

## 吸音モデルを考慮した音場解析手法の移動音源問題への適用

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。しかし既往の研究<sup>1)</sup>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、吸音効果を地表面に考慮し、それらの問題に対して時変量み込みを用いた移動音源問題の適用を行った。

### 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]、 $\rho$  は空気の密度 [kg/m<sup>3</sup>] 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<sup>2)</sup>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。このモデルは多孔質材料を非常に薄い音響管に近似し、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。詳細は参考文献<sup>1)</sup>を参照されたい。

### 4. インパルス応答解析

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。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。

$$\omega_n(\Delta t) \cong \frac{R^{-n}}{L} \sum_{l=0}^{L-1} \left( \frac{1}{4\pi r} e^{-\frac{sr}{c}} \right) e^{(-2\pi i \frac{nl}{L})} \quad (5)$$

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。詳細は参考文献<sup>3)4)</sup>を参照されたい。

### 5. 時変量み込み演算による移動音源

騒音問題は、工事騒音などの静止音源問題と交通騒音などの移動音源問題がある。移動音源問題の再現方法として、時変量み込み演算を適用する。

#### (1) 時変量み込み

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  $p(t)$  は移動音源の波動方程式より次式で与えられ、近似的に式 (6) で表せることが示されている<sup>5)</sup>。

$$p(k) = \sum_{k_s=0}^{\infty} s(k_s) h(k - k_s, x(k_s)) \quad (6)$$

また、式 (6) は行列の演算の形で次式で表せる。

$$\mathbf{p} = \mathbf{H} \mathbf{s} \quad (7)$$

$$\mathbf{s} = [ s(1) \quad s(2) \quad \cdots \quad s(L_s) ]^T$$

$$\mathbf{p} = [ p(1) \quad p(2) \quad \cdots \quad p(L_s + L_h - 1) ]^T$$

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

**KeyWords:** AMR 法, CIP 法, Rayleigh モデル, 多孔質吸音材, 時変量み込み演算

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

ここで、 $s$  が音源信号ベクトル、 $p$  が受信信号ベクトル、 $H$  が時変畳み込み行列、 $L_s$  は音源信号長、 $L_h$  はインパルス応答長である。

## 6. 数値解析例

### (1) 地表面に吸音効果を考慮した固定音源問題

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。

#### a) 解析条件

解析領域は図-1 に示すとおりである。媒質を空気とし、媒質密度は  $1.205\text{kg/m}^3$ 、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  $1.5625\text{cm}$ 、時間離散化幅  $0.020525\text{ms}$  の条件において計算を行った。インパルスとして式 (5) 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を用いた。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。

#### b) 解析結果

結果の時刻歴を図-2 に、可視化結果を図-3 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-2 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。

### (2) 地表面に吸音効果を考慮した移動音源問題

#### a) 解析条件

空気の媒質密度，最小空間離散化幅，時間離散化幅，擬似インパルスは 6.(1)a) と同様の条件を用いて解析を行った。時変畳み込み行列を作成するための音源から伝搬する音源信号としては大型トラックの走行音を用い，音源の移動速度は  $80\text{km/h}(22\text{m/s})$  とした。

#### b) 解析結果

時変畳み込みを行って求めた，結果の時刻歴，周波数特性，可聴化音などは講演時に示す。

## 7. 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，完全反射の地表面に比

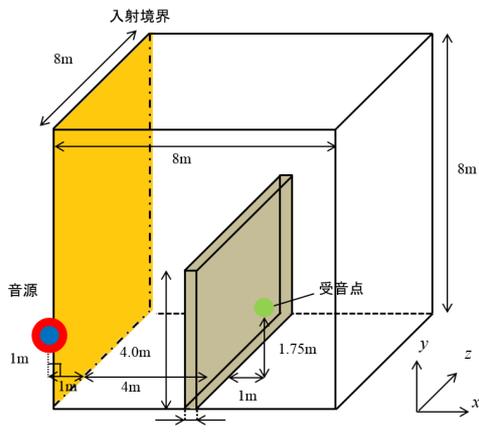


図-1 解析領域

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，没入型 VR 装置による可視化，可聴化を行う予定である。

### 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。
- 5) 中島弘史，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，第 21 回人口知能学会全国大会，2007。

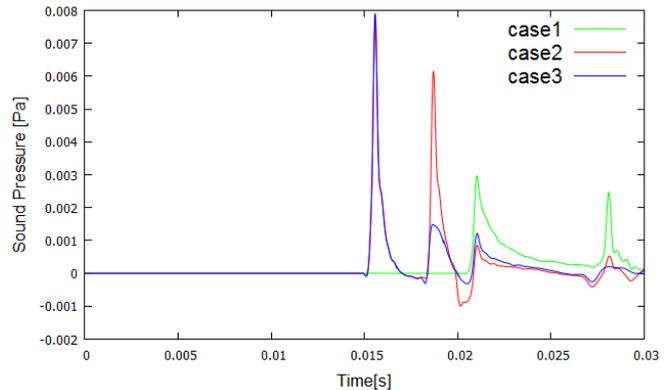


図-2 受信点での時刻歴

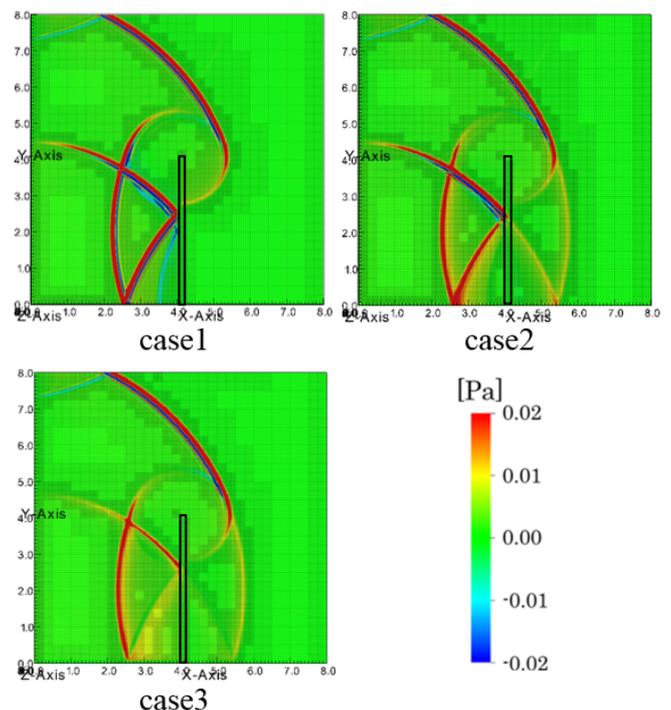


図-3 可視化結果