

音響インピーダンスを考慮した3次元時間域騒音シミュレーション

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

騒音とは一般に、人にとって不快な音のことを指す。騒音問題が深刻化すると身体的、精神的な被害に発展する恐れがあり、騒音の発生を事前に予測することは重要であるといえる。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。本研究では、高精度なシミュレーションが可能な波動音響理論を採用している。

著者らは、高速多重極境界要素法に基づき MPI-OpenMP ハイブリッド並列による、大規模音場解析手法の構築を行ってきた¹⁾。他方、インピーダンス境界条件により吸音を考慮した音響解析手法の構築²⁾も行ってきたが、これは並列化や高速多重極法を用いた高速化が施されておらず、大規模問題への適用性に難があった。そこで本報告では、本手法の大規模問題への適用性の向上を目標とし、その前段階として、ベンチマーク問題を用いた本手法の有効性の検証と、交通騒音遮音壁のモデルを用いた小規模な騒音伝播解析の例を示す。

2. インピーダンス境界条件を考慮した音場解析

音響インピーダンス Z_n は以下の式で表される、媒質に固有の値である。

$$Z_n = \frac{\rho c}{\cos \theta} \frac{1 + \gamma}{1 - \gamma} \quad (1)$$

ここに、 ρ は媒質の密度、 c は音速、 γ は音圧反射率である。また、 θ は入射角であり、入射波が反射境界面に対して垂直入射のとき $\theta = 0$ である。

続いて、以下にインピーダンス境界条件を持つ初期値・境界値問題を示す。

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

$$\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t) = -\frac{\rho}{Z_n} \frac{\partial u}{\partial t}(\mathbf{x}, t) \quad (\text{on } S) \quad (3)$$

$$u(\mathbf{x}, 0) = 0, \frac{\partial u}{\partial t}(\mathbf{x}, 0) = 0 \quad (\text{in } D) \quad (4)$$

$$u(\mathbf{x}, t) \rightarrow u_{\text{in}}(\mathbf{x}, t), |\mathbf{x}| \rightarrow \infty \quad (\text{in } D) \quad (5)$$

ここに、 u は音圧、 $\mathbf{n}$ は領域からの外向き単位法線ベクトルである。 D 、 S はそれぞれ解析領域、解析境界を示す。式(1)を代入することにより、境界条件(3)は次式のように表される。

