

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 Impulse Response Analysis Method considering Sound Absorption Model and Auralization using VR Technology

17N3100004J 今井 啓太 (計算力学研究室)
Keita IMAI (Computational Mechanics Lab.)

Key Words : CIP method, Impulse response, Rayleigh model, Auralization

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き、時々刻々とメッシュの粗密付けを行う 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、吸音効果を考慮した音響シミュレーションの構築と、本手法の移動音源問題への適用を行った。具体的に、前者に対してはグラスウールなどの多孔質吸音材の吸音効果を考慮できる Rayleigh モデルを導入し、後者に対しては移動音源の再現のために時変畳み込み演算を行い、交通騒音問題に適用した。

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。移流方程式の解法には高精度差分法である CIP 法を用いている

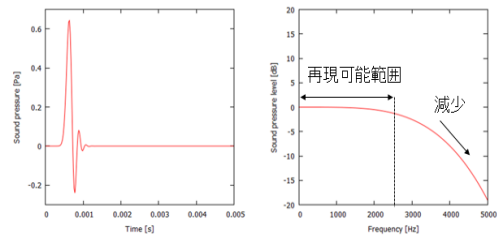


図-1 Lubich の波形と周波数特性

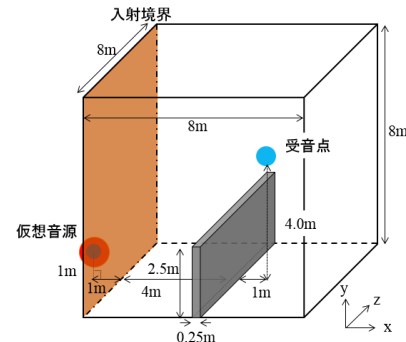


図-2 解析領域

3. インパルス応答解析

(1) インパルス応答解析

インパルス応答とは、ある空間に対してインパルスを送った際に得られる受信点での応答のことである。事前の解析で得られたインパルス応答と入力波形の畳み込みを行うことで、容易に受信点での出力波形を得ることができる。また入力波形としての音源データを用いることで、可聴化を実現する。本解析手法では、インパルスを離散的に取り扱うため、Lubich が提案した畳み込み積分の離散近似式の重み式 (5) を適用する。

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

図-1 に示すように、Lubich のインパルスは低い周波数領域では平坦な周波数特性を有し、高い周波数領域では急激な減少を示す。これにより高周波成分に起因する数値分散の影響が少ないことが知られている²⁾。

(2) 可聴化と解析メッシュの解像度

可聴化音の周波数特性は、畳み込みに用いるインパルス応答の周波数特性により決まるが、解析メッシュの解像度の差異によっても周波数特性の再現性が異なる。

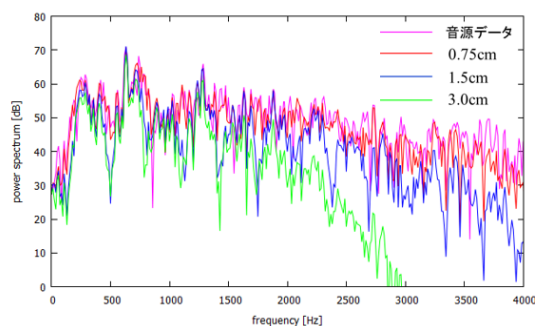


図-3 畳み込み結果の周波数特性の比較

図-2 に示す解析領域において、0.75cm、1.5cm、3.0cm の 3 パターンのメッシュ解像度でインパルス伝搬解析を行った。受信点における 3 パターンのインパルス応答に音源データの畳み込みを行い、周波分析を行った結果を図-3 に示す。メッシュの解像度が粗くなるにつれて、元の音源の再現性が失われていくことが確認できる。

4. 多孔質吸音材

騒音防止のための設計・計画には、境界条件、特に吸音機構の材料特性を考慮することが重要である。境界のモデリングには表面インピーダンスを用いて局所的に反射・透過を近似することができるが、一般的には材料内部の伝搬が与える境界面での挙動を考慮する必要がある。

