

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2章 大きさを無視できる指向性音源の 表現

第1章で述べてような指向性を考慮したうえで、自動車走行騒音や工場騒音などに対する防音壁の挿入損失を算出することが必要である。そこで、任意の指向性に対する挿入損失が算定できれば良いが、まだ、そのような検討例はない。実際の指向特性に近い指向特性をもつ音源を解析的にまたは計算機上で作成することにより、波動現象を正確に捉え、しかも反射や回折効果をも損なわずに、指向性を持つ音源の検討が可能となると考えた。本章では、そのような手段により実在する指向性を模擬できる音源の表現方法を説明する。

2.1 Dipoleによる指向性音源の表現とその問題点

解析的に作成できる簡単な指向性音源としては、dipole(二重音源)が良く知られている。ここでは、まず dipole を構成する2つの音源間の距離 d を $d \rightarrow 0$ と十分小さくする場合について指向性音源を表現する基本的な考え方を説明する。その上で、dipole を用いた指向性表現の問題点、および実在するような指向性を持つ音源を模擬する可能性について述べる。

Fig. 2.1 に示すように、2つの点音源を x 軸に沿って置き、座標の原点はその中心とする。このとき、受音点における音圧 ϕ_{dipole} は、位相が π 異なる2つの音源の寄与を加算することにより、次式のように求まる。

$$\phi_{dipole} = \frac{e^{jkR_+}}{R_+} - \frac{e^{jkR_-}}{R_-} \quad (2.1)$$

上式を $d \rightarrow 0$ のもとで展開すると、

$$\phi_{dipole} = jd \cos \theta \frac{e^{jkR}}{R} \left(1 + \frac{j}{kR} \right) \quad (2.2)$$

が得られる。更に、 $kR \gg 1$ が成立するとき、すなわち、受音点が音源から十分遠方にあるときは、右辺の括弧内第2項目は十分小さくなり無視できる。そのため、以下のように簡略化される。

$$\phi_{dipole} = jd \cos \theta \frac{e^{jkR}}{R} \quad (2.3)$$

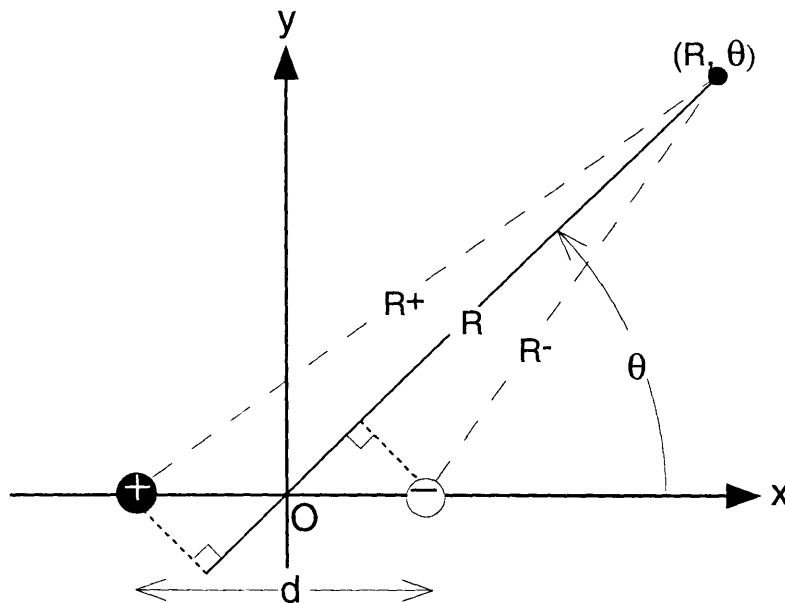


Fig. 2.1 Dipole の配置

ここで、受音点における音圧を表す(2.3)式に関して、角度 θ に依存する指向係数は $\cos\theta$ と単純な式で表されている。従って、音圧レベルにより表現すると、dipoleの指向特性は8の字型となる。上に示した(2.1)式から(2.3)式への展開は、dipoleを構成する2つの音源間距離 d が極限的に0に近くなければ成り立たない。つまり、指向係数が $\cos\theta$ になるのは $d \rightarrow 0$ が成立するときのみであり、特に $d > \lambda/2$ のときには8の字型ですらなくなり歪な指向特性となる。しかし、2つの音源間距離 $d \leq \lambda/2$ であれば $\cos\theta$ に近い8の字型の指向性となることは、(2.1)式を直接プログラミング化した数値計算により容易に確認できる。

このように、dipoleを用いて指向性音源を表現することにより、実在する指向性音源が模擬できる可能性が示唆される。しかし、防音壁の挿入損失を解析することを考えたとき dipoleには実在する指向性音源にはないような以下のような問題が生じた。

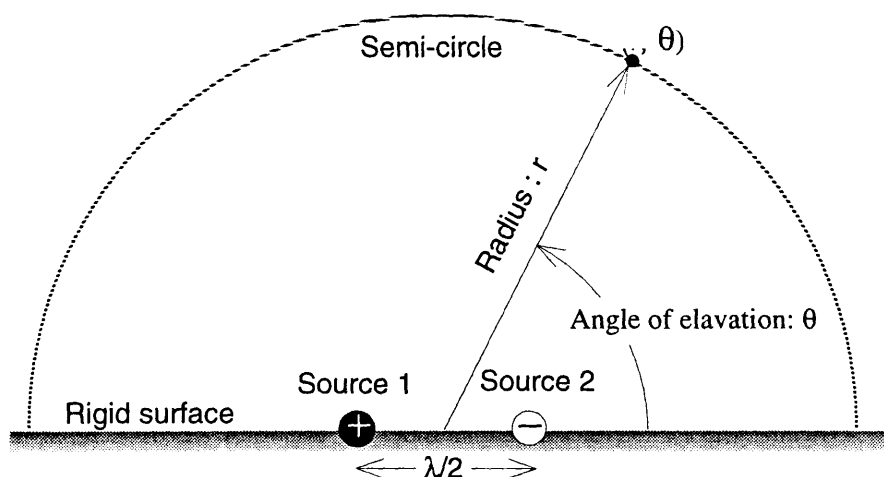
問題の1点目として、dipoleによればFig. 2.1の $\theta = 90^\circ$ 、すなわち $x = 0$ なる受音領域において音圧が0となることがあげられる。鉛直方向に強い指向性を扱う場合には dipoleを構成する2つの音源は y 軸上におくため、 $\theta = 0^\circ$ のところ音圧が0となってしまう。この向きに防音壁がある場合には、挿入損失の計算自体ができない。続いて問題の2点目は、dipoleによると音圧レベルでは8の字型であり y -軸に関して左右対象となるものの、音圧としてみれば y -軸を挟んで正負が逆、つまり位相が逆となり、音源の左右で対称とはならないことがあげられる。左右で位相がことなるため、防音壁を dipoleの右側に置くか、左側に置くかで遮音効果が異なってしまうことが、これまでの検討から明らかになっている。

