九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

指向性音源に対する防音壁挿入損失に関する研究

松本，源生

https://doi.org/10.11501/3181892

出版情報：九州芸術工科大学，2000，博士（工学），課程博士
バージョン：
権利関係：

第5章　大きさの無視できない指向性音源に対する防音壁の遮音効果

大きさの無視できない指向性音源に対する検討として，前章では幾何光学的回折理論により三次元音場における指向性を数値計算するモデルを作成した．続いて本章では，これから提案する防音壁の遮音効果の計算モデルの妥当性，および，計算モデルによる数値計算から大きさの無視できない指向性音源に対する防音壁の遮音効果の傾向を検討する．

工場建屋に加え防音壁も反射性地面上に併存するときには，幾何光学的回折理論によると回折音波だけでなく幾何光学的音波の取り扱いが非常に複雑となり，その適用は困難である．代わって二次元の境界要素法を適用して遮音効果を算出する．ただし，通常の境界要素法は工場建屋のような大きな散乱体に対しては解が一意とならない．この点に関する工夫も解説する．

5.1 工場建屋透過音のモデル化から境界要素法の適用

付録 B に示すように，工場建屋のような不整型で断面積が大きな散乱体に対しても，内部 Helmholtz 方程式を併用して係数行列を再構成する CHIEF を適用する境界要素法によれば，固有周波数近傍の解の一意性が保証される．次に考えなければならないのは，工場建屋内部からの透過音に対して，境界要素法の音源を如何にして設定するか，という問題である．そこで，透過音は以下のようなモデル化を考えて音源を設定することとした．

5.1.1 工場建屋透過音のモデル化

2 次元の拡散音場の仮定より，建屋内部の音響出力パワーを W_{in} $(watt)$ とすると，内部のエネルギー密度 E_{in} は，

$$E_{in} = \frac{\pi W_{in}}{cA} \ (watt \cdot s/m^2) \tag{5.1}$$

となる．ここで，A は室の全吸音力 (m)，c は音速 (m/s) である．

内部音場から屋根と側壁からなる外壁面に音響エネルギーが入射し，外部へと透過する．この透過音が外部音場に対しては音源となりうる．そこで，**Fig. 5.1** に示すように外壁面を間隔 d で分割し，その中心に位置する線音源から音波が放射されていると考えると，各線音源から放射される音響出力パワー W_{line} は，外壁の透過率を τ とおくと次式であらわせる．

$$W_{line} = \frac{c}{\pi} E_{in} d\tau \tag{5.2}$$

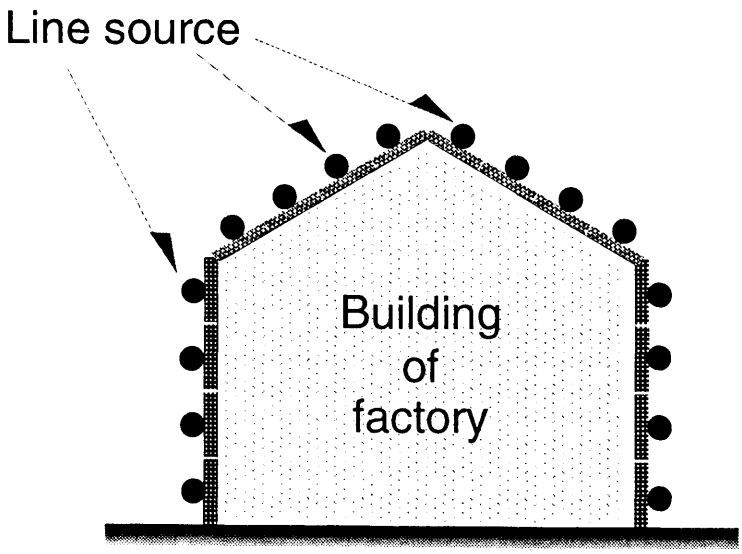


Fig. 5.1 外壁上の線音源配置.

そこで，任意の受音点における音圧レベルは，(5.2) 式で表せる音響出力パワーを持つ線音源からの寄与をエネルギー加算することより求めることができる．ただし，屋根と側壁で透過率が異なれば音響出力パワーも異なることとなる．しかし，それぞれの透過率を τ_{roof}，τ_{wall} により表示すると，パワーレベルの差は，

$$L_{roof} - L_{wall} = 10\log_{10}\frac{1}{\tau_{wall}} - 10\log_{10}\frac{1}{\tau_{roof}} \tag{5.3}$$

のように透過損失の差となる．従って，屋根材と側壁材の透過率の差を考慮するため，屋根上の線音源からの寄与をエネルギー加算する際に，(5.3) 式により表せるパワーレベル差，すなわち透過損失の差を加えることとした．

5.1.2 境界要素法の適用

各線音源からの寄与計算には，既に述べた位置に内点群を配置した境界要素法を用いる．音源位置が散乱体表面にあるため，(A.50) 式の係数 $\varepsilon(\boldsymbol{q})$ が 1/2 となることに注意すると，境界上および内点に関する連立方程式 (B.2) 式，(B.3) 式は次式のようになる．

$$\sum_{j=1}^{N} A_{ij}\, p(\boldsymbol{r}_j) + \frac{1}{2}p(\boldsymbol{r}_j) = \frac{1}{2}p_D(\boldsymbol{r}_i)\ , \qquad (i = 1, \cdots, N) \tag{5.4}$$

$$\sum_{j=1}^{N} A_{ij}\, p(\boldsymbol{r}_j) = 0\ , \qquad (i = N+1, \cdots, N+M) \tag{5.5}$$

A_{ij} は (A.55) 式により表される境界要素 S_j に関する積分であり $(N+M)\times N$ の係数行列を構成する．係数行列はすべての線音源に関して同一であるので係数行列構成は各周波数に関して 1 回で済む．受音点 $\boldsymbol{r}$ における，音圧は以下に示す手順により求めることができる．

i) 各音源毎に，(5.4) 式と (5.4) 式からなる連立方程式を解くことにより境界要素上の表面音圧 $p(\boldsymbol{r}_j)$, $(j = 1, \cdots, N)$ を求める．

ii) 各音源毎に (A.54) 式，すなわち

$$\frac{1}{2}p(\boldsymbol{r}) = \frac{1}{2}p_d(\boldsymbol{r}) - \sum_{j=1}^{N} p(\boldsymbol{r}_j)A_{ij} \tag{5.6}$$

により受音点における音圧寄与を求める．

iii) 各音源からの音圧寄与をエネルギー加算することにより，透過音による音圧を求める．

ただし，線音源の間隔は，幾何光学的回折理論による計算で良い結果が得られた 1/2 波長 (4.3.2 節参照) を上限とした．

5.2 実験的検討

計算モデルによる防音壁の遮音効果の計算精度を確認するため，4.4.1 節 にて作成した工場建屋の 1/10 縮尺模型により防音壁背後の遮音効果の測定をおこなった．

5.2.1 遮音効果の測定

Fig. 5.2 の写真に示しているように，模型では防音壁として厚さ 3 mm 高さ 500 mm の鉄板を用いた．マイクロホンを **Fig. 5.3** の受音領域に正確に配置するため，模型の中心断面で糸で格子網を作成した．

