

CIP法に基づく吸音効果を考慮した道路交通騒音シミュレーション

Road traffic noise simulation considering sound absorption based on CIP method

20N3100027J 堤 蘭 (計算力学研究室)
Ran TSUTSUMI/ Computational Mechanics Lab.

Key Words : CIP method, Rayleigh model, Impulse response, Time-variant convolution

1. はじめに

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ため、騒音問題に対して数値シミュレーションに基づいた事前予測が必要である。著者らの研究グループは既往の研究¹⁾において定量的な騒音影響評価を行うため、CIP法を用いたインパルス応答解析に基づく数値シミュレーション手法の構築を行い、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。また、実際の騒音問題への適用例としては、工事騒音などの固定音源問題に限られていた。

そこで本研究では、Rayleighモデルを用いた地表面に対しての吸音効果の考慮、さらに交通騒音などの移動音源問題への適用を可能とするために時変畳み込み手法の導入を行い、道路交通騒音問題を対象として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

空気中の波動伝播の基礎式は運動方程式(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)との和と差をとると

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

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

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

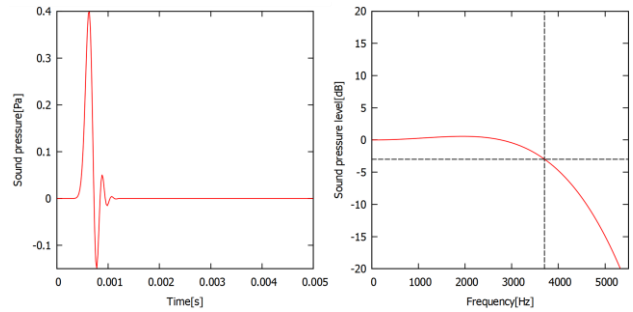


図-1 用いた擬似インパルス(左)とその周波数特性(右)

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) 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。音源での入力波形とインパルス応答の畳み込みを行うことによって受音点での出力波形を得ることができる。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。本報告では、-3dBまでフラットとみなせると仮定すると約3700Hz付近までフラットとなる擬似インパルスを用いた(図-1)。詳細は参考文献^{3,4)}を参照されたい。

3. 多孔質吸音材

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

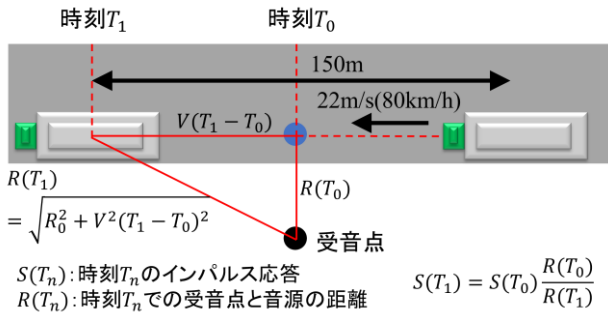


図-2 時変畳み込みの補正方法

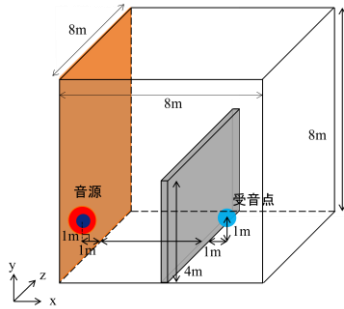


図-3 解析領域

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。

Rayleigh モデルの定式化については、式(1), (2)の支配方程式に流動抵抗 σ を用いた減衰項を加える形で表される。ここで、Rayleigh モデルは、多孔質材料を非常に薄い音響管に近似するモデルであり、ポアズイユの法則がこの音響管に適用され管の両端に作用する単位長さ当たりの圧力差は、流動抵抗 σ を仮定して次の式で表せる。

$$\sigma = \frac{8\eta k}{R^2\phi} \quad (6)$$

2章1節と同様に移流方程式を導くと式(7), (8)のように書ける。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c u + p) + c \frac{\partial}{\partial x}(\rho c u + p) = -\sigma c u \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c u - p) - c \frac{\partial}{\partial x}(\rho c u - p) = -\sigma c u \quad (8)$$

式(7), (8)の左辺に関しては空気中の波動伝搬と同様にCIP法を用いて解くこととする。外力項(非移流項)である右辺に関しては、この外力値を一定とみなし一次元の運動方程式として差分法を用いて解く。すなわち二つのステップに分けて解くこととなる。ここで、各パ

ラメータは、 σ :空気の粘性抵抗[$\text{kg/m}^3\text{s}$], 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. 時変畳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に大別される。本報告では、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(9)で表せることが示されている⁵⁾。

$$p(k) = \sum_{k_s=0}^{\infty} s(k_s) h(k - k_s, x(k_s)) \quad (9)$$

また、式(6)は行列の演算の形で次式で表せる。

$$\mathbf{p} = \mathbf{H} \mathbf{s} \quad (10)$$

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

ここで、 \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。音源が移動するすべての点からのインパルス応答を数値解析で求めることは困難であるため、図-2のように基準点からのインパルス応答を用いてその他の点のインパルス応答を距離減衰による補正で求めている。

