

時間域 FMBEM に基づく大規模並列音場解析手法の構築

中央大学大学院 学生員 高木 貴弘
 京都大学大学院 正会員 吉川 仁
 名古屋大学大学院 非会員 高橋 徹
 中央大学 正会員 櫻山 和男

1. はじめに

都市空間の騒音の評価には波動音響理論に基づく数値シミュレーションが広く用いられている。著者らはこれまでに波動音響理論に基づく境界要素法による道路交通騒音解析に対して高速多重極法 (Fast multipole method: FMM) および共有メモリ型並列計算機を用いた OpenMP 並列を行い、その可聴化を行ってきた¹⁾。しかし、実現象レベルの騒音の可聴化を行うためには数千 Hz 程度の高周波成分を考慮可能な微細なメッシュを用いる必要があり、現状の並列計算手法では広領域の解析を行うことが困難であった。

そこで本研究では、高速多重極境界要素法 (Fast multipole boundary element method: FMBEM) に MPI (Message Passing Interface)²⁾ および OpenMP に基づくハイブリッド並列化手法を導入し、非定常の音場解析を行う。ハイブリッド並列化手法の導入によって、共有分散メモリ型並列計算機で大規模解析が可能となる。直壁型、円弧型の 2 種類の遮音壁を有する 3 次元非定常の音場解析を用いて、本手法の妥当性および有効性の検証を行う。

2. 時間域境界要素法による初期値・境界値問題

本研究で扱う非定常波動散乱問題は次の通りである。

$$\frac{\partial^2 u(\mathbf{x}, t)}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 u(\mathbf{x}, t) \quad \text{in } D, \quad t > 0, \quad (1)$$

$$u(\mathbf{x}, 0) = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, 0) = 0 \quad \text{in } D, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t) = \bar{q}(\mathbf{x}, t) \quad \text{on } \partial D, \quad t > 0, \quad (3)$$

$$u(\mathbf{x}, t) = u_{\text{in}}(\mathbf{x}, t), \quad |\mathbf{x}| \rightarrow \infty, \quad t > 0, \quad (4)$$

ここに、 D 、 ∂D は領域とその境界を表し、 u は音圧、 c は波速、 \bar{q} は既知関数、 u_{in} は入射波、 n は領域からの外向き単位法線ベクトルである。式 (1) ~ (4) に対応する境界積分方程式は次式で得られる。

$$\frac{1}{2}u(\mathbf{x}, t) = \int_0^t \int_{\partial D} \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) \bar{q}(\mathbf{y}, s) dS ds - \int_0^t \int_{\partial D} \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) u(\mathbf{y}, s) dS ds + u_{\text{in}}(\mathbf{x}, t), \quad (5)$$

ここに、 Γ は、3 次元波動方程式の基本解である。また、式 (5) により求められた境界上の u の値を用いて、次式より、領域内部の任意の点 \mathbf{x} での音圧 u を求める。

$$u(\mathbf{x}, t) = \int_0^t \int_{\partial D} \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) \bar{q}(\mathbf{y}, s) dS ds - \int_0^t \int_{\partial D} \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) u(\mathbf{y}, s) dS ds + u_{\text{in}}(\mathbf{x}, t). \quad (6)$$

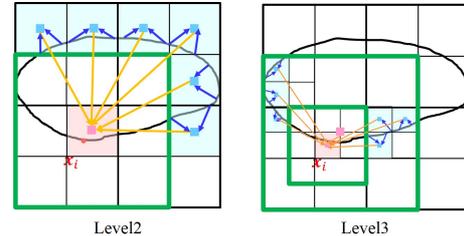


図-1 解析境界上の観測点 x_i と 2 次元領域における FMM の計算

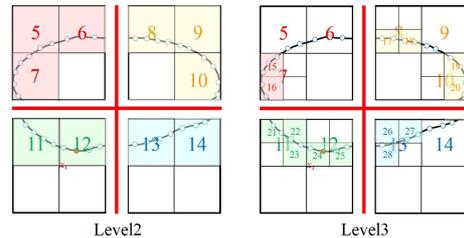


図-2 FMM におけるセルベースの MPI 並列化 (4 並列)

