

## 高架橋防音壁の吸音性能向上と車両下部音を対象とした騒音低減評価

[機] 佐藤 大悟 [機] 豊原 匡志 (鉄道総研)

## Noise Reduction Effect in Improving of Sound Absorption Performance of Noise Barrier

○Daigo Sato, Tadashi Toyohara, (Railway Technical Research Institute)

Various types of sound absorbing panels have been installed to improve the noise reduction performance of noise barriers. The noise reduction effect of sound absorbing panels depends on the sound absorbing performance of the sound absorbing material. It is expected to improve the accuracy of noise reduction evaluation by directly reflecting acoustic properties of the materials in the acoustic analysis. In this study, the expression of the characteristic impedance and the propagation constant by an experimental approximation with the flow resistance as a parameter is investigated. In addition, the effect of the improvement of sound absorption performance on the noise reduction effect is evaluated by using FEM analysis.

キーワード：防音壁，吸音材，騒音低減，音響解析，有限要素法

Key Words：Noise barrier, sound absorbing material, noise reduction, acoustic analysis, Finite element method

## 1. はじめに

鉄道高架橋において、防音壁の軌道側壁面への吸音板の設置は、遮音板による嵩上げ対策とともに主要な騒音対策手法となっている。吸音板で使用する吸音材には、主に、グラスウールやポリエステル素材の繊維系材料が使用され、その吸音性能は吸音材の厚さのほか、吸音材を構成する素材の繊維径や嵩密度等によって変化する。

空気や材料内を始めとした各種媒質中での音の伝搬状況は、媒質固有の特性インピーダンス ( $\text{Pa}\cdot\text{s/m}$ ) と伝搬定数 ( $\text{m}^{-1}$ ) によって規定される。そのため、音響数値シミュレーションで各値の周波数特性を直接反映することができれば、吸音材表面での反射、吸音材中での減衰、吸音材背面からの透過などの材料による音への効果をより実際に近い状況で模擬した評価が可能となる。そこで、本研究では特性インピーダンスと伝搬定数を流れ抵抗 ( $\text{N}\cdot\text{s/m}^4$ ) をパラメータとした実験近似式によって表現することを検討した。また、有限要素法による音響数値シミュレーションを活用して、吸音性能の向上が車両下部音を対象とした騒音低減効果へ与える影響について評価を行った。以下、詳細を示す。

## 2. 吸音材のモデル化と吸音性能の向上

## 2.1 実験近似式による吸音材のモデル化

## (1) 実験近似式

過去の知見によれば、グラスウール等の繊維系吸音材(以下、単に吸音材と称す)の特性インピーダンス $Z_c$ と伝搬定

数 $\gamma$ は、式(1)、式(2)で表される<sup>1)2)</sup>。

$$Z_c/\rho_0 c_0 = R + jX \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $j = \sqrt{-1}$ 、 $\rho_0$ は空気の密度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $c_0$ は空気中での音速 ( $\text{m/s}$ ) であり、各式の右辺について

$$R(f) = 1 + a \left( \frac{f}{\sigma} \right)^b \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$X(f) = -c \left( \frac{f}{\sigma} \right)^d \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\alpha(f) = \frac{\omega}{c_0} p \left( \frac{f}{\sigma} \right)^q \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\beta(f) = \frac{\omega}{c_0} \left\{ 1 + r \left( \frac{f}{\sigma} \right)^s \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

である。ここで、 $\omega$ は各振動数 ( $\text{rad/s}$ )、 $\sigma$ は流れ抵抗 ( $\text{N}\cdot\text{s/m}^4$ )、 $a \sim d$ 、 $p \sim s$ は定数である。本研究では次章で示す音響数値シミュレーションで式(7)、式(8)で示す複素密度 $\rho$ と複素音速 $c$ により、特性インピーダンスと伝搬定数による吸音材の効果を扱った。

$$\begin{aligned} \rho &= \rho' + j\rho'' \quad (\rho', \rho'' \text{は実数}) \\ &= \frac{\rho_0 c_0}{c} (R + jX) \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c &= c' + jc'' \quad (c', c'' \text{は実数}) \\ &= \frac{\omega}{\alpha^2 + \beta^2} (\beta + j\alpha) \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

