

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3章 大きさを無視できる指向性音源に 対する防音壁挿入損失の検討

点音源列を用いることによって指向性を持つ音源が表現可能となる。その点音源列の中でも、3つの無指向性点音源を同一直線上に配置し、両端の2音源とその中間に位置する音源が逆相となる3点音源を用いると、音源間距離と音源体積流の振幅比の取り方次第では、実在する指向性音源との対応のよい指向性特性となることを述べた。そこで、3点音源を利用することにより指向性音源に対する障壁による遮音効果を評価し、無指向性音源による挿入損失との比較を行う。検討に当たっては、まず半無限障壁による回折場の計算手法を解説した後、地面が存在しない場合について指向性音源に対する挿入損失の傾向を探る。そして、地面上の障壁に対しても同様に挿入損失の解析を行い、指向性音源に対する実用的な遮音効果の算出手法を提案する。

3.1 半無限障壁による回折場

回折音場の解は1896年にSommerfeld[23]により最初の厳密解が得られて以来, Carslaw[24], Macdonald[25]により様々な形で解が与えられた. これらは物理現象を解析的に解き厳密な数式表現がなされており, 数値計算の際に多大な計算時間を要するなどの難点がある. ここでは, 点音源に対する無限に薄い半無限障壁による回折場の計算方法のなかでも, 数値計算が比較的容易であるClemmowら[26, 27]により示された方法を紹介する.

Fig. 3.1に示す音場を仮定し, $\xi = 0, \eta \leq 0$ により障壁を表す. 半無限障壁のエッジ上に原点を持つ円筒座標系において, 音源を $r_0(r_0, \Theta_0, z_0)$ に, 受信点を $r(r, \Theta, z)$ に置く.

音源が時間項を省略して(3.1)式で表される球面波を放射しているものとする.

$$\phi_i = \frac{e^{jkR}}{kR} \quad (3.1)$$

このとき受信点 $r(r, \Theta, z)$ における音圧は,

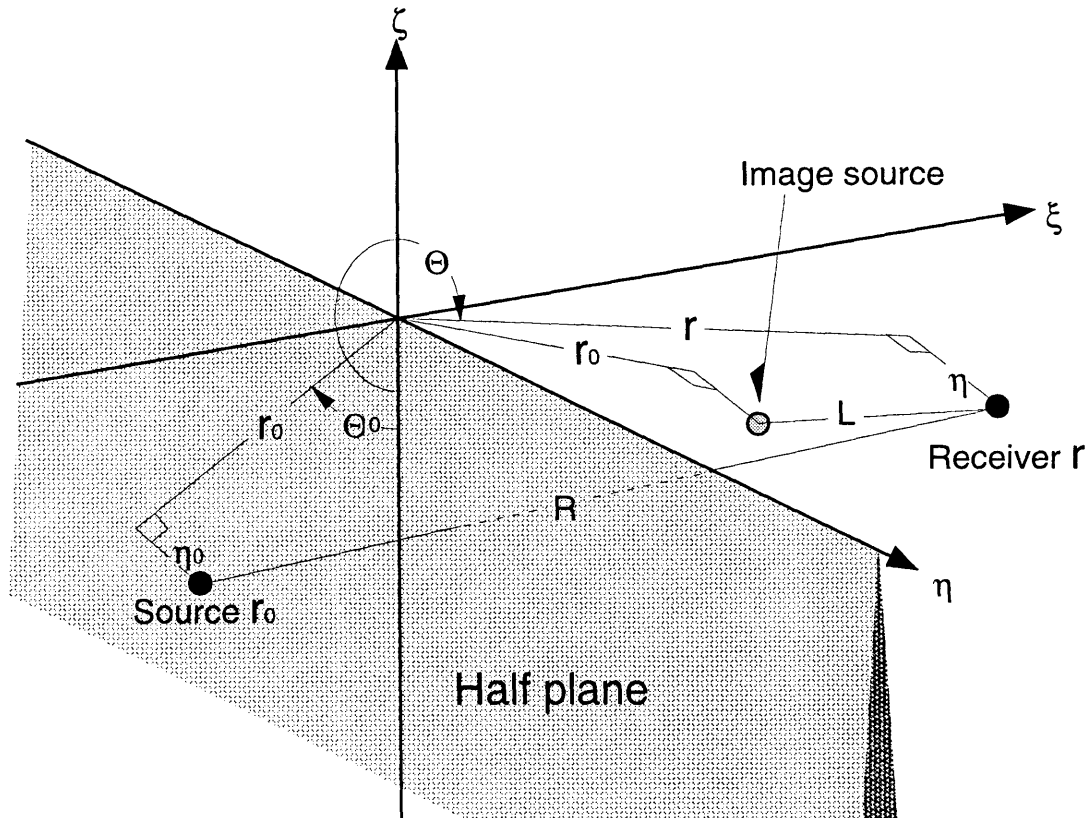


Fig. 3.1 半無限障壁による回折場の円筒座標表示による位置関係

$$p(\mathbf{r}) = j \int_{-m}^{\infty} \frac{H_1^1(\mu^2 + kR)}{\mu^2 + 2kR} d\mu + j \int_{-m'}^{\infty} \frac{H_1^1(\mu^2 + kL)}{\mu^2 + 2kL} d\mu \quad (3.2)$$

$$m = 2\sqrt{\frac{krr_0}{R_1 + R}} \cos \frac{1}{2}(\Theta - \Theta_0)$$

$$m' = 2\sqrt{\frac{krr_0}{R_1 + L}} \cos \frac{1}{2}(\Theta + \Theta_0)$$

$$R_1 = \sqrt{(r + R_0)^2 + (z - z_0)^2}$$

により求めることができる。しかし、(3.2)式によると $[-m, \infty]$ および $[-m', \infty]$ の範囲の積分計算において多大な計算負荷を要するため、まだ実用的ではない。そこで、回折場の音圧を入射音線と反射音線の総和である幾何学的音波による寄与 p^g と回折音線の総和による寄与 p^d により分け、 p^d を漸近的に近似する次式が与えられている。

$$p(\mathbf{r}) = p^g(\mathbf{r}) + p^d(\mathbf{r}) \quad (3.3)$$

$$p^g(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{e^{jkR}}{kR} + \frac{e^{jL}}{kL} & \text{for } 0 \leq \Theta \leq \pi - \Theta_0 \\ \frac{e^{jkR}}{kR} & \text{for } \pi - \Theta_0 < \Theta \leq \pi + \Theta_0 \\ 0 & \text{for } \pi + \Theta_0 < \Theta \leq 2\pi \end{cases}$$

$$p^d(\mathbf{r}) = - \sqrt{\frac{2}{\pi k R_1}} e^{-j\frac{4}{\pi}} \left\{ \operatorname{sgn}\left(\cos \frac{\Theta_0 - \Theta}{2}\right) \frac{e^{jkR}}{\sqrt{k(R_1 + R)}} F[k(R_1 - R)] \right. \\ \left. + \operatorname{sgn}\left(\cos \frac{\Theta_0 + \Theta}{2}\right) \frac{e^{jL}}{\sqrt{k(R_1 + L)}} F[k(R_1 - L)] \right\}$$

$$F[\tau] = \int_{\tau}^{\infty} \exp(j\mu^2)$$

(3.3)式では積分計算が Fresnel 積分の形に変換されており、Fresnel 積分の関数プログラムを用いることにより高速に計算できる。そのため、非常に効率的である。また、尾本 [28] による (3.2)式と (3.3)式の比較によれば、両者の差は kR にして 8.4 程度であれば 0.1 dB 以内に収まり、実用上ほぼ等しいとみなせるとが示されている。

そこで、3点音源を構成する3つの音源それぞれの寄与を Clemmow の漸近解 (3.3)式を用いて求める。その上で、3つの音源からの寄与を加算することにより、3点音源による半無限障壁による音圧を算出することができる。

3.2 半無限障壁に対する指向性の影響

Clemmow の漸近解による計算値を比較することにより，地面の存在しない剛な半無限障壁による挿入損失の検討を，1000 Hz の周波数に関して行う．周波数を限定するものの，遠方音場での検討をおこなうため，これから展開する議論は任意の周波数においても成り立つものでもある．

Fig. 3.2 に示すようにデカルト座標系において，半無限障壁は z 軸に沿ってそのエッジが $y = 2$ にあるように置く．また，音源は原点 O から x 方向に -2 の位置とし，受信領域と同様に $z = 0$ 面に置く．従って，1000 Hz ではエッジまでの距離 $2\sqrt{2}m$ で指向性は安定している．指向性音源としては，2.2 節で示した3点音源のうち最も現状に即していると判断できた Type I，すなわち音源間の間隔を半波長 $\lambda/2$ ，中心に位置する音源の振幅を4倍と設定したものをを用いる．そして， x 軸上に3つの点音源を並べて水平方向に強い指向性を持つ場合と， y 軸上に3つの点音源を並べて鉛直方向に強い指向性を持つ場合の2通りについて計算を行う．

ここで指向性音源に対する挿入損失の傾向分析を容易にする目的で，比較指標の定義を行う．Fig. 3.3 に示しているように，音源を中心とする極座標を考える．音源から受信点をのぞむ角度を仰角 θ ，音源からエッジをのぞむ角度を θ_{edge} と定義する．音源から受信点およびエッジまでの距離をそれぞれ R ， r_{edge} とおくと，受信点は (R, θ) ，エッジは $(r_{edge}, \theta_{edge})$ ，受信点と等距離にあるエッジ方向の点は (R, θ_{edge}) ，またエッジと等距離にある受信点方向の点は (r_{edge}, θ) となる．

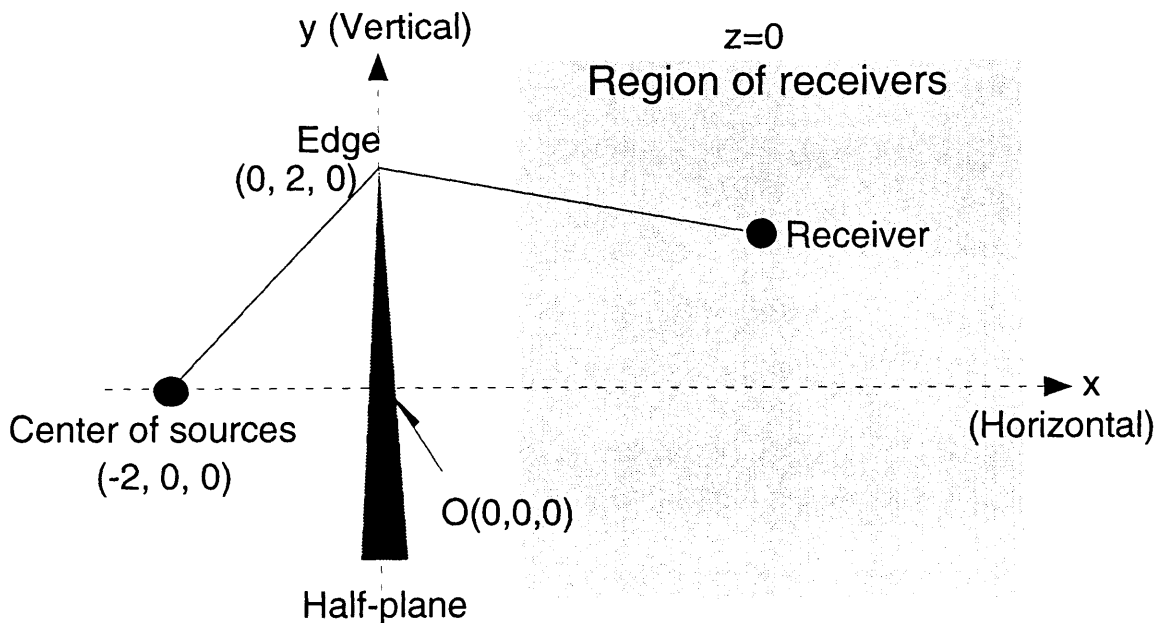


Fig. 3.2 音源，受信領域および半無限障壁位置関係 -デカルト座標系-

更に、指向性音源による回折場の音圧、自由音場での音圧をそれぞれ $p_{dir}^D(\cdot)$, $p_{dir}^F(\cdot)$ と表記することとする。同様に、無指向性音源に対しても、下添字で *omni* と記述して区別することとする。指向性音源による挿入損失 $IL_{dir}(R, \theta)$ と無指向性音源による挿入損失 $IL_{omni}(R, \theta)$ は次式のように表せる。

$$IL_{dir}(R, \theta) = -20 \log_{10} \frac{|p_{dir}^D(R, \theta)|}{|p_{dir}^F(R, \theta)|} \quad (3.4)$$

$$IL_{omni}(R, \theta) = -20 \log_{10} \frac{|p_{omni}^D(R, \theta)|}{|p_{omni}^F(R, \theta)|} \quad (3.5)$$

指向性音源による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値を、「指向性挿入損失差」と呼ぶ。更に、障壁が無いときに、音源を中心としたエッジまでの距離の同心円上における、受音点方向とエッジ方向の地点での音圧レベル差を「指向性音圧レベル差」と呼ぶこととする。記号を用いて表すと、

$$(\text{指向性挿入損失差}) = IL_{dir}(R, \theta) - IL_{omni}(R, \theta) \quad (3.6)$$

$$(\text{指向性音圧レベル差}) = 20 \log_{10} \frac{|p_{dir}^F(r_{edge}, \theta)|}{|p_{dir}^F(r_{edge}, \theta_{edge})|} \quad (3.7)$$

となる。指向性音圧レベル差に関しては、「全方位で指向性が安定」* しているときには、音源からエッジまでの距離 r_{edge} に依らず仰角 θ にのみ依存することとなる。

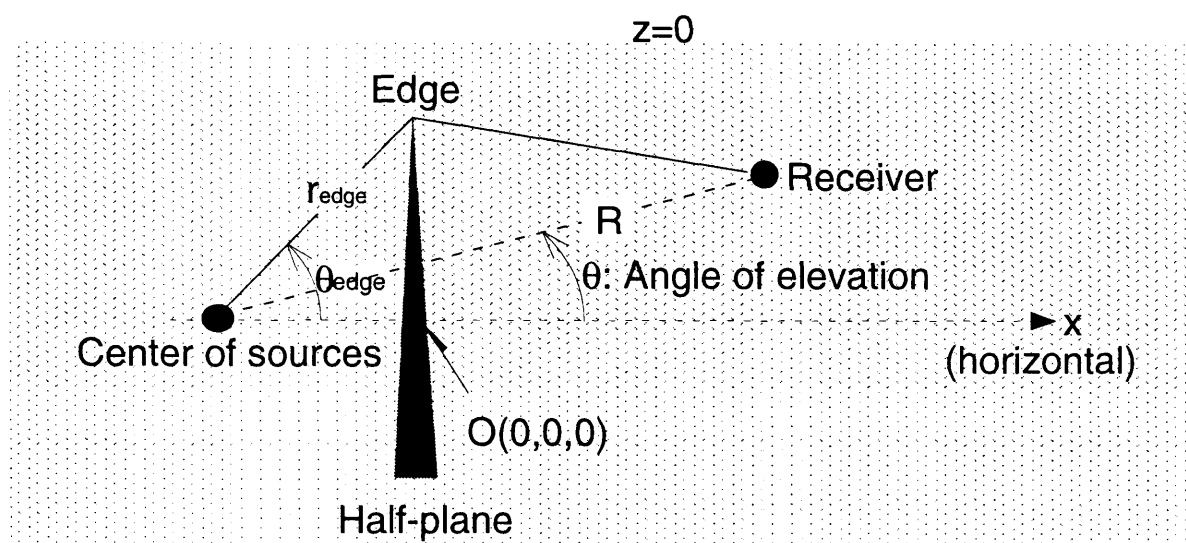


Fig. 3.3 音源、受音領域および半無限障壁位置関係 -音源を中心とする極座標系-

* 全仰角で $20 \log_{10} |p_{dir}^F(\infty, \theta)| / |p_{dir}^F(\infty, 0)| - 20 \log_{10} |p_{dir}^F(R, \theta)| / |p_{dir}^F(R, 0)| \leq 0.1$ が成立.

