

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

Development of the noise prediction method based on the pseudo impulse response and its auralization using VR technology.

14N3100015K 吉町 徹

Toru YOSHIMACHI

Key Words : CIP method, AMR method, Impulse response, Auralization, Virtual Reality

1. はじめに

騒音の予測および防音対策等を講じる上で、数値計算手法は有効であり、近年のコンピュータ性能の発展により、数多くの数値計算手法が提案されている。

幾何音響理論に基づく方法は、計算アルゴリズムが簡便なためリアルタイム処理が可能となる長所があるが、複雑な幾何形状への適用性と計算精度の点で問題がある。また、波動音響理論に基づく方法は、複雑な幾何形状への適用性と計算精度の点では優れるが、必要となる記憶容量及び計算時間が膨大になる問題点がある。

一方、計算結果の表現方法について着目すると、専門家以外も計算結果を直感的に理解・把握するために既往の研究では、幾何音響理論に基づくリアルタイム計算手法を用いて、非定常計算された音圧レベルをバーチャルリアリティ (VR) 技術を用いて可視化情報と共に聴覚情報として同時に提示する研究が行われてきた。^{1) 2)} しかし、音響計算に波動音響理論ではなく幾何音響理論に基づく方法を用いていたために、複雑な幾何形状を有する問題への適用には限界がある。

そこで本研究では、幾何形状が複雑な実際の問題に適用可能な騒音予測システムを構築するために、波動音響理論に基づく離散化解析手法を用い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を行う。離散化解析手法としては、CIP 法と AMR 法 (解適合格子法) を導入した並列計算手法を用いた³⁾。なお、インパルスを離散的に精度良く扱うために、Lubich の Convolution Quadrature Method⁴⁾ の式を利用した滑らかな波形の擬似インパルスを用いる。数値解析例として、遮音壁を有する三次元波動伝播問題を取り上げ、得られたインパルス応答との畳み込みによる可聴化を行い、VR 技術を用いた可聴化手法としての妥当性の検討を行った。

2. VR 技術を用いた騒音可聴化システム

本システムは、数値計算結果を用いて騒音の可聴化を行い、VR 技術を用いて視覚情報と聴覚情報を提示するものである。本研究で使用する没入型 VR 装置 Holostage は三面の立体視スクリーン及び 7.1ch スピーカーシステムを有しており、VR 空間内に立体映像と立体音響を提示することが可能である。本システムは図-1 に示すように数値解析、可視化、可聴化の 3 部で構成さ

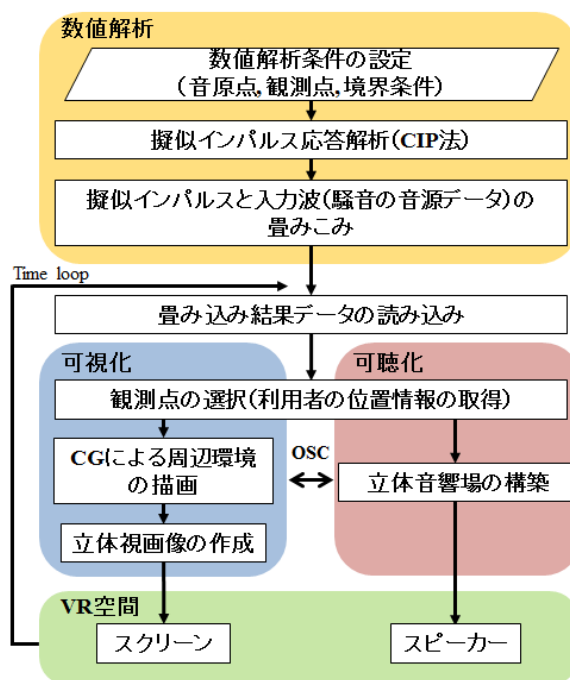


図-1 本システムの処理工程

れている。

まず、数値解析において、騒音の音原点の位置や遮音壁や地面等の境界条件を定める。そして、VR 空間内で使用者が移動する全ての個所でのインパルス応答をあらかじめ数値計算で求め、音源データとの畳み込みを行う。VR 空間内ではインパルス応答が求められた離散点毎に移動して解析結果を聞くことが可能となる。可視化では、C++ と OpenGL を用いて自動車や重機等の CG や 3D 都市モデル等の周辺環境の描画を行い、CAVE ライブラリを使用することで立体映像を提示する。可聴化では、立体音響を実現するために、数値計算結果を用いて可聴化された音が VR 空間内の音源点と観測者の位置情報に応じて、スピーカーから適切に出力されるように制御する必要がある。そこで音響プログラミングソフトの MAX 内で Ambisonics と呼ばれる手法を用いて音源制御を行う。また、プログラムおよび MAX 間での情報の共有には、OSC (Open Sound Control) プロトコルを用いた UDP/IP 通信により行う。

