

# 数値シミュレーションによる 防音壁嵩上げ部からの透過音の影響評価

佐藤 大悟\* 豊原 匡志\*

Evaluation by Acoustic Analysis for Transmitted Sound from Additional Sound Insulating Panel  
Installed on Concrete Noise Barrier

Daigo SATO Tadashi TOYOHARA

In this study, the authors propose an acoustic analysis method to consider the sound insulation performance of noise barriers based on the sound transmission loss. A medium domain different from the air domain is set as a sound damping component, whose characteristics are represented by the complex wave number. This paper describes that the sound attenuation corresponding to the sound transmission loss of the noise barrier can appropriately be set in the plane wave propagating model. In addition, FEM analyses were conducted for railway viaducts by applying the proposed method. The distribution of sound pressure level indicates the differences caused by the sound insulation performance of the noise barrier.

キーワード：防音壁，遮音，音響透過損失，透過音，有限要素法，無限要素

## 1. はじめに

鉄道高架橋において、防音壁の設置は車両走行に伴って発生する騒音に対して主要な対策手法となっている。防音壁の騒音低減効果に関して、従来から防音壁形状や車体側面間との多重反射の影響等が評価されてきた<sup>1)2)</sup>。これらの評価では、縮尺模型実験や境界要素法等の数値シミュレーションが活用されているが、実際に使われる部材の違い等は考慮されず、防音壁はいずれも十分な遮音性能を有する剛壁として扱われる。

一方、騒音低減性能の向上を目的とした防音壁の嵩上げ対策では、厚さ90mm～160mmの既設コンクリート製防音壁に対して厚さが1/10以下の樹脂や鋼製の遮音板が用いられる場合がある。一般に、これらの嵩上げ用遮音板の遮音性能はコンクリート製防音壁よりも低く、こうした遮音板を設置した際の騒音低減効果を予測する場合、遮音性能をコンクリート製防音壁と同等として扱うと実際の効果よりも過大な評価となる可能性がある。そのため、防音壁を対象とした騒音低減評価において、防音壁の遮音性能の違いを考慮することは重要である。

そこで、本研究では防音壁の遮音性能の違いを考慮した有限要素法による音響数値シミュレーション（以下、音響解析）を実施するため、防音壁で使われる材料、あるいは防音壁自体の音響透過損失に基づいてエネルギーの減衰量を反映する手法について検討した<sup>3)</sup>。具体的には、空気とは異なる媒質部を解析空間中に設け、この媒質部に減衰効果を付与することを考えた。減衰効果は媒

質の複素波数によって音響解析へ適用することとし、複素波数は音響透過損失の値に基づき周波数ごとに決定した。また、鉄道高架橋防音壁で行われる厚さ8mmのポリカーボネート板を用いた嵩上げの事例を対象に、本手法を適用して嵩上げ部での音響透過損失を反映した音響解析を実施し、嵩上げ部からの透過音の影響について評価を行った。

## 2. 音響透過損失に基づく減衰効果の付与

### 2.1 媒質の複素波数と平面波の減衰

本研究では、音響解析において音の減衰を考慮するため、複素波数を音響透過損失に基づき以下のように決定した。

まず、図1に示すように平面波がx軸に沿って長さ $\Delta x$ の媒質中を伝搬することを考える。このとき、媒質による音の減衰について、入射側表面での音圧を $p_1$ 、透過側表面での音圧を $p_2$  ( $p_1 > p_2$ )、その減衰量を $TL'$  (dB) とすると式(1)の関係が成り立つ。

$$-TL' = 10 \log_{10} \frac{p_2^2}{p_1^2} \quad (1)$$

式(1)を速度ポテンシャル $\phi$ で表記すると、式(1)となる。

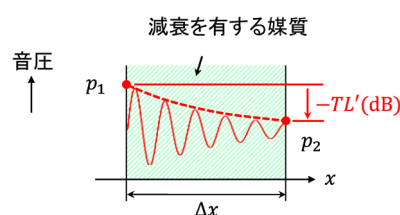


図1 平面波の減衰モデル

\* 材料技術研究部 防振材料研究室

$$-TL' = 10 \log_{10} \frac{\varphi_2^2}{\varphi_1^2} \quad (1)$$

内部減衰がある媒質中を伝搬する平面波について、速度ポテンシャル  $\varphi$  に関する Helmholtz 方程式は、複素波数を  $k_m$  とし式 (2) となる。

$$\nabla^2 \varphi + k_m^2 \varphi = 0 \quad (2)$$

(ただし、 $\nabla$  はナブラ演算子である)