以上のような計算手法，位置関係のもと，3点音源により生成した指向性音源と無指向性音源に対する挿入損失の比較を行う。

まず始めに，1000 Hzにおける Fresnel 数と挿入損失の関係を Fig. 3.4 に示す。Fresnel 数が20を超える回折角が大きな場合を除き，(a)からは水平方向に強い指向性の場合に強い音響放射の向きに障壁を置いたことに対応して，無指向性音源のときよりも挿入損失は向上している。一方，(b)からは鉛直方向に強い指向性では傾向が逆となり，無指向性音源のときよりも挿入損失は低下していることがわかる。これは，二次音源としてのエッジからのポテンシャルが障壁がないときの直接波によるポテンシャルよりも増加することに対応している。

(a)，(b)とも N が20より大きくなるあたりで指向性による影響が消滅するのは，回折角が非常に大きくなり2次音源である障壁エッジ以外からの音波の寄与が極めて小さくなるためと考えられる。しかし，各指向性に対して Fresnel 数と挿入損失との対応を探っても得られる情報量が少なく，指向性音源に対する挿入損失に関しての意味のある傾向が見出せない。

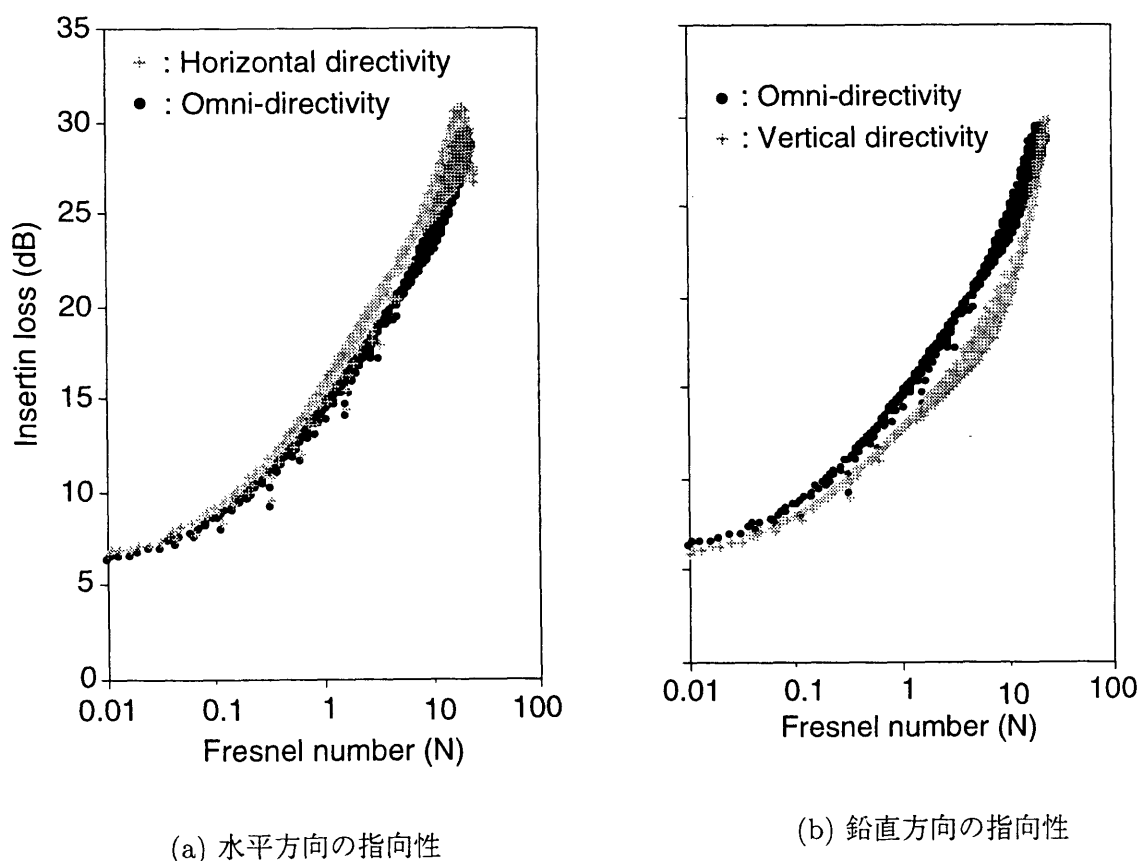


Fig. 3.4 フレネル数と挿入損失の関係

そこで、(3.6)式により定義される、指向性音源による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値である「指向性挿入損失差」に関して、障壁背後領域の分布図を描いてみることにする。Fig. 3.5に示すように「指向性挿入損失差」は、水平方向に強い指向性の場合においても鉛直方向に強い指向性の場合においても、音源高さ面 $y = 0$ に対して対称的であり仰角 θ に依存する分布となっている。また、その中心は音源位置という特徴が明確に現れている。

水平方向に強い指向性の場合には、仰角が $\theta = 0^\circ$ のとき最大となり 2 dB 近い数値である。しかし、仰角が大きくなるにつれ「指向性挿入損失差」は減少し、エッジ角度 $\theta_{edge} = 45^\circ$ より大きな仰角において「指向性挿入損失差」は 0 dB 程度となっている。

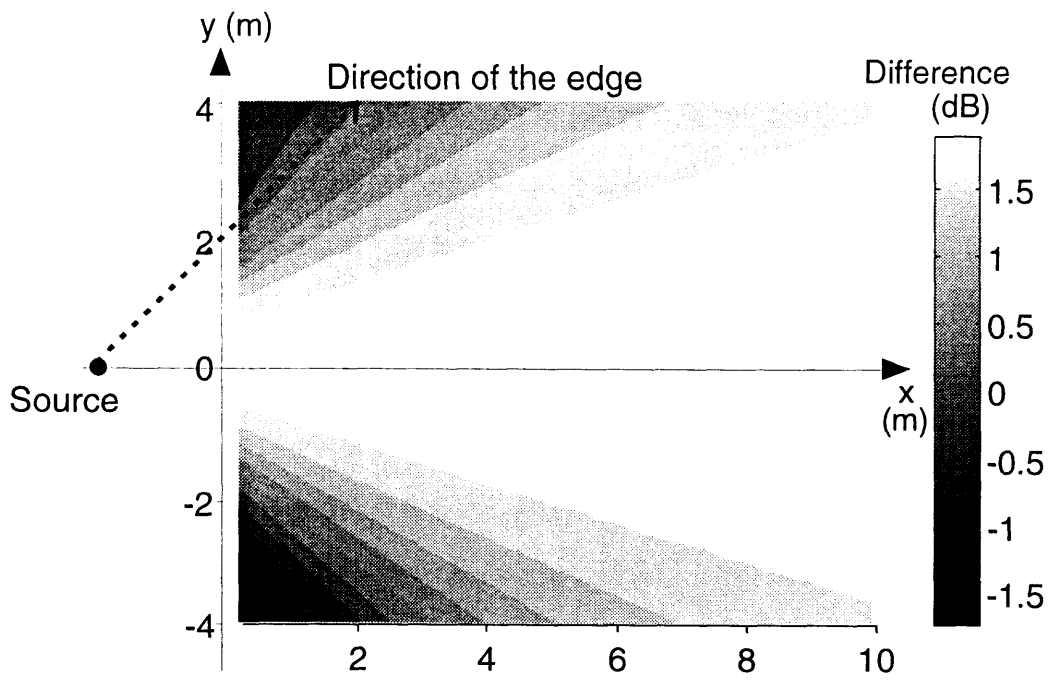
鉛直方向に強い指向性の場合には、水平方向の場合と傾向が逆となり、仰角が $\theta = 0^\circ$ のとき -3.5 dB 近い数値で最小値となり、仰角が大きくなるにつれ「指向性挿入損失差」は増加している。

このように「指向性挿入損失差」は音源から受音点をのぞむ角度を仰角 θ に依存している。障壁エッジからの回折現象のため、回折角度に影響すると予想していたが、回折角度には全く依存していない。この理由としては、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に含まれる回折角度に関する寄与が両者を差し引くことにより相殺された、ということが考えられる。

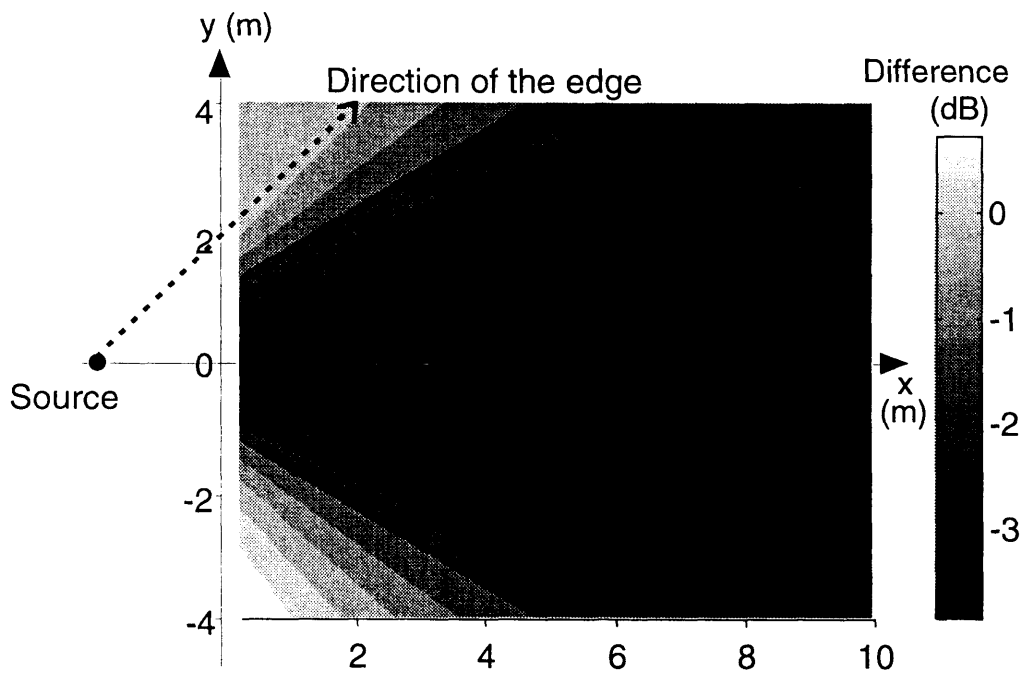
このような音源から受音点をのぞむ仰角に対する依存性を詳細に検討するため、仰角毎に「指向性挿入損失差」を描くこととする。

水平方向に強い指向性の場合に、仰角を固定して受音点を x 座標にして 0.2 m から 20 m まで移動させ、横軸を受音点の x 座標、縦軸を「指向性挿入損失差」としたものを Fig. 3.6 に示す。なお、点線は (3.5) 式により定義される「指向性音圧レベル差」である。図から、仰角が等しければ音源からの距離が変わっても「指向性挿入損失差」の変動は小さいことが読みとれる。また、仰角が負値のとき (Fig. 3.6 (a)) には「指向性音圧レベル差」と「指向性挿入損失差」の一致精度は極めて高い。一方、仰角が正值のとき (Fig. 3.6 (b)) は仰角が小さいほど両者は良く一致しており、仰角 θ が大きくなりエッジ角度 45° を超えると両者の差は大きくなっている。

更に、Fig. 3.7 には鉛直方向に強い指向性の場合に、仰角毎に「指向性挿入損失差」の距離変化に対する振る舞いを示している。仰角が負値のときには「指向性音圧レベル差」と「指向性挿入損失差」はほぼ一致し、仰角が正值のときには仰角が小さいほど両者は良く一致しているというように、水平方向の指向性の場合と同じ傾向がつかめる。