これらの問題点を考えると、dipoleによる防音壁の挿入損失の検討では、実在する指向性音源に対する挿入損失の傾向を正しく評価できない。

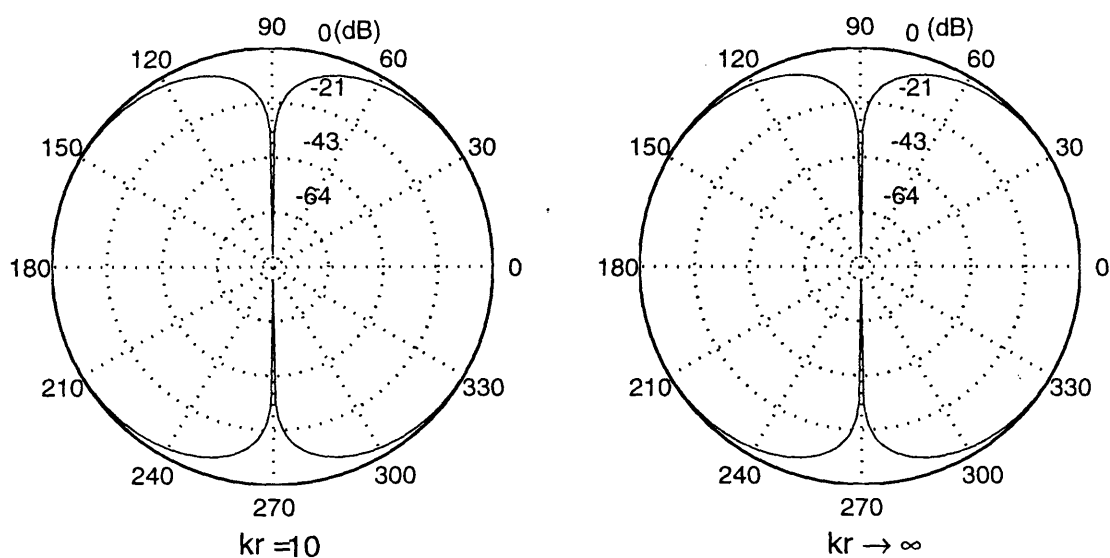
そこで、dipoleと同じ multipoleの一種である quadrupole[19]を用いた指向性の検討も行った。2つの dipoleを同じ向きで* 同一軸上に並列させた longitudinal quadrupoleにし、2つの dipoleを直行させた lateral quadrupoleにし現実味の乏しい指向性しか作成できなかった。

なんらかの糸口を見出すため、反射性の地面に dipoleを置き実音源に加え虚音源の干渉効果の状況下で指向性の変化を探ってみた。

* 位相的に同相となる向き、という意味である。



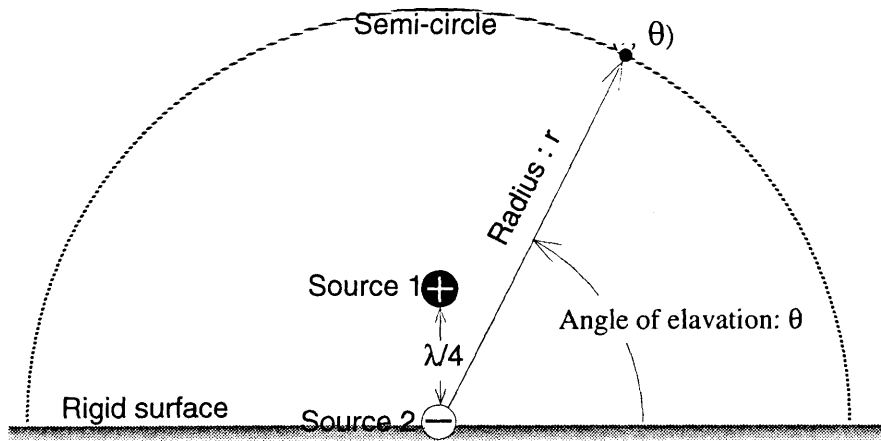
(a) dipole の配置



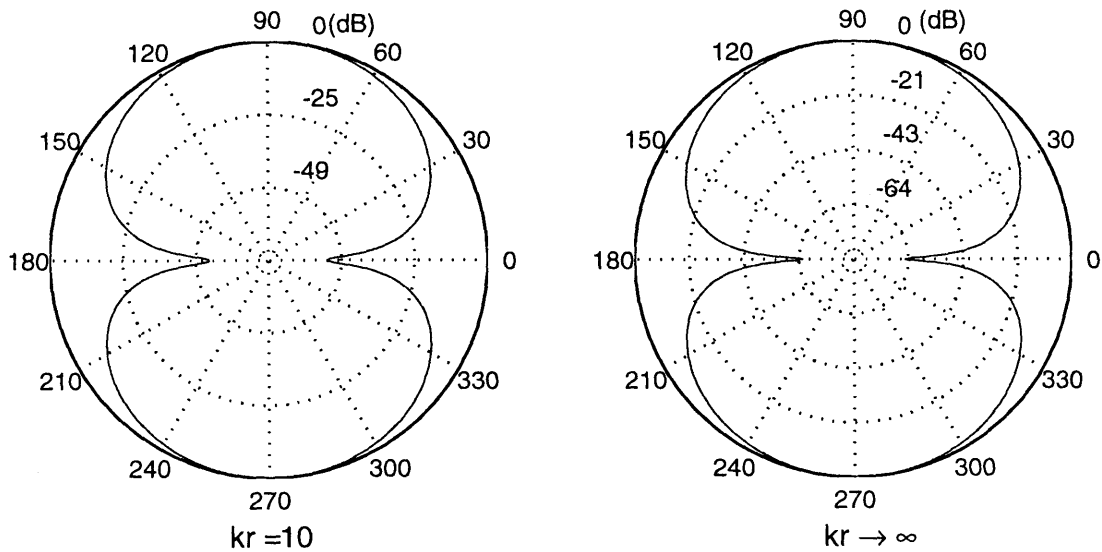
(b) dipole の指向性

Fig. 2.2 dipole を地面に接して水平配置

実在する音源は、通常は地面に接しているか地面の上に存在している。そこで、dipole を剛な地面上に置くとにより、その指向性がどのようなかを検討した。Fig. 2.2 (a) のように2つの点音源を $d = \lambda/2$ だけ離して地面に接して置くと、地面のない場合と比べて音圧が2倍となるだけであるため、(b) に示すように水平方向に強い8の字型の指向性となった。また、その指向性も $r = 10/k$ においても $r \rightarrow \infty$ においても同様な指向性となり、遠方音場が音源から近い距離においても実現されている。



(a) dipole の配置



(b) dipole の指向性

Fig. 2.3 dipole を地面より上に鉛直配置

一方, Fig. 2.3 (a) に示すように, 間隔にして $\lambda/4$ ほど離れている 2 つの点音源を地面から $\lambda/4$ 離して鉛直に配置すると, 鉛直方向に強い指向性が実現できる. (b) により $r = 10/k$ と $r \rightarrow \infty$ とを比較すると, Fig. 2.2 で示した水平配置の場合と異なり, 無限遠における指向性のほうが強度が強くなっていた. しかし, その指向特性は 8 の字型に近いものであるが, 音圧が 0 となる位置が存在していない. また, 位相的には左右対称でとなることは, 音源の配置からもわかる. このように, dipole の配置を工夫することにより実在する音源の指向特性に, より近いものが表現できることがわかる.