式 (2) の一般解は、媒質中で反射波が無いと仮定すると、入射波振幅  $A_i$  を用いて式 (3) で表される。

$$\begin{aligned} \varphi &= A_i e^{-ik_m x} \\ &= A_i e^{-k'_m x} \cdot e^{-ik''_m x} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 $i = \sqrt{-1}$ 、  
 $k_m = k'_m - ik''_m$  ( $k'_m$  と  $k''_m$  は実数)

このとき、式 (3) 中の  $e^{-k'_m x}$  は距離による減衰を表す。式 (1) および式 (3) より、式 (4) が得られる。

$$\begin{aligned} -TL' &= 10 \log_{10} \left| e^{-ik_m \Delta x} \right|^2 \\ &= 10 \log_{10} \left| e^{-i(k'_m - ik''_m) \Delta x} \right|^2 \end{aligned} \quad (4)$$

式 (4) において、距離減衰のみの場合は  $k''_m = 0$  となり、式 (5) の関係が得られる。

$$k''_m = \frac{TL' / \Delta x}{20 \log_{10}(e)} \quad (5)$$

式 (5) より、媒質の複素波数 (虚数部) を決定すれば、入射波は長さ  $\Delta x$  の媒質中で  $TL'$  (dB) の減衰を示す。

## 2.2 反射波を考慮した場合の媒質の複素波数

前節では、媒質中で反射波が無いと仮定した場合における媒質の複素波数と音の減衰量の関係を示した。しかし、実際の解析では減衰効果を付与した媒質の周囲は空気であることが多く、このような場合には媒質の境界で反射が生じる。つまり、図 1 において媒質の入射側および透過側表面での反射を考慮する必要性が生じる。

反射波の影響を考慮して前節の方法で媒質に減衰効果を付与するには、解析プログラム内での処理によって媒質中の反射波を除外すること、あるいは式 (5) に対して反射波の影響を考慮した補正を行う等の工夫が必要となる。本研究では後者による方法を採用し、以下、減衰を付与する媒質 (減衰媒質と称する) 中での反射波の影響を考慮した式 (5) に対する補正方法を示す。

図 2 に示すように、平面波が  $x$  軸に沿って媒質 1 ~ 3 中を伝搬することを考える<sup>4)</sup>。ただし、平面波は  $x$  軸に沿って媒質 1 側から入射し、媒質 3 の右端は無限遠とする。また、媒質 1 と媒質 3 の特性インピーダンスは等しく、媒質 2 の特性インピーダンスは媒質 1 および媒質 3 とは異なるものとする、媒質 1 と媒質 2 間、および媒質 2 と媒質 3 間では反射が生じる。このとき、平面波は媒質

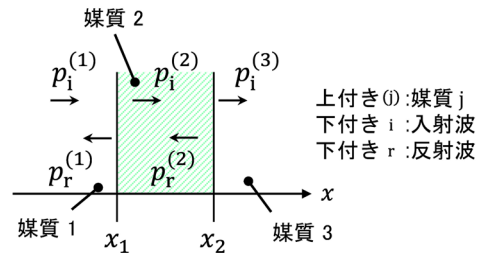


図 2 平面波の伝搬モデル<sup>4)</sup>

2 中でのみ減衰することを仮定すると、減衰効果は入射波だけでなく反射波に対しても作用することとなる。以上の条件の下、以下では、媒質 1 および媒質 2 中では入射波と反射波が重ね合わせ (合成波) となることを考慮し、媒質 2 の入射側表面と透過側表面での合成波音圧レベル差  $\Delta L$  (dB) と前節で示した  $TL'$  (dB) の関係を求め、式 (5) へ代入することを考える。