本研究では多孔質タイプの吸音材に注目し、その中でも最も単純で広く知られている Rayleigh モデルを適用する⁴⁾。このモデルは吸音機構として空気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、流れ抵抗 σ を仮定して次の式で表される。

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

ここで、各パラメータは、 σ ：空気粘性抵抗、 k ：構造係数、 R ：管径、 ϕ ：多孔度である。この Rayleigh 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、以下のように書き換えられる。

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

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

本研究では、 k と ϕ の両方を 1 と仮定している。

5. 数値解析例(1)

本解析手法における Rayleigh モデルの妥当性を確認するために、以下の条件で一次元解析を行った。

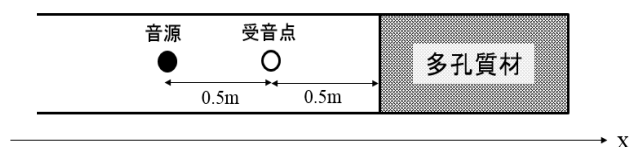


図-4 解析領域(一次元音響管モデル)

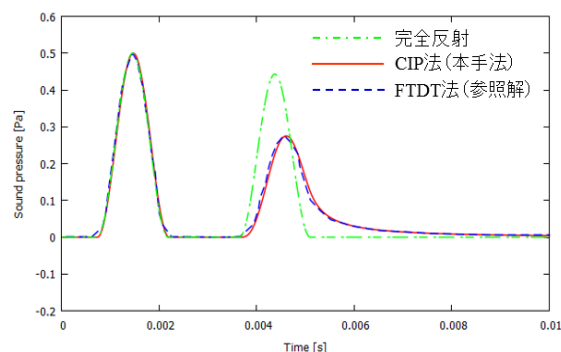


図-5 受信点での応答の比較

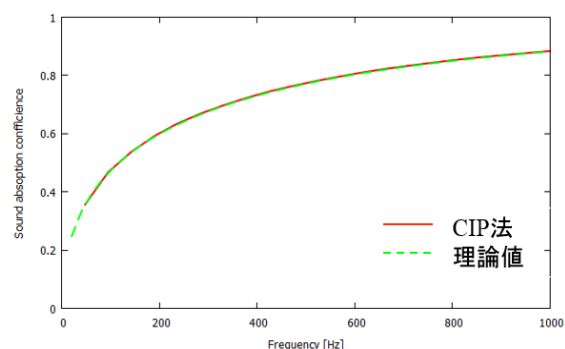


図-6 吸音率の比較

(1) 解析条件

解析領域は図.4 に示す、多孔質材料が無限長の厚さを持つような音響管を設定する。各解析パラメータは $\rho = 1.21\text{kg/m}^3$ 、 $c = 340\text{m/s}$ 、最小離散化幅 0.0025m、時間離散化幅 0.00255ms、流動抵抗 $\sigma = 15000\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$ である。受信点は多孔質材料から 0.5m の地点に設定し、入射するインパルスは参考解との比較のために次式(9)で表される波形を入射させる。

$$p(r) = 0.5 + 0.5\cos\left(\frac{\pi r}{100}\right) \quad (9)$$

(2) 解析結果

図.5 に受信点での応答の結果を示す。凡例は図中に示している。参照解⁵⁾(破線、FDTD 法)と比較すると、ほぼ同じ値を示している。また、完全反射(従来法)と比較して、吸音効果による応答波形の前傾化と減衰を確認することができる。

また本解析手法における Rayleigh モデルの妥当性を確認するために理論値との比較を行う。吸音率 α は、入射波のエネルギーに対する反射しない波の成分の割合であり、理論的に導出することができる。多孔質材料の音

響インピーダンス: Z_{m0} は以下の式で算出される．

$$Z_{m0} = \rho c \left(1 - \frac{i\sigma}{\rho\omega} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