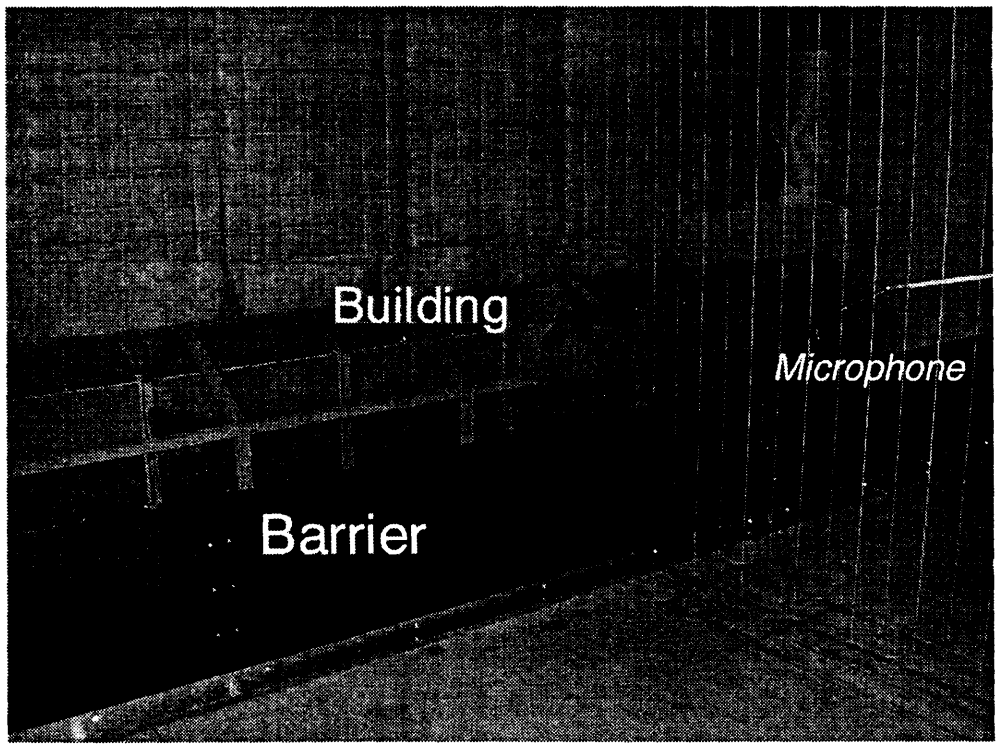


Fig. 5.2 半無響室内での測定．

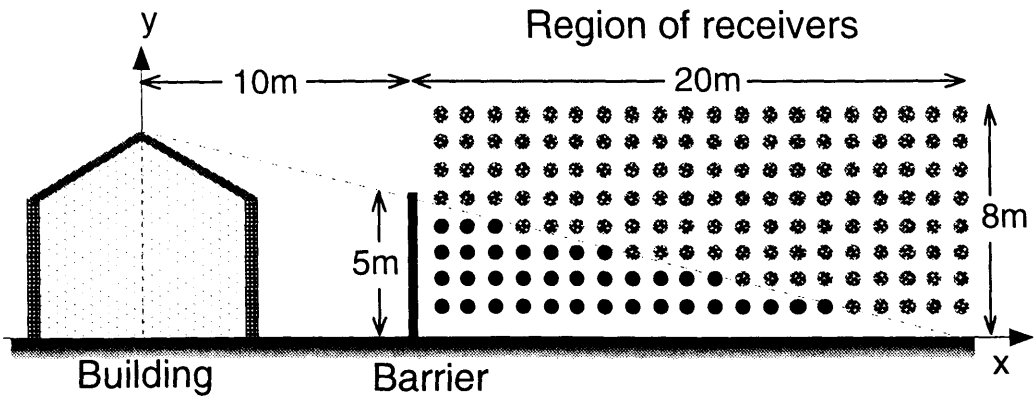
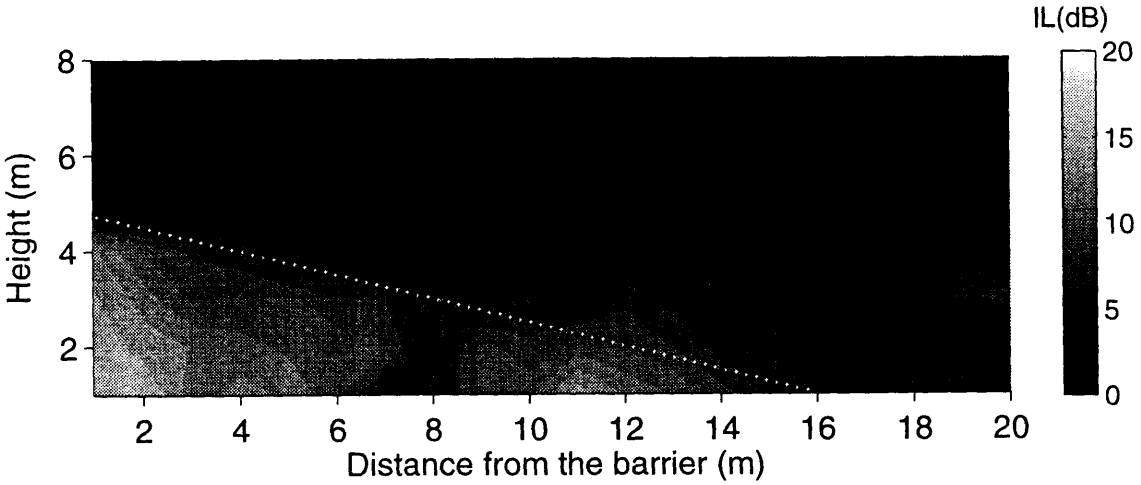
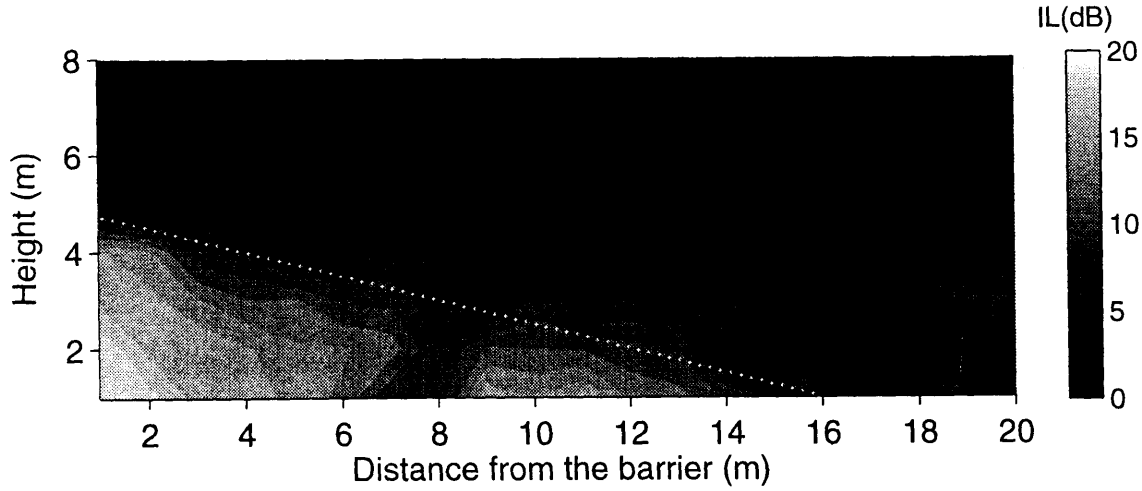


Fig. 5.3 防音壁位置と受音領域 –実寸–．

"防音壁がない場合", "高さ 0.5m, 厚さ 3mm の鉄板を防音壁に用いた場合", "鉄板の音源側に密度 32 kg/m^3 厚さ 50 mm のグラスウールを付与した場合"の 3 通りについて, 格子網内でマイクロホンを移動して 100 mm のメッシュ間隔で 160 点について 1/3 オクターブバンド音圧レベルの測定を行い, 挿入損失を算出した. 500 Hz と 1000 Hz の周波数に対して, 挿入損失の分布をそれぞれ **Fig. 5.4** と **Fig. 5.5** に示す. 分布は実寸で示し, 図中の点線は shadow boundary を表している. 防音壁高 5 m よりも高い領域において, 特に 1000 Hz で遮音効果はほとんど現れていない. 一方, 点線より下となる音響的に影の領域においては, 防音壁エッジからの回折角が大きくなるほど大きな遮音効果が再現されている.



