

吸音境界を考慮したインパルス応答解析手法の構築

Impulse response analysis considering sound absorption boundary

- 今井 啓太, 中大院, 東京都文京区春日 1-13-27, a13.apg4@g.chuo-u.ac.jp
- 谷川 将規, 清水建設, 東京都江東区越中島 3-4-17, tanigawa@shimz.co.jp
- 吉町 徹, JSOL, 名古屋市中区丸の内 2-18-25, toru.yoshimachi@gmail.com
- 檜山 和男, 中大, 東京都文京区春日 1-13-27, kaz@civil.chuo-u.ac.jp

Keita IMAI, Chuo-University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo, 112-8551

Masaki TANIGAWA, Shimizu Corporation, 3-4-17, Etchujima, Koto-ku, Tokyo, 135-8530

Toru YOSHIMACHI, JSOL Corporation, 2-18-25, Marunouchi, Naka-ku, Nagoya, 104-0053

Kazuo KASHIYAMA Chuo-University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo, 112-8551

This paper investigates the effect of mesh resolution to the quality of auralization and introduces the sound absorption boundary for considering sound barrier with porous absorbing material. The CIP method using adaptive mesh refinements is employed for the discretization of wave equation. The pseudo impulse wave is employed for the impulse response analysis and Rayleigh model is applied for expressing porous material as sound absorbing condition. We verified the validity with a one-dimensional acoustic tube model. The present analysis method is expected to be a useful method for planning and designing to sound barrier or various construction works in urban area.

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。この手法は解析結果の可聴化に際して、受信点におけるインパルス応答と実際の騒音の音声データの畳み込みを行う手法を用いているが、メッシュの解像度の差異が計算結果及び可聴化に及ぼす影響について、十分な検討が行われていなかった。また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、物質内の内部伝搬の考慮はなされていなかった。

そこで本研究では、前者の課題に対して複数のメッシュ解像度で解析を行い、その差異がインパルス応答と可聴化へ及ぼす影響を検討した。また後者に対しては、グラスウールなどを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特性を考慮する解析手法を構築しその妥当性の検証を行った。

2. 数値解析手法

2.1 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 次元の場合は以下のようなになる。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

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

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

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

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

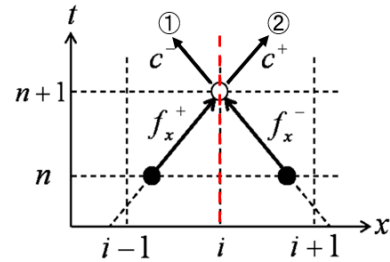


Fig. 1: Characteristic Curve

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 (Fig.1)。 $\rho c u + p$ 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。

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

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

2.2 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法である。移流させる物理量を求める際、格子点での物理量と微分値から 3 次多項式を用いて補間する CIP 補間を行うことで厳密解のプロファイルを比較的よく維持できる手法である。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。3 次元の場合は式 (3) 式 (4) に加え、 y 方向、 z 方向の移流方程式を解くことにより求める。この多次元移流を実現した CIP 法には M 型 CIP 法と C 型 CIP 法などがあるが、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。詳細は参考文献⁽³⁾を参照されたい。

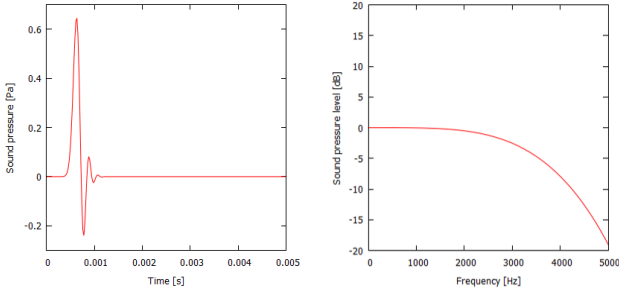


Fig. 2: Incident impulse and frequency characteristic

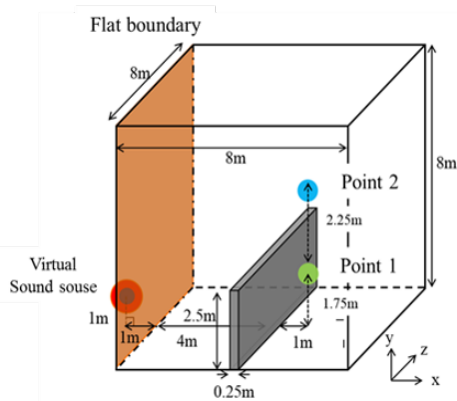


Fig. 3: Computational domain

3. インパルス応答解析

3.1 インパルス応答

インパルス応答とはある空間に対して、インパルスと呼ばれる非常に短い波を入力した際に得られる受音点での応答のことである。事前に解析して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、容易に受音点での出力波形を得ることができる。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。

