

# 圧電材料を用いて 車内騒音を低減する

山本 克也

車両構造技術研究部(車両振動 主任研究員)



やまもと かつや

## はじめに

地球温暖化をはじめとする環境問題に取り組むことは、鉄道の世界においても例外ではありません。一方で、高速化に向けた研究開発は、鉄道総研のほか、旅客会社や車両メーカーなどで盛んに行われ、高速鉄道は安全で利便性の高い移動手段として世界中で注目を集めています。しかし、高速で走行するためには、必要なエネルギーが大きくなります。すなわち、環境問題と高速化はある意味、相反する問題と言えるでしょう。それに対する一つの解決方法は、車両の重さを軽くすることです。そうすることで、走行時に必要なエネルギーが小さくなります。では、軽ければ軽いほど車両はよいのか、というと別の問題が発生します。例えば、車両の振動が大きくなったり、あるいは車両の耐久性も落ちるかもしれません。また、構体や床板などの軽量化が進むことになればより、車内の騒音が大きくなることが予想されます。

これまでの研究で、車内騒音が乗客の快適性を左右する一つの要因であることが明らかになっています。特に新型車両が導入される際には、環境問題と高速化の両方の課題を満足できるよう、さまざまな新しい技術を導入してきました。しかし、これまで使用されていた騒音対策手法は「質量則」という「重いものを取り付けて騒音の侵入を小さくする」という原理に則ったものが多かったと言えます。台車や車両の搭載機器などの騒音源から車内に侵入する騒音を小さくするために、構体や内装に重い鉄板などを敷設することがありました。車両は軽くしたいけど、車内騒音は大きくしたくない…車両の担当者は、このようなジレンマと戦っています。

もし、車両に使用している材料を軽量化しても騒音を小さくできる、というシステムが完成すれば、快適な高速走行が実現でき、さらに快適で環境にも優しいという姿に少し近づくことができるかもしれません。そこで、鉄道総研で車内騒音低減のために開発を行っている圧電材料という材料

を使用した、新たな騒音低減システムについて紹介します。

## 圧電材料とは

ライターをカチカチとすると、小さな火花が散ってガスに着火します。この火花を発生させているのが、圧電材料です。圧電材料とは、「機械的な力を加えると電気エネルギーが発生し(圧電効果)、電気エネルギーを加えると機械的な力が発生する(逆圧電効果)材料」のことです。ライターでは、ガスの噴出口近くに圧電材料を取り付け、衝撃力を与えることにより圧電効果で放電させ、火花を発生させています。このような着火材のほか、電気信号を加えてある周波数で振動させる信号発生器の部品、振動や力のセンサー、スピーカやブザーの振動子などに広く使用されています。水晶も圧電材料の一つと言われることがありますが、振動子などの工業用にはチタン酸ジルコル酸鉛を焼結したものの(PZT-圧電セラミック)やポリフッ化ビニリデン(PVDF)などがよく用いられます。特に圧電セラミックは、圧電特性が大きいため、最も汎用性の高い圧電材料の一つです。

## 音のエネルギーを変換する

図1のように、極薄の圧電セラミックを金属板に貼り付け、電極を設けます。この電極に電気信号を与えると、逆

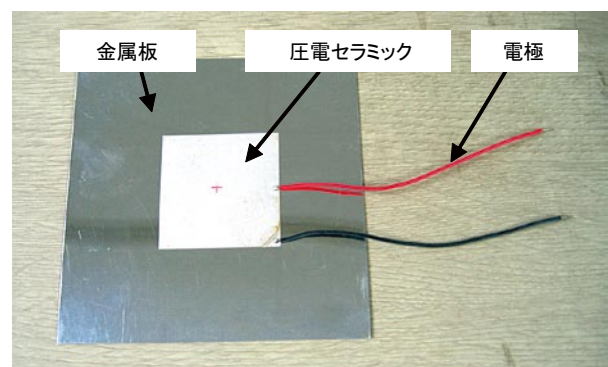


図1 圧電材料を貼付した金属板(遮音板)

