

高速多重極境界要素法による遮音壁周辺の音場解析とその可聴化

中央大学大学院 学生員 ○ 庄子 諒
 京都大学大学院 正会員 吉川 仁
 中央大学 正会員 檜山 和男

1. はじめに

騒音の評価には、近年のコンピュータ技術の向上に伴い、波動音響理論や幾何音響理論に基づく数値シミュレーションが広く用いられている。

著者らは、高精度なシミュレーションが可能な波動音響理論に基づき、高速多重極境界要素法による大規模音場解析手法の構築¹⁾を行い、本手法を用いて遮音壁形状の差異による影響の検討²⁾を行ってきた。本研究では前述の検討内容に加え、さらに複雑な形状を有する遮音壁モデルを用いた数値解析を行い、それらの結果をバーチャルリアリティ（以下 VR）装置による騒音体験システム¹⁾へ実装した。本報告では、その数値解析の概要と VR 装置を用いた可聴化結果の定量的な評価について示す。

2. 数値解析手法

本研究で取り扱う 3 次元非定常波動問題の外部問題の支配方程式である 3 次元の波動方程式、境界条件、放射条件、初期条件を以下に示す。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(\mathbf{x}, t) = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_i}(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \text{ in } D \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t) = -\frac{\rho}{Z_n} \frac{\partial u}{\partial t}(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \text{ on } \partial D \quad (2)$$

$$u(\mathbf{x}, 0) = 0, \frac{\partial u}{\partial t}(\mathbf{x}, 0) = 0 \quad \mathbf{x} \text{ in } D \quad (3)$$

$$u(\mathbf{x}, t) \rightarrow u_{\text{in}}(\mathbf{x}, t) \quad |\mathbf{x}| \rightarrow \infty \quad (4)$$

ここに、 D 、 ∂D はそれぞれ解析領域と、その境界を表し、 u は音圧、 n は解析領域からの外向き法線ベクトル、 u_{in} は入射波を示す。

続いて、式 (1) に対応する境界積分方程式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}u(\mathbf{x}, t) &= \int_0^t \int_{\partial D} \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{y}, s) dS ds \\ &- \int_0^t \int_{\partial D} \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) u(\mathbf{y}, s) dS ds + u_{\text{in}}(\mathbf{x}, t) \end{aligned} \quad \mathbf{x} \text{ on } \partial D \quad (5)$$

ここに、 Γ は 3 次元波動方程式の基本解である。式 (5) を離散化し、境界上での u 、 $\frac{\partial u}{\partial n}$ を求め、それらを以下の式に代入することにより領域内の任意の点での音圧 u を求める。

$$\begin{aligned} u(\mathbf{x}, t) &= \int_0^t \int_{\partial D} \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{y}, s) dS ds \\ &- \int_0^t \int_{\partial D} \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) u(\mathbf{y}, s) dS ds + u_{\text{in}}(\mathbf{x}, t) \end{aligned} \quad \mathbf{x} \text{ in } D \quad (6)$$