3.2 擬似インパルスの生成

インパルス応答解析を行う上で、解析インパルスにはフラットな周波数特性をもつディラックのデルタ関数を用いることが望ましい。しかし厳密なインパルスは形が急峻なため、離散化手法で精度よく計算を行うことは困難である。そのためインパルスを離散近似した擬似インパルスを用いることとする。本手法では、数値計算で使用する擬似インパルスとして、Lubich が提案した畳み込み積分の離散近似式の重み式 (7) を用いる。

$$\omega_n(\Delta t) \cong \frac{R^{-n}}{L} \sum_{L=0}^{L-1} \left(\frac{1}{4\pi r} e^{-\frac{sr}{c}} \right) e^{-2\pi i \frac{nl}{L}} \quad (7)$$

詳細は参考文献⁽⁶⁾を参照されたい。式 (7) のパラメータを $r = 0.2\text{m}$, $t = 0.01026\text{ms}$ とした擬似インパルスとその周波数特性を Fig-2 に示す。約 3500Hz までフラットな周波数特性を表しているが、そこから急激に減少していくことがわかる。

4. 数値解析例 (1)

メッシュの解像度がインパルス応答及び音源データとの畳み込みによる可聴化への影響の検討を、数値解析例を用いて行った。

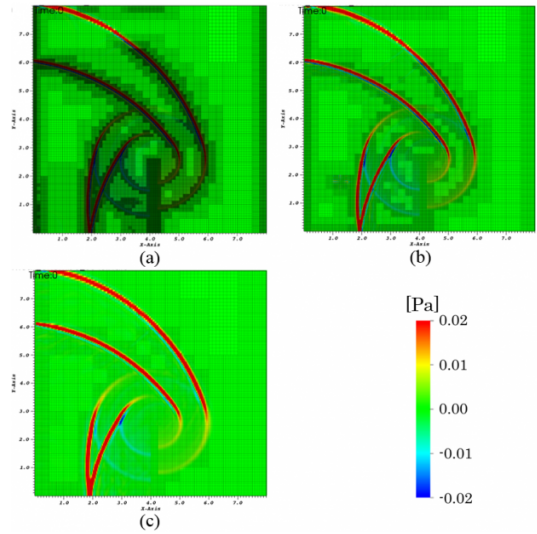


Fig. 4: Visualization of propagation : (a)Case1 (b)Case2 (c)Case3

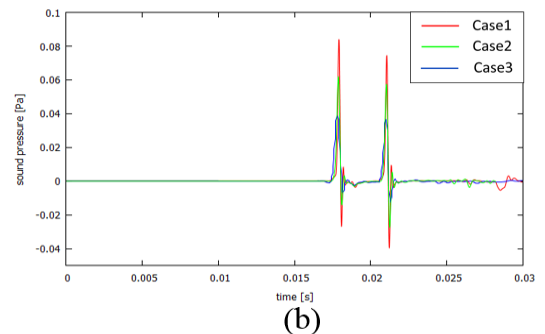
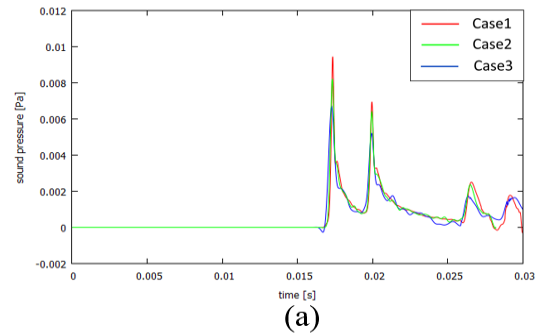


Fig. 5: Time steps of impulse response : (a)point1 (b)point2

4.1 解析条件

解析領域は Fig-3 に示す通りであり、 $\rho = 1.21[\text{kg}/\text{m}^3]$, $c=340[\text{m}/\text{s}]$ とし、Case1(最小空間離散化幅 0.0078125m, 時間離散化幅 0.01026ms), Case2(最小空間離散化幅 0.01563m, 時間離散化幅 0.02053ms), Case3(最小空間離散化幅 0.03125m, 時間離散化幅 0.04105ms) の 3 通りで解析を行った (ともに CFL=0.45)。必要なメッシュの解像度を 1 波長 10 分割とすると、Case1 は 1000Hz, Case2 は 2000Hz, Case3 は 4000Hz 程度まで再現可能である。入射境界を図の位置に設定し、仮想音源との距離を 1m とする。境界条件は遮音壁が完全反射、底面が鏡像音源を用いた完全反射、その他が透過としている。入射波には Fig-2 で示した擬似インパルスを用いる。