本研究では、式 (5) の解法として補間に基づく時間域高速多重極法³⁾を適用した。

3. 時間域 FMBEM のハイブリッド並列化

(1) 境界のセル分割と時間域 FMBEM のアルゴリズム

本研究では境界要素解析の計算負荷を大幅に削減するために FMM を用いる。次項で述べる並列化手法に先立ち、FMM のアルゴリズムについて説明する。図 - 1 に解析境界上にある観測点 x_i および 2 次元領域における FMM の計算の概念図を示す。Level 2 において、遠くの境界要素からの影響はそのレベルのセルに集められる。近くの境界要素の影響は、セル分割をもう一度行い、細かい分割レベルで影響が集められる。セル内の要素が任意の数よりも小さくなるまで分割されたら近傍の境界要素からの影響は直接計算で求められる。

(2) FMM における MPI 並列

図 - 2 に示すように FMBEM の計算において、Level 2 のセルに関して領域分割を行い、担当セルを均等にプロセスに割り当てる。Level 3 以降のセルに関しては、担当するセルを再分割して生まれたセルを担当する。それぞれのプロセスが割り当てられたセルおよびその中に含まれる境界節点に関する計算のみを行うことで、計算メモリの削減および計算時間の短縮をはかることができる。

図 - 3 に MPI 並列を行った際の高速多重極法の計算の概念図を示す。図 - 1 で青地になっているセルのうち図 - 3 で青枠になっているセルは赤地のセルを担当するプロセスが持っていないセルである。そのため、青枠のセルに収

KeyWords: 境界要素法, 音響, 高速多重極法, MPI 並列, 遮音壁

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学 E-mail: a12.e8af@g.chuo-u.ac.jp

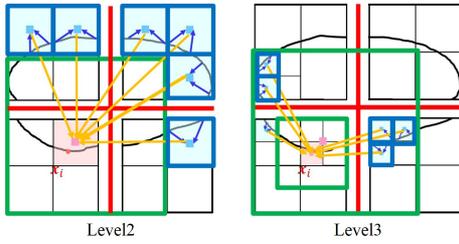


図-3 MPI 並列時の FMM の計算

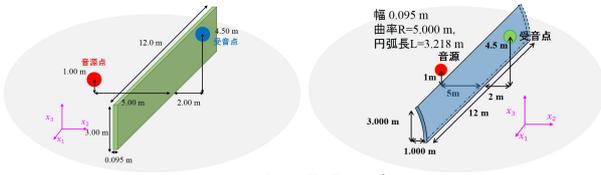


図-4 解析モデル

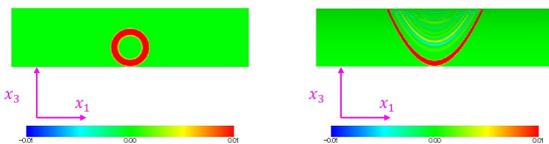


図-5 時刻 $t = 0.015$ sec. の壁面の音圧分布

集された値はプロセス間の通信によって得る。

(3) FMM における MPI-OpenMP ハイブリッド並列

メモリ確保のため MPI 並列において 1 プロセスで 1 ノードを占有して並列計算を行う。さらに、計算速度向上のため共有分散メモリ型計算機での OpenMP 並列を実装する。そのために、MPI-OpenMP ハイブリッド並列を用いる。

4. 数値解析例

本発表では時間域 FMBEM に基づく大規模並列音場解析の現実空間への適用例として、図-4 に示す 2 種類の遮音壁を有する問題の解析を行う。直立型の遮音壁を有する半無限領域を遮音壁 1 とする。円弧型の遮音壁を有する半無限領域を遮音壁 2 とする。いずれも、境界の離散化には短辺が 34 mm の二等辺直角三角形の構造メッシュ (総要素数 263,424) を用いる。時間離散化幅は $100 \mu s$ とした。入力波形として、1step 目のみ 1 の値を与えられたインパルスを用いる。また、境界条件としていずれの問題に対しても完全反射 $\bar{q} = 0$ を仮定する。また、共有分散メモリ型並列計算機は京都大学スーパーコンピュータ (Cray XC40) を用いた。1 ノードあたり 68 個のコアと 90 GiB のメモリが使用可能である。本解析では、FMM による Level 2 のセル数が遮音壁 1 では 16、遮音壁 2 では 24 であり、MPI による並列数もそれに合わせた。また、いずれも OpenMP による並列数を 68 とし、遮音壁 1 では 1088 個のコアと 1.41 TiB のメモリを、遮音壁 2 では 1652 個のコアと 2.11 TiB のメモリを確保した状態で解析が行われた。また、遮音壁 1、遮音壁 2 の計算時間はそれぞれ 23 分、187 分であった。

