

# 車内騒音を制御する

山本 克也

車両構造技術研究部  
(車両振動研究室 主任研究員)

朝比奈 峰之

同  
(同 副主任研究員)



やまもと かつや



あさひな みねゆき

## はじめに

鉄道を利用されるお客様にとって、車内騒音に対する印象は様々でしょう。旅行中の特急列車の中では、レールの継ぎ目を車輪が通過する時の音もリズムカルに聞こえるかもしれません。友人や会社の同僚と話したいときは、お互いの声がどうも聞き取りにくく、周りの音が煩わしく思います。毎日の通勤列車の中では、地下鉄の大きな音さえ何も感じなくなります。

これまでの鉄道車両の開発において、車内騒音の研究は新幹線開業前の特急列車から長い歴史がありますが、主に騒音の大きさをいかに小さくするかという点に着目して行われてきました。その結果、新幹線などでは最高速度が高くなるにもかかわらず、車内騒音の増大が抑えられています。鉄道車両に施されている対策は、「重いものを取り付けて騒音の侵入を小さくする」という「質量則」と呼ばれる原理に則ったものが多いと言えます。これは、ますます軽量化を求められる車両において、限界が近いと考えられます。

そこで本稿では、新たな騒音対策手法として、車内騒音に制御技術を適用することについて、考えていきたいと思えます。

## 音を制御するとは？

騒音を制御することを考えるには、「音」について知る必要があります。ちなみに、音とは人が耳で感じる空気の圧力変動ですが、その中で望ましくない音や不快な音を「騒音」と言います<sup>1)</sup>。以降、一般的な特性などについては音と、低減あるいは制御すべき対象は騒音と呼ぶことにします。

日常身の回りで聞こえる音が持つエネルギーは非常に小さいことが分かっています。人間は大よそ1m<sup>2</sup>あたり10<sup>-12</sup>W(ワット)から100W程度の範囲の音を聞くことができますが、鉄道車両の車内騒音は、新幹線が最高速度で走行する場合でも1m<sup>2</sup>あたり10<sup>-5</sup>W前後です。物理的には小さいエネルギーですが、そのように小さなエネルギーで

ある音を制御することは、簡単にできるということもできますし、非常に難しいということもできます。

音の制御に関する特許は、1936年にアメリカのP.Luegによって初めて取得されています。そこでは、ダクト内に伝搬してくる音をマイクロホンで検知し、それに基づいて逆位相の制御音を加えることで、音圧を相殺する手法が提案されています。これは「アクティブノイズコントロール」と言われ、最も基本的な音の制御手法ですが、近年幅広く製品化されている「ノイズキャンセリングヘッドホン」に用いられています。

このノイズキャンセリングヘッドホンが実用化できた理由は二つ上げることができます。一つは、制御用のデバイスが安価で小型にさらに高性能に製作できるようになったこと、もう一つは制御対象である空間がヘッドホンと耳に囲まれた小空間であることです。そのため、広い周波数帯域の音を効率よく低減することができています。

音を制御するもう一つの手法としては、住宅の部屋や航空機、鉄道車両などの閉じられた空間において、その閉空間を構成している壁面を透過する音(透過音)や反射する音(反射音)に対して、壁面の振動を制御する手法があります<sup>2)</sup>。例えば、壁面の振動を加速度センサーで検知し、アクチュエータから制御力を加えて振動を制御することにより、透過音や反射音を抑制する手法です。しかし、複雑に振動する壁面から放射される騒音は、互いに干渉し合う特性があるので、一部の振動を抑制すると逆に騒音が増大することがあります。すなわち、振動と音の関係を見極めながら制御する必要があり、単純に振動の大きい箇所を制御すればよいわけではありません。

## 鉄道車両にこれまでの騒音制御技術を適用すると…

近年、様々な騒音制御技術の研究開発が進んでいますが、鉄道車両に前述の干渉を考慮せずに適用するとどうなるでしょうか。図1に鉄道車両の車内騒音の伝搬経路を示しま

す。伝搬経路の一つとして、車外音が車両の構体や内装などの壁面を透過して車内に侵入するものがあります。そこで、最も基本的な騒音制御技術として、客室に制御スピーカを置いて、内装からの透過音に制御音を加える場合について検証したいと思います。