図 2 において、媒質 1 と媒質 2 間、媒質 2 と媒質 3 間の各境界での複素音圧反射係数  $r_{12}$  および  $r_{23}$  は、それぞれ式 (6)、式 (7) で表される。

$$r_{12} = p_r^{(1)}(x_1) / p_i^{(1)}(x_1) \quad (6)$$

$$r_{23} = p_r^{(2)}(x_2) / p_i^{(2)}(x_2) \quad (7)$$

ただし、 $p_i^{(j)}(x)$  および  $p_r^{(j)}(x)$  は媒質  $j$  の位置  $x$  における入射波音圧および反射波音圧である。

複素音圧反射係数  $r_{23}$  は、媒質  $j$  の特性インピーダンス  $Z_0^{(j)}$  を用いると式 (8) のように表される。

$$r_{23} = \frac{Z_0^{(3)} - Z_0^{(2)}}{Z_0^{(3)} + Z_0^{(2)}} \quad (8)$$

ここで、媒質  $j$  の複素密度および複素波数を  $\rho_j$ ,  $k_j$  とすると特性インピーダンス  $Z_0^{(j)}$  は式 (9) で表される。

$$Z_0^{(j)} = \frac{\omega \rho_j}{k_j} \quad (\text{ただし、}\omega \text{ は角振動数}) \quad (9)$$

続いて、媒質 2 中での反射波を一意に決定することを考える。まず、媒質 2 と媒質 3 間 (図 2 中の位置  $x_2$ ) について、媒質 2 の密度  $\rho_2$  を  $Z_0^{(2)}/Z_0^{(3)} = i$  となるよう便宜的に決定する。このとき、式 (8) より  $r_{23} = -i$  となり、複素音圧反射率  $|r_{23}|^2$  は常に 1 となる。従って、式 (7) より反射波音圧は入射波音圧と等しくなり、合成波音圧レベルは入射波音圧レベルに対して、常に  $10 \log_{10}(2)$  (dB) 加えた値となる。

次に、媒質 1 と媒質 2 間 (図 2 中の位置  $x_1$ ) について、入射側表面の音圧レベルについて、 $x_1$  における合成波と媒質 1 中の入射波の音圧レベル差  $\Delta L_i^{(1)}(x_1)$  は、 $r_{12}$  を用いて式 (10) のように表される。

$$\Delta L_i^{(1)}(x_1) = 10 \log_{10}(1 + |r_{12}|^2) \quad (10)$$

以上より、媒質 2 前後の合成波音圧レベル差  $\Delta L$  (dB)

と  $TL'$  (dB) の関係は、図3のように、媒質間で合成波の連続性が確保される一方で、 $x_1$  における媒質1の入射波音圧  $L_i^{(1)}(x_1)$  と媒質2の入射波音圧  $L_i^{(2)}(x_1)$  が異なることに注意して、式(11)のように表される。

$$TL' = \Delta L + 10 \log_{10}(2) - \left\{ \left( L_i^{(1)}(x_1) + \Delta L_i^{(1)}(x_1) \right) - L_i^{(2)}(x_1) \right\} \quad (11)$$

式(11)を式(5)に代入すれば、減衰媒質前後の合成波音圧レベル差  $\Delta L$  (dB) となる減衰媒質の複素波数が決定される。なお、式(6)の  $r_{12}$  は各媒質の特性インピーダンスを用いて表すことができ<sup>4)</sup>、周波数および減衰媒質の厚さには依存しない<sup>3)</sup>。そのため、式(11)の関係も周波数および減衰媒質の厚さから独立して一意に決定される。

図4に、 $TL'$  と  $\Delta L$  の関係を示す。図中の各点は式(11)より求めた値であり、破線は  $TL' = \Delta L + 10 \log_{10}(2)$  を示す。図に示すように、 $TL'$  は、 $\Delta L$  が大きくなると  $\Delta L + 10 \log_{10}(2)$  の値に漸近する。これは、減衰媒質による音の減衰効果が大きいほど減衰媒質中の  $x_1$  での反射波音圧レベルが小さくなり、合成波と入射波の音圧レベル差が小さくなる(式(11)中の  $\{ \}$  内が0に近づく)ためである。また、詳細は省略するが、 $TL'$  が大きいほど複素音圧反射率  $|r_{12}|^2$  は1に近づく<sup>3)</sup>。

