

屋外音響伝搬解析における地表面境界処理に関する検討

Numerical treatment of ground surface boundary conditions in outdoor sound field analysis

比江島慎二*・吉木健吾**・向井靖彦**

Shinji Hiejima, Kengo Yoshiki and Yasuhiko Mukai

*正会員 工博 岡山大学准教授 環境学研究科資源循環学専攻 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

** 学生会員 岡山大学 大学院環境学研究科資源循環学専攻 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

Numerical treatments of ground surface boundary conditions are investigated to simulate outdoor sound field with various surface geometries. Two types of numerical treatments are applied to the perfectly reflective boundary conditions of ground surfaces and they are compared in a typical sound field model. In order to suppress the numerical instability caused in the narrow spaces between perfectly reflective boundaries and infinity boundaries, the ground slopes are flattened around the external boundaries in the numerical analysis models.

Key Words: outdoor sound, wind, perfectly reflective boundary, finite difference method

1. はじめに

自動車や電車などの交通機関、建設現場、工場、発電施設などの様々な生産活動の現場から騒音は発生し、近隣住民に心理的・身体的な被害を及ぼす。近年は、風力発電施設の増加から風車騒音が問題となり、風車の夜間稼働を停止するなど、これまでにない新たな騒音問題も顕著になりつつある。これらの騒音はいずれも広大な屋外空間を伝搬するため被害が広範囲に及ぶとともに、風や気温などの気象条件、様々な地形形状や建物などの伝搬経路上の障害物による反射等によって複雑な伝搬性状を有する。このような広範囲かつ複雑な屋外音響伝搬に対し、数値解析による音響伝搬予測は詳細な伝搬性状を把握し、適切な対策を検討する上で極めて有効な手段である。

屋外の半無限空間における音響伝搬解析に適した手法として、境界要素法が多く用いられる。しかし、境界要素法は基本的に一様な媒質中の波動伝搬を前提としており、屋外で非一様な風速分布や気温分布等の気象条件の影響が存在するケースには適していない。風や気温などの気象条件の影響を考慮した解析手法として、FFP (Fast Field Program) 法や PE (Parabolic Equation) 法などがあるが、FFP 法は実用上、気象条件が高さ方向に線形に変化するか、地面に平行な多数の層に区切って各層内で一様と見なせる場合に限られる¹⁾。また、PE 法は非一様な風速分布も近似的に考慮できるが、風の流れ場と音場の流体力学的な連成項を基礎方程式の中で考慮しているわけではなく、風による音響移流効果等を精密には再現していない。さらに、PE 法は基本的に音源からの進行波だけを考慮するため、様々な障害物で反射して音源に戻ってくるような複雑な伝搬性状を有する山岳地形や都市内ビル群などでの音響

解析を扱うには何らかの工夫が必要と思われる。

このような気象条件や複雑な地形形状などを考慮した屋外音響伝搬を扱うには、差分法や有限要素法が有利と考えられる。著者らは、音場と流れ場の精密な連成項を含む、空力音分離解法^{2),3)}で用いられる基礎方程式を導入することによって、複雑な風の流れの影響を高精度に考慮可能な差分法による屋外音響伝搬解析手法を構築し、風の移流効果による音の波長変化などの再現に成功している⁴⁾。一方、気象の影響に加えて、特に屋外空間に存在する複雑な地形形状や構造物表面による反射境界の扱いも重要になる。そこで本研究では、複雑な地表面形状に対する境界条件の処理法を中心にさらなる解析手法の構築を試みた。実際の地表面はその表面状態によって吸音性を有する場合もあるが、本解析では複雑な地表面形状を考慮した屋外音響伝搬解析の基礎部分の構築を主な目的とするため、まずは完全反射境界と仮定した基本的な地表面形状を対象に境界処理手法の検討を行っている。

本解析では、地盤も含んだ解析対象領域を等間隔の直交格子で分割し、音響伝搬に直接関わる空気媒質の格子点と地表面下の地盤内に属する格子点とに大別する。そのうち空気媒質格子点に隣接する地盤内格子点は仮想点として処理し、空気媒質格子点との間で完全反射境界条件を満たすような音響成分値を仮想点に設定する。このとき、斜面地形などでは地盤内の仮想点 1 つに対して複数の空気媒質格子点が隣接するような箇所が現れ、そのような仮想点では、それぞれの隣接する空気媒質格子点との間で異なる音響成分値が定義されることになる。本研究では、そのような仮想点における音響成分値の設定の仕方として 2 通りの方法を検討している。さらに、様々な地表面形状パターンや風の流れなどを考慮したケースについて鏡像音源

による音場と比較しながら、境界条件処理の妥当性等について検証解析を行った。

2. 屋外音響伝搬の解析手法

2.1 空力音分離解法における音場基礎方程式

風による音の移流効果などの現象をできるだけ精密に再現した屋外音響伝搬解析を実現するため、空力音の分離解法^{2), 3)}で用いられる音場の基礎方程式を導入する。空力音の分離解法は、圧縮性の圧力変動である音圧とは桁違いの大きさを有する非圧縮性の風の流れ場における圧力変動に対し、音場の基礎方程式から分離することにより、全く異なる大きさ及び異なる流体特性を有するこれら2つの圧力場を別々に扱う手法である。分離解法の音場の基礎方程式の中で、非圧縮性の風の流れ場の圧力変動は、主に空力音の音源項として組み込まれ、別途、非圧縮性流体の基礎方程式の解析から得られた結果をその音源項に逐次代入して解かれることになる。本研究では、空力音の音源は扱わないため、これを無視することによって、非圧縮性の流れ場の風速による音響成分の移流効果のみを考慮する。この場合、速度 u 、圧力 p 、密度 ρ の各物理量は以下のように分離される。

$$\begin{cases} u_s = U_s + u'_s \\ p = P_0 + p' \\ \rho = \rho_0 + \rho' \end{cases} \quad (1)$$

ここで、大文字は風の流れ場成分、添字ダッシュは音響成分、添字 0 は静止流体中の成分、添字 s は座標方向をそれぞれ示す。

この分離により、圧縮非粘性流れ場の連続式と運動方程式から音響成分に関する次式が導かれる。

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \sum_{s=1}^3 \frac{\partial \mathbf{E}_s}{\partial x_s} = \mathbf{F} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{E}_s$ 、 $\mathbf{F}$ はそれぞれ次式で表される。