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

本報告では、入射波は反射面に対して垂直に入射する ($\theta = 0$) と仮定する。式(6)を以下の境界積分方程式に代入し、

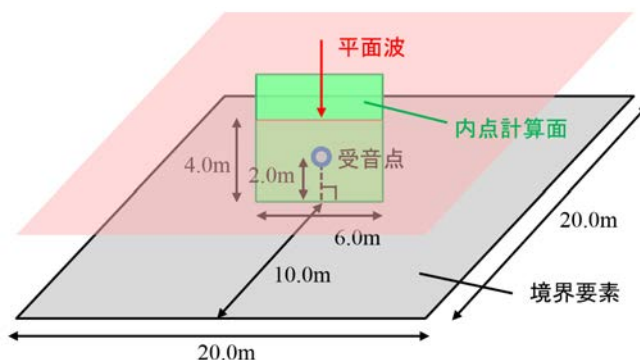


図-1 ベンチマーク問題：解析条件図

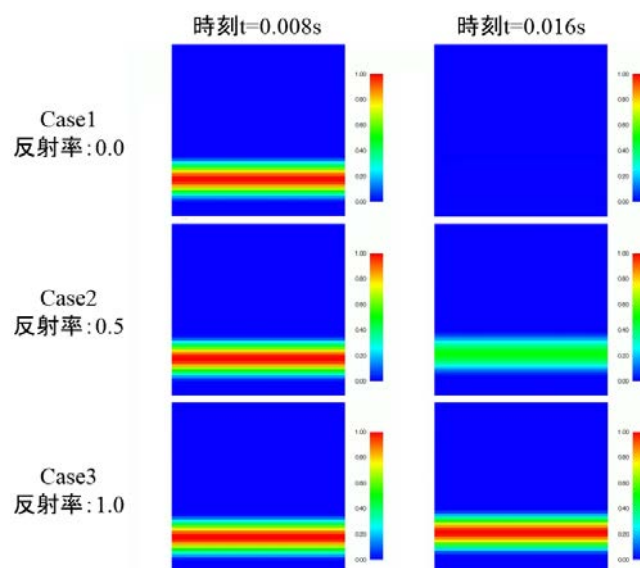


図-2 ベンチマーク問題：解析結果

これを離散化して解くことで音波の伝播解析を行う。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} u(\mathbf{x}, t) \\ &= u_{\text{in}}(\mathbf{x}, t) + \int_0^t \int_S \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - t_0) \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{y}, t_0) dS dt_0 \\ & \quad - \int_0^t \int_S \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - t_0) u(\mathbf{y}, t_0) dS dt_0 \end{aligned} \quad (7)$$

3. 数値解析例

(1) ベンチマーク問題

本手法の妥当性を検証するため、図-1に示す条件で解析を行い、厳密解との比較を行う。入力波は下向きに進行する1波長分のcos波を平面波として与える。解析は3種類の反射率を与えて行う。反射率はそれぞれ、Case1のとき0.0、Case2のとき0.5、Case3のとき1.0である。

KeyWords： 境界要素法, 騒音, 遮音壁, 音響インピーダンス

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

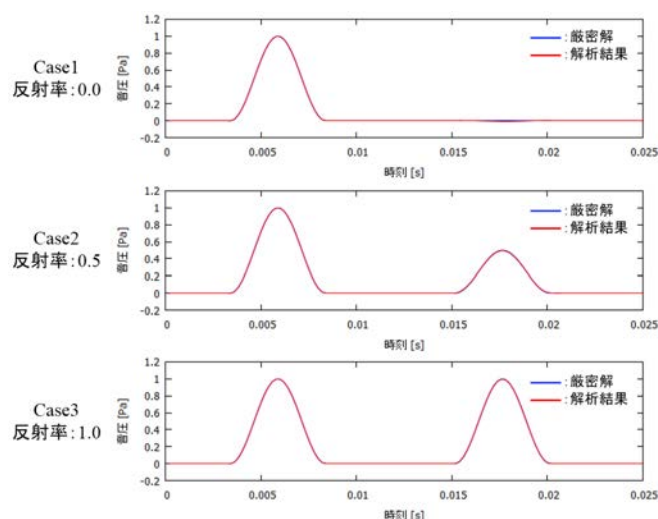


図-3 数値解と厳密解の比較

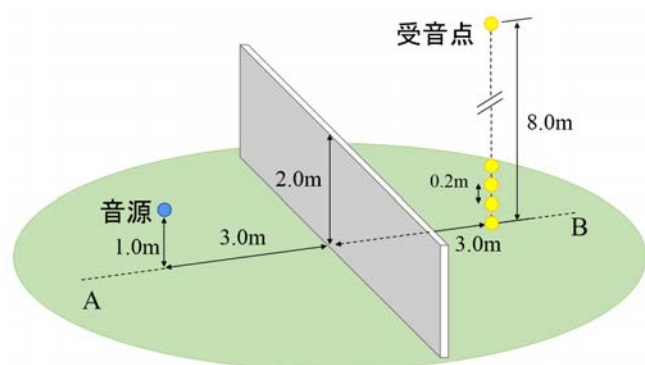


図-4 解析モデル（遮音壁）

図-1に示す緑色の仮想断面上の音圧分布（時刻 $t=0.008s$ および $0.016s$ ）を図-2に示す。時刻 $t=0.008s$ において、波は下向きに進行中であり、まだ反射面の影響は受けていない。その後、図の下端まで到達すると与えられた反射率で反射し、時刻 $t=0.016s$ において波は上向きに進行中である。時刻 $t=0.016s$ の図より、反射率の違いにより反射波の強さが変化している様子が見て取れる。また、図-3に受信点における数値解と厳密解との比較の結果を示す。図より、両者は良い一致を示しており、本手法の有効性が確認された。

