

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

中央大学大学院 学生員 ○今井 啓太
(株)JSOL 正会員 吉町 徹
中央大学 正会員 檜山 和男

1. はじめに

騒音とは一般に、不快な音、好ましくない音のことを言い、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、近年この問題が深刻化しており騒音影響の事前予測が不可欠である。著者らの既往の研究¹⁾では音場解析を効率的に行うため、波動音響理論に基づくAMR(Adaptive Mesh Refinement:解適合格子法)法とCIP法²⁾を用いた音場解析手法が構築されてきた。しかし、既往の手法では完全反射境界のみを用いた解析が行われてきたため遮音壁や路面などの吸音効果の考慮はされておらず、また、解析対象も工事騒音などの固定音源問題にとどまっていた。

そこで本研究では、グラスウールなどの多孔質吸音材を付した遮音壁を想定し、インパルス応答解析に基いた、吸音モデルを考慮した解析手法を構築し、交通騒音を対象とした移動音源問題へ適用した。

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 : 音圧 [Pa], u : 粒子速度 [m/s], ρ : 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。 $\rho c u + p$ を f_x^+ , $\rho c u - p$ を f_x^- とおくと、各地点、各時間ステップにおける音圧 p と粒子速度 u は以下の様に求まる。

$$p = \frac{1}{2}(f_x^+ - f_x^-) \quad (5)$$

$$u = \frac{1}{2\rho c}(f_x^+ + f_x^-) \quad (6)$$

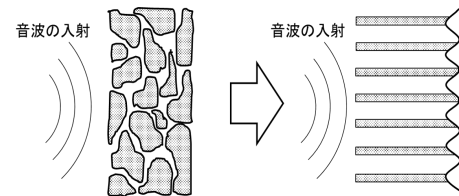


図-1 Rayleigh Model

(2) CIP 法

CIP(Constrained Interpolation Profile) 法は特性曲線に沿って物理量を移流させる移流方程式に対する高精度の差分解析法である。多次元問題は1次元CIP法をそれぞれの座標軸方向に拡張する。本手法ではより高精度な解析が可能なC型CIP法を用いている。

3. 多孔質吸音材

本研究では多孔質タイプの吸音材に注目し、その中でも最も単純で広く知られているRayleighモデルを適用する³⁾。このモデルは吸音機構として空気の粘性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できる。

Rayleighモデルは図.1に示すように、多孔質材料を非常に細い音響管に近似する。この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、以下のように表される。

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

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\rho c^2}{\phi} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

ここで、各パラメータは、 σ : 空気の粘性抵抗, k : 構造係数, R : 管径, ϕ : 多孔度である。本研究では、 k と ϕ の両方を1と仮定している。

4. 時変畳み込み演算

インパルス応答解析における移動音源の抽出方法として、時変畳み込み演算が提案されている。ここで移動音源の位置を $p(t)$ 、その信号を $s(t)$ とすると、任意の位置における音圧 $x(t)$ は離散化されたシステムにおいて以下の式で表される。

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

この時、 $h(t, p)$ は位置 $p(t)$ にある固定音源から受音点位置までのインパルス応答であり、音源が取りうる位置からのインパルス応答が既知であれば、移動音源の出力信号が得

KeyWords: AMR法, CIP法, Rayleighモデル, 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: a13.apg40g.chuo-u.ac.jp

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}\mathbf{s}$$

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

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

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

図-2 時変量み込み演算

られることを意味している．式(9)はベクトルと行列の演算を用いて図-2示す様に表される．この時、 $\mathbf{s}$ が音源信号ベクトル、 $\mathbf{x}$ が受信信号ベクトル、 $\mathbf{H}$ が時変量み込み行列である．音源の移動パターンの離散時間 t における位置ベクトルを $\mathbf{p}(t)$ としており、行列 $\mathbf{H}$ は移動パターンと受信点位置により定まる．ここで L_s は音源信号長、 L_h はインパルス応答長である．詳細は参考文献⁴⁾を参照されたい．

