

騒音シミュレーションにおけるメッシュの解像度の影響の検討とVRによる可聴化

中央大学大学院 今井 啓太
清水建設(株) 谷川 将規
(株)JSOL 吉町 徹
中央大学 榎山 和男

近年、騒音によって健康被害を受けるなどこの問題が深刻化してきている．そのため波動音響理論を用いた精度の高い騒音の影響の事前予測と評価が不可欠である．既往の研究¹⁾では音場解析を効率的に行うため、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 法を用いたインパルス応答解析手法と可聴化システムが構築されてきた．しかし、メッシュの解像度の差異がインパルス応答と可聴化にどのような影響が出るかという検討はなされていなかった．

そこで本研究では、インパルス応答解析に基づく手法の、メッシュの解像度の差異が両者に及ぼす影響の検討を行った．さらに、得られたインパルス応答を用いて可聴化を行い、VR 装置に導入しメッシュの解像度の差異による音色の違いを提示するシステムを構築した．

1. 数値解析手法

1.1 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．この移流方程式の解法には CIP(Constrained Interpolation Profile) 法²⁾を採用する．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．

2. インパルス応答解析

2.1 インパルス応答

インパルス応答とは何かしらのシステムに対して、インパルスと呼ばれる非常に短い信号を入力した際に得られるシステム応答のことである．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出力波形を得ることができる．インパルス応答と入力波形としての音源データとの畳み込みを行うことで、可聴化を実現する．

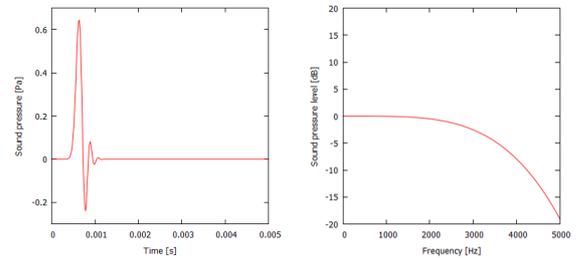


図-1 用いた擬似インパルスと周波数特性

2.2 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 (5) を用いる．

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

詳細は参考文献³⁾を参照されたい．式 (5) 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図-1 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．

3. 数値解析例

数値解析例として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行った．

3.1 解析条件

解析領域は図-2 に示す通りであり、 $\rho = 1.21[\text{kg/m}^3]$ 、 $c = 340[\text{m/s}]$ とし、メッシュの解像度が良い Case1(最小空間離散化幅 0.0078125m 時間離散化幅 0.01026ms) とメッシュの解像度が粗い Case2(最小空間離散化幅 0.03125m、時間離散化幅 0.04105ms) の 2 通りで解析を行った(ともに CFL=0.45)．入射境界を図の位置に設定し、仮想音源との距離を 1m とした．入射波には図-1 で示した擬似インパルスを用いる．