ここでは、極力少数のシステムで、車内全域の騒音を効率よく低減することを目指すことにします。また、単純化のために内装板は全て同位相で振動し、客室内に平面波を放射していると仮定します。制御スピーカを中央の内装に取り付け、制御音を出力できるようにします。内装からの透過音は、場所により空気の圧力の「山(密)」と「谷(疎)」が現れます。一方で、中央に置いた制御スピーカからは半円状に制御音が伝搬し、同じく空気の圧力の山と谷が現れ

ます。例えば、図2の客室の中央付近の騒音が低減するように”うまく”制御音の特性を調整できるとすると、そこは透過音の「谷」と制御音の「山」が重なる状態か、逆に透過音の「山」と制御音の「谷」が重なる場所になります。このように「山」と「谷」が重なる場所では騒音が小さくなると考えられます。しかし、透過音の「山」と制御音の「山」が重なる位置、あるいは逆に透過音の「谷」と制御音の「谷」が重なる場所では、制御音を加えることにより逆に音が大きくなります。その結果、透過音と制御音がうまく相殺され、音が小さくなる範囲と、逆に音が大きくなる範囲が交互に現れることになります。このように、客室全体の騒音を一律に低減することは困難であると言えます。この問題を解決するために、例えば制御スピーカも内装に並べて平面波を出力できるようにすることや、最近では音が一方方向にしか放射されない特殊なスピーカが開発されているので、それを利用する方法などもあります。しかし、そのためには、制御スピーカの数が増えたり、コストが余計にかかるなど、「少数のシステムで」という前提が満足できなくなります。

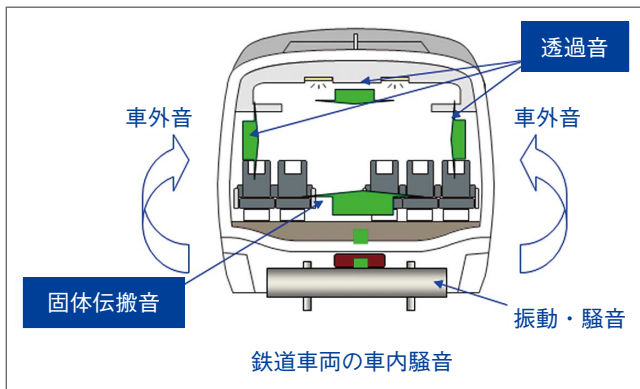


図1 鉄道車両の車内騒音の主な伝搬経路

### 騒音低減システムの基本コンセプト

それでは、車内騒音を制御するにはどのような手法であれば実現できるのでしょうか。その一つとして、筆者らは内装透過音を対象に圧電材料を用いた騒音低減システムの開発を進めています。図3に断面図を示します。なお、本