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \rho' \\ (\rho_0 + \rho')u'_1 + \rho'U_1 \\ (\rho_0 + \rho')u'_2 + \rho'U_2 \\ (\rho_0 + \rho')u'_3 + \rho'U_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{E}_s = \begin{bmatrix} (\rho_0 + \rho')u'_s + \rho'U_s \\ (\rho_0 + \rho')(U_1u'_s + U_su'_1 + u'_1u'_s) + U_1U_s\rho' + \delta_{1s}p' \\ (\rho_0 + \rho')(U_2u'_s + U_su'_2 + u'_2u'_s) + U_2U_s\rho' + \delta_{2s}p' \\ (\rho_0 + \rho')(U_3u'_s + U_su'_3 + u'_3u'_s) + U_3U_s\rho' + \delta_{3s}p' \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_{monopole} \\ F_{dipole1} \\ F_{dipole2} \\ F_{dipole3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

なお、 $\mathbf{F}$ は音源項であり、第1成分は単極子音源、他の3成分は各方向に指向性を有する双極子音源を表す。元々

の空力音分離解法の方程式では、空力音の音源となる、風の流れ場成分で構成される単極子音源や双極子音源の項が含まれるが、本研究では流れ場による音響成分の移流効果のみを必要とするため、それらの空力音源はすべて取り除いている。本解析で用いる音源は、次式のガウス分布型関数で表される空間的に連続的な広がりを持つ分布音源として式(5)の第1成分に与える。本解析では、音源強さ $F_0 = 0.1 \text{ (kg/m}^3\text{)/s}$ 、音源周波数 $f = 20\text{Hz}$ 、音源の空間的広がり $d = 5.0\text{m}$ とした。

$$F_{monopole} = F_0 \exp\left(-\frac{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}{d^2}\right) \sin 2\pi ft \quad (6)$$

また、音圧は等エントロピーを仮定して次式で与えられる。

$$p' = P_0 \left(\frac{\rho_0 + \rho'}{\rho_0} \right)^\gamma - P_0 \quad (7)$$

$$P_0 = \frac{\rho_0 c_0^2}{\gamma} \quad (8)$$

ここで、 c_0 は静止流体中の音速、 γ は比熱比である。なお、本解析では、媒質は空気として $c_0 = 340\text{m/s}$ 、 $\rho_0 = 1.2\text{kg/m}^3$ 、 $\gamma = 1.4$ とする。

式(2)の時間領域の音場基礎方程式に対し、第一段階の予測子で中間的予測値を求め、第二段階の修正子で修正値を求める予測子・修正子法の一つで、2次精度の陽的差分スキームである MacCormack 法³⁾を用いて時間積分する。音源周波数 $f = 20\text{Hz}$ とその波長 $\lambda = 17\text{m}$ を十分に解像できる時間刻み $\Delta t = 0.001\text{s}$ および空間刻み $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_3 = 1.0\text{m}$ として解析した。特に本解析では直交格子を用いることから、地表面の斜面部分などで十分な精度の解を得るには、音の波長に対する空間刻みを十分細かく設定することが重要と考えられる。後述のように、斜面を有するいくつかのケースで良好な精度の解が得られていることから、本解析で用いた1波長17分割程度の空間解像度で十分であると考えられる。なお、本解析ではレギュラー格子を用いており、各音響成分や風の流れ場成分はすべて同一点に配置している。

2.2 地表面などの完全反射境界処理

本解析では、地表面や構造物表面などの境界を完全反射境界として処理する。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内の格子点 (i, j) を仮想点と見なし、地表面法線方向の音響粒子速度が0、その他の音響成分については自由という滑り条件に従って、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仮想点 (i, j) の各成分にそれぞれ与える。これによって、地盤内の仮想点 (i, j) とそれに隣接する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

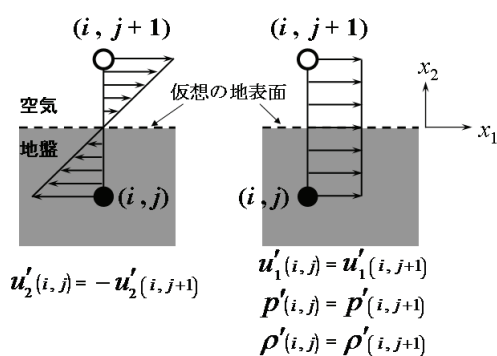


図-1 完全反射境界の処理

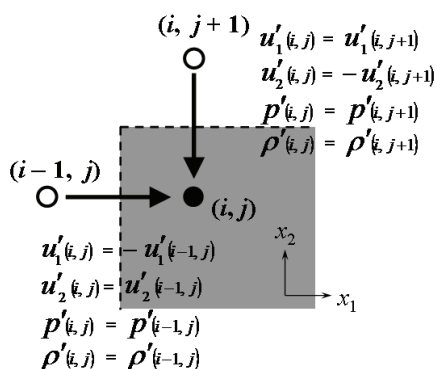


図-2 複数の空気媒質格子点が隣接するときの完全反射境界処理

境界（地表面）が仮想的に設定されることになる。

本解析では直交格子を用いるため、例えば斜面を有する地形形状などでは地表面形状が階段状に近似されるため、図-2のように1つの地盤内仮想点が複数の空気媒質の格子点と隣接するパターンがしばしば現れる。その場合、隣接格子点 $(i, j+1)$, $(i-1, j)$ からそれぞれ異なる音響成分値が仮想点 (i, j) に与えられることになる。このとき、仮想点 (i, j) での音響成分値の決め方として以下の2通りを考える。1つは、隣接格子点 $(i, j+1)$, $(i-1, j)$ から与えられる異なる音響成分どうしの平均値を取って仮想点 (i, j) での音響成分値とする方法である。この方法では、次の時間ステップに進む前に平均値を求めておき、次の時間ステップではいずれの隣接格子点においても、この平均値を使って差分計算が行われる（境界処理1）。もう1つの方法は、仮想点での値はあらかじめ設定せず、隣接格子点での差分計算が行われるたびに、それぞれの滑り条件に応じた仮想点の値に更新しながら差分計算する方法である（境界処理2）。前者の方法は簡便であるが、滑り条件が完全には満たされなくなり、後者の方法はすべての隣接格子点との間で滑り条件が満たされるものの、隣接する格子点での差分計算のたびに仮想点の音響成分を更新する手間が増える。なお、有風時には風の流れ成分についても境界処理を行うことになるが、今回の解析では、地表面に沿った一様な風速分布しか扱っていないため、仮想点には隣接する空気媒質中の風速値と等しい風速を与えて処理した。