Fig. 2.3 (a)においては地面に対する鏡像を考えている。そこで、鏡面となる地面がない場合は Fig. 2.4 に示すように、3つの無指向性点音源を同一直線上に等間隔に配置すればよい。例えば、 y 軸上に3つの無指向性点音源を等間隔に配置すると、鏡面のある Fig. 2.3 (a) と全く同じ状態となり、鉛直方向に強い指向性が表現できる。また、 x 軸上に3つの無指向性点音源を配置すると水平方向に強い指向性が表現できる。しかも、音圧が0となる位置が存在せず、音源の配置からわかるように位相的には左右対称となる。また、水中パイプオルガンの一次モードの音響放射に関しては、Fig. 2.4 のような位置関係、位相関係の3つの点音源からの音響放射で近似的に表されることが示されており [18]、実在する音源との対応もよい†。

以上から、無指向性点音源を組み合わせることにより、実在する音源の指向特性に近い指向性音源作成可能が示唆された。これらの指向性は音源間の距離が波長に比べて小さいときにうまく表現されるため、1つの指向性音源と考えたとき、その大きさは非常に小さく、大きさが無視できる音源といえる。また、その音源間の距離を変えたり、更にはそれぞれの点音源の体積流の振幅を調整することにより、自動車走行騒音や工場騒音などの指向性に近い指向特性を持った音源も作成できると考えられる。そこで、続く 2.2 節において、無指向性点音源の組み合わせを点音源列という定義から再整理することから始め、実在するものと近い指向性音源を作成する。

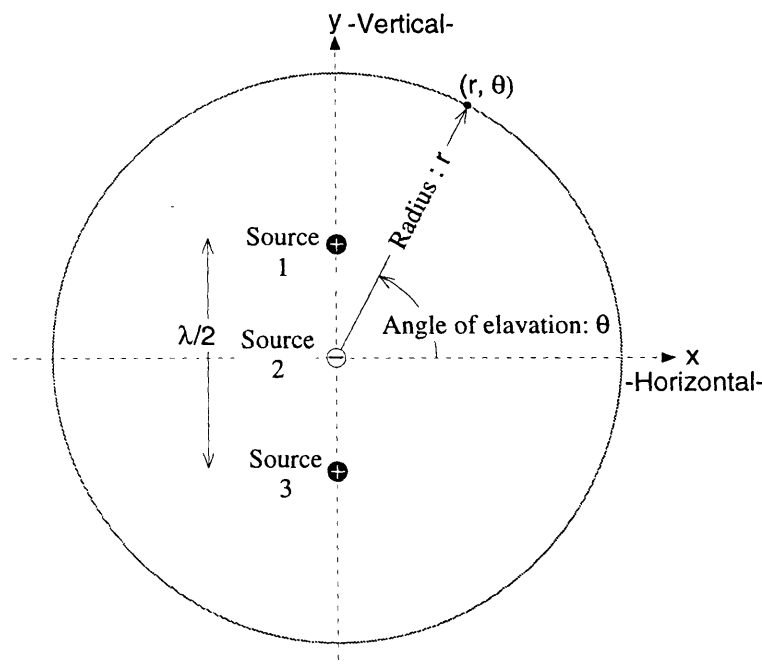


Fig. 2.4 3つの無指向性点音源を原点に対称に配置

† dipole を Fig. 2.3 (a) に示す位置から上方に移動させた場合、その移動距離によっては位相的に左右対称で音圧が0となる位置がないという指向特性を示すものがある。しかし、これは quadrupole [19] とは位相的な関係が異なる。物理的な意味が明確でない上、そのような音源が実在するかどうか不明である

2.2 3点音源による指向性音源の表現

2.2.1 自由空間内の3点音源

自由空間において、複数の点音源を等間隔に並べた点音源群は指向性を持ち、それぞれの点音源の体積流の振幅に荷重をかけることにより、指向性が調整できる [20]。Fig. 2.5 のように、3つの無指向性点音源を x 軸上または y 軸上に配置し、両端の2音源と中間に位置する音源が逆相であるとき、音圧レベル、位相とも左右に対称な音場が再現可能となる。以後、この点音源群を3点音源と呼ぶこととする。3点音源の音源間の間隔や振幅を調整することにより、指向特性がどのように変化するか、また、遠方音場となり指向性が安定するまでの距離を検討した。

例えば、波数 k に対して、両端の2音源の間隔 d は、

- $d = \lambda/2$ すなわち, $kd = 3.1$,
- $d = \lambda$ すなわち, $kd = 6.2$

の2通り設定する。指向性を観測する同心円の半径 r は、

- $kr = 2$,
- $kr = 10$,
- $kr = 50$,
- $kr \rightarrow \infty$

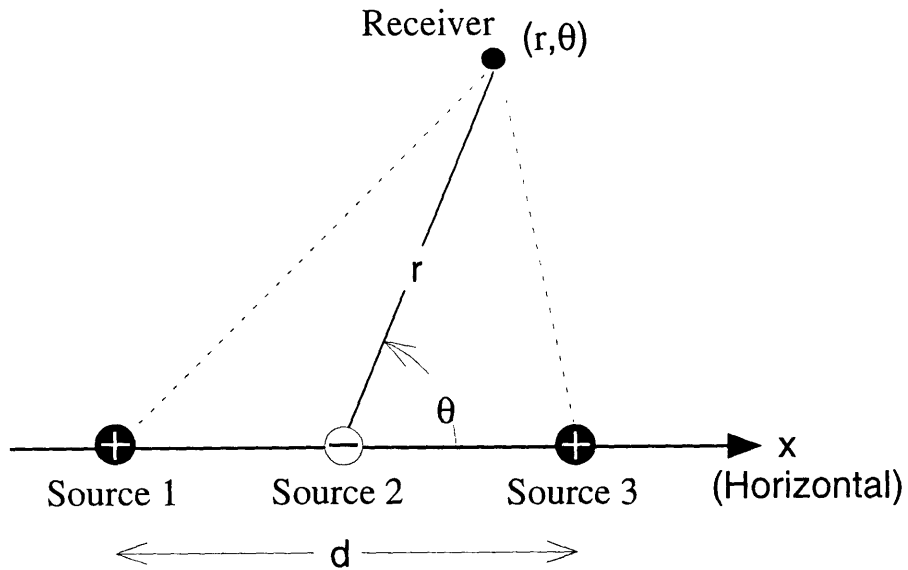
の4通り設定する。また、各点音源の体積流の振幅比は、Table 2.1 に示すような、2つの場合 $weight1$ および $weight4$ を設定する。間隔 d と各点音源の体積流の振幅比の組み合わせにより、どのような指向性が表現されるかを、これから調べてゆく。ただし、ここでは指向性を検討するのみであるため、Fig. 2.5 の (a), (b) どちらかの検討で十分である。そのため (a) の場合、すなわち3点音源を x 軸上に配置したときについて、 $z = 0$ 面における指向性を計算し x 軸方向の音圧により基準化した指向性を比較することとする。

