

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoiseにおける 無限要素境界形状の一般化

田之上 文彦* 徳永 健一*

Generalization of infinite element boundary shapes in Advance/FrontNoise

Fumihiko Tanoue* and Ken-ichi Tokunaga*

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise では、無限要素境界を用いることで、解析領域の外側の音場を計算することができる。バージョン 6.2 までは、境界面の形状は球面でなければならなかったが、バージョン 6.3 では、凸である任意の形状を無限要素境界として利用できるようになった。境界形状を一般化した無限要素境界の定式化と検証計算、無限要素境界を利用した事例を紹介する。

<https://doi.org/10.69290/j.001237-vol133>

Keywords: スーパーコンピュータ、シミュレーション、ソフトウェア、音響解析、無限要素

1. はじめに

有限要素のみを利用した音響解析で放射問題を取り扱う場合、一般的には音響インピーダンスを pc とした pc 境界が設定される。しかし、 pc 境界は垂直に入射する音が完全に透過するという原理を利用するため、斜めに入射する音は完全に透過しないことに注意が必要であった。また、有限要素では外部問題が不得手であるという欠点があった。

Advance/FrontNoise [1]では、放射問題における境界条件の課題の解決と、外部問題を同時に解くために無限要素を導入した[2]。無限要素の導入により、さまざまな放射問題を解くことができるようになったものの、無限要素を設定する境界面の形状を球面にする制約があり、有限要素領域は半球や球とする必要があった。そのため、解析モデルのアスペクト比が大きい場合、長辺に合わせて半球や球などの解析モデルを作成する必要があり、計算負荷が高くなってしまいう課題があった。

Advance/FrontNoise バージョン 6.3 では、課題を解決するために、無限要素境界の定式化を拡

張し、凸である任意の形状を無限要素境界として利用できるようにした。今回、一般化した無限要素境界の定式化と検証計算、無限要素境界を利用した事例を紹介する。

2. Advance/FrontNoise の従来の無限要素

従来の定式化では無限要素を球面形状の境界に設定し、その面上の三角形メッシュを底面とする三角柱台の無限要素を生成する。無限要素における補間は三角形面内では三角形要素の形状関数（面積補間）、球面の放射方向は Lagrange 多項式^{注1}で補間する。無限要素内ではこれらの積で形状関数を定めている。

この定式化では無限要素は球面形状にしか定義することができず、有限要素領域のモデル化の制約になっている。外部領域は無限要素を使って、要素数を節約できるとしても、無限要素を球面上に定義しなければならないために、有限要素領域の要素数の節約が難しい場合がある。

3. 無限要素境界面の形状緩和

従来の無限要素の定式化の制約を緩和するため、球面以外の形状でも無限要素を定義できるようにするための定式化を行う。

従来の定式化では、無限要素が球面上にあるこ

*アドバンスソフト株式会社 第2事業部

2nd Computational Science and Engineering Group,
AdvanceSoft Corporation

と、すなわち無限要素の中心から境界の三角形メッシュの頂点までの距離が等しいこと、が暗黙に使われていた。形状を緩和する場合はこの暗黙の仮定が成り立たないとして定式化する必要がある。

無限要素の領域は無限要素の中心から無限要素境界の三角形に向かって無限に広がる放射状の三角錐台の集合になる。三角錐台が重なり合ったり、向きが逆転したりしないためには、無限要素境界が無限要素の中心から見て星形多面体になっていることが必要である。実用上は凹形状になっていると要素の性能が低下するため、できるだけ隣り合う面との法線ベクトルの角度の変化が少ないような凸形状であるのが望ましい。

4. 無限要素の定式化

境界面の三角形の頂点の座標を $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$, $P_3(x_3, y_3, z_3)$ とし、無限要素の中心を $O(x_0, y_0, z_0)$ とする。従来の定式化では球面の中心であったが、ここでは球面であることを仮定しない。区別する場合は放射中心と呼ぶ。無限要素の領域を、そこに含まれる点 Q が点 O と結ぶ線分 OQ が三角形 $P_1P_2P_3$ を貫くようなものとして定義する。 $Q(x, y, z)$ の式で表すと次のようになる。

$$\{(x, y, z) = (x_0, y_0, z_0) + \sum \alpha_i (x_i - x_0, y_i - y_0, z_i - z_0) | \alpha_i > 0, \sum \alpha_i = 1\} \quad (1)$$

係数の和を $r = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ とし、無限要素の座標系を、

$$s = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} \quad (2)$$

$$t = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} \quad (3)$$

$$u = 1 - \frac{2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} \quad (4)$$

とすると、無限要素領域の点 $Q(x, y, z)$ は次のように、

$$\begin{aligned} (x, y, z) = & -\frac{1+u}{1-u}(x_0, y_0, z_0) \\ & + \frac{2s}{1-u}(x_1, y_1, z_1) \\ & + \frac{2t}{1-u}(x_2, y_2, z_2) \\ & + \frac{2(1-s-t)}{1-u}(x_3, y_3, z_3) \end{aligned} \quad (5)$$

表され、無限要素はこの座標系で、

$$\{(s, t, u) | 0 \leq s, 0 \leq t, s+t \leq 1, -1 \leq u < 1\} \quad (6)$$

を満たす点となる。このときヤコビアンは、

$$\left| \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(s, t, u)} \right| = -r^2 \begin{vmatrix} (x_1 - x_0) & (x_2 - x_0) & (x_3 - x_0) \\ (y_1 - y_0) & (y_2 - y_0) & (y_3 - y_0) \\ (z_1 - z_0) & (z_2 - z_0) & (z_3 - z_0) \end{vmatrix} \quad (7)$$

で与えられる。

無限要素の放射方向には、放射中心 O と頂点 P_j とを結ぶ半直線上に、 q 個の仮想節点 $\{P_{ji} | i = 1, \dots, q\}$ を考える。初項 1.0 の単調増加列 $\{r_i | i = 1, \dots, q\}$ を配置比率として与えておく。この時、仮想節点 P_{ji} は放射中心からの距離が、

$$|OP_{ji}| = r_i |OP_j| \quad (8)$$

を満たすように配置する。定義より最初の仮想節点は頂点 $P_{j1} = P_j$ と一致する。

無限要素の形状関数は (s, t) 座標については三角形の形状関数、

$$\tilde{N}_1(s, t) = s \quad (9)$$

$$\tilde{N}_2(s, t) = t \quad (10)$$

$$\tilde{N}_3(s, t) = 1 - s - t \quad (11)$$

を用いる。動径方向 r の形状関数は、従来の無限要素の形状関数と同様に Lagrange 多項式を用いて、

$$N_i(r) = \left(\frac{r_i}{r}\right)^q \prod_{i \neq j} \frac{(r_j - r)}{(r_j - r_i)} \quad (12)$$