2.3 有限空間から無限空間への無反射境界処理

有限領域解析である差分法では、半無限の屋外空間での音響伝搬を再現するため、計算対象領域の外部境界において音波の反射・散乱を防ぐ無反射境界条件の設定が必要となる。無反射境界処理にはいくつかの手法があるが、本研究では扱いが簡便なMurの1次吸収境界条件^{6), 7)}を採用する。

波の形を変えずに x 軸の正の方向から負の方向へ伝搬速度 c で進む波は次式で表される。

$$Q = Q(x + ct) \quad (9)$$

ここで、式(9)は常に次式を満たす。

$$\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{1}{c} \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

音波がある断面を通過する際、無反射であれば波の形を保ったまま通過するはずである。Murの吸収境界条件では、解析領域の末端で式(10)の条件を課することによって、反射のない無限領域へのスムーズな音波の伝搬を表現する。なお、式(10)の伝搬速度 c には、無風時には音速 c_0 の値を用いる。しかし、有風時には、例えば、 x_1 軸の正の方向に風速 U_1 があるとする、領域中の音源位置から見て x_1 軸の負の方向にあたる風上側境界では c_0 の代わりに見かけ上の音速 $c_0 - U_1$ 、音源から見て x_1 軸の正の方向にあたる風下側境界では見かけ上の音速 $c_0 + U_1$ を与える。同様に、 x_2 軸方向の境界と x_3 軸方向の境界において、それぞれ有風時の見かけ上の音速を伝搬速度として与える。

3. 様々な地表面境界を有する屋外空間の音場解析

3.1 2つの地表面境界処理手法の比較

2.2節で述べた完全反射境界における2つの境界処理方法について比較検討するため、図-3のような地表面上に立つ遮音壁形状の構造物まわりの音響伝搬解析を行った。遮音壁内部には縦に1列だけ格子点（仮想点）を配置することによって、その格子点を挟んで遮音壁の左右両側で完全反射境界処理が行われるようにしている。左右の隣接格子点から与えられる音響成分の平均値を遮音壁内の仮想点に与える方法（境界処理1）と隣接格子点ごとに異なる音響成分を遮音壁内の仮想点に与える方法（境界処理2）で解析したときの等音圧線図を図-4に示す。時間刻み $\Delta t = 0.001s$ で計算開始から1s後、すなわち音源から最初に出た音が地表面で反射し、その反射音が音源に戻ってきて、さらに上部境界にも達した後の音圧分布である。いずれも音源からの音が遮音壁先端を回り込んで遮音壁右側領域に伝搬する様子、音源からの直接音が遮音壁や地表面の完全反射境界からの反射音と干渉して生じる干渉縞などが捉えられているが、2つの境界処理手法で、遮音壁近傍の音圧分布に違いが生じているのが分かる。

図-5に、図-3の点Aにおける音圧の時刻歴を示す。境界処理1の方が境界処理2に比べて早い時刻に点Aに

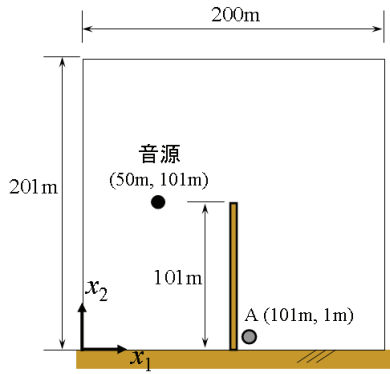


図-3 遮音壁モデル



図-4 等音圧線図 (経過時間 1.0s, 等音圧線間 20Pa)

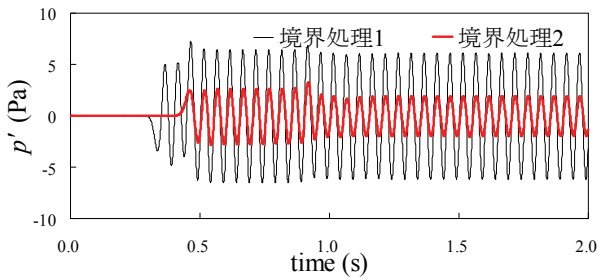
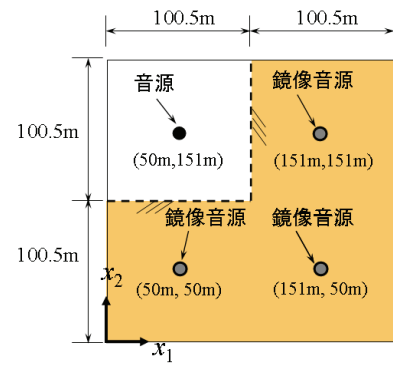


図-5 点 A における音圧時刻歴

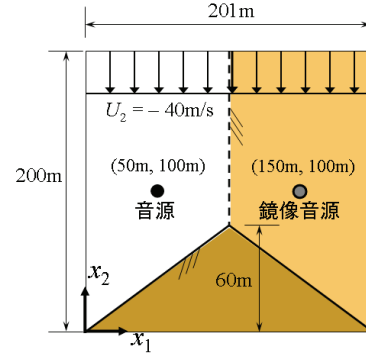
音が伝わっているが、これは、遮音壁左右の面で滑り条件が完全には満たされないため、遮音壁表面が振動して、あたかも音が遮音壁を突き抜けて反対方向の領域に伝わる“音漏れ”のような現象が生じ、回折音よりも早い時刻に音が点 A に到達したためと思われる。また、回折音に加えて音漏れの音も伝わるため、境界処理2よりも音圧が大きくなっている。以上のことから、完全反射境界処理手法としては、境界処理2の方が適していると判断でき、これ以後の解析では、すべて境界処理2の手法を用いて検討した。なお、図-3の地表面以外の3つの外部境界では Mur の吸収境界条件を設定しているが、図-4を見る限り、反射による影響などは見られず、有限領域から無限領域へのスムーズな音の伝搬を仮想的に実現できている。

