

AMR 法を用いた CIP 法によるインパルス応答解析に関する研究

中央大学 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 櫻山 和男

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きている。そのため事前の騒音の影響の予測、評価が不可欠である。波動音響理論に基づく数値シミュレーションを行う際、音波は考慮すべき周波数の範囲が広いいため細かいメッシュを必要とし、計算時間も膨大になる。

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、AMR(Adaptive Mesh Refinement:解適合格子法)法とCIP法²⁾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。本論文ではメッシュの解像度の差異が計算結果に及ぼす影響の検討を行う。

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。

(2) CIP法とCIP補間

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の差分を用いた高精度の解法である。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、本論文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メッシュの粗密付けを行う方法であり、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PARAMESH³⁾をベースとしている。MPIに基づく並列計算の処理、AMRに関する格子の分割・結合及び格子間のデータの授受等をPARAMESHが担い、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うことで、計算システムの構築を行っている。

3. 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、畳み込み積分の離散近似手法であるLubichのConvolution Quadrature Method(CQM)で提案された式(5)を用いる。Lubichは次のような畳み込み積分

$$f(t) * g(t) = \int_0^t f(\tau)g(t-\tau)d\tau, \quad t \geq 0 \quad (5)$$

を時間増分 Δt を用いて N ステップに分解し

$$f(n\Delta t) * g(n\Delta t) \simeq \sum_{j=0}^n \omega_{n-j}(\Delta t)g(j\Delta t) \quad (6)$$

のように離散化近似することにより求める。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、ラプラス変換域における三次元波動方程式の基本解を用いると

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

と表せ、本手法では式(7)を任意の点における擬似インパルスとして用いる。詳細は参考文献⁴⁾を参照されたい。

4. 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結果に与える影響の検討を行った。

(1) 解析条件

解析領域は図-1に示す通りであり、Case1(最小空間離散化幅 0.0078125m, 時間離散化幅 0.01026ms)とCase2(最小空間離散化幅 0.03125m, 時間離散化幅 0.04105ms)の2

KeyWords: AMR法, CIP法, 波動音響理論, インパルス応答解析

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

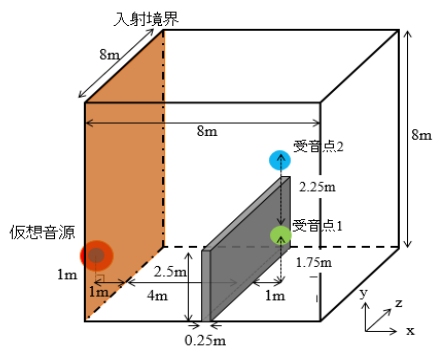


図-1 解析領域

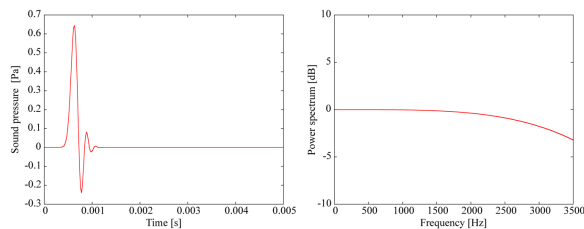


図-2 用いた擬似インパルスと周波数特性

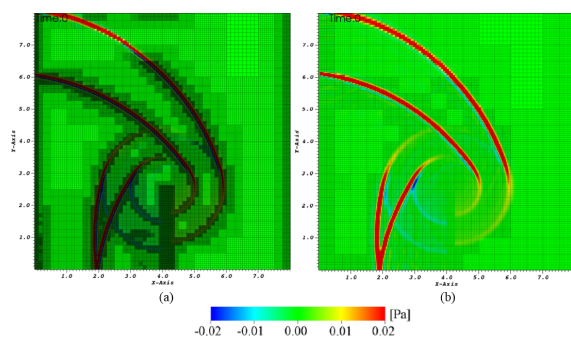


図-3 伝播の様子：(a)Case1 (b)Case2

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．式 (7) のインパルスのパラメータは $r = 0.2\text{m}$ ， $\Delta t = 0.01026\text{ms}$ とした．図-2 に伝播させるインパルスとその周波数特性を示す．

(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 に各受音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の波形が広がっていることが確認できる．

(3) 畳み込み結果

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図-5 に示す音源データ（工事騒音）との畳み込みを行う．Case1，Case2 のインパルス応答と音源データとの畳み込み結果の波形の周波数特性を図-6 に示す．図-6 の (b) において，Case2 の場合（メッシュの解像度が粗い場合）に，1200Hz 付近から音圧レベルが減少し Case1 に比べて高周波を再現できていないことが確認できる．

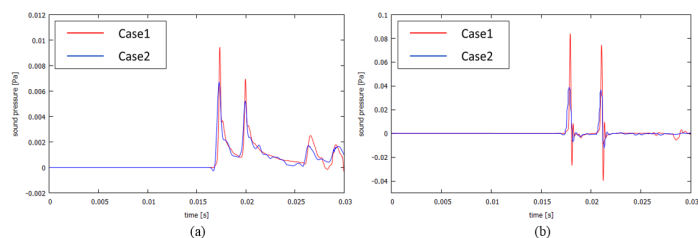


図-4 インパルス応答：(a) 受音点 1 (b) 受音点 2

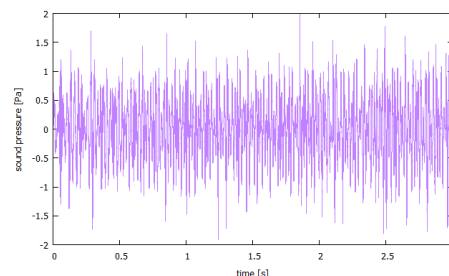


図-5 音源データ

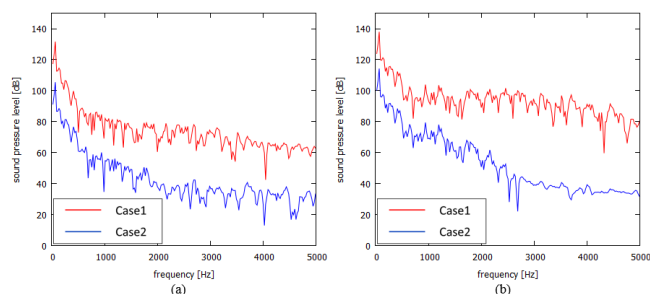


図-6 周波数特性：(a) 受音点 1 (b) 受音点 2

5. おわりに

本論文では，メッシュの解像度が計算結果結果に及ぼす影響の検討を行い以下の結論を得た．

- メッシュの解像度が粗いと，擬似インパルスの形を捉えられずに波形が広がることを示した．
- 畳み込みを行った際に，メッシュの解像度が粗いと高周波成分の再現ができないことを示した．

今後の課題として，畳み込みによって得られたシミュレーション結果を可聴化して VR 空間に提示する予定である．

参考文献

- 1) 吉町徹，谷川将規，樫山和男：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) PARAMESH ホームページ：<https://opensource.gsfc.nasa.gov/projects/paramesh/index.php#software/>
www.physics.drexel.edu/~olson/paramesh-doc/Users_manual/amr.html
- 4) Lubich, C.：Convolution quadrature and discretized operational calculus I Numer. Math., 52, (1988), pp. 129-145.