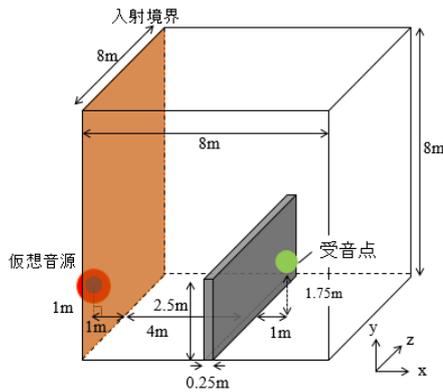


図-2 解析領域

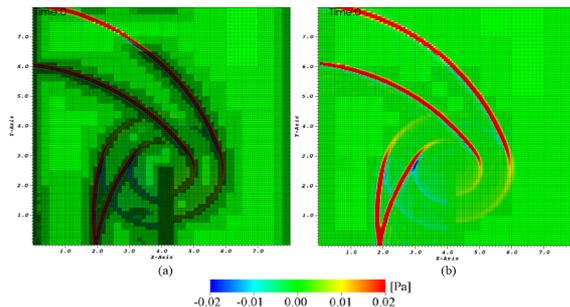


図-3 伝播の様子：(a)Case1 (b)Case2

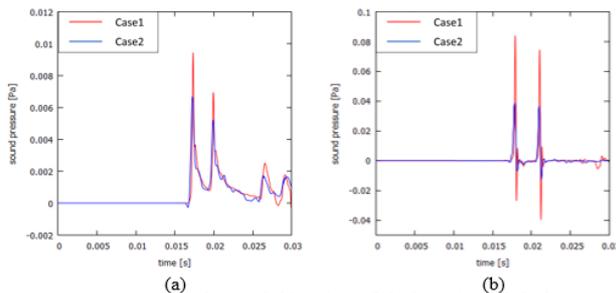


図-4 インパルス応答：(a) 受信点 1 (b) 受信点 2

3.2 解析結果

図-3 に xy 断面での 1.86ms における音圧分布とメッシュの可視化結果、図-4 に各受信点でのインパルス応答を示す。Case2 において、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を確認できる。メッシュの解像度が畳み込み結果に与える影響の検討のために音源データ（工事騒音）との畳み込みを行い、可聴化音を作成した。

4. 工事騒音評価システム

4.1 VR 環境

本研究で用いる没入型 VR 装置 HoloStage は、前面と側面及び底面の 3 面の大型スクリーンとそれぞれに対応した高性能プロジェクター、また VR 空間内において操作者の動きを捉えるためのワイヤレスのトラッキング装置及びそれらを制御する並列計算機から構成されている。本装置は、1 台の Master-PC と 4 台の Slave-PC から構成されている。4 台の Slave-PC のうち 1 台はヘッドト

ラッキングにより計測された視点位置やコントローラーの位置を逐次計算し、残りの 3 台は各プロジェクターと接続されており各スクリーンが担当する領域の映像を配信している。HoloStage に映像を投影している様子を図-5 に示す。

また、天井にある 7.1 チャンネルまで再生可能なスピーカーにより聴覚情報を提示することができる。スピーカーは 8 台設置されており、これにより立体音響を構築した結果を提示している。

4.2 システム概要

本システムは、事前のシミュレーションによって得られた、可聴化音を、音響プログラミングソフト MAX 上に独自に構築したプログラムにより提示する。図-6 に VR 空間に実装したはつりのモデルと空間内で再現した位置関係を示す。また、遮音壁のなしの場合の投影の様子を図-7 に、遮音壁ありの場合の投影の様子を図-8 に示す。コントローラー操作により、遮音壁のなし・ありと Case1・Case2 の可聴化音の切り替えることができる。この VR 技術を用いた可聴化システムの利用において遮音壁の効果を容易に理解・把握することが可能となる。本手法では波動音響理論による可聴化を実現しており、音波の回折や干渉なども再現できる。

4.3 可聴化結果

図-9 に今回適用した Case1 の可聴化音の波形を示す。遮音壁のなし・ありの違いで音圧が減少し、その影響を再現できていることが確認できる。また可聴化音を周波数分析した結果を図-10、図-11 に示す。図中の sound は可聴化に用いた元の音源データの周波数特性である。解析に用いたメッシュの解像度の差異 (case1 と case2) によって再現される周波数が異なり、遮音壁なしの場合は解像度が良い方がより元の周波数の分布を再現していることが確認できる。このため音声データに変換した際、音色が元の音源に近いものとなる。一方で、遮音壁ありの場合は再現された周波数に大きな差異が表れていないことが確認できる。再現される音色に違いがないということである。この可聴化音を VR 装置を用いて提示することで、その音色の違いを体験できるシステムを構築した。



図-5 没入型 VR 装置 HoloStage

5. おわりに

本研究では、メッシュの解像度がインパルス応答と可聴化へ及ぼす影響の検討と VR 装置への適用を行い以下の結論を得た。

- メッシュの解像度が粗いと、インパルス応答の波形が広がり減衰が生じてしまうことを示した。
- 可聴化を行った際に、メッシュの解像度が粗いと高周波成分の再現ができず、こもった様な音になってしまうことを示した。
- 可聴化音を VR 装置に適用し、その音色の違いを臨場的に体験できるシステムを構築した。

今後の課題として、現在提示している可聴化音の情報を直感的に理解できるようなインターフェイスの作成するなど、本システムの品質の向上が挙げられる。

参考文献

- 1) 吉町徹, 谷川将規, 樫山和男: 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) 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, No.2,I 195-I 202, 2014.

