

S1-1-3

モジュール型騒音低減システムの特性改善

○山 本 克 也 田 川 直 人 ((財) 鉄道総合技術研究所)

Characteristic improvement of module type noise reduction system

Katsuya Yamamoto, Member, Naoto Tagawa, (Railway Technical Research Institute)

In the development for a noise reduction system adaptable to passenger cabins, transmitted noise is not sufficiently decreased by a method of ANC (Active Noise Control) system consisting of a module type merely attached directly on target panels depending on the condition of the target panels.

We verified that the causes were due to the propagation of vibration across the target panels between the modules, and a change in a vibration mode for the target panels. As a countermeasure, we fixed a panel on each module, in addition, provided an air layer between the target panels and modules; as a result, we verified that the effect of ANC system reflected upon the transmission noise.

キーワード：車内騒音、アクティブ消音システム

Keyword: active noise control

1. はじめに

鉄道の高速化に伴い、乗り心地や沿線環境の観点から車両内外の騒音の静音化が求められており、現在、これらに関係した研究開発が行なわれている。

車内音に関し、モジュール型騒音低減システムを内装板に取り付け、車外からの透過音をアクティブ制御して低減させる方法を開発していたが、内装板の条件によって透過音が低減しないことがわかった。

そこで、本報告ではモジュール型騒音低減システムにおいて発生し得る問題点を明らかにし、改善方法の検討と効果の検証を行なった。

2. モジュール型騒音低減システム

本論文におけるモジュール型騒音低減システム（以下ANCシステムという）とは、図1に示すように、同一性能をもつモジュールタイプの小型騒音低減システム（以下、モジュールと言う）を内装板等の制御対象板に複数取り付け、モジュールに印加される騒音をアクティブ制御（以下、ANC制御と言う）により消音するシステムを想定する。

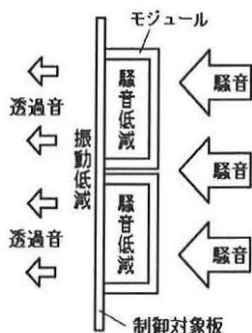


図1 モジュール型騒音低減システム

一例として以前開発した圧電スピーカを用いたANCシステムを図2に示す。このシステムは、圧電スピーカ付きモジュール枠、マイク、ANC制御回路で構成され、制御対象板に取り付ける。圧電スピーカから逆位相の音を出すことによって、モジュール内の騒音を低減し、制御対象板の振動を抑制することにより、透過音を小さくする。

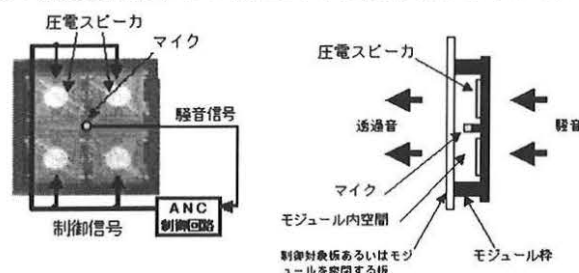


図2 ANCシステムの一例

3. ANCシステムの特性検証方法

ANCシステムの特性を検証するに当たり、図3(a)に示すモジュール取り付け可能な試験パネルを製作し、定置試験によってANC制御効果を検証した。図3(b)はモジュールを制御対象板に直接取り付けた場合（以下、直付け型モジュール）の断面図である。

(1) 試験パネル構成

制御対象板は、アルミ板 1100mm×847mm の大きさと、縦5列横7行計35個のモジュールを裏面に取り付け付けた。

(2) 評価方法

図3(b)の通り、制御対象板表面上に振動加速度ピックアップ、制御対象板から500mm離れた位置に測定用騒音計マイクを設置した。モジュール側に設置したスピーカから騒音を発生し、試験パネル全体を音響加振した。制御対象