とする。無限要素内の節点 P_{ji} における音響速度ポテンシャルの値を φ_{ji} とするとき、無限要素の座標系 (s, t, u) および $r = \frac{2}{1-u}$ を用いて、無限要素領域内の波数 k に関する音響速度ポテンシャルは、

$$\varphi(s, t, u) = \sum_{i,j} \varphi_{ji} N_i(r) \tilde{N}_j(s, t) e^{\sqrt{-1}k(r-r_i)} \quad (13)$$

で表される。

これらの定式化を用いて、従来の無限要素の計算における剛性マトリクスおよび補間の処理の修正を行った。

5. Advance/FrontNoise の無限要素機能の入力

無限要素境界形状の一般化により、従来の無限境界面定義ファイルの形式は以下のように変更した。

FNFEM_INFINITE=ON の場合、無限要素境界のグループごとに無限要素の中心の座標を記述する。

```
<number_of_groups>
<group1_id> <center1_x> <center1_y> <center1_z>
<group2_id> <center2_x> <center2_y> <center2_z>
...
```

FNFEM_INFINITE=OPT の場合、さらに配置比率の個数 (order) と配置比率 (ratio{i}) を記述する。

```
<number_of_groups>
<group1_id> <center1_x> <center1_y> <center1_z>
<group2_id> <center2_x> <center2_y> <center2_z>
...
<order>
<ratio1> <ratio2> ...
```

FNFEM_INFINITE=ON の場合は、配置比率は規定値{1.0,1.5,2.0,2.5,3.0}が用いられる。

無限要素解析結果ファイルも以前のバージョンとの互換性はない。無限要素解析結果を用いて外部領域を含む解析結果の可視化ファイルを作成する Advance/FrontNoise に同梱されているツール rsl2obs も境界面の形状緩和に対応した。それに伴い、以前のバージョンの無限要素解析結果は読み込めなくなっていることに注意する。

6. 球と直方体の無限要素境界面の検証

6.1. 問題設定

球と直方体の有限要素モデルについて、点音源からの放射問題を検証した。点音源の体積速度を q_0 とすると、音源から距離 r の位置における音圧 $p(r)$ は、

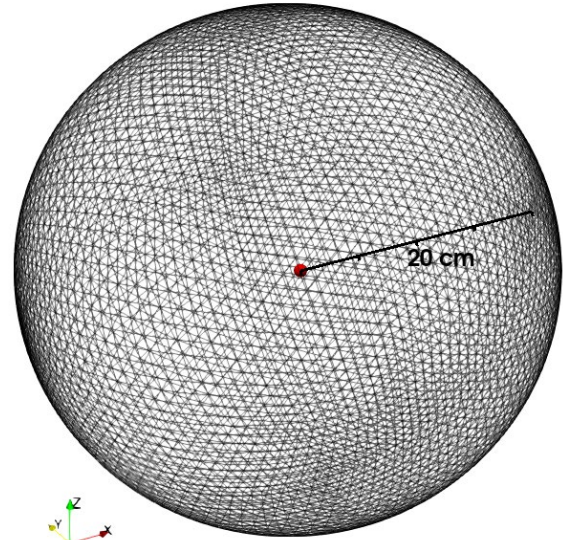
$$p(r) = \sqrt{-1}\omega\rho \frac{q_0}{4\pi} \frac{e^{-\sqrt{-1}kr}}{r} \quad (14)$$

である。ここで、 ω は角周波数、 k は波数である。音源から距離 r の位置での音圧レベル $L_p(r)$ は、

$$\begin{aligned} L_p(r) &= 20 \log_{10} \left(\frac{|p(r)|}{p_0} \right) \\ &= 20 \log_{10} \left(\frac{1}{p_0} \frac{\omega\rho q_0}{4\pi r} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

である。ここで、 p_0 は基準音圧で $20 \mu\text{Pa}$ である。本章では、解析結果と式(15)を比較して検証した。

(a)



(b)

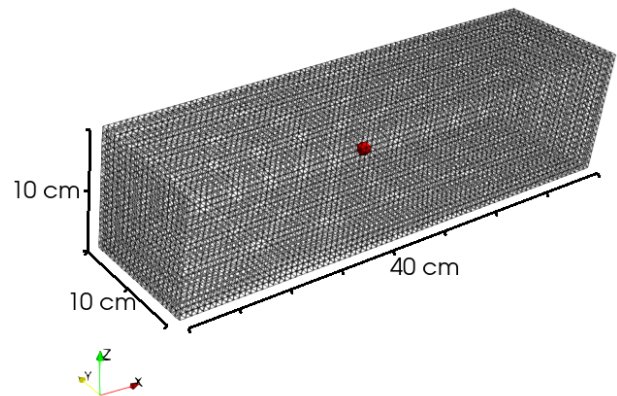


図 1 有限要素メッシュ ((a) は球、(b) は直方体で、赤い点は点音源の位置を示す)

表 1 有限要素メッシュのデータ

項目	(a)	(b)	(a)に対する (b)の削減率
形状	球	直方体	—
格子間隔	0.5 cm	0.5 cm	—
節点数	88,641	35,721	0.597
要素数	512,000	192,000	0.625

表 2 解析条件と材料パラメータ

項目	値	単位
解析周波数	865	Hz
点音源	4.62×10^{-5}	m^3/s
音速	346.0	m/s
空気密度	1.0	kg/m^3

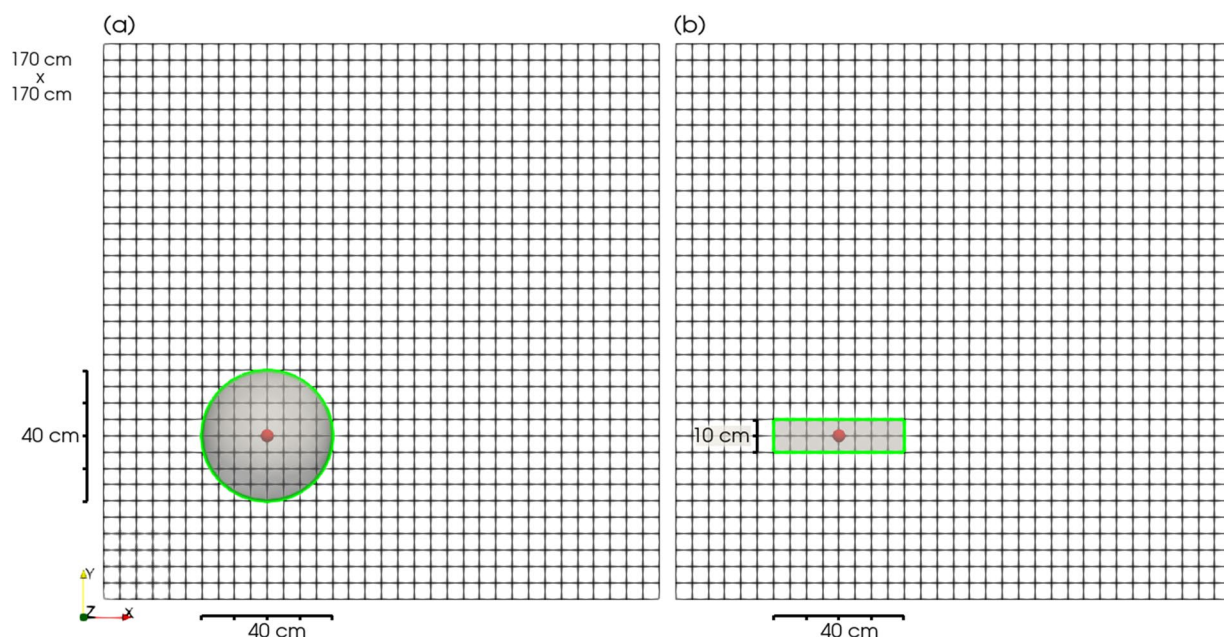


図 2 外部領域の評価用メッシュ（寸法は 170 cm×170 cm、格子間隔は 5 cm で、不透明部分は有限要素、有限要素の境界の太線は無限要素境界面、有限要素内部の点は点音源を示す）