上記手法の一例として、図2で  $x_1 = 1$ ,  $x_2 = 2$ 、媒質2を長さ1mの減衰媒質とし、周波数400Hz、媒質2中での合成波の減衰量を20dBとした時の各媒質での合成波の音圧および音圧レベルの計算結果を図5示す。また、表1に計算に用いた各媒質の複素密度および複素波数の各値を示す。媒質1および媒質3は同じ媒質とし、媒質1の長さは1m、左端での入射波音圧振幅を2Paとした。図5に示すように、媒質2前後の音圧レベル差は20dB

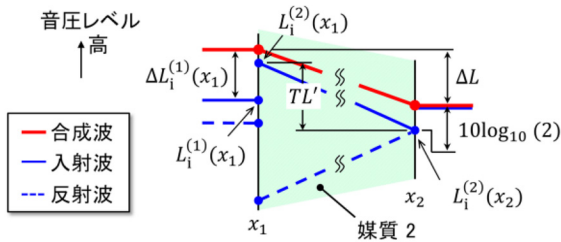


図3 媒質2における音圧レベルの関係

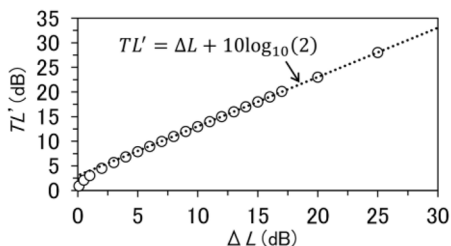


図4 減衰媒質中における音圧レベルの関係

と付与した減衰量に一致し、正しく計算されていることが確認された。

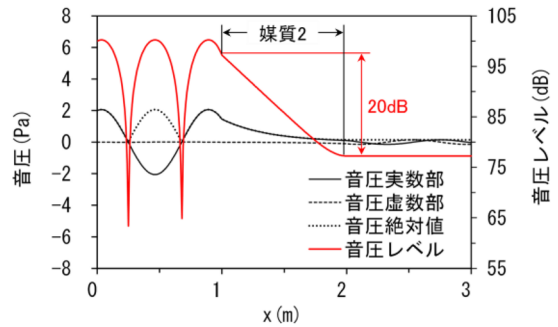


図5 平面波による減衰効果の検証(合成波計算値)

表1 計算に用いた値

複素密度		複素波数	
$\rho_1, \rho_3$	1.205+i0	$k_1, k_3$	7.31+i0
$\rho_2$	0.44+i0	$k_2$	0-2.65i

### 3. 防音壁嵩上げ部からの透過音の影響評価

#### 3.1 解析の概要および解析モデル

前章で示した手法を適用し、鉄道高架橋防音壁において透明ポリカーボネート板(以下、透明遮音板)を用いた嵩上げが実施される事例<sup>5)</sup>を参考に有限要素法に基づく音響解析を行い、嵩上げ部での音響透過損失に応じた透過音が高架橋周囲の音圧レベル分布へ与える影響を評価した。

解析は高架橋外への音の放射を扱うが、このとき、有限要素領域の外部境界において疑似反射等の影響を考慮することが必要となる<sup>6)</sup>。そこで、この外部境界(仮想境界と称する)面を遠方に拡張した無限要素を導入し、この外部境界面をSommerfeldの放射条件<sup>7)</sup>に基づく音の透過面とした。これにより、車体や高架橋周囲の音の伝搬が複雑になる空間を有限要素による領域として詳細な計算を実行する一方、高架橋外は有限要素領域の外部境界からの単純な音の伝搬空間とし無限要素として扱う領域とした。各領域の詳細は、以下のとおりである。

解析対象は図6に示すように高架橋片側半分とし、有限要素領域を図7に示すように車体および高架橋を含む半径7mの球を高架橋長手方向に薄くスライスした形状とした。このとき、厚さを0.024m、球中心を厚さ方向中央とした。図8に、有限要素領域の中央断面上での各位置関係を示す。コンクリート製防音壁の高さはレールレベル(以下、R.L.)+2m、透明遮音板による嵩上げ高さは1mとした。高架橋外の無限要素による領域は、軌道中心から距離を12.5m~30m、高さをR.L.±12mとした。