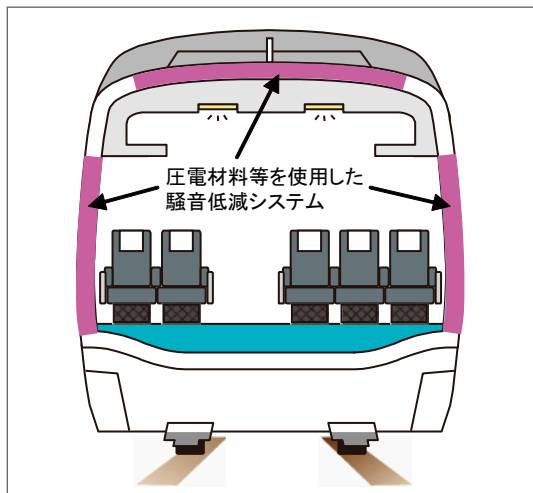


図2 騒音低減システムの適用法

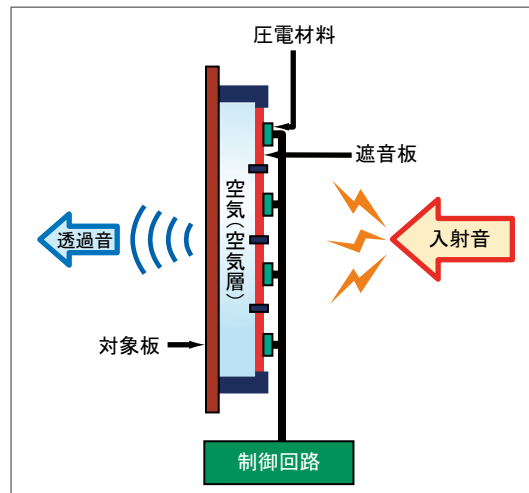


図3 騒音低減システム断面図

圧電効果により金属板が振動し、音が発生します。また、この金属板を指で叩いて振動させて、電極に発生する電圧を観測すると、叩いたタイミングに合わせて電圧が変化します。次に、スピーカから音を発生させ、コーンに正対するように金属板を置くと、この時も電極の電圧が変化します。これらのことから、圧電材料を利用することで音のエネルギーを電気エネルギーに変換できることがわかります。この現象は音響エネルギーが機械エネルギーになり、さらに圧電材料の特性によって電気エネルギーに変わっていることになります。音もそのままでは扱いにくいですが、電気エネルギーになれば、さまざまな制御手法を使用することができます。そこで、この姿を変えた電気エネルギーを利用して、制御することで騒音を低減する、新しい能動騒音制御システムを開発しました。

### 鉄道車両に能動騒音制御を適用する

能動騒音制御は「アクティブノイズコントロール」とも言われ、ある音に別の音や力を加えて制御する技術、とすることができます。専門書には「逆位相の音を出してもとの音をキャンセル消音する技術」と定義されています。能動騒音制御で最も身近にあるのはノイズキャンセリングヘッドホンです。周りから入ってくる騒音に対し、ヘッドホン内で逆位相の制御音を加えて、耳元で騒音を相殺します。その結果、うるさい中で静かな状態を作ったり、聞きたい音だけを抽出して聞いたりすることができます。能動騒音制御の基本特許は1936年に取得され、1970年代以降に電子技術とデジタル技術の進歩に伴い研究開発が進んでいます。一時は、うるさい音が全て小さくなる、という夢のようなイメージが先行しましたが、実用化までには至らず、

工場のダクト騒音など一部に留まっているのが実状です。

最近になり、能動騒音制御システムが搭載された自動車や航空機が登場しています。しかし、鉄道車両では過去に試験を実施したのみで、実用化に至っていません。その理由として、例えば新幹線電車の車内は約 $20 \times 3.4 \times 2.2$ mと自動車に比べ大きな空間を対象としなければならないことや、走行速度や走行区間により騒音や振動の状態が常に変化するなど、能動騒音制御には困難な条件にあることなどがあげられます。

能動騒音制御には大きく分けて2つの手法があります。一つは、対象空間にスピーカから制御音を発生させる手法です。もう一つは対象空間に侵入する騒音を、その境界面で制御する手法で、例えば、新幹線車両などでは内装板の透過音を低減することや、床からの放射音を抑制することなどが例にあげられます。鉄道車両に適した手法を考える場合、第一の手法では、客室空間が大きいため、一部の範囲では騒音が低減するものの、逆に騒音が大きくなる範囲も現れます。それに対し、第二の手法では、内装板を透過して車内に侵入する音響エネルギーを低減するため、客室全体の音響エネルギーが小さくなることが期待できます。よって、鉄道車両には第二の手法が適していると言えます。図2に、内装透過音を低減する騒音低減システムの適用イメージを示します。ただし、前述の通り、内装板の振動状態は走行中常に変化します。この振動状態の変化の影響を受けない手法が必要となります。

