

複雑地形を考慮した屋外音響伝搬解析における地表面境界の検討

岡山大学 学生会員 ○吉木 健吾
岡山大学 正会員 比江島 慎二

1. はじめに

屋外における騒音伝搬は、風の流れや複雑な地形形状等の影響を受け複雑な伝搬性状を呈する。本研究では、直交格子を用いた差分による複雑地形上の音響伝搬解析において、地表面を完全反射としたときの境界処理方法について検討した。

2. 屋外音響伝搬の解析手法

風による音の移流効果を精密に再現するため、Hardinら¹⁾による非圧縮性の風の流れ場との連成項を含んだ空力音の分離解法で用いられる以下の音場基礎方程式を導入した。

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \sum_{s=1}^3 \frac{\partial \mathbf{E}_s}{\partial x_s} = \mathbf{F} \quad (1)$$

ここで

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \rho' \\ (\rho_0 + \rho')u'_1 + \rho'U_1 \\ (\rho_0 + \rho')u'_2 + \rho'U_2 \\ (\rho_0 + \rho')u'_3 + \rho'U_3 \end{bmatrix} \quad \mathbf{E}_s = \begin{bmatrix} (\rho_0 + \rho')(U_1u'_s + U_su'_1 + u'_1u'_s) + U_1U_s\rho' + \delta_{1s}p' \\ (\rho_0 + \rho')(U_2u'_s + U_su'_2 + u'_2u'_s) + U_2U_s\rho' + \delta_{2s}p' \\ (\rho_0 + \rho')(U_3u'_s + U_su'_3 + u'_3u'_s) + U_3U_s\rho' + \delta_{3s}p' \end{bmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_{monopole} \\ F_{dipole1} \\ F_{dipole2} \\ F_{dipole3} \end{bmatrix}$$

u は速度、 p は圧力、 ρ は密度、大文字は非圧縮である風の流れ場成分、添え字ダッシュは音響成分、 ρ_0 は静止流体の密度、添え字 s は座標方向のそれぞれの成分を示す。この基礎方程式に対し、等間隔の直交格子およびマッコーマック法²⁾による時間積分にもとづいた有限差分解析を行う。なお、有限領域での差分解析において、屋外での半無限空間への音響伝搬を仮想的に実現するため、解析領域の外部境界にMurの1次吸収境界条件³⁾を用いた。

3. 複雑地形における完全反射境界処理

解析対象とする2次元あるいは3次元の全体領域を等間隔の直交格子で分割し、まずはすべての格子点を対象として、空気媒質に属する格子点と地表面下の地盤内に属する格子点とに分別する。そして図-1のように空気媒質に隣接する地盤中の格子点 (i, j) に対しては、地表面法線方向の音響粒子速度が0、地表面に平行な音響粒子速度とその他の音響成分が自由という滑り条件にしたがって隣接する空気媒質の格子点 $(i, j+1)$ の逆符号および同符号の値をそれぞれ与える。これによって、地盤中の格子点 (i, j) とそれに隣り合う空気媒質中の格子点 $(i, j+1)$ との間に破線で示すような完全反射境界（地表面）を仮定する。しかし図-2のように隣り合う空気媒質の格子点が複数存在する場合、それらの格子点毎に異なる複数の音響成分が格子点 (i, j) に与えられることになる。よって、格子点 (i, j) の隣接格子点での差分計算の方法としては、 (i, j) における複数の音響成分の平均値を次の時間ステップに進む前に求めておき、次の時間ステップではいずれの隣接格子点でもこの平均値を使って差分計算する方法、あるいは (i, j) での値はあらかじめ設定せず、隣接格子点で差分計算が行われる度に、その都度、その隣接格子点に対応した滑り条件を満たすように (i, j) での値を更新しながら進める方法の2つが考えられる。前者は簡便であるが、滑り条件が完全には満たされなくなる。一方、後者はすべての隣接格子点との間で滑り条件が満たされることになるが、隣接する格子点での差分計算ごとに格子点 (i, j) の音響成分を更新する手間が増える。