図 1 に有限要素モデルを示す。球の直径と直方体の長辺の長さは 40 cm とした。直方体の長辺以外の辺は 10 cm とし、直方体の体積が球の体積よりも小さくなるように設定した。点音源は要素の中心に配置し、無限要素の中心も点音源と同じ位置とした。表 1 にそれぞれのモデルの節点数と要素数を示す。直方体の節点数と要素数は、それぞれ球よりも 60 % 程度削減されていた。

表 2 に解析条件と材料パラメータを示す。式 (14) と (15) を用いて、音源から 1 m 離れた地点の音圧レベルが 60 dB となるように、点音源の体積速度を設定した。

6.2. 外部領域の評価用メッシュ

Advance/FrontNoise では、無限要素境界面の値を用いて、外部領域の物理量を算出できる。図 2 に外部領域の評価用メッシュを示す。評価領域は 170 cm×170 cm で、メッシュは格子間隔 5 cm の四角形要素とした。

6.3. 解析結果

6.3.1. 内部領域と外部領域のコンター図

図 3 に内部領域と外部領域における音圧レベルのコンター図を示す。(a) は音源からの距離 r に応じて一様に減衰していることが確認できた。

一方 (b) では、±Y 軸方向の境界面と +X 軸方向の境界面が接続されたエッジの外側で音圧レベルが急激に低下しており、一様な減衰は見られなかった。これは、エッジ近辺における無限要素の形状が原因であると考えられる。図 4 の右上に、(b) の有限要素と無限要素のイメージを示した。無限要素の中心と点音源の位置は同じである。+X 軸方向の境界は無限要素の中心から距離があるため、エッジ近辺の無限要素は先鋭化する。そこで、点音源や無限要素境界の中心の座標は変更せず、有限要素を X 軸方向へ 15 cm シフトさせた場合について考える。このとき、エッジ近辺の無限要素のメッシュは、図 4 の左上のように形状変化が小さくなると考えられる。有限要素を X 軸方向へ 15 cm シフトさせたときの音圧レベルを図 4 の左下に示す。音圧レベルのコンターは、図 3 (a) と同等になった。したがって、(b) における音圧レベルの急激な低下は、無限要素の形状の影響であることを確認した。