(2) 応用問題

続いて、遮音壁のモデルを用いた数値解析例を示す。図-4に解析に用いるモデルを示す。入力波は1波長分のcos波を点音源から発せられる球面波として与える。ベンチマーク問題と同様、3種類の反射率（Case1のとき0.0、Case2のとき0.5、Case3のとき1.0）を与えて解析を行う。これらの条件は遮音壁の表面に導入される。なお、本解析では地面での反射も考慮されるが、これは鏡像音源を配置することにより再現しているため、すべてのケースで完全反射となっている。

遮音壁に直交しA-Bを底辺とする断面上での音圧分布（時刻 $t=0.0178s$ ）を図-5に示す。図より、反射率の違いに基づき、反射波や回折波の大きさが変化している様子が確

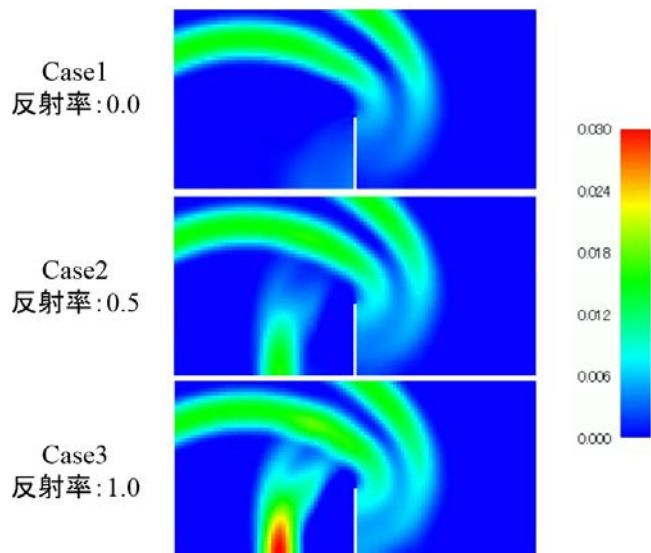
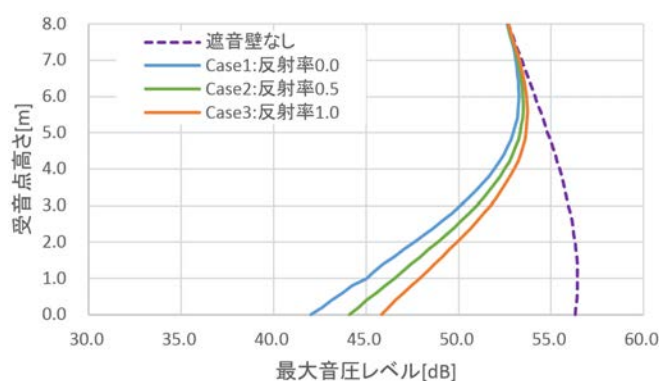
図-5 遮音壁に直交する断面上での音圧分布（時刻 $t=0.0178s$ ）

図-6 受信点の高さと最大音圧レベルの関係

認できる。また、図-6は受信点の高さと最大音圧レベルの関係を示している。なお、高さ3mまでの受信点は遮音壁で回折した音が到達し、3mより上方の受信点には音波が直接到達する。図より、Case1とCase3を比較すると、最大でおよそ4dB程度の差があることが確認できる。また、遮音壁表面を吸音化することにより、音源を直接見通せる位置にある受信点にまで減音効果が現れることが確認された。

4. おわりに

本論文では、インピーダンス境界条件を用いた数値解析例を示し、数値解と厳密解との比較の結果、インピーダンス境界条件により、吸音効果を考慮した解析が可能であることが確認された。

今後の課題として、本手法の高速多重極境界要素法への適用を予定している。

参考文献

- 岡村理一郎, 吉川仁, 高橋徹, 高木貴弘, 檜山和男: 安定化手法を用いた時間域多重極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.
- 高木貴弘, 吉川仁, 岡村理一郎, 檜山和男: インピーダンス境界条件を考慮した時間域境界要素法による音場解析, 第43回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, 2016.