

有限要素法による道路交通騒音シミュレーションシステムの構築とその可聴化

中央大学大学院 学生会員 ○ 深澤 一志

中央大学 正会員 榎山 和男
京都大学大学院 正会員 吉川 仁

1. はじめに

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や有限要素法による大規模音場解析手法の構築を行い、遮音壁形状の差異による影響の検討¹⁾²⁾を行ってきた。しかし、移動音源に対する交通騒音問題の適用として、事変畳み込み演算を用いた解析を行っていたが妥当性の検証が十分ではなかった。

そこで本研究では、移動音源の評価に幾何音響理論との比較を行い解析手法の妥当性検証を行う。また、解析結果をヘッドマウントディスプレイ (以下 HMD) により可聴化するシステムを構築し、計算結果通りの音場が再現できているかについて検討した。

2. 数値解析手法

本研究では開境界の処理に PML 法³⁾ (Perfectly Matched Layer) を使用する。

(1) 支配方程式

解析対象とする開領域の開境界を PML 領域 D_{PML} とし、境界と D_{PML} で囲まれた領域を D とする。3次元座標 $x \in D \cup D_{PML}$ において音圧 p が満たす支配方程式の修正波動方程式と移流方程式、式中の変数と行列を以下に示す。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \alpha \frac{\partial p}{\partial t} + \beta p - c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x_j^2} - c^2 \frac{\partial \Phi_j}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial t} + \mathbf{A} \Phi_i + \mathbf{B} \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0, \quad (2)$$

$$\alpha = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z,$$

$$\beta = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x,$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_y - \sigma_z & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y - \sigma_z - \sigma_x & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z - \sigma_x - \sigma_y \end{bmatrix},$$

ここに、 t は時間を、 c は音速を、 Φ_i は補助変数を表す。 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ は各方向の減衰パラメータを表し、PML 領域 D_{PML} では非 0、非 PML 領域 D では 0 となり音波を吸収する役割をもつ。また、領域 D 内では Φ_i, σ_i が 0 となるため通常の波動方程式を解くことに等しい。

(2) 有限要素法に基づく数値解析

式 (1), (2) に対して Galerkin 法に重み付き残差法を適用し、導いた弱形式に対して、空間方向に四面体 1 次要素を用いた有限要素法を適用し、以下の方程式を得る。

$$\mathbf{M}_e \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \alpha \mathbf{M}_e \frac{\partial p}{\partial t} + \beta \mathbf{M}_e p + \mathbf{K}_e p - \mathbf{S}_e \Phi_j = \mathbf{F}_e, \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_e \frac{\partial \Phi_i}{\partial t} + \mathbf{A} \mathbf{M}_e \Phi_i + \mathbf{B} \mathbf{S}_e p = 0, \quad (4)$$

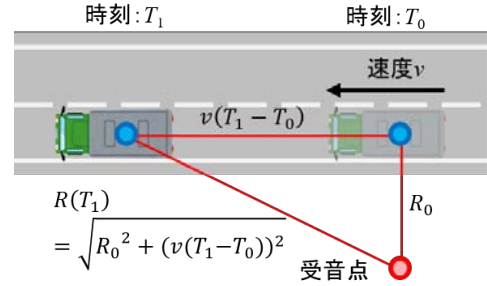


図-1 移動音源の推定方法

ここで $\mathbf{M}_e, \mathbf{K}_e, \mathbf{S}_e, \mathbf{F}_e$ はそれぞれ各要素の質量行列、拡散行列、移流行列、境界積分項を表す。