5. 数値解析例

多孔質吸音材を付した遮音壁を想定した三次元音場解析と可聴化をおこなうために、以下の条件で解析を行った．

(1) 解析条件

解析領域を図.3に、伝播させるインパルス波とその周波数特性を図.4に示す．AMRを用いて、最小空間離散化幅：0.009766 m、時間離散化幅：0.022806 msとしている．解析に関するパラメータは $\rho = 1.21 \text{ kg/m}^3$ 、 $c = 340 \text{ m/s}$ 、流動抵抗 $\sigma = 8000 \text{ kgm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ であり、大型トラックの走行音を対象とし、音源の移動速度は 60km/h (17m/s) としている．高さ 4.0m の遮音壁を想定し、ここに Rayleigh モデルを適用する．音源は地点 1(受信点と同軸上)、地点 2(音源 1 から z 軸方向へ 5.0m 地点) と 2 地点に設置している．遮音壁がない場合、完全反射の遮音壁がある場合、吸音材を付した (Rayleigh モデルを適用した) 遮音壁がある場合の 3 つの解析ケースに関して、受信点における解析結果の違いを比較する．

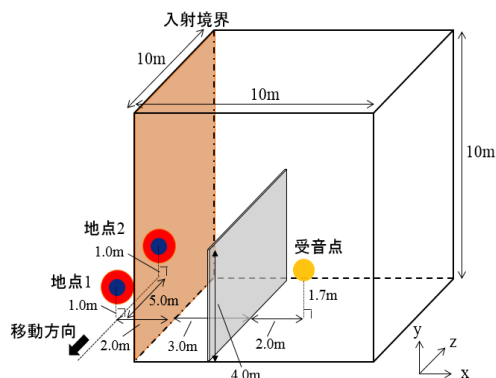


図-3 解析領域

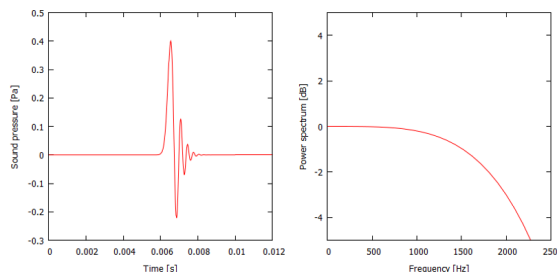


図-4 左：入射インパルス 右：周波数特性

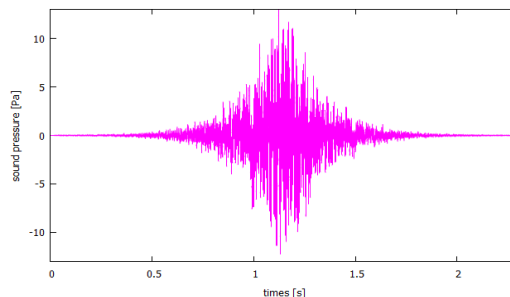


図-5 時変量み込み演算により算出した受信点での波形

(2) 解析結果

4章で示した様に、厳密には、時変量み込み行列の作成には移動音源が取りうる全ての位置からのインパルス応答が必要である．簡単のため、本手法では地点 1、地点 2 からの応答波形を用いて、一次元線形補間により両地点間の応答波形を推定している．

遮音壁がない場合の解析に関して、補間をおこない作成した時変量み込み行列と、音源データとの演算により求めた移動音源の時刻歴を図.5に示す．遠方から音源が近づくにつれて音圧値が大きくなり、遠ざかるにつれて再び音圧値が小さくなる移動音源の特徴を表していることが確認できる．遮音壁を有する場合の解析結果及び可聴化結果は発表当日に示すものとする．

6. おわりに

本研究では、インパルス応答解析に基いた、吸音モデルを考慮した解析手法を構築し、時変量み込み演算を導入することで移動音源問題への適用を行った．

今後の課題として、実際に遮音壁を有する現場における、実測値との比較・検証を行う予定である．

参考文献

- 1) 吉町徹, 谷川将規, 檜山和男 : 波動音響解析における擬似インパルス応答解析手法 土木学会論文集 A2 (応用力学) Vol. 71 No. 2 pp.349-357 2015 .
- 2) H.Takewaki, A.Nishiguchi and T.Yabe : Cubic interpolated pseudo-particle method (CIP) for solving hyperbolic-type equations, J. Comput.Phys. ,61 ,(1985), pp. 261-268.
- 3) 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-拡張作用境界モデルの適用, 生産研究, 63 巻 2 号 pp. 235-240. 2011.
- 4) 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, 人工知能学会全国大会論文集, Vol.21, 3C8-4 2007.