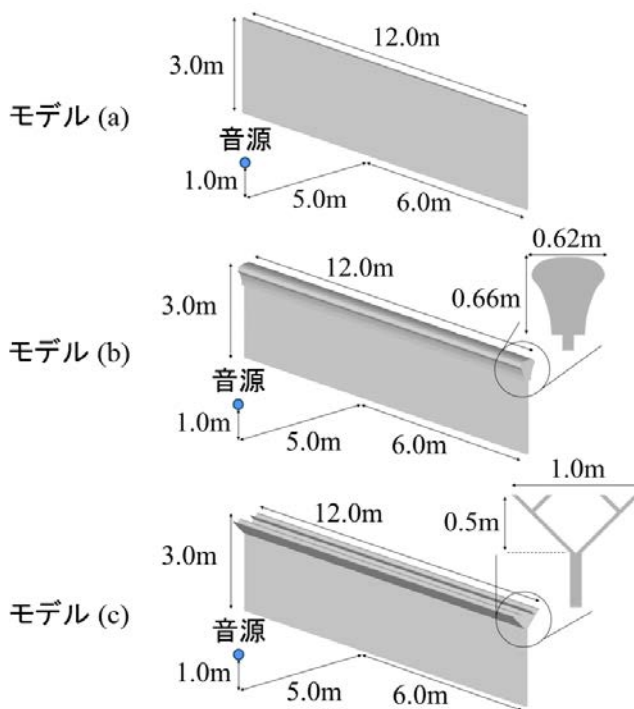


図-1 解析モデル

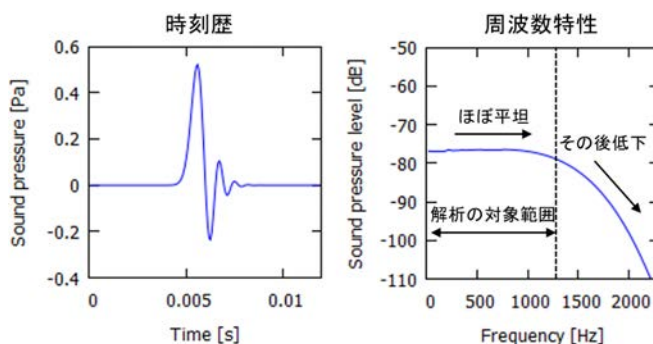


図-2 Lubich の疑似インパルス

3. 数値解析例

(1) 解析条件

図-1 に解析に用いるモデルを示す。各モデルの壁面上の要素分割幅は 0.017m である。音速、時間増分はそれぞれ、340m/s、0.0512ms とし、壁面の境界条件は完全反射とする。入力波には以下の式により得られる Lubich の疑似インパルスを用いる。

$$\omega_n(\Delta t) = \frac{R^{-n}}{L} \sum_{L=0}^{L-1} \left(\frac{1}{4\pi r} e^{-\frac{s}{c}r} \right) e^{(-2\pi i \frac{nL}{L})} \quad (7)$$

生成した入力波とその周波数特性を図-2 に示す。図に示すように、Lubich の疑似インパルスの周波数特性は、あ

KeyWords： 境界要素法，騒音，遮音壁，可聴化，VR

連絡先： 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL：03-3817-1815 E-mail：a15.dg8m@g.chuo-u.ac.jp

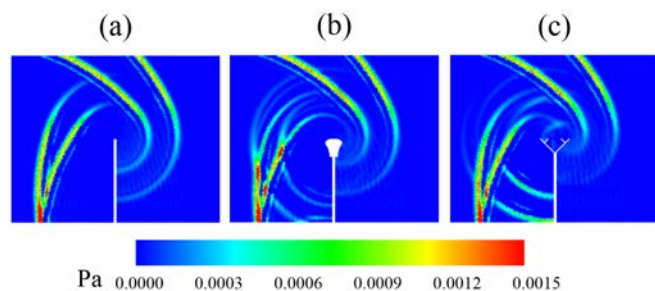


図-3 遮音壁と直交する断面上の音圧分布

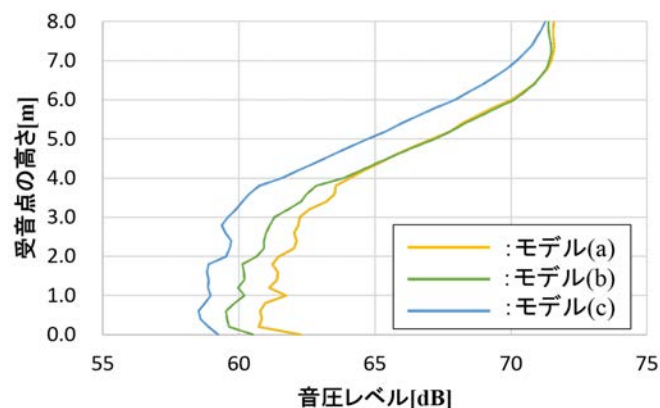


図-4 受音点の高さと音圧レベルの関係

る周波数まではほぼ平坦に推移しその後急激に低下するという特徴を持つ。周波数特性が平坦な領域の上限の周波数は、式中のパラメータに連動して変更することができる。本研究では、 $L = 2000$, $r = 1.8$, $\Delta t = 0.0512\text{ms}$ として入力波を生成し、 1.3kHz 付近までを対象範囲として解析を行う。

(2) 解析結果

遮音壁と直交する断面上での遮音壁近傍の音圧分布 (時刻 $t=0.0178\text{s}$) を図-3に示す。図より、遮音壁形状の違いにより遮音壁後方へ進行する音波の強さが変化しており、特にこの中では解析モデル(c)が大きな減音効果を持っていることが確認できる。また、図-4は遮音壁の後方5.0mの地点における、受音点の高さと音圧レベルの関係を示している。この図は各受音点で得られたインパルス応答に音源データを畳み込み、その二乗平均平方根の値をdBに変換しグラフ化したものである。この図からも解析モデル(c)が最も音を低減していることが確認でき、高さ8.0m近くまでその効果が及んでいることがわかる。