境界条件について、仮想境界面は前述のように音の透過面とし、車体およびコンクリート製防音壁を含めた高架橋は完全反射性（剛壁）とした。音源は高速走行時の発生音に対する寄与が大きい車両下部音を対象とし<sup>8)</sup>、左右のレール頭頂部を音源位置とした。解析では同位置に直径0.01mの円筒状の非解析領域を設け、その円筒面から放射する音の図8に示す断面方向への伝搬状況を解析的に求めた。円筒長は有限要素領域の奥行方向と一致させ、これにより有限要素領域では円筒波による無限長干渉性線音源に基づく評価を行った。一方、無限要素内では球状の仮想境界面の音圧を基にした球中心からの放射音が計算されるが、これは点音源に基づく音圧分布となり、線音源に基づく有限要素領域とは距離減衰の特性が異なる<sup>9)</sup>。そこで、解析後に音源の距離減衰の特性の違いを補正するため、無限要素内のn番目の節点に対して式(12)に示す距離減衰補正值 $\Delta L_{i,n}$ を加え、有限要素領域と同じく円筒波に基づく音圧レベルを求めた。

$$\Delta L_{i,n} = 10 \log_{10} \frac{r_{i,n}}{r_{e,n}} \quad (12)$$

ただし、 $r_{i,n}$ は無限要素内のn番目の節点と仮想境界面の球中心の距離、 $r_{e,n}$ は仮想境界面の球中心と仮想境

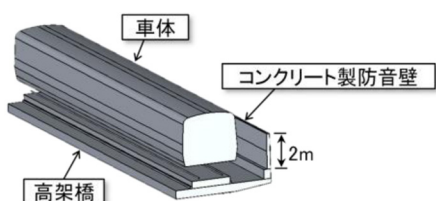


図6 解析対象

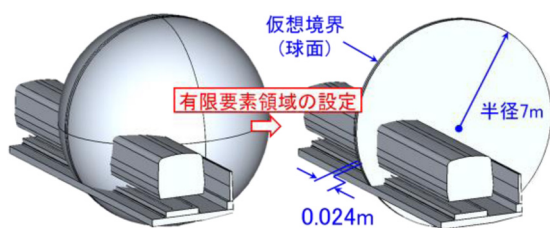


図7 有限要素領域の設定

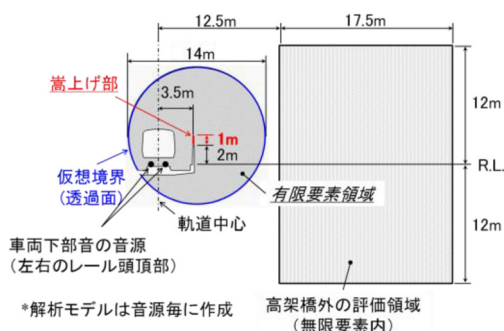


図8 解析モデルの概要

界面の距離で、 $r_{i,n}$ と $r_{e,n}$ は同一線上にあるものとする。

なお、本研究では音響解析にアドバンスソフト(株)製の音響解析ソルバーであるAdvance/FrontNoiseを用いた。

### 3.2 解析モデルの妥当性検証

まず、前節の解析モデルの妥当性を検証した。ここでは、高架橋外に設定した図8の無限要素内の領域での音圧レベル分布について、音響解析による結果と1/25縮尺模型実験による結果とを比較した。防音壁は、コンクリート製防音壁(高さはR.L.+2m)のみとした。

図9に、鉄道総研所有の無響室内で行った縮尺模型実験の実施状況を示す。縮尺模型は車体と構造物をいずれも反射性の金属板を用いて製作し、音響解析と同様に高架橋片側半分を対象とした。模型長は、実寸換算で100mとし、各模型および音源の位置は音響解析と一致させた。高架橋下方には十分な遮音性能を有する遮蔽板を設置し、防音壁の反対側から音が回り込むのを防止した。音源には圧縮空気を用いた無指向性の線音源を用い、設置長は模型長と同様とした。高架橋外での音圧レベルの測定には1/4インチマイクロホンを用い、模型長中央の同一断面上をトラバース装置によって移動させ、図8の無限要素内の評価領域での音圧レベル分布を求めた。測定は音源を左右の各レール位置として行い、測定ごとに音源を移動させた。評価は、各音源における各測定点での音圧レベルに対して実寸換算200Hz～2000Hzで1/3オクターブバンド分析を行い、各音源時の結果を合成してO.A.値(dB)を求めた。なお、音響解析における音源音圧レベルの周波数特性は、模型実験で用いた線音源近傍で測定した音圧レベルの周波数特性と一致させた。

