

## Study on the energetic prediction model of sound propagation

福島, 昭則

<https://doi.org/10.15017/458552>

---

出版情報 : Kyushu Institute of Design, 2002, 博士 (工学) , 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

## 第4章

# 指向性点音源に対する

# 障壁の挿入損失

騒音制御における遮音壁の音響設計では、前川の実験チャート〔4-1〕により計算するのが一般的である。前川の実験チャートは無指向性点音源を仮定しているが、実際の音源は指向性を有する。例えば通常は無指向性点音源として扱っている自動車走行騒音も上方向に比べ側方に強い指向性を有していることが報告されている〔4-2〕。また無指向性点音源が地表面近傍にある場合には、直接波と地面での反射波により見かけ上は指向性点音源のような音圧分布を示すため、遮音壁の挿入損失は前川の実験チャートどおりにはならない〔4-3〕。

松本〔4-3〕は、指向性点音源に対する障壁の挿入損失に関する指向性の影響は音源を中心とした回折点までの距離の同心円上における観測点方向と回折点方向の音圧レベル差により近似できることを報告している。

ところで、文献〔4-4〕に障壁に垂直に平面波が入射したときの等位相分布図が掲載されているが、障壁の影の領域では障壁のエッジを中心とした同心円であり、あたかも障壁のエッジに音源があるかのような分布となっている。このことに着目し、藤原〔4-5〕はエッジへの吸音材の設置により、大久保〔4-6〕はエッジのソフト化によりエッジポテンシャルを低減し、影の領域での音圧を低減させる手法を報告している。そしてそのアイディアは道路交通騒音対策用遮音壁として実用化されている。また尾本〔4-7〕はアクティブ制御によりエッジポテンシャルを低減し、影の領域の音圧を低減させる手法を報告している。大西〔4-8〕はこれらの考えを併用して遮音壁先端をソフト化することにより、移動音源に対しても適用可能なアクティブ遮音壁を開発している。

これらの研究にみられるように、障壁背後の音場はエッジポテンシャルの影響を強く受けている。松本が指向性音源に対する障壁の挿入損失を検討するにあたりエッジの音圧に着目したのもこれらの研究結果を踏まえたものと考えられる。しかし松本が指摘しているように指向特性が複雑になると必ずしもエッジの音圧のみでは考慮しきれない。

本研究では第5章において地表面近傍に無指向性点音源が設置された場合の地表面効果を扱うが、点音源が地表面近傍であれば直接波と地表面反射波の合成音圧を指向性点音源として扱えると考えられる。また第6章では  $\cos \theta$  の指向性点音源からの騒音伝搬を扱う。

本章では、松本と同様の方法を用いて、もっとも単純な2つの点音源の振幅と位相を調整

することで指向性音源をモデル化し、松本が報告している指向性音源に対する挿入損失の計算モデルの妥当性を確認する。最初に、半波長の間隔で設置された2つの無指向性点音源で $\cos \theta$ の指向特性を近似し、そのときの障壁の挿入損失について松本のモデルの妥当性を検討する。次に、任意の間隔で設置された2つの無指向性点音源に対する障壁の挿入損失について松本のモデルの適用範囲を検討する。さらに、松本のモデルが適用できる場合と適用できない場合の音場の特徴について検討する。

本章の結果は、第5章「地表面効果のエネルギーモデル」での障壁が設置されたときの地表面効果(直接波と地表面反射波により見かけ上の指向性音源となる場合)、および第6章「高架裏面反射音のエネルギーモデル」での境界エネルギー積分法によるエネルギー予測( $\cos \theta$ の指向性点音源に対する障壁の遮蔽効果)において使用する。

## 4. 1 障壁周囲の音場に関する波動解

## 4. 1. 1 波動解

最初に、障壁周囲の音場計算に用いた波動解について述べる。

松本は音場計算に *Macdonald* の厳密解 [4-9] の *Clemmow* の漸近解 [4-10,11] を用いているが、ここでは川井 [4-12] により広範囲に精度がよいことが確認されている *Kouyoumjian* の漸近解 [4-13] を用いた。また障壁面に対する音源と受音点の虚像の考え方については松井の方法 [4-14] を用いた。