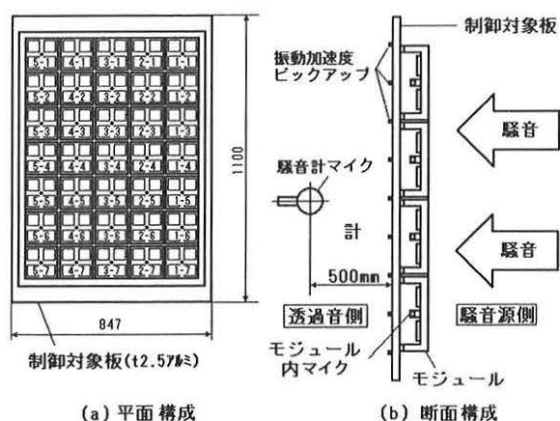


図3 試験パネル概要図

板の振動加速度及び制御対象板の透過音を測定し、それぞれANC制御なし時とあり時の測定値の差で評価した。

4. 直付け型モジュールの試験結果

以前行った試験において、0.5mm厚の鉄板を制御対象板とし、モジュールを直接取り付け、ANC制御を行なった場合、透過音を200～400Hzの帯域で最大5dB低減できることを確認した。

そこで、制御対象板を2.5mm厚アルミ板(0.5mmの鉄板に対し曲げ剛性は約40倍)に変更し、上述の鉄板時と同様モジュールを直付けして制御特性を検証した。

モジュール内騒音と制御対象板振動加速度を図4に、制御対象板からの透過音制御効果を図5に示す。縦軸は制御効果量(dB)であり、「0～」方向はANC制御を行なったことにより低減し、「0～」方向は増加したことを示す。

図4より、モジュール内騒音はANC制御の効果により180～380Hzにおいて最大15dB低減されている。これに対し、制御対象板の振動は同帯域で最大12dB低減しているものの、120～280Hzで逆に最大5dBの振動増が見られた。また、0～120Hz付近では、モジュール内騒音が最大10dB増音しているにもかかわらず、制御対象板の振動の増減は見られない。600Hz以上の帯域では、増加傾向であるものの、モジュール内騒音と制御対象板振動の増減傾向が一致している。

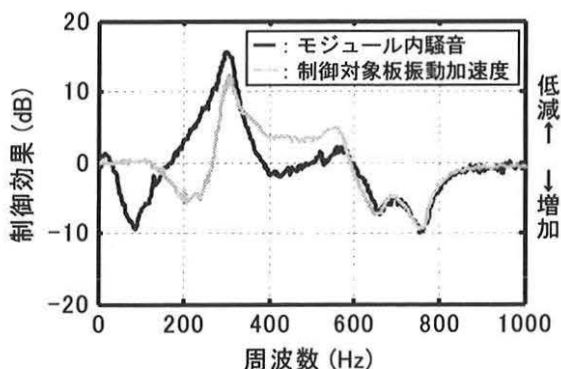


図4 直付けモジュールの制御効果

図5の制御対象板の透過音は0～600Hz付近まではほとんど0dBに近く、ほとんどANC制御効果が現れていない。600～800Hz付近の高周波域においては、増音傾向が見られ、モジュール内騒音および制御対象板制御効果が透過音に反映されている。

以上より、モジュールを制御対象板に直接取り付ける方法では、制御対象板の条件によっては、低周波域においてモジュール内の騒音低減効果が制御対象板からの透過音低減に現れないことがわかった。

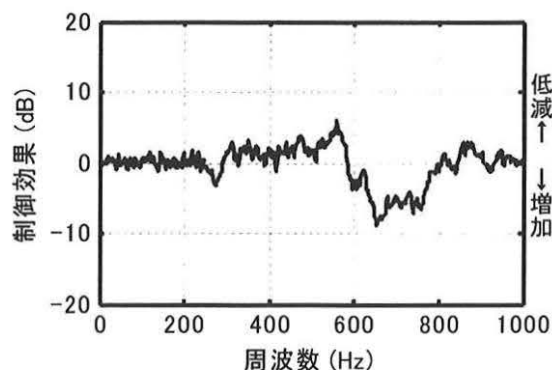


図5 制御対象板の透過音制御効果

5. 原因の推定

前章で述べた制御対象板透過音にANC制御効果が現れない現象の原因として、制御対象板の剛性が増したことに伴ない、制御対象板を介したモジュール間の振動伝搬と、モジュール取り付けによる制御対象板の振動状態の変化が影響を及ぼしたと推定し、以下の検証を行った。