## (2) グラスウールのモデル化

代表的な吸音材であるグラスウールを対象に、前項で示した実験近似式の妥当性を検証した。まず、音響管を用いた2マイクロホン法 (ISO-10534-2) により、一定の周波数間隔で特性インピーダンス $Z_c$ と伝搬定数 $\gamma$ を測定した。続いて、静的流れ抵抗測定装置 (Mecanum 社製 Sigma-X) を用いてグラスウールの流れ抵抗 $\sigma$ を測定 ( $6400 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^4$ ) した。得られた各値の実数部と虚数部をもとに、式(3)～式(6)より $a\sim d$ 、 $p\sim s$ を決定し、最終的に周波数 $f$  (Hz) の関数として式(1)、式(2)を求めた。最後に、式(9)より垂直入射吸音率 $\alpha_0$ を求めた。

$$\alpha_0 = 1 - |r_0|^2 \quad \dots\dots (9)$$

ここで、 $r_0$ は材料表面の音圧反射係数で

$$r_0 = \frac{Z_1 - \rho_0 c_0}{Z_1 + \rho_0 c_0} \quad \dots\dots (10)$$

と表され、 $Z_1$ は材料表面のインピーダンスで

$$Z_1 = Z_c \frac{Z_c \sinh(\gamma l) + Z_2 \cosh(\gamma l)}{Z_c \cosh(\gamma l) + Z_2 \sinh(\gamma l)} \quad \dots\dots (11)$$

と表される。ただし、 $Z_2$ は材料背面のインピーダンス、 $l$ は材料厚さである。

表1に、実験により求めた $a\sim d$ 、 $p\sim s$ の各値を、図1に、式(9)で求めた垂直入射吸音率 $\alpha_0$ の実験値との比較結果を示す。この結果、両者は良く一致し、前項で示した実験近似式に基づくモデル化は妥当であると考えられた。

表1  $a\sim d$ 、 $p\sim s$ の値

|     |       |     |       |
|-----|-------|-----|-------|
| $a$ | 0.073 | $b$ | -0.74 |
| $c$ | 0.21  | $d$ | -0.50 |
| $p$ | 0.22  | $q$ | -0.59 |
| $r$ | 0.078 | $s$ | -0.88 |

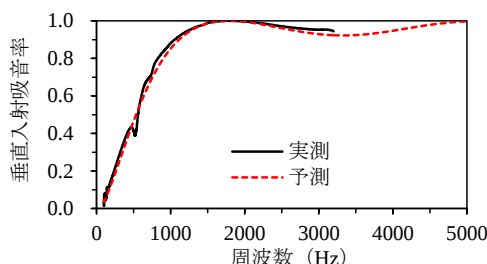


図1 グラスウールの垂直入射吸音率  
(厚さ 50mm, 背後空気層無し)

## 2.2 吸音材の吸音性能向上とそのモデル化

近年、吸音材では従来のグラスウールの代替としてポリエステル素材の吸音材が採用されている。その吸音性能は内部繊維の繊維径や嵩密度、繊維自体の固さ等に応じて様々である。鉄道においては、吸音材の設置が列車走行音（特に、車両下部音）の防音壁と車体側面間での多重反射音の抑制を目的としており<sup>3)</sup>、車両下部音の周波数特性に適した吸音性能を実現することが重要である。

そこで、本研究では、図1のグラスウールと比較して低

周波側および 1500Hz～2000Hz 付近のピーク以降の周波数域での吸音性能を向上し、図2に示すような吸音率を目標性能とした吸音材（改良型吸音材）の実用化を目指している。本稿では、その実用化後の騒音低減効果へ与える影響について、次章で示す音響数値シミュレーションを活用した評価を行う。改良型吸音材を音響数値シミュレーションへ反映するあたり、改良型吸音材を2.1(1)項で示した方法でモデル化した。表2に、改良型吸音材の式(3)～式(6)の各係数を示す。なお、この時、式(3)～式(6)での流れ抵抗 $\sigma$ は  $7200 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^4$  であり、図2の垂直入射吸音率（点線）は式(9)より算出したものである。

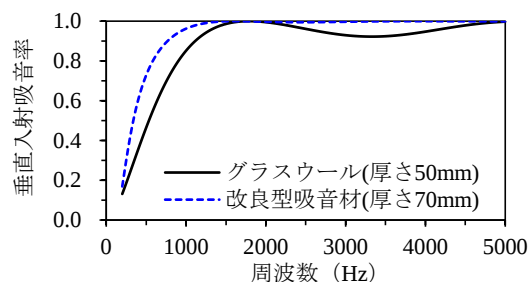


図2 改良型吸音材の垂直入射吸音率(背後空気層無し)

