

波動音響解析における擬似インパルス応答解析手法の妥当性の検証

中央大学大学院 学生員 吉町 徹
清水建設(株) 正会員 谷川 将規
中央大学 正会員 櫻山 和男

1. はじめに

著者ら¹⁾は広域の波動音響解析を高精度かつ合理的に行うため、計算メッシュの動的な粗密付けが可能なAMR(Adaptive Mesh Refinement:解適合格子)法を用いたCIP法²⁾³⁾に基づく音場解析手法を構築した。

道路交通騒音のように様々な周波数特性の音源が混在する問題の場合、インパルス応答と音源を畳み込むことで様々な音源の応答を得る方法が有効であるが、空間離散化解法においてインパルスを精度良く伝播させる事は困難であるため、擬似インパルスを用いる必要がある。

本論文では著者らにより構築された音場解析手法¹⁾を基に、擬似インパルス及び入射境界を用いた効率的なインパルス応答解析手法を構築し、本手法のインパルス応答解析としての妥当性の検証を行う。

2. 入射境界を用いた擬似インパルス応答解析手法

(1) 擬似インパルスの生成

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)⁵⁾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、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

$$\omega_n(\Delta t) \simeq \frac{R^{-n}}{L} \sum_{l=0}^{L-1} \left(\frac{1}{4\pi r} e^{-\frac{sr}{c}} \right) e^{(-2\pi i \frac{nl}{L})} \quad (3)$$

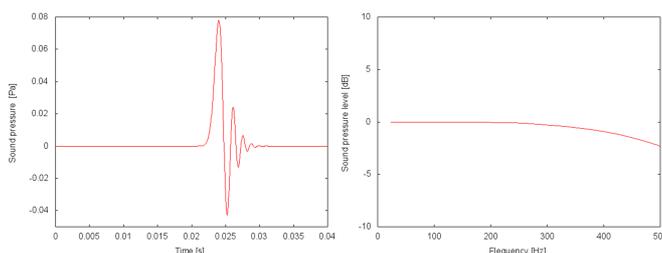


図-1 擬似インパルスの周波数特性

と表せる。ここで 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。本手法では式(3)を任意の点における擬似インパルスとして用いる。

式(3)で $r = 8\text{m}$, $\Delta t = 0.082\text{ms}$ とすると図-1に示すように500Hzまでは差異3dB以内のフラットな周波数特性をもつ波形となる。

(2) 入射境界

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-2に示すように仮想音源点から任意の平面に球面波として流入してくる物理量を入射境界上に与える手法を提案する。

地点Aを基準に擬似インパルスで与えられた音圧 p_A に対して地点Bの音圧は、 p_A を距離減衰させた以下の式で与える。

$$p^B = \frac{r_0}{r_1} p^A \quad (4)$$

また地点Aと地点Bの到達時間差をステップ数で近似したものを Δn とすると地点Bの音圧は距離減衰と到達時間差を考慮した以下の式で与えられる

$$p_n^B = \frac{r_0}{r_1} p_{n-\Delta n}^A \quad (5)$$

粒子速度は速度ポテンシャル ϕ から導出し境界上に与える。速度ポテンシャル ϕ は、音圧との関係から次式で導出し

$$\phi_n = \phi_{n-1} - \frac{\Delta t}{\rho} p_n \quad (6)$$

速度ポテンシャルから粒子速度を以下の式で導出する。

$$u_n = \frac{\partial \phi_n}{\partial x} = \frac{\partial \phi_{n-1}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \frac{\Delta t}{\rho} p_n \quad (7)$$

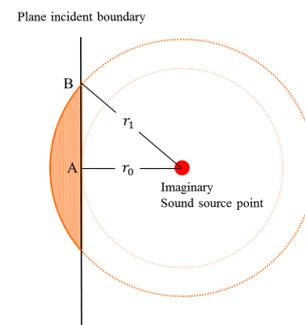


図-2 入射境界

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

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 E-mail: yoshimachi@civil.chuo-u.ac.jp

3. 数値解析例

入射境界から入射された擬似インパルスの三次元伝播問題において、自由空間での距離減衰率及び周波数特性の検証を行う。また数値計算で得られた受信点の時刻歴をインパルス応答として畳み込みを行い、本手法のインパルス応答解析としての妥当性の検証を行う。

(1) 解析条件

解析モデルは図-3 に示すものであり、空間離散化幅を 0.03125m、時間離散化幅は 0.04136ms(CFL=0.45)、入射境界から 4m の位置に仮想音源点を配置し、入射境界上の節点に音圧を式 (5)、粒子速度を式 (7) で与える。