図10に、縮尺模型実験および音響解析で得られた高架橋外での音圧レベル分布の結果を示す。両図とも音圧レベルは高架橋に近い上方から遠方下方に向かって低下する傾向を示した。両図の比較からその分布状況は良く一致していると判断され、音響解析における無限要素の導入、および式(12)の補正は妥当であると判断された。

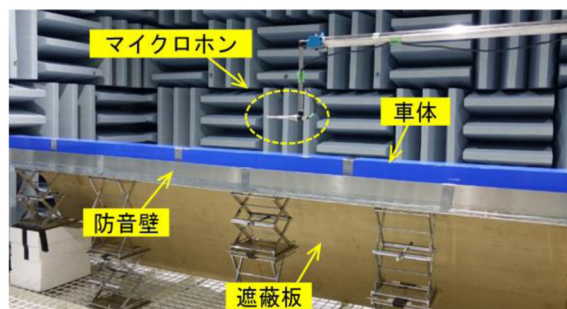
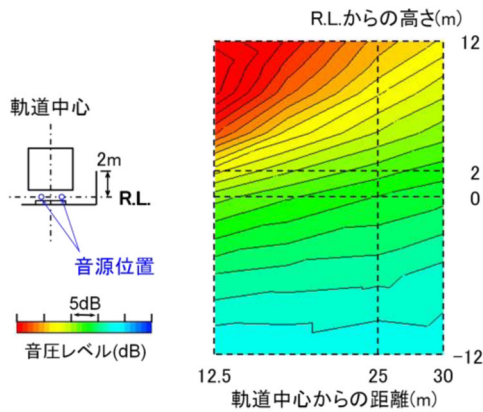
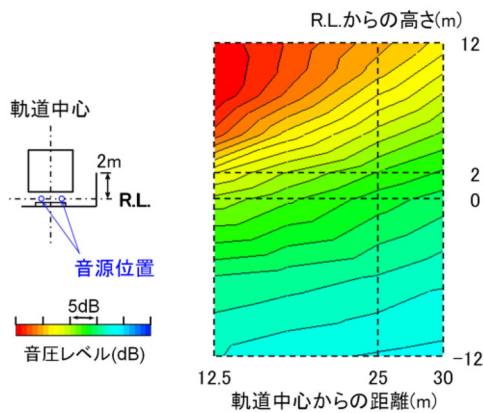


図9 縮尺模型実験の実施状況



(a) 縮尺模型実験の結果



(b) 音響解析の結果

図 10 高架橋外における音圧レベル分布の比較

### 3.3 嵩上げ部からの透過音の影響

前章で示した手法を用いて嵩上げ部の透明遮音板の音響透過損失を反映し（以下、条件 1）、透明遮音板からの透過音が周囲の音圧レベル分布へ与える影響を評価した。評価では嵩上げ部を車体やコンクリート製防音壁と同様に音の透過が無く完全反射性として扱った場合（以下、条件 2）についても同様の解析を行い、両結果を比較した。ただし、比較において、遮音板上端の反射特性の違いは回折および減音量に影響を与えることが考えられる。そのため、条件 1 において、上端より高さ 0.01m（嵩上げ高さの 1%）は完全反射性とした。

透明樹脂板は鉄道分野で実績のある厚さ 8mm のものを対象とし、音響透過損失は類似品の公称値<sup>10)</sup>を参考に図 11 のとおりとした。嵩上げ部に相当する領域の複素波数は、式 (11) における  $\Delta L$  を図 11 より周波数毎に音響透過損失として読み取り、式 (5) によって求めた。