3.2 様々な地表面境界における音場解析

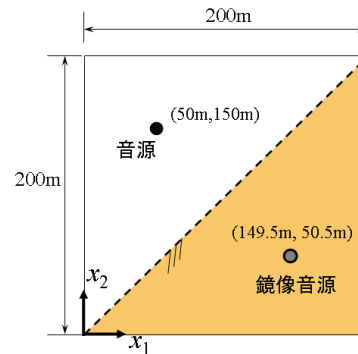
次に、様々な地表面パターンを有する空間の音響伝搬解析を行い、地表面上での完全反射境界処理の妥当性を検証した。図-6に3種類の2次元地表面モデルを示す。



(a) 2D-case1



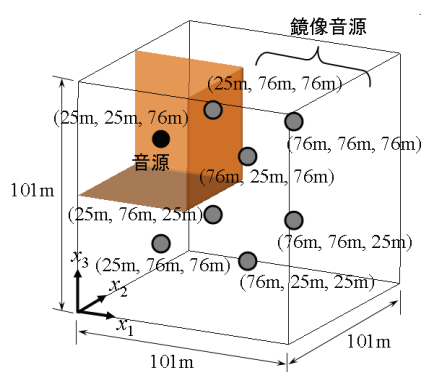
(b) 2D-case2



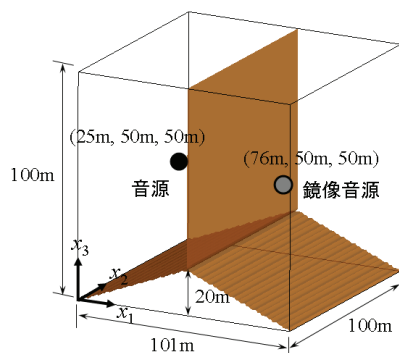
(c) 2D-case3

図-6 2次元地表面モデル

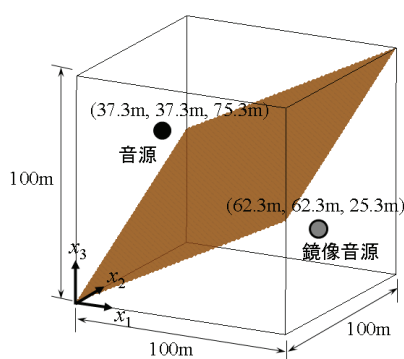
2D-case1 は正方形領域の下辺と右边が完全反射境界、上辺と左边が無限境界となる領域の中心に音源が配置されたモデルである。このモデルの音場は、鏡像の原理により、波線で示した完全反射境界を対称軸として、図に示すような3つの鏡像音源を設定したモデルの音場と等価である。鏡像音源の音場と比較することにより、完全反射境界の処理の妥当性を検証する。2D-case2 は四辺形の領域内に斜辺を有するモデルで、この斜辺と右边が完全反射境界である。斜辺上には、図-2に示したような、一度に複数の空気媒質格子点と隣接する地盤内格子点が並んでおり、前節の境界処理2の処理が行われる。なお、このモデルは右边を対称軸とした鏡像領域を設定すれば、三角山を有するモデルと等価となる。2D-case3 は直角三角形領域の斜辺を完全反射境界とするモデルで、やはりその上で1つの地盤内格子点に複数の空気媒質格子点が隣接する配列パターンとなる。この場合は、斜辺を対称軸とする鏡像音源を設定した



(a) 3D-case1



(b) 3D-case2

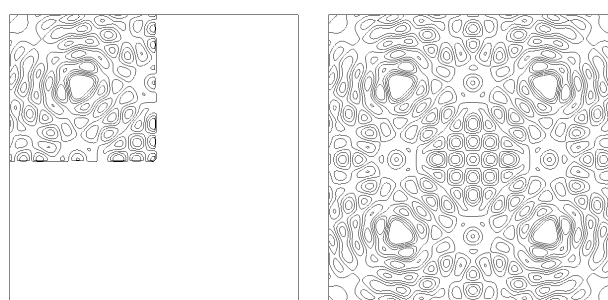


(c) 3D-case3

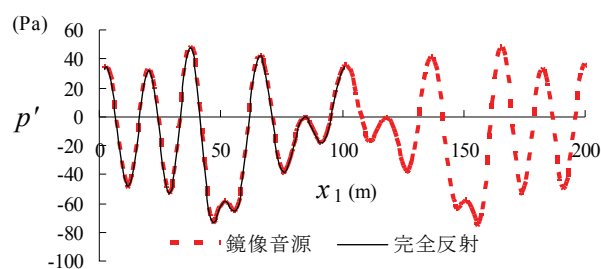
図-7 3次元地表面モデル

正方形領域の音場と等価である。さらに図-7には、図-6の2次元空間を3次元空間に拡張したようなモデルを設定しており、やはり鏡像音源を設定したときの音場との比較により完全反射境界処理の検証を行う。いずれも時間刻み $\Delta t = 0.001s$ で計算する。

2D-case1の計算開始から1.0s経過時の領域全体の等音圧線図、および音源を通り x_1 軸に平行な直線上の音圧分布を図-8に示す。いずれも鏡像音源を設定したモデルの結果と比較して示している。図-8(a)の領域全体の等音圧線図を見ると、音源からの直接波と完全反射境界からの反射波による干渉縞がよく再現されるとともに、完全反射境界を設定したモデルは鏡像音源のモデルの対応する領域部分とほぼ同一の音圧分布になっている。また、図-8(b)の音源を通る直線上の音圧分布では、より定量的に、両者の音圧分布が一致するのを見て取れる。2D-case1は前節の遮音壁モデルと違って正方形領域の下辺および右辺では、空

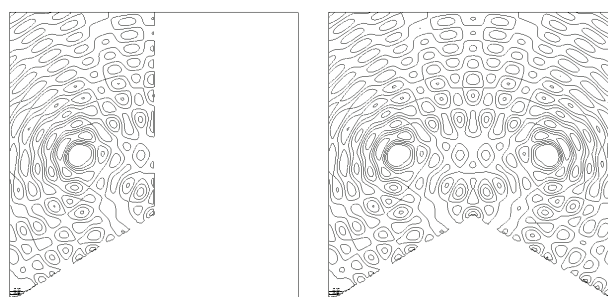


(a) 領域全体の等音圧線図 (等音圧線間 20Pa)