(2) 解析結果

図-4 に xy 断面での 250step と 500step における音圧分布とメッシュの可視化結果を示す。入射境界から球面擬似インパルス波が伝播できていることが確認できる。また 8m,16m 地点の 2 点間の距離減衰率は 0.5022 となったことから自由空間における球面波の伝播を精度良く再現できている。また、図-5 に受信点 2 の音圧時刻歴と周波数特性を示す。受信点において入射波の周波数特性を十分に保持していることが確認できる。

(3) インパルス応答の畳み込み

図-6 に入力信号、インパルス応答、出力信号を示す。本適用例では入力信号に sin 波 100Hz を 5 波長とし、インパルス応答には図-5 に示す受信点 2 での応答を使用した。出力には若干のオーバーシュートが生じているものの、入力波の応答として妥当な結果が得られた。

4. 結論

本論文では、波動音響解析における擬似インパルス応答解析手法の妥当性の検証を目的とし、擬似インパルスの三次元伝播問題への適用例を通して以下の結論を得た。

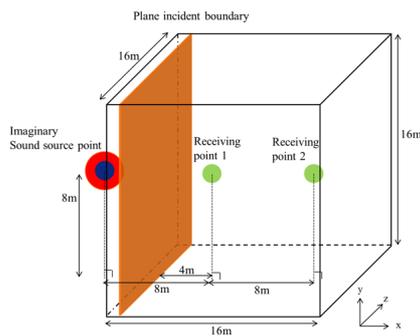


図-3 解析モデル

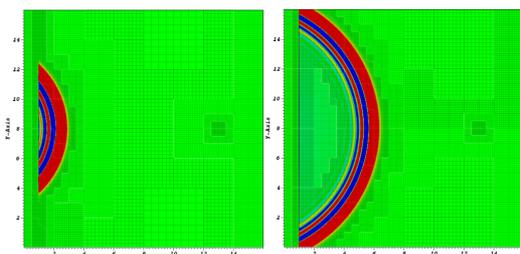


図-4 伝播の様子

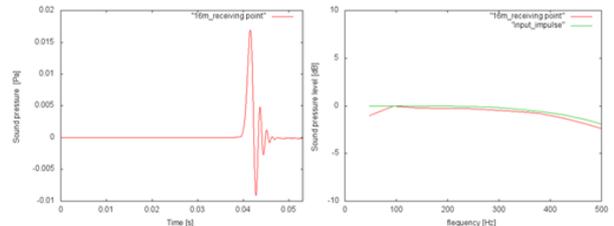


図-5 受信点での時刻歴と周波数特性

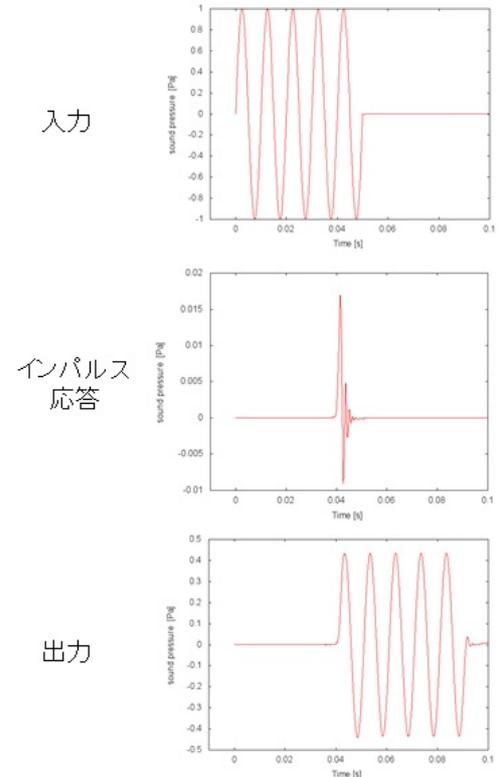


図-6 インパルス応答の畳み込み

- 入射境界から入射された擬似インパルスは自由空間における球面波の距離減衰率を良い精度で満たし、周波数特性も入射波の特性を十分に保っている。
- 擬似インパルスの伝播計算によって得られたインパルス応答と音源信号の畳み込みを行い、妥当な出力信号が得られた。

以上の結果より、本提案手法の妥当性が示されたといえる。

今後は、より定量的な精度検証、本手法の移動音源への適用を予定している。

参考文献

- 1) 守屋陽平・谷川将規・榎山和男 :AMR 法を用いた CIP 法による音場解析, 土木学会論文集 A2, (応用力学論文集), Vol.16, I-195-202, 2013.
- 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) 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) 日本音響学会 (編) :音環境の数値シミュレーション 波動音響解析の技法と応用, 丸善出版, 201
- 5) Lubich C, Convolution quadrature and discretized operational calculus. I. Numerische Mathematik, Vol.52, pp.129-145, 1988.