表2 改良型吸音材のモデル化 ( $a\sim d$ 、 $p\sim s$ の値)

|     |       |     |       |
|-----|-------|-----|-------|
| $a$ | 0.007 | $b$ | -0.34 |
| $c$ | 0.031 | $d$ | -0.97 |
| $p$ | 0.35  | $q$ | -0.38 |
| $r$ | 0.1   | $s$ | -0.01 |

## 3. 吸音性能の向上による騒音低減効果

### 3.1 概要

吸音材の性能向上が騒音低減効果へ与える影響について、防音壁の嵩上げ高さとの関係性に着目して評価を行った。本研究では、有限要素法による音響数値シミュレーション (アドバンスソフト社 Advance/FrontNoise) を活用し、吸音材の音への効果を2.1節で示した手法によって反映した。また、嵩上げ部については、厚さ 8mm の透明ポリカーボネート板での嵩上げを想定し、同材料の音響透過損失に基づき嵩上げ部の遮音性能を反映した<sup>4)</sup>。

### 3.2 解析条件

#### (1) 解析モデル

図3に、解析モデルを示す。高架橋外での音圧レベル分布を評価することを目的とし、列車 (新幹線) が走行する高架橋の片側半分を解析対象とした。解析では無限要素を導入し<sup>5)</sup>、車体や防音壁を含む高架橋周囲の複雑な音の伝搬空間を有限要素領域とする一方、高架橋外については無限要素として有限要素領域の周囲の境界 (透過面となる仮想境界) からの単純な放射音領域とした。

コンクリート製防音壁 (以下、既設防音壁) の高さはレールレベル (R.L.) から 2m とし、軌道中心から防音壁内側までの距離は 3.5m とした。車体および既設防音壁を含めた高架橋は全て完全反射面とした。高架橋外の領域は軌道

中心から 12.5m～30m、高さは R.L.±12m とし、地面の反射の影響は無視した。音源は車両下部音を対象とし、音源位置は左右のレール頭頂部（2箇所）とした。

（2）解析条件

解析条件は、表 3 に示すように既設防音壁（条件 1）に対する嵩上げ対策および吸音対策およびその併用とした。図 4 にそれぞれ嵩上げ対策（条件 2, 3）と吸音対策（条件 4, 5）の詳細を示す。条件 1 は、既設防音壁のみで未対策を想定した条件である。条件 2 と条件 3 は条件 1 に対して厚さ 8mm のポリカーボネート板を用いて嵩上げ高さをそれぞれ 1m、1.5m とした条件である。条件 4 は、条件 1 に対して厚さ 50mm のグラスウールを背後空気層 10mm で設置した条件、条件 5 は厚さ 70mm の改良型吸音材を背後空気層無しで設置した条件である。

（3）音源特性

図 5 に、音源の周波数特性を示す。解析は 228Hz～4387Hz の 1/15 オクターブバンド中心周波数を対象に、音源位置ごとに 65 通りで実施し、全 130 通りの計算結果を合成し、各条件での軌道中心から 25m の距離における高さ方向の音圧レベル分布を求めた。

なお、本評価は列車走行音の周波数特性を有する空気伝搬音に対して、周波数特性を考慮した各対策材の性能差を

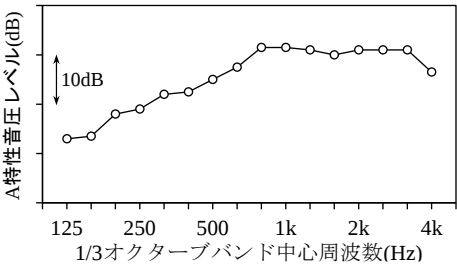


図 5 音源の周波数特性

相対的に評価したものであり、実際の騒音低減効果とは異なることに注意を要する。

3.3 解析結果

図 6 に、解析結果として条件 1（未対策）に対する条件 2～5 および条件 2, 3 と条件 4, 5 の併用による騒音低減効果を示す。以下、各結果の詳細を述べる。

（1）嵩上げ対策の効果

嵩上げ対策における設置高さの影響について、図 6(a)に着目すると 1m の嵩上げ（条件 2）よりも 1.5m の嵩上げ（条件 3）の方が騒音低減効果は高い。また、両条件ともそれぞれ R.L.+5m よりも高い位置で低減効果が顕著に大きい。これは、嵩上げによって既設防音壁上端から高架橋外へ放射する音源からの直接音および車体側面からの反射音が直接遮蔽された効果と考えられた。一般的な高架橋において地上付近と想定される R.L.-9m～-6m での騒音低減効果は、条件 2 では 2.8dB～3.6dB、条件 3 では 3.6dB～4.7dB であった。