音源音圧境界の音圧レベルは、高速列車の走行音に関わる過去の知見<sup>11)</sup>を参考に、図 12 に示す周波数特性とした。解析は各音源につき 228Hz ~ 3455Hz の 1/15 オクターブバンド中心周波数を対象に 60 通りで実施し、計 120 通りの計算結果から各節点での O.A. 値を算出した。

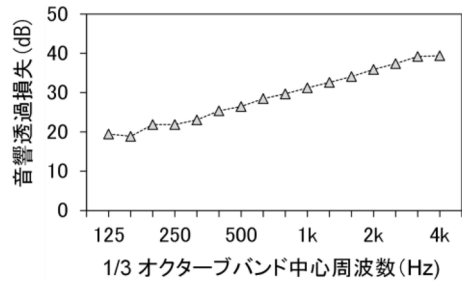


図 11 透明樹脂板（厚さ 8mm）の音響透過損失

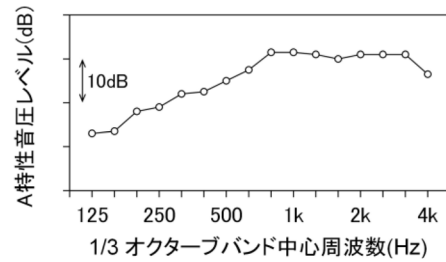
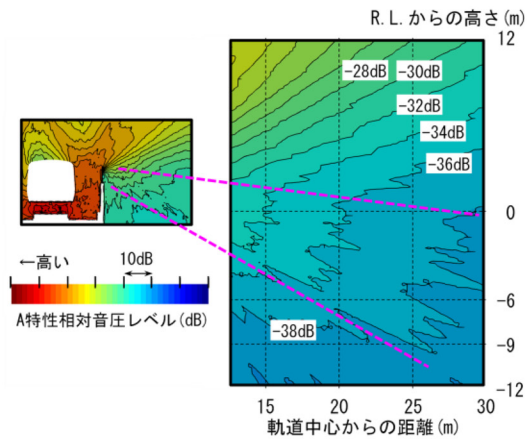


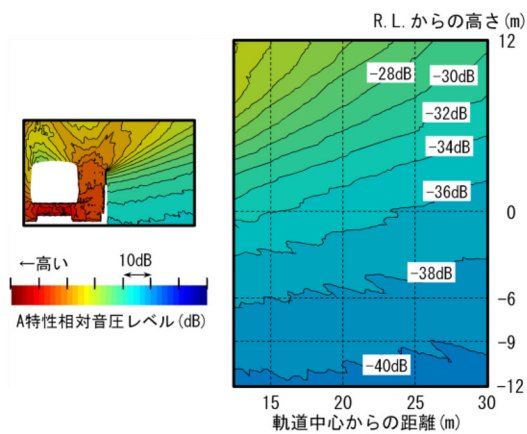
図 12 音源音圧境界の周波数特性

### 3.4 解析結果および考察

図 13 に、解析で得られた防音壁周囲および高架橋外での音源を 0dB とした時の相対音圧レベル分布を示す。図 13(a) は嵩上げ部での音響透過損失を反映した条件 1、図 13(b) は嵩上げ部を完全反射性とした条件 2 の結果である。図中の数値は、代表的なコンター境界での音源からの相対音圧レベルを示す。両図を比較すると、車体周囲や高架橋外の防音壁より上方での音圧レベル分布は良く似た傾向を示した。一方、高架橋外の嵩上げ部上端より下方では、図 13(a) 中の破線で示した部分でコンター境界がやや遠方へ広がるような分布を示し、両図は異なる傾向を示した。これは、嵩上げ部が破線の延長線上に位置していることから、嵩上げ部からの透過音に起因したものであると考えられる。なお、透過音の影響は高架橋外の防音壁上方でも生じると推測されるが、両図での差異は防音壁下方と比較して小さい。原因として、防音壁上方では直接伝搬する音に対して透過音の影響が相対的に小さいためと考えられる。嵩上げ部からの透過音が実用上与える影響は、例えば軌道中心から 25m, R.L.-9m における相対音圧レベルは条件 1 で約 -38dB, 条件 2 で約 -39.5dB であり、R.L.-6m では条件 1 で約 -38dB, 条件 2 で約 -38.5dB と、透過音を考慮した場合には最大 1.5dB 程度高くなっている。嵩上げ部を厚さ 2 倍、あるいは面密度が 2 倍となるような材料へ変更すると音響透過損失は 5dB ~ 6dB 増加するが、条件 2 の結果を参考にすると地上付近での騒音低減効果は 1.5dB 未満と推定される。なお、本結果は車両下部音のみを対象としており、実際に得られる効果は集電系音や構造物音の影響等によりさらに小さくなると考えられる。