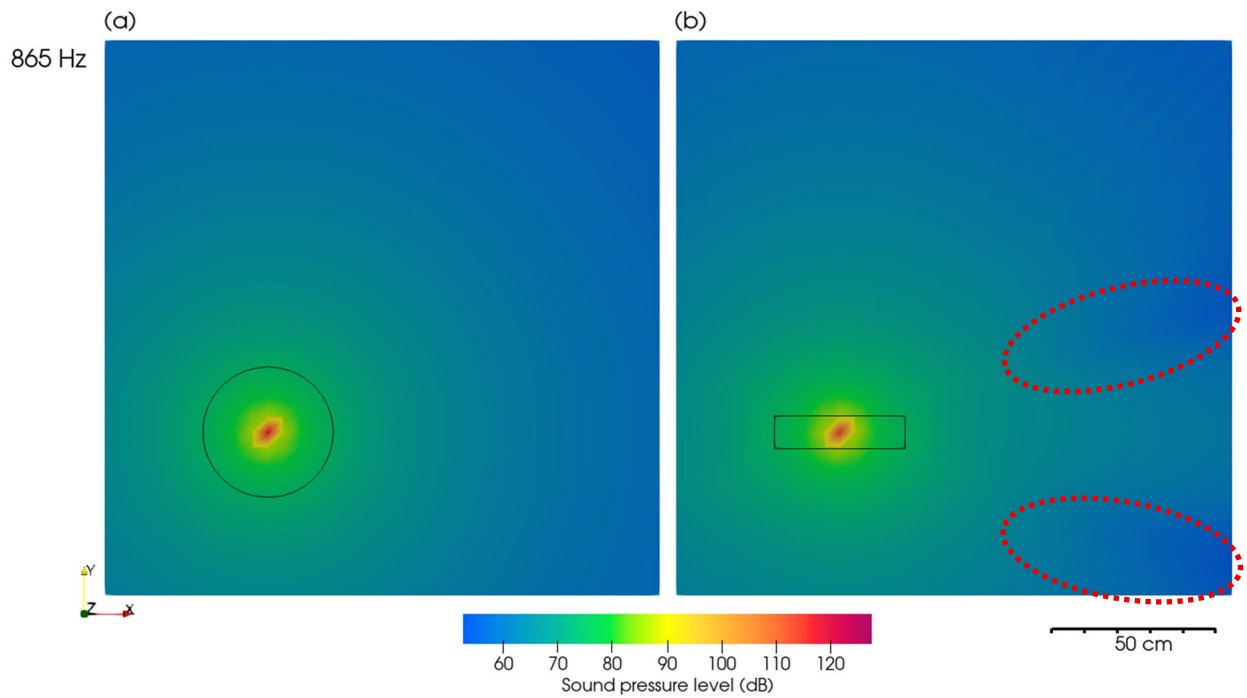


図 3 音圧レベルのコンター図（黒線は無限要素境界面、点線部分は音圧レベルが急激に低下しており結果が正しくない領域）

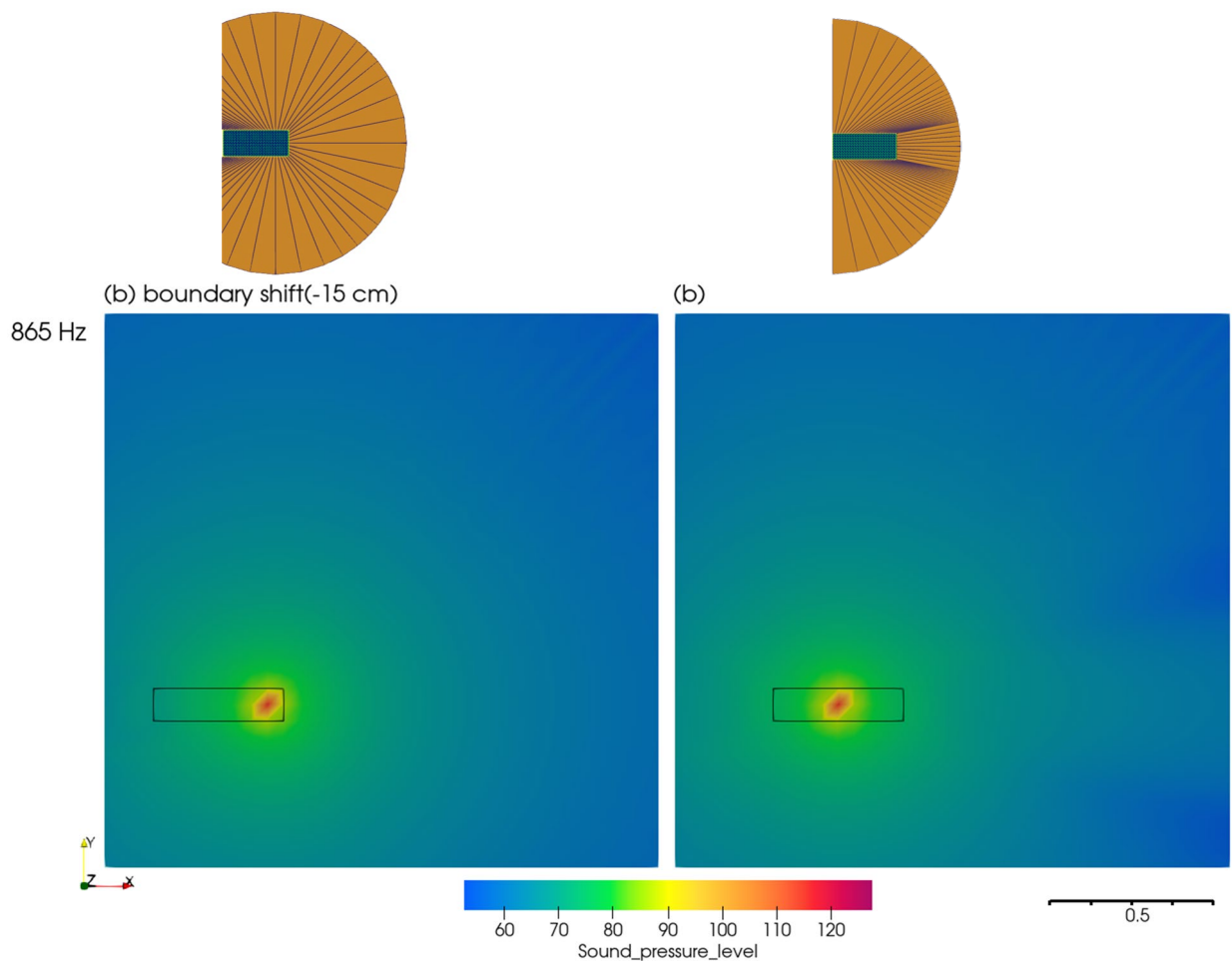


図 4 (b)で右側の境界面と無限要素の中心との距離がほぼ等しくなるように有限要素を X 軸方向へ-15 cm シフトさせた場合の有限要素と無限要素の概要図と音圧レベル（左）と、元の(b)のモデルの有限要素と無限要素の概要図と音圧レベル（右）

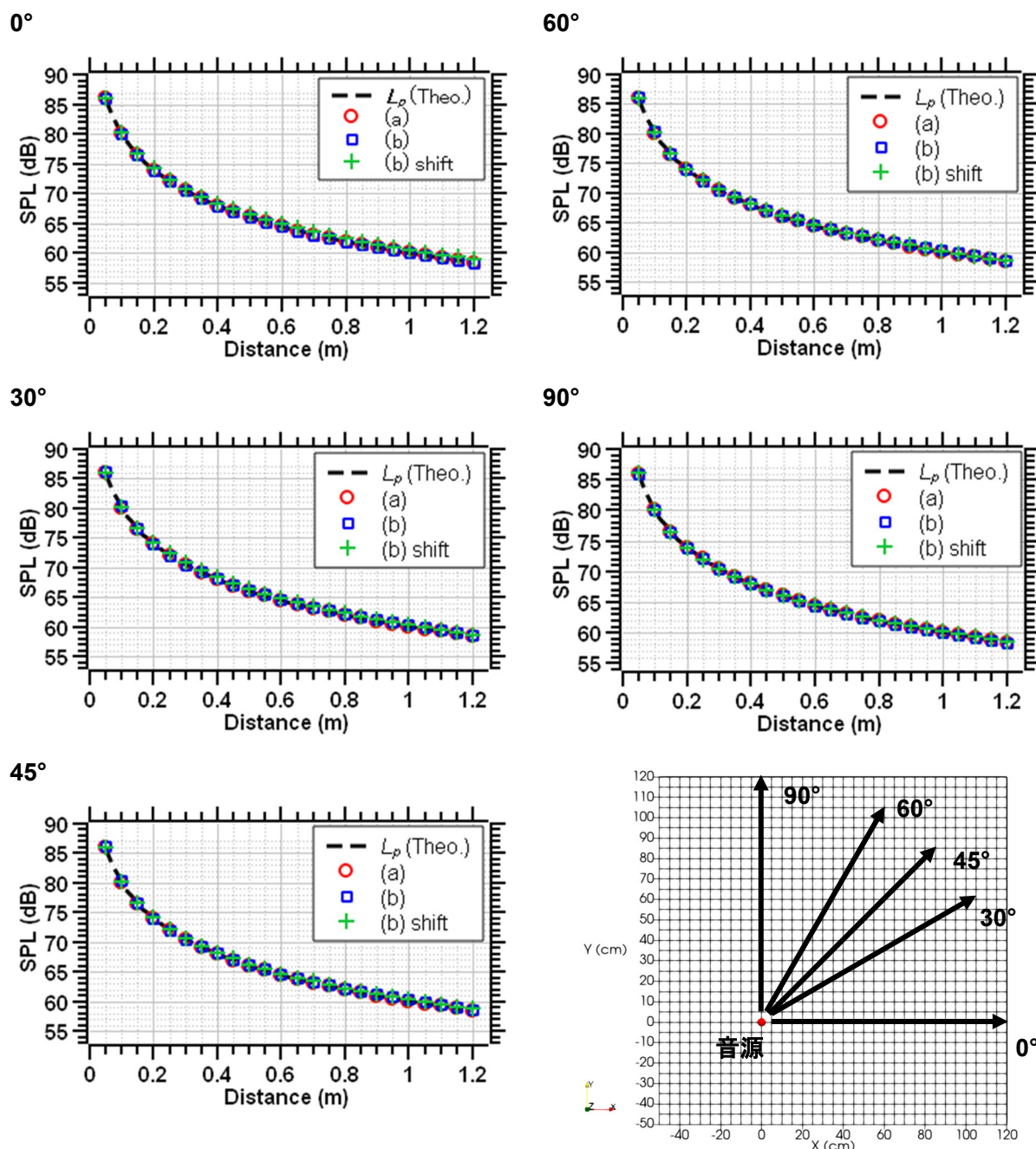


図 5 点音源から 0°、30°、45°、60°、90°方向の線分上における音圧レベル (---は式(15)、○は(a)、□は(b)、+は(b)を X 軸方向へ 15 cm シフトさせたときの結果)

