

並列計算による 3 次元音響伝搬解析

岡山大学 学生会員 ○前田 琢己
岡山大学 正会員 比江島 慎二

1. はじめに

交通騒音や建設騒音、風力発電の風車からの騒音など、屋外における騒音伝搬が問題となることがある。屋外の音響伝搬解析には、半無限領域の解析に適した境界要素法(BEM)が多く用いられるが、空間的な気温変化の存在や構造物群・複雑な地形周辺の音響伝搬解析には、有限要素法(FEM)が有利である。しかしながら、有限要素法(FEM)は、広大な屋外空間において計算量・必要記憶容量が必然的に膨大となる。本研究では、無限空間へのスムーズな音響伝搬を実現するため、ハイブリッド型無限要素¹⁾²⁾を用いるとともに、計算容量削減のため、有限要素法における全体マトリクスを作成せずに要素ごとに共役勾配法の内積計算を行う Element-by-Element 法³⁾を導入し、並列計算による 3 次元音響伝搬解析を行った。

2. 解析方法

音場のヘルツホルム方程式をリッツ・ガラーキン法により離散化すると以下の有限要素方程式が得られる。

$$([M] - k^2[K] + ik[G])\{p\} = \{Q\} \quad (1)$$

ここで、 k : 波数、 $[M]$: イナータンス行列、 $[K]$: エラスタンス行列、 $[G]$: 減衰行列、 $\{p\}$: 節点音圧ベクトル、 $\{Q\}$: 点音源ベクトル、 i : 虚数単位である。式(1)の有限領域での基礎方程式に加えて、ハイブリッド型無限要素を有限領域の終端境界に接合し、ハイブリッド変分原理にもとづいて終端境界のフラックス連続条件を緩めた定式化を行うことにより、有限領域を終端するためのアドミッタンスマトリクスが得られる。このアドミッタンスマトリクスにより、無限空間への音響伝搬が仮想的に表現される。また、Element-by-Element 法は共役勾配法の反復計算の中で繰り返し現れる全体マトリクス $[A]$ と節点ベクトル $\{x\}$ の内積計算を次式のように要素マトリクス $[A]_e$ のままで処理するものである。全体マトリクスを作成しないため、計算容量を大幅に削減できる。

$$[A]\{x\} = \sum_e [A]_e \{x\}_e \quad (2)$$

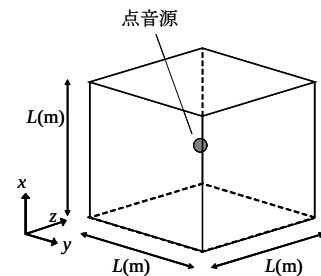


図-1 解析モデル図

図-1 に示す立方体領域の中心に 50Hz の点音源を置いたときの 3 次元音響伝搬解析を行った。この立方体領域の x, y, z 方向の各辺を同じ分割数で格子状に分割してできる 6 面体要素を用いる。6 面体要素は頂点と辺上に節点を持つ 20 節点アイソパラメトリック要素である。全体領域の 6 つの面はすべて無限境界¹⁾²⁾として処理する。なお、音速 340m/s、空気密度 1.293kg/m³とした。並列計算には Intel Xeon 3.4GHz プロセッサをデュアル CPU 構成した計算機を複数台ネットワーク接続している。並列計算の CPU 数に応じて、図-1 の立方体領域を z 方向に等間隔に分割し、各分割領域に含まれる有限要素群を各 CPU に割り当てている。

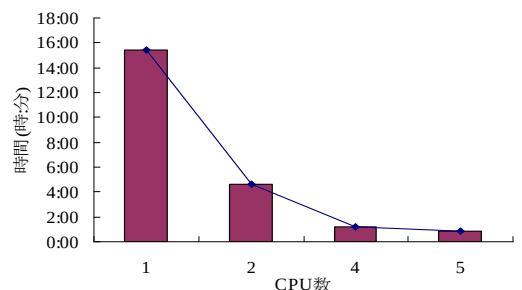


図-2 CPU 数による計算時間の変化
($L=20m, 20$ 分割)

3. 並列計算による演算時間の短縮

図-1 において、 $L=20m$ 、 x, y, z 方向に 20 分割(8000 要素)したとき、並列計算の CPU 数の違いによる演算時間の変化を示した

のが図-2である。図-2よりCPU数が n 倍になれば、ほぼ $1/n^2$ の割合で演算時間が短縮されることが分かる。また、要素分割数が2倍、すなわち総要素数が8倍となると計算時間は約80～90倍となることが別途明らかになっている。

