

吸音モデルを考慮した CIP 法による三次元音場解析に関する研究

中央大学 学生員 ○堤 蘭
清水建設株式会社 正会員 谷川 将規
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¹⁾においては騒音影響評価を行うため、CIP 法と AMR 法を用いた、インパルス応答解析手法による数値シミュレーションが行われてきた。また境界条件として完全反射のみならず、吸音効果の考慮が行える Rayleigh モデルの導入が行われてきた。さらに、著者らの従来の研究¹⁾では、地表面に対しては完全反射条件が用いられていたが、実際の道路舗装では排水性舗装などがされており、そのような舗装には吸音効果がある。

本報告では、吸音効果の考慮に関して、Rayleigh モデルの境界条件処理についての検討、及び地表面に対して吸音効果の考慮をした解析を行った。

2. 数値解析手法

(1) 支配方程式と特性曲線法

空気中の波動伝播は運動方程式 (1)、と連続式 (2) で表され、1 次元の場合は以下になる。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

ここで、 p は音圧 [Pa]、 u は粒子速度 [m/s]、 ρ は空気密度 [kg/m³] である。式 (1) に音速 c [m/s] を掛け、式 (2) との和と差を作ると

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c u + p) + c \frac{\partial}{\partial x}(\rho c u + p) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c u - p) - c \frac{\partial}{\partial x}(\rho c u - p) = 0 \quad (4)$$

と表すことができる。この $\rho c u + p$ 、 $\rho c u - p$ を特性曲線に沿って移流させる。

(2) CIP 法

CIP 法は特性曲線に沿って物理量を移流させる移流方程式の差分を用いた高精度の解法である。本論文では三次元伝播問題に対しより高精度な解析が可能な C 型 CIP 法を用いている。詳細は参考文献²⁾を参照されたい。

3. 多孔質型吸音材

防音対策のための設計・計画では、吸音機構の材料特性を考慮することが重要である。本研究では多孔質タイプの吸音材に注目し、その中でも最も簡便で広く用いられている Rayleigh モデルを適用する。このモデルは吸音機構として空気の粘性による粘性減衰を利用した解析モデルであり、例えばグラスウールやロックウールなどの繊維材料に対して内部伝播を考慮して解析を行うことが可能である。

図-1 に示すように、多孔質材料を非常に薄い音響管に近似する。Rayleigh モデルの定式化については、式 (1),(2) の

支配方程式に σ を用いた減衰項を加える形で、次のように表される。

$$\frac{k}{\phi} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = -\sigma u \quad (5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\rho c^2}{\phi} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

ここで、各パラメータは、 σ :空気の粘性抵抗 [kg/m³s]、 k :構造係数、 ϕ :多孔度である。構造係数 k は、空隙が空気の流れに寄与できるのかを表すパラメータ、多孔度は空気が占める割合を示すパラメータである。本研究では簡単のため k と ϕ の両方を 1 としている。

4. インパルス応答解析

(1) インパルス応答

インパルス応答とはインパルスと呼ばれる非常に短い波を入力した時の受音点で得られる応答のことである。厳密なインパルスは形が急峻なため、離散化を行い精度よく扱うことは困難である。そこで解析するうえでは、離散化を容易に行うために擬似インパルスを用いる。

(2) 擬似インパルスの生成

今回は擬似インパルスとして、畳み込み積分の離散近似手法である Lubich の Convolution Quadrature Method(CQM) で提案された次式を擬似インパルスの式として用いる。

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

ここで、 $\omega_n(\Delta t)$ は離散化された畳み込み積分の重み、 R は目標とする精度、 L は積分区間の分割数、 n は時間ステップ数、 r は周波数特性を決めるパラメータである。式 (7) において $R=0.9988$ 、 $\Delta t=0.020525\text{ms}$ 、 $L=2000$ 、 $r=0.2\text{m}$ として、約 2500Hz 付近までフラットとなる周波数特性をもつ疑似インパルスを作成した (図-2 参照)。詳細は参考文献³⁾を参照されたい。

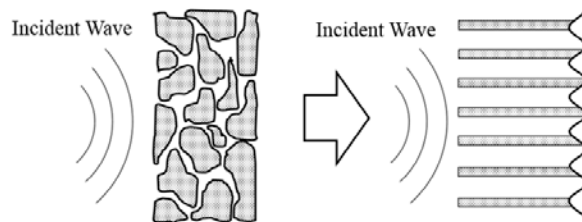


図-1 Rayleigh モデル

KeyWords : AMR 法, CIP 法, Rayleigh モデル, 多孔質吸音材

連絡先 : 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学 TEL 03-3817-1815 E-mail:a16.maye@g.chuo-u.ac.jp

5. 数値解析例

(1) 数値解析例 1

Rayleigh モデルを適用した遮音壁において背後に完全反射面を設置することによって、透過波の発生を防ぐ解析を行った。

a) 解析条件

解析領域は図-3 に示すとおりであり、入射境界から 1m の位置に仮想音源を設定し、遮音壁を領域の中央に設置し、受音点を遮音壁の裏に配置する。媒質を空気とし、媒質密度は 1.205kg/m^3 、時間離散化幅は $\text{CFL}=0.45$ に基づいて求められる。最小空間離散化幅 1.5625cm 、時間離散化幅 0.020525ms の条件において計算を行った。また、case1(遮音壁：完全反射)、case2(遮音壁：多孔質吸音材)、case3(遮音壁：音源側が多孔質吸音材、受音点側が完全反射) の 3 通りで解析を行った。それぞれの case において地表面は完全反射を仮定し、詳細図は図-4 に示す。

b) 解析結果

結果の時刻歴を図-5 に、可視化結果を図-6 に示す。遮音壁における球面波の回折、反射、透過の様子が確認できる。また、完全反射面を設けて透過波を防いだことによって、音圧値の低減が確認できる。