6.3.2. 理論値との比較

図 5 に点音源からの距離と音圧レベルの関係を示す。点音源から 0°、30°、45°、60°、90°方向の 5 つの方位についてまとめ、理論値(式(15))、(a)、(b)、(b) の有限要素を X 軸方向へ 15 cm シフトさせた場合についてプロットした。0°、30°、45°、60°、90°方向においては、無限要素の境界面の形状に関係なくすべてのモデルで理論値と一致した。コンター図では、(b)のエッジの外側で正しくない結果が見られたが、プロットした方位につい

ては正しい結果が得られた。

6.3.3. 計算時間

(a)、(b) はそれぞれ直接法で計算した。(a) の計算時間は 21.8 秒、(b) の計算時間は 4.53 秒であり、(b) は (a) よりも 4.8 倍高速であった。これは、無限要素境界の形状を球面から緩和して解析モデルの規模を小さくできたためである。

直方体モデルでは、境界面のエッジ近辺外側のコンター図が正確に表現されない場合があるも

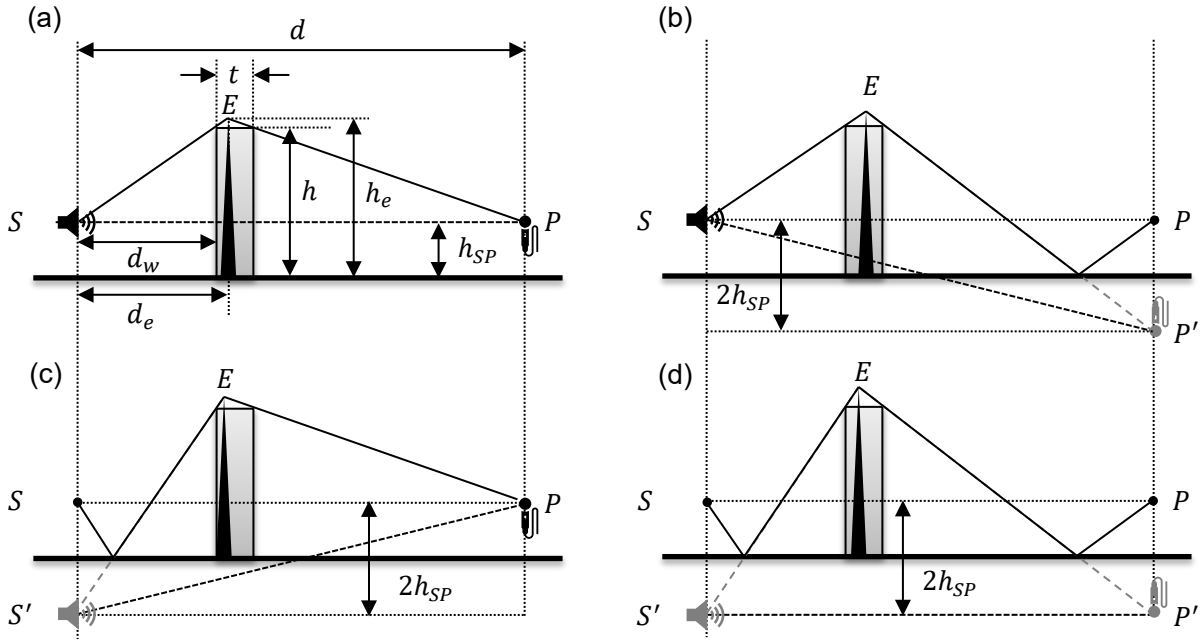


図 6 塀による遮音の近似計算の模式図

の、外部領域で評価が必要な場所の境界面の形状や中心からの位置関係に注意すれば、解析精度を担保しつつ、計算コストを下げるができる。

7. 塀による遮音の事例

7.1. 近似計算式の導出

図 7 に示した、音源と受信点との間に塀がある場合について考える。受信点では、直接音と地面からの反射音を足し合わせる必要がある。図 7 に示すように、音の伝搬経路は、塀の手前と塀の奥で、それぞれ無反射または地面で 1 回反射の組み合わせがあり、全部で 4 通りの伝搬経路が考えられる[3]。音源は点音源とし、それぞれ近似計算で受信点の音圧レベルを算出する。

受信点における音圧レベルは、次式で表される。

$$L_p^{total}(r) = 10 \log_{10} [\sum_{i=1}^m 10^{L_{pi}(r)/10}] \quad (16)$$

$$L_{pi}(r) = L_{p0}(r) - ATT_i \quad (17)$$

$L_{p0}(r)$ は点音源による音圧レベルで、式(15)で表される。 ATT は塀による減音量で、 m は伝搬経路の数、添え字の i は図 7 の伝搬経路を区別するためのインデックスである。 ATT はフレネル数 N によってさまざまな計算式が提案されている[4]。文献[4]では、既存の計算式や著者らが提案した計算式が示されており、それぞれ前川チャートとの差

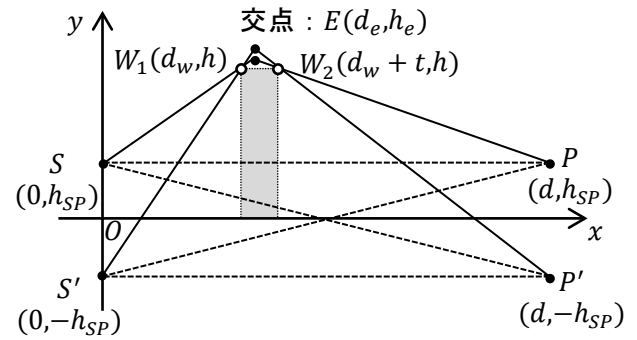


図 7 近似計算における座標系

について評価されている。文献で、前川チャートとの差の分散が最も小さくなった計算式は著者らが提案した式(10)であり、今回の計算では、文献の式(10)を採用した。採用した式は以下のとおりである。

$$ATT_i = \begin{cases} 10 \log_{10} N_i + 13 & (N_i \geq 1) \\ 5 + \frac{8 \sinh^{-1}(|N_i|^{0.485})}{\sinh^{-1}(1)} & (0 \leq N_i < 1) \\ 5 - \frac{8 \sinh^{-1}(|N_i|^{0.485})}{\sinh^{-1}(1)} & (-0.324 \leq N_i < 0) \\ 0 & (N_i < -0.324) \end{cases} \quad (18)$$

$$N_i = \frac{2\delta_i}{\lambda} \quad (19)$$

ここで、 λ は波長、 δ_i は伝搬距離と音源から受信点までの直線距離との差である。伝搬距離の計算にあたり、図 6 のように座標系を設定した。点 W_1 と点 W_2 はそれぞれ塀の上端の前縁と後縁であり、