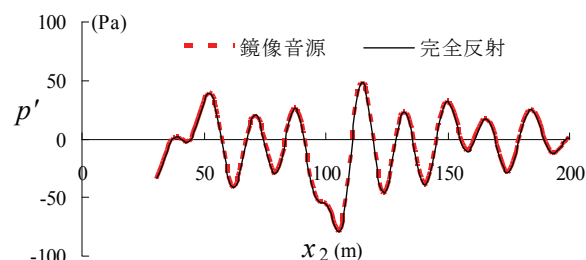


(b) 音源を通り x_1 軸に平行な直線上の音圧分布

図-8 2D-case1の音場解析結果 (経過時間 1.0s)



(a) 領域全体の等音圧線図 (等音圧線間 20Pa)

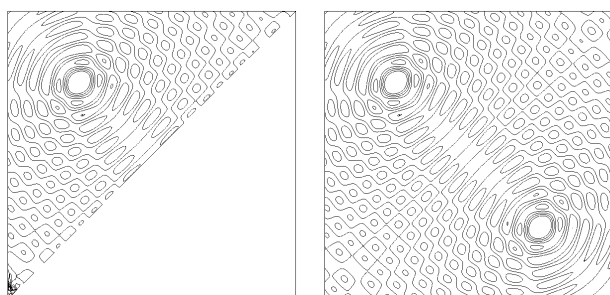


(b) 音源を通り x_2 軸に平行な直線上の音圧分布

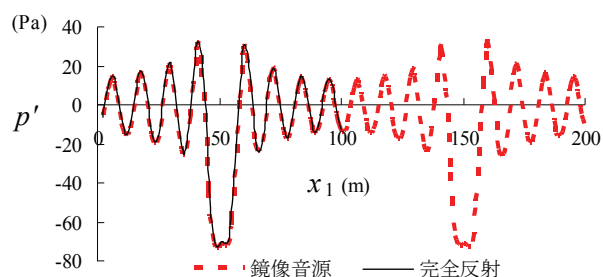
図-9 2D-case2の音場解析結果 (経過時間 1.0s)

気媒質格子点と地盤内格子点が1対1で隣接する単純な完全反射境界処理しか行われませんが、鏡像モデルの結果と一致したことで、完全反射境界が適切に機能することが定量的に示されたことになる。

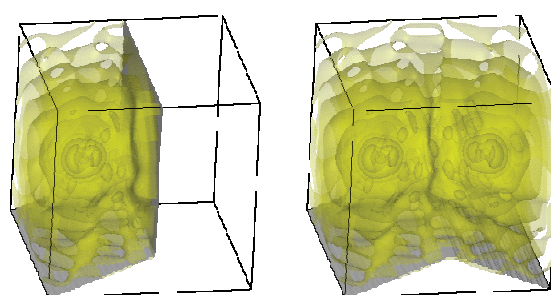
2D-case2の計算開始から1.0s経過時の結果を図-9に示す。等音圧線図を鏡像音源モデルの左半分の領域と比較すると、やはり領域全体にわたって音圧分布がほぼ一致することが確認できる。また、音源を通り x_2 軸に平行な直線上の音圧分布からも、両者がよく一致することが分かる。なお、等音圧線図を見ると、領域斜辺の左端のところで、わずかに数値的な乱れが見られる。実は、経過時間が1.0s



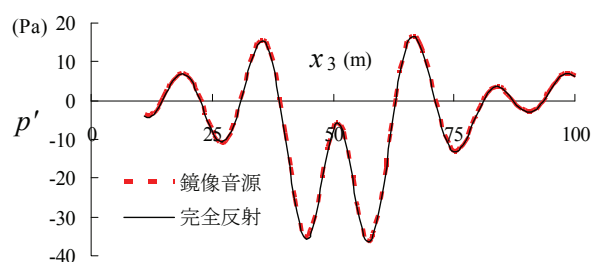
(a) 領域全体の等音圧線図 (等音圧線間 20Pa)



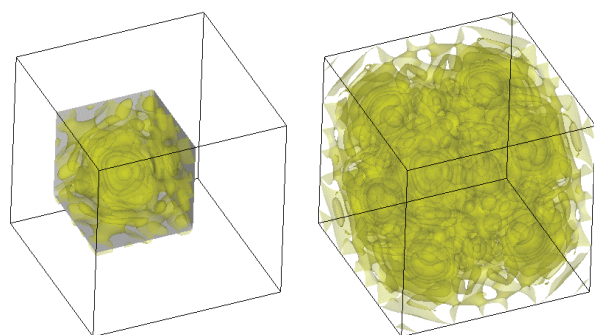
(b) 音源を通り斜辺に垂直な線上の音圧分布
図-10 2D-case3 の音場解析結果 (経過時間 1.1s)



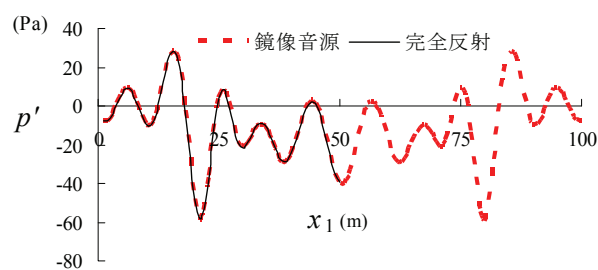
(a) 領域全体の等音圧面図 (等音圧線間 20Pa)



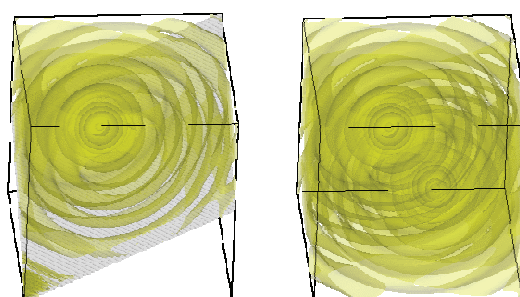
(b) 音源を通り x_3 軸に平行な直線上の音圧分布
図-12 3D-case2 の音場解析結果 (経過時間 1.0s)



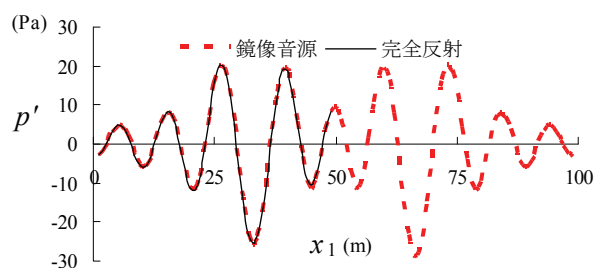
(a) 領域全体の等音圧面図 (等音圧線間 20Pa)



