

## 高速多重極境界要素法による遮音壁周辺の音場解析

中央大学大学院 学生員 ○深澤 一志  
 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

騒音は典型7公害の一つに定められており、とり分け都市部においては、騒音被害が増加しており、その影響評価にコンピュータシミュレーションが用いられている<sup>1)</sup>。騒音の評価手法は幾何音響理論と波動音響理論に大別されるが、複雑な幾何形状を有する音場解析には波動音響理論が用いられる。

著者らは、これまで無限境界を有する波動問題に適している境界要素法に着目し、大規模問題に対して省メモリーかつ高速に解析が可能な時間域高速多重極境界要素法を用いて音場解析手法の構築を行ってきた<sup>2)</sup>。しかし、遮音壁の形状の違いによる遮音効果の違いについての検討が不十分であった。

そこで本研究では、様々な遮音壁モデルを用いて解析を行い、遮音効果について比較を行った。

### 2. 数値解析手法

#### (1) 支配方程式

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、放射条件、初期条件を以下に示す。

・支配方程式

$$\nabla^2 u(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(\mathbf{x}, t) \quad : \Omega \text{内} \quad (1)$$

・放射条件

$$u(\mathbf{x}, t) \rightarrow u_{\text{in}}(\mathbf{x}, t) \quad |\mathbf{x}| \rightarrow \infty \quad (2)$$

・初期条件

$$u(\mathbf{x}, 0) = 0 \quad : \Omega \text{内} \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(\mathbf{x}, 0) = 0 \quad : \Omega \text{内} \quad (4)$$

ここに、 $\Omega$  は解析領域を表し、 $u$  は音圧、 $\mathbf{n}$  は解析領域からの外向き法線ベクトル、 $u_{\text{in}}$  は入射波を示す。また、解析開始時は無音状態とする。

境界条件としては以下の二つの式を用いる。式(5)は完全反射の条件式、式(6)は音響インピーダンスに基づき吸音を再現するインピーダンス境界条件式である。

・境界条件

$$\frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}}(\mathbf{x}, t) = 0 \quad : \Gamma \text{上} \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}}(\mathbf{x}, t) = -\frac{\cos \theta}{c} \frac{1 - \gamma}{1 + \gamma} \frac{\partial u}{\partial t}(\mathbf{x}, t) \quad : \Gamma \text{上} \quad (6)$$