Table 2.1 3つの点音源体積流の比

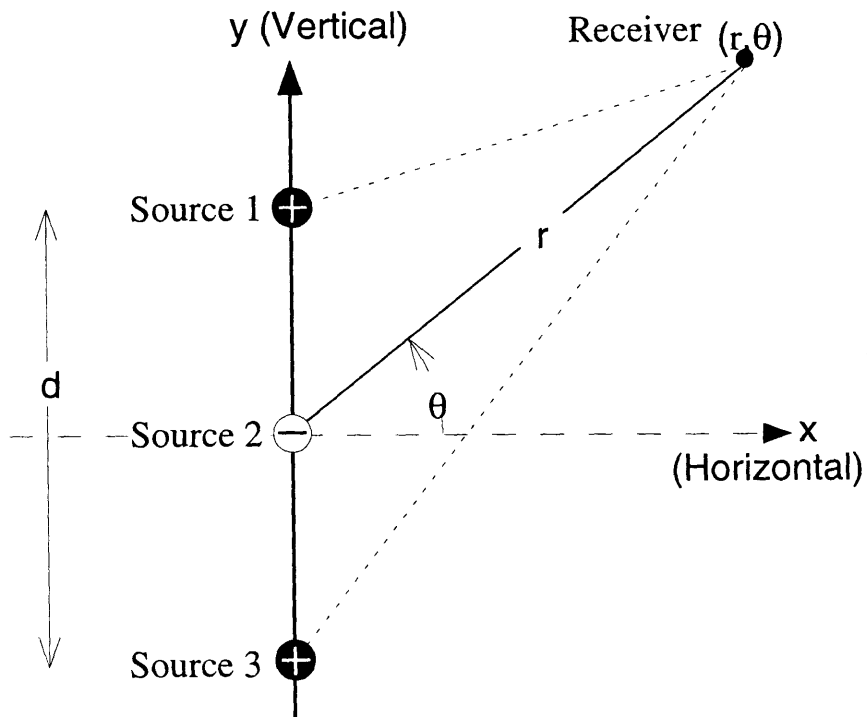
Pattern	Source 1	Source 2	Source 3
$weight1$	1	1	1
$weight4$	1	4	1

Table 2.2 音源間の間隔と振幅による4つのタイプ

Type	Type IV	Type III	Type II	Type I
kd	6.2	6.2	3.1	3.1
Amplitude	$weight1$	$weight4$	$weight1$	$weight4$



(a) 水平配置



(b) 鉛直配置

Fig. 2.5 自由空間内の3点音源の配置

まず, Type IV に関して, すなわち両端の音源間が波長 λ に等しい距離ほど離れている $kd = 6.2$ を満たし, また振幅に関しては3つの音源の振幅が等しい *weight1* のタイプの指向性を Fig. 2.6 に示す. 水平方向から鉛直方向にかけて一様に増加もしくは減少しているような単純な指向性で

はなく、増減を繰り返すものとなっている。

次に、両端の音源間が波長 λ に等しい距離ほど離れている $kd = 6.2$ を満たし、振幅に関しては中心に位置する音源の振幅を4倍とする Type III の指向性を Fig. 2.7 に示す。水平方向に強い指向性が現れており、水平方向に比べて鉛直方向は9 dB程度音圧レベルが小さくなっている。また、左右対称な指向性となり、位相的にも左右に対称である。しかも、無限遠と $r = 2/k$ という音源にごく近接している同心円上の指向性もほぼ等しく、 $r = 2/k$ で遠方音場となっている。

続いて、音源間の間隔を半波長 $\lambda/2$ すなわち $kd = 3.1$ と狭めた場合の指向性を検討する。振幅に関して3つの音源の振幅が等しい Type II のタイプの指向性を Fig. 2.8 に示す。単純な指向性ではなく、増減を繰り返すものとなっている。一方、中心に位置する音源の振幅を4倍とする Type I の場合は Fig. 2.9 に示すように、 $r = 2/k$ という近接音場を除いて水平方向から鉛直方向にかけて緩やかに音圧レベルが減少する指向特性を示し、その減少値も5 dB程度である。 $r = 10/k$ における指向性は、 $r = 50/k$ および $r \rightarrow \infty$ の指向性とほぼ等しくなっている。特に、 $r = 50/k$ と $r \rightarrow \infty$ の同心円においては、各角度での x 軸方向の音圧により基準化した音圧レベル差は0.1 dBほどの違いもない。従って、 $r = 50/k$ の距離で遠方音場が実現している。

この中で自動車走行騒音や工場騒音などの指向性に近いのは、Fig. 2.7 および Fig. 2.9 に示した Type III と Type I のタイプによるものであろう。なぜならば、音圧レベルが急激に低下する領域が存在していない点、前章にあげた走行車両や工場建屋透過音などのように水平方向から鉛直方向に一様に低下もしくは増加している点があるからである。ただ、点音源群という観点からは音源間の間隔は自由に設定しても構わないが、その点音源群に物理的な意味づけ、もしくは、実在する音源との対応があるものが適している。既に、2.1節で示したように水中パイプオルガンの音響放射が、両端の音源間隔を半波長とする Type I の位置関係、位相関係に対応している。従って、実在する音源との対応を考慮すると Type I, Type II が適していることとなる。特に、Type I は前章で述べた走行車両の指向特性と極めて類似している。また、音源から極端に遠くない $r = 50/k$ 地点でも遠方音場が成立しており、音源近接場の影響を受けない安定した領域が大きくとれ、次章でおこなう回折音場の解析上の大きな利点となる。

ところで、 $r = 50/k$ は距離にすると、例えば1000 Hzに周波数に対しては $r = 2.7$ となる。この程度の距離において遠方音場が成立するため、Type I によると3 m前後の距離に防音壁を設置する状況で遠方音場での検討が可能となる。