点 S や点 S' と点 W_1 を通過する直線と点 P や点 P' と点 W_2 を通過する直線との交点が点 E である。点 P 、点 P' 、点 S 、点 S' 、点 W_1 、点 W_2 はそれぞれ位置が決まっているので、 $\overline{SE}$ 、 $\overline{S'E}$ 、 $\overline{EP}$ 、 $\overline{EP'}$ を含む直線の方程式は次式で与えられる。

$$\overline{SE}: y = \frac{h-h_{SP}}{d_w}x + h_{SP} \quad (20)$$

$$\overline{S'E}: y = \frac{h+h_{SP}}{d_w}x - h_{SP} \quad (21)$$

$$\overline{EP}: y = -\frac{h-h_{SP}}{d-(d_w+t)}(x-d) + h_{SP} \quad (22)$$

$$\overline{EP'}: y = -\frac{h+h_{SP}}{d-(d_w+t)}(x-d) - h_{SP} \quad (23)$$

式(20)～(23)を使って、(a)～(d) の各ケースについて δ_i を求める。

(a) のケース :

(a) は直接音を受音するケースである。 δ_i は、

$$\begin{aligned} \delta_i &= (\overline{SE} + \overline{EP}) - \overline{SP} \\ &= \left[\sqrt{d_e^2 + (h_e - h_{SP})^2} \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{(d - d_e)^2 + (h_e - h_{SP})^2} \right] - d \end{aligned} \quad (24)$$

である。式(20)と式(22)より、交点 $E(d_e, h_e)$ は、

$$d_e = \frac{d}{d-t}d_w \quad (25)$$

$$h_e = \frac{dh - th_{SP}}{d-t} \quad (26)$$

である。

(b) のケース :

(b) は受音側の地面で反射した音を受音するケースである。 δ_i は、

$$\begin{aligned} \delta_i &= (\overline{SE} + \overline{EP'}) - \overline{SP'} \\ &= \left[\sqrt{d_e^2 + (h_e - h_{SP})^2} \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{(d - d_e)^2 + (h_e + h_{SP})^2} \right] \\ &\quad - \sqrt{d^2 + 4h_{SP}^2} \end{aligned} \quad (27)$$

である。式(20)と式(23)より、交点 $E(d_e, h_e)$ は、

$$d_e = \left[1 + \frac{(h+h_{SP})t}{(d-t)(h-h_{SP})+2d_wh_{SP}} \right] d_w \quad (28)$$

$$h_e = h + \frac{(h^2 - h_{SP}^2)t}{(d-t)(h-h_{SP})+2d_wh_{SP}} \quad (29)$$

である。

(c) のケース :

(c) は音源側の地面で反射した音を受音するケースである。 δ_i は、

$$\begin{aligned} \delta_i &= (\overline{S'E} + \overline{EP}) - \overline{S'P} \\ &= \left[\sqrt{d_e^2 + (h_e + h_{SP})^2} \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{(d - d_e)^2 + (h_e - h_{SP})^2} \right] \\ &\quad - \sqrt{d^2 + 4h_{SP}^2} \end{aligned} \quad (30)$$

である。式(21)と式(22)より、交点 $E(d_e, h_e)$ は、

$$d_e = \left[1 + \frac{(h-h_{SP})t}{(d-t)(h+h_{SP})-2d_wh_{SP}} \right] d_w \quad (31)$$

$$h_e = h + \frac{(h^2 - h_{SP}^2)t}{(d-t)(h+h_{SP})-2d_wh_{SP}} \quad (32)$$

である。

(d) のケース :

(d) は音源側と受音側でそれぞれ反射した音を受音するケースである。 δ_i は、

$$\begin{aligned} \delta_i &= (\overline{S'E} + \overline{EP'}) - \overline{S'P'} \\ &= \left[\sqrt{d_e^2 + (h_e + h_{SP})^2} \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{(d - d_e)^2 + (h_e + h_{SP})^2} \right] \\ &\quad - d \end{aligned} \quad (33)$$

である。式(21)と式(23)より、交点 $E(d_e, h_e)$ は、

$$d_e = \frac{d}{d-t}d_w \quad (34)$$

$$h_e = \frac{dh + th_{SP}}{d-t} \quad (35)$$

である。

7.2. 解析モデル

図 8 に解析モデルを、表 3 に解析モデルの形状パラメータを示す。地面と塀の表面は完全反射とし、それ以外の境界面はすべて無限要素境界とした。無限要素境界面の形状の違いによる結果を比較するために、半球と立方体のモデルを作成した。半球モデルは半径を 4 m とし、立方体モデルは、1 辺の長さを 4 m とした。格子幅はおよそ 0.05 m とした。半球モデルの節点数は 930,062、要素数は 5,374,485 であった。一方、立方体モデルの節点数は 471,647、要素数は 2,700,173 であり、立方体の節点数や要素数は半球の節点数や要素数のおおよそ半分であった。

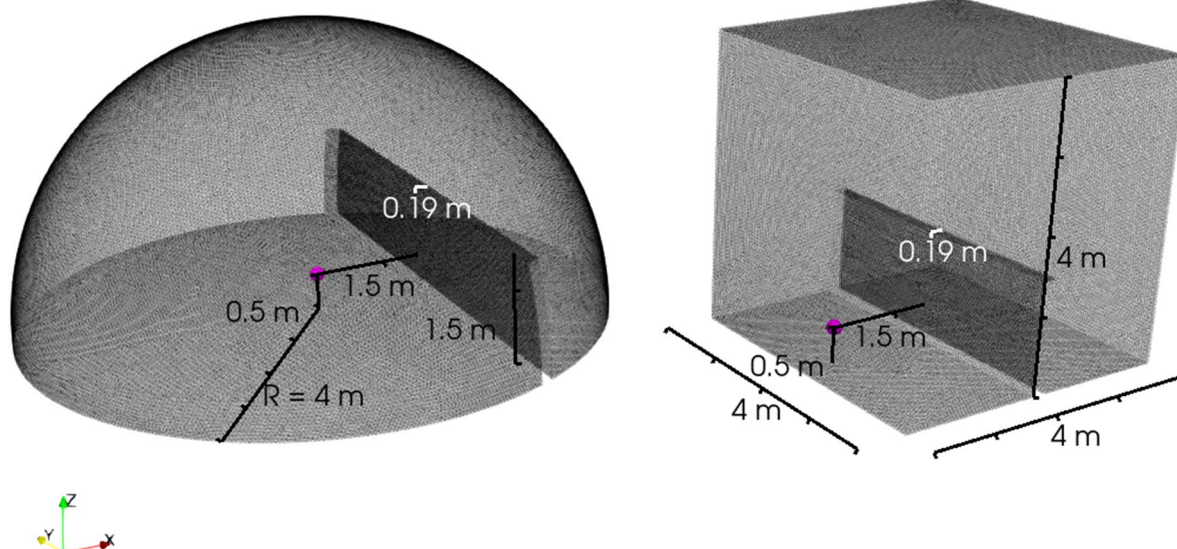


図 8 解析モデル（左：半球モデル、右：立方体モデル）

表 3 解析モデルの形状パラメータ

寸法（単位：m）	記号	値
塀の高さ	h	1.5
音源や観測点までの高さ	h_{SP}	0.5
音源から塀までの距離	d_w	1.5
塀の厚み	t	0.19

表 4 解析条件と材料パラメータ

項目	値		単位
解析周波数	63	125	Hz
点音源	6.3	3.2	$10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$
音速	346.0		m/s
空気密度	1.0		kg/m^3