### 内装透過音を低減する新たな騒音低減システムの開発

内装透過音を低減するにあたり、圧電材料を使用した騒音低減システムを新たに開発しました。図3に概要図を、

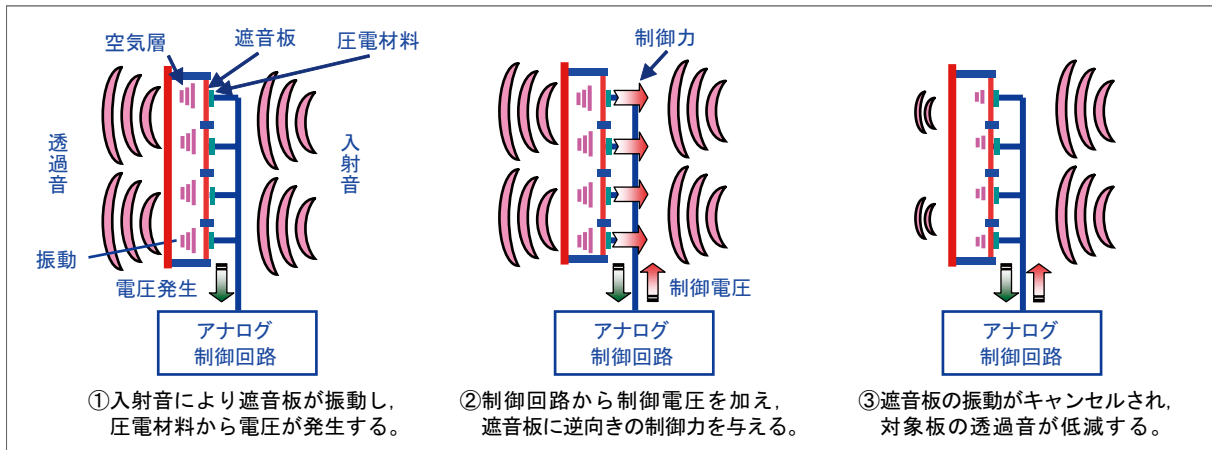


図4 制御原理

図4に制御原理を示します。本騒音低減システムは、圧電材料を貼付した小型平板（以下「遮音板」）を平面状に配列したパネル（以下「騒音低減パネル」）と制御回路から構成されます。入射音が騒音低減パネルに印加されると、遮音板が振動し、同時に圧電材料から電圧が発生します。圧電材料は、電気的にコンデンサーのような特性を持っているため、制御回路としてインダクタンス回路を接続すると、圧電材料の静電容量との間で共振回路が構成され、共振周波数を中心に逆位相の制御電圧を得ることができます。その結果、遮音板に逆位相の振動が発生するため、両者が相殺し合うことで遮音板の振動が抑制され、透過音が低減します。この騒音低減システムを内装板と構体間の間に取り付けることで、透過音の低減を図ります。

内装板のような板を透過する音を小さくするためには、通常板の振動を小さくしようとします。しかし、板の振動をやみくもに小さくしても、透過音は小さくなるとは限りません。逆に透過音が大きくなる場合もあります。なぜなら、板の振動の「形状」が透過音に大きく影響しているためです。もし、この「形状」を保ったまま板全体の振動を小さくすることができれば、確実に透過音は低減できると言えます。そこで、これを実現するために、内装板と騒音低減パネルの間に空気層を設け、独立した遮音層を構成するという手法を考案しました。こうすると、騒音低減システムにより空気層内の音響エネルギーが低減するため、内装板に入射する音響エネルギーが小さくなります。内装板への入射音が低減すれば、内装板の振動の「形状」がほとんど変わらないまま小さくなるので、透過音を低減することができます。

図5に定置試験における制御による騒音低減効果を示します。これは、1000×850mmの内装板代わりのアルミ板に780×850mmの騒音低減パネルを取り付けた時の、単

一周波数の音（純音）における透過音の低減量を示したものです。この時は、アルミ板の振動や透過音の状態などを同定することなく、測定データでは300Hzで約30dB、250Hz、350Hzで17～18dBの騒音低減ができ、それぞれ実際の聴感上も騒音低減することがはっきりわかりました。

ここで、このような板の透過音について、前述の「質量則」に基づいて同等の騒音低減効果を得るためにはどれくらいの質量増加が必要になるかを計算しました。図6の通り、例えば透過音をさらに10dB低減するためには、厚さ1.0mm