5. 数値解析例

本手法の妥当性の検証のため、工事騒音を対象とした固定音源問題と交通騒音問題を対象とした移動音源問題に適用した。

(1) 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-3に示すとおりである。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、

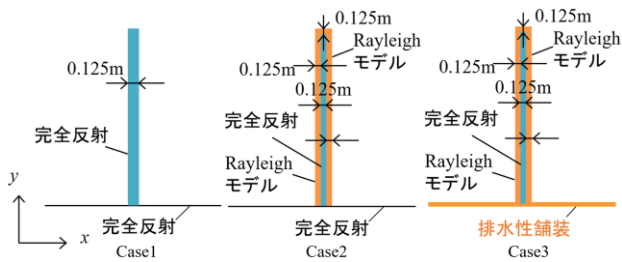


図4 遮音壁と地表面の詳細

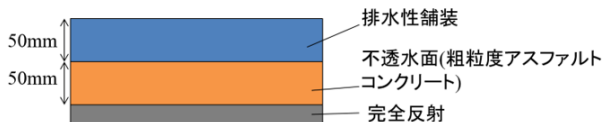


図5 排水性舗装の構造

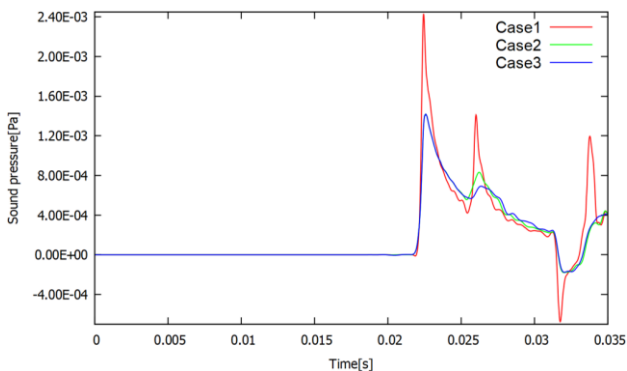


図6 結果の時刻歴

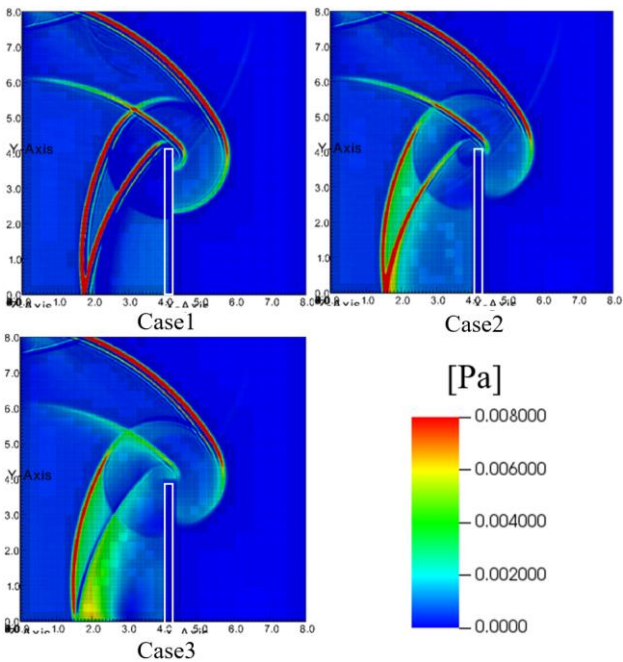


図7 可視化結果

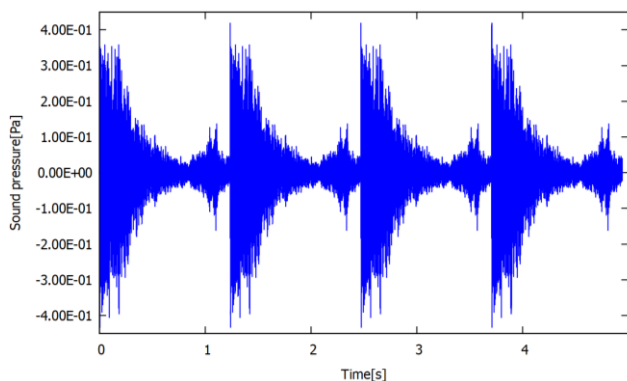


図8 畳み込みに用いた杭打機の音源

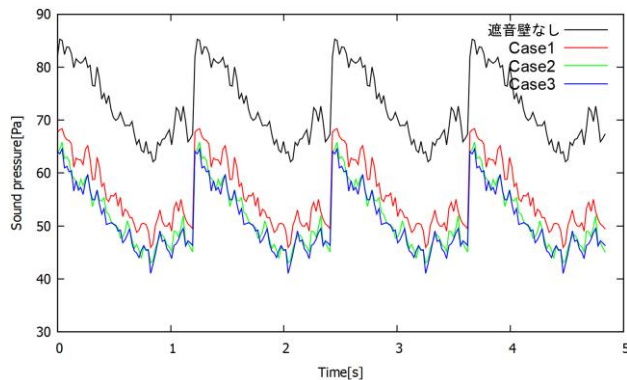


図9 畳み込んだ結果の時刻歴

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。遮音壁の多孔質吸音材の流動抵抗は $\sigma = 15000\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$ とした。それぞれのCaseにおける遮音壁と地表面の詳細を図4に、排水性舗装の構造を図5に示す。上部から順に、排水性舗装面(流動抵抗 $\sigma = 15000\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$)，不透水面である粗粒度アスファルトコンクリート($\sigma = 2000\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$)，完全反射面の考慮を行った。

