1.はじめに

風力発電風車の風切り音や都市内の交通騒音など、 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。

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

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

$$E_{s} = \begin{bmatrix} (\rho_{0} + \rho')u' + \rho'U_{s} \\ (\rho_{0} + \rho')(U_{1}u'_{s} + U_{s}u'_{1} + u'_{1}u'_{s}) + U_{1}U_{s}\rho' + \delta_{1s}p' \\ (\rho_{0} + \rho')(U_{2}u'_{s} + U_{s}u'_{2} + u'_{2}u'_{s}) + U_{2}U_{s}\rho' + \delta_{2s}p' \\ (\rho_{0} + \rho')(U_{3}u'_{s} + U_{s}u'_{3} + u'_{3}u'_{s}) + U_{3}U_{s}\rho' + \delta_{3s}p' \end{bmatrix}$$
(2)

ここで、 *ρ*, *u*, *p*'は音場の密度、粒子速度、音圧、 *ρ* 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。

$$Q = Q(x + vt)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{1}{v} \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \tag{4}$$

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、ほぼ直線と見なせる。Thompson の方法で境界付近(1/r=0.01付近)に音圧のわずかな 上昇が見られるが、立方体領域の角部付近に相当する 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。



キーワード:騒音解析、時間領域差分法、Mur の吸収境界条件、Thompson の無反射条件、PML 法、風力発電 連絡先:岡山市津島中 3-1-1 岡山大学 環境理工学部 環境デザイン工学科 電話 086-251-8869 hiejima@cc.okayama-u.ac.jp

(3)

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 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 m/s のケースや U = 80 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-3 有風時の等音圧線図 (Mur, 風速 40m/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 < 55.0m), b (r>

55.0m) でそれぞれ 18.0 m, 16.5 m であるが、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 れた。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。



1) 宇野亨: FDTD 法の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, AIAA journal, 33-1, pp.20-26, 1995. 4) Hardin, J.C. and Pole, D.S.: Sound Generation By Flow over a Two-Dimensional Cavity, AIAA journal, 33-3, pp.407-412, 1995.