(b) 音源を通る領域対角線上の音圧分布
図-11 3D-case1 の音場解析結果 (経過時間 1.0s)



(a) 領域全体の等音圧面図 (等音圧線間 20Pa)



(b) 音源を通り斜面に垂直な線上の音圧分布
図-13 3D-case3 の音場解析結果 (経過時間 1.0s)

を越えたあたりから、この斜辺左端付近から数値解が発散してしまうことが明らかになっている。この原因や対策については後で議論する。

2D-case3 の計算開始から 1.1s 経過時の結果を図-10に示す。領域全体の音圧分布および音源を通り斜辺に垂直な線上の音圧分布のいずれも鏡像音源の結果とよく一致している。2D-case3 のモデルは斜辺を階段状の凹凸のある形状として近似するのに対し、その鏡像音源モデルは直線状の斜辺を設定しているのと等価である。したがって、両者

の結果が一致するという事は、たとえ階段状の斜辺近似であっても、本解析の完全反射境界処理が定量的にも十分な精度で機能することを示している。ただし、2D-case2 と同様、斜辺の左端の部分から数値的な不安定が生じ、経過時間が 1.1s を越えたあたりから解が発散してしまった。なお、このような斜辺を有していない鏡像音源モデルの方では発散は生じていない。やはり斜辺に相当する完全反射境界では、物理的に妥当な解が得られるものの、数値的に不安定になりやすいと考えられる。

次に、図-7の 3 次元モデルについて、同様な結果を図

図-11～図-13に示す。図-11の 3D-case1 は、2D-case1 と同様に斜面を持たない領域の音場であり、解が発散することにはなかった。3つの完全反射境界面からの反射を伴う音場であるため、等音圧面図ではかなり複雑な伝搬性状が示されているが、音源を通る領域対角線上の音圧分布を見ると鏡像音源モデルとほとんど一致する結果が得られているのが分かる。

図-12の 3D-case2 においても、鏡像音源モデルとよく一致する結果が得られており、鏡像の対称面に相当する完全反射境界が十分に機能していることを示す。なお、2D-case2 では時間経過に伴い斜辺の端部から解が発散したが、3D-case2 は斜面の勾配がより小さいためか、解の発散が生じなかった。解の安定性には、このような斜面勾配の大きさも影響すると考えられる。

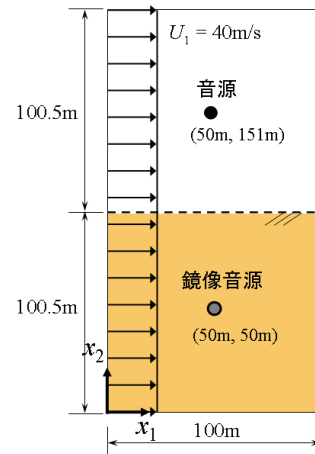
図-13の 3D-case3 では、2D-case3 と同様、完全反射境界である斜面の端部付近から解が発散し、鏡像音源モデルでは解の発散は起こらなかった。しかし、発散する直前の経過時間 1.0s における領域全体の音圧分布や音源を通り斜面に垂直な線上の音圧分布は鏡像音源モデルとよく一致しており、物理的に妥当な解は得られている。

3.3 有風時の音場解析

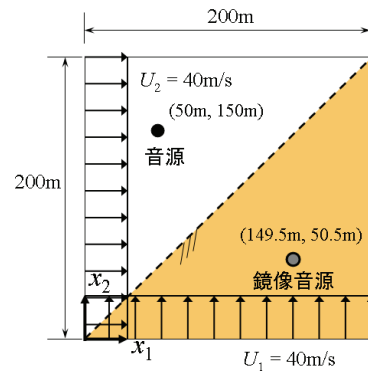
次に、本解析手法の特徴の1つである有風時の音場について解析した。解析対象としたモデルを図-14に示す。wind-case1 は正方形領域の下辺を水平な地表面と想定した2次元モデルで、領域の左辺から右辺に向かって地表面に平行な一様風が吹くモデルである。地表面を対称軸とする鏡像音源を設定したモデルも同時に解析して比較する。wind-case2 は2D-case3 の斜面に沿った一様風を想定したモデルである。いずれも時間刻み $\Delta t = 0.001\text{s}$ で計算する。

wind-case1 の解析結果を図-15に示す。図-15(a)の領域全体の等音圧線図から、風により音場全体が風下に相当する領域右辺側に流されている様子が捉えられている。無風であれば、音源を通り x_1 軸に平行な直線上の音圧分布は左右対称な分布形状になるが、図-15 (b)ではそのようなようになっておらず、風によって見かけ上の音速が小さくなる $x_1 < 50\text{m}$ の風上側領域の方が、 $x_1 > 50\text{m}$ の風下側領域よりも伝搬音の波長が短くなっているのが分かる。なお、音源から地表面である領域下辺の完全反射境界に向かう音波とその反射波によって生じる干渉縞が捉えられるとともに、やはり鏡像音源モデルの音場とよく一致することから、有風時であっても完全反射境界が十分に機能していると言える。また、斜辺を有しないこのモデルでは数値的な発散も生じなかった。

wind-case2 の解析結果が図-16である。この場合、風は斜辺を吹き上げるように吹いており、音場全体もその方向に流されている様子が領域全体の等音圧線図から見て取れる。また、鏡像音源モデルの音場ともよく一致しており、有風時の斜辺における完全反射境界処理も適切に機能している。しかし、2D-case3 と同様に、やはり斜辺の左端から解が発散する。図-16は発散直前の経過時間 0.75s の結果であるが、発散を始める経過時間も無風時の 2D-case3