(a) 鉄板のみ

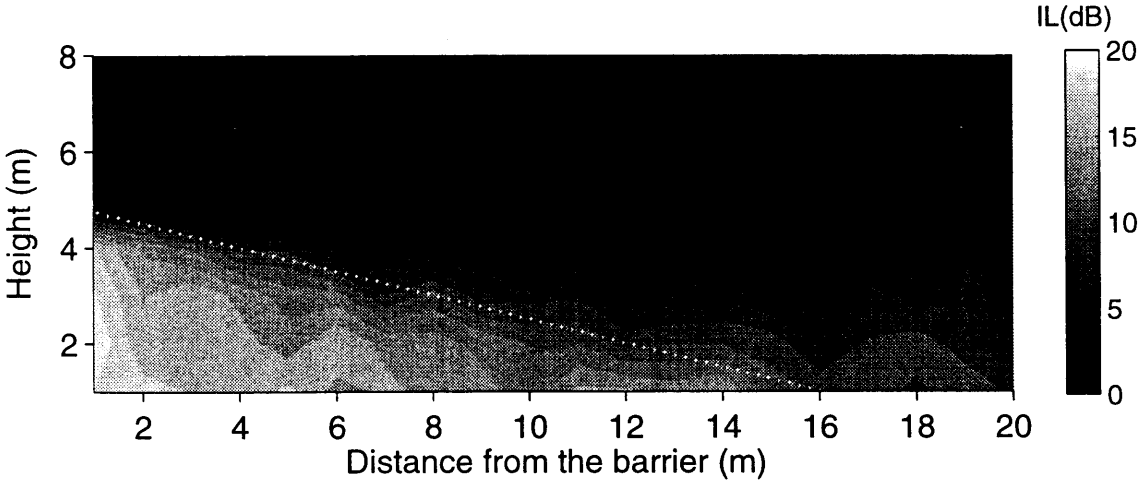


(b) グラスウールを付与

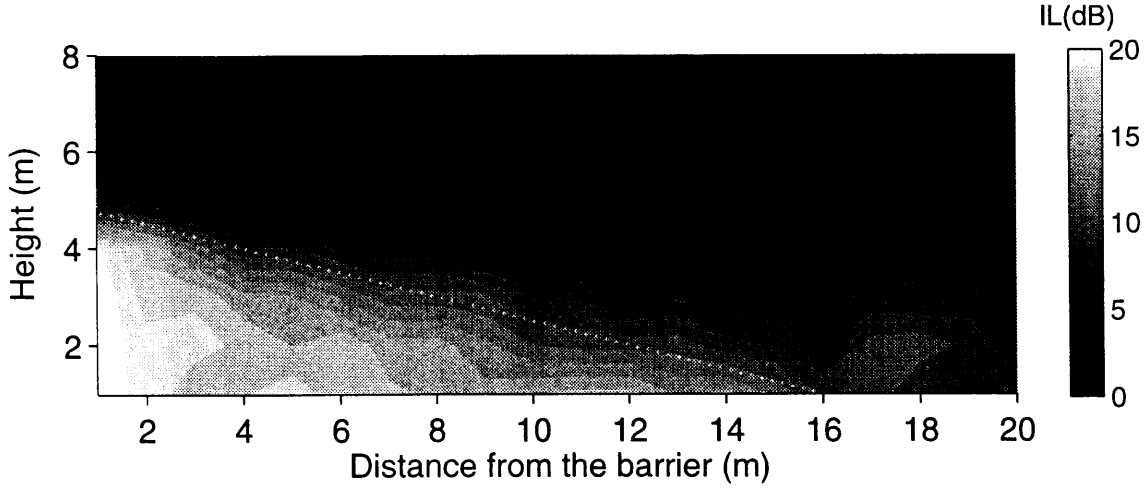
Fig. 5.4 挿入損失 –500 Hz–.

しかし，コンターを作成するためには，受音点のメッシュ間隔は波長の 1/2 もしくは 1/3 が定石とされるが，模型実験では実寸換算で 500 Hz の場合は 0.68 m の波長に対して，また 1000 Hz の場合は 0.34 m の波長に対して 1 m のメッシュ間隔で測定しているため，音場の再現精度に問題がある．干渉稿が多く発生する場合などには 1 m のメッシュ間隔では無理がある．

だが，大まかな傾向把握は可能と思われる．例えば，鉄板のみの場合とグラスウールを付与したときの分布図を比較すると，グラスウールを付与したことによる遮音量の増加は大きくないような傾向が伺える．このような吸音性の効果の検討は，後の 5.3.2 節 にて検討することとする．



(a) 鉄板のみ



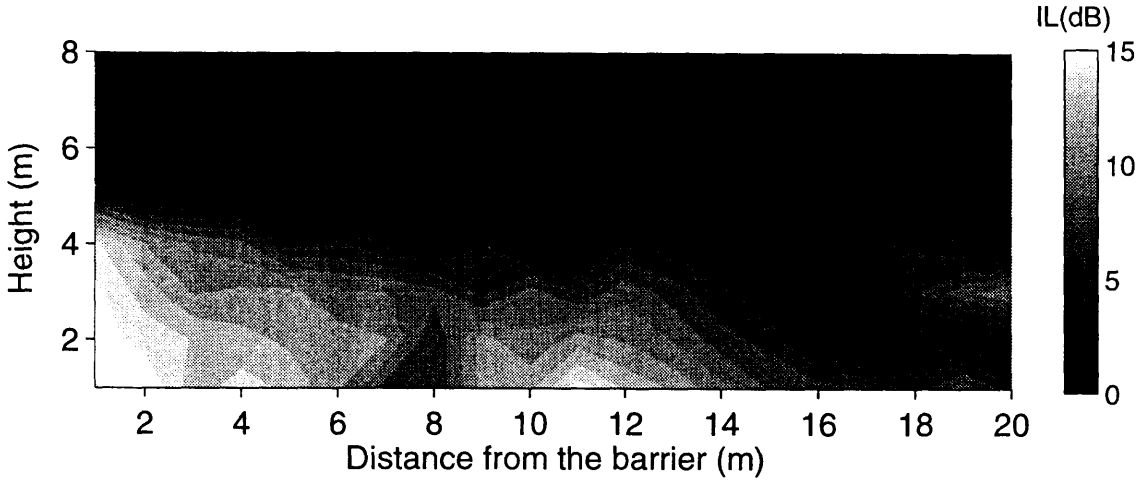
(b) グラスウールを付与

Fig. 5.5 挿入損失 –1000 Hz–.