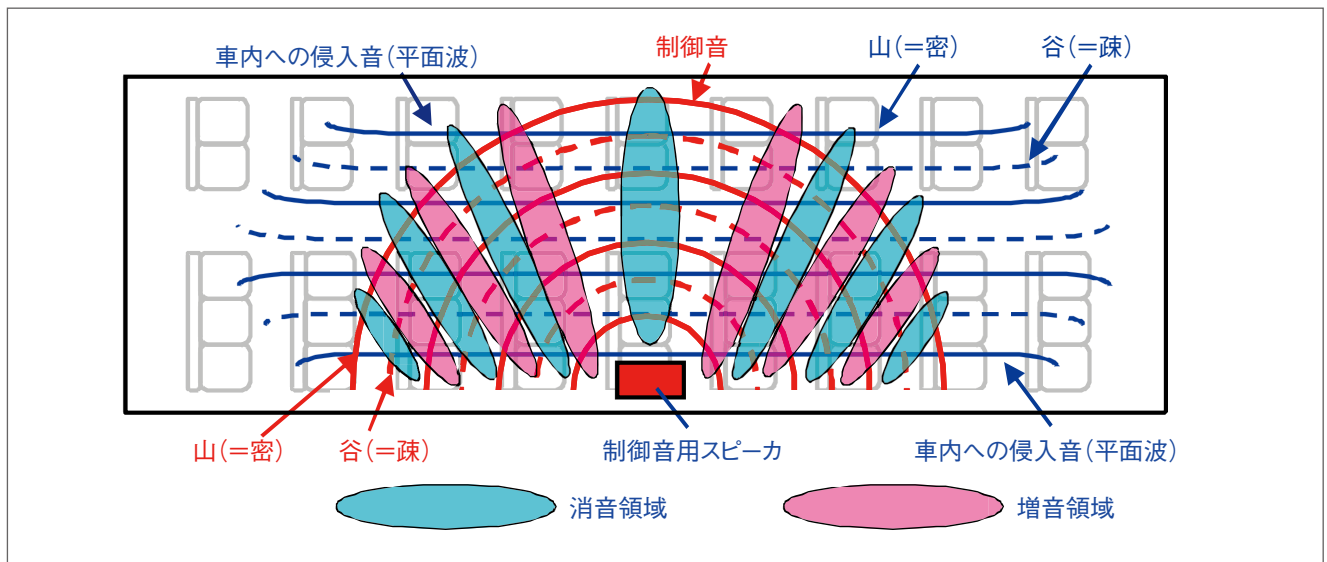


図2 制御音を加えた場合の騒音変化の一例

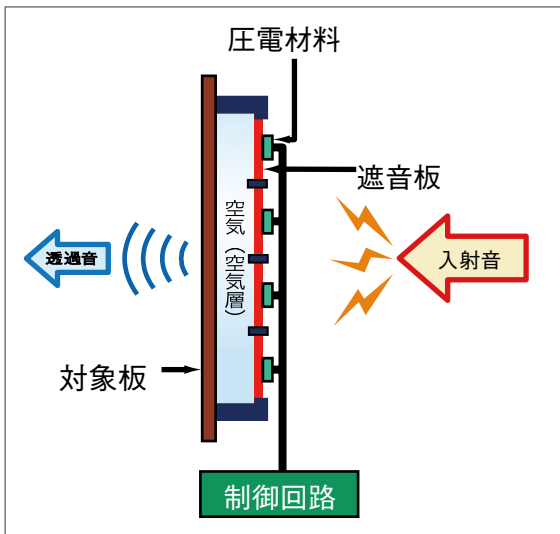


図3 騒音低減システム断面図

誌2010年1月号に本システムの概要が掲載されているため、あわせてご参照ください<sup>3)</sup>。

本システムを開発するにあたり、一つの割り切りをしました。それは、「少数のシステムで効率的な騒音低減を目指す」ということです。新幹線をはじめ、鉄道車両の客室は、騒音制御にとって大きな空間です。そのため、数少ないシステムを適用しても全体的な騒音低減は困難であるため、単純なシステムを、騒音の侵入量が多い範囲に取り付ける方が実現性が高いと判断しました。

そこで、紹介する騒音低減システムでは、騒音が透過する小型で薄い金属板（遮音板）の中央部に圧電材料を貼付し、これに制御電圧を加えることにより、遮音板が硬い板となるような状態を作ります。その結果、透過音が低減され、客室へ入射する騒音が抑制されることにより、客室全体の音のエネルギーを低減することを図ります。

### 騒音低減システムを適用するまでの流れ

内装透過音を対策する手法を車両に適用する際には、騒音の侵入の割合が大きい部位に取り付けることが重要です。そこで、本騒音低減システムを例に、適用までのフローを図4に示します。最初に、①対象空間と走行条件を明確にし、②対象空間内の評価点における騒音特性の測定と解析を行い、③制御対象周波数を定め、④騒音侵入経路を特定します。その後、⑤騒音低減システムを製作し、可能であれば⑥数値解析などにより騒音低減効果の予測を行います。これらの結果を基に⑦適用範囲を決定し、⑧鉄道車両に適用します。