4. VR装置を用いた可聴化

各ケースにおいて遮音壁の背後5.0m、高さ1.0mの地点に受音点を設け、得られた可聴化音を用いてVR技術を用いた都市騒音体験システムの作成を行った。可聴化に用いたデバイスは、没入型VR装置HoloStageである。システム利用中の様子を図-5に示す。VR空間内でCGとともに可聴化音を聞くことで、音のみを聞く場合に比べて騒音の発生源との距離や遮音壁の高さ等を直感的に理解することができ、可聴化の効果をより高められることが期待できる。また、図-6はVR装置内に騒音計を設置して計測を行い、計算結果通りの音場が再現されているかどうかの検

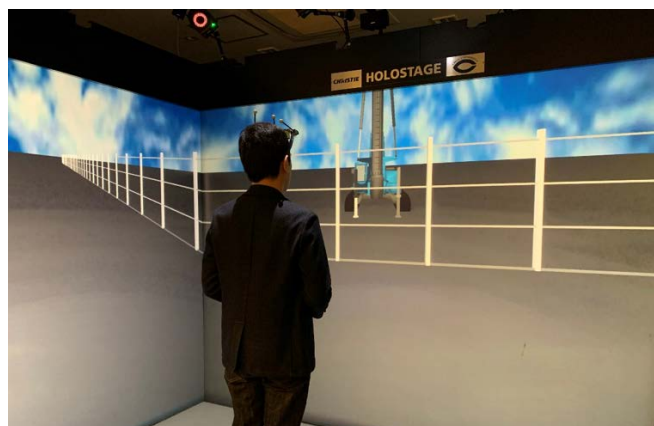


図-5 VR装置を用いた騒音体験システム

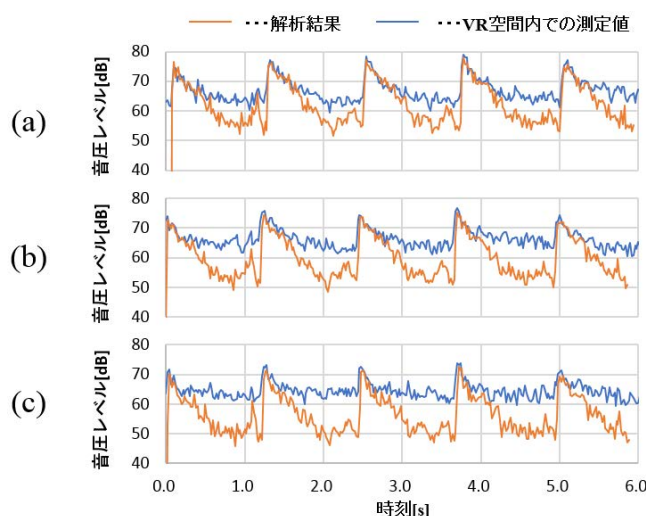


図-6 解析結果とVR空間内での測定値の比較

証を行った結果である。VR装置内では、装置の駆動音に起因する65dB程度の暗騒音が常に存在しているため、解析結果がそれを下回る場合にはVR空間内での測定値との間に乖離がみられるが、それ以外の部分では両者はいずれの条件においても良い一致を示しており、VR空間において計算結果どおりの音場がほぼ再現されていることが確認できる。

5. おわりに

本論文では、高速多重境界要素法による音場解析を行い、遮音壁形状の差異に伴う音圧レベルの変化を定量的に示した。また、その解析結果を用いた騒音体験システムの構築を行い、VR空間において計算結果どおりの音場がほぼ再現されていることを確認した。

今後は、遮音壁の境界条件や音源の移動を考慮した騒音体験システムの構築を予定している。

参考文献

- 岡村理一郎, 吉川仁, 高橋徹, 高木貴弘, 櫻山和男: 安定化手法を用いた時間域多重境界要素法に基づく道路交通騒音解析とその可聴化システム, 土木学会論文集 A2(応用力学), 土木学会, Vol.72, pp.257-264, 2016.
- 庄子諒, 吉川仁, 櫻山和男: 境界要素法による任意形状を有する遮音壁周辺の音場解析, 令和元年度土木学会第74回年次学術講演会講演概要集, CS5-15, 2019.