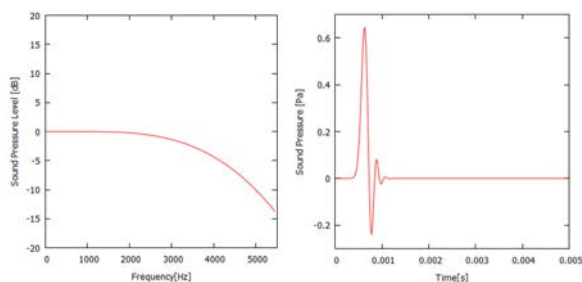


図-2 用いた疑似インパルスとその周波数特性

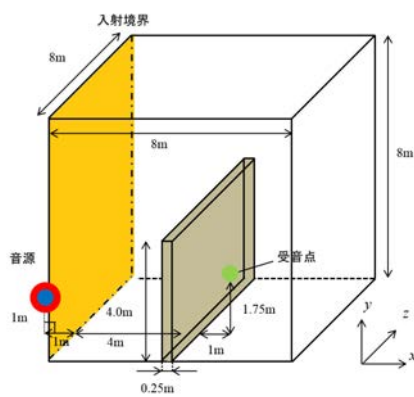


図-3 解析領域

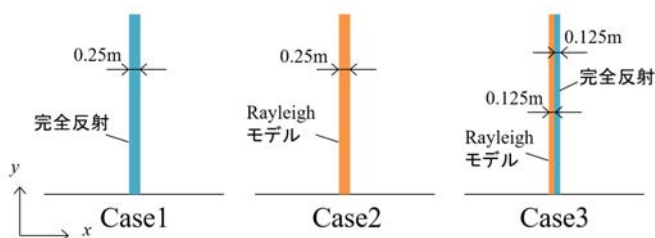


図-4 解析領域の詳細図

(2) 数値解析例 2

数値解析 1 の case3 の条件に対して、遮音壁の受音点側にも Rayleigh モデルを適用し、地表面に対して吸音効果を考慮した解析を行った。また、この解析によって得られた受音点でのインパルス応答を用いて、工事騒音との畳み込みも行った。それらの解析結果は講演時に示す。

6. おわりに

本研究では Rayleigh モデルの遮音壁において、透過波を防ぎ、音圧値が低減することを示した。また、排水性舗装の考慮によって音圧値の低減、および畳み込みを行った際の高周波成分における音圧レベルの低減を示した。今後の予定として、時変畳み込みを用いた移動音源問題への適用を検討している。

参考文献

- 1) 今井啓太, 吉町徹, 檜山和男: 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, 応用力学論文集, vol.75, No.2, pp.259-267, 2019.
- 2) H.Takewaki, A.Nishiguchi and T.Yabe: Cubic interpolated pseudo-particle method (CIP) for solving hyperbolic-type equations, J. Comput.Phys., vol.61, pp.261-268, 1985.
- 3) C. Lubich: Convolution Quadrature and Discretized Operational Calculus.I., Numer.Math.52, pp.129-145, 1988.

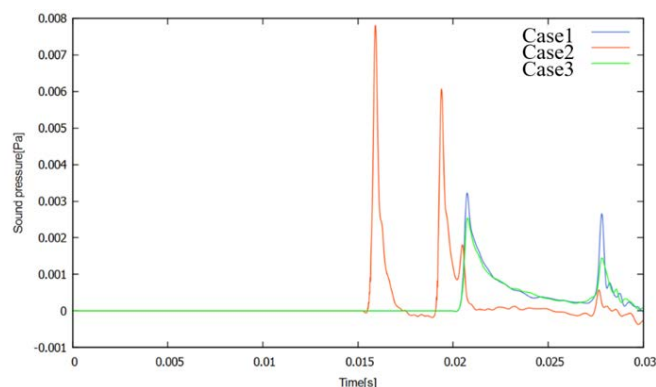


図-5 受音点での時刻歴

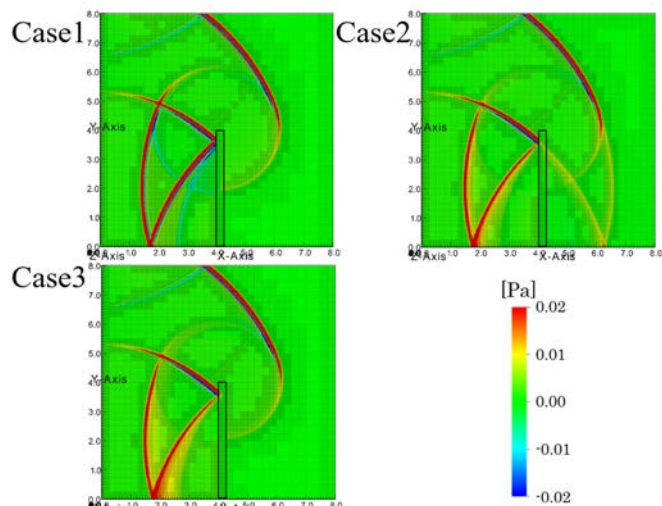


図-6 可視化結果