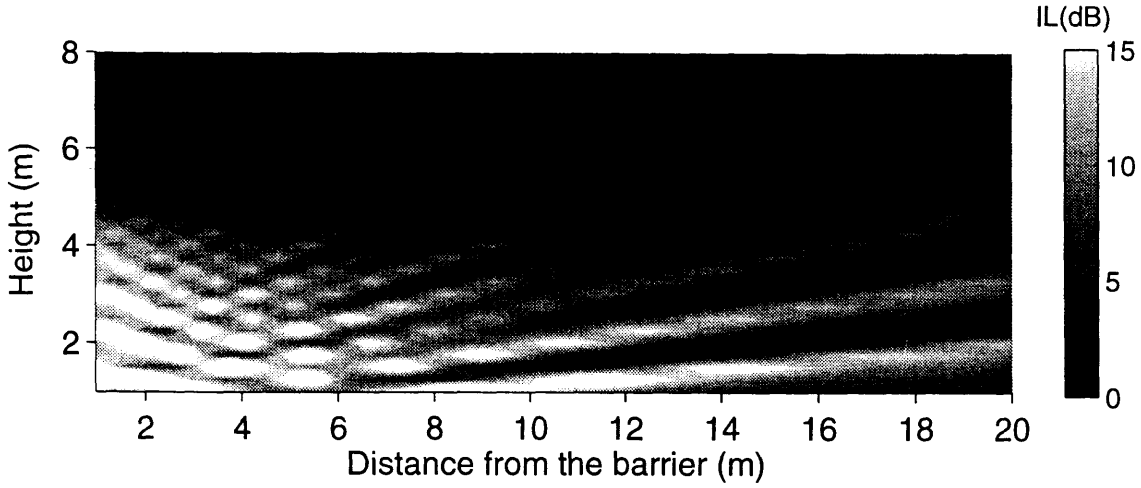
5.2.2 数値計算値と実験値の比較 –防音壁背後の挿入損失–

防音壁として用いる鉄板は，剛壁として，つまり防音壁のアドミタンスは (0, 0) と設定して数値計算をおこなった．

周波数 500 Hz における剛な防音壁壁背後領域の挿入損失を，**Fig. 5.6** に示す．数値計算によると，波長の 1/2 のメッシュ間隔の挿入損失値をもとに描いた分布図は，ピークとディップが激しく出現するものであった．しかし，模型実験では，実寸にして 1 m のメッシュ間隔のため音場の再現精度に問題があり，ピークとディップを正確に再現するのは困難となる．受音領域で音圧レベル分布が比較的単純な場合には問題はないが，例えば，散乱体や地面があり干渉稿が多く生じる場合などには 1m のメッシュ間隔では対応できない．



(a) 実測値

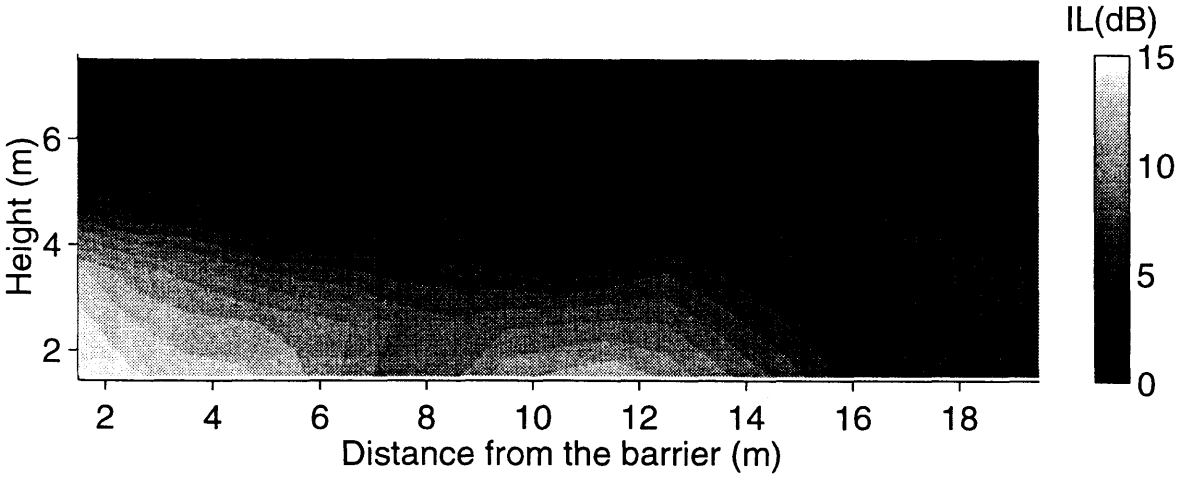


(b) 計算値

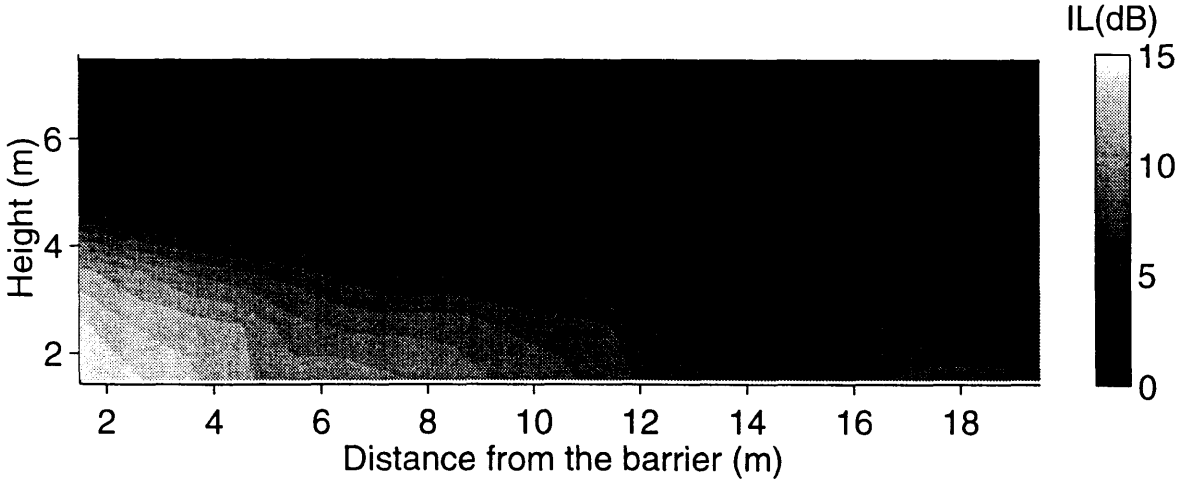
Fig. 5.6 剛壁背後の挿入損失の比較 –500 Hz–.

そこで，模型実験値に関しては，実寸換算で1 m間隔のメッシュ単位格子を構成する4点の音圧レベルをエネルギー平均した値を，その格子の中心点での音圧レベルとした．同様に，数値計算により得られた音圧レベルに対しても，1 mメッシュに含まれる受音点でエネルギー平均することにより，メッシュデータを再作成した．このようにして得た133メッシュに関する挿入損失の分布を **Fig. 5.7** に示す．防音壁から10 mより14 mにかけての地面に近い領域で少し違いが見られるが，実測した受音点が地面に近く干渉による誤差が現れやすい位置であったことが影響しているためと考えられる．

また，音源が見える領域では直接音の寄与が大きく模型実験値と数値計算値の差は小さいと考えられる．そこで，音源が見える領域以外，すなわち防音壁の影の領域で両者を定量的に比較した．影の領域のうち地面に近く誤差が大きな4つのメッシュを除いたエリアに関して，模型実験と



(a) 実測値



(b) 計算値

Fig. 5.7 1 m^2 の単位格子毎にエネルギー平均した剛壁背後の挿入損失 –500 Hz–.