図 4-1-1 に示すように音源  $Q$ 、観測点  $P$ 、回折点  $O$  を考える。このとき音源  $Q$  から観測点  $P$  への伝搬経路に関する音場  $\phi_{00}$  は次式で与えられる。なお、時間項は  $e^{-i\omega t}$  であり、以下での数式表現では省略する。

$$\phi_{00} = \begin{cases} 0 & , \text{ for } \theta \geq 3\pi \\ \frac{e^{-i\pi/4}}{\sqrt{\pi}} \cos^2\left(\frac{\pi-\theta}{4}\right) F(\tau) \cdot \frac{e^{ikR_d}}{R_d} & , \text{ for } 3\pi > \theta \geq \pi \\ \frac{e^{ikR_g}}{R_g} - \frac{e^{-i\pi/4}}{\sqrt{\pi}} \cos^2\left(\frac{\pi-\theta}{4}\right) F(\tau) \cdot \frac{e^{ikR_d}}{R_d} & , \text{ for } \pi > \theta \geq 0 \end{cases} \quad (4-1-1)$$

ここで、 $R_g$  は直線距離で  $R_g = \overline{PQ}$ 、 $R_d$  は伝搬経路長で  $R_d = \overline{PO} + \overline{OQ}$  である。また、 $\tau$  および  $F(\tau)$  は以下のとおりである。

$$\tau = \frac{k(R_d^2 - R_g^2)}{2R_d} \quad (4-1-2)$$

$$F(\tau) = e^{-i\tau} \int_{\sqrt{\tau}}^{\infty} e^{it^2} dt \quad (4-1-3)$$

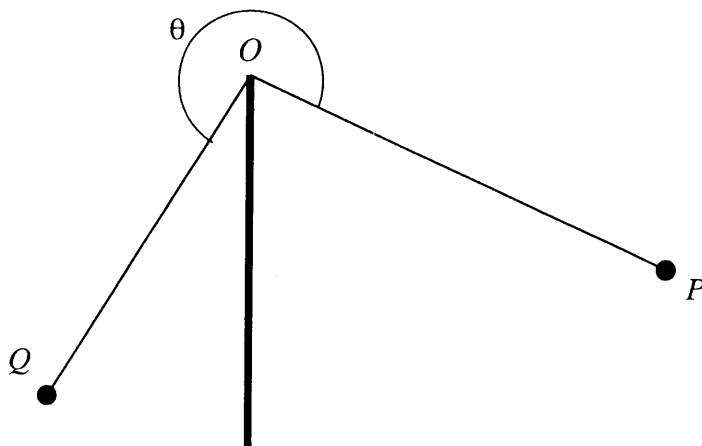


図 4-1-1. 障壁と音源・受音点の配置

また障壁面に対する音源  $Q$  の虚像を  $Q'$ 、観測点  $P$  の虚像を  $P'$  とし、図 4-1-2 に示すように  $Q \rightarrow P$  の伝搬経路以外に  $Q' \rightarrow P$ 、 $Q \rightarrow P'$ 、 $Q' \rightarrow P'$  の 3 経路についても式(4-1-1)で音場  $\phi_{nm}$  を計算する。ここで、 $\phi_{nm}$  の添え字  $n, m$  は  $n$  が音源の実像あるいは虚像を、 $m$  が観測点の実像あるいは虚像を意味し、0 のときが実像を、1 のときが虚像を表す。障壁の音源側あるいは観測点側の複素音圧反射係数を乗じて加算すれば次式により全音場が求まる。

$$\phi = \phi_{00} + Q_Q \phi_{10} + Q_P \phi_{01} + Q_Q Q_P \phi_{11} \quad (4-1-4)$$