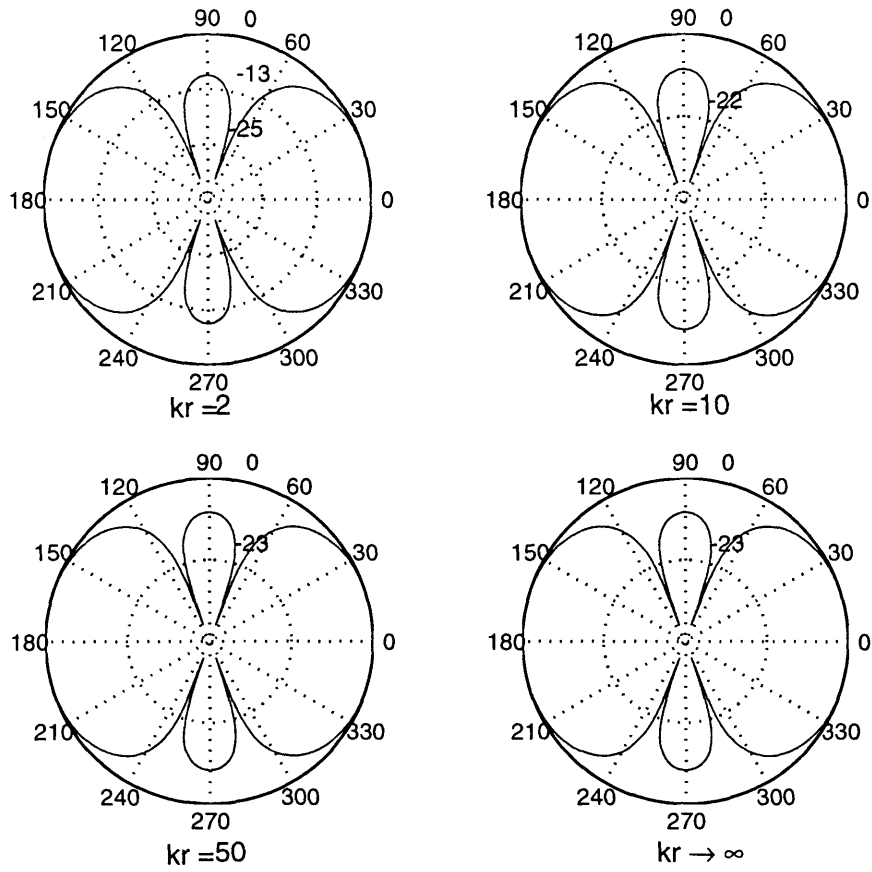


Fig. 2.6 3点音源の指向性 -Type IV-

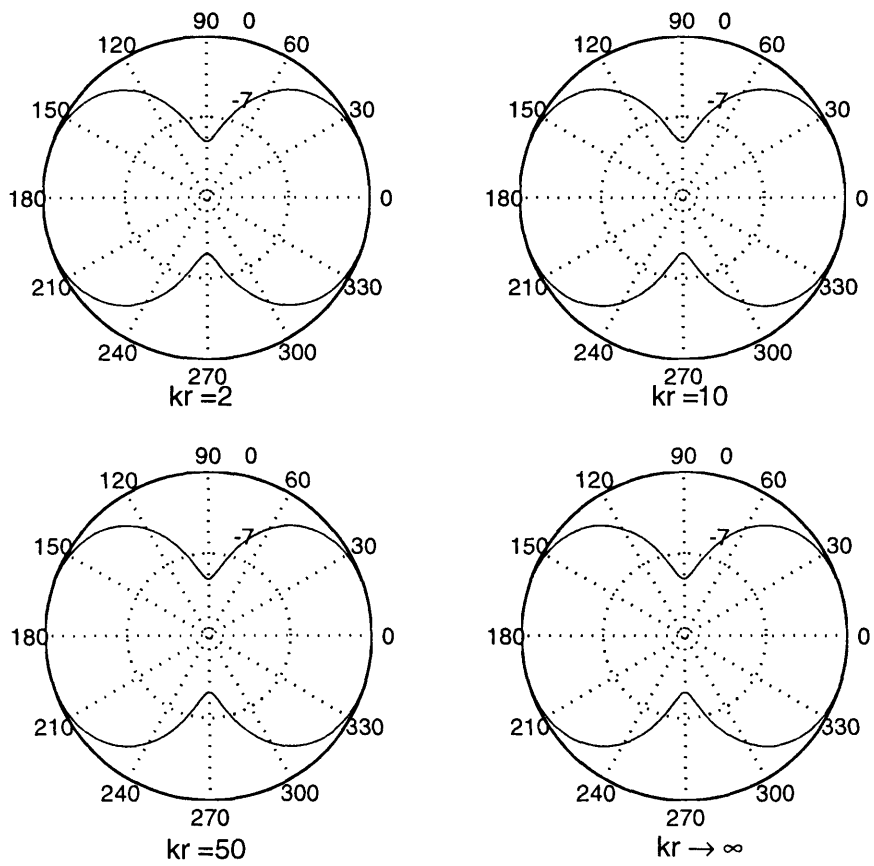


Fig. 2.7 3点音源の指向性 -Type III-

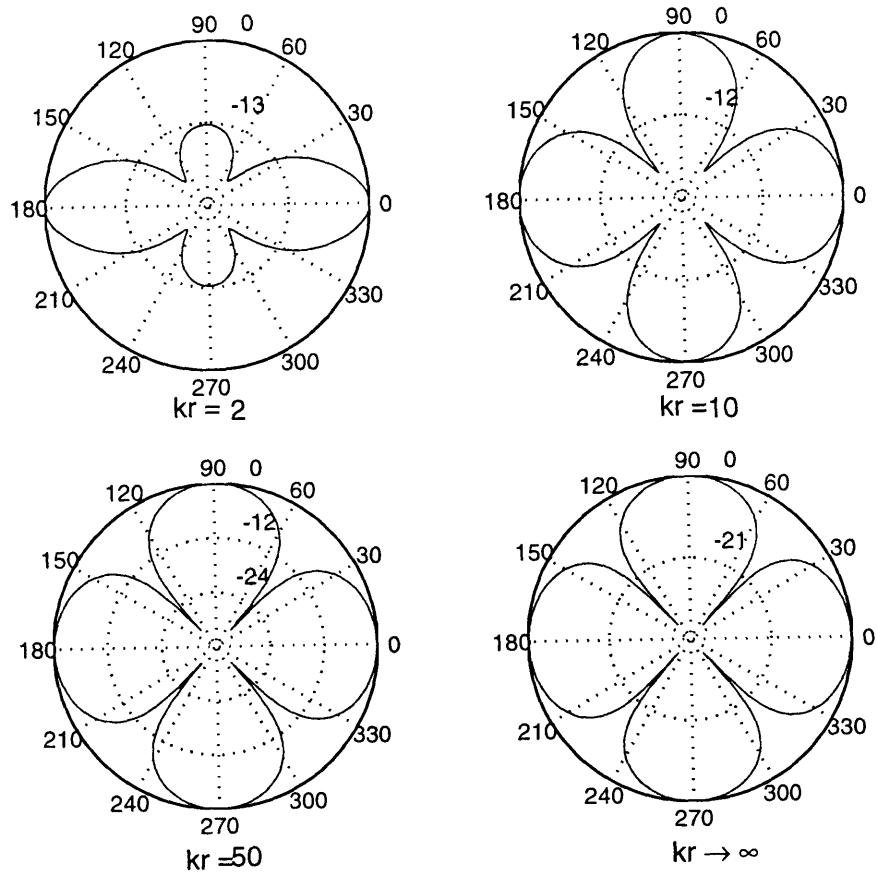


Fig. 2.8 3点音源の指向性 -Type II-

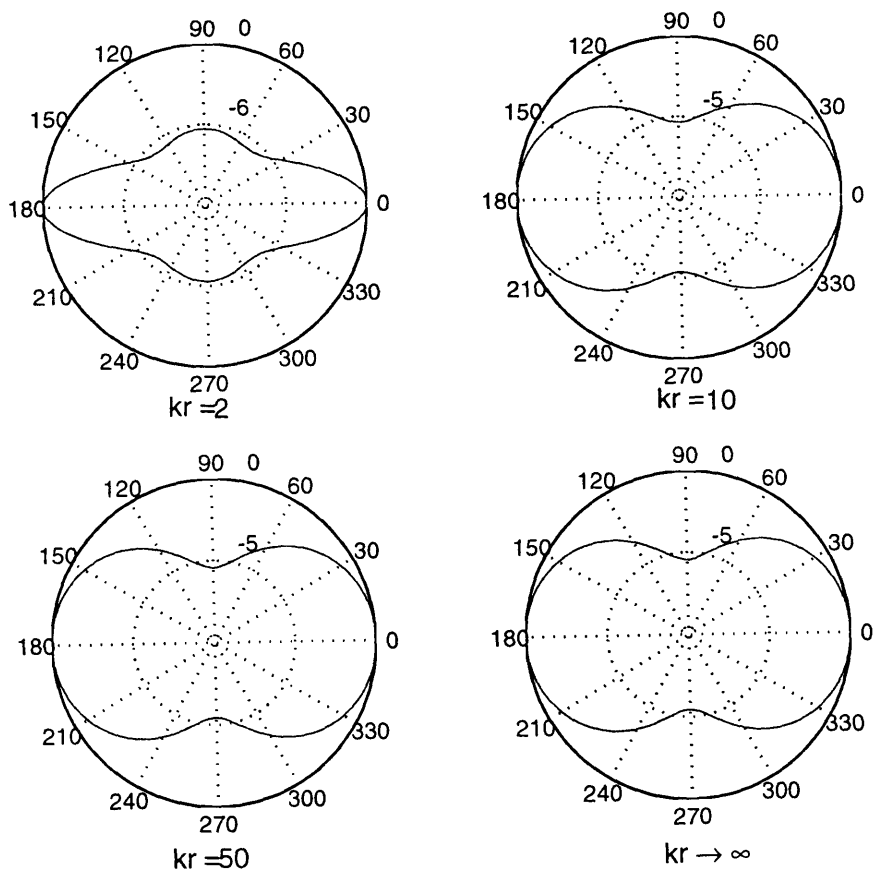


Fig. 2.9 3点音源の指向性 -Type I-

2.2.2 反射性地面上の3点音源

我々の身の回りに実在する騒音源は地面の上に存在している。そこで、3点音源に関しても反射性地面の上において、その指向性が如何に変化するかを検討する。水平方向配列の3点音源が地面に接して置かれた場合には、地面がないときに比べ音圧が2倍となるだけで指向性は何ら変わらない。しかし、地面から離してゆくと、実音源だけでなく虚音源が生じ、計6個の点音源間の複雑な干渉により指向性は変化する。

Type I の水平方向に強い指向特性を持つ3点音源を、Fig. 2.10 に示すように地面より上空に配置する。Fig. 2.11, Fig. 2.12, Fig. 2.13, Fig. 2.14 に、地面からの距離がそれぞれ $0.25d$ m, $0.5d$ m, d m, $1.5d$ m の場合の指向特性を示す。

3点音源が地面に近い $0.25d$ m (Fig. 2.11) では、 $r = 10/k$ 以遠では水平方向から鉛直方向にかけて一様に弱くなる指向特性を示し、 $r = 50/k$ 程度の距離でほぼ遠方音場が成立している。しかし、3点音源が地面上にあるときに比べて、強い指向性となっている。3点音源を地面からもう少し離れた $0.5d$ m (Fig. 2.12) でも $r = 10/k$ あたりで一様な指向性となっているが、 $r = 50/k$ の距離でも遠方音場とはなっていない。地面からさらに離して d m (Fig. 2.13) に3点音源を置くと、水平方向だけでなく、鉛直方向にも極大値を持つびつな指向特性となっている。地面から $1.5d$ m (Fig. 2.14) の位置に置いたときも同様で、一様な指向特性が崩れている。極僅かな設置場所の違いで、指向特性が大きく異なることがわかる。