数値計算による挿入損失の差を算出したところ，差の最大値は 2.0 dB，1 dB 以上の差があるのは 17.9%であり，誤差は小さいことが確認できた．

このように，建物内部を拡散音場と考え，外壁を透過した音を境界要素法により求め，それらの寄与をエネルギー加算する手法を用いて，挿入損失が精度良く計算されることがわかった．

5.3 大きさを無視できない指向性音源に対する防音壁の遮音性能について

第3章において，大きさを無視できる指向性音源に関して無指向性音源との比較により挿入損失を検討した．その結果，音源から障壁エッジまでの距離で指向性が安定するときに,「指向性挿入損失差」が「指向性音圧レベル差」により近似されることがわかり，3.4節で記述した簡易算出式を導いた．ただし，音源からエッジをのぞむ角度 θ_{edge} より小さい仰角ほど近似精度は高い傾向にあり，指向性が安定していない仰角は適用範囲外とする結論を導いた．このことから推測すると，大きさを無視できない指向性音源に関しては，指向性が安定しない近接音場にあるため，簡易算出式は適用範囲外，つまり「指向性音圧レベル差」と「指向性挿入損失差」とは数値に関連性が見出せない可能性が高い．しかし確認の意味で，どの程度の関連があるか，また全く関連性がないかを工場建屋透過音を例にあげ検討する．

さらに，工場建屋透過音などの大きさを無視できない音源は，外壁全面を面音源としているため全音源からの寄与を考慮しなくてはならない．また，外壁での音波の回折や，外壁と防音壁間の相互影響，すなわち多重反射も生じる．そのため，防音壁の遮音性能を論じる際に多重反射のことは重要な事項となる．この多重反射の影響についても検討を行う．

大きさの無視できない音源の一例である工場などの建物から放射される騒音に対する防音壁の遮音量は，二次元境界要素法により外壁の総合透過損失と形状がわかれば算出できる．ここでも，建物と防音壁の形状および位置関係はこれまでと同様な **Fig. 5.8** に示すものを想定し数値計算をおこなう．

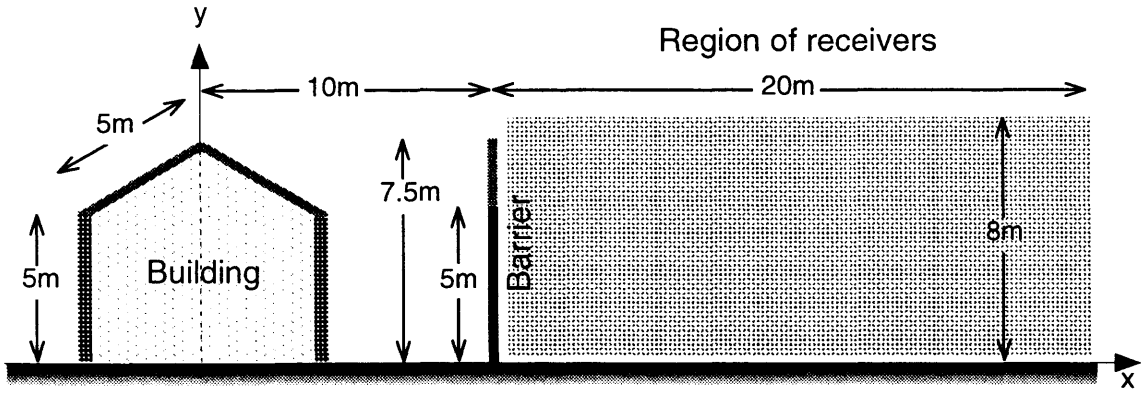
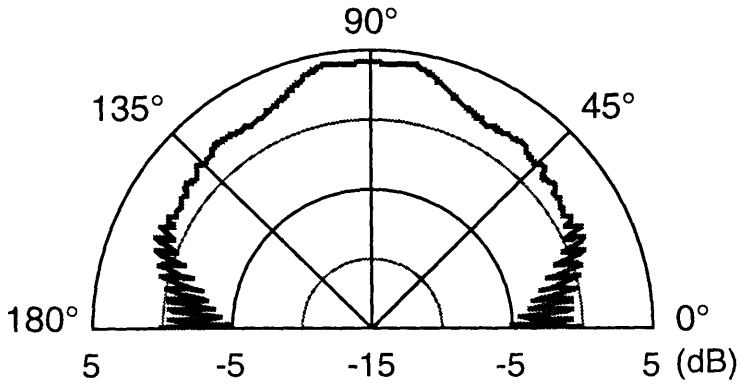


Fig. 5.8 数値計算をおこなう位置関係

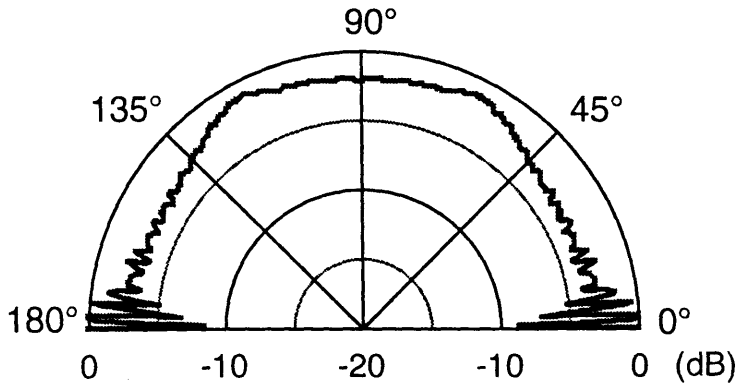
5.3.1 指向性音圧レベル差と指向性挿入損失差との関係について

建物の外壁については，通常の工場建屋の外壁材のパターンを想定し，屋根は 6.5 mm 厚のスレート大波板，側壁は 150mm 厚のコンクリートブロックと 6.5 mm 厚の板ガラス (面積比 4:1) とした．その上で，工場建屋透過音の指向性と防音壁による挿入損失の計算を試みる．なお，工場騒音に関しては，工作機械やコンプレッサ等の騒音発生源の卓越周波数である 500 Hz において数値計算を行った．この場合，総合透過損失は，屋根，側壁でそれぞれ 22.0 dB，28.9 dB と側壁の透過損失が 6.9 dB ほど大きく設定される [36].

このとき，座標 (0, 0) を中心として，エッジまでの距離 $5\sqrt{5}$ m を半径する同心円上の 2 次元音場での指向性を **Fig. 5.9 (a)** に示す．半径 30 m での指向性も，同じく **(b)** に示す．半径 30 m では地面近傍で干渉がみられるものの指向性は弱い．遠方になるほど，回折音波よりも音源からの



(a) 半径:エッジまでの距離 $5\sqrt{5}$ m



(b) 半径:30 m

Fig. 5.9 建屋周辺の指向性 –500 Hz–.

直接の寄与が強くなり，指向性は弱くなる傾向にあることがわかる．しかし，エッジまでの距離 $5\sqrt{5}$ m においては顕著に鉛直方向に強い指向性を示している．エッジまでの距離の半径 $5\sqrt{5}$ m の円周上と半径 30 m の円周上のについて，指向性が安定する，すなわち

$$20\log_{10}|p^F_{dir}(30,\theta)/p^F_{dir}(30,0)| - 20\log_{10}|p^F_{dir}(5\sqrt{5},\theta)/p^F_{dir}(5\sqrt{5},0)| \leq 0.1$$

となる仰角を 0° からエッジ角度 26.5° まで 0.5° 刻みで調べたところ，5° の仰角のみであった．一方，

$$20\log_{10}|p^F_{dir}(30,\theta)/p^F_{dir}(30,0)| - 20\log_{10}|p^F_{dir}(5\sqrt{5},\theta)/p^F_{dir}(5\sqrt{5},0)| > 1.0$$

となる仰角は 40% と多くを占めていた．従って，エッジまでの距離 $5\sqrt{5}$ m では「指向性は安定」していないことが確認できた．

次に，防音壁を設置したときに指向性が遮音効果におよぼす影響をみるために，防音壁の音源側は完全吸音性と設定して数値計算をおこなう．これは，防音壁と建物による多重反射が発生する状況下では，挿入損失に対する指向性による影響と多重反射による影響を分離することは困難となるためである．**Fig. 5.10** に，防音壁の音源側を完全吸音としたときの防音壁背後の挿入損失を示す．なお，分布図中の破線は建物が見える境界線であり，その左下の領域は建物透過音の直接波が到達しない影の領域である．