この流れは、基本的に従来のパッシブ対策の検討においても同様であると考えられますが、パッシブ対策ではあら

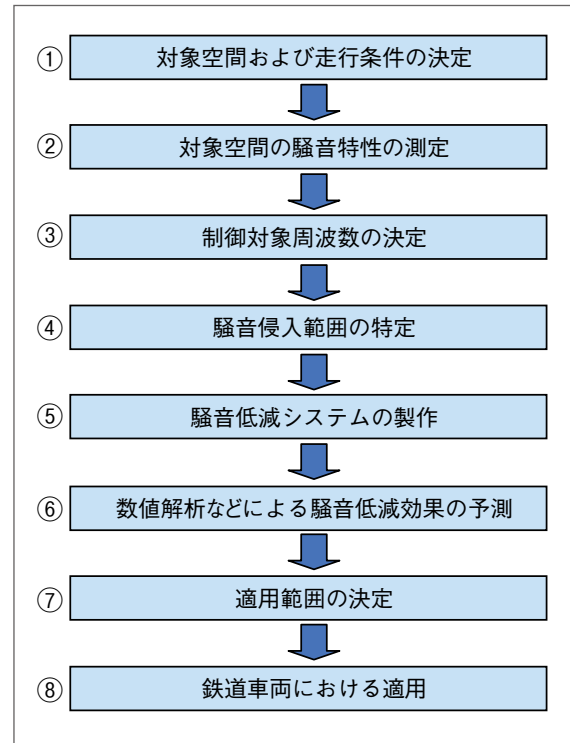


図4 騒音低減システムを適用するまでの流れ

かじめ材料が持つ特性に期待して騒音低減を図るのに対し、騒音低減システムでは最初に制御対象周波数を決定し、それに合わせて騒音低減システムを製作する必要があります。

### 音の制御効果を可視化する

内装透過音に対し騒音制御技術を適用するにあたり、図4の④にある騒音侵入範囲の特定は重要です。車両が走行している条件（速度や走行区間）や周波数などで、車内に侵入する騒音の特性は異なります。当然ながら大きく侵入している範囲を低減しなければ、車内騒音の低減は見込めません。

これまでは、車内騒音と内装の振動を同時に測定し、その関係から騒音侵入の割合（寄与度）を推定したり、単位面積当たりの音響エネルギーを測定するインテンシティマイクロホンなどで騒音の侵入範囲を特定していました。しかし、それぞれ大きな手間が掛かったり、2方向に音源があるとその中間位置が結果として出力される可能性があるなど原理的な問題がありました。

そこで、31個のマイクロホンと12個のCCDカメラを球状に配置した全方位音源探査システムを使用し、予め騒音侵入範囲を特定し、さらに騒音低減システムにより騒音を低減した後の変化を検証することとしました。図5に全方位音源探査システムの外観を示します<sup>4)</sup>。

今回は新幹線のデッキ部騒音を対象に試験を実施しまし

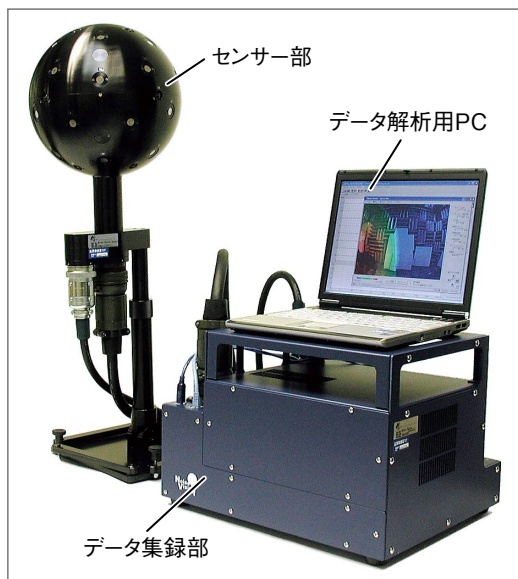


図5 全方位音源探査システム

た。図6は、全方位音源探査システムの12個のCCDカメラで撮影したデッキ部の写真に、騒音の分布を重ね書きした画像を展開したもので、赤く示された範囲が騒音の大きい範囲です。事前の測定で、ある走行条件では天井からの騒音侵入量が多いことが明らかになりました。そこで、天井に騒音低減パネルを取り付け、220Hzを対象に制御を行いました。図6 (a)に制御なしの、図6 (b)に制御ありの騒音分布を示します。制御を行うことにより、騒音が大きい赤い部分が小さくなるのがわかります。なお、色が抜けている範囲は青色以下の音の大きさです。この場合、天井からの透過音が低減することに加え、他の範囲からの騒音も低減するように見えます。これは、天井から侵入した騒音のうち、床や側扉など各内装で反射音も低減したか

