

AMR法を用いたCIP法による音場解析

中央大学大学院 学生員 ○ 守屋 陽平
清水建設(株) 谷川 将規
中央大学 正会員 檜山 和男

1. はじめに

近年、コンピュータのハードウェアの進歩により波動音響理論に基づく高精度な音場解析手法が提案されている。しかし、一般的に波動音響解析は膨大な計算機資源を必要とするため、広域の計算には不向きである。

そこで、本論文では広域の波動音響解析を高精度かつ合理的に行うため、計算メッシュの粗密付けが可能なAMR(Adaptive Mesh Refinement:解適合格子)法に着目し、音場解析手法には近年注目されているCIP法¹⁾を用いる。本手法の有効性を検討するため、単純な形状の障壁を有する2次元室内音場問題への適用を行う。

2. 解析アルゴリズム

(1) AMR法

本解析手法は、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PARAMESH²⁾をベースとしており、図-1に示すようにPARAMESHが担う部分と、ユーザが実装する部分により構成される。PARAMESHの機能としては、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があり、そこにCIP法による音場計算、初期条件、境界条件等を組み合わせることによりシステムの構築を行っている。

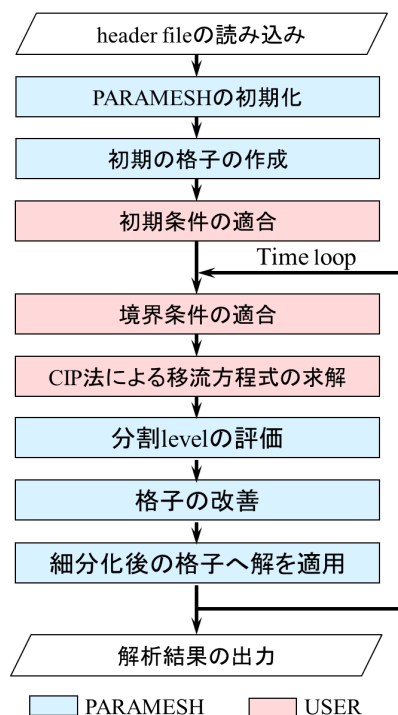


図-1 フローチャート

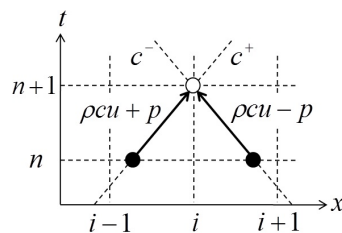


図-2 特性曲線

(2) CIP法

a) 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³⁾。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

ここで、 p は音圧[Pa]、 u は粒子速度[m/s]、 ρ は空気の密度[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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c u + p) + c \frac{\partial}{\partial x}(\rho c u + p) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c u - p) - c \frac{\partial}{\partial x}(\rho c u - p) = 0 \quad (4)$$

のようになる⁴⁾。

式(3)は $\rho c u + p$ が正方向に、式(4)は $\rho c u - p$ が負方向にそれぞれ速さ c で伝播する移流方程式であり、図-2のように、 $\rho c u + p$ 、 $\rho c u - p$ を特性曲線に沿って移流させることにより次ステップの値を算出する。

b) CIP補間

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高精度の解法であり、移流させる物理量を求める際には微分値も用いたCIP補間と呼ばれる補間を行う。勾配も移流させるために数値分散が起りにくく、厳密解のプロファイルを比較的よく維持することができる。式(3),(4)の両辺を x で微分した式(5),(6)も移流方程式を満たす³⁾。

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x}(\rho c u + p) + c \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x}(\rho c u + p) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x}(\rho c u - p) - c \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x}(\rho c u - p) = 0 \quad (6)$$

3次多項式の未知数決定には、格子点における $\rho c u + p$ 、 $\rho c u - p$ に加え、 $\partial(\rho c u + p)/\partial x$ 、 $\partial(\rho c u - p)/\partial x$ を用いる。

KeyWords: AMR法, CIP法, 音響

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

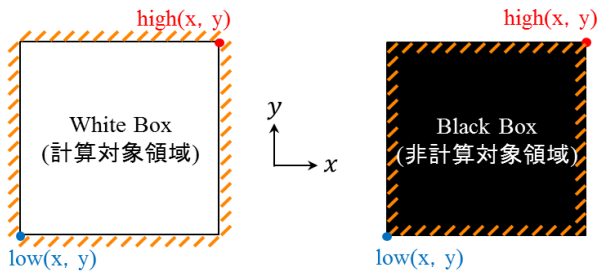


図-3 領域の定義

(3) 領域の定義

本解析手法では、初期の格子の作成時において、計算対象領域と非計算対象領域の定義を行っている。領域の定義の方法は図-3に示すように、領域の外側に境界をもち、内部での計算及び格子の改善を行う WhiteBox と、領域の内側に境界をもち内部での計算を行わない BlackBox の2種類の領域がある。これらを解析領域に配置することによって任意の領域形状を作成可能としている。なお、領域同士を重ね合わせることも可能である。