ここに、 $\gamma$  は音圧反射率、 $\Gamma$  は解析領域の境界を示す。

また、 $\theta$  は解析境界に対する音波の入射角を示し、本研究では入射波は境界面に対して垂直に入射する( $\theta = 0$ )と仮定する。

**キーワード：** 高速多重極法, 境界要素法, 音響学, 騒音, 遮音壁

**連絡先：** 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学 E-mail: a17.kfgc@chuo-u.ac.jp

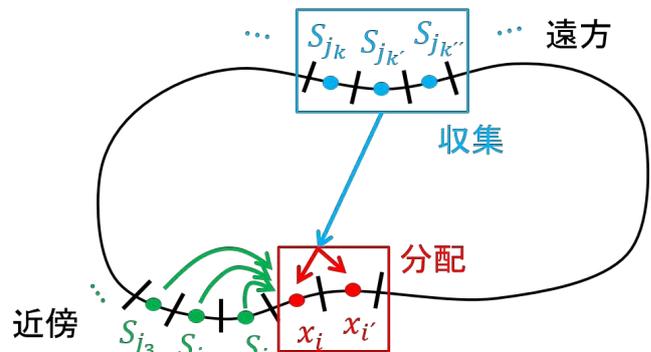


図-1 高速多重極法

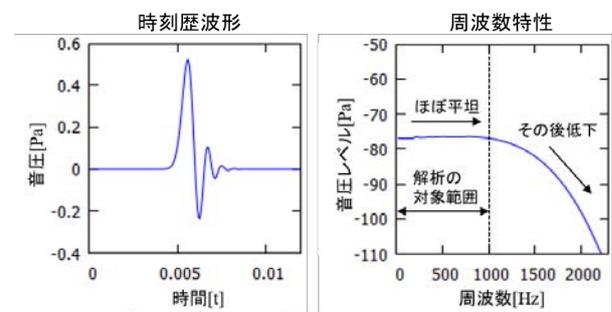


図-2 擬似インパルス

#### (2) 高速多重極法

本手法では大規模な解析を可能とするため、時間域高速多重極法<sup>3)</sup>を用いるとともに、MPIとOpenMPのハイブリッド並列計算手法の導入を行っている。高速多重極法は図-1に示すように解析空間を境界要素で分割し、遠方の要素からの影響をまとめて計算することで計算負荷を低減させる手法である。図では2次元であるが、実際の解析は3次元であり、離散化に用いる境界要素としては、三節点三角形一次要素を用いる。

#### (3) インパルス応答解析

本手法では、Lubichの擬似インパルスを用いたインパルス応答解析に基づく音場解析を行う。インパルス応答解析手法を用いることで、評価対象の音源データを直接入力波として与えて解析を行う場合に比べて解析時間の削減が可能となる。

インパルス応答解析における入力波としては、フラットな周波数特性を持つDiracのデルタ関数を用いることが望ましいが、波形が急峻であるため安定かつ高精度に伝播解析を行うことは困難である。そこで本手法ではインパルス波として、畳み込み積分の近似解法である文献4)で応用されているLubichのCQM(Convolution Quadrature Method)をもとに作成した擬似インパルス波を使用する。本稿で示す例題では、図-2に示す擬似インパルスを入力波として

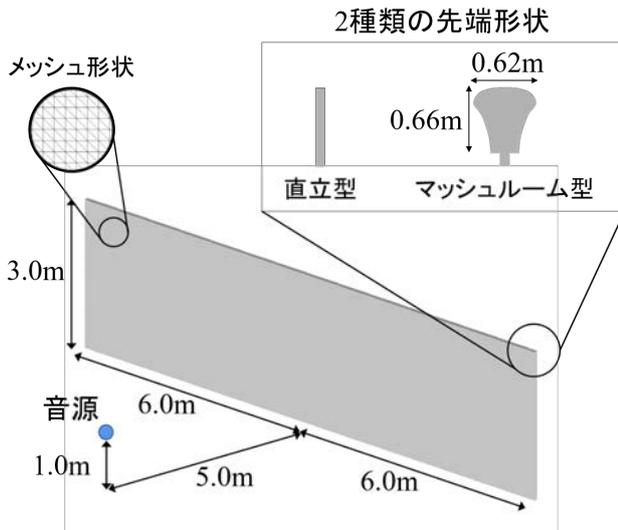


図-3 解析モデル

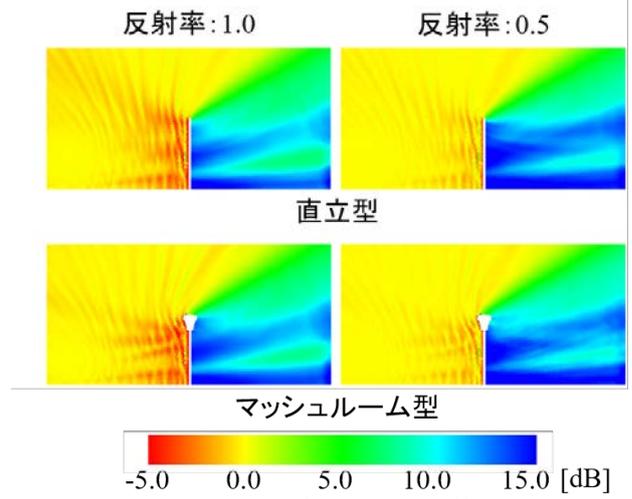
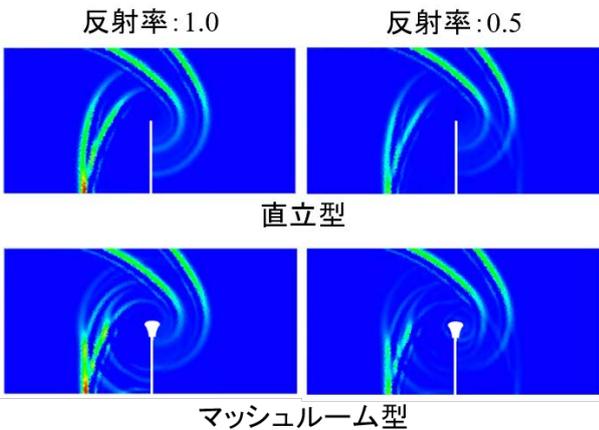


