動速度データを客室空間へ放射する音の粒子速度データとして入力し、各内装および座席の部材が持っている吸音効果を反映している。

車内音分布の評価面は乗客の耳の高さとほぼ同じである床 $1200\text{mm}$ とし、周波数分析の特性は妻面より3列目の座席で評価した。

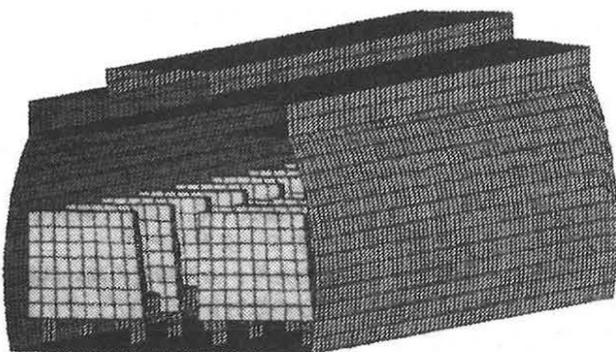


Fig.2 Analysis model

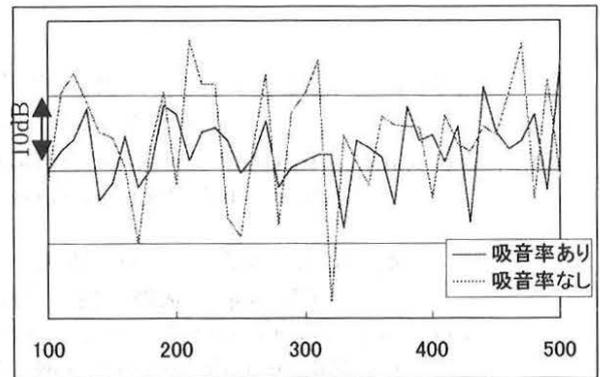


Fig.3 Effect of admittance for frequency characteristic

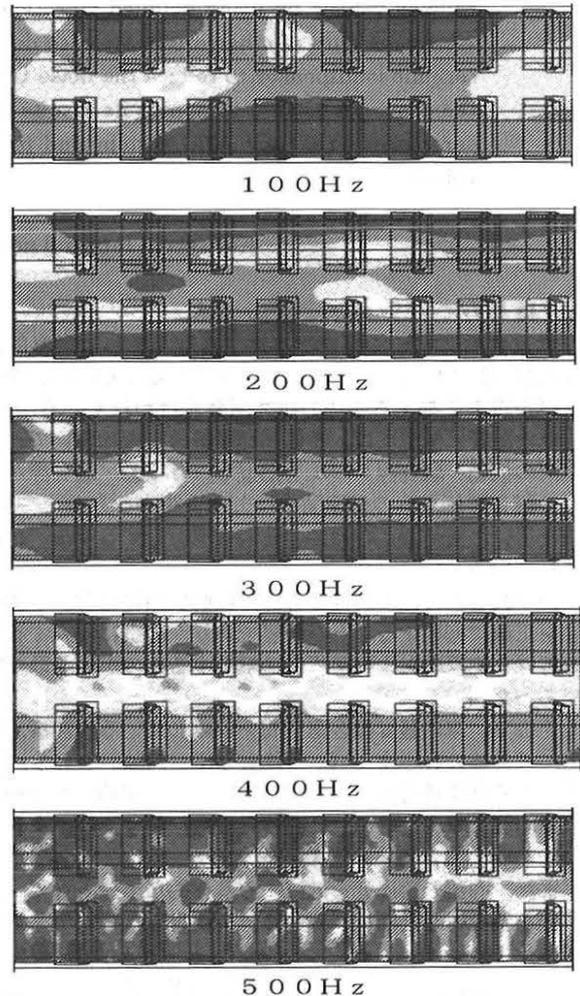


Fig.4 Distribution of inter noise by simulation

## 2.3 解析結果

### 1) 周波数特性と内装吸音効果の影響について

周波数特性は、大まかな特徴を把握するために必要と考えられる $10\text{Hz}$ ステップで計算をした。

妻面より3列目座席における内装および座席の吸音効果の有無による周波数特性を図3に示す。内装からの振動データのみを入力した場合は、最大の値と最小値の差が $30\text{dB}$ 以上となるのに対し、吸音率を設定したところ、その差は $15\text{dB}$ 程度に小さくなった。