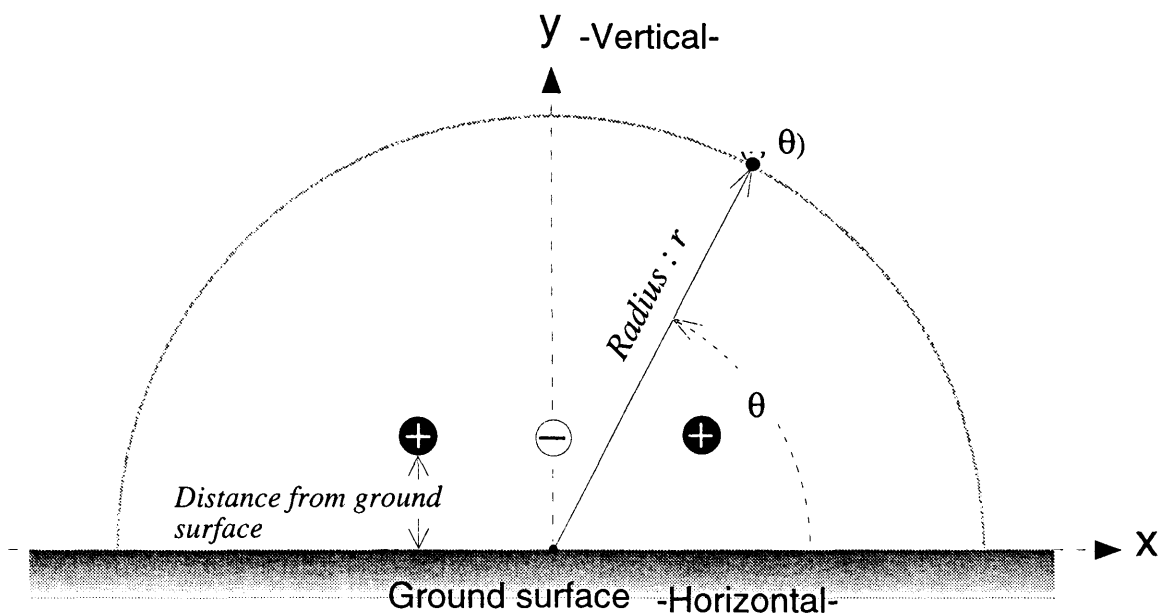


Fig. 2.10 反射性地面上の3点音源

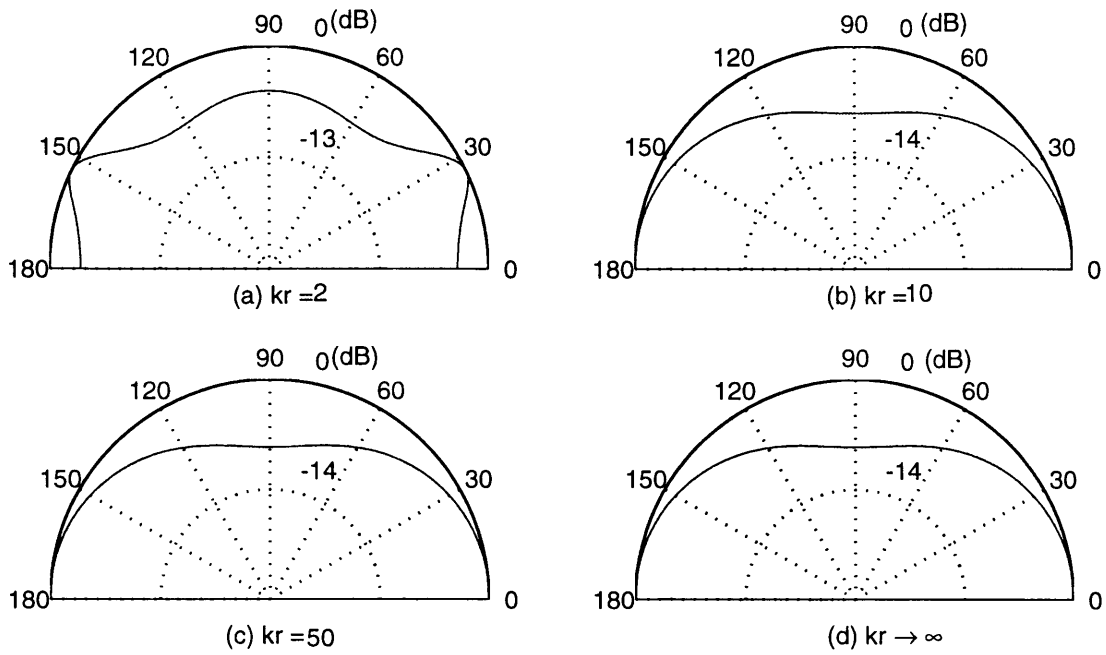


Fig. 2.11 3点音源 Type I を地面上 0.25d m に置いたときの指向特性

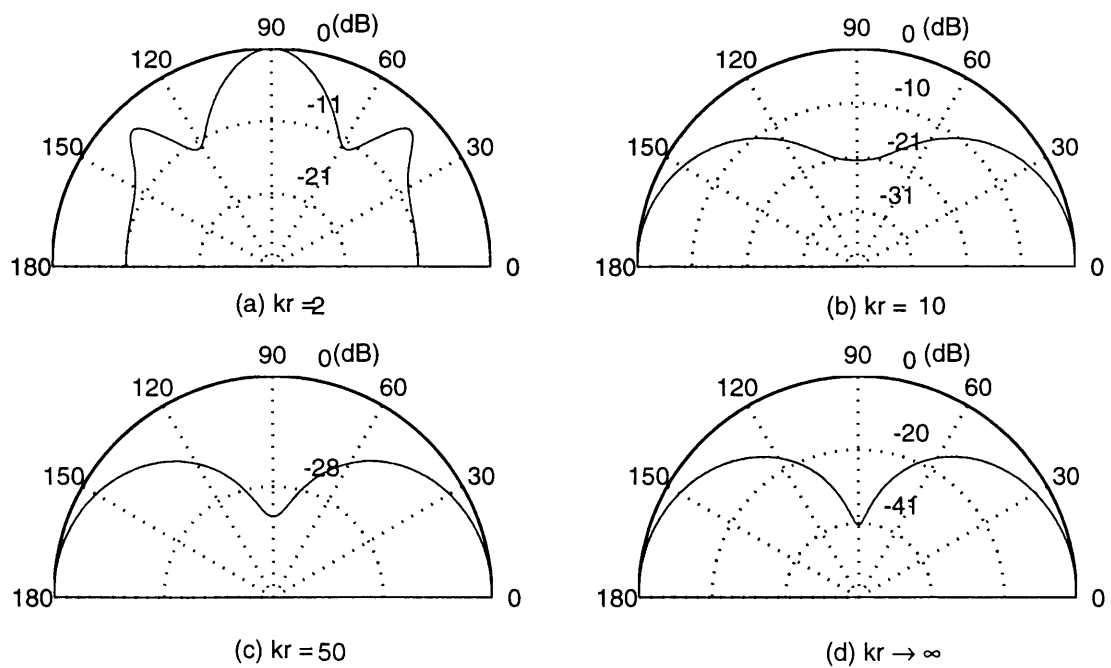


Fig. 2.12 3点音源 Type I を地面上 0.5d m に置いたときの指向特性

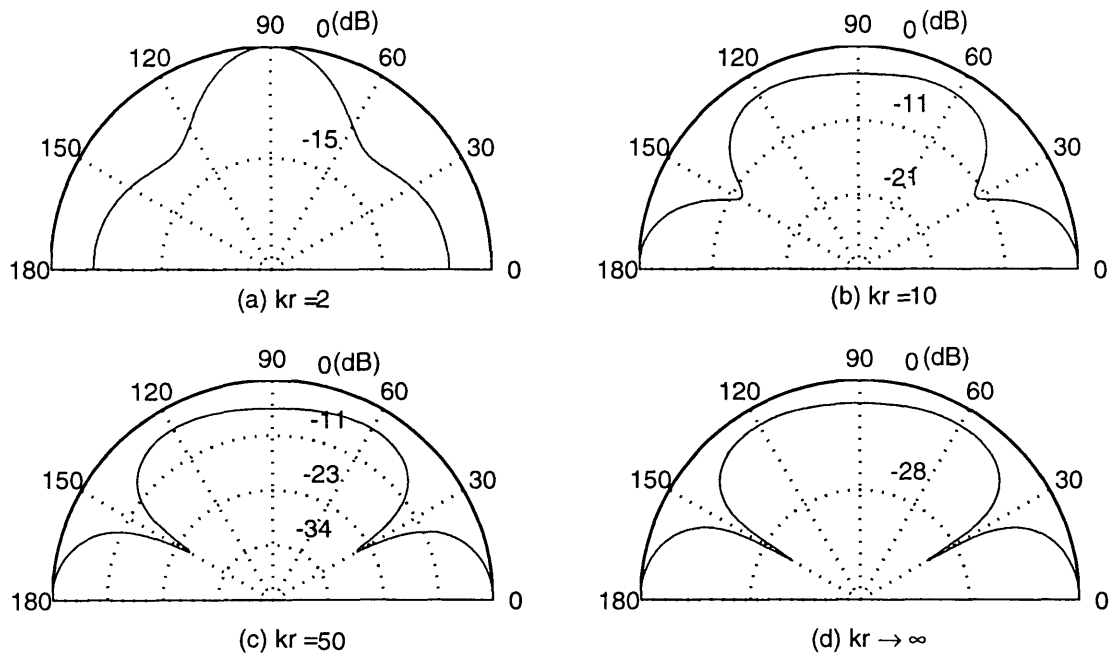


Fig. 2.13 3点音源 Type I を地面上 d m に置いたときの指向特性

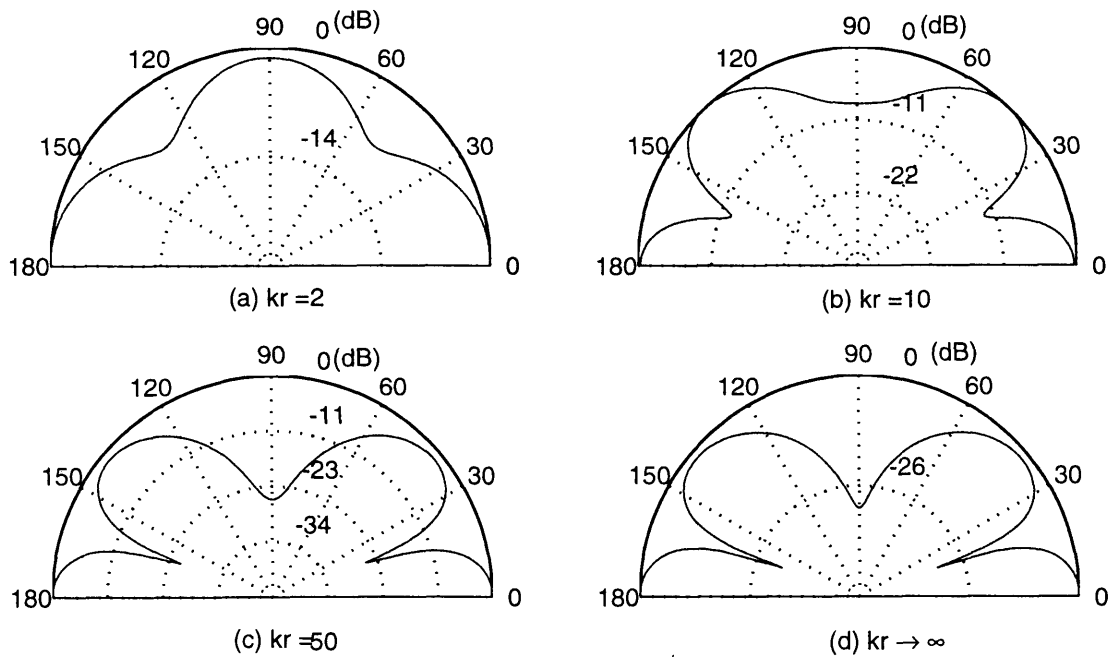


Fig. 2.14 3点音源 Type I を地面上 $1.5d$ m に置いたときの指向特性

このように3点音源を用いれば、指向特性を持つさまざまな音源を任意に近い意味で作成可能となる。特に、Fig. 2.9, Fig. 2.11 に示した指向性は、水平方向から鉛直方向にかけて音圧レベルが緩やかに低下し、前章における福島らが阪神高速道路における走行車両の指向特性を解析したものと類似しており、現状に即した指向特性が表現されている。しかし、受信領域によっては音源の近接空間であるために指向特性が安定しない領域もあれば、指向性が安定する遠方音場となる領域もある。そのため、防音壁の遮音効果の検討を行う際には、近接空間に防音壁があるのか、遠方音場に防音壁があるのかに留意する必要がある。しかしながら、後の3.1節に示すように、波動理論に基づいた解析解により障壁背後の音圧を求めることができるため、指向性を考慮した障壁の遮音効果の傾向分析で威力を発揮するなどのメリットもあり、3点音源は非常に使い勝手の良い指向性音源である。

ここで示した3点音源は複数の音源をごく近距離に配置して作成した音源である。従って、音源としての大きさは非常に小さく、無視できる程度である。しかし、実在する音源には、当然大きさがある。小型のスピーカからオートバイなどは音源から受信点間にある程度の距離があれば、それらの音源としての大きさは受信点からみて無視できるものであろう。しかし、大型のトラックなどでは、例えば20 m程度離れた距離であっても、ボディサイズからすれば、その程度の距離は遠方とはならないと推測される。従って、音源としての大きさが無視できる3点音源による実在する音源の模擬は、受信点からみて、また、障壁があれば障壁からみて、音源の大きさが無視できる範囲が妥当だと考えている

2.3 指向性の安定性について

これまで、「遠方音場」また「指向性の安定」という言葉を定義しないまま使用してきた。ここで、これらの厳密な定義を行うこととする。

Goldstein[22]は、「遠方音場 (far field) は、音源やこれと干渉する個体表面から十分離れた (波長と音源の代表長さの両方に関して) 領域で圧力場が次式

$$p(r, t) = \frac{1}{4\pi r} g(t - r/c, \theta) \quad (2.4)$$