3. 数値解析例

数値解析例として、任意の幾何形状を作成するための領域定義方法を用いた、単純な形状の障壁を有する2次元室内音場問題を取りあげる。

(1) 解析条件

解析領域は図-4に示すものであり、空間離散化幅を0.0391m、時間離散化幅を0.0574ms(CFL=1.0)、音源を図の左下の位置に設定する。

$$p(r) = \exp \left\{ - \left(\frac{r}{d} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

初期の音圧分布は式(7)のGauss分布とし、 r は波源点からの距離を表し、 d は音源の幅を与える定数であり1.47mとする。また、媒質密度 ρ は1.205kg/m²、音速 c は

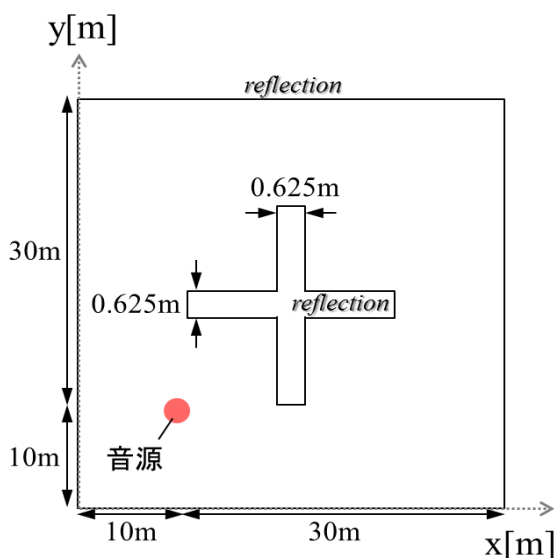
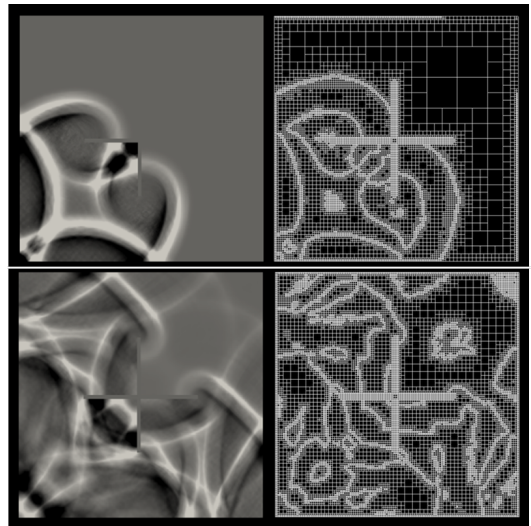


図-4 解析領域

図-5 $t=46.0\text{ms}$ (上図)と $t=115.0\text{ms}$ (下図)における音圧分布とメッシュの可視化結果

340.0m/s、境界条件は外周及び十字型の障壁のすべての面を完全反射境界とし、計算を行う。

(2) 解析結果

図-5に $t=46.0\text{ms}$ と $t=115.0\text{ms}$ における音圧分布とメッシュの可視化結果を示す。2つのBlackBoxから1つの十字型の障壁を作成することができており、それに音波が反射することによって多重の回折や干渉が生じている。このような複雑な境界条件下においても、本手法では計算格子を精度良く局所的に細かくできている様子が確認できる。

4. おわりに

本論文では、AMR法を用いたCIP法による広域の音場解析手法の構築を目的とし、単純な形状の障壁を有する2次元室内音場問題を通して以下の結論を得た。

- PARAMESHを用い、今まで使用していたCIP法のコードにAMR法の適用を行った。
- 2次元室内音場問題において、複雑な境界条件下における本手法の有効性を示すことができた。

今後の課題として、3次元への解析領域の拡張、及び実地形を想定した斜めや曲線の境界の作成を検討していく予定である。

参考文献

- 1) PARAMESH ホームページ: http://www.physics.drexel.edu/~olson/paramesh-doc/Users_manual/amr.html
- 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) 太刀岡勇気, 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, 2011.