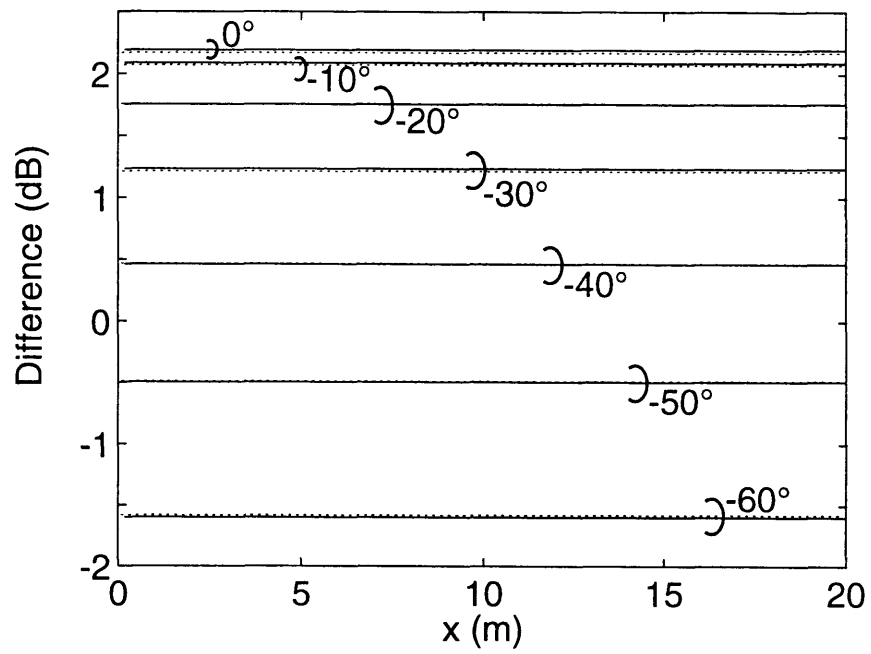


(a) 水平方向の指向性

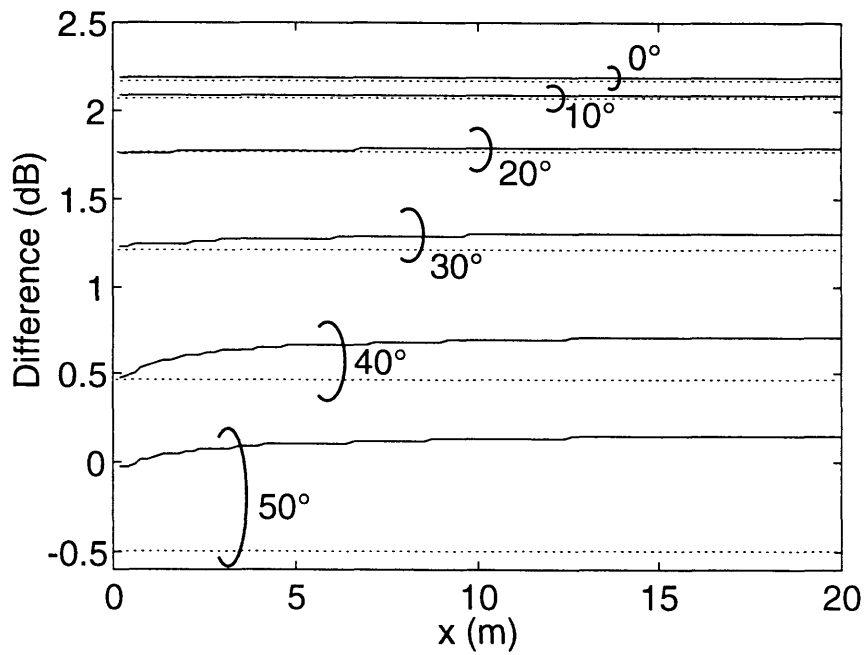


(b) 鉛直方向の指向性

Fig. 3.5 指向性挿入損失差の分布



(a) 仰角 $\theta \leq 0$



(b) 仰角 $\theta \geq 0$

Fig. 3.6 仰角別に描いた指向性挿入損失差の距離に対する変動 -水平方向の指向性-
(実線: 指向性挿入損失差, 点線: 指向性音圧レベル差)

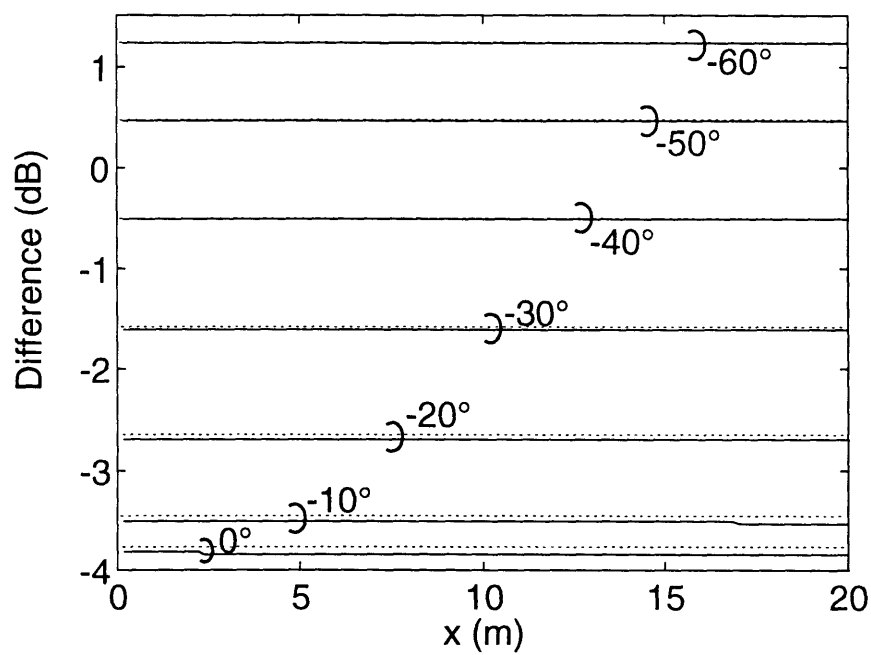
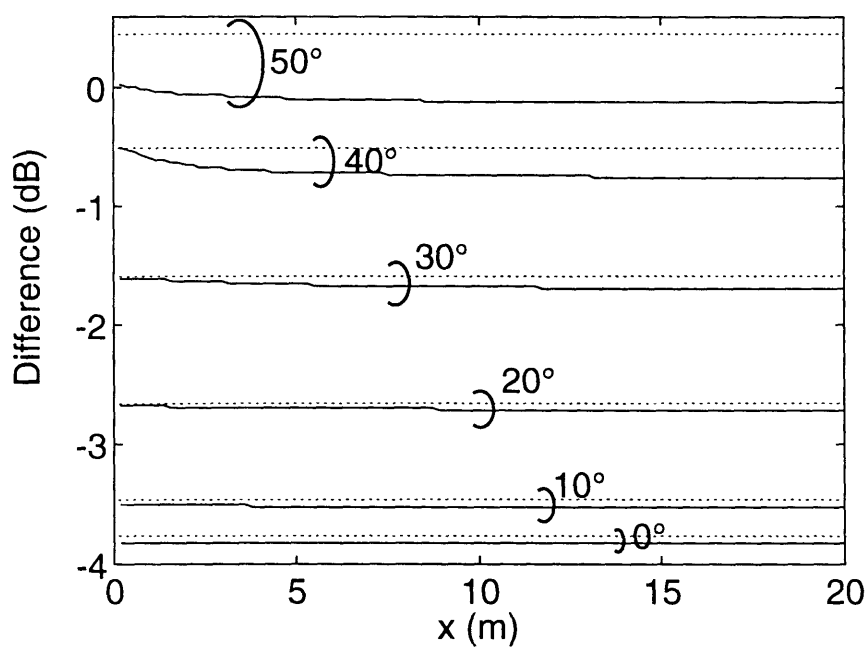
(a) 仰角 $\theta \leq 0$ (b) 仰角 $\theta \geq 0$

Fig. 3.7 仰角別に描いた指向性挿入損失差の距離に対する変動 -鉛直方向の指向性-.

(実線: 指向性挿入損失差, 点線: 指向性音圧レベル差)

このメカニズムを「指向性挿入損失差」の定義にもとって検討した。「指向性挿入損失差」は、

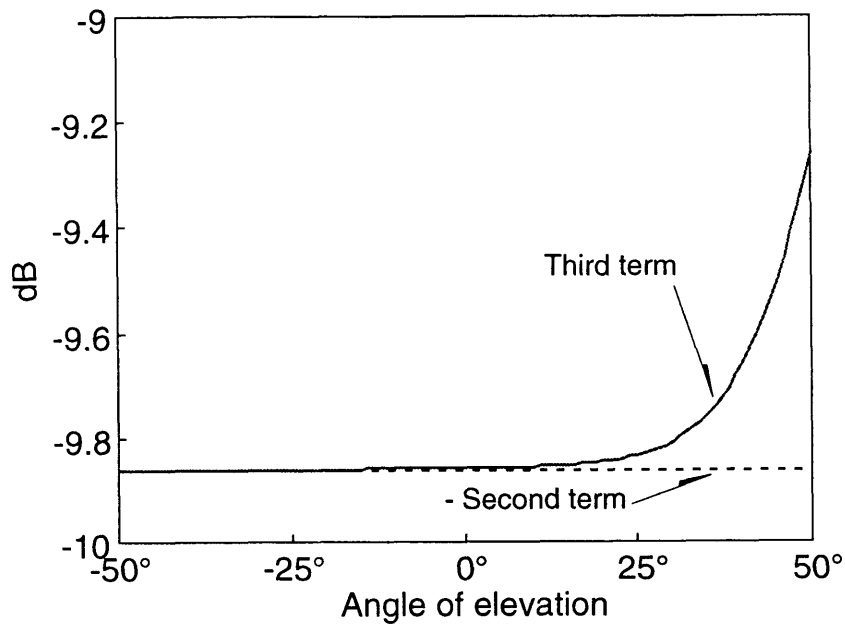
$$\begin{aligned}
& IL_{dir}(R, \theta) - IL_{omni}(R, \theta) \\
&= 20 \log_{10} \frac{|p_{dir}^F(R, \theta)| \cdot |p_{omni}^D(R, \theta)|}{|p_{omni}^F(R, \theta)| \cdot |p_{dir}^D(R, \theta)|} \\
&= 20 \log_{10} \frac{|p_{dir}^F(R, \theta)| \cdot |p_{dir}^F(R, \theta_{edge})| \cdot |p_{omni}^D(R, \theta)|}{|p_{omni}^F(R, \theta)| \cdot |p_{dir}^F(R, \theta_{edge})| \cdot |p_{dir}^D(R, \theta)|} \\
&= 20 \log_{10} \left(\frac{|p_{dir}^F(R, \theta)|}{|p_{dir}^F(R, \theta_{edge})|} \cdot \frac{|p_{dir}^F(R, \theta_{edge})|}{|p_{omni}^F(R, \theta)|} \cdot \frac{|p_{omni}^D(R, \theta)|}{|p_{dir}^D(R, \theta)|} \right) \\
&= 20 \log_{10} \frac{|p_{dir}^F(R, \theta)|}{|p_{dir}^F(R, \theta_{edge})|} + 20 \log_{10} \frac{|p_{dir}^F(R, \theta_{edge})|}{|p_{omni}^F(R, \theta_{edge})|} + 20 \log_{10} \frac{|p_{omni}^D(R, \theta)|}{|p_{dir}^D(R, \theta)|} \quad (3.8)
\end{aligned}$$

と展開される。ここで、エッジまでの距離 r_{edge} で指向性が安定する場合には、第1項において R を r_{edge} で置き換えることにより次式が成立する。

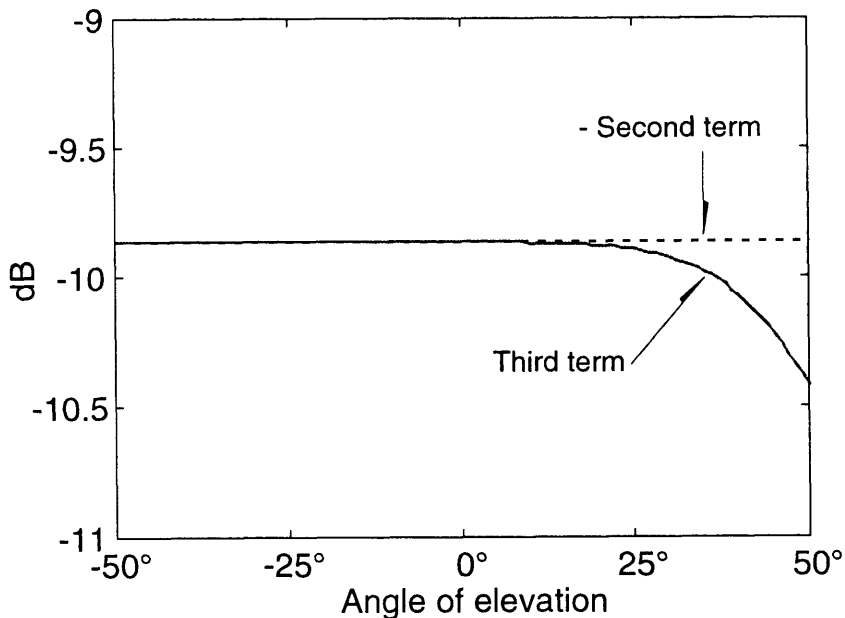
$$\begin{aligned}
& IL_{dir}(R, \theta) - IL_{omni}(R, \theta) \\
&= 20 \log_{10} \frac{|p_{dir}^F(r_{edge}, \theta)|}{|p_{dir}^F(r_{edge}, \theta_{edge})|} + 20 \log_{10} \frac{|p_{dir}^F(R, \theta_{edge})|}{|p_{omni}^F(R, \theta_{edge})|} + 20 \log_{10} \frac{|p_{omni}^D(R, \theta)|}{|p_{dir}^D(R, \theta)|} \quad (3.9)
\end{aligned}$$

右辺のそれぞれの項に関して、第1項は「指向性音圧レベル差」、第2項は自由音場において (R, θ_{edge}) での指向性音源と無指向性音源の音圧レベル差、第3項は障壁があるときの受音点位置の無指向性音源と指向性音源の音圧レベル差となっている。(3.9)式より第2項と第3項が正負逆で絶対値に近い値となると、「指向性挿入損失差」は第1項つまり「指向性音圧レベル差」で良く近似されることがわかる。そこで、実際に第2項と第3項の挙動を調べることにする。