5.1 制御対象板を介した振動伝搬の影響

隣接するモジュールからの制御対象板振動影響を評価するため、制御対象板中心付近にあるモジュールのモジュール内騒音、制御対象板振動加速度の制御効果を測定した。(図6)。

モジュール内騒音が200～400Hzにおいて低減しているのに対し、制御対象板の振動加速度は逆に250～300Hz、350～450Hz、500～800Hzに増加する帯域がある。そこで、音響加振している状態で隣接モジュール間の制御対象板振動の伝達特性を測定し、両制御効果と重ねた。制御対象板振動の伝達特性は隣接モジュールからの振動がどのくらい伝搬してくるかを示すものであり、0dBの場合は伝搬がなく、伝達特性の数値が高いと増幅されて伝搬してくるといえる。その結果、制御対象板振動の伝達特性の高い周波数では、制御対象板の振動低減効果が小さくなる傾向が見られた。これは制御対象板の振動が隣接モジュールからの伝搬してくる振動で増幅されるため、モジュール内騒音の制御効果が低減したものと考えられる。

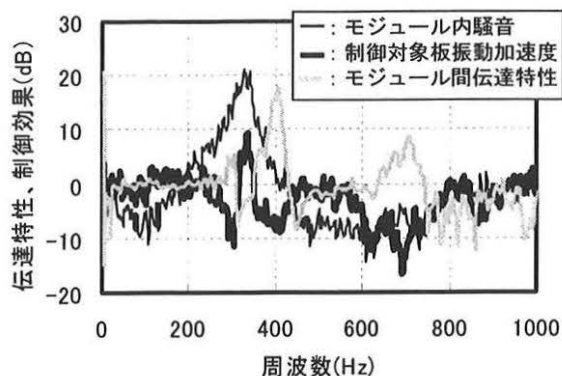


図6 アルミ (t2.5mm) 制御対象板における制御効果

5.2 モジュール取り付けによる振動モードの変化

制御対象板の透過音（あるいは放射音）は、板の振動モードとの関係が大きく、いずれの振動モードにおいても、振動の腹である位置から音となる空気疎密波が発生している。一般に、1次振動モードの周波数では板中心付近から音が放射され、高次振動モードでは各腹からそれぞれ音が発生している。

このような状況を踏まえ、モジュール有無による制御対象板の振動状態を確認した。

図7はモジュールの付いていない制御対象板単板の200Hzにおける振動状態である。全体が複雑で細かいピッチで振動していることがわかる。

これに対し、図8(a)は、制御対象板にモジュールを直付けした時の200Hzの振動状態である。図8(b)の通り、モジュールと一体で全体が大きく変形する、1～2次の低次モードの振動に変化した。これは、モジュールを制御対象板へ直接取り付けることにより、制御対象板の剛性が向上したためと考えられる。制御対象板の透過音は、板全体から音が放射されることがわかった。

モジュールを制御対象板に直接取り付ける場合、各モジュールはモジュール枠毎の狭い範囲しか透過音を低減することはできないため、制御対象板全体が振動するような低次の振動状態では、モジュール一体で振動することとなり、透過音を抑制することは不可能である。

6. 改善方法についての検討

制御対象板を介したモジュール間の振動伝播、モジュール取り付けによる制御対象板の振動モードの変化という2つの問題点を改善するため以下の検討を行なった。

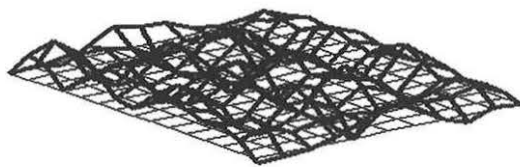
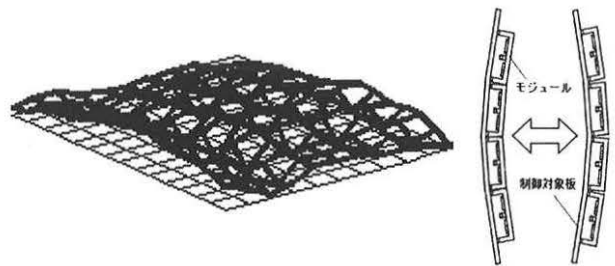