3. 擬似インパルス応答解析手法

(1) 擬似インパルスの生成

離散化解析手法において、インパルスは離散近似を行わないと数値解析的に不安定になりやすく、非物理的な振動も生じやすくなる．そこで本研究では、Dirac のデルタ関数で表されるインパルスを離散近似した擬似インパルスを用いる．本手法では、擬似インパルスに畳み込み積分の離散近似手法である Lubich の Convolution Quadrature Method(CQM)⁴⁾ で提案された式 (3) を用いる．Lubich は次のような畳み込み積分

$$f(t) * g(t) = \int_0^t f(\tau)g(t-\tau)d\tau, \quad t \geq 0 \quad (1)$$

を時間増分 Δt を用いて n ステップに分解し

$$f(n\Delta t) * g(n\Delta t) \simeq \sum_{j=0}^n \omega_{n-j}(\Delta t)g(j\Delta t) \quad (2)$$

のように離散化近似することにより求める手法を提案した．ここで $\omega_n(\Delta t)$ は離散化された畳み込み積分の重みであり、

$$\begin{aligned} \omega_n(\Delta t) &= \frac{1}{2\pi i} \int_{|z|=R} F\left(\frac{\gamma(\zeta)}{\Delta t}\right) z^{-n-1} dz \\ &\cong \frac{R^{-n}}{L} \sum_{l=0}^{L-1} F\left(\frac{\gamma(\zeta_l)}{\Delta t}\right) e^{-\frac{2\pi i n l}{L}} \end{aligned} \quad (3)$$

と表せる．ここで n は時間ステップ、 L は積分区間の分割数、 R は目標とする精度 ϵ を用いて $R = \epsilon^{1/2L}$ で表される．また、 $\zeta_l = Re^{-2\pi i l/L}$ である．式 (3) の $\gamma(\zeta_l)$ は線形マルチステップ法 (差分法) における生成多項式の商であり、本研究では、

$$\gamma(\zeta) = (1 - \zeta) + \frac{(1 - \zeta^2)}{2} \quad (4)$$

を用いた．また式 (3) において F は関数 f のラプラス変換である．ここで $s = \gamma(\zeta)/\Delta t$ と定義すると、三次元時間領域波動問題のラプラス変換域における基本解より $F(s)$ は

$$F(s) = \frac{1}{4\pi r} e^{-\frac{s}{c}r} \quad (5)$$

で表される．ここで、 r は音源からの距離とする．式 (5) より、式 (3) は

$$\omega_n(\Delta t) \cong \frac{R^{-n}}{L} \sum_{l=0}^{L-1} \left(\frac{1}{4\pi r} e^{-\frac{s}{c}r} \right) e^{-\frac{2\pi i n l}{L}} \quad (6)$$

で表され、本手法では式 (6) を任意の点における擬似インパルスとして用いる．

図-2 に式 (6) を用いて $L = 2000$ 、 $r = 8\text{m}$ 、 $\Delta t = 0.082\text{ms}$ で生成した擬似インパルスの波形と周波数特性を示す．生成された擬似インパルスは滑らかな波形であ