これは、吸音効果がない場合、内装板や床などの壁面への入射音を全反射するために空間内の干渉による重ね合わせや

打ち消し合いが極端に現れるのに対し、吸音率を設定することでその成分が小さくなるためと考えられる。

## 2) 車内騒音分布解析結果

解析結果の一例として、図4にトンネル走行中の振動データを使用した際の車内分布を100から500Hzの100Hz毎の解析結果を示す。

その結果、全体的な傾向として内装板付近が大きく、通路付近は小さい。これはトンネル走行中であるため、トンネル壁面からの反射音が車両に入射されるために、内装板の透過音が大きくなる特徴が現れているものと考えられる。また、周波数が高くなるに従い騒音分布が複雑になり、車内全体がほぼ同じレベルの騒音レベルになる。低周波では車両長手方向の分布が現れるなど、車内の空間による騒音分布の影響を把握できる。特に200~300Hzでは通路中心付近において若干大きくなり、断面方向でW字形となる傾向が現れる。

## 2.4 実測結果との比較

解析結果と実測データの比較グラフは当日に発表するが、図3の周波数分析結果と実測結果を比較すると、解析結果の方が若干変動が大きいものの、全体的な傾向は合っている。実際の車内音は内装間の隙間や客室ドアからの漏れ音などにより、内装からの2次放射音以外の成分も含まれているものと考えられる。特に周波数分析においては吸音率を設定することによりほぼ同じ傾向を得ることができると言える。

また、車内音分布に関し実測データとの比較を行うと、25点のマイクロホンで測定した車両の車内音分布とは、全体的に内装板付近が大きくなる傾向と、300Hz付近で通路付近が大きくなるW型となることや、高周波になるに従い一様な分布になる様子は解析結果とほぼ同じ傾向であった。

## 2.5 内装侵入音低減時の推定について

上記解析手法を用い、内装板からの放射音が低減した場合の計算を行った。解析条件の一例として、全周波数5dB騒音レベルが低下した場合を想定し、図5に車内音分布図(代表として100, 300, 500Hzのみを表示)を示す。

その結果、低周波域は場所によって騒音が低減する箇所と逆に増加される箇所があることがわかる。一方高周波域は全

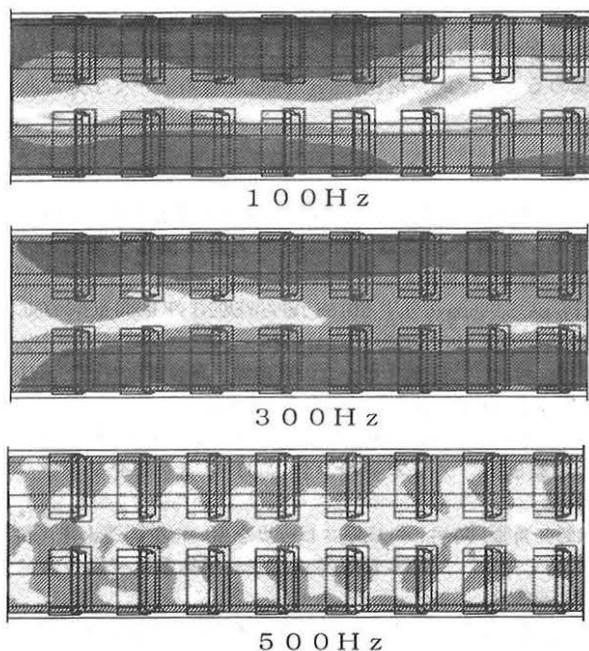


Fig.5 Distribution of inter noise (-5dB side panel vibration level)

体的に騒音レベルが低減し、侵入音の低下の効果が現れている。

これは特に低周波域において、これまで内装板から入射されていた音が客室内で打ち消しあって小さくなっていった箇所が、打ち消しあっていた成分が小さくなったために逆に増加されるケースがあることを示しているものと考えられる。

## 2.6 本解析手法の使用手法

本解析は内装からのみ客室へ騒音を放射していることを前提としており、次の条件の下で活用可能と考えられる。

- ① 客室が壁面で仕切られている閉空間である。
- ② 窓や内装間の隙間がなく騒音侵入がない。
- ③ 乗客のいない空車状態である。

車内騒音を実測した場合、特に②の内装間の隙間による騒音侵入は全体の騒音特性に与える影響が大きい。

この条件の元においては、本解析手法を用いて、現状の騒音侵入経路や対策部位の検討および対策後の車内音変化の解析などに活用可能である。

## 3. 内装透過音低減のANCシステム

### 3.1 システムの概要

本システムの概要を図6に示す。圧電スピーカ4枚とマイク1個、制御回路がフレームに装着され、独立した制御系を構成しているモジュール構造である。このモジュールを騒音低減したい内装などの制御対象壁面の裏側に取り付ける。