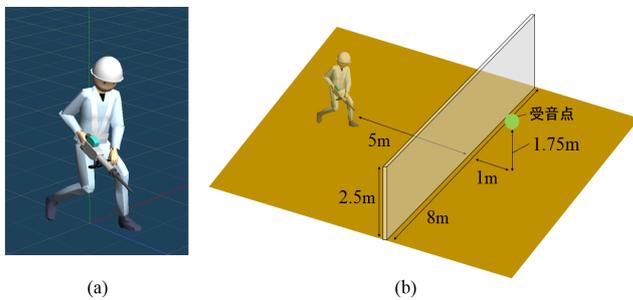


図-6 (a) はつりのモデル (b) 空間内で再現した位置関係

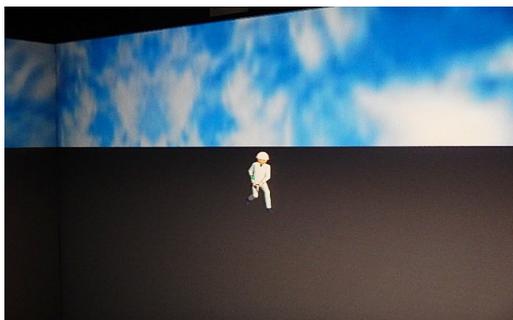


図-7 遮音壁なしのモデル

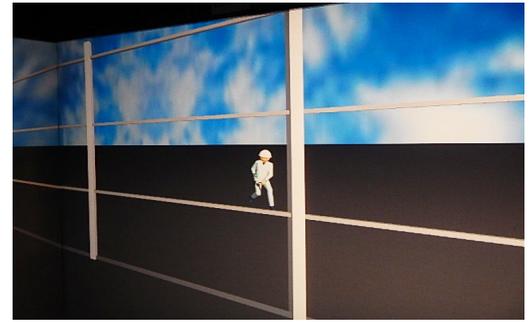


図-8 遮音壁ありのモデル

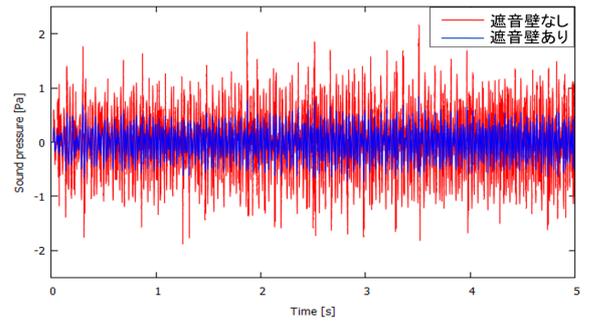


図-9 可聴化音の波形

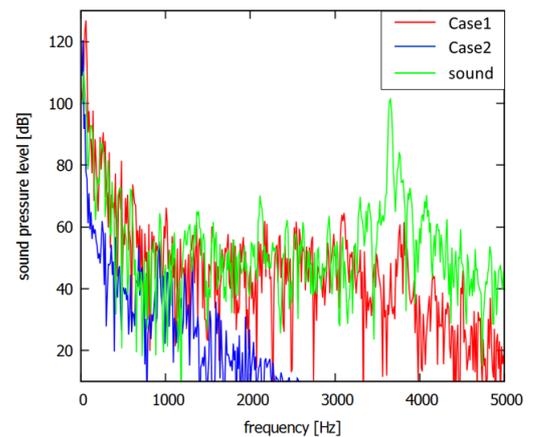


図-10 遮音壁なしの可聴化音の周波数特性

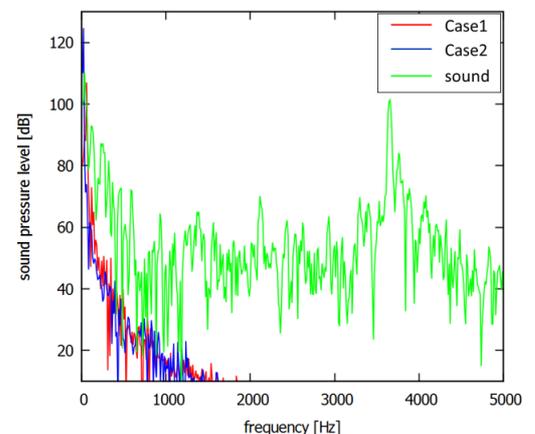


図-11 遮音壁ありの可聴化音の周波数特性