ここで  $Q_Q$  および  $Q_P$  は音源側および観測点側の障壁表面の複素音圧反射係数である。なお、本章では障壁表面が剛な場合、すなわち障壁表面の複素音圧係数が 1.0 の場合について検討する。このとき、全音場  $\phi$  は 4 つの音場の和として以下のように表せる。

$$\phi = \phi_{00} + \phi_{10} + \phi_{01} + \phi_{11} \quad (4-1-5)$$

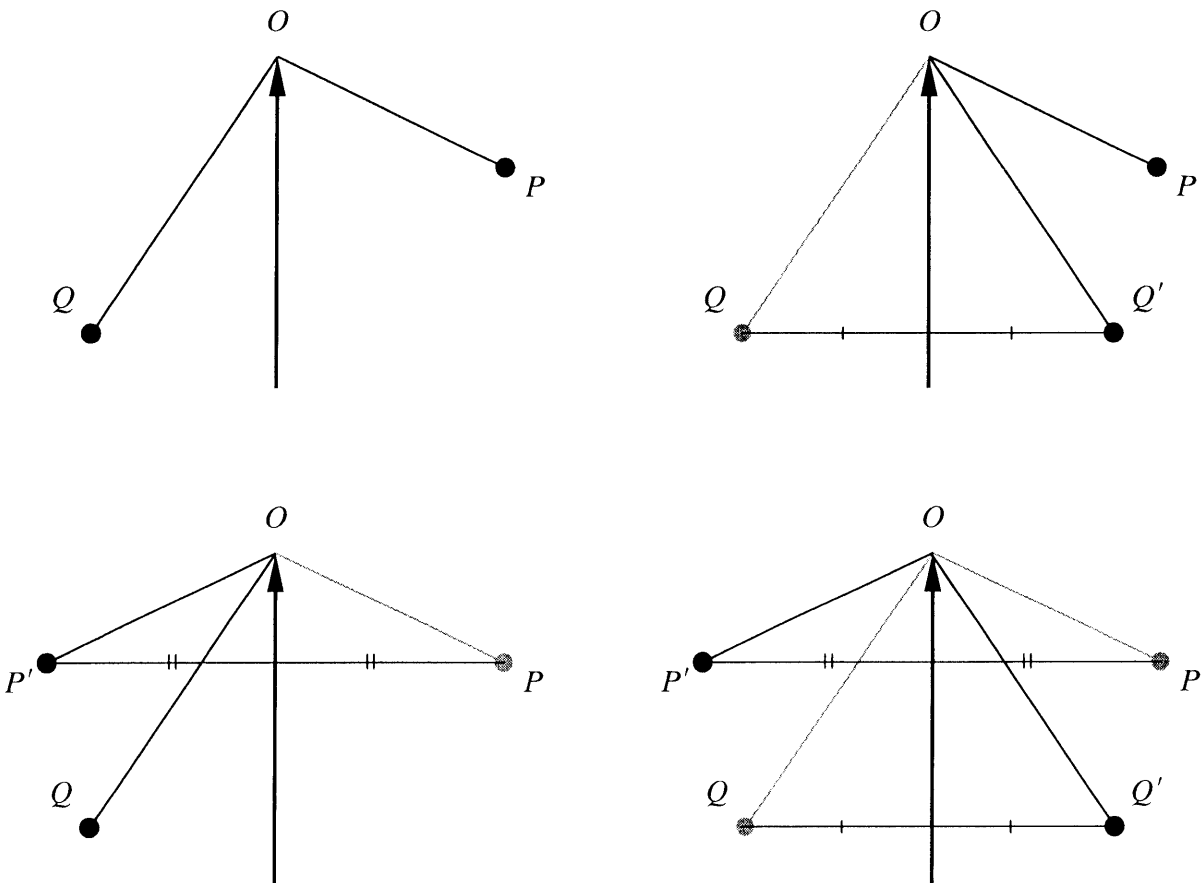


図 4-1-2. 計算で考慮する伝搬経路

障壁の挿入損失は、次式により求められる。

$$\Delta L_d = -10 \cdot \log_{10} \left| \frac{\phi}{\phi_0} \right|^2 \quad (4-1-6)$$