図-6 音圧レベルの比較



0.000 0.002 0.004 0.006 0.008 0.010 [Pa]

図-4 遮音壁と直交する断面上の音圧分布

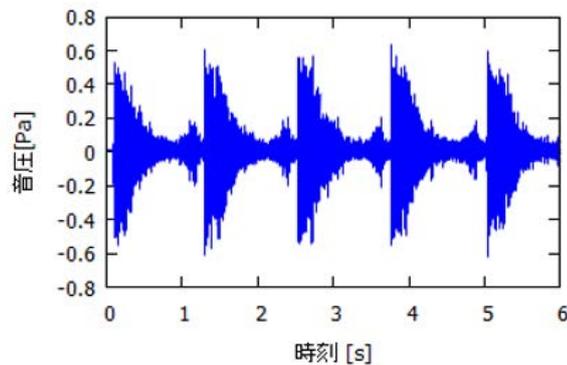


図-5 実音源(杭打ち音)

使用した。図より、この入力波は 1000Hz 程度までフラットな特性を持っていることが分かる。

### 3. 数値解析例

#### (1) 解析条件

図-3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 0.022m である。音速、時間増分幅はそれぞれ、340m/s、0.0667ms とする。それぞれの解析モデルに対して、反射率 1.0 (完全反射) と 0.5 の 2 種類の境界条件を与え、解析を行う。

#### (2) 解析結果

図-4に遮音壁と直交する断面上でのインパルス波の音

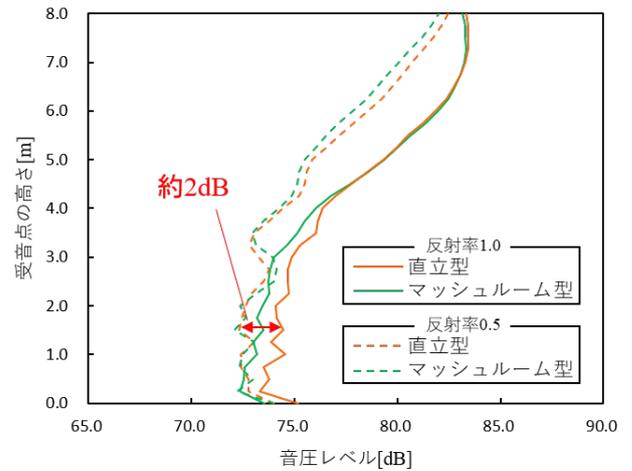


図-7 受音点の高さと音圧レベルの関係

圧分布を示す。また、得られた音圧に対して図-5に示す杭打ち音を畳み込み、図-6に遮音壁のない場合と比較した結果を示す。図において、青色に近いほど音が低減されていることを表す。また、図-7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。これらの図から反射率の考慮により音が低減できていることが確認できる。

### 4. おわりに

本研究では、遮音壁の形状の違いによる遮音効果の検討を行った。他のモデルの解析結果、比較等は講演時に示す。

#### 参考文献

- 1) 日本音響学会 (編) : 音環境の数値シミュレーション-波動音響解析の技法と応用-, 丸善, 2011.
- 2) 庄子諒, 吉川仁, 榎山和男: 境界要素法による音場解析における遮音壁の先端形状が及ぼす影響の検討, 計算工学講演会論文集, 計算工学会, Vol.24, B-02-04, 2019.
- 3) Takahashi, T. : An interpolation-based fast- multipole accelerated boundary integral equation method for the three dimensional wave equation, Journal of Computational Physics Vol.258, pp.809-832, 2014.
- 4) 今井啓太, 吉町徹, 榎山和男: 吸音モデルを考慮したインパルス応答解析手法の構築とVR技術を用いた可聴化, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.75, No2, pp.I 259-I 267, 2019.