Fig. 3.8 (a) には、水平方向に強い指向性音源の場合に、音源から 10 m の距離にある受音点の仰角変化に対する第2項と第3項の振る舞いを示す。ただし、第2項に対しては、-1 を乗じた。第2項に-1 を乗じたものは、仰角に依存しないため-9.9 dB で一定している。また、第3項も、仰角が負値のとき-9.9 dB で一定しているが、 10° あたりから単調に増加し、エッジ角度 45° では-9.5 dB となっている。更に、**(b)** には、鉛直方向に強い指向性音源の場合に、同様に第2項と第3項の振る舞いを示す。鉛直方向に強い指向性音源の場合には、第2項に-1 を乗じたものは-9.9 dB で一定している。しかし、第3項は仰角が負値のとき-9.9 dB で一定しているが、 20° あたりから単調に増加し、エッジ角度 45° では-10.2 dB となっている。以上のことより、障壁があるときの受音点位置の無指向性音源と指向性音源の音圧レベル差を意味する第3項に関して、仰角が正值より大きくなるにつれ増加してゆく傾向が近似精度に影響していることがわかる。



(a) 水平方向の指向性



(b) 鉛直方向の指向性

Fig. 3.8 (3.9) 式の第2項と第3項の振る舞い

これまで述べてきた「指向性音圧レベル差」と「指向性挿入損失差」の一致性に関する議論は、音源位置を限定していた。そこで、音源位置に関わらず両者の一致性は高いことを示すため、

- $\theta_{edge}63^\circ$: エッジから、x方向に-2, y方向に-4の位置に音源を置く
- $\theta_{edge}45^\circ$: エッジから、x方向に-2, y方向に-2の位置に音源を置く
- $\theta_{edge}27^\circ$: エッジから、x方向に-4, y方向に-2の位置に音源を置く

のように、3ヶ所の音源位置 (Fig. 3.9) を設定し同様な検討をおこなった。1000 Hzにおいては、どの音源位置からもエッジ地点で遠方音場となり、指向性は安定していた。Type I の3点音源により水平方向に強い指向性と鉛直方向に強い指向性を表現し、それぞれの場合に関して仰角毎の指向性挿入損失差の距離変化を計算したものを Fig. 3.10 に示す。「指向性挿入損失差」の変動は小さく、仰角が正值のときは仰角が小さいほど両者は良く一致しており、仰角 θ がエッジ角度 θ_{edge} に近づくほど両者の差は大きくなっている。また、ここには示していないが、仰角が負値のときには「指向性音圧レベル差」と「指向性挿入損失差」の一致精度は極めて高かった。このように、「指向性音圧レベル差」と「指向性挿入損失差」の一致性は音源位置に依存しないことが確認できた。

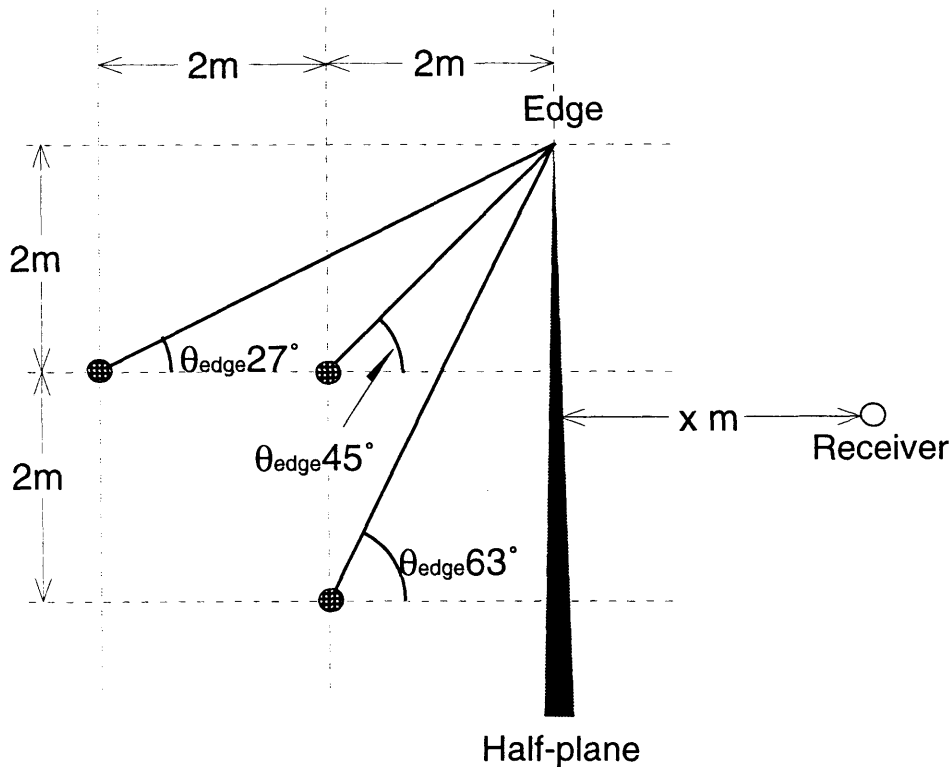
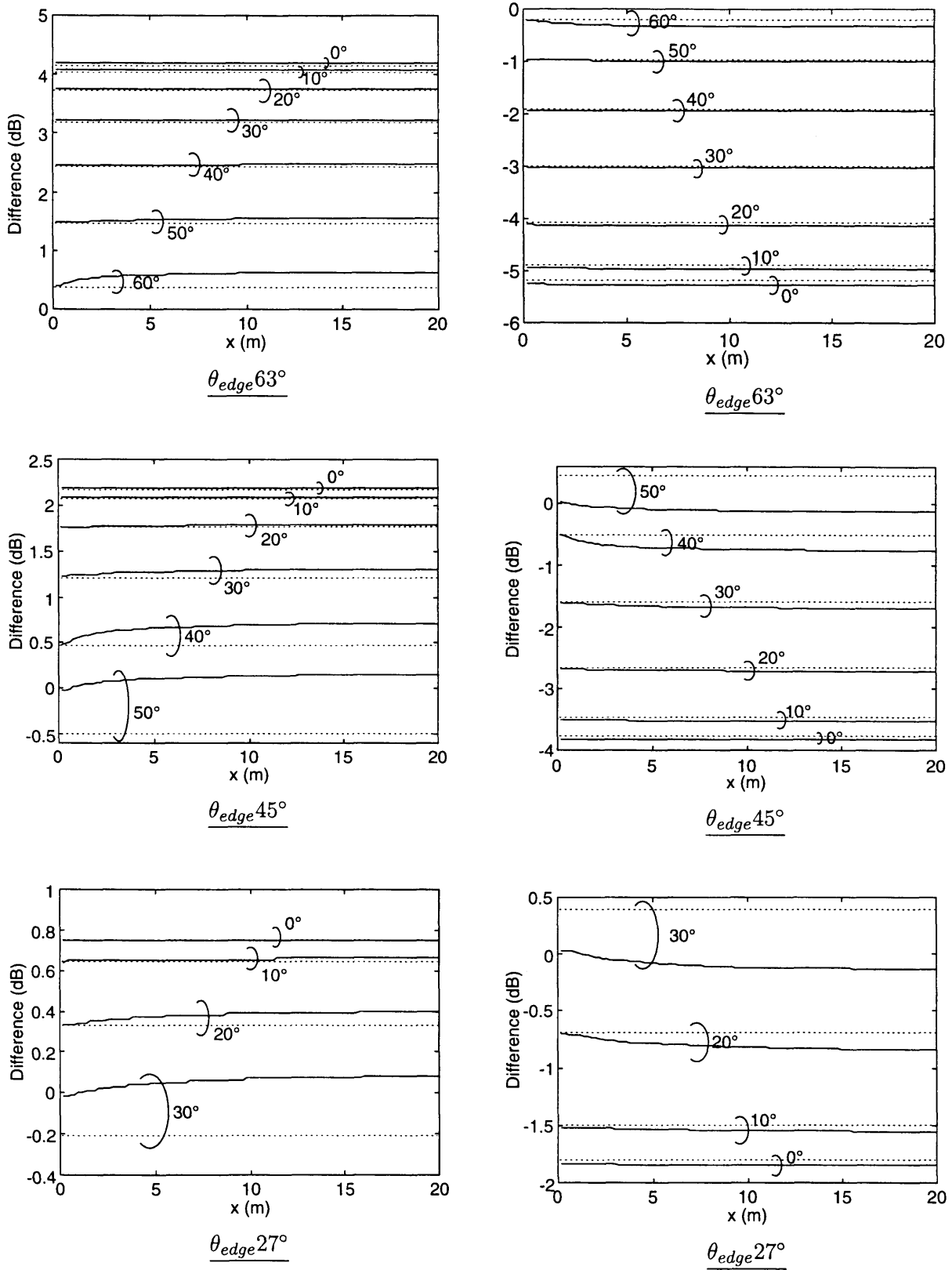


Fig. 3.9 3パタンの音源位置.



(a) 水平方向の指向性

(b) 鉛直方向の指向性

Fig. 3.10 仰角別に描いた指向性挿入損失差 -音源位置を移動-
(実線: 指向性挿入損失差, 点線: 指向性音圧レベル差)

これまでの議論は、水平方向と鉛直方向に強い指向性の結果しか示していない。そこで、水平方向 $\theta = 0^\circ$ から鉛直方向 $\theta = 90^\circ$ にかけて極大値と極小値が繰り返されるような複雑な指向性に関しても、同様に「指向性挿入損失差」を計算した。用いた指向性音源は、両端の音源間隔が半波長、Source 1, 2, 3 音源体積流の振幅比を 1:4:1 と設定した Type II の 3 点音源であり、Fig. 3.2 (a) と同様に x 軸上に 4 つの点音源を並べたものである。このとき $z = 0$ 面における無限遠の同心円上の指向性は Fig. 3.11 に示すように、極大値と極小値が繰り返されるようなものであった。また、「全方位において指向性が安定」する距離を計算すると、音源から $600/k$ 程度であった。従って、1000 Hz にして音源から 33 m あれば指向性が安定することとなる。そこで、Fig. 3.12 に示す 3ヶ所、

- $\theta_{edge}63^\circ$: エッジから、 x 方向に-25, y 方向に-50 の位置
- $\theta_{edge}45^\circ$: エッジから、 x 方向に-25, y 方向に-25 の位置
- $\theta_{edge}27^\circ$: エッジから、 x 方向に-50, y 方向に-25 の位置

に音源を設置し、仰角毎の指向性挿入損失差の距離変化を計算した。仰角毎の指向性挿入損失差は、Fig. 3.13 に示すように距離変化に対する変動は小さい。極大値と極小値が繰り返されるような複雑な指向性に関しても、水平方向や鉛直方向に強い指向性音源によるものと同様な傾向が見いだせる。

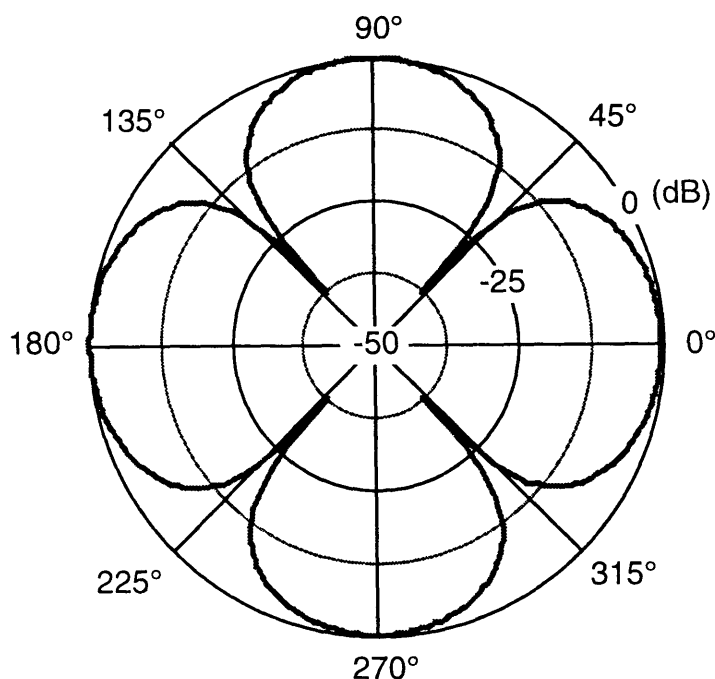


Fig. 3.11 極大値と極小値を繰り返す複雑な指向性 -無限遠の指向性-

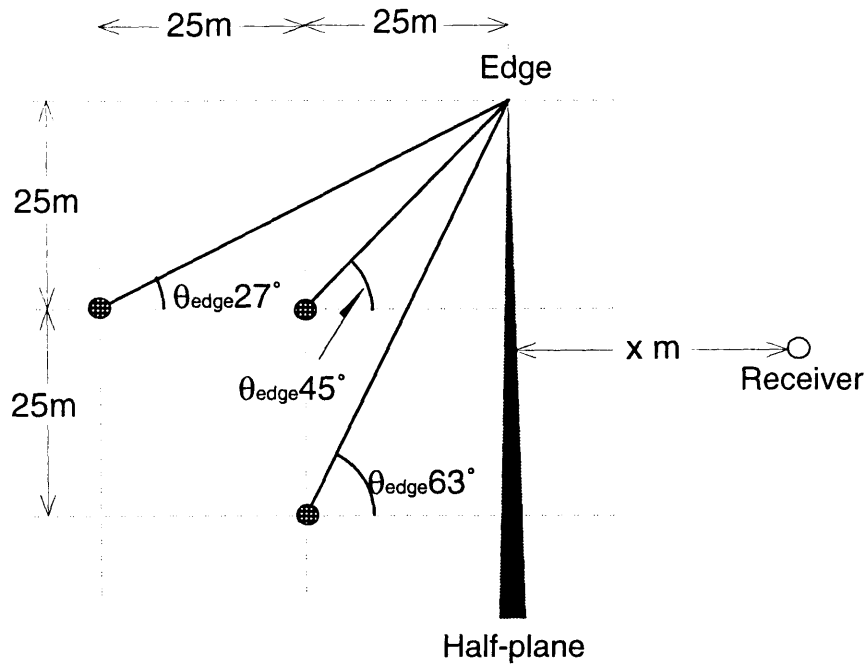


Fig. 3.12 3パタンの音源位置.