（2）吸音対策の効果

吸音板の設置効果について、図 6(b)に着目するとグラスウール（条件 3）よりも改良型吸音材（条件 4）の方が全体的に騒音低減効果は高く、両条件とも R.L.+5m よりも高い位置での低減効果大きい。これは、吸音効果によって防音壁からの反射音およびそれに伴う車体側面からの反射音が抑制されたためである<sup>3)</sup>。R.L.-9m～-6m での騒音低減効果は、条件 3 では 2.6dB～3.0dB、条件 4 では 3.3dB～4.1dB であり、吸音性能を向上させた条件 4 は、条件 3 に対して 0.7dB～1.1dB 高い効果が得られた。これは、吸音材の性能差が騒音低減量に反映され、2.2 節に示したように車両下部音の周波数特性に幅広く対応した吸音性能を実現することの重要性を示唆している。

（3）嵩上げ対策と吸音対策の併用

嵩上げ対策と吸音対策の併用効果について、図 6(c)および図 6(d)に着目すると騒音低減効果はそれぞれ 1m の嵩上げ（条件 2）、1.5m の嵩上げ（条件 3）に対して前項で示した吸音板の設置効果が上積みされたような傾向を示した。ただし、吸音板の設置効果は、R.L.-9m～-6m において、1m の嵩上げで条件 4、5 との組み合わせ時に各々 1.5dB～2.0dB、1.9dB～2.5dB であるのに対し、1.5m の嵩上げで各々 1.3dB～1.8dB、1.5dB～2.2dB であり、嵩上げ高さが高いほど吸音板の騒音低減効果への影響は小さくなった。また、条件 2, 3 に対しての条件 4 と 5 の差異も 0.4dB～0.5dB か

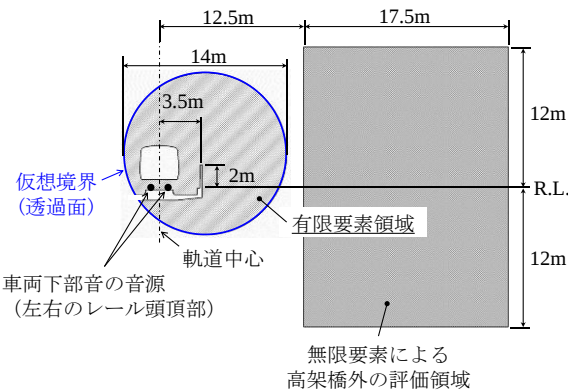
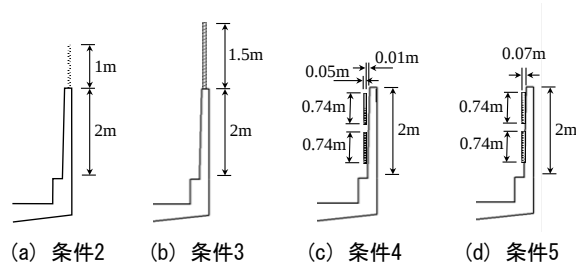


図 3 解析モデル

表 3 吸音対策および嵩上げ対策の概要

| 条件   | 種類    | 詳細                               |
|------|-------|----------------------------------|
| 条件 1 | 対策無し  | 既設防音壁のみ                          |
| 条件 2 | 嵩上げ対策 | ポリカーボネート板による 1m の嵩上げ             |
| 条件 3 |       | ポリカーボネート板による 1.5m の嵩上げ           |
| 条件 4 | 吸音対策  | 厚さ 50mm のグラスウールの設置<br>背後空気層 10mm |
| 条件 5 |       | 厚さ 70mm の改良型吸音材の設置<br>背後空気層無し    |