図7 制御対象板単板の振動状態 (200Hz)



(a) 振動状態 (200Hz)

(b) 1次モード振動

図8 直付け型モジュール付き制御対象板 振動状態

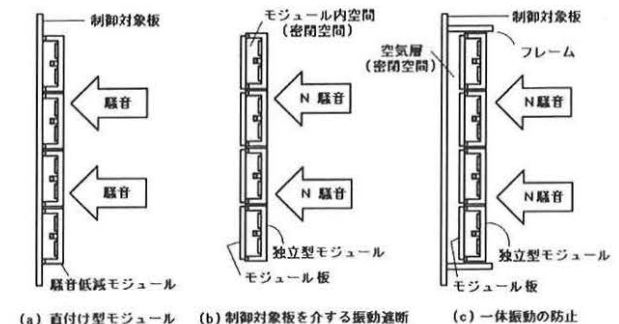
6.1 モジュール板による振動伝搬の防止

制御対象板を介した振動伝搬を遮断するために、図9(b)に示すように、モジュール毎に独立した板（以下、モジュール板という）を取り付けることとした（以下、モジュール板付きモジュールを独立型モジュールと言う）。モジュール間を渡る板がなくなるため、モジュール間の振動伝搬の影響を受けることをなくすることができる。

図10に独立型モジュールにおけるモジュール内騒音とモジュール板振動加速度の制御効果を示す。両者は200Hz以上においてはほぼ一致した傾向を示し、400Hz付近で約11dB低減された。なお、200Hz以下はモジュール枠を介した振動伝播影響が若干残り、完全に一致はしなかった。しかし、全体的にはモジュール内騒音制御効果がモジュール板振動加速度の低減効果に反映されていることから、制御対象板を介したモジュール間の振動伝搬の影響がなくなったと言える。

6.2 低周波域における制御効果の改善

制御対象板の透過音を制御する場合、振動モードに応じて振動の腹の位置の振動速度を低減する方法がある。この場合、1次の振動モードでは一般に板中心部を、高次の振動モードでは複数の腹を制御するよう制御点位置を変える必要がある。広帯域の透過音を制御するに依り、各振動モードに応じて制御しなければならず、複雑な制御システムとなることが予想される。



(a) 直付け型モジュール

(b) 制御対象板を介する振動遮断

(c) 一体振動の防止

図9 ANCモジュールの取り付け改善方法

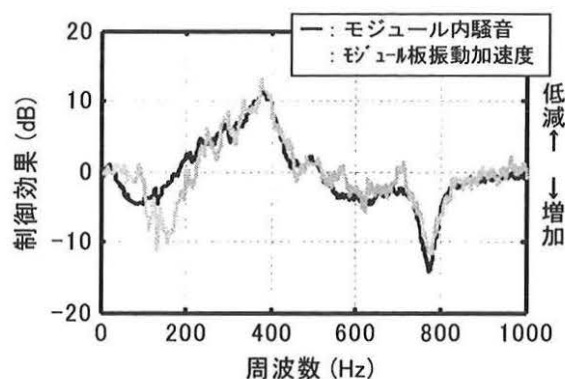


図10 空気層付独立型モジュールの制御効果

一方、制御対象板の透過音は、入射する音響エネルギーの大小によって変化する。つまり、制御対象板に印加される入射音を制御できれば、透過音も制御できるといえ、いかなる振動モードにおいても共通である。

そこで、モジュールと制御対象板の間に、図9(c)に示すような空気層を設けることとした。その結果、入射音はモジュール群によりANC制御され、空気層内の騒音となる。空気層内の騒音は制御対象板への入射音であるから、制御対象板からの透過音を制御できるようになる。