表 4 に解析条件と材料パラメータを示す。63 Hz と 125 Hz の周波数に対して解析を実施した。点音源はそれぞれ音源から 1 m の距離で 60 dB となるように体積速度を設定した。

図 9 にコンター図を評価するためのメッシュを示す。評価領域の寸法は 11 m × 11 m で、XZ 断面に設定した。メッシュの形状は四角形要素で、格子間隔は 5 cm とした。図において、①は有限要素の領域、②は無有限要素の領域、③は有限要素でも無有限要素でもない領域を示す。Advance/ FrontNoise では、①の領域は有限要素の計算結果がマッピングされ、②の領域には、無有限要素の結果から算出された値がマッピングされる。③の有限要素でも無有限要素でもない領域は、ParaView などの可視化ソフトウェアで可視化できるように 0 が代入される。

7.3. 解析結果

図 10 に半球と立方体の XZ 断面における音圧レベルのコンター図を示す。立方体のモデルでは、

右上のエッジよりも右側の領域で、音圧レベルの大きさが半球モデルの音圧レベルとやや異なっていた。図 11 に受音点の位置と音圧レベルの関係を示す。63 Hz では立方体の音圧レベルは半球よりも 1～2 dB ほど高く、125 Hz では半球よりも 1～2 dB ほど低かった。塀のあるケースでは、回り込む音波が右上のエッジを通過するため、誤差が生じたと考えられる。誤差をなくするためには境界面のメッシュを増やし、境界面同士を滑らかに接続してエッジをなくすことが有効であると考えられる[5]。

図 10 に、式(15)の点音源の音圧レベルと、式(16)による近似計算による音圧レベルもプロットした。63 Hz では、近似計算で算出した音圧レベルは 45 dB であったが、解析結果は 49 dB で、塀による減衰を考慮しない場合の音圧レベルとほぼ同じ値であった。63 Hz の波長はおおよそ 5.5 m で、塀の高さ 1.5 m や厚み 0.19 m よりも大きいため、塀による遮音効果が得られなかったと考えられる。125 Hz ($\lambda \cong 2.8 \text{ m}$) では、解析結果にも遮音

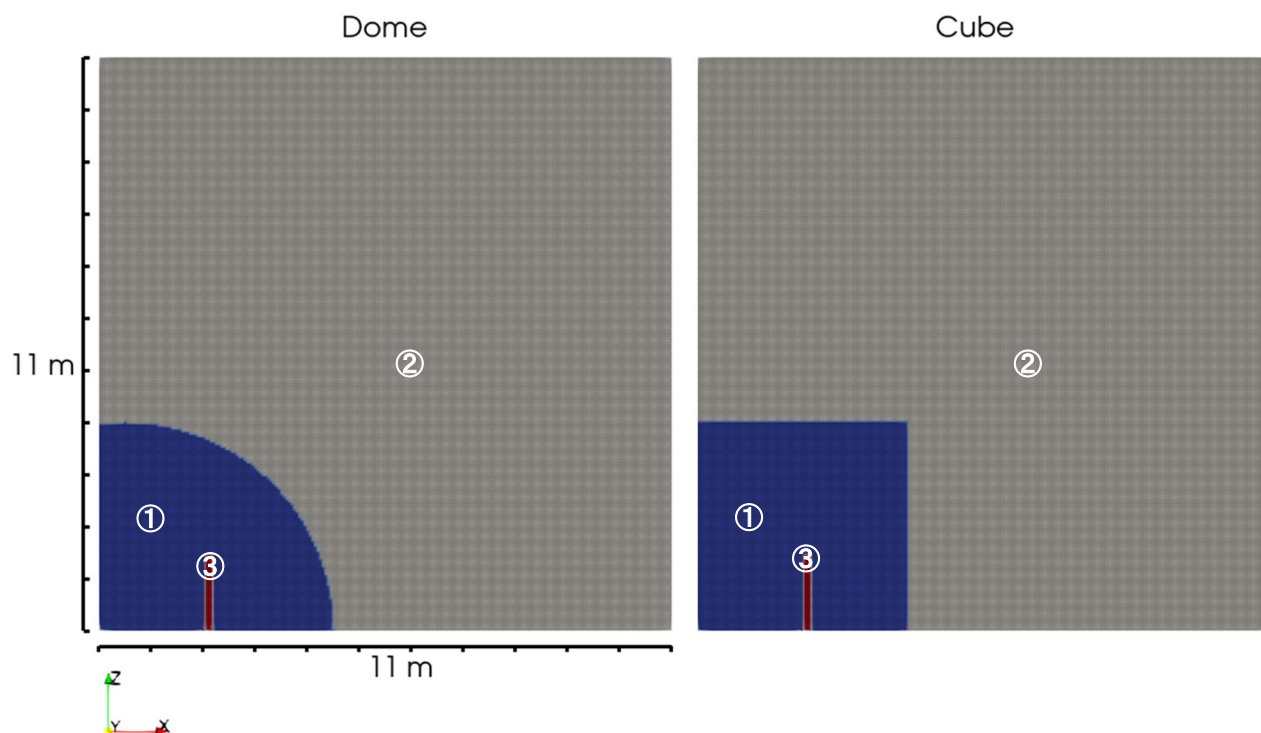


図 9 結果評価用のメッシュ（格子間隔は 5 cm で、青色（①）は有限要素の領域、白色（②）は無限要素の領域、赤色（③）は有限要素でも無限要素でもない領域を表す）