時間方向の離散化には差分法 (中心差分) を用い、陽解法により解を求める。

(3) 事変畳み込み演算

本研究では、インパルス応答解析を用いた移動音源波形の再現を行うため、事変畳み込み演算を使用する。移動音源の各位置を $x(t)$ 、各時間 t からのインパルス応答を $h(t, x(t))$ 、音源信号を $s(t)$ とすると、各位置、各時間における受音点での音圧 $p(t)$ は移動音源の波動方程式より次式で与えられ、近似的に式 (5) で表せることが示されている⁴⁾。

$$p(k) = \sum_{k_s=0}^{\infty} s(k_s) h(k - k_s, x(k_s)), \quad (5)$$

また、式 (5) は行列の演算の形で次式で表せる。

$$\mathbf{p} = \mathbf{H} \mathbf{s}, \quad (6)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h(1, \mathbf{x}(1)) & 0 & \cdots & 0 \\ h(2, \mathbf{x}(1)) & h(1, \mathbf{x}(2)) & \ddots & \vdots \\ \vdots & h(2, \mathbf{x}(2)) & \ddots & 0 \\ h(L_h, \mathbf{x}(1)) & \vdots & \ddots & h(1, \mathbf{x}(L_s)) \\ 0 & h(L_h, \mathbf{x}(2)) & \ddots & h(2, \mathbf{x}(L_s)) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & h(L_h, \mathbf{x}(L_s)) \end{bmatrix},$$

式 (6) における \mathbf{s} は音源信号ベクトル、 \mathbf{p} は受音信号ベクトル、 \mathbf{H} は時変畳み込み行列、 L_s は音源信号長、 L_h はインパルス応答長を表す。また、時変畳み込み行列の作成にあたって、図-1 に示す方法で基準点からの距離減衰によって各位置でのインパルス応答を求める。図-1 内の v は音源の想定速度、 R_0 は音源と受音点の距離、 T_0 は基準の時刻、 T_1 は任意の時刻を表す。これにより、推定されたインパルス応答を事変畳み込み行列に代入するが、その際に到達距離の差による到達時間差も考慮して代入する。最後に、事変畳み込み行列と、音源データとの演算により移動音源の可聴化音を再現する。

KeyWords: 有限要素法, 騒音, 遮音壁, 可聴化

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL: 03-3817-1815 E-mail: a17.kfgc@g.chuo-u.ac.jp

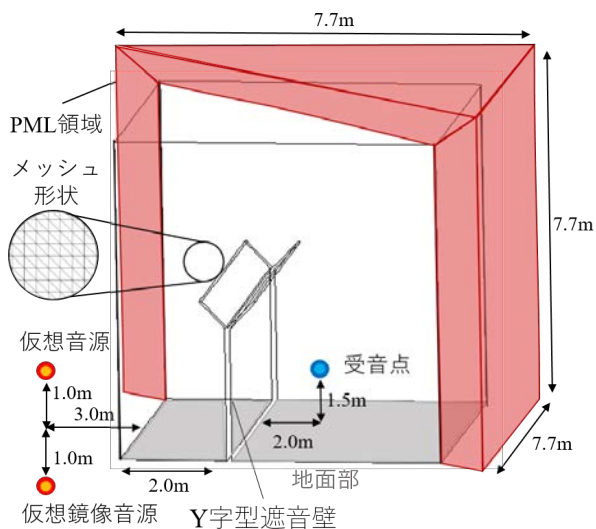


図-2 解析モデル

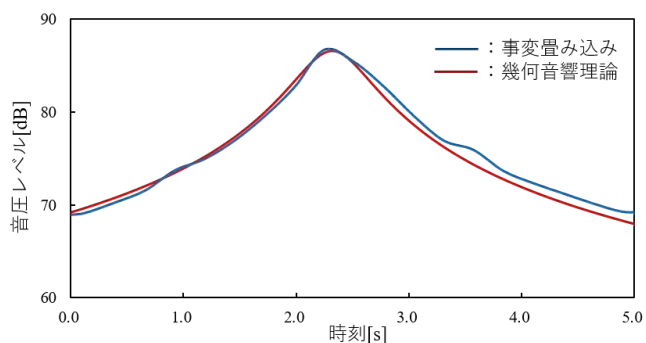


図-3 受音点における音圧レベルの比較

3. 移動音源考慮の妥当性検証

(1) 解析条件

図-2に解析に用いるモデルを示す。空間離散化幅、時間離散化幅、音速はそれぞれ、0.022m, 0.667ms, 340m/sとする。入射波には1000Hz程度まではほぼフラットな周波数特性を持つように生成したLubichの擬似インパルスを用いる。境界条件は地面部、遮音壁ともに完全反射とし、PML領域 D_{PML} の厚さは1.1mとしている。また、可聴化対象は大型車の走行音とし、時速80kmの速度で150mを走行するものと仮定した。