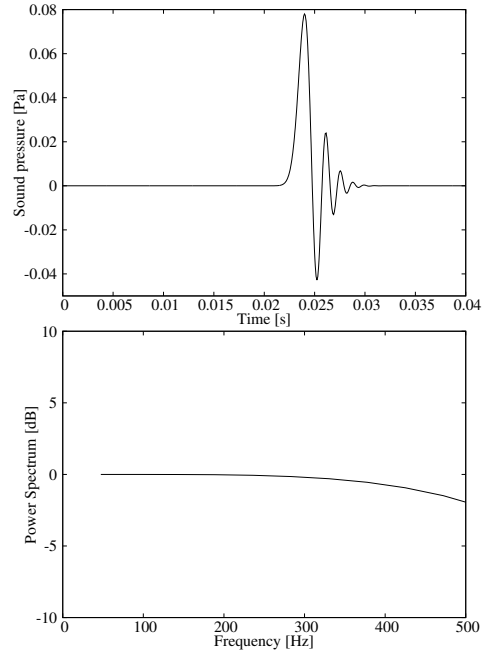


図-2 擬似インパルスの周波数特性

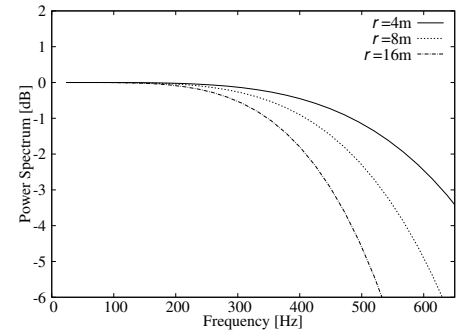


図-3 パラメータによる周波数特性の変化

り、差異 3dB 以内をフラットとみなせる上限周波数とすると、今回のパラメータの場合約 530Hz まではフラットな周波数特性をもつ波形となる．

また、図-3 に擬似インパルスのパラメータによる周波数特性の変化を示す．パラメータ Δt は、数値計算の最小格子幅と CFL 条件から定まる値で $\Delta t = 0.0827\text{ms}$ とし、パラメータ r を変化させることによって周波数特性を変化させる． $r = 0$ において生成された擬似インパルスはデルタ関数となるため、対応して解析における空間解像度を細かくする必要がある．周波数の差異 3dB 以内を上限周波数とすると、 $r = 4\text{m}, 8\text{m}, 16\text{m}$ の場合は約 630Hz, 530Hz, 450Hz となり、 r の値を小さくするほど上限周波数が高くなる．また Δt の値も小さくすると同様に上限周波数が高くなる．

(2) 境界面からの入射方法

音源周辺に障害物等が存在しない問題では、自由空間での伝播損失を考慮した波形を解析領域の境界から入射させることにより音源付近のメッシュを用意することなく解析が可能となり効率的である．本手法では生成した擬似インパルスを、図-4 に示すように仮想的に設けた音

源から球面波として伝播してくる物理量を平坦な入射境界面に与える手法を提案する．

はじめに音圧の与え方について説明する．まず，仮想音源点と入射境界の最短距離 r_0 である地点 A を基準に擬似インパルスを次式で生成し，時間ステップ n ，地点 A の音圧を p_n^A とする．

$$p_n^A = \frac{R^{-n}}{L} \sum_{l=0}^{L-1} \left(\frac{1}{4\pi r_0} e^{-\frac{s}{c} r_0} \right) e^{-\frac{2\pi i n l}{L}} \quad (7)$$

入射境界上の任意の地点 B の音圧 p^B は地点 A の音圧を次式のように距離減衰させることで与える．

$$p^B = \frac{r_0}{r_1} p^A \quad (8)$$

また地点 A と地点 B の到達時間差 dh は距離差 $r_1 - r_0$ と音速 c の関係から．

$$dh = \frac{r_1 - r_0}{c} \quad (9)$$

で表され，計算の時間離散化幅 Δt で dh をステップ数 $\Delta n = dh/\Delta t$ で近似すると，時間ステップ n ，地点 B の音圧 p_n^B は距離減衰と到達時間差を考慮した次式で表される．

$$p_n^B = \frac{r_0}{r_1} p_{n-\Delta n}^A \quad (10)$$

次に粒子速度の与え方について説明する．本研究では速度ポテンシャル ϕ から粒子速度を導出し解析領域の境界上に与える方法を採用した．速度ポテンシャル ϕ は，音圧との関係から次式で導出し

$$\phi_n = \phi_{n-1} - \frac{\Delta t}{\rho} p_n \quad (11)$$

速度ポテンシャルから粒子速度を以下の式で導出する．

$$u_n = \frac{\partial \phi_n}{\partial x} = \frac{\partial \phi_{n-1}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \frac{\Delta t}{\rho} p_n \quad (12)$$

