

風や温度変化などの気象条件を考慮した音響伝搬解析

岡山大学大学院 学生員 ○向井 靖彦

岡山大学大学院 正 員 比江島慎二

1. はじめに

都市内の交通騒音や風力発電風車の風切り音など、開領域である屋外でしばしば騒音が問題になる。屋外騒音では、風や気温変化などの気象条件が伝搬に大きく影響すると考えられるが、一般に屋外の音響解析で多用される境界要素法(BEM)は、そのような媒質の移動や不均一性を伴う解析には不向きである。

本研究は、そのような媒質の移動や不均一性を考慮するため、時間領域差分法(FDTD法)を用いるとともに、無限領域への伝搬を表現するための外部境界処理として、Murの吸収境界条件¹⁾、Thompsonの無反射条件²⁾、PML(Perfectly Matched Layer)法³⁾について比較検討した。

2. 解析方法

音場解析には、空力音解析で用いられる音場と流れ場の分離解法⁴⁾を応用し、流れ場における音響伝搬に関する以下の支配方程式を用いる。

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

$$Q = \begin{bmatrix} \rho' \\ (\rho_0 + \rho')u'_1 + \rho'U_1 \\ (\rho_0 + \rho')u'_2 + \rho'U_2 \\ (\rho_0 + \rho')u'_3 + \rho'U_3 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} F_{monopole} \\ F_{dipole1} \\ F_{dipole2} \\ F_{dipole3} \end{bmatrix},$$

$$E_s = \begin{bmatrix} (\rho_0 + \rho')u'_s + \rho'U_s \\ (\rho_0 + \rho')(U_1u'_s + U_su'_1 + u'_1u'_s) + U_1U_s\rho' + \delta_{1s}p' \\ (\rho_0 + \rho')(U_2u'_s + U_su'_2 + u'_2u'_s) + U_2U_s\rho' + \delta_{2s}p' \\ (\rho_0 + \rho')(U_3u'_s + U_su'_3 + u'_3u'_s) + U_3U_s\rho' + \delta_{3s}p' \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 ρ' , u' , p' は音場の密度、粒子速度、音圧、 ρ_0 は静止流体の密度、 U は流れ場の流速である。これを2次精度の陽的差分スキームであるマッコーマック法により計算する。

伝搬速度 v で x の負の方向に進む波 Q は式(3)で表され、必ず式(4)を満足することになる。Murの吸収境界条件は式(4)を外部境界で満足することを条件にして無限領域への伝搬を表現する。

$$Q = Q(x+vt) \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{1}{v} \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

一方、Thompsonの無反射条件は、外部境界に入射する波の振幅が時間的に変化しないという条件を課すもので、定式化が複雑であり、境界面への垂直入射を前提とする。また、PML法は解析領域の外部に吸収層を設け、そこで波を十分に減衰させる手法である。

3. 解析結果および考察

辺長120mの立方体の3次元領域の中心に置いた点音源から伝搬する球面波について解析した。媒質特性は密度1.2 kg/m³、音速340 m/s、比熱比1.4、点音源は振幅0.1、周波数20 Hzの正弦波である。格子分割120×120×120、時間刻み0.001 secとした。3種類の境界処理手法について、立方体対角線上の音圧の標準偏差を求めた結果を図-1に示す。球面波の音圧は音源からの距離 r に反比例することから、この分布が直線に近いほど理論解に近いことになる。

3つの境界処理手法で音圧に多少の違いが生じるものの、音圧標準偏差と $1/r$ との相関係数はMur, Thompson, PMLでそれぞれ0.997, 0.987, 0.988となり、いずれも1に近く、ほぼ直線に近い音圧分布であることが確認できた。Thompsonの方法で境界付近($1/r = 0.01$ 付近)の音圧のわずかな上昇が見られるが、立方体領域の角部であるため、境界面への垂直入射の前提を満たしていないことなどが原因と考えられる。

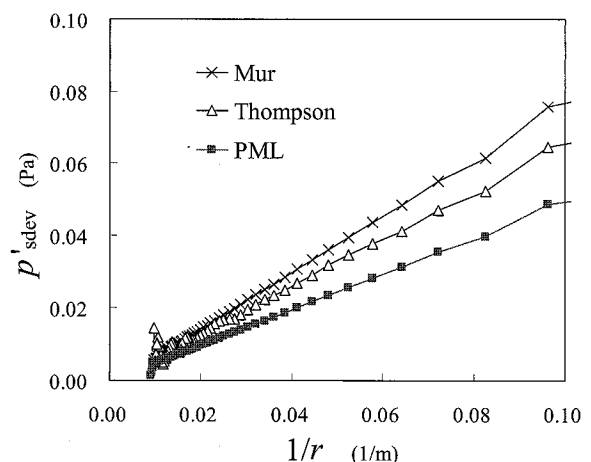


図-1 球面波の音圧分布の比較

次に、辺長 125m の正方形の 2 次元領域の中心に点音源を設置したとき、有風時の音響伝搬を解析した。媒質特性と音源の条件は図-1 と同じである。格子分割 250×250 、時間刻み 0.0001 sec とした。図-2 は、一様な $U = 40 \text{ m/s}$ の有風時に、流れ方向に音源を通る線上における、ある時刻の音圧分布であり、図-3 はそのときの Mur での等音圧線図である。無風時の音速 c とすると、風速 U のときの見かけ上の音速は、音源より風上側 ($r < 0$) で $c - U$ 、風下側 ($r > 0$) で $c + U$ となり、波長の理論値は風上側 15.0 m、風下側 19.0 m である。3つの境界処理手法のうち Mur と Thompson の結果はほぼ一致しており、波長もほぼ理論値どおりであることが明らかとなった。しかし、PML 法では計算が発散してしまい、解を得ることができなかった。また、 $U = 60 \text{ m/s}$ のケースや $U = 80 \text{ m/s}$ で音源周波数 40 Hz のケースについても解析したが、同様に理論値どおりの波長が得られた。