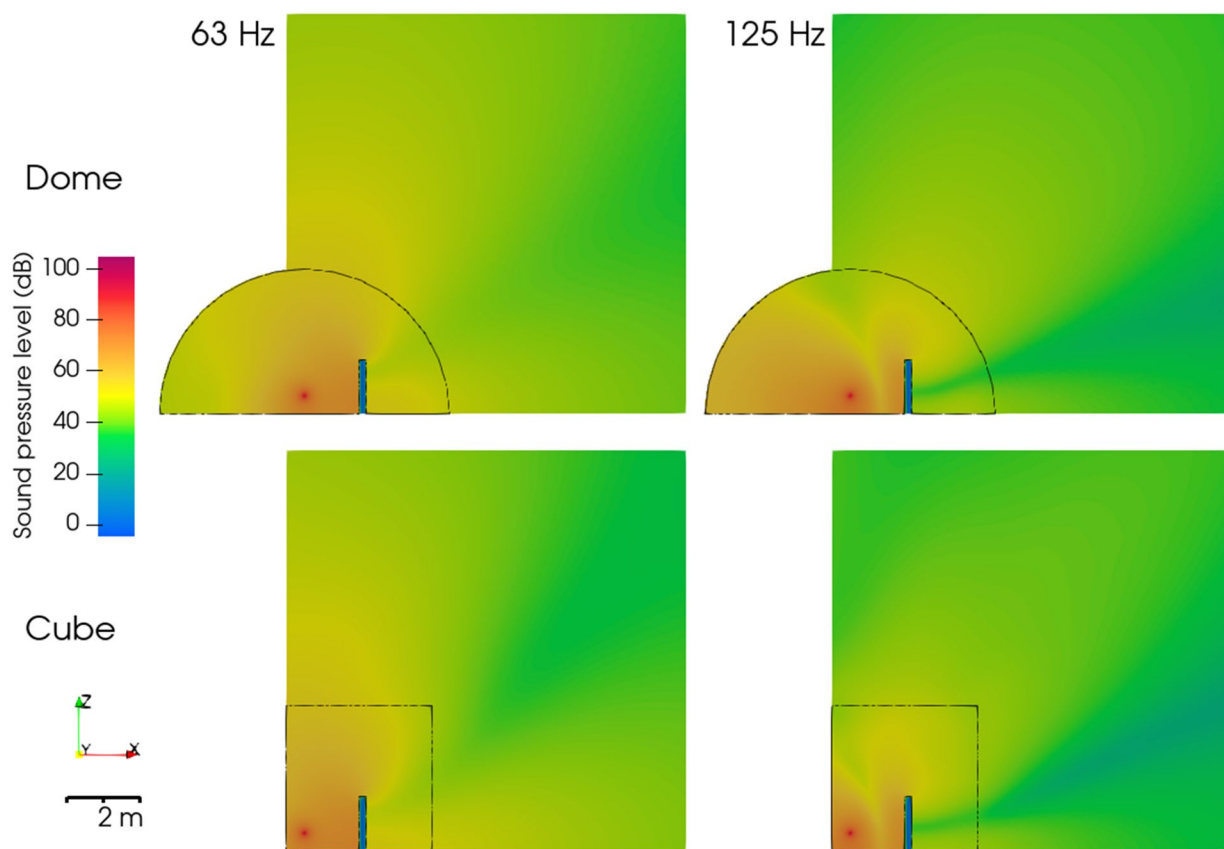


図 10 音圧レベルのコンター図（黒線は有限要素の境界面を表す）

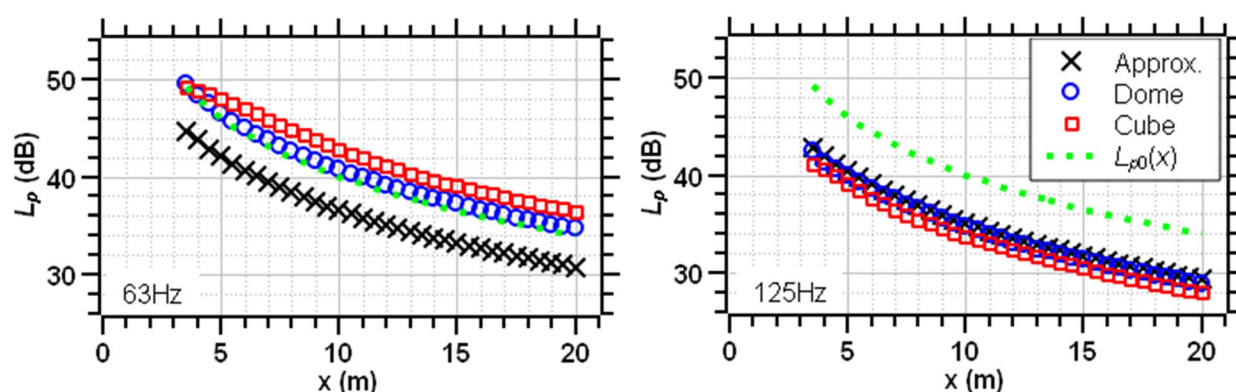


図 11 受音点の位置と音圧レベルの関係（左図は 63 Hz、右図は 125 Hz の時の結果で、Approx. は式 (16) による近似計算値、Dome および Cube は解析値、 $L_{p0}(x)$ は塀による減衰を考慮しない場合の点音源 (式 (15)) による音圧レベルである)

表 5 直接法の計算時間 ($\times 10^2$ s)

モデル	63 Hz	125 Hz
半球	10.2	15.7
立方体	2.81	2.73

効果が見られており、半球モデルでは式 (16) による近似計算とほぼ一致した。

表 5 に計算時間を示す。モデルの規模を縮小できたことにより、立方体は 300 秒弱、半球は 1000 秒オーダーであった。

8. まとめ

境界形状を一般化した無限要素境界の定式化について説明し、放射問題の検証計算と事例を紹介した。直方体の境界面場合に無限要素境界を適用すると、単純な放射問題では境界面のエッジの外側で誤差が生じるものの、境界面と無限要素の中心の位置関係を調整することで、誤差がなくなることを確認した。また、塀など構造物によって単純な放射境界ではない場合、境界面にエッジがあると 1~2 dB の誤差が生じた。球面の制約条件を緩和したことによって解析モデルの規模を縮小できるようになったため、計算時間を短縮できるようになった。

参考文献

- [1] 松原聖, 大家史, 尾川慎介, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise”, アドバンス

シミュレーション Vol.20(2014.12).

- [2] 松原聖, 尾川慎介, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise への無限要素の導入”, アドバンスシミュレーション Vol.23(2016.12).
- [3] 前川純一, “障壁(塀)の遮音設計に関する実験的研究”, 日本音響学会誌, 18 (1962), 187—196.
- [4] 山本貢平, 高木興一, “前川チャートの数式表示について”, 騒音制御, 15 (1991), 202—205.
- [5] R. J. Astley, G. J. Macaulay, J-P. Coyette, L. Cremers, “Three-dimensional wave-envelope elements of variable order for acoustic radiation and scattering. Part I. Formulation in the frequency domain”, *J. Acoust. Soc. Am.* 103, (1998) 49–63.

注1. [1]では Legendre 多項式と記述していたが、Lagrange 多項式の間違いである。

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、それぞれの文献タイトルの下に記載した DOI から、PDF ファイル (カラー版) がダウンロードできます。また、本雑誌に記載された文献は、発行後に、JDREAMIII (日本最大級の科学技術文献情報データベース) に登録されます。