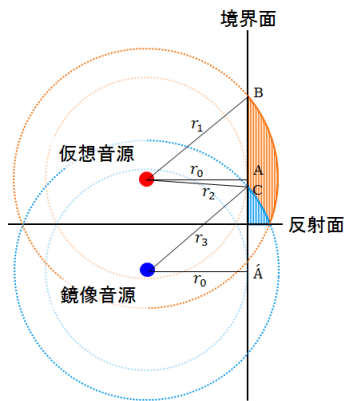


図-4 入射境界

また，境界面上で地面等の反射を考慮する場合は，図-4に示すように，鏡像音源を配置することで反射波の入射を行う．

4. 数値解析例

擬似インパルス及び境界面からの入射方法を用いて，遮音壁を有する三次元波動伝播問題の数値解析を行う．また，数値解析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，VR 装置での可聴化を行う．

(1) 解析条件

解析モデルを図-5 に示す．空間離散化幅は AMR 法により $0.125\text{m} \sim 0.0125\text{m}$ ，時間離散化幅は 0.01642ms ($\text{CFL}=0.45$) とする．また媒質を空気とし，媒質密度 ρ は 1.205kg/m^3 ，音速 c は 340.0m/s とする．高さ 3m ，厚さ 0.25m の遮音壁を配置し，解析領域の底面及び遮音壁は完全反射条件とする．遮音壁から 5m の位置に仮想音源点を設定し，受音点を図のように高さを変えて 2 点設ける．入射境界上の節点に音圧 p と粒子速度 u を以下の式で与える

$$p_n^A = \frac{R^{-n}}{L} \sum_{l=0}^{L-1} \left(\frac{1}{4\pi r} e^{-\frac{s}{c} r} \right) e^{-\frac{2\pi i n l}{L}} \quad (13)$$

$$u_n = \frac{\partial \phi_n}{\partial x} = \frac{\partial \phi_{n-1}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \frac{\Delta t}{\rho} p_n \quad (14)$$

ここで，擬似インパルスのパラメータは $\Delta t = 0.01642\text{ms}$ ， $r = 0.25\text{m}$ とし，差異 3dB までを上限周波数とすると約 2000Hz までフラットな周波数特性をもつ擬似インパルスとなる．

(2) 解析結果

図-6 に xy 断面での音圧分布とメッシュの可視化結果を示す．境界面から擬似インパルス波が入射され，底面及び遮音壁での反射，回折を確認できる．また，インパルスの伝搬に合わせてメッシュの粗密付けが行われてい