ここで， ω :角周波数である．この多孔質材料の音響インピーダンスを用いて吸音率 α は理論的に以下の式で計算される．

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_{m0} - Z_{a0}}{Z_{m0} + Z_{a0}} \right|^2 \quad (11)$$

ここで， Z_{a0} は空気の音響インピーダンスである．解析結果から計算された α と理論値とを比較した結果を図.6 に示す．これにより吸音効果が低周波域では小さく，周波数が高くなるにつれて大きくなること示される．また，2 つの値が非常に良好な一致を示していることがわかる．

以上のことから，Rayleigh モデルを考慮した本解析の妥当性が示された．

6. 時変量み込み演算

インパルス応答解析における移動音源の再現方法として，時変量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．

$$x(k) = \sum_{ks=0}^{\infty} s(ks)h(k - ks, p(ks)) \quad (12)$$

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-7 示す様に表される．この時， s が音源信号ベクトル， x が受音信号ベクトル， 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 $p(t)$ としており，行列 H は移動パターンと受音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⁵⁾を参照されたい．

7. 数値解析例 (2)

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.8 に示す．伝播させるインパルス波とその周波数特性は図.??と同様のものである．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

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

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

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

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

図-7 時変量み込み演算

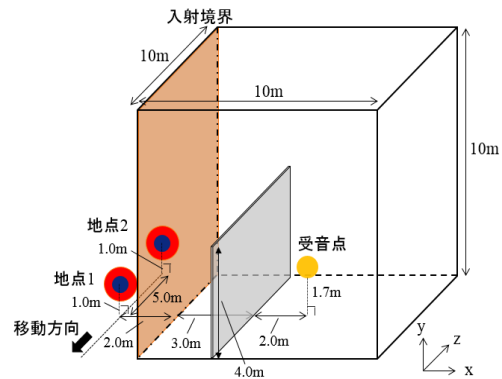


図-8 解析領域

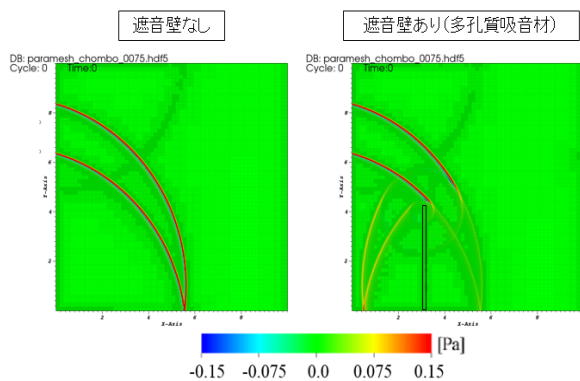
の移動速度は 80km/h (22m/s) としている．高さ 4.0m の遮音壁を想定し，ここに Rayleigh モデルを適用する．音源は地点 1(受音点と同軸上)，地点 2(音源 1 から z 軸方向へ 5.0m 地点) と 2 地点に設置している．遮音壁がない場合と，吸音材を付した (Rayleigh モデルを適用した) 遮音壁がある場合の解析ケースに関して，解析結果の違いを比較する．

(2) 解析結果

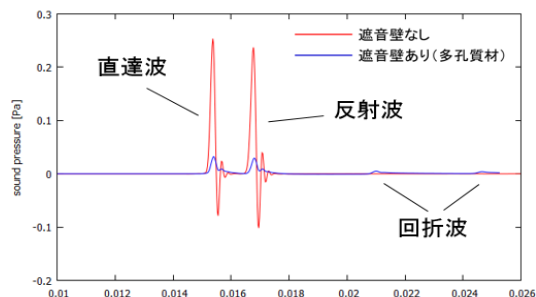
図.9 に xy 断面 (z 軸は 5m) での音圧分布とメッシュの可視化結果を示す．多孔質材を付した場合に，吸音効果により減衰された透過波が発生することを確認できる．