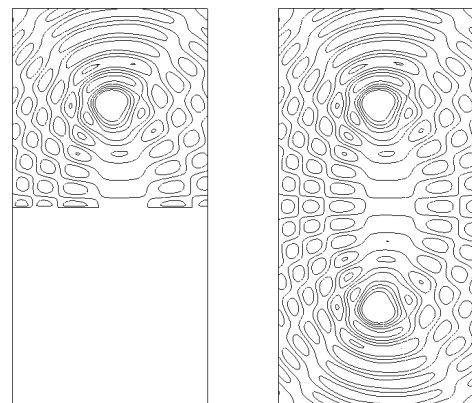


(a) wind-case1

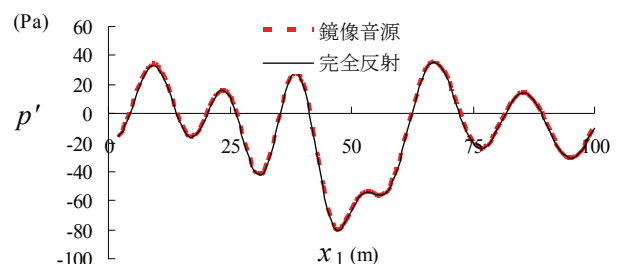


(b) wind-case2

図-14 有風時モデル

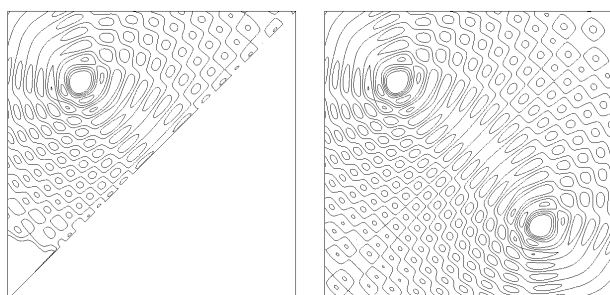


(a) 領域全体の等音圧線図 (等音圧線間 20Pa)

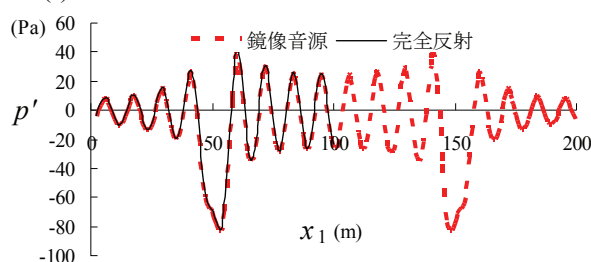


(b) 音源を通り x_1 軸に平行な直線上の音圧分布

図-15 wind-case1 の音場解析結果 (経過時間 1.0s)



(a) 領域全体の等音圧線図 (等音圧線間 20Pa)



(b) 音源を通り斜辺に垂直な線上の音圧分布

図-16 wind-case2 の音場解析結果 (経過時間 0.75s)

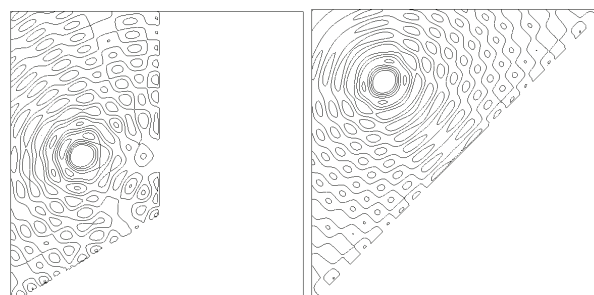
より早まっており、有風時にはより数値的に不安定になりやすいと考えられる。

4. 数値的な不安定性に対する対策について

前章では様々な地表面パターンを有する音場を解析した結果、本解析で用いた完全反射境界処理が適切に機能し、物理的に妥当な数値解が得られることが明らかとなった。しかし、いくつかのケースについては、数値的に不安定となり、解が発散してしまう例が見られた。発散が生じる箇所はいずれも、急な勾配を有する斜面地形のケースであり、解析領域の外部境界と斜面地形とが接近して空気媒質に相当する領域が狭くなる斜面端部付近であった。さらに詳しく調べると、斜面地形の地盤内部に相当する格子点 (仮想点) と無限領域へのスムーズな伝搬処理が行われる Mur の吸収境界に相当する格子点との間に空気媒質の格子点が 1 つ挟まれるような格子配列パターンの箇所において、発散が始まることが明らかとなった。

そこでまず、時間刻みを $\Delta t = 0.001s$ から $\Delta t = 0.0001s$ に細かくして数値的な安定化を図った。その結果、前章で解が発散した 2D-case2, 2D-case3, 3D-case3, wind-case2 のケースのうち、2D-case2 と 2D-case3 は発散が抑えられるものの、3D-case3 と wind-case2 は発散してしまった。発散した 2 ケースについては、さらに $\Delta t = 0.00005s$ にして解析したが、いずれも発散は抑えられなかった。なお、時間刻みとともに空間刻みも細かくすれば、数値的により安定化する可能性があるが、広大な屋外空間の音響伝搬解析は膨大な計算機容量を必要とすることから、これ以上細かい空間刻みについては検討しなかった。

次に、発散を生じる箇所は斜面地形の端部付近であるが、同じ端部付近でも格子点番号が小さい、2 次元の (1, 1) や



(a) 2D-case2

(b) 2D-case3

図-17 音響伝搬方向にもとづく差分の結果 (経過時間 2.0s, 等音圧線間 20Pa)

3 次元の (1, 1, 1) の格子点番号付近で生じていることが分かった。このことから、空間差分の差分方向が何らかの影響を与えている可能性が示唆された。その 1 つとして考えられるのが、音響の伝搬方向と差分方向の関係である。通常、MacCormack 法では、予測子で後退差分、修正子で前進差分が行われる。領域の中心付近に置かれた音源から放出され、より小さい格子点番号の方向に伝搬する音とより大きい格子点番号の方向に伝搬する音とでは、音の伝搬方向と差分方向の関係がほぼ逆になる。そこで、音響の伝搬方向と差分方向が領域内のいずれの場所でも統一されるように、音響の伝搬方向に応じて差分方向を決める手法を検討した。このとき、音響の伝搬方向は以下の音響インテンシティ I を指標とする。

$$I = p'u' \quad (11)$$

音響インテンシティが正の値のときは予測子で後退差分、修正子で前進差分を行い、音響インテンシティが負の値のときは逆に予測子で前進差分、修正子で後退差分として処理する。ちなみに、上記の差分方向の定義を I の正負で逆にした場合、解がより不安定になることが別途判明している。発散を生じたケースにこの方法を適用したところ、2D-case2 と 2D-case3 は $\Delta t = 0.001s$ で解析しても発散せずに解析できた。このときの経過時間 2.0s の等音圧線図を図-17に示す。3D-case3 は音響伝搬方向にもとづいた差分方向と $\Delta t = 0.0001s$ の下で解析すると、やはり格子点番号 (1, 1, 1) 付近の斜面端部でやや不安定な解の振動が見られるものの、発散は生じなかった。しかし、wind-case2 は音響伝搬方向を考慮した差分を行っても発散した。有風時の wind-case2 の場合、音響自体が風によって流されるため、音の伝搬方向が複雑になる。風の流れの方向も含めた音響伝搬方向を考慮すれば安定した解が得られる可能性はあるが、より複雑な風の流れなどを扱う場合には実用的でない。また、地形が複雑で様々な方向に音響が伝搬するような音場においても、解の安定化効果が低下する可能性がある。