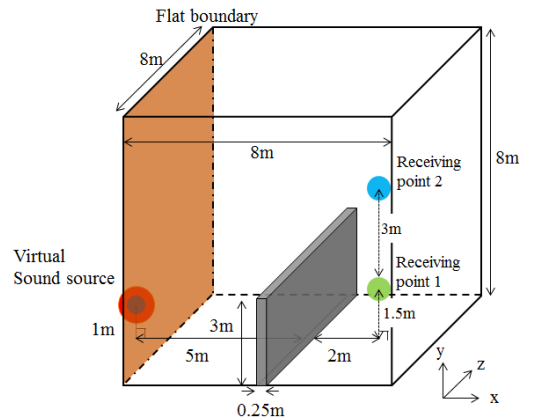


図-5 解析モデル

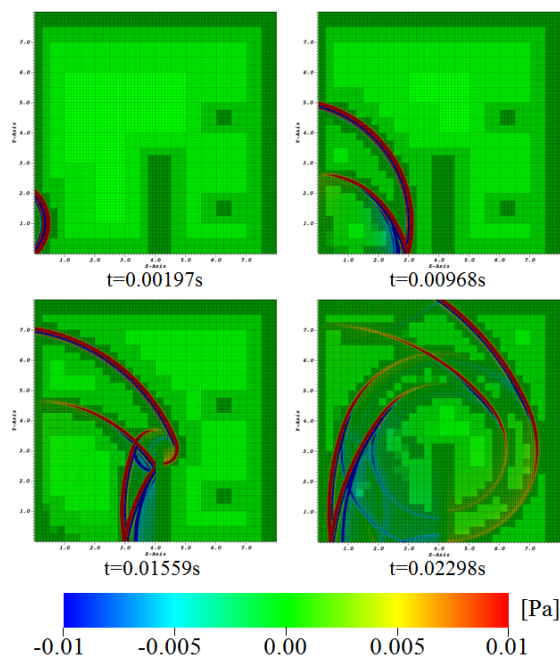


図-6 音圧とメッシュの可視化結果

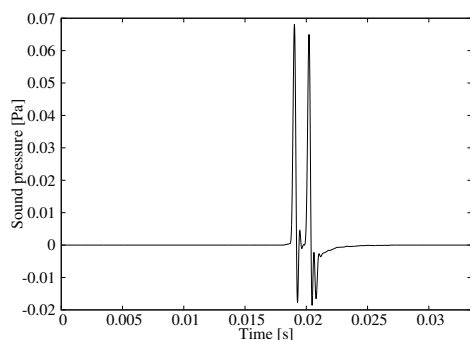


図-7 インパルス応答 (遮音壁有り)

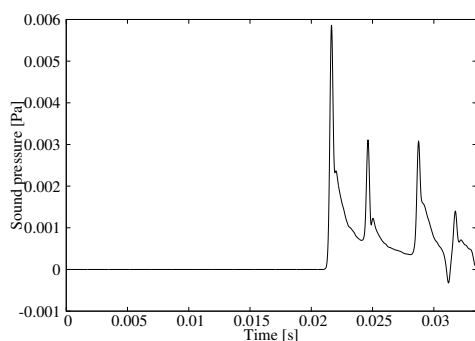


図-8 インパルス応答 (遮音壁無し)

ることも確認できる．図-7、図-8 に遮音壁無し，有りの場合のインパルス応答を示す．また，本数値解析例で畳み込みを行う音源データは図-9 に示す杭打ち機の打音とした．図-10 に畳み込み結果を示す．図より，遮音壁による音圧の減衰を確認することができる．

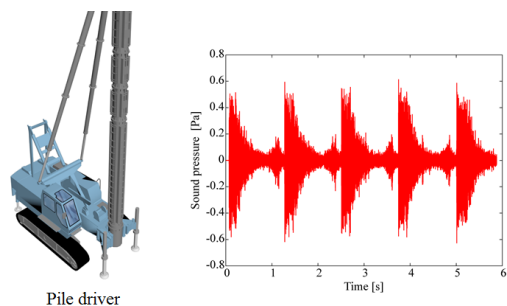


図-9 入力音源データ

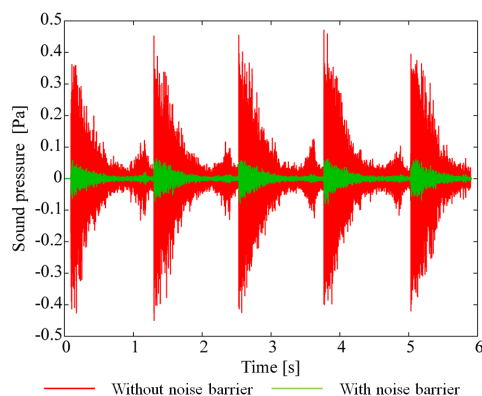


図-10 畳み込みによる可聴化結果

5. 結論

波動音響理論に基づく離散化解析手法を用い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を行い，本手法を遮音壁を有する三次元波動伝搬問題に適用し，以下の結論を得た．

- Lubich の CQM の式を擬似インパルスとして用い，境界面から擬似インパルスを入射する解析手法を構築した．
- 数値解析で得られたインパルス応答を用いて音源データの畳み込みを行い，VR 装置での可聴化を行った．

今後の課題として，本手法のより定量的な精度検証，より高周波まで考慮した大規模解析を行う予定である．

参考文献

- 1) 田近伸二，樫山和男，志村幸行：VR 技術を用いた対話型道路交通騒音評価システムの構築，応用力学論文集，土木学会，Vol. 13，pp.231-239，2010．
- 2) 谷川 将規，江嶋 孝，樫山 和男，志村 正幸：混合交通を考慮した VR 技術に基づく道路交通騒音評価システムの構築，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol.70(2)，I.195-I.202，2014．
- 3) 守屋陽平・谷川将規・樫山和男：AMR 法を用いた CIP 法による音場解析，土木学会論文集 A2，(応用力学)，Vol.16，I.195-I.202，2013．
- 4) C. Lubich：Convolution quadrature and discretized operational calculus. I. Numerische Mathematik, Vol.52, pp.129-145, 1988．