

Rayleigh モデルを用いた CIP 法による音場解析に関する研究

中央大学 学生員 堤 蘭
中央大学 正会員 櫻山 和男

1. はじめに

騒音とは人の健康及び生活環境に影響を及ぼす音のことを言う。近年、工場や工事現場からの騒音によって健康被害を受けるなど、この問題が深刻化しており、シミュレーションに基づく騒音影響評価が必要である。既往の研究¹⁾では遮音壁に吸音効果を考慮するため Rayleigh モデルの導入が行われてきた。しかし従来の研究では地表面には完全反射の条件が用いられてきた。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、Rayleigh モデルを道路面に対して適応し、その吸音効果についての検討を行った。

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次元の場合は以下ようになる。

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

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

ここで、 p は音圧 [Pa]、 u は粒子速度 [m/s]、 ρ は空気の密度 [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。

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

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 $R=0.9988$ 、 $\Delta t=0.020525\text{ms}$ 、 $L=2000$ 、 $r=0.2\text{m}$ として作成された擬似インパルスとその周波数特性を図-2 に示す。詳細は参考文献³⁾⁴⁾を参照されたい。

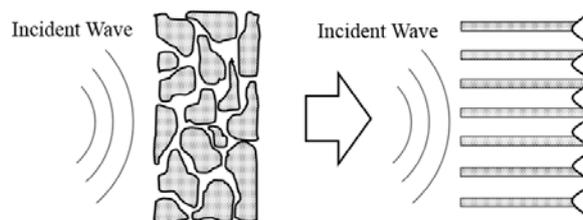


図-1 Rayleigh モデル

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

地表面に多孔質吸音材を仮定した三次元音場解析を行うために以下の条件で解析を行った。

(1) 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(地表面：完全反射，遮音壁：完全反射)，case2(地表面：完全反射，遮音壁：多孔質吸音材)，case3(地表面：多孔質吸音材，遮音壁：多孔質吸音材) の 3 通りで解析を行った。

(2) 解析結果

結果の時刻歴を図-4 に、可視化結果を図-5 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。また図-4 における 2 波目は地表面からの反射波であり、地表面に吸音材を考慮することによって反射波の低減が確認できる。

6. おわりに

本研究では排水性舗装の考慮のため地表面に吸音条件を導入した解析を行った。その結果、完全反射の道路面に比べ吸音効果により道路面からの反射波が低減することを示

した。

今後の課題として、時変置み込み演算を用いた移動音源問題への適用について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 今井啓太, 吉町徹, 櫻山和男: 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 による可聴化, 第 46 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, 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.
- 4) 斎藤隆泰, 福井卓雄, 石田貴之: 三次元スカラー波動および弾性波動問題における演算子積分時間領域境界要素法, 応用力学論文集, vol.10, pp.217-224, 2007.

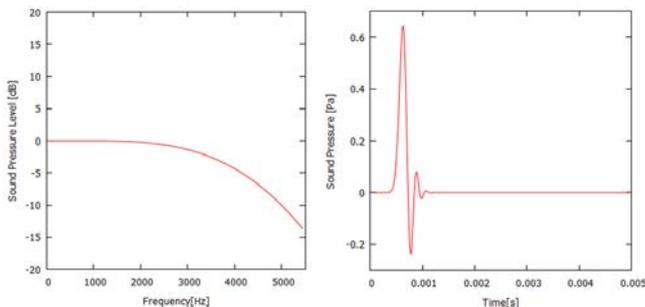


図-2 用いた擬似インパルスと周波数特性

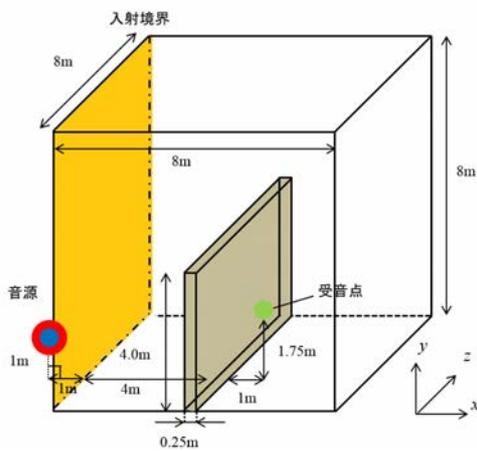


図-3 解析領域

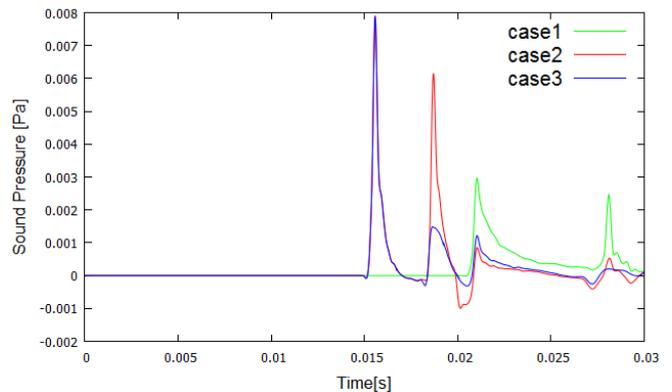


図-4 受音点での時刻歴

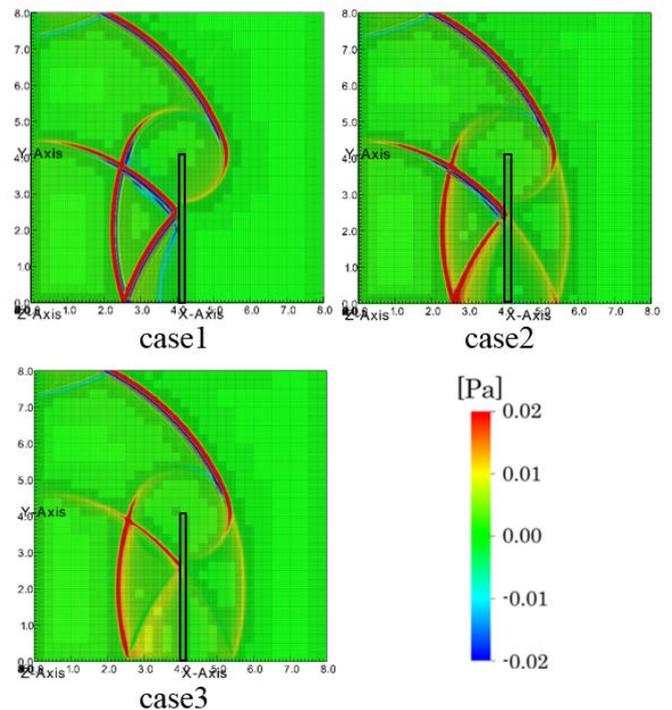


図-5 可視化結果