らだと考えられます。

通常、騒音の特性はマイクロホンで集録し、周波数特性等で評価しますが、このように騒音の全体的な特性を可視化することで、騒音低減後の様子もよく分かります。

## おわりに

車内騒音を持つエネルギーは非常に小さいので、適切に対策することにより低減することができます。しかし、騒音制御の研究開発は未だ発展途上であるために、実用化されているものは多くありません。音の特性を十分に理解し、振動をはじめとする機械的な現象と、制御回路などの電気動きをうまく融合させる必要があります。このどれか一つでも欠けると、音は全く小さくなりません。鉄道車両は騒音制御にとって、非常に難しい条件と言えます。しかしながら、旅客の快適性が向上するよう、少しずつでも開発を進めていきたいと思えます。[RRR]

## 文献

- 1) 一宮亮一：わかりやすい静音化技術，pp.11, 1999.07
- 2) 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，pp.3-19, 2006.06
- 3) 山本克也：圧電材料を用いて車内騒音を低減する，RRR，67巻，1号，2010.01
- 4) 山本克也，山本大輔，間々田祥吾，佐藤大悟，小池宏寿，倉光拓馬，中川博：全方位音源探査システム（ノイズビジョン）による車内騒音侵入経路調査法について，第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.201-204

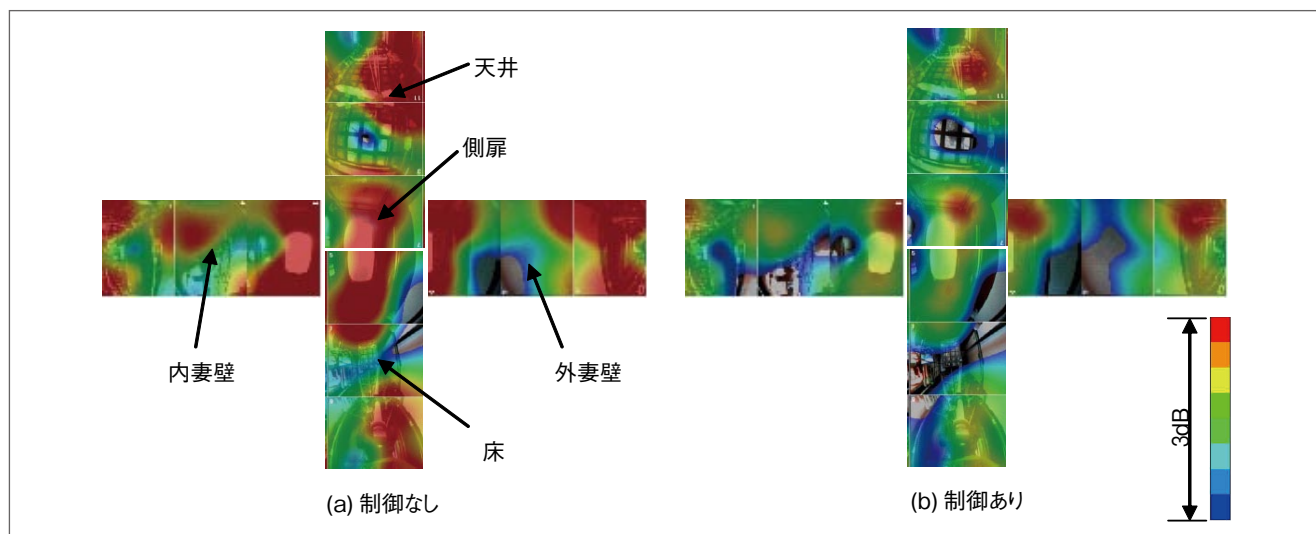


図6 全方位音源探査システムによるデッキ部騒音制御の結果(220Hz)