図.10 に地点 1 からのインパルス応答を比較した結果を示す．多孔質材を付した遮音壁の場合，遮音壁がない場合とを比べて，吸音効果によるインパルス応答の波形の減衰が確認できる．

6 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 からの応答波形を基準として，距離減衰の関係により両地点間の応答波形を推定している．この時変量み込み行列と，音源データとの演算により移動音源の可聴化音を作成する．



図－9 可視化結果の比較



図－10 インパルス応答の比較

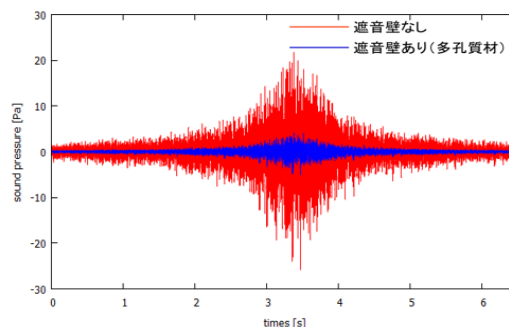


図－11 VR 技術を用いた騒音提示システム

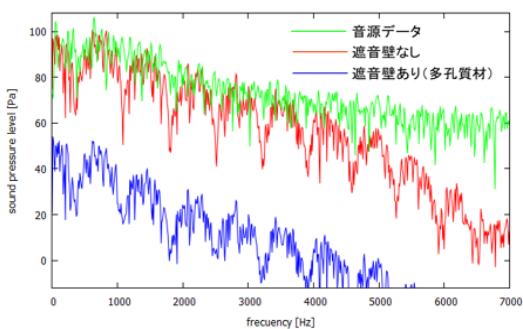
(3) VR 技術を用いた可聴化

作成する可聴化音は、大型トラックが 80km/h (22m/s) で 150m 走行した場合の走行音を想定している。VR 装置を用いて可聴化音を提示している様子を図.11 に、可聴化音の時刻歴を図.12 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。また遮音壁がある場合とない場合とで、遮音壁の遮音効果により音圧値が大幅に減少していることが分かる。

図.13 に可聴化音の周波数分析結果を示す。遮音壁がある場合とない場合とで遮音効果による音圧レベルの差が確認できる。また高周波域になると、音源データとの差が大きくなる傾向にあるが、これはメッシュの解像度が不足していることと、入射インパルスの周波数の再現可能範囲を超えていることに起因している。



図－12 時変量み込み演算により算出した受音点での波形



図－13 可聴化音の周波数分析結果の比較

8. おわりに

本研究では、吸音効果を考慮した音響シミュレーションの構築と、本手法の移動音源問題への適用を行い以下の結論を得た。

- CIP 法を用いた本解析手法に対し Rayleigh モデルを導入し、その妥当性が確認された。
- 時変量み込み演算を行うことで移動音源問題を対象とした解析が可能となった。
- 吸音効果の有無による差異を、可聴化により示すことができた。

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・検証をおこなう。

参考文献

- 1) 吉町徹，谷川将規，檜山和男：擬似インパルス応答解析に基づく騒音予測手法の構築と VR 技術を用いた可聴化 土木学会論文集 A2 (応用力学) Vol. 72 No. 2 pp.207-216 2016。
- 2) 矢部孝，内海隆行，尾形陽一：CIP 法 原子から宇宙までを解くマルチスケール解法，森北出版，2007。
- 3) Lubich, C.: Convolution quadrature and discretized operational calculus I Numer. Math., 52, (1988), pp. 129-145.
- 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-拡張作用境界モデルの適用，生産研究，63 巻 2 号 pp. 235-240. 2011.
- 5) Treatment of boundary conditions by finite difference time domain method Hisaharu Suzuki, Akira Omoto and Kyoji Fujiwara Acoustical Science and Technology Volume 28, 2007.
- 6) 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.