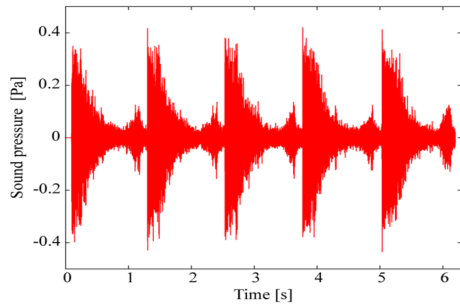


Fig. 6: Waveform of the original sound data

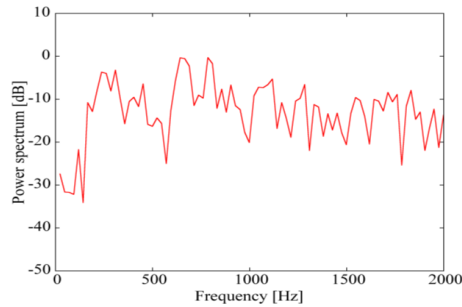


Fig. 7: Frequency characteristic of the original sound data

4.2 解析結果

Fig-4 に xy 断面 (z 軸は 4m) での 1.86ms における音圧分布とメッシュの可視化結果, Fig-5 に各受音点でのインパルス応答を示す. Case1 と比べて Case2, Case3 とメッシュの解像度が粗くなるにつれて, 数値拡散によりインパルス応答の波形が広がり減衰が生じていることが分かる.

4.3 解析結果の可聴化

数値解析例で得られたインパルス応答を用いて音源データとの畳み込みを行い, インパルスの波形及びメッシュ解像度が可聴化に及ぼす影響について検証する. 畳み込みを行う音源データは Fig-6 に示す杭打ち機の打音とした. また, 音源データの周波数特性を Fig-7 に示す.

得られたインパルス応答と音源データとの畳み込みを行う. それぞれの Case のインパルス応答と音源データとの畳み込み結果の周波数特性を Fig-8 に示す. 凡例は図中に示すものとする (original は音源データの周波数特性). Fig-8 の (a)(地上 1.75m 地点) より, 受音点 1 では遮音壁の影響により Case1, Case2, Case3 とともに高周波成分の減衰が確認できる. (b)(地上 4m 地点) より, 受音点 2 では Case1 は Fig-2 の周波数特性を再現できているが, Case2, Case3 は解像度の不足による高周波域の減衰が生じ, 再現性が低くなる.

この結果に基づき可聴化を行なった際, メッシュの解像度が粗くなるにつれてこもった様な音となる. 実際の可聴化音は講演時に示すものとする.

5. 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

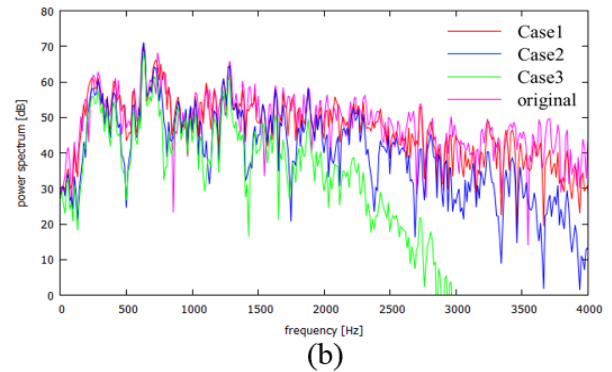
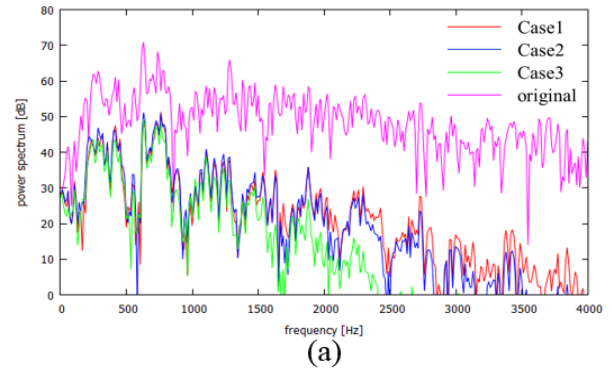


Fig. 8: Frequency characteristic of the aurarization sound : (a)point1 (b)point2

うことができる.