$\theta_{edge}63^\circ$ のケースで仰角が $60^\circ, 40^\circ, 20^\circ, 0^\circ$ の場合を比較すると、 60° のときに「指向性音圧レベル差」と「指向性挿入損失差」の一致精度が最も良く、 40° のときが一致精度は最も悪いが、 $20^\circ, 0^\circ$ のときも 60° のときに比べて一致精度はよくはない。他の、 $\theta_{edge}45^\circ$ のケースでも $\theta_{edge}27^\circ$ のケースでも、仰角が小さくても「指向性音圧レベル差」と「指向性挿入損失差」の一致精度は向上していないという同様な傾向が現れている。このように、仰角 θ がエッジ角度 θ_{edge} に近づいても両者の差は大きくなってはいない。Fig. 3.11 に示すように遠方音場においても音源を中心とする同心円上での音圧レベルの変動が大きいため、「指向性音圧レベル差」自体も仰角に応じて一様に変動するものではなく変動が大きくなっている。そのため、エッジ位置よりも上部から回り込む回折音波が受音点に及ぼす寄与が、エッジより上部になるほど低下するとは限らなくなる結果、「指向性音圧レベル差」と「指向性挿入損失差」の傾向が複雑化したと思われる。この理由に関しては、今後さらに厳密に追求する必要がある。

また、 $\theta_{edge}45^\circ$ のケースでは、「指向性音圧レベル差」と「指向性挿入損失差」の差が 2 dB あり、一致精度が悪い。この原因としては、Fig. 3.11 に示す指向特性の極小値は 47° にあり、対してエッジは 45° の位置にあるため音圧レベルの急激に変化する場所に位置することとなり、安定した領域での傾向が見出せなくなったと考えられる。

このような指向特性が極小値をとる仰角の近傍にエッジがある場合を除けば、「指向性音圧レベ

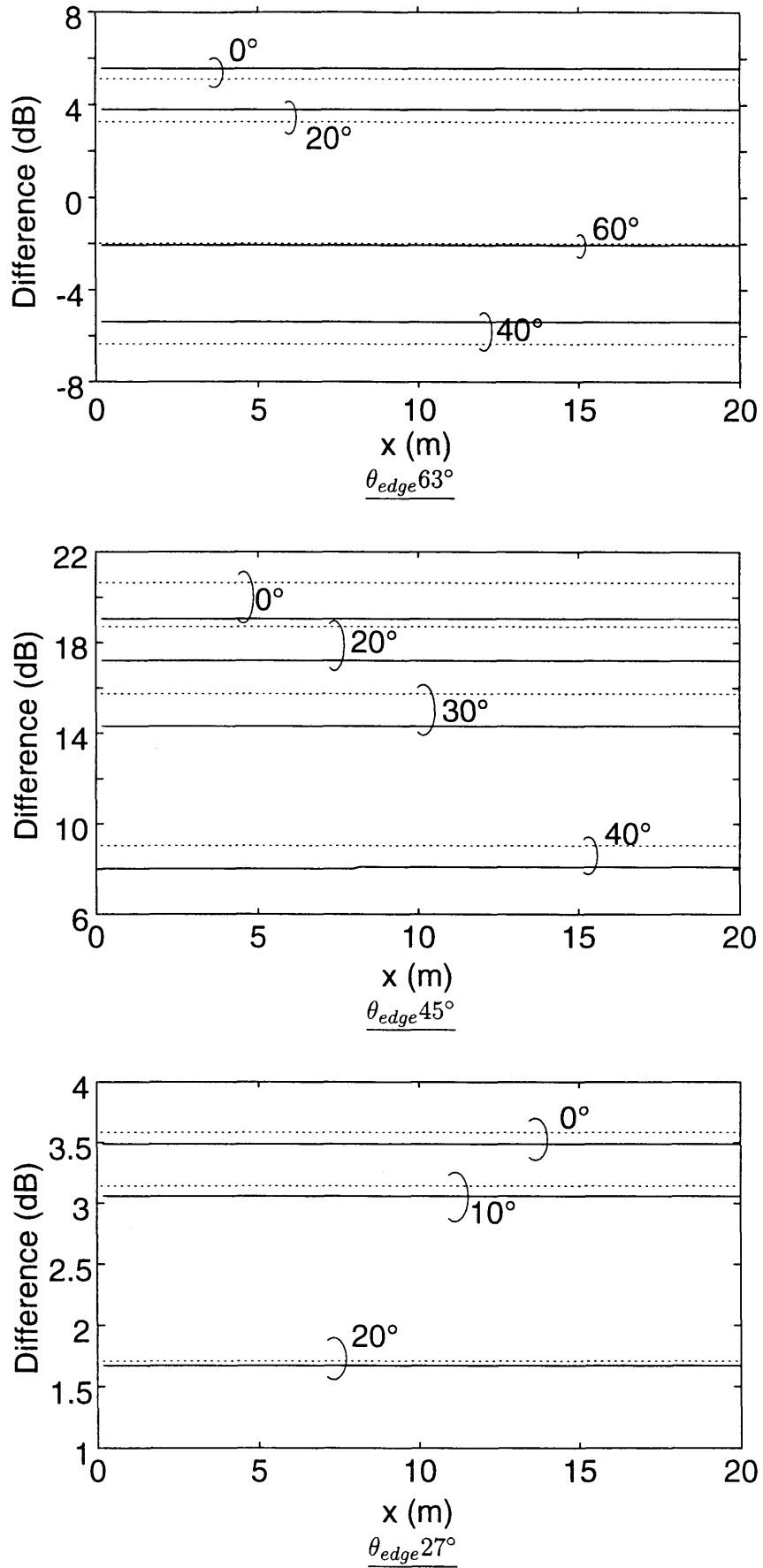


Fig. 3.13 複雑に極大値と極小値を繰り返すな指向性音源に対して、仰角別に描いた指向性挿入損失差—音源位置を移動— (実線: 指向性挿入損失差, 点線: 指向性音圧レベル差)

ル差」と「指向性挿入損失差」の差は大きくても 1 dB 程度に収まっている。従って、複雑に極大値と極小値を繰り返されるような指向性音源であろうと、指向性が安定する範囲にエッジ地点があれば、「指向性音圧レベル差」により「指向性挿入損失差」が近似できると結論できる。

以上総合すると、水平方向から鉛直方向にかけて一様に指向特性が変化する指向性音源であろうと、また複雑に極大値と極小値を繰り返されるような指向性音源であろうと、指向性が安定する範囲にエッジ地点があれば、障壁により音源が見えない領域において「指向性挿入損失差」は「指向性音圧レベル差」により近似される。特に、指向性が水平方向から鉛直方向にかけて一様に変化するときは、仰角 θ が小さくなるほどその近似精度は高くなる傾向にある。しかし、実際に防音壁を設置するとき、騒音を制御したい受音点は地面近傍であることが多く、仰角 θ は大きくはならない。従って、指向性挿入損失差を定量的に示すものとして、指向性音圧レベル差を指標として用いても誤差は小さい状況が多いと考えられる。

3.3 地面反射をも考慮した検討

次に地面に接する状態で、もしくは地面上のある高さに音源が位置するときに対応して、剛な地面が存在する場合についても、1000 Hz の周波数に関して同様に計算を行った。音源として、まず水平方向に強い指向性を生成する 3 点音源を用い、音源を地面に接して置く場合と地面上のある高さの位置に置く場合について検討する。

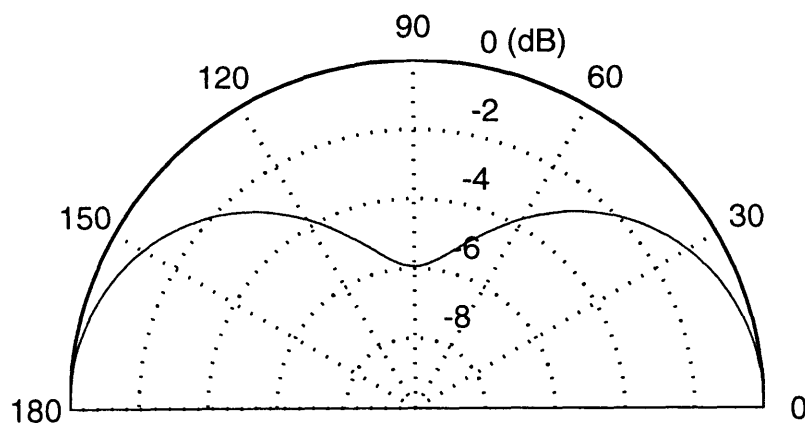


Fig. 3.14 3点音源を構成する音源群を地面に置いた場合の指向性—無限遠同心円上—

3点音源を構成する3つの音源を地面に置いた場合、地面がない場合に比べて受音点の音圧が2倍となる。従って、音源を中心とする同心円上における指向性は、地面がない場合と同様であ

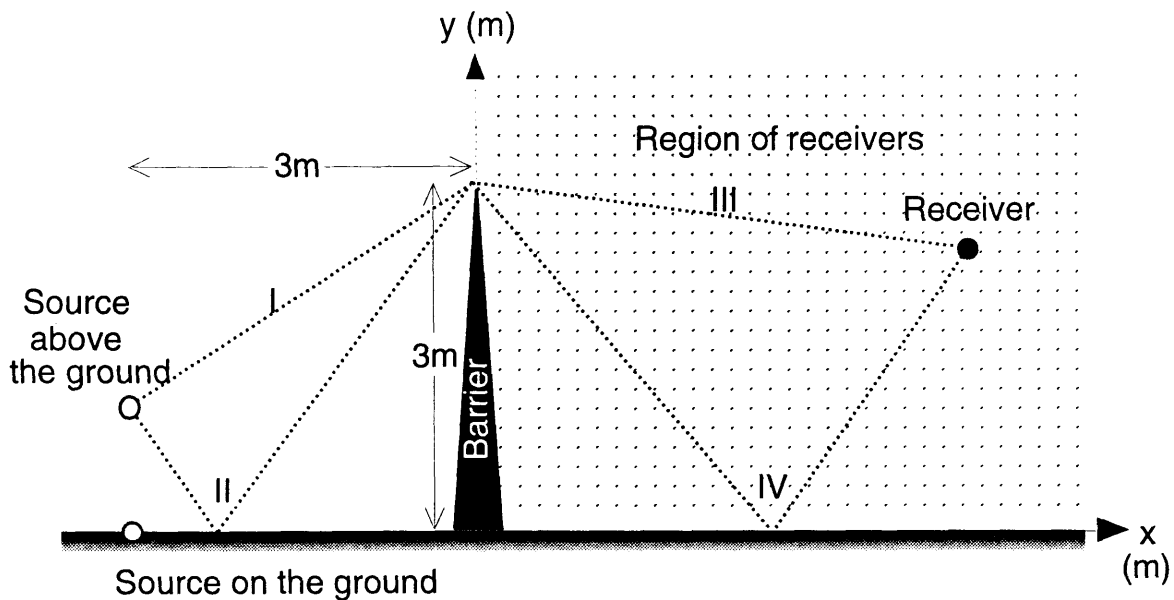
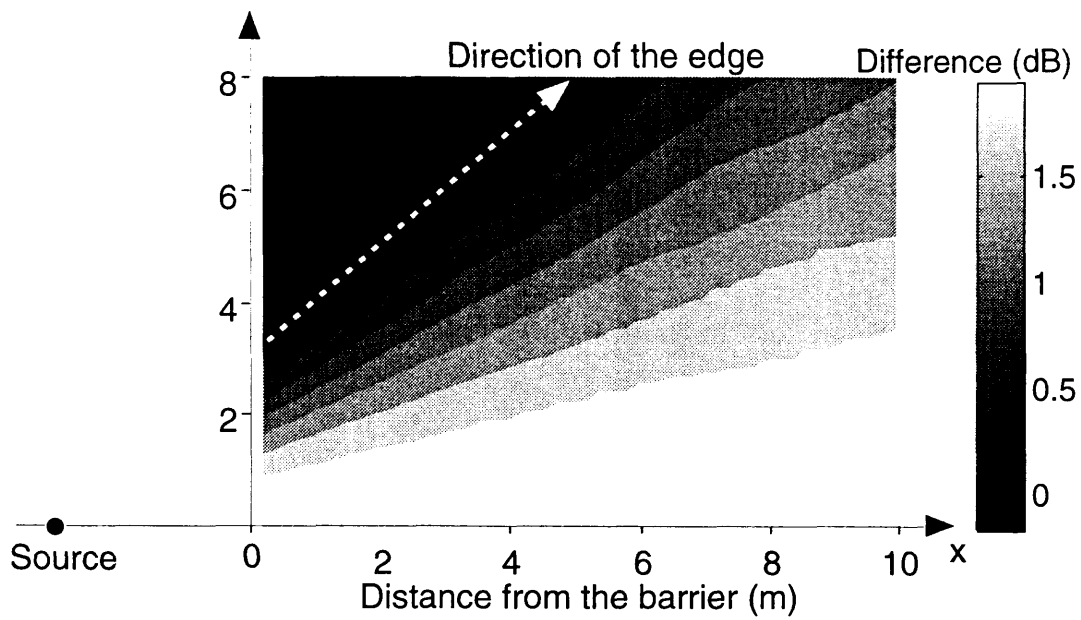


Fig. 3.15 音源，障壁，受音点の位置関係 及び 音線パス I, II, III, IV.