車外から侵入してくる騒音は、一旦圧電スピーカを透過し、モジュール内部に伝搬する。モジュール内部の騒音はマイクで検知され、電気信号に変換される。マイク信号は制御回路に入力され、制御回路(もしくは制御フィルター)を介しスピーカからマイクの位置で騒音と同音圧かつ逆位相になる制御音が放射される。モジュール内部で騒音とスピーカからの制御音が打ち消し合い、モジュール内部の騒音が低減する。その結果、壁面に侵入する騒音が小さくなることで、内装の

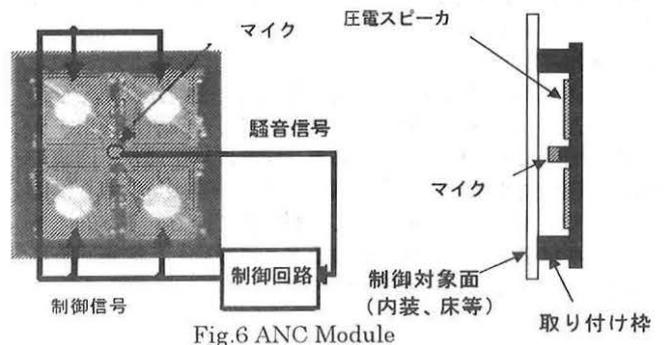


Fig.6 ANC Module

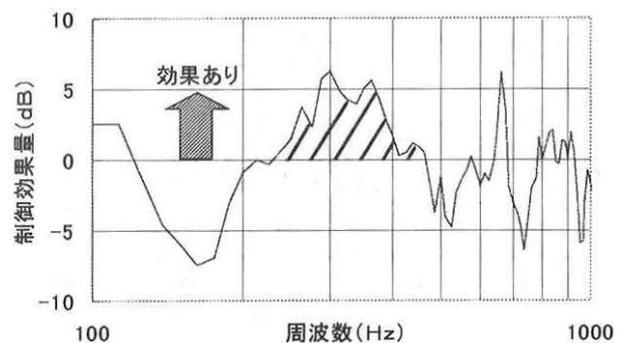


Fig.7 Deadening noise level from inter panel by ANC system

## ANCシステムの適用イメージ

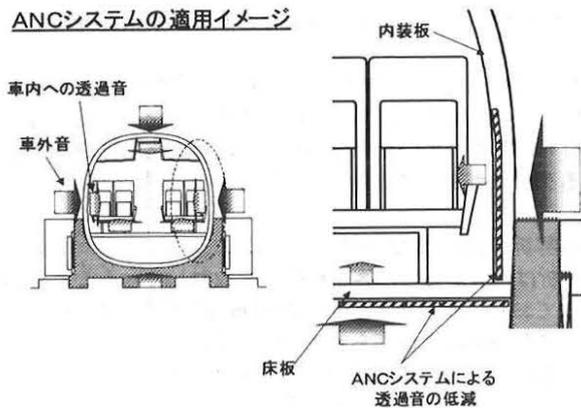


Fig.8 Application image for inter panel in vehicle of ANC system

振動が小さくなり客室側への2次放射音が小さくなる。

制御回路は、制御部における遅延を極力短くすること、モジュールの大きさやコストを小さくすることなどを目的にアナログによるフィードバック回路で構成している。

また、フレームによる密閉構造とすることで、隣接するモジュール間との制御音の相互干渉もほとんどないため、モジュール単位で独立した制御系となっている。

### 3.2 制御効果

本システムによる制御効果を試験装置を使用して検証した。制御対象壁面は $t 0.5\text{mm}$ の鉄板に化粧シートを貼った板とし、裏側にモジュールを4個取り付けている。騒音源は下部のスピーカーから白色雑音を与え、制御対象壁面の上方 $0.5\text{m}$ における騒音レベルで評価した。

制御をON、OFFした場合の騒音レベルを確認した結果を図7に示す。200から400Hzの帯域において最大5dBの騒音の低減が確認された。200Hz以下および500Hz付近などで逆に騒音が増加しているところが見られているが、制御効果を得られている周波数帯域以外への影響が少ない制御を検討している。