(2) 解析結果

遮音壁がない場合において、受音点で得られるインパルス応答に対し事変畳み込み演算を行った結果と、幾何音響理論による計算結果との比較を行った。受音点における時刻歴波形の比較図を図-3に示す。ユニットパターンは概ね一致しており、移動音源の考慮が正しく行えていることが確認できる。

4. HMDを用いた可聴化システム

受音点において事変畳み込み演算を行い、得られた結果を用いてVR技術による可聴化し、道路交通騒音シミュレーションシステムの構築を行った。可聴化に使用したデバイスは可搬型VR装置のMeta Quest2である。VRデバイスとシステム内での体験の様子を図-4に示す。図-5, 6に



図-4 HMDによる交通騒音シミュレーションシステム

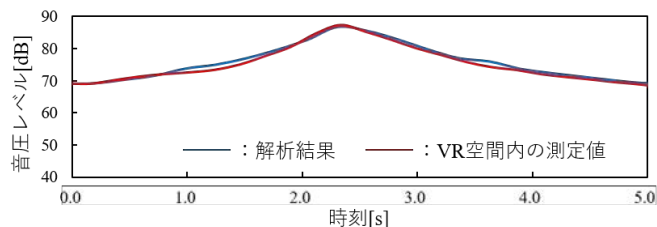


図-5 解析結果とHMDの測定値の比較(遮音壁なし)

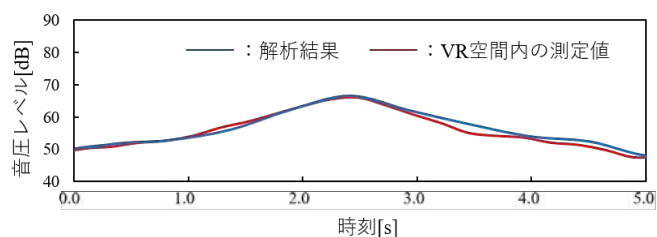


図-6 解析結果とHMDの測定値の比較(Y字型)

解析結果とHMD内での録画システムを用いた測定値の比較を示す。データの時間幅が異なることから、わずかにずれは生じるものの、作成したシミュレーションシステムは、解析結果を良く再現できていることがわかる。

5. おわりに

本研究では、事変畳み込み演算に基づく本手法の妥当性を幾何音響理論による結果との比較のもとに行った。また、HMDを用いて計算結果を可聴化するシステムの構築を行いVR空間内での測定値との比較を行った。その結果、騒音評価システムによる可聴化結果は計算結果を良く再現できていることを確認した。

今後は、遮音壁内部の構造の考慮や風速の考慮を行うことを予定している。

参考文献

- 1) 庄子諒, 深澤一志, 吉川仁, 高橋徹, 榎山和男: インパルス応答解析に基づく高速多重極境界要素法による音場解析とその可聴化, 土木学会論文集 A2(応用力学), 土木学会, Vol77, No2, pp. I.171-I.182, 2021.
- 2) 深澤一志, 榎山和男, 吉川仁: インパルス応答解析に基づく有限要素法を用いた音場解析手法の構築, 計算工学講演会論文集, 計算工学会, Vol.27, E-10-03, 2022.
- 3) Kaltenbacher, B., Kaltenbacher, M. and Sim, I.: A modified and stable version of a perfectly matched layer technique for the 3-d second order wave equation in time domain with an application to aeroacoustics, *J. Comput. Phys.*, Vol.235, pp.407-422, 2013.
- 4) 島弘史, 中臺一博, 長谷川雄二, 辻野広司: 事変拡張ビームフォーミングによる移動音源の抽出, 人工知能学会全国大会論文集, Vol.21, 3C8-4, 2007.