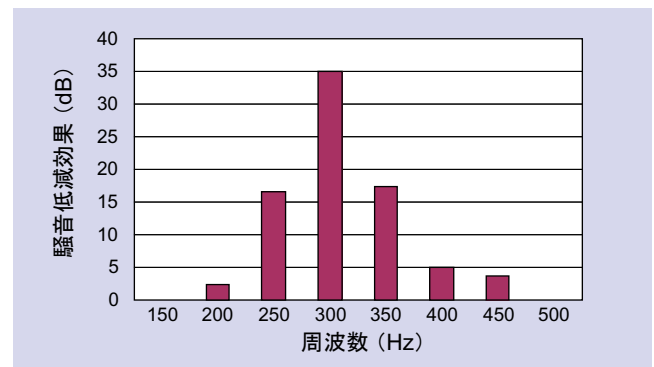


図5 騒音低減効果（純音）

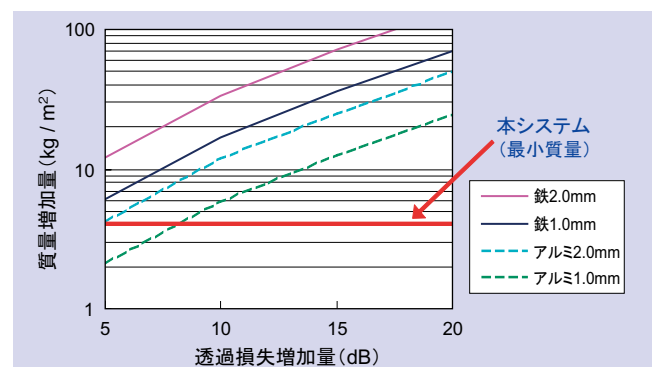


図6 質量則と騒音低減システムの質量比較

のアルミ板がある場合は約6kg、厚さ1.0mmの鉄板がある場合は約15kgそれぞれ増加する必要があります。これは周波数に関わらず一定となります。それに対し、本システムは、1m<sup>2</sup>当たり4kg前後であるため、質量則による対策と比較すると、軽いことがわかります。しかも、電気的な特性を利用して透過音を小さくするため、騒音低減効果の大小とシステムの質量は特に関係ありません。よって、大きな騒音低減効果が得られるに連れ、より軽量なシステムで透過音を低減できることになります。

### 現車試験における騒音低減試験結果

新幹線車両のデッキ部に騒音低減システムを適用し、走行時の騒音低減効果を検証しました。デッキ部の騒音は、特にトンネルに入ると隣接車両の連結面側にある外妻壁から騒音が侵入することがわかっています。そこで、騒音低減パネルを左右の外妻壁に4枚取り付けました。仮設状況を図7に示します。等速走行時のトンネル区間におけるデッキ中央の制御ありと制御なしの騒音レベルを比較したところ、図8に示す通り、240Hzの制御周波数を中心に、180～300Hzにおいて騒音が低減し、約220Hzでは約4dB小さくなりました。

このデッキ部での試験の他に、パンタグラフ部下の騒音低減のため、天井パネルの背面に騒音低減パネルを設置し、天井部を透過する騒音を低減する試験も実施し、騒音低減効果を確認しています。

このように走行中の鉄道車両において、対象とする車内騒音を低減できたことから、本騒音低減システムの有効性を実証できました。

### おわりに

鉄道の乗客で、車内騒音のエネルギーで怪我をしたり、モノが壊れたという人はいないでしょう。なぜなら、もともと音のエネルギーは小さいからです。この小さいエネルギーである騒音を人間の耳は捉えることができ、乗車時の印象が大きく変わります。

エネルギーが小さいため、適切に扱えば簡単にコントロールできるのですが、扱い方を間違えると全く言うことを聞いてもらえません。ちょっとしたシステムを取り付けて、車内全体の騒音を低減したい、という要望をよく聞きますが、相手はなかなかの強敵です。鉄道車両に適用できるシステムを開発するには、鉄道車両の条件と音の特性を



図7 デッキ部騒音低減の様子

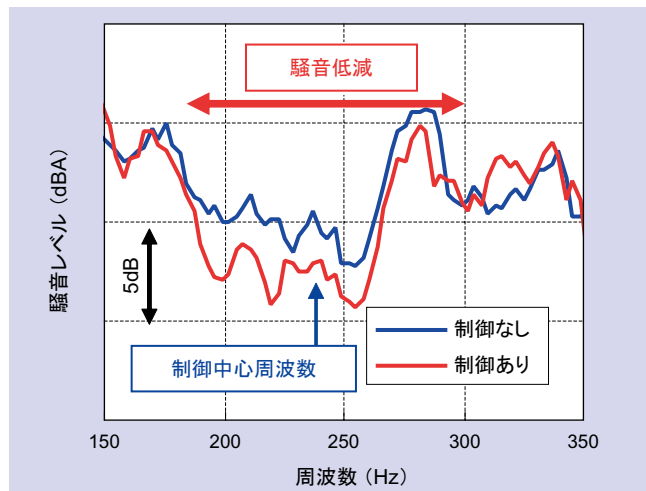


図8 デッキ部騒音低減試験結果

十分に理解した上で、現実的な手法を検討することが重要です。最終的には、これまでに施されている遮音材や吸音材などによる対策をベースに、新たに騒音低減システムを適切な範囲に適用することが最善の対策となるでしょう。

今回の圧電材料を用いた騒音低減システムは、鉄道車両の走行状態においても騒音低減効果が得られることが確認できました。鉄道車両に適用されるためにはいくつか課題がありますが、これからも実用化に向け開発を進めていく予定です。RRR