

CIP法に基づく道路交通騒音シミュレーション

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

騒音とは典型七公害の1つであり、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、航空機・鉄道・道路などの交通騒音や工事騒音などによる騒音の苦情件数が典型7公害の中で最も多いものとなっている。著者ら¹⁾は騒音の影響評価を行うため、CIP法とAMR法に基づく数値解析と可聴化について研究を行ってきた。また、遮音壁での吸音効果を考慮するためにRayleighモデルの導入を行ってきた。しかし、実際の道路舗装では排水性舗装が一般的となっており、そのような場合には吸音効果を考慮する必要がある。

そこで本報告では、地表面に対しても吸音効果をRayleighモデルにより考慮するとともに、道路交通騒音を対象とした移動音源問題に対して時変畳み込み手法を導入して、それらの妥当性の検証を行った。

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差分法に基づく高精度の解法である。本論文では三次元伝播問題に対して、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¹⁾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。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。詳細は参考文献³⁾⁴⁾を参照されたい。

5. 時変畳み込み演算の移動音源問題への適用

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に大別される。移動音源問題の再現方法として、時変畳み込み演算を適用する。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(5)で表せることが示されている⁵⁾。

$$p(k) = \sum_{k_s=0}^{\infty} s(k_s)h(k - k_s, x(k_s)) \quad (5)$$

また、式(5)は行列の演算の形で次式で表せる。

$$\mathbf{p} = \mathbf{H}\mathbf{s} \quad (6)$$

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

式(5)における \mathbf{s} が音源信号ベクトル、 \mathbf{p} が受音信号ベクトル、 \mathbf{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。時変畳み込み行列の作成にあたっては、すべての音源位置からのインパルス応答を求める必要があるが、求められるインパルス応答にも限界があるため、基準点からの距離減衰によって各位置でのインパルス応答を求めた。

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。

KeyWords: AMR法, CIP法, Rayleighモデル, 多孔質吸音材, 時変畳み込み演算

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

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 1.205kg/m^2 ，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，地表面：完全反射)，case2(遮音壁：完全反射と Rayleigh モデル，地表面：完全反射) の case3(遮音壁：完全反射と Rayleigh モデル，地表面：排水性舗装) の3通りで解析を行った。

b) 解析結果

結果の時刻歴を図-3 に，可視化結果を図-4 に示す。遮音壁における球面波の回折，反射及び，地表面における排水性舗装による吸音の様子が確認できる。

(2) 地表面に吸音効果を考慮した移動音源問題

時変畳み込み行列作成の際に，音源と受音点の距離が最も近い点でのインパルス応答を基準として，幾何音響理論の距離減衰によって他の点の音圧値を求めていた。本報告ではその妥当性についての検証を行った。解析領域は図-5 に示すとおりである。結果は講演時に示す。

7. おわりに

本報告では排水性舗装の吸音効果考慮するために Rayleigh モデルを適用するとともに，道路交通騒音を対象とした移動音源問題に対して時変畳み込み手法を導入して，それらの妥当性の検証を行った。その結果，完全反射の地表面に比べ吸音効果により道路面からの反射波の低減，時変畳み込みを用いることで，移動音源問題の定性的な評価が可能であることを示した。

今後は，実測値との定量的な比較に基づく妥当性の検証を行う予定である。

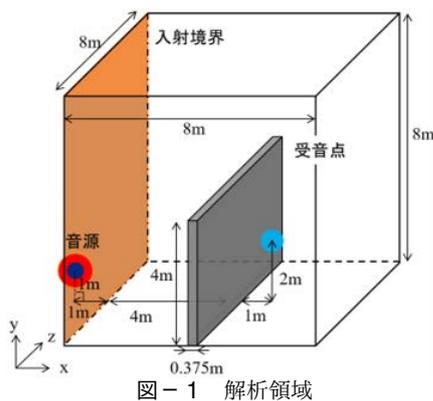


図-1 解析領域

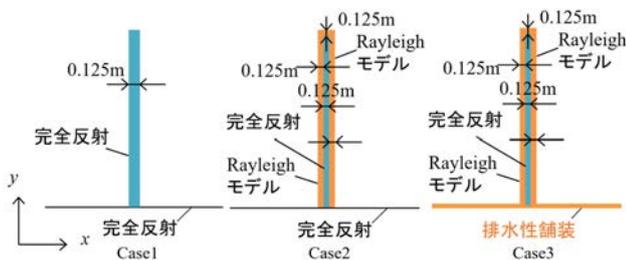


図-2 遮音壁と地表面の詳細図

参考文献

- 1) 今井啓太，吉町徹，樫山和男：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.
- 4) 齋藤隆泰，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.

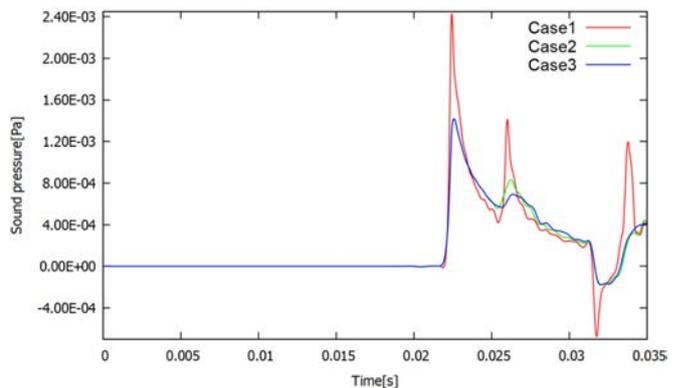
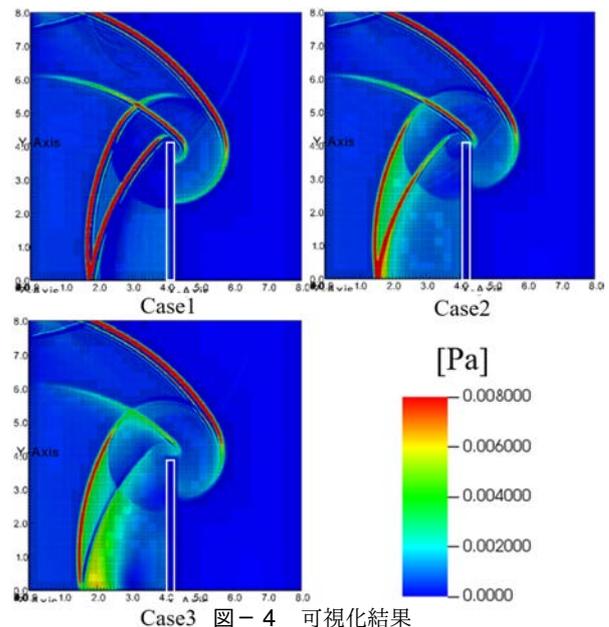


図-3 受音点での時刻歴



Case3 図-4 可視化結果

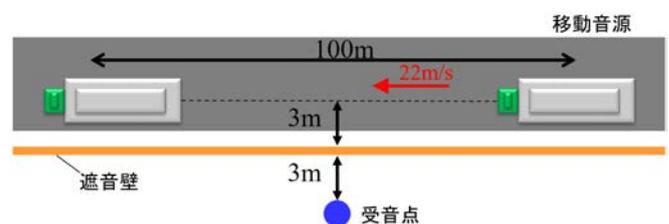


図-5 移動音源解析例