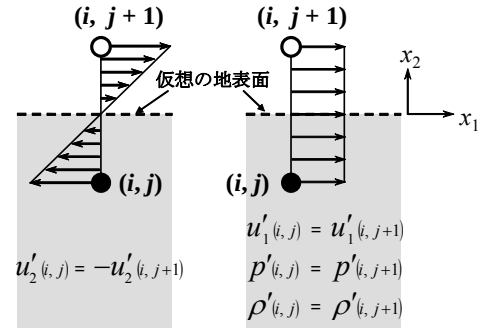


図-1 完全反射境界の処理

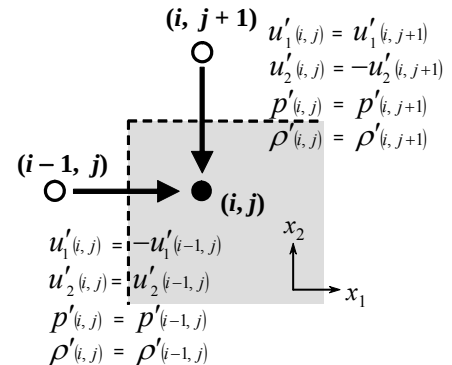


図-2 複数の空気媒質格子点が隣接する場合

キーワード：屋外音響伝搬、複雑地形、完全反射境界、マッコーマック法

連絡先：〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1 岡山大学大学院環境学研究科

4. 地表面を有する様々なケースの解析結果

地表面境界を有するいくつかのケースについて音響伝搬解析を行った。いずれのケースも音源周波数20Hz、音源強さは頂点で $0.1\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$ となるガウス分布に従う空間的な広がりを持つ分布音源とする。また、時間刻み $\Delta t = 0.001\text{s}$ 、格子刻み $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_3 = 1.0\text{m}$ とした。空気媒質に関する定数として音速 340m/s 、空気密度 1.2kg/m^3 、比熱比1.4とした。図-3は2次元平面の遮音壁の解析ケースで、遮音壁内部に縦に1列に格子点を配置し、遮音壁の左右に対して完全反射境界処理が行われるようにし、前述の隣接する格子点の音響成分の平均値を与える方法（境界処理1）と隣接格子点別に異なる音響成分を与える方法（境界処理2）で解析した。図-4の点Aにおける音圧時刻歴によると、境界処理1では遮音壁左右の面で滑り条件が完全には満たされないため、あたかも音が遮音壁を突き抜ける音漏れのような現象が生じ、回折音よりも早い時刻に伝搬音が点Aに到達しているのが分かる。また、音漏れの音と回折音との干渉により音圧も大きくなっている。次に図-5のように正方形の2次元領域の対角線に地表面を設定したモデルに対し、地表面の代わりに鏡像音源を設定したモデルとの比較を行った。図-6の等音圧線図に示すように、両者はよく一致しており完全反射境界での処理が適切に機能している。ところが図-5に示した解析例では、さらに解析時間ステップを進めると領域左下の完全反射境界付近から数値的な発散が生じることが明らかとなった。そのような不安定性が他のケースでもいくつか見られ、いずれも完全反射境界と解析領域の外部境界に相当するMurの1次吸収境界との間に1つの空気媒質の格子点が配置される箇所から発生することが明らかとなった。対策として、時間刻みを細かくしたり、音の伝搬方向を基準とした風上差分を行うことである程度の改善は見られたが、必ずしも全てのケースで発散を抑えることはできなかった。そこで、発散の生じる地表面外周部を平坦にして発散が生じる格子点の配置パターンをなくすように解析モデルの地盤形状を改良したところ、全てのケースで発散を抑えられた。この結果、発散の起こりやすい図-7に示すような複雑な地表面においても音響伝搬解析が可能となった。

5. まとめ

- ・地盤中の1つの格子点に空気媒質中の複数の格子点が隣接する場合、それぞれの滑り条件によって決まる音響成分の平均値を地盤中の格子点に与える方法と隣接格子点毎に別々に与える方法について検討したところ、後者の方がより適切な完全反射の結果が得られた。
- ・解の不安定性の対策として外周に平坦な地表面を設定し、1つの空気媒質の格子点がMurの1次吸収境界と完全反射境界に挟まれる格子点配列をなくすことで発散を抑えることができた。

参考文献

- 1) Hardin, J.C. and Pole, D. S. : Sound Generation by Flow over a Two-Dimensional Cavity, ALAA journal, 33-3, pp.407-412, 1995
- 2) 日本機械学会編：流れの数値シミュレーション コロナ社, 1988
- 3) 宇野亨：FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析 コロナ社, 1998

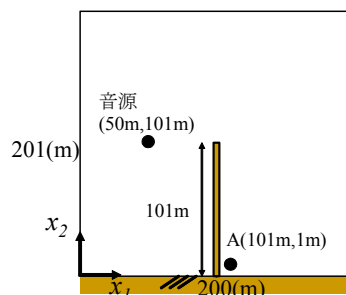


図-3 遮音壁

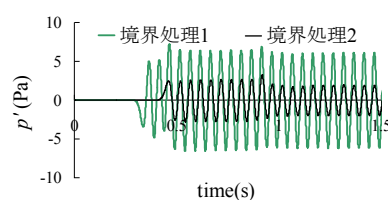


図-4 点 A での音圧時刻歴

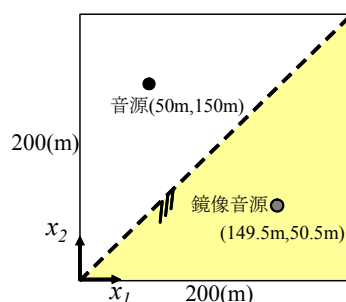


図-5 斜めの地表面とその鏡像

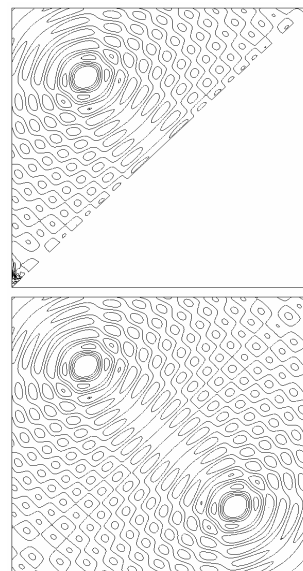


図-6 等音圧線図
(1100 時間ステップ、
等音圧線間 20Pa)

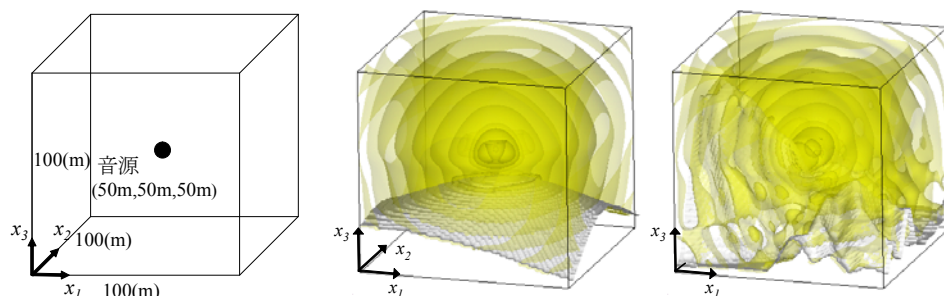


図-7 複雑地形の音響伝搬 等音圧面図(右: 地形1 左: 地形2) 2000 時間ステップ 等音圧面間 20Pa