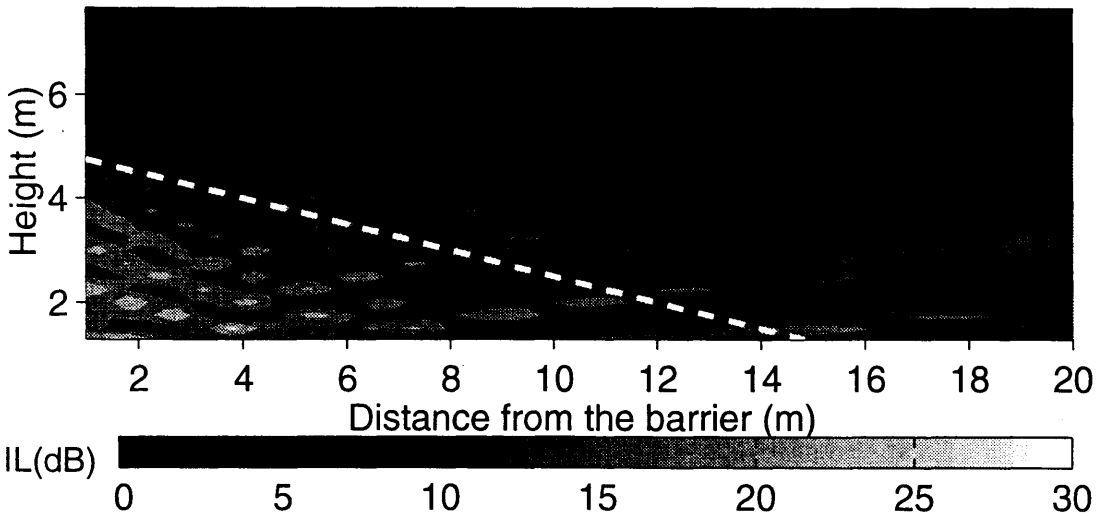
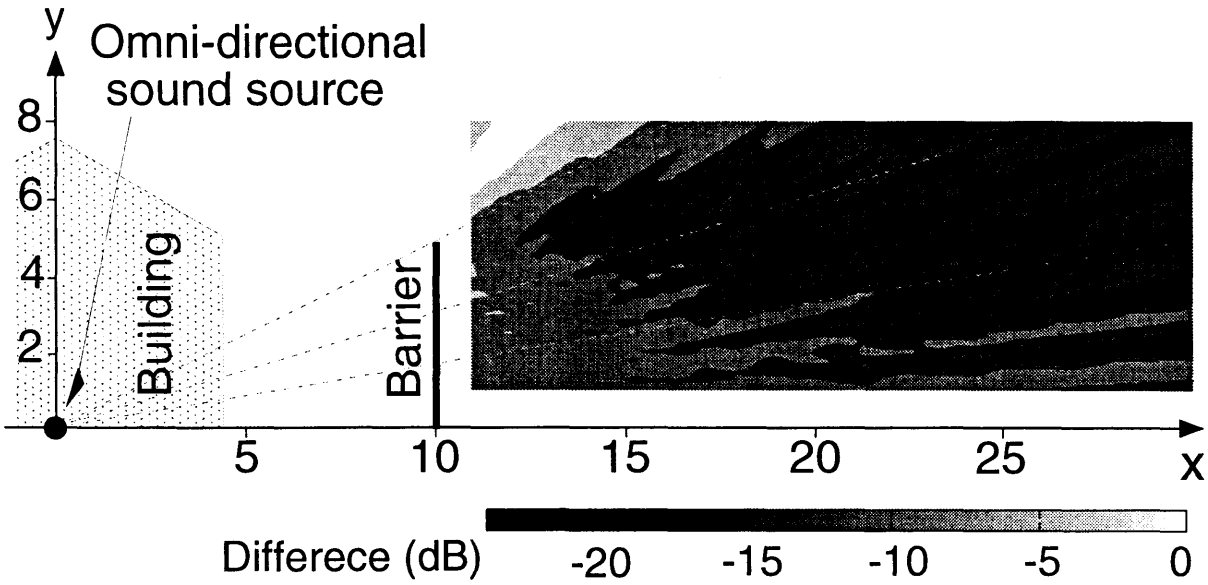


Fig. 5.10 音源側が完全吸音な防音壁による挿入損失

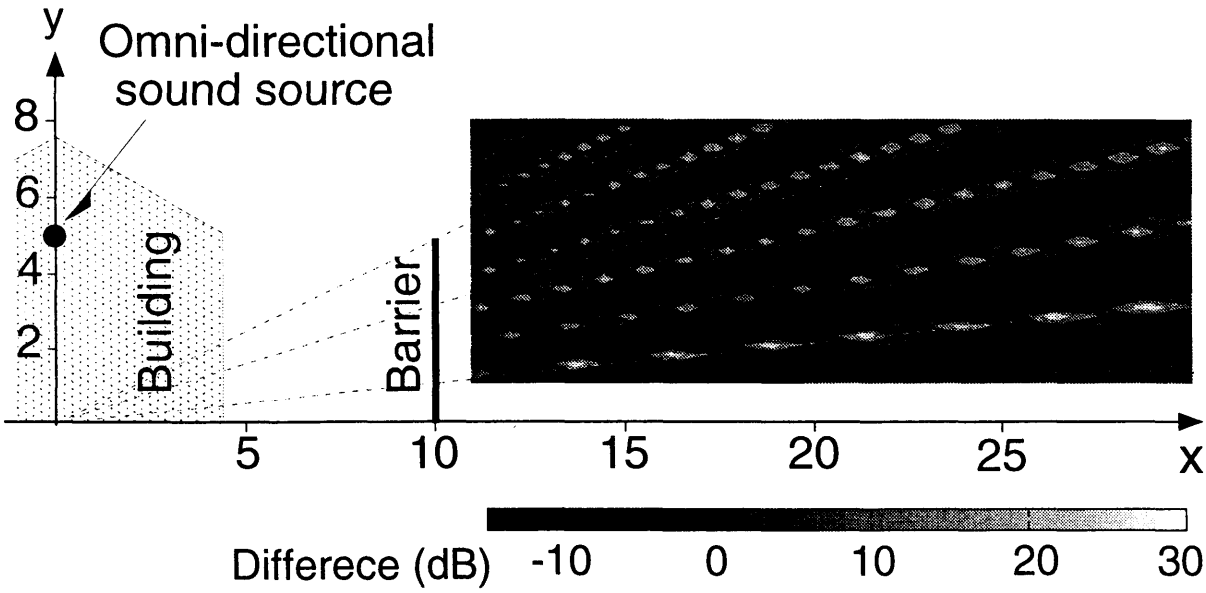
ここで，指向性音源による挿入損失と無指向性音源による挿入損失との比較を行う．音源位置は，座標 (0, 0) と (0, 5) の 2 通り設定する．前者では無指向性音源を地面に置くこととなる．後者は 4.5 節において，幾何学的回折理論による検討から得た仮想的な中心に無指向性音源を置くこととなる．**Fig. 5.11** に，指向性挿入損失差，つまり **Fig. 5.10** に示す挿入損失から無指向性音源による挿入損失を差し引いたものを示す．