6.3. 空気層付独立型モジュールによる試験結果

空気層付独立型モジュールでの空気層内騒音と制御対象板振動加速度の制御効果を図11に示す。両波形はほぼ一致しており、空気層内騒音により制御対象板が加振されていることがわかる。

また、制御対象板透過音の制御効果は図12であり、200～400Hz 範囲で最大8 dB 低減できるようになった。この制御効果の全体的な傾向は図10のモジュール板振動の制御効果とほぼ対応しており、モジュール内騒音低減効果が制御対象板透過音の制御効果に有効に反映されるようになったと言える。

ちなみに、制御対象板の振動状態は、図13の通り、図7の単板の振動状態と同様高次の振動モードである。

以上より、制御振動板とモジュール間に空気層を設けることで、制御対象板の振動状態がいかなる場合においても、ANC制御効果を透過音に反映できるようになった。

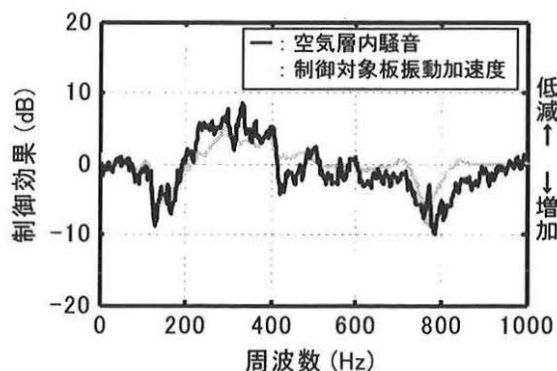


図11 空気層付独立型モジュール 制御効果

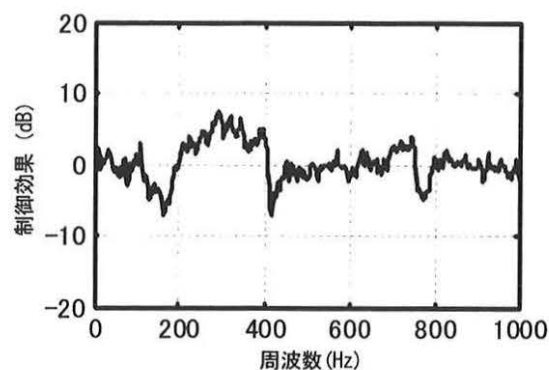


図12 制御対象板から放出される騒音低減効果

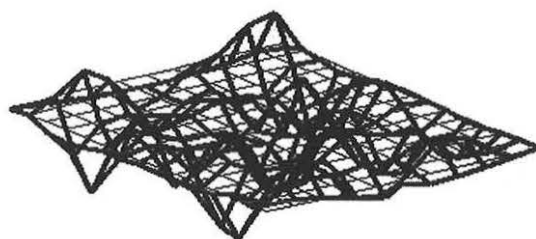


図13 空気層付制御対象板の振動モード(200Hz)

7. まとめ

制御対象板とモジュールとの構成を直付け型から空気層付独立型へ変更することにより、ANCシステムによる透過音の制御特性を向上することができた。この方法は、振動状態に応じて制御することなく、空気層を設けるという簡便な方法でモジュール内騒音低減効果を有効に透過音低減に反映させることができるものであり、モジュール型騒音低減システム全般に通用可能と考えられる。

8. おわりに

今後は空気層厚さの影響等を明らかにし、ANCの制御効果向上と合わせ、鉄道車両への適用ならびに車内騒音の低減に取り組む予定である。

最後に本研究を進めるにあたり、多大な御協力を頂いた関係各位に対し厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 山本克也, 田川直人, 梅原康宏, 角張勲, 水野 耕, 寺井賢一: 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: J-RAIL2003, pp. 365～368, 2003. 12
- 2) 山本克也, 田川直人, 水野耕: 車内騒音低減のためのアクティブノイズコントロールシステム: 鉄道総研報告第19巻第6号, pp. 45～48, 2005. 6