実用性を重視するならば、差分スキームはシンプルのまま、より汎用性のある安定化手法が望ましい。解が不安定になるのは、Mur の吸収境界の格子点と地盤内部の格子点との間に空気媒質の格子点が 1 つ挟まれる格子点配列で

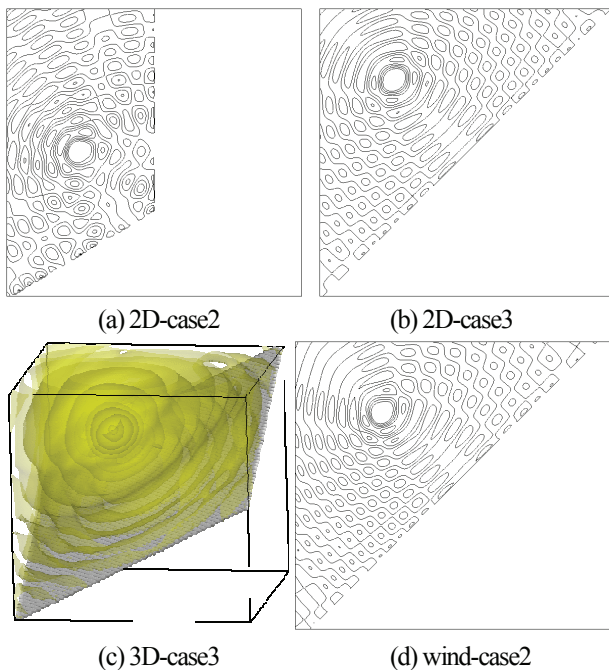


図-18 地形外周部の平坦化による結果
(経過時間 2.0s, 等音圧線間 20Pa)

あり, そのような配列パターンは勾配を有した地形が解析領域の外部境界に接する地形外周部に生成される. そこで, 解析対象とするモデルの地形外周部の勾配が 0 になるようにモデルそのものを改良する手法を検討した. 具体的には, 解析領域の外部境界上に配置されている格子点をそのまま外側に数個分コピーして領域を拡大することによって, 地形外周部で地形勾配が 0 になるような新たな解析領域を作成する. この手法を発散が生じたケースに適用したところ, 2D-case2, 2D-case3 および 3D-case3 は 2 点の格子点, wind-case2 は 10 点の格子点を外側に追加することで解が安定化し, 結局, すべてのケースで発散を抑えることができた. このときの計算開始から 2.0s 後の等音圧線図を図-18に示す. いずれもこれまで発散していた斜面の端部部分で発散が抑えられている.

5. まとめ

空力音の分離解法の基礎方程式を導入し, 風などの気象条件の影響を考慮した屋外音響伝搬解析手法の構築にあたり, 複雑形状の地表面や構造物表面における完全反射境界の処理方法を中心に検討した結果, 以下の知見が得られた.

(1) 空気媒質に属する複数の格子点を隣接格子点とする 1 つの地盤内格子点に対し, その点を完全反射境界における仮想点としたときの音響成分値の設定の仕方として, 各隣接格子点からそれぞれの滑り条件に応じて与えられる音響成分値の平均を用いる方法, および各隣接格子点での差

分計算ごとにそれぞれの音響成分値を別々に与える方法の 2 つの手法について検討した. その結果, 後者の手法の方が手間はかかるものの, より物理的に妥当な解が得られることが明らかとなった. 前者の手法は簡便であるが, 滑り条件が完全には満たされないため, 遮音壁周辺の音場解析では音漏れの現象などが生じた.

(2) 2 次元や 3 次元の様々な地表面形状を有する空間モデルとそのモデルに対する鏡像音源を設定したモデルについて音響伝搬解析したところ, 上記の完全反射境界処理を地表面に適用したときの解は鏡像音源モデルの解と一致し, この境界処理手法の妥当性が実証された.

(3) ただし, 急峻な斜面を有する地表面が存在する場合には, 斜面と外部境界が接する付近で数値的な不安定が生じ, 解が発散するケースが見られた. この不安定性は, 外部境界上の Mur の吸収境界の格子点と斜面下の地盤内格子点 (仮想点) との間に 1 つの空気媒質格子点が挟まれる格子点配列パターンが存在する箇所から発生することが明らかとなった.

(4) 斜面における数値的な不安定性に対する対策として, 時間刻みを細かくしたり, 音響伝搬方向に応じて差分方向を変える手法などを試みたが, 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, 解析モデルの外部境界上に配置された格子点をそのまま外側にコピーして外部境界付近の地表面勾配を 0 とすることで, 不安定の原因となる格子点配列パターンを解消したところ, 全てのケースで解の発散を抑えることに成功した.

参考文献

- 1) 山田一郎: 音の長距離伝搬と気象の影響, 騒音制御, Vol.28, No.4, pp.222 - 223, 2004.
- 2) Hardin, J. C. and Pole, D.S.: Sound Generation By Flow over a Two-Dimensional Cavity, AIAA journal, Vol. 33, No. 3, pp.407-412, 1995.
- 3) Shen, W. Z. and Sorensen, J. N.: Comment on the aeroacoustic formulation of Hardin and Pope, AIAA journal, Vol. 37, No. 1, pp. 141 - 143, 1999.
- 4) 向井靖彦, 比江島慎二: 風や温度変化などの気象条件を考慮した音響伝搬解析, 平成 19 年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集, Vol.59, pp.43 - 44, 2007.
- 5) MacCormack, R. W.: A numerical method for solving the equations of compressible viscous flow, AIAA Paper No.81-0110, 1981.
- 6) 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.
- 7) 橋本修, 阿部琢美: FDTD 時間領域差分法入門, 森北出版, 1996.

(2009 年 4 月 9 日 受付)