

騒音シミュレーションにおけるメッシュの解像度がインパルス応答と可聴化に及ぼす影響の検討

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

1. はじめに

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。著者らは騒音の影響の事前予測と評価を高精度かつ効率的に行うため、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 法を用いたインパルス応答解析手法と可聴化システムを構築してきた¹⁾。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、メッシュの解像度が両者に及ぼす影響の検討を行った。

2. 数値解析手法

(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伝播させ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。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。

(2) CIP 法と CIP 補間

CIP(Constrained Interpolation Profile)法²⁾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良好に維持できる手法である。多次元移流を実現した CIP 法には M 型 CIP 法と C 型 CIP 法があるが、本手法ではより高精度な解析が可能な C 型 CIP 法を用いる。

(3) AMR 法

AMR 法とは計算解の勾配を指標として時々刻々と部分的にメッシュの粗密付けを行う方法である。図-1 にメッシュの粗密付けの様子を示す。本手法では NASA のオープンソースで AMR 法のサブルーチンパッケージである PARAMESH をベースとしていて、ユーザは CIP 法による音場計算、初期条件、境界条件等のプログラムの実装を行い、計算システムの構築を行っている。

インパルスは非常に短い波であるので、部分的なメッシュの粗密付けは有効である。また AMR 法を用いることで、計算負荷の減少が実現できる。

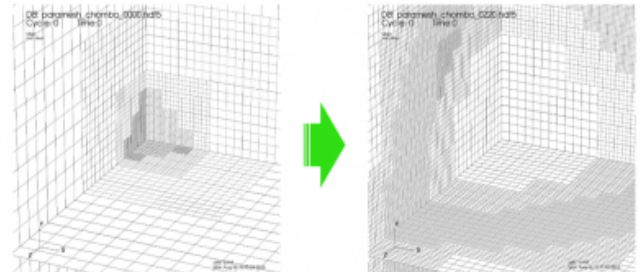


図-1 AMR によるメッシュの粗密付け

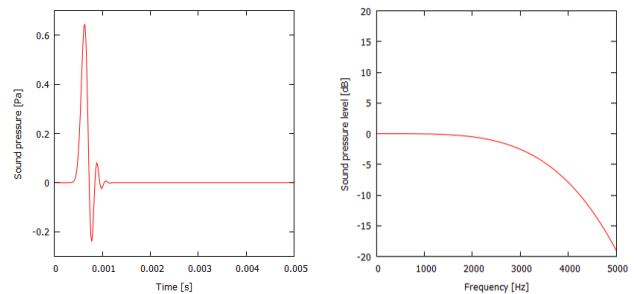


図-2 用いた擬似インパルスと周波数特性

(4) 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 (1) を用いる。

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

詳細は参考文献³⁾を参照されたい。式 (1) のパラメータを $r = 0.2\text{m}$, $\Delta t = 0.01026\text{ms}$ とした擬似インパルスとその周波数特性を図-2 に示す。3500Hz 程度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

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検討を、数値解析例を用いて行った。

KeyWords: AMR 法, インパルス応答, 可聴化

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL 03-3817-1815 E-mail p.tanaka@civil.chuo-u.ac.jp

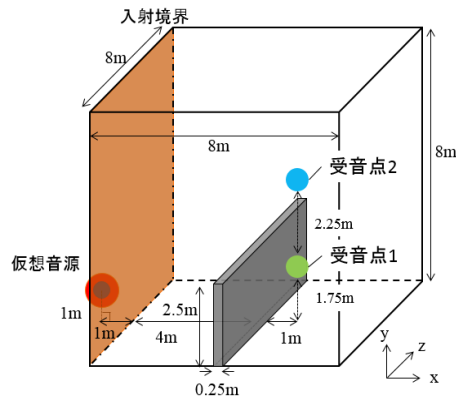


図-3 解析領域

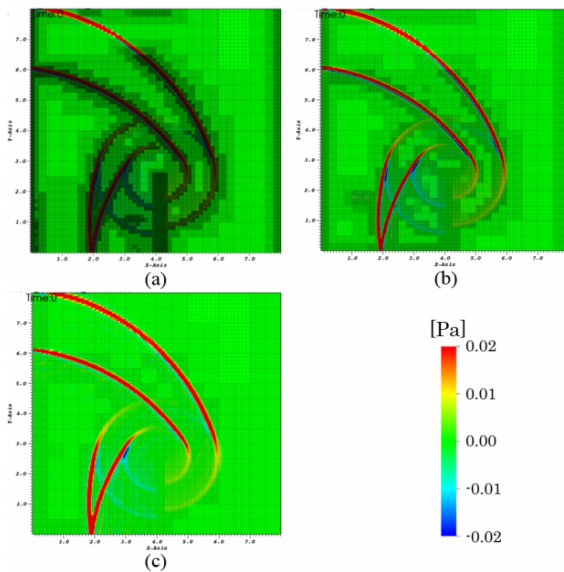


図-4 伝播の様子：(a)Case1 (b)Case2 (c)Case3

(1) 解析条件

解析領域は図-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．入射波には図-2で示した擬似インパルスを用いる．

(2) 解析結果

図-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，図-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．

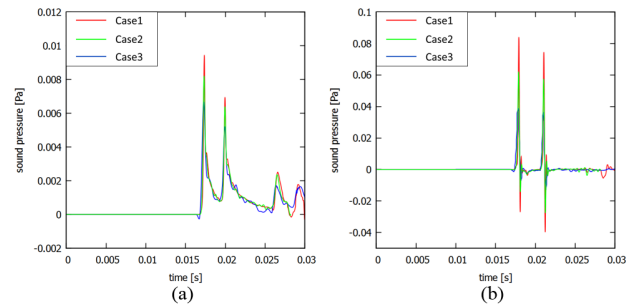


図-5 インパルス応答：(a) 受音点1 (b) 受音点2

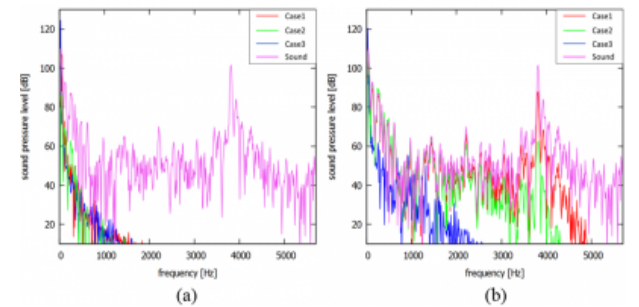


図-6 周波数特性：(a) 受音点1 (b) 受音点2

(3) 畳み込み結果

得られたインパルス応答と音源データ(工事騒音)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図-6に示す．図-6の(a)より，受音点1では遮音壁の影響によりCase1，Case2，Case3ともに高周波成分の減衰が確認できる．また(b)より，受音点2ではCase1は図-2の周波数特性を再現できているが，Case2，Case3はそれぞれの再現可能周波数までしか再現できず高周波の減衰が確認できる．また実際に可聴化を行うと，メッシュの解像度が粗くなるにつれてこもった様な音になる．実際の可聴化音は発表時に示す．

4. 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を行った．その結果メッシュの解像度が十分でないと，インパルス応答の波形が広がり減衰が生じることを示した．また可聴化を行った際，高周波成分の再現ができず，こもった様な音になることを示した．

今後の課題として，実際の都市空間を想定した計算の大規模化，材質を考慮した境界条件の導入が挙げられる．

参考文献

- 吉町徹，谷川将規，榎山和男：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．
- 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．
- Lubich, C. : Convolution quadrature and discretized operational calculus I Numer. Math., 52, (1988), pp. 129-145.