まず,「指向性挿入損失差」という観点からは，無指向性音源を (0, 0) に位置させたときには，同一仰角に対しても「指向性挿入損失差」の距離減衰らしきものが見られ，影の領域におけるその分布にも規則性がない．(0, 5) に位置させたときは，指向性挿入損失差の仰角依存性が受音領域全体に対して明確に現れているものの，**Fig. 5.9 (a)** に示される指向性との関連は見いだせない．そのため，大きさを無視できない音源の場合の指向性挿入損失差を，簡便に評価することは困難である．3 点音源の検討の際の分布は，仰角毎に「指向性挿入損失差」は一定となるような分布であったが，**Fig. 5.11** からはそのような傾向は見出せない．しかしながら，図中に補助線として座標 (0, 0) から引いた点線は,「指向性挿入損失差」の分布図の縞と良い一致を示している．従って,「指向性挿入損失差」と仰角はやはり何らかの因果関係がある可能性は捨てきないため，課題として今後更に検討を進めていきたい．

また，音源を (0, 0) に位置させたものでは，全領域にわたって過大評価となっている．(0, 5) に位置させたものでは，仰角の増加に伴い過大・過小評価が繰り返されている．従来から，大きさを無視できない音源の挿入損失を，無指向性音源により評価することには無理があると言われてきたが，本計算モデルを用いた計算により，その誤差の大きさが確認できた．



(a) 無指向性音源位置：(0, 0)



(b) 無指向性音源位置：(0, 5)

Fig. 5.11 指向性挿入損失差

5.3.2 大きさを無視できない音源と防音壁間で生じる多重反射の影響について

大きさを無視できる音源においては，音源から放射された音波が防音壁で反射して音源のボディで再び反射を繰り返すという多重反射は，音源ボディが十分に小さいために考慮する必要はない．しかし，大きさを無視できない音源のボディと防音壁間では多重反射が生じるため，防音壁の挿入損失を議論するに当たって多重反射による影響をも考慮しなければならない．

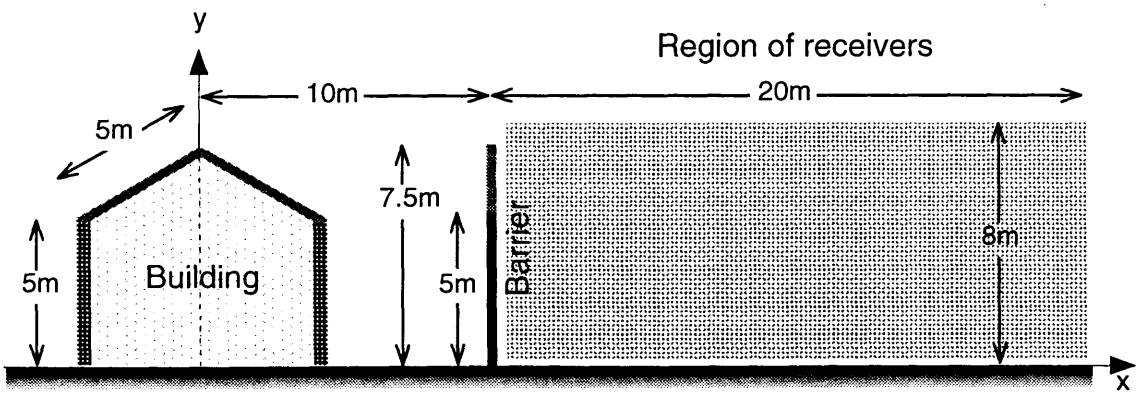
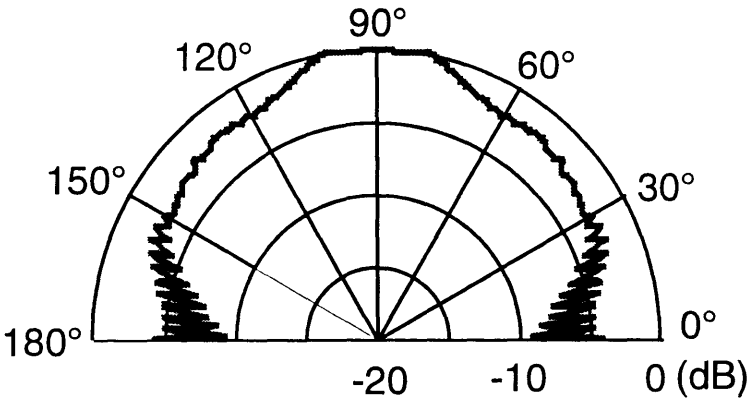


Fig. 5.12 数値計算をおこなう位置関係

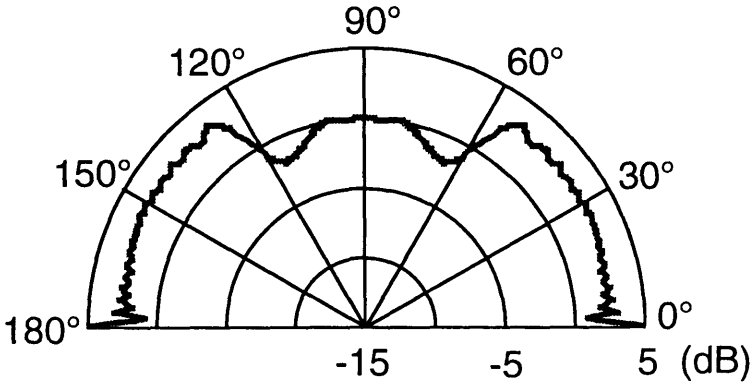
ここでも工場透過音を例にあげ，多重反射の影響について考察する．検討に用いる工場形状，防音壁等は，これまでと同様で **Fig. 5.12** とする．屋根と側壁の透過損失としては，**Table 5.1** に示す 2 つのケースを設定する．case 1 は，屋根を 6.5 mm 厚のスレート大波板，側壁を 150 mm 厚のコンクリートブロックと 6.5 mm 厚の板ガラス (面積比は 4:1) からなるものを，また case 2 は，側壁はそのままで屋根を 6 mm 厚の波形スレート積層材にコンクリート充填したものを想定している．この 2 つのケースを比較することにより，指向特性による多重反射の影響の違いがわかる．

Table 5.1 数値計算に用いる透過損失パターン –500 Hz–

		case1	case2
TL (dB)	for roof	22.0	33.0
	for side wall	28.9	28.9



(a) case 1



(b) case 2

Fig. 5.13 (0, 0) を中心とした半径 $5\sqrt{5}$ 半円上における指向性 –500 Hz–

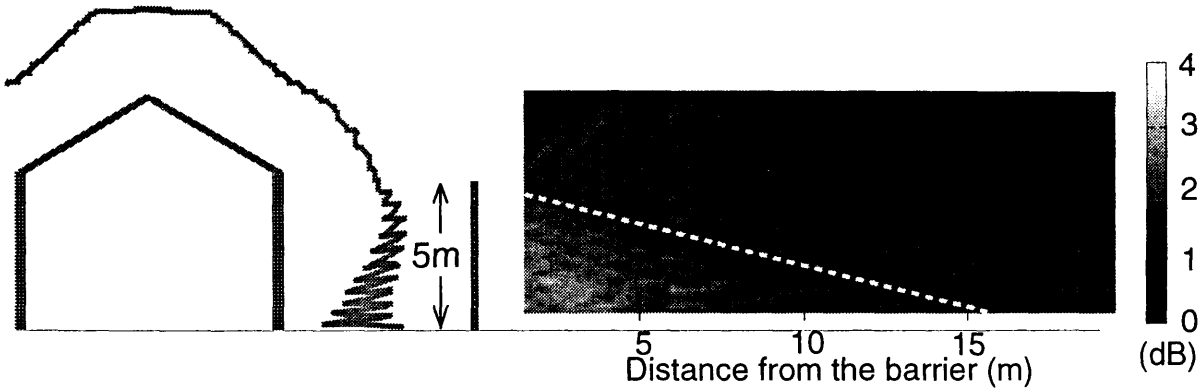
case 1 と case 2 に関して，**Fig. 5.13** に防音壁を設置しないときに，座標 (0, 0) を中心としてエッジまでの距離 $5\sqrt{5}$ m を半径とする同心円上での指向を示す．case 1 では屋根からの強い音響放射により，鉛直方向に強い指向性を示し，case 2 では屋根に比べて音響放射の強い側壁の効果により，50° 付近まで音圧レベルがほぼ一定となる指向性を示している．

