

CIP 法に基づく時変畳み込み演算を用いた道路交通騒音シミュレーション

中央大学
清水建設株式会社
中央大学

学生会員 ○堤 蘭
正会員 谷川 将規
正会員 檜山 和男

1. はじめに

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、遮音壁や排水性舗装の吸音効果の考慮を行うために Rayleigh モデルの導入を行ってきた。しかし、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。

そこで本報告では、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. 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) で提案された式を擬似インパルスの式として用いる。本報告で

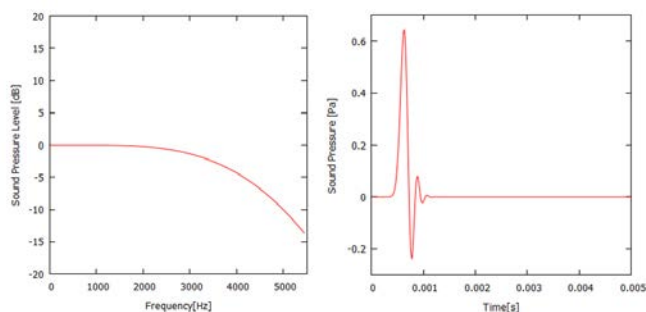


図-1 用いた擬似インパルス (左) とその周波数特性 (右)

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。

4. 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。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 (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、図-2 に示す方法で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。

KeyWords : AMR 法, CIP 法, 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

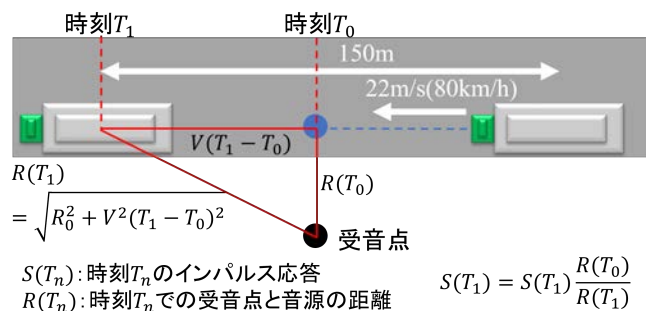


図-2 時変量み込みの補正方法

5. 移動音源考慮の妥当性の検証

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。遮音壁がある場合、遮音壁に対する入射角の差異が疑似インパルスの回折に及ぼす影響についての考慮を行う必要がある。

(1) 遮音壁なし

a) 解析条件

基準となるインパルス応答を求める際の解析条件を以下に示す。解析領域は図-4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量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-3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 、音源と受音点の最短距離は 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量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-5に示す。遮音壁がない場合では両者は良い一致が見られることが確認できる。

(2) 遮音壁あり

各受音点でのインパルス応答を補正によって求める際の、遮音壁に対する入射角の差異が回折効果に及ぼす影響についての検討のため、図-6に示す解析を行い、妥当性の検証を行った。結果は講演時に示す。

6. おわりに

本報告では道路交通騒音を対象とした移動音源問題に対して時変量み込み手法を導入して、計算結果の妥当性の検証幾何音響理論に基づく手法との比較のもとに行った。その結果、遮音壁がない場合には両者は良い一致を示した。

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, 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 inter-

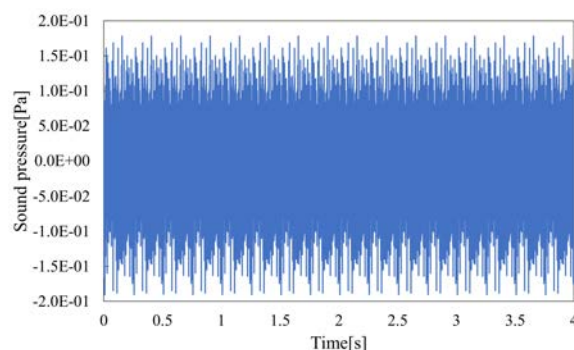


図-3 時変量み込みに用いた音源

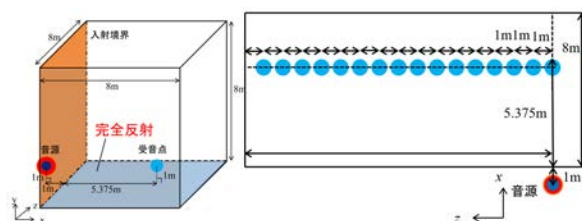


図-4 数値解析例 壁なし

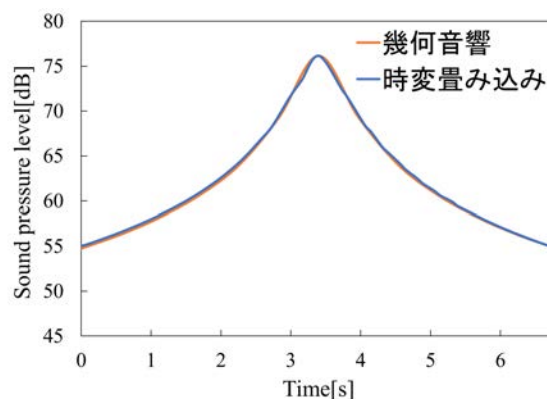


図-5 時変量み込み結果と幾何音響による計算の比較

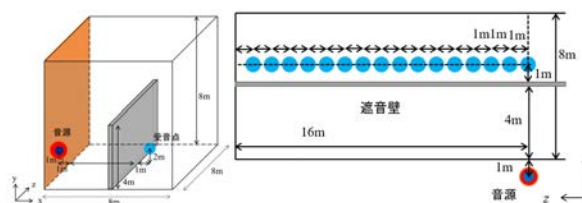


図-6 数値解析例 壁あり

polated 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.