b) 解析結果

図6に受音点における音圧値の時刻歴を、図7に遮音壁と直交する断面上の音圧分布を示す。Case2はCase1と比べ、遮音壁に吸音材を適用したことによる音圧値の低減、Case3はCase1，Case2と比べ、地表面に排水性舗装を考慮したことによって反射波の音圧値の低減が確認できる。図7より、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。

c) 工事騒音との畳み込み

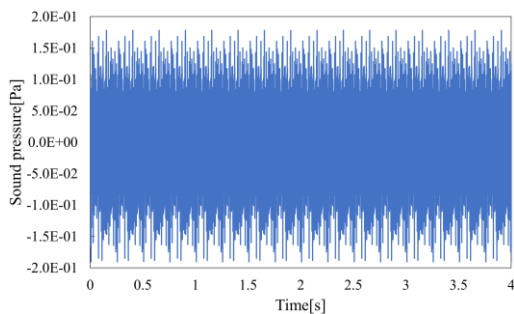


図-10 時変畳み込みに用いたトラックの走行音

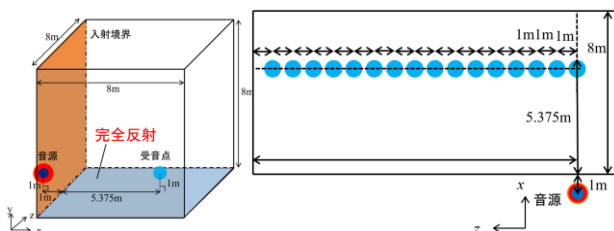


図-11 数値解析例 遮音壁なし

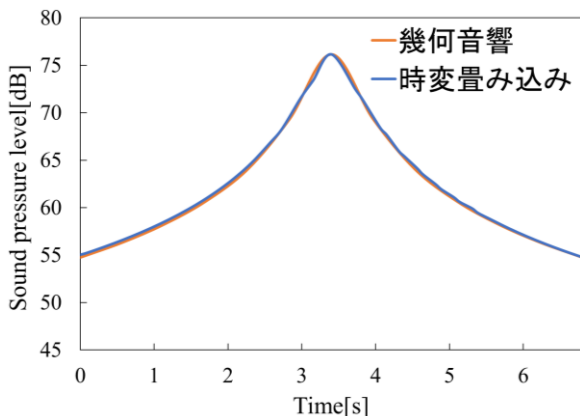


図-12 時変畳み込み結果と幾何音響による計算結果の比較

求めたインパルス応答を用いて、工事騒音との畳み込みを行った。畳み込みに用いた音源を図-8に示す。受信点における結果の時刻歴を図-9に示す。図-9より、遮音壁がない状態から完全反射の遮音壁を考慮することで約15dBの低減、吸音材の考慮を行うことで約4.5dBの低減が行われていることが確認できる。完全反射の遮音壁の考慮に加え、遮音壁、地表面への吸音効果の考慮によって音響パワーレベルの効果的な低減が行われていることが確認できる。

(2) 移動音源問題(遮音壁なし)

解析が行える領域には限界があるため、図-2のように基準点からのインパルス応答を用いてその他の点のインパルス応答を距離減衰による補正で求めている。妥当性の検証のため、時変畳み込み演算による結果と幾何音響による計算結果の比較を行った。

a) 解析条件

解析領域は図-11に示すとおりである。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。移動音源問題への時変畳み込み演算の適用の妥当性検証のために、図-2の解析領域で解析を行った。用いた音源は図-10に示すトラックの走行音源、トラックの走行速度は $22\text{m/s}(80\text{km/h})$ 、走行距離は 150m 、音源と受信点の最短距離は 6.375m である。

b) 解析結果

求めたインパルス応答とトラックの走行音源を用いて時変畳み込みを行った結果と、幾何音響による計算を行った結果の比較を行った。結果を図-12に示す。遮音壁がない場合には両者は良い一致が見られることが確認できる。

6. おわりに

本報告では排水性舗装の吸音効果を考慮するために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、以下の結論を得た。

- 遮音壁、地表面にRayleighモデルを適用すると、約4.5dB程度の低減効果になることを示した
- 時変畳み込みを用いることで、遮音壁がない場合には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や没入型VR装置への導入を行う予定である。

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.
- 4) 鹿野洋, 横山栄, 坂本慎一, 笹岡岳陽, 波頭伸哉: 3次元FDTD法による車内音場解析一拡張作用境界モデルの適用, 生産研究, vol.63, No.2, pp.235-240, 2011.
- 5) 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.