で特徴づけられる領域である。」と定義している。ここで、 t は時間、 g は一般的な圧力場で適用できる関数である。(2.4) 式より、受信点の方向つまり θ が同じならば、 r による距離にのみ依存する領域が遠方音場と言える。

それに対して本論で用いる「指向性の安定」という言葉も遠方音場とほぼ同じ意味であるが、全く同じ意味では用いてはいない。「指向性の安定」に関しては、仰角が 0° つまり $\theta = 0^\circ$ の音圧で基準化した無限に遠い同心円上の音圧レベルと半径 r の同心円上の音圧レベルの差が、全ての方向で 0.1 dB 以下[†]であるとき、距離 r で「全方位で指向性が安定する」と定義することとする。

数式表現によれば、音源を中心とする極座標表示で、受音点 (∞, θ) における音圧を $p(r, \theta)$ により表すとき、

$$\left| 20 \log_{10} \left| \frac{p(\infty, \theta)}{p(\infty, 0)} \right| - 20 \log_{10} \left| \frac{p(r, \theta)}{p(r, 0)} \right| \right| \leq 0.1, \quad \text{for } 0 < \theta < 360 \quad (2.5)$$

が成立するとき「全方位で指向性が安定する」と呼ぶこととなる。

それに対して、既に示したように指向特性に極大値や極小値が現れる指向性音源に対しては、極小値近傍の θ において

$$\left| 20 \log_{10} \left| \frac{p(\infty, \theta)}{p(\infty, 0)} \right| - 20 \log_{10} \left| \frac{p(r, \theta)}{p(r, 0)} \right| \right| > 0.1$$

となってしまう。しかし、極小値近傍の θ を除く広い範囲では上式が 0.1 に収まっている。このようなとき、「仰角 θ の近傍を除き指向性が安定する」と表現する。

同様に特定の仰角に着目したとき、

$$\left| 20 \log_{10} \left| \frac{p(\infty, \theta)}{p(\infty, 0)} \right| - 20 \log_{10} \left| \frac{p(r, \theta)}{p(r, 0)} \right| \right| \leq 0.1$$

が成立すれば、「仰角 θ で指向性が安定する」となどと表現する。

「全方位で指向性が安定する」ような例としては、ここで作成した3点音源 Type I があり、 r がほぼ $12/k$ 以上で「全方位で指向性が安定」していた。これは、 1000 Hz で考えると、3つの点音源のなす距離は 0.17 m 、「全方位で指向性が安定」する同心円の半径はおよそ 0.65 m となる。従って、 1000 Hz の周波数では3つの点音源の中心から 0.65 m 以上の距離において、音源の大きさを考慮しない遠方音場として解析ができることがわかる。

[†] 差の上限値を、ここでは 0.1 dB と設定した。上限値を緩くすると後に示す挿入損失の近似精度の低下につながる