

# 有限要素法による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 ○ 宮内 暖季  
中央大学大学院 学生会員 深澤 一志  
中央大学 正会員 檜山 和男

## 1. はじめに

著者らの既往の研究では、高精度なシミュレーションが可能である波動音響理論に基づき、任意形状への適合性に優れる有限要素法を用いた大規模解析手法の構築<sup>1)</sup>を行ってきた。しかし、移動音源問題において、複数音源への適用がなされていなかった。

そこで本研究では、複数音源による交通騒音の可聴化を行う。解析結果をヘッドマウントディスプレイ (以下 HMD) により可聴化システムを構築し、計算結果通りの音場の再現性について検討した。

## 2. 数値解析手法

本研究では、開境界処理方法として PML(Perfectly Matched Layer) 法<sup>2)</sup>を使用する。

### (1) 支配方程式

解析対象とする開境界領域を PML 領域  $D_{PML}$  とし、 $D_{PML}$  で囲まれた領域外部を  $D$  とする (図-1 参照)。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。

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

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

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

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

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

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

ここで、 $t$  は時間、 $c$  は音速、 $\Phi_i$  は補助変数を示す。 $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  は各方向の減衰パラメータを示し、領域  $D$  では 0、領域  $D_{PML}$  では非 0 となり伝播波を吸収する役割をもつ。なお、領域  $D$  では  $\Phi_i$ ,  $\sigma_i$  が 0 となり、通常の波動方程式を解くことになる。

### (2) 有限要素法に基づく数値解析

式 (1), (2) に対して Galerkin 法に基づく重み付き残差法を適用し、Green-Gauss の定理を用いて得られる弱形式に対して、有限要素として四面体 1 次要素を用いると、各要素における時間に関する常微分方程式は以下ようになる。

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

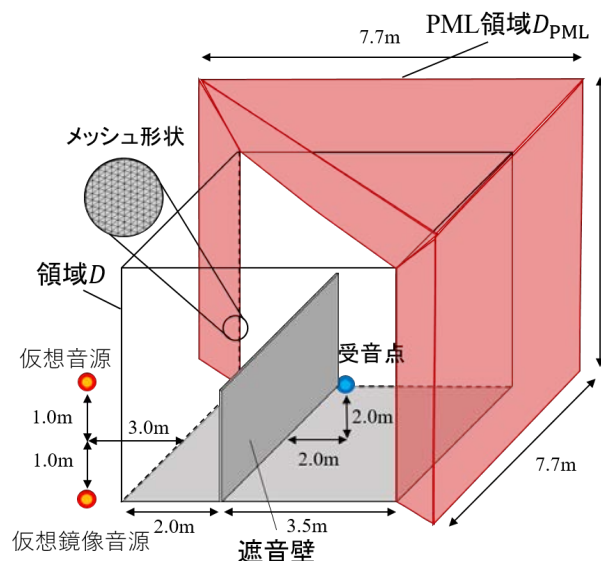


図-1 解析モデル

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

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を用い、各時間の微分項に対して中心差分を施し、陽解法により未知数を求める。

### (3) 時変量み込み演算

本研究ではインパルス応答解析における移動音源波形の再現として、時変量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  $p(t)$  は近似的に式 (5) で表せる。<sup>3)</sup>

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

また、式 (5) は行列の演算の形で次式で表せる。

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

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

**KeyWords** : 有限要素法, 騒音, 複数音源, 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 a19.65sn@g.chuo-u.ac.jp

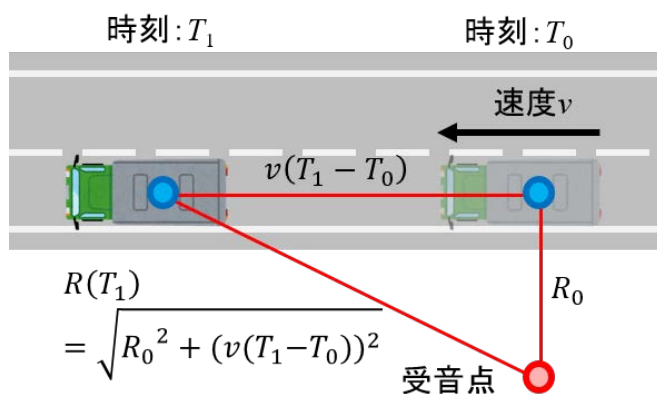


図-2 移動音源の推定方法

式(6)における  $\mathbf{s}$ ,  $\mathbf{p}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $L_s$ ,  $L_h$  はそれぞれ音源信号ベクトル, 受信信号ベクトル, 時変畳み込み行列, 音源信号長, インパルス応答長を示す。また, 時変畳み込み行列の作成において, 図-2 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-2 内の  $v$ ,  $R_0$ ,  $T_0$ ,  $T_1$  はそれぞれ音源の想定速度, 音源と受信点の距離, 基準の時刻, 任意の時刻を示す。これにより, 推定されたインパルス応答を時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。そして, 時変畳み込み行列と, 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。