(a) 嵩上げ部での透過音を考慮した場合 (条件1)



(b) 嵩上げ部を完全反射性とした場合 (条件2)

図 13 音源に対する相対音圧レベル分布の比較

#### 4. まとめ

有限要素法に基づく音響解析により、防音壁からの透過音を考慮した騒音低減評価を実施するため、音響透過損失に基づく遮音性能の反映手法を検討した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 透過音を考慮する有限要素領域を空気とは異なる媒質とし、その複素波数について材料の音響透過損失および厚さに基づく減衰量として一意に決定した。平面波による理論的検証の結果、媒質前後の音圧レベル差は与えた減衰量と一致することを確認した。
- (2) 鉄道高架橋防音壁で厚さ 8mm の透明遮音板を用いて嵩上げされる事例を参考に、同手法によって嵩上げ部の音響透過損失を反映した騒音低減評価を行った。車両下部音を対象に嵩上げ部を剛壁とした場合と比較した結果、高架橋外では嵩上げ部からの透過音の影響と考えられる音圧レベル分布を示し、本手法によって音の透過を考慮した評価が可能であると

考えられた。

- (3) 嵩上げ部からの透過音の影響について、材料厚さを 2 倍にする等の変更を行った場合の騒音低減効果は、車両下部音のみを対象とした場合に地上付近で 1.5dB 未満と推定された。

今後は、模型実験等で実際の音の透過現象との比較により本手法の妥当性等の検証を進めるとともに、遮音性能および吸音性能の違いに着目した評価等を行い新規騒音対策材の開発に活用していく予定である。

#### 5. 謝辞

本研究の遂行に際し、九州大学の尾本章教授より有益な助言を受けた。ここに、感謝の意を表する。

#### 文 献

- 1) 長倉清, 北川敏樹: 新幹線用防音壁の形状に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.16, No.12, pp.17-22, 2002
- 2) 廣江正明, 加来治郎, 森圭太郎, 高桑靖匡, 野澤 伸一郎: 差分法を用いた台車騒音に対する逆L型防音壁の遮蔽効果の解析, 騒音制御, Vol.31, No.4, pp.322-332, 2007
- 3) 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, DOI:10.1299/transjsme.19-00239, 2019
- 4) 伊藤毅: 音響工学原論 (下巻) 第 8 版, コロナ社, 1973
- 5) 佐藤清一, 伊藤昭夫: 列車風圧とアルミニウム枠防音工の強度特性, SED (JR 東日本構造技術プロジェクト), No.12, pp.64-73, 1995
- 6) 佐藤大悟, 尾本章: 有限要素法の開領域問題としての鉄道高架橋防音壁の騒音低減評価, 日本音響学会 2018 年秋季研究発表会講演論文集 (CD-ROM), 講演番号 1-8-18, 2018
- 7) 例えば, 加川幸雄: 開領域問題のための有限/境界要素法, サイエンス社, 1983
- 8) Kurita, T., Wakabayashi, Y., Yamada, H. and Horiuchi, M., "Reduction of wayside noise from Shinkansen High-Speed Trains," Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, Vol.4, No.1, pp.1-12, 2011.
- 9) 西田公至, 藤塚桂男: 有限長障壁による音波回折の境界要素解析, 日本音響学会誌, Vol.44, No.11, pp.815-823, 1988
- 10) 住友ベークライト株式会社: ポリカエース技術資料, p.18, 2013
- 11) 長倉清, 善田康雄: 新幹線沿線騒音予測手法, 鉄道総研報告, Vol.14, No.9, pp.5-10, 2000