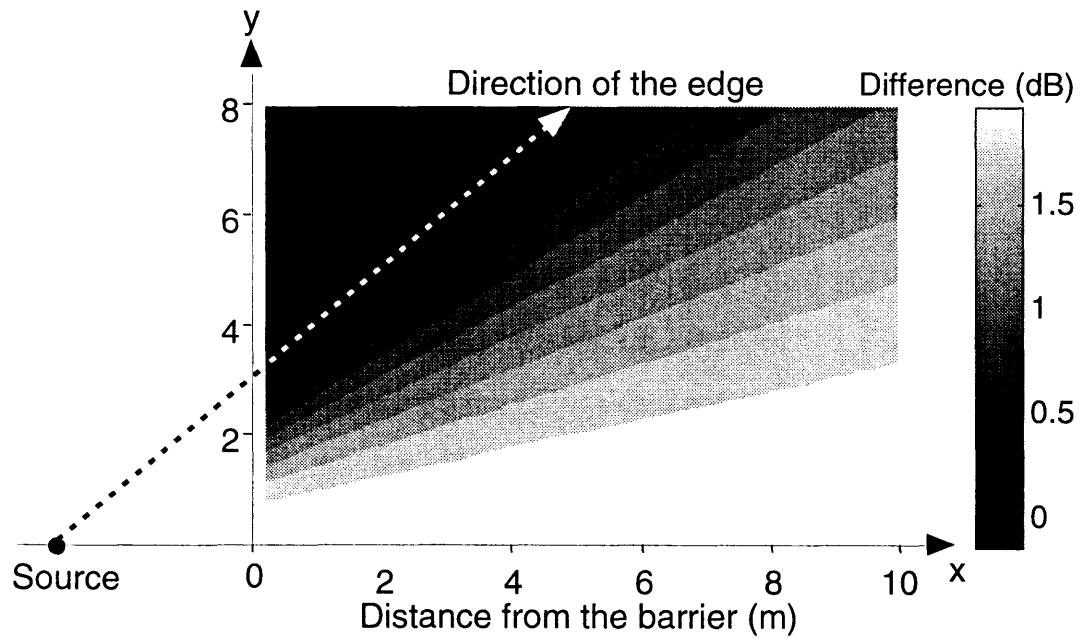
り，Fig. 3.14 のようになる．ここで，Fig. 3.15 に示すように音源から 3 m 離れたところに高さ 3 m の厚さのない剛壁を置き[†]，3 点音源と無指向性音源に対する挿入損失の比較をおこなう．回折場の音圧計算には，Fig. 3.15 の点線で示す鏡像を考慮した 4 つの音線パスそれぞれに Clemmow の方法を適用する．従って，3 点音源それぞれに 4 つの音線パスがあるため，計 12 通りの音線パスによる音圧寄与の総和により受音点における音圧が求められる．

地面に音源が接しているときの「指向性挿入損失差」は，地面上からの分布を描くと Fig. 3.16 (a) となり，地面がないときの指向性挿入損失差の分布 (Fig. 3.16 (b)) と一見同じ分布に見える．しかし，Fig. 3.17 に示すように仰角毎にみると，地面がないときの指向性挿入損失差は障壁からの距離に対して滑らかに推移している．対して，地面に音源が接しているときは障壁からの距離に対する指向性挿入損失差の変動には揺らぎがあり，滑らかに推移していない．これは，エッジから受音点の経路で直接波と反射波による干渉が影響するため，不安定な揺らぎを生じているものと考えられる．しかし，指向性挿入損失差と指向性音圧レベル差との隔たりは，仰角 40° の受音点に対しても最大で 0.2 dB 程度と小さく，揺らぎは大きくはない．従って，音源が地面に接しているときには，音源が見えない領域であれば地面がない場合と同様に，「指向性挿入損失差」は「指向性音圧レベル差」で近似される．

[†] この配置は，自動車騒音に対して防音壁を設置することを念頭に置いている．

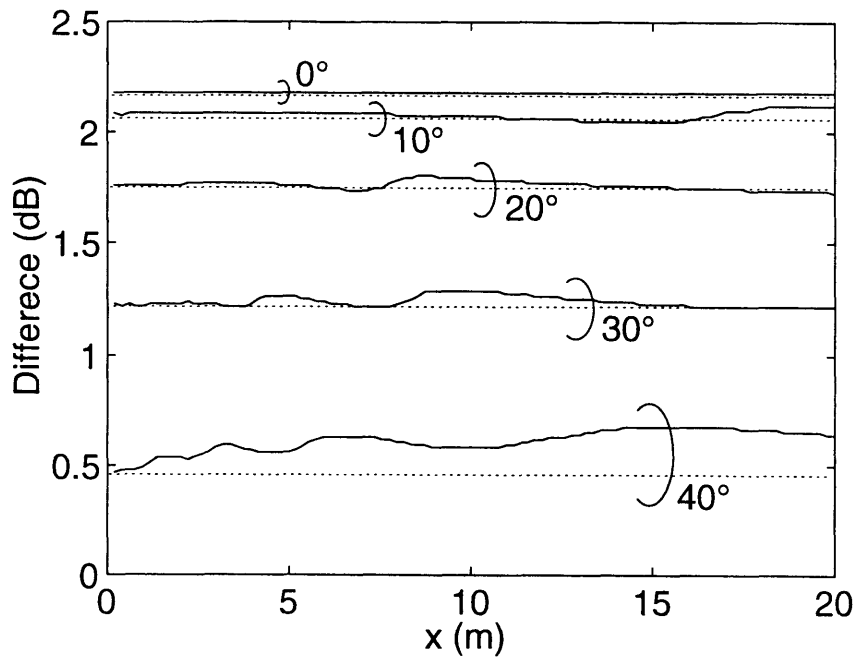


(a) 音源が地面に接するとき

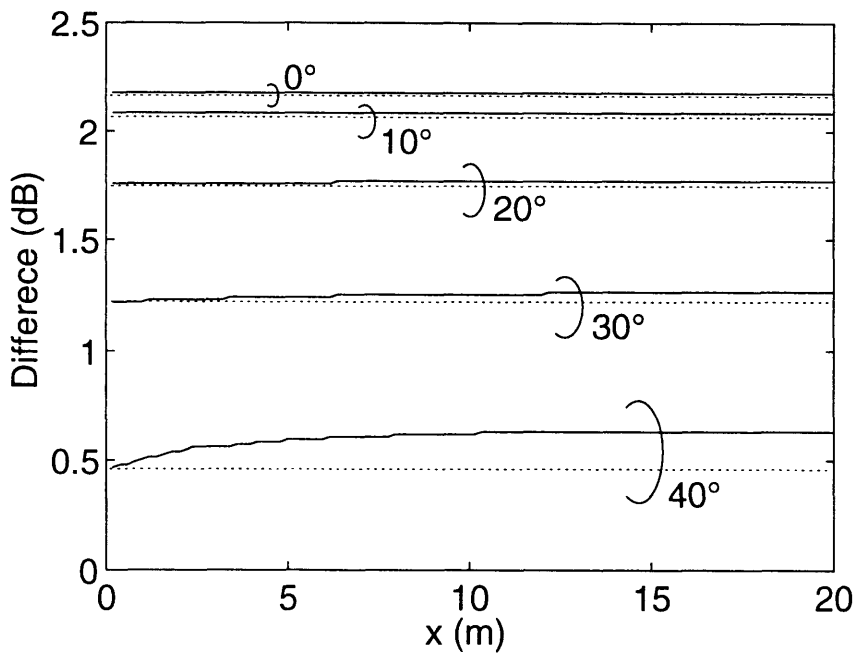


(b) 地面がないとき

Fig. 3.16 指向性挿入損失差の分布



(a) 音源が地面に接するとき



(b) 地面がないとき

Fig. 3.17 仰角別に描いた指向性挿入損失差の距離に対する変動-地面があるときと、ないときの比較-(実線: 指向性挿入損失差, 点線: 指向性音圧レベル差)

次に、この3点音源を地面から上空に移動して、指向性挿入損失差の傾向を検討する。Fig. 3.15の Source above the ground のように地面から離せば、反射性地面の存在により実音源だけでなく虚音源が現れる。ここで用いている3点音源は、1000 Hzの周波数において x 方向に17 cmの大きさを持っており、実音源と虚音源を1つの音源と見なせば y 方向に関しても実音源の地面からの高さの2倍ほど大きさを持つこととなる。なお、 y 方向の大きさに関しても波数との関係で論じて整理することが妥当だと思われる。しかし、3点音源の x 方向の大きさ d と波数 k との関係 kd は、指向特性を決定するパラメータ間の関係という意味があるが、 y 方向の大きさ $2h$ と波数 k との関係 $2kh$ で論じて、 y 方向の大きさに対する波数との関係の普遍的な意味のある結論とはならない。あくまでも、 x 方向の大きさ d と y 方向の大きさ $2h$ を比較することにより、1つの音源としての大きさや指向性が安定する距離を論じるべきだと考える。そこで、実音源と虚音源を1つの音源と見たときの y 方向の大きさに関しては、3点音源を置いた地面からの高さを直接距離で表示して検討するととした。このとき、1000 Hzの周波数に議論を限定しており、 x 方向の大きさは17 cmであることを念頭において考察すれば問題はない。

Fig. 3.18には、3点音源を地面から8 cm上空に置いた場合の無限遠における指向性を示す。ただし、指向性を描く中心は、実音源と虚音源の midpointである地面に置くこととした。3点音源を地面に接して置いたときよりも水平方向の指向性は強くなっており、 x 方向の17 cmの大きさに加え、実音源と虚音源間の距離である16 cmほど y 方向にも大きさを持つ音源となったことに対応して、指向性が安定する距離が大きくなることが予想される。実際、指向性が安定する距離を算出すると455 cmであり、エッジまでの距離 $3\sqrt{2}$ mよりも30 cm程度大きくなっていった。

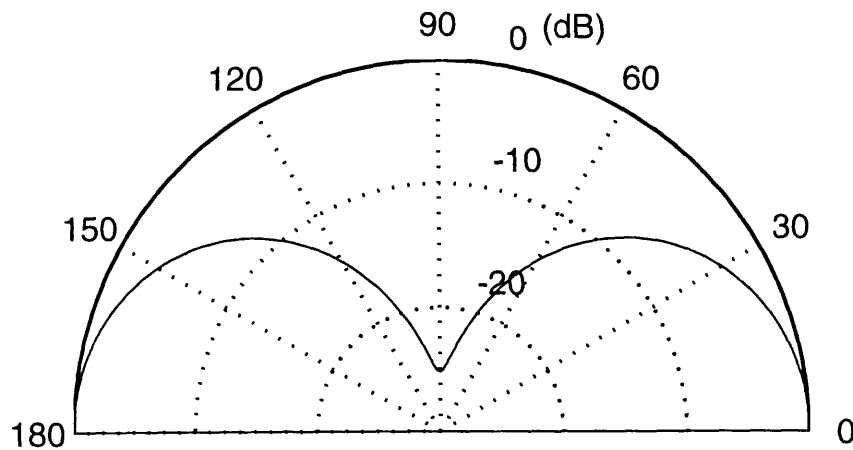


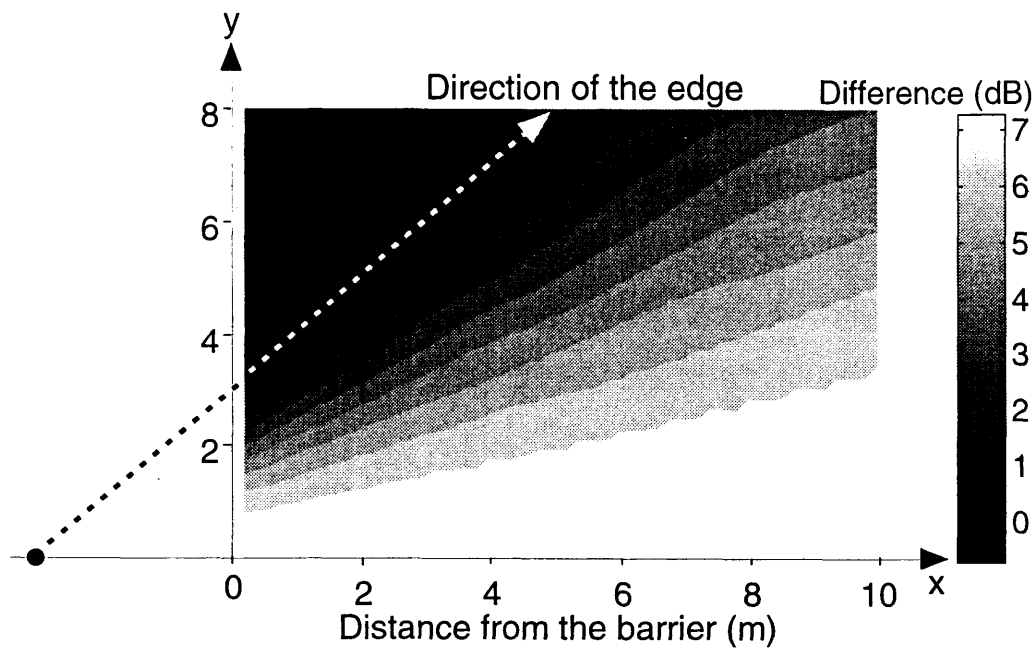
Fig. 3.18 地面から8 cm上空に置いた場合の指向性 -無限遠-

しかし、音源からエッジ間の距離 $3\sqrt{2}$ m での指向性の安定を調べるため次式、

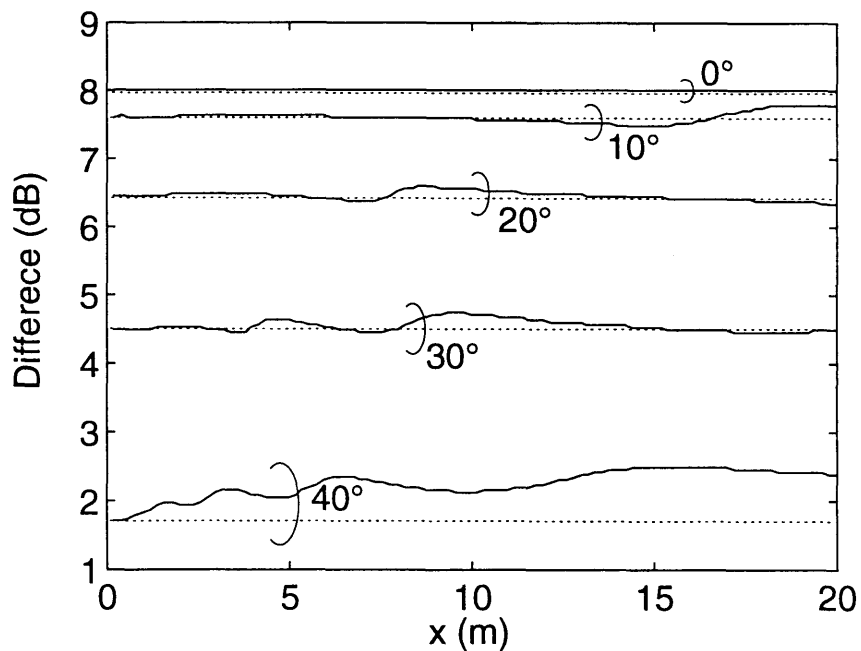
$$\left| 20 \log_{10} |p(\infty, \theta)/p(\infty, 0)| - 20 \log_{10} |p(3\sqrt{2}, \theta)/p(3\sqrt{2}, 0)| \right|$$