次に，このような指向特性を示す大きさのある音源に対して，防音壁との間で生じる多重反射による遮音効果への影響を検討する．工場建屋中心から 10m の位置に厚さ 0.1 m，高さに関しては 5 m と 7.5 m の直壁を置き，剛な場合と音源側完全吸音な場合の計 4 通りについて，500 Hz の周波数に関して受音領域における音圧レベルを計算する．そこで，多重反射による遮音効果への影響を次式で評価する．

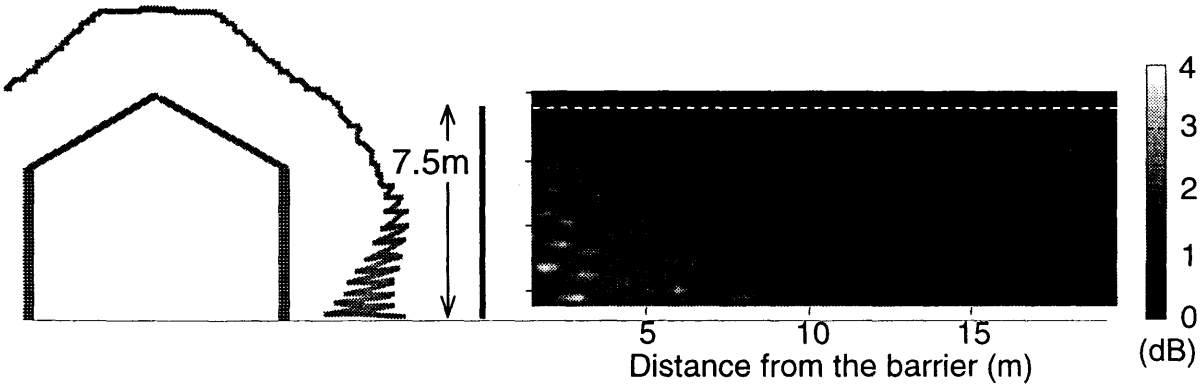
(多重反射による音圧レベルの上昇値)

= (剛な防音壁による音圧レベル) − (音源側完全吸音な防音壁による音圧レベル)

(5.7)



(a) 防音壁高さ: 5 m

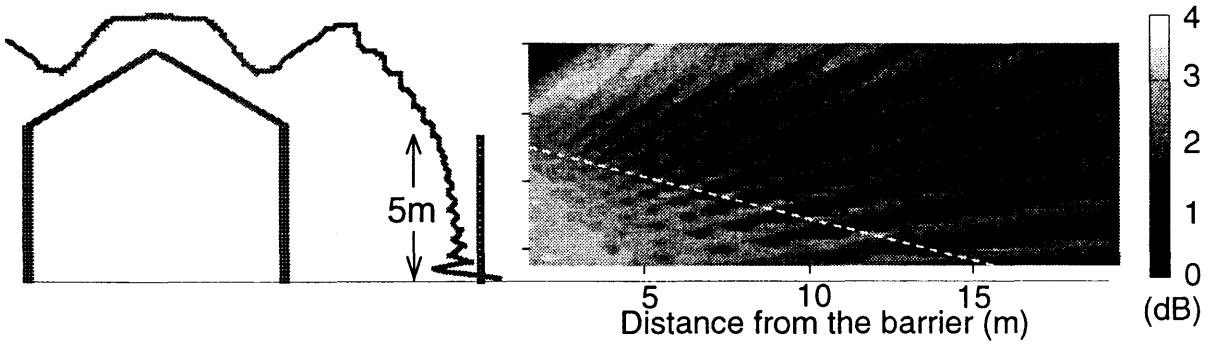


(b) 防音壁高さ: 7.5 m

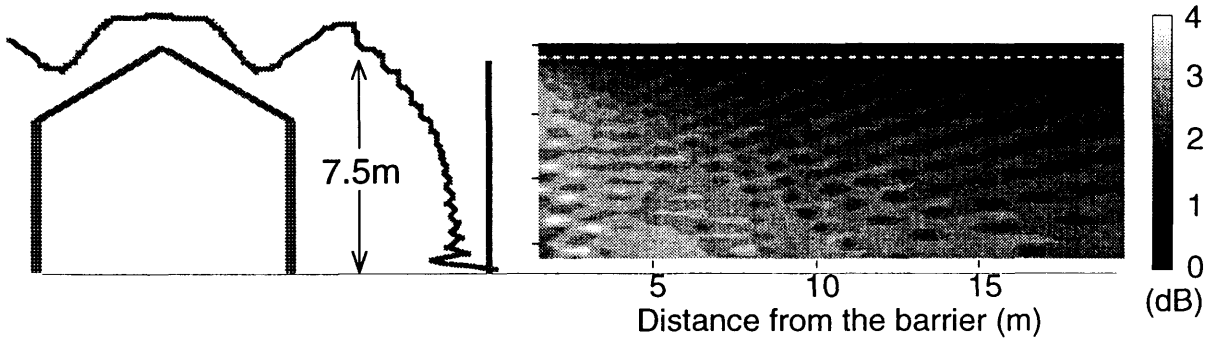
Fig. 5.14 case 1 の場合の多重反射による音圧レベル上昇値の分布 –500 Hz–

防音壁背後の領域において，(5.7) 式により示される多重反射による音圧レベルの上昇値を算出した.，case 1 と case 2 について，それぞれ **Fig. 5.14**，**Fig. 5.15** に示す．なお，分布図中の点線は建物が見える境界線である．

まず，case 1 に関して考察する．防音壁が高さ 5 m のときは，直接波が到達しない影の領域の中でも防音壁の直近で回折角が大きな領域において 3 dB から 4 dB 程度の多重反射による音圧レベルの上昇が見られるが，その他の領域では音圧レベルの上昇は小さく，音響放射の強い屋根からの寄与が大きいことがうかがえる．一方，防音壁が高さ 7.5 m のときは，影の領域でも多重反射による音圧レベルの上昇は小さい．これは，多重反射音線の多くが，スロープのある屋根面での反射により進行方向が防音壁エッジよりも上方となることにより，多重反射音波の防音壁背後の領域における寄与が，屋根からの透過音に比べて小さくなるためと考えられる．従って，case 1



(a) 防音壁高さ: 5 m



(b) 防音壁高さ: 7.5 m

Fig. 5.15 case 2 の場合の多重反射による音圧レベル上昇値の分布 –500 Hz–

において防音壁を吸音性とすることによる遮音効果の向上は小さく，剛壁であっても高さをより高くするほうが，大きな遮音効果を得るには有効となる．

次に，case 2 に関しては，音響放射の強い側壁と並立して防音壁があるため，影の領域の広い範囲にわたって，多重反射による音圧レベルの上昇が見られる．また，防音壁を 5 m から 7.5 m へと高くすることにより，多重反射の影響範囲が広がっている．つまり，case 2 では，屋根からの透過音の寄与よりも多重反射音波による寄与が大きいため，壁面を吸音性にすることにより音圧レベルが効果的に減少すると考えられる．

以上のように，本章で提案した計算モデルの計算により工場建屋と防音壁間で生じる多重反射の影響も評価できる．側壁よりも屋根の透過損失が小さく、鉛直方向の指向性が強くなる場合には，建屋と防音壁間で生じる多重反射の影響による防音壁背後での音圧レベルの上昇は小さいことがわかった．