図-5 に時刻 $t = 0.015$ sec. の壁面の音圧分布を示す。図より、遮音壁の形状による音圧分布の違いが確認できる。

続いて、図-6 に示す断面に対して要素分割を行い内点計算を行った (要素数はそれぞれ 125,565, 128,131)。使用した計算機は、境界値計算のときと同様のものを用いた。

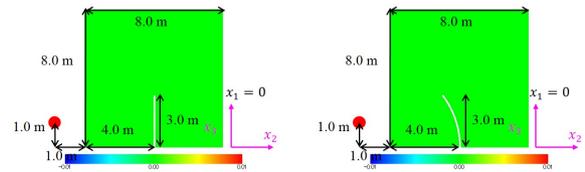


図-6 $x_1 = 0$ 断面

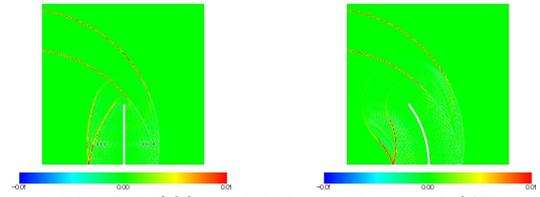


図-7 時刻 $t = 0.020$ sec. の $x_1 = 0$ 断面

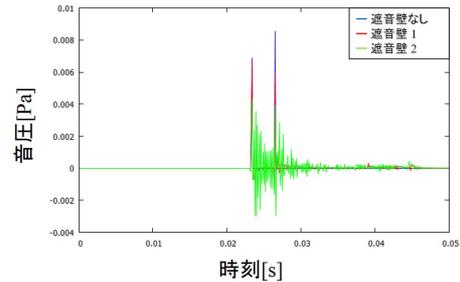


図-8 受音点における音圧の時刻歴

いずれも MPI による並列数を 16, OpenMP による並列数を 68 とし、1088 個のコアと 1.41 TiB のメモリを確保した状態で解析が行われた。

図-7 に時刻 $t = 0.020$ sec. の断面の音圧分布を示す。図より、遮音壁 2 のほうが遮音壁裏において音を遮っている範囲が広いことが確認できる。

図-8 に受音点における時刻歴を示す。図より遮音壁 1 では音源点からインパルスが直接届いている為音圧のピーク値に変化が見られないが、遮音壁 2 では音圧のピーク値が下がっていることが確認できる。このことから壁の形状によって遮音効果が異なると考えられる。また、工事騒音の音源データとの畳み込みを行い可聴化を行った。可聴化結果については講演時に示す。

5. おわりに

本報告では、MPI-OpenMP ハイブリッド並列化された時間域 FMBEM に基づく大規模並列音場解析手法を用いて、直立型および円弧型の遮音壁を有する音場解析を行い、比較を行った。

今後の課題として、境界要素法の特徴を生かした建物等を有するさらに複雑な形状への適用を行っていく。

参考文献

- 岡村理一郎, 吉川仁, 高橋徹, 高木貴弘, 櫻山和男: 安定化手法を用いた時間域多重境界要素法に基づく道路交通騒音解析とその可聴化システム, 土木学会論文集 A2(応用力学), 土木学会, Vol.72, 2016.
- 櫻山和男, 西村直志, 牛島省: 並列化計算法入門, 日本計算工学会, 丸善, 2003.
- T. Takahashi: An interpolation-based fast-multipole accelerated boundary integral equation method for the three-dimensional wave equation, Journal of Computational Physics, Vol.258, pp.809-832, 2014.