を算出すると、差の最大値は 0.12 dB と小さい数値であった。また、 $\theta < 90^\circ$ の範囲で 0.1 dB 以上の差がある仰角を調べたところ、 83° から 89° つまり $3\sqrt{2}$ m の同心円上の指向性が極小値となる仰角 90° の近傍領域に限られていることがわかった。この領域は、音源からエッジをのぞむ角度 θ_{edge} 45° よりも大きく、「指向性音圧レベル差」による「指向性挿入損失差」の近似範囲対称外となっている。このように、エッジまでの距離 $3\sqrt{2}$ m の同心円上での指向性の安定度も比較的高い上、 0° から θ_{edge} までは遠方音場が十分成立している。

このとき、無指向性音源を実音源と虚音源の midpoint である地面に置き指向性挿入損失差の分布図を描くと **Fig. 3.19 (a)** に示すようになり、指向性挿入損失差は、両音源の midpoint から受音点をのぞむ仰角への依存性を明確に示している。また、仰角毎の指向性挿入損失差の距離変化は **Fig. 3.19 (b)** のようになり、「指向性音圧レベル差」により「指向性挿入損失差」が表現され、仰角 θ が小さくなるほどその近似精度は高くなることが示されている。このように、実音源と虚音源間の距離である 16 cm の y 方向の大きさは、 x 方向の 17 cm の大きさと比較して大きくはないため、「指向性音圧レベル差」により「指向性挿入損失差」がうまく近似されると結論づけることができる。また、指向性が極小値を示す仰角 90° の近傍において指向性の安定度が低下するが、 0° から θ_{edge} までの範囲で指向性が安定していれば十分であり、全方位で指向性が安定する必要はないことがわかった。



(a) 指向性挿入損失差の分布



(b) 仰角別に描いた指向性挿入損失差の距離にたいする変動
(実線: 指向性挿入損失差, 点線: 指向性音圧レベル差)

Fig. 3.19 地面から 8 cm 上空に置いた場合の指向性挿入損失差

しかし、3点音源をさらに上空に置いた場合には、指向性は極小・極大を繰り返すような、複雑なものとなる。Fig. 3.20に、地上10 cm, 20 cm, 30 cm, 50 cmに3点音源を置いたときの指向性を示している。指向性を描く中心は、実音源と虚音源の midpointである地面に置くこととし、エッジまでの距離 $3\sqrt{2}$ を半径とする同心円上で描いている。音源が上空になるにつれて、 90° にある極小値が水平方向へと移動し、再び新たな極小値が 90° 近傍で生じ、これがまた水平方向へと移動している様子が見て取れる。このように 90° で極小値が生じ、水平方向へと移動することの繰り返しにより、音源が上空になるほど極大・極小値の繰り返し数が増える傾向が伺える。

また、音源が上空になるほどエッジまでの距離 $3\sqrt{2}$ mでは、指向性が安定しない仰角が増える傾向もあった。Table 3.1に、 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ の範囲で 1° 毎に、指向性が安定しない仰角、すなわち

$$\left| 20 \log_{10} \frac{p(\infty, \theta)}{p(\infty, 0)} - 20 \log_{10} \frac{p(3\sqrt{2}, \theta)}{p(3\sqrt{2}, 0)} \right| > 0.1 \quad (3.10)$$

となる θ を算出し、その範囲と差が最大となる θ を示している。地面から20 cm以上の上空に音源を設置したときには、指向性の極小値が 45° より小さい仰角で生じており、その近傍の仰角において指向性が安定していない。つまり、エッジまでの距離 $3\sqrt{2}$ mを半径とした同心円上で音圧レベルが極小値となる仰角近傍において、指向性が安定していないこととなる。言い換えると、一定距離 r_{edge} の同心円上で音圧レベルが極小となる仰角と、(3.10)式を満たす仰角が一致するということになる。

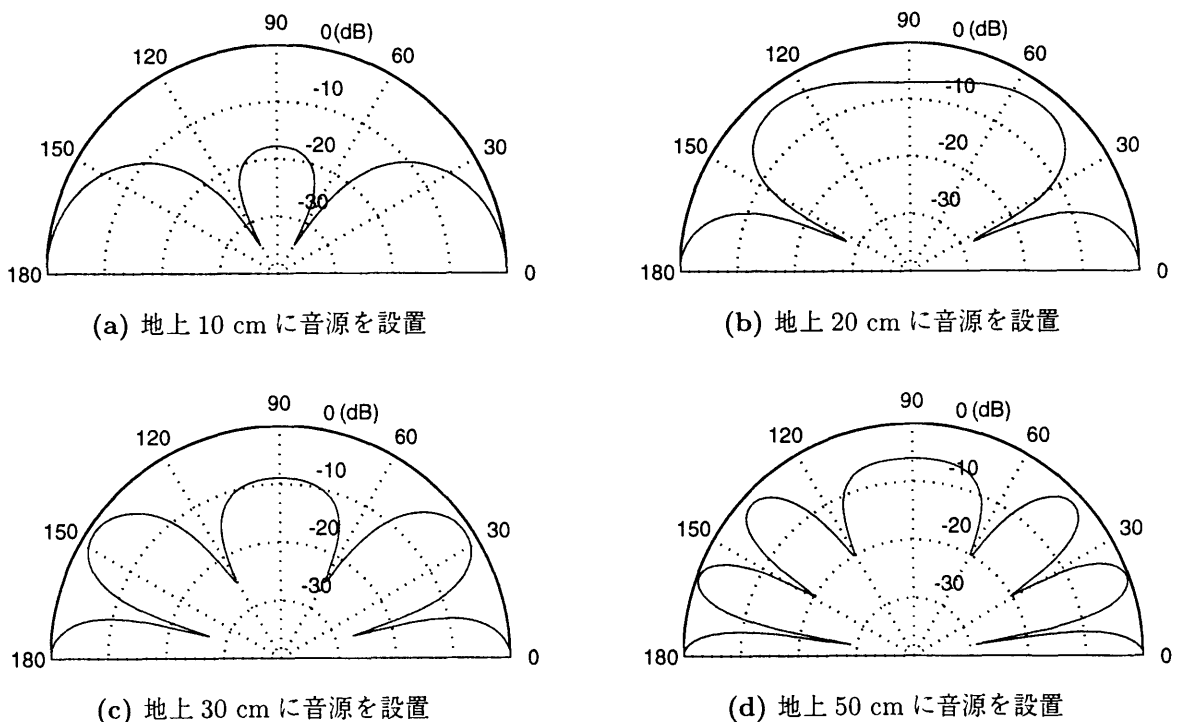


Fig. 3.20 音源が地面上空に位置するときの指向性

Table 3.1 エッジまでの距離 $3\sqrt{2}$ m で指向性が安定していない仰角

音源位置	10cm上空	20cm上空	30cm上空	42°~90°
0.1dBより大きくなる範囲	48°~73°	21°~28°	13°~18°	
最大となる仰角	59°	25°	17°	59°
	50cm上空			
	7°~14°	22°~32°	42°~90°	
	10°	31°	59°	

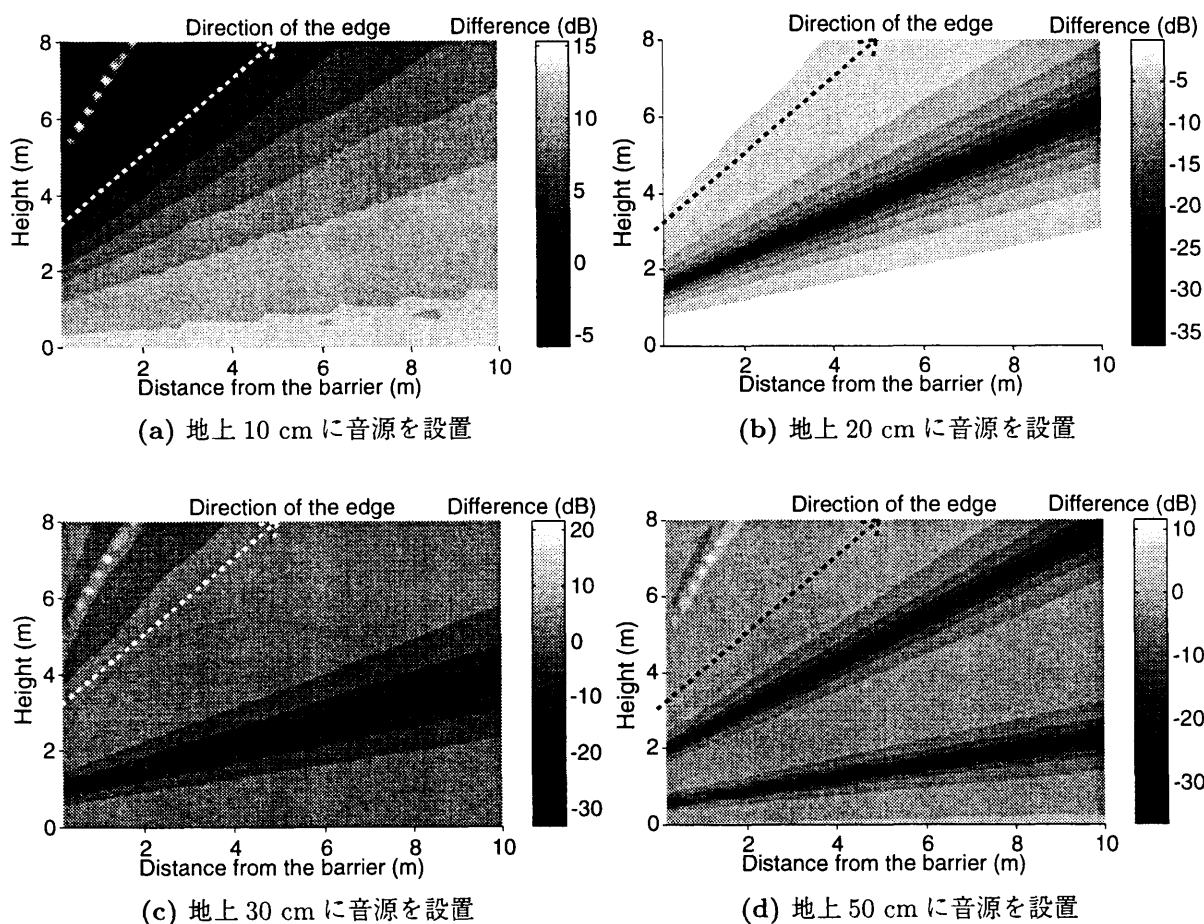


Fig. 3.21 音源が地面上空に位置するときの指向性挿入損失差の分布

「指向性挿入損失差」の分布図を描くと Fig. 3.21 のようになり、仰角に対する依存性が明確に現れており、上空 10 cm に 3 点音源を配置したときの図からは仰角依存性と同時に同一仰角内での「指向性挿入損失差」の数値の揺らぎも見られる。上空 20 cm 以上の上空に 3 点音源を配置したときの分布図中において、ある仰角近傍で特に黒くなっている。これらの仰角について調べたところ Table 3.1 示した指向性が安定しない仰角近傍に一致していた。そして、これらの仰角

近傍では色の濃淡が繰り返されており、「指向性挿入損失差」の数値が振動しているようである。

そこで、仰角依存性に関する検討に当たっては、指向性が安定していない仰角と、それ以外の指向性が安定している仰角とで分けて行うこととする。各音源位置における仰角依存性の距離変化を Fig. 3.22 から Fig. 3.25 までに示し、詳細に検討する。

3 点音源を上空 10 cm においたとき、指向性挿入損失差の仰角依存性の距離変化は Fig. 3.22 のようになった。エッジまでの距離 $3\sqrt{2}$ m を半径とした同心円上を音圧レベルが極小値となる仰角 59° はエッジ角度 45° を超えているため、「指向性音圧レベル差」による「指向性挿入損失差」の近似適用範囲外であるが、ここでは極小値となる仰角での「指向性挿入損失差」の振る舞いを観察

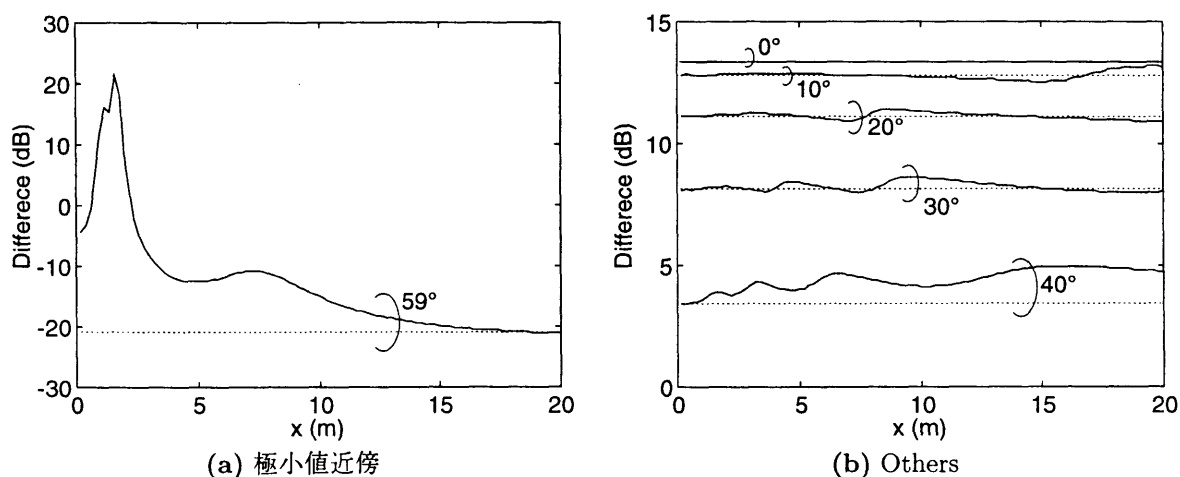


Fig. 3.22 指向性挿入損失差の仰角依存性 -3 点音源が 10 cm 上空の場合-
(実線: 指向性挿入損失差, 点線: 指向性音圧レベル差)