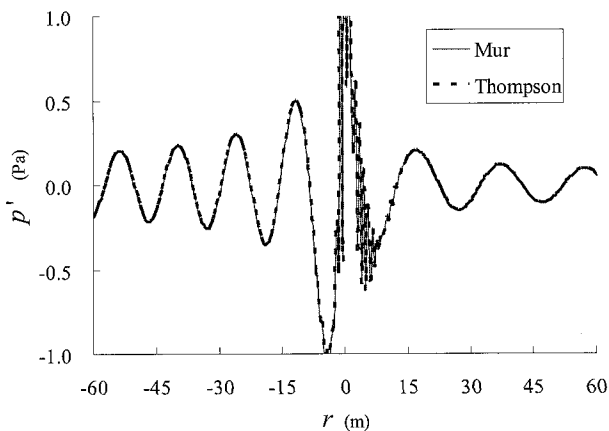


図-2 有風時の音圧分布 (風速 40 m/s)

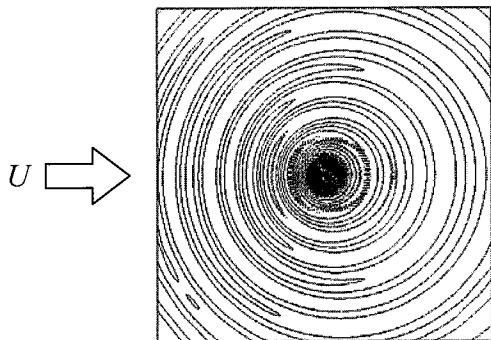


図-3 有風時の等音圧線図 (Mur, 風速 40 m/s)

図-4 に示すような温度が異なる媒質間の解析も行った。点音源の周波数は 20 Hz である。格子分割 430×430 、時間刻み 0.0001 sec とした。2つの媒質を横断する方向に音源を通る線上における、ある時刻の音圧分布を図-5 に示す。また、図-6 はそのときの Mur での等音圧

線図である。波長の理論値は媒質 a ($r < 55.0 \text{ m}$)、b ($r > 55.0 \text{ m}$) でそれぞれ 18.0 m, 16.5 m である。3つの境界処理手法のいずれもほぼ理論値どおりの波長が得られている。音圧の振幅では、Mur と Thompson はほぼ同じであるが、PML は少し小さめの値となった。

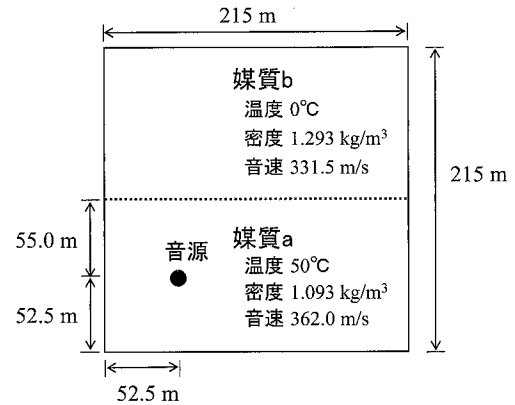


図-4 異なる媒質間の伝搬解析モデル

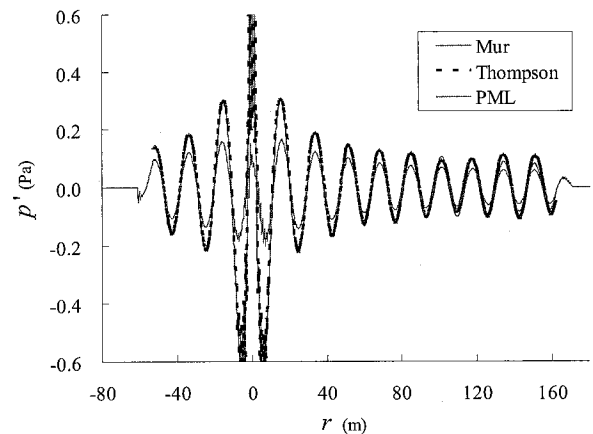


図-5 異なる媒質間伝搬の音圧分布

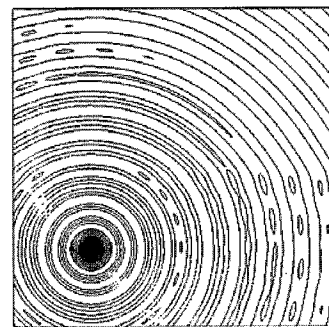


図-6 異なる媒質間伝搬の等音圧線図 (Mur)

参考文献

- 1) 宇野亨: FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, pp.58-68, 1998.
- 2) Thompson, K. W.: Time dependent boundary conditions for hyperbolic systems, J. Comp. Physics, Vol.68, pp.1-24, 1987.
- 3) Lee, D.J. and Koo, S.O.: Numerical Study of Sound Generation due to a Spinning Vortex Pair, ALAA journal, 33-1, pp.20-26, 1995.
- 4) Hardin, J.C. and Pole, D.S.: Sound Generation By Flow over a Two-Dimensional Cavity, ALAA journal, 33-3, pp.407-412, 1995.