### 3. 数値解析例

#### (1) 解析条件

図-1 に解析モデルを示す。入力波には 1000Hz 程度まで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。音速は 340.0m/s, 要素分割幅は 0.022m, 時間増分量は 0.00667ms としている。なお, 節点数は約 3820 万, 要素数は約 2 億である。境界条件は, 壁面, 地面部ともに完全反射とし, PML 領域  $D_{\text{PML}}$  の厚さは 1.1m としている。また, 可聴化対象は中型車, 大型車, バイクの走行音とし, 時速 80km の速度で 150m の区間を車間距離 80m で走行するものと仮定した。

#### (2) 解析結果

遮音壁と直交する鉛直中心断面のインパルス応答の可視化結果を図-3 に示す。反射や回折現象の再現が行えていることを確認した。また, 可聴化結果については, 中型車, 大型車, バイクの順に走行するものとし, 車両ごとの畳み込み演算結果を重ね合わせることで複数車両の再現を行った。なお, 音源には各車両の走行音を定常化したものを用いた。可聴化音の時刻歴波形を図-4 に示す。音源が遠方から近づくにつれ, 次第に音がおおきくなり, 遠ざかると小さくなるという移動音源の特徴を表していることを確認し, 複数音源においても移動音源の特徴を表せることを確認した。

HMD による可聴化システムと, システム内の音場の再現性についての検討は, 講演時に示す。

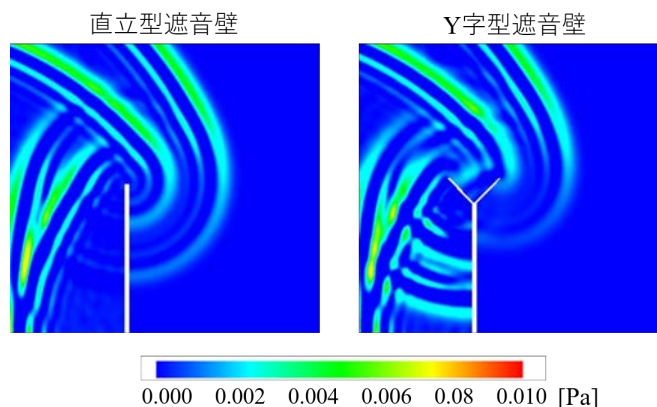
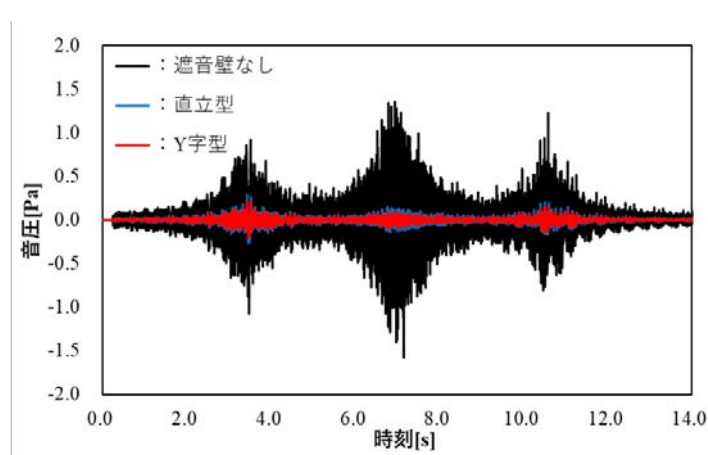
図-3 遮音壁と直交する断面上のインパルス波の音圧分布 ( $t = 0.018009[\text{s}]$ )

図-4 可聴化音の時刻歴波形

### 4. おわりに

本研究では, 有限要素法を用いた複数音源による交通騒音の可聴化を行った。結論を以下に示す。

- 遮音壁が可聴化音の低減に大きく寄与していることを確認した。
- 複数音源においても時変畳み込み演算結果の重ね合わせにより, 再現が可能であることを確認した。

今後の課題として, 遮音壁の内部構造の考慮, 実測値との比較を予定している。

#### 参考文献

- 1) 深澤一志, 檜山和男, 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.
- 2) 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.
- 3) 島弘史, 中臺一博, 長谷川雄二, 辻野広司: 時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.