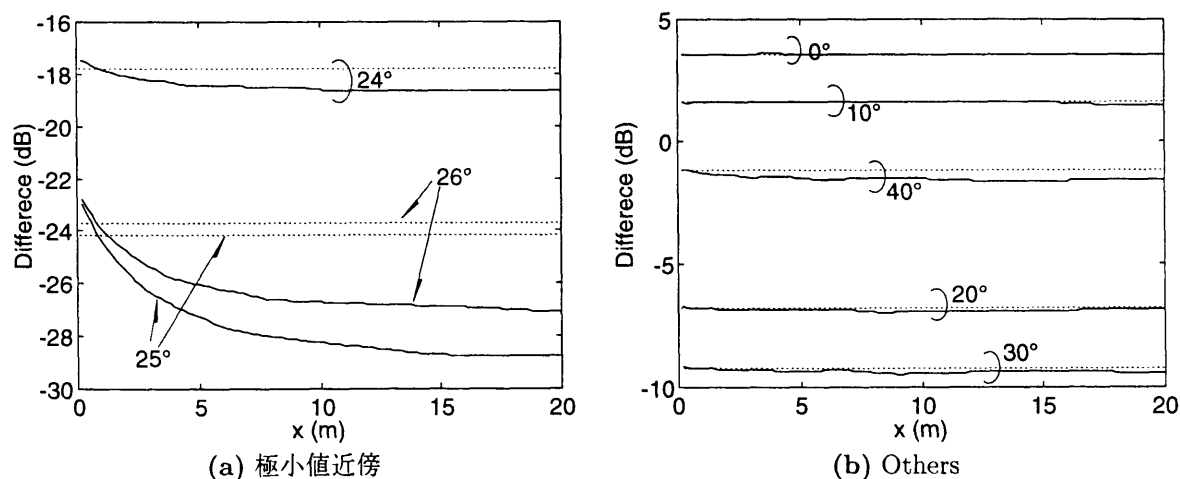


Fig. 3.23 指向性挿入損失差の仰角依存性 -3 点音源が 20 cm 上空の場合-
(実線: 指向性挿入損失差, 点線: 指向性音圧レベル差)

する目的でグラフ化している。仰角 59° の「指向性挿入損失差」の振る舞いは、障壁から 2 m の距離辺りまで急激に数値を上昇し、4 m の距離辺りまで急激に低下して、それ以降は比較的緩やかな下降傾向にある。変化が緩やかとなった距離辺りで遠方音場に近くなったと考えられるが、それまでの変化があまりに急激すぎる。一方、指向性が安定している仰角に関しては「指向性挿入損失差」の振る舞いには距離変化に対する振動が観察されるものの、仰角が小さくなるほど「指向性音圧レベル差」との一致性は向上している。

3点音源が上空 20 cm に位置するとき Fig. 3.23 は、極小値を示す仰角 25° はエッジ角度 45° を超えていない。そこで、その前後の仰角についても「指向性挿入損失差」の距離変化を計算した。極小値を示す仰角 25° および仰角 26° において「指向性挿入損失差」の距離変化は大きく、障壁か

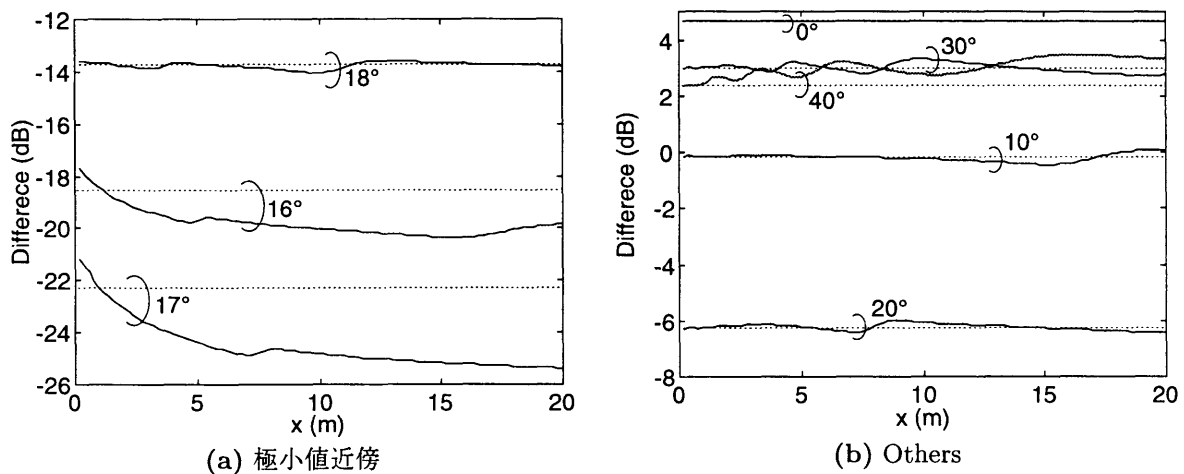


Fig. 3.24 指向性挿入損失差の仰角依存性 -3点音源が 30 cm 上空の場合-
(実線: 指向性挿入損失差, 点線: 指向性音圧レベル差)

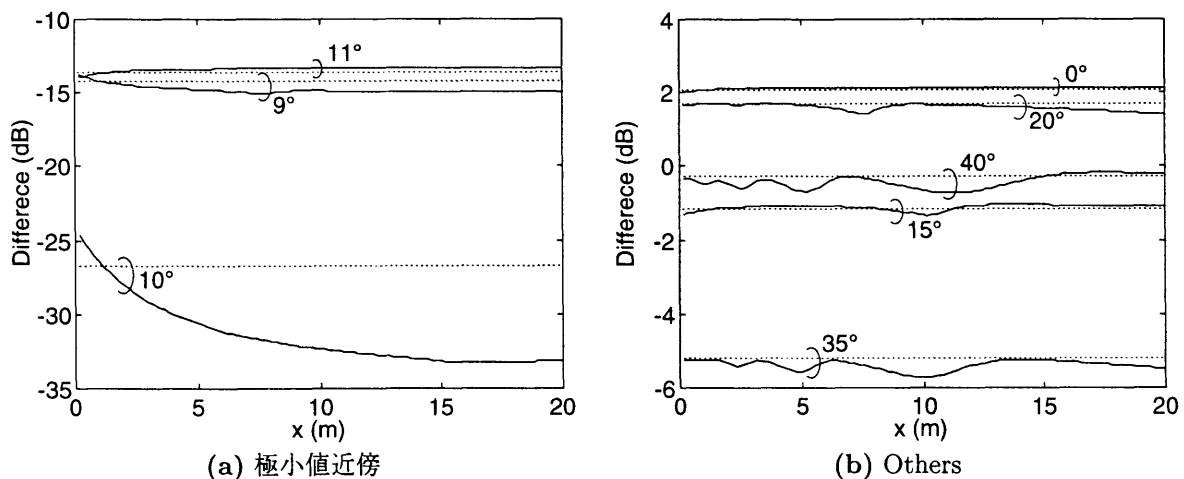


Fig. 3.25 指向性挿入損失差の仰角依存性 -3点音源が 50 cm 上空の場合-
(実線: 指向性挿入損失差, 点線: 指向性音圧レベル差)

らの距離が大きくなるほど「指向性音圧レベル差」との差は広がっていた。しかし、仰角 24° においては「指向性挿入損失差」と「指向性音圧レベル差」との一致性は高い。つまり、極小値を示す仰角では「指向性音圧レベル差」による「指向性挿入損失差」の近似精度は大きく低下するが、その仰角から 1° 異なる仰角の近似精度の傾向は前後で全く異なっている。一方、指向性が安定する仰角では、「指向性挿入損失差」と「指向性音圧レベル差」との一致性は高く、エッジ角度 45° に近づいている仰角 40° でも一致性は高い。

3点音源が上空 30 cm に位置するとき (Fig. 3.24) も、上空 50 cm に位置するとき (Fig. 3.25) も、「指向性挿入損失差」は上空 20 cm に位置するときと同様な傾向を示しており、指向性が安定する仰角では、「指向性挿入損失差」と「指向性音圧レベル差」との一致性は高い。しかし、指向性が極小値を示す仰角ではその一致性は劣っており、極小値を示す仰角近傍での一致性の良くはない。従って、極小値となる仰角、すなわち同心円上の音圧レベル変動が急な仰角周辺を避ければ、「指向性挿入損失差」と「指向性音圧レベル差」との一致性が高く、高い近似精度が確保できると考えられる。

これまで扱った上空 50 cm 程度に音源を置く場合は、 0° からエッジ角度 45° の範囲で指向性が安定する仰角の割合が多かった。つまり、近似精度が高くなる領域が多く取れていた。しかし、上空 100 cm に 3 点音源を置いたときには指向性は Fig. 3.26 に示すように変動が激しいものであり、指向性が安定する仰角は 1° 間隔で調べると $\theta = 1^\circ, 38^\circ, 42^\circ, 53^\circ, 54^\circ$ しか存在していない。つまり、指向性は安定する仰角はほとんど存在しない。実際に、仰角別にみた「指向性挿入損失差」の距離変化は Fig. 3.27 (a) に示すように激しく変動しており、指向性が極小値となる仰角 $\theta = 5^\circ$ に関しては Fig. 3.27 (b) に示すように指向性音圧レベル差とは大きく開きがある。

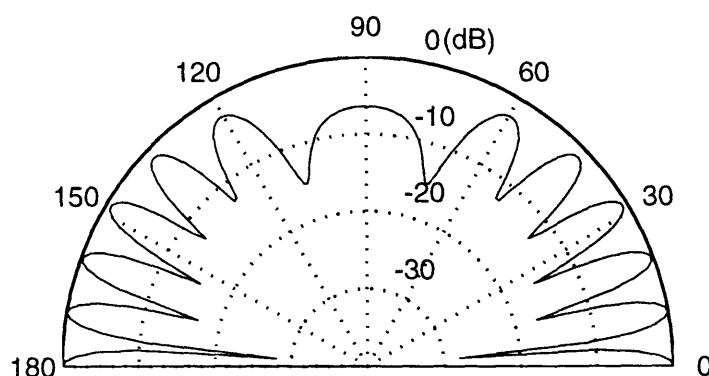


Fig. 3.26 3点音源を上空 100 cm に設置したときの指向性

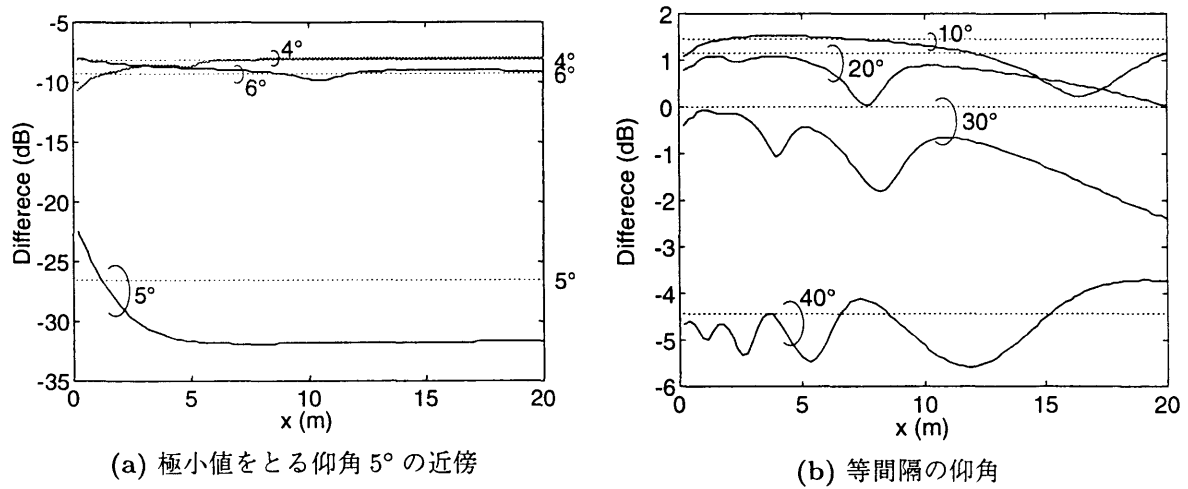


Fig. 3.27 指向性挿入損失差の仰角依存性 -3点音源が100 cm上空の場合-
(実線: 指向性挿入損失差, 点線: 指向性音圧レベル差)

なお、3点音源で鉛直方向に強い指向性を生成した場合でも、極大値と極小値が繰り返されるような複雑な指向性を生成した場合でも、エッジまでの距離で指向性が安定するならば、指向性音圧レベル差により指向性挿入損失差が表現され仰角 θ が小さくなるほどその近似精度は高くなることは、同様な手順で確認できる。

3.4 挿入損失の算出手順

以上、4点音源を利用した指向性音源に対する防音壁の挿入損失の検討から、音源の指向性を考慮した挿入損失の簡易的な算出手順を導くことができる。

障壁エッジまでの距離で「指向性が安定」する仰角に対しては、地面または地面近傍に置かれた指向性音源の挿入損失 IL_{dir} は、次に示す手順で求めることができる。

- 音源の指向性を調べ、指向性音圧レベル差を求める
- 無指向性音源のもとで挿入損失 IL_{omni} を計算する
- $IL_{dir} = IL_{omni} + (\text{指向性音圧レベル差})$

ただし、指向性音圧レベル差が指向性挿入損失差と完全に一致するわけではない。しかし、これまでの検討から、仰角 θ が小さくなるほどその近似精度は高くなり、地面近傍の受音点では問題ない精度となる。音源が地面より上にある場合でも、音源が小さくエッジ地点で指向性が安定する場合には、上記の手順により挿入損失を求めることが可能である。

しかし、音源がさらに地面から離れると、エッジまでの距離で指向性が安定しないため、上記の手順により挿入損失を求めることは妥当ではない。実際に音源が上空に存在するのは、何らかの構造物内もしくは構造物に接する形で音響放射を生じているものである。このようなケースに対する挿入損失を検討するため、続く第4章と第5章に述べる計算モデルが必要となる。