ここで、 $\Delta L_d$  は障壁の挿入損失(dB)、 $\phi_0$  は自由空間中での音場で、 $\phi_0 = e^{ikR_g} / R_g$  である。

#### 4. 1. 2 前川の実験チャートとの比較

式(4-1-6)の波動解による障壁の挿入損失と、騒音制御でよく用いられる前川の実験チャートの山本による関数近似式〔4-15〕を比較し両者の対応を整理する。前川の実験チャートの関数近似式を以下に示す。

$$\Delta L_d = \begin{cases} 13 + 10 \cdot \log_{10} N & , \text{ for } N \geq 1 \\ 5 \pm \frac{8}{\sinh^{-1}(1)} \cdot \sinh^{-1}(|N|^{0.485}) & , \text{ for } -0.324 \leq N < 1 \\ 0 & , \text{ for } N < -0.324 \end{cases} \quad (4-1-7)$$

ここで、 $N$  はフレネル数で、 $N = \pm \frac{2\delta}{\lambda}$  であり、 $\delta$  は経路差で  $\delta = R_g - R_d$ 、 $\lambda$  は波長である。

また  $N$  の符号は、観測点  $P$  が障壁の影の領域のとき [+], それ以外で [-] である。

式(4-1-6)と式(4-1-7)を比較するための計算条件は図 4-1-3 のとおりである。障壁から音源  $Q$  までの距離は 5m、障壁から観測点  $P$  までの距離は 1.26~158.5m まで 22 ケース、音源  $Q$  から障壁のエッジ  $O$  までの高さは 0.5~12.5m まで 7 ケース、音源  $Q$  から観測点  $P$  までの高さは 1.2~14m まで 7 ケースとした。

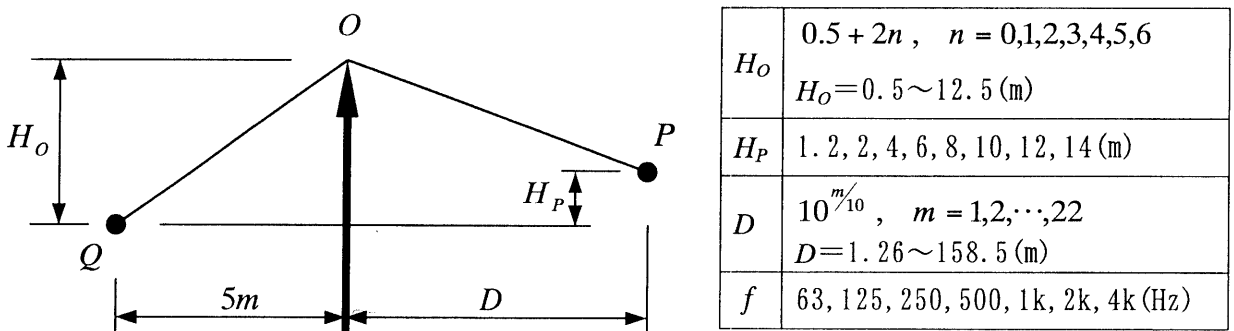


図 4-1-3. 計算条件

計算結果をフレネル数で整理して図 4-1-4 に示す。また波動解と前川の実験チャートの計算値の対応を図 4-1-5 に示す。

図 4-1-4 で式(4-1-7)の値が 5dB 以上のときに観測点が壁の領域にある場合で  $N > 0$  である。 $N > 1$  の領域では、式(4-1-7)は漸近解のデータの最小値を包絡しており、 $N < 1$  の領域では漸近解のほぼ平均的な値となっている。また図 4-1-4 でおおよそ  $N > 5$  の領域、あるいは図 4-1-5 で挿入損失が 25dB を超える範囲で前川の実験チャートと波動解との差が大きくなるケースが見られるが、これは障壁表面での反射波の影響であることが報告されている [4-16]。