Fig.9 に示すように, 多孔質材料を非常に薄い音響管に近似する. ポアズイコ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.

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

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. 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.

$$\frac{k}{\phi} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = -\sigma u \quad (9)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\rho c^2}{\phi} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

本研究では, k と ϕ の両方を 1 と仮定している.

6. 数値解析例 (2)

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.

6.1 解析条件

解析領域は Fig.10 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 $\rho=1.21[\text{kg}/\text{m}^3]$, $c=340[\text{m}/\text{s}]$, 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. 受音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 (11) で表される波形を入射させる.

$$p(r) = 0.5 + 0.5\cos\left(\frac{\pi r}{100}\right) \quad (11)$$

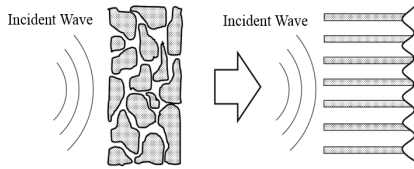


Fig. 9: Rayleigh Model

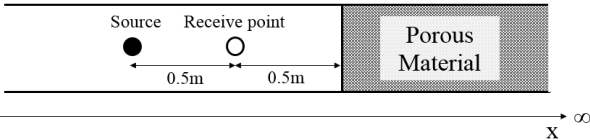


Fig. 10: Computational domain (one-dimensional acoustic tube model)

6.2 解析結果

Fig.11 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．

$$Z_{m0} = \rho c \left(1 - \frac{i\sigma}{\rho\omega}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

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．

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_{m0} - Z_{a0}}{Z_{m0} + Z_{a0}} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

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 Fig.12 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が示される．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．なお吸音特性を考慮した可聴化は講演時に示すものとする．

7. おわりに

本研究では，複数のメッシュ解像度で解析した結果で可聴化を行い，その差異がインパルス応答と可聴化へ及ぼす影響を検討した．また境界内部の伝搬による吸音特性を考慮した解析手法を構築し，その妥当性の検証を行った．その結果以下の結論を得た．

- 数値計算で得られたインパルス応答を用いて，実騒音の音声データの畳み込みを行う際，解析メッシュの解像度が粗い場合に数値分散を起こし，実騒音の再現性（特に高周波成分）が悪くなるが示された．
- CIP 法を用いた本解析結果より算出した吸音率と，理論式に基づく吸音率が非常に良い一致を示し，本解析手法における吸音モデルの妥当性が確認された．

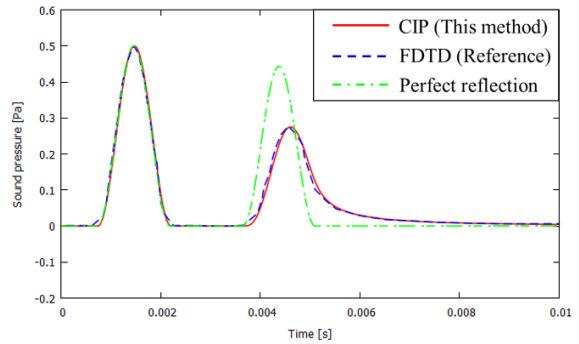


Fig. 11: Comparison of the waveform at receive point

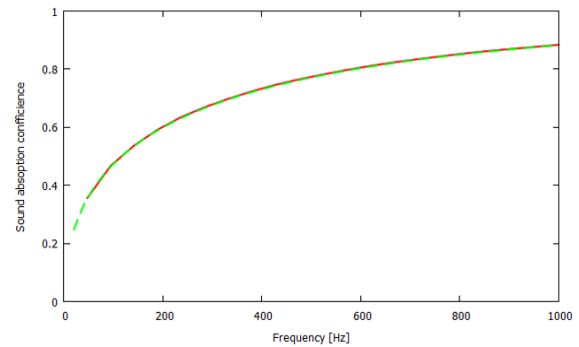


Fig. 12: Comparison of the sound absorption coefficient (solid: this analysis dot: theoretical value)

今後の課題として，吸音モデルを用いた解析を多次元に拡張し，解析結果の可聴化及び実測値との比較による本手法の精度検証が挙げられる．

参考文献

- (1) 吉町徹，谷川将規，櫻山和男：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) 太刀岡勇氣，安田洋介，佐久間哲哉：CIP 法による時間領域音場解析 FDTD 法との比較，日本音響学会建築音響研究会講演論文集 (秋)，pp . 979-982，2007 . 9.
- (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) Lubich, C. : Convolution quadrature and discretized operational calculus I Numer. Math., 52, (1988), pp.129-145