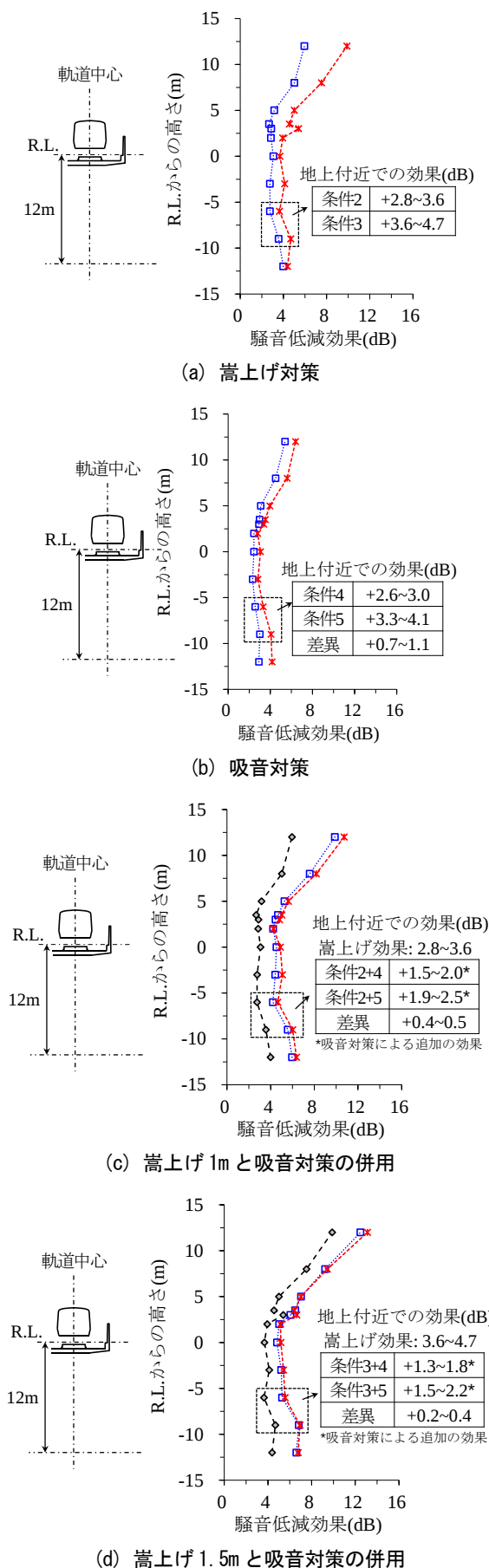


図6 解析結果 (軌道中心から 25m 離れ)

ら 0.2dB~0.4dB へと小さくなった。

この原因については、①高さ R.L.+2m の防音壁に対して吸音板の設置効果よりも嵩上げの効果が高いこと、②防音壁の全高さに対する吸音板の設置高さの影響が考えられた。①については、3.4 (1) 項で述べたように嵩上げによって高架橋外への音の放射を直接遮蔽される領域が増加し、嵩上げ高さが高いほど騒音低減への寄与が大きいことを示唆している。②については、吸音板の設置効果が吸音材の音響的性質のほかに音源、受音点、防音壁の位置関係に依存するためと考えられる<sup>6)</sup>。つまり、防音壁の嵩上げによって嵩上げ後の防音壁先端から音源がより下方に位置することで騒音低減効果が増加するのに対し<sup>7)</sup>、吸音板による反射音抑制効果の騒音低減への寄与が相対的に小さくなったためと考えられる。

以上より、吸音対策の効果は嵩上げ高さに依存する一方、嵩上げ高さが制限される場合には、吸音材の吸音性能を向上させることが重要であると判断された。

#### 4. まとめ

音響数値シミュレーションを活用し、吸音材の音への効果を特性インピーダンスと伝搬定数によって反映した評価手法を示した。吸音材の吸音性能は、列車走行音の周波数特性に幅広く対応させることが騒音低減効果に有効であり、嵩上げ対策が困難な状況ほどその効果が顕著なることを示した。現在、ポリエステル繊維材を用いて繊維構造や積層構造の適用による吸音性能の向上に取り組んでおり、今後、同吸音材を用いた騒音対策材の実用化を目指す予定である。

#### 参考文献

- 1) M.E.Delany and E.N.Bazley: Acoustical properties of fibrous absorbent materials, Applied Acoustics, Vol.3, Issue 2, pp.105-116, 1970.
- 2) Yasushi Miki: Acoustical properties of porous materials - Modifications of Delany-Bazley models-, Journal of the Acoustical Society of Japan(E), Vol.11, pp.19-24, 1990.
- 3) 村田香, 長倉清, 北川敏樹, 田中慎一郎: Y 型形状をベースにした新幹線用防音壁の遮蔽効果, 鉄道総研報告, Vo.20, No.1, pp.11-16, 2006.
- 4) 佐藤大悟, 尾本章: 防音壁の遮音性能の違いを考慮した騒音低減評価手法, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.879, 2019.
- 5) 松原聖, 尾川慎介: 音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise への無限要素の導入, アドバンスシミュレーション, Vol.23, pp.55-87, 2016.
- 6) 湯沢睦茂, 鈴木博司: エッジに平行な狭い領域を吸音処理した障壁の減音効果, 日本音響学会誌, Vol.41, No.4, pp.248-255, 1985.
- 7) 例えば, 子安勝ほか: 騒音・振動 (下), pp.85-86, コロナ社, 1982.