4. 音圧距離減衰の検証

点音源から伝搬する球面波は、距離減衰により、距離が2倍になれば音圧は半分になり、音圧レベルで6dBの低下に相当する。図-1で $L=30\text{m}$ 、 x,y,z 方向に30分割(27000要素)、音源周波数50Hzとしたとき、音源からの距離 r に対する音圧レベルの分布を図-3に示す。横軸の基準距離 $r_0=0.125\text{m}$ は今回の一連の解析において最も要素サイズが小さい解析ケースの最小節点間距離を用いている。図-3で例えば音源からの距離 $r=6\text{m}, 12\text{m}$ (横軸の1.7と2.0に相当)の倍距離2点間の音圧レベル差はほぼ6dBとなり、理論通りの距離減衰であることが確認できる。

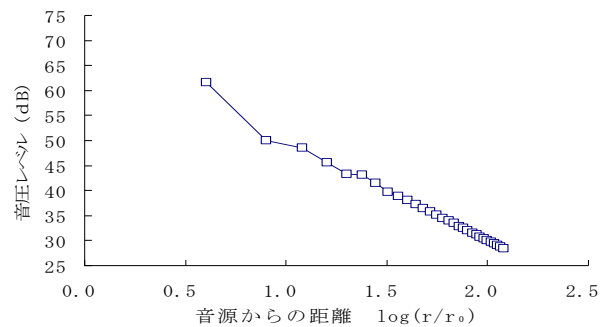


図-3 音圧の距離減衰 ($L=30\text{m}$, 30 分割)

5. 気温変化や地面が存在するときの音響伝搬解析例

図-1の立方体領域において、音源から上半分と下半分で気温が異なる(上側: 50°C 、下側: 0°C)ときの等音圧面図および音源からの距離に対する音圧分布を図-4に示す。 $L=20\text{m}$ 、 x,y,z 方向に40分割(64000要素)、音源周波数50Hzのときの結果である。図-4からわかるように 0°C 領域の方が同じ音源からの距離で少し高い音圧をとっている。これは、音圧が媒質密度に比例し、 0°C の空気密度 1.293kg/m^3 が 50°C の空気密度 1.093kg/m^3 を上回るためである。

また、図-1の底面を地面と見なし、底面のみを完全反射境界としたときの等音圧面図および音源からの距離に対する音圧分布を図-5に示す。

$L=30\text{m}$ 、 x,y,z 方向に30分割(27000要素)、音源周波数50Hzのときの結果である。音源と地面の間の空間には、音源からの直接音と地面からの反射音による波の干渉が起こり、音の波長の半分の間隔の定常波が生じている。

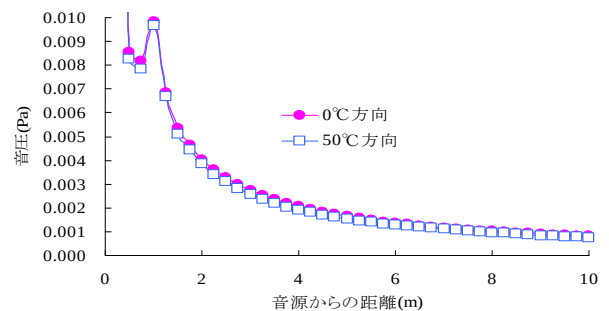
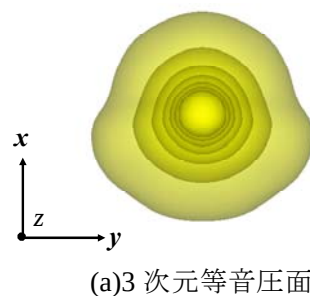


図-4 領域内で気温が異なるとき($L=20\text{m}$, 40 分割)

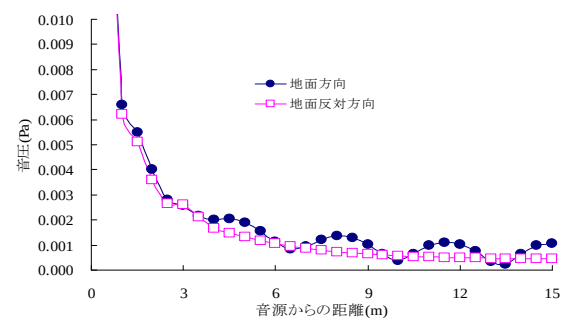
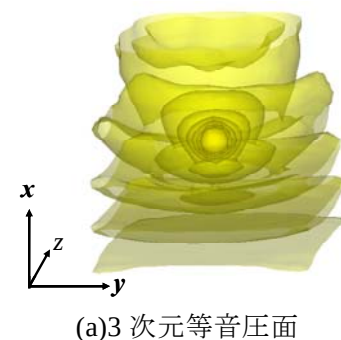


図-5 地面が存在するとき($L=30\text{m}$, 30 分割)

参考文献

- 1) 加川幸雄(1983): 開領域問題のための有限/境界要素法、サイエンス社
- 2) 加川幸雄(1998): FEMプログラム選3 音場・圧電弾性振動場 -2次元/軸対象/3次元・2次元-、森北出版
- 3) Barragy, E. and Carey G. E.(1988): A parallel element-by-element solution scheme, Int. J. Numerical Methods in Eng., Vol. 26, pp. 2367-2382