### 3.3 適用イメージ

本システムは客室の内装に適用することを前提に開発を進めてきたが、デッキ部分や運転席など多くの箇所に適用することが可能な汎用システムである。図8に示す通り、内装や床など制御対称面の入射音側（客室などの裏側）に取り付けることで、透過音を低減することが可能である。基本的にモジュールは必要範囲に敷き詰めるように敷設し、制御回路に電源を供給するのみで動作可能である。

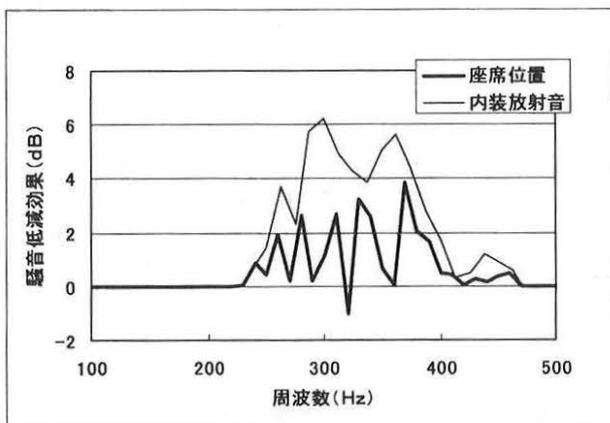


Fig.9 Prediction of deadening noise level at 3<sup>rd</sup> sheet using ANC system

適用範囲については、騒音侵入源の寄与度解析により騒音低減箇所を把握し、内装の振動レベルを低減した場合の車内騒音解析を行い、必要最小限な範囲において適用することが望ましい。

本システムを適用した場合の騒音低減効果は、第2章で述べている車内騒音解析を使用し、適用範囲とモジュールの消音効果を各内装の振動データに反映させることで、最終的な騒音レベルを予測することが可能である。

図7に示す騒音低減効果のうち、制御効果がみられる200~480Hzの部分だけを制御可能な特性を持つANCシステムを内装板と床に適用した場合、妻面から3列目座席における騒音低減効果を予測した解析結果を図9に示す。

その結果、ANCシステムにより内装板や床からの放射音を最大約6dB低減したことにより、座席位置においては最大約3dB低減することがわかった。また、周波数によってはほとんど低減しない帯域や、逆に320Hz付近のように騒音が増加される場合があることなどが予測できる。

この圧電スピーカを使用したANCシステムは鉄道車両で問題となっている床下機器の騒音など機器からの発生音を抑制する方法として、機器を入れている筐体の壁面に取り付けることで機器からの放射音を低減させることも可能である。

## 4. 結論

鉄道車両の内装振動データを使用した車内騒音の予測手法と、具体的な内装透過音低減を目的としたANCシステムを提案した。

車内騒音解析については、一部の実測した内装振動データを車両全体へ展開することで、車内の騒音分布特性を把握できる手法を開発した。

さらに内装透過音を低減する具体的な手法として、圧電スピーカを使用したANCシステムを構築し、実験室での騒音低減効果確認を行った。また、車内音解析と組み合わせることで車内音の騒音低減効果を予測した。なお、実際の鉄道車両に適用し、内装透過音の騒音低減効果を検証する必要がある。

今後は、ANCシステムの性能向上を行いつつ、車内騒音解析の精度を高め、いかに効果的に車内騒音を低減させるかを見極めることで、実用化へ向け開発を進めていく予定である。

## 参考文献

1. 吉村, 秋山, 矢野, 大西, 杉本, “新型新幹線電車の車内低騒音化”, 第5回交通・物流部門大会講演論文集(1996) No. 96-51, P. 371-374
2. Akiyama, S, Kumaya, T, “NOISE IMPROVEMENT OF HONG KONG KCR EMU”, STECH' 03(2003), P. 141-146
3. 小椋, 村田, “圧電スピーカの広帯域, 高音質化技術”, 日本音響学会 2001年秋季研究発表会, P. 639-640
4. 角張, 水野, 寺井, 山本, “圧電スピーカを用いた壁面透過音の能動制御”, 日本音響学会 2003年春季研究発表会, P. 62-63
5. 水野, 角張, 寺井, “圧電スピーカを用いた壁面透過音 制御モジュール”, 日本音響学会 2003年秋季研究発表会, P. 591-593
6. 橋本, 寺井, “シートオーディオシステムのアクティブ騒音制御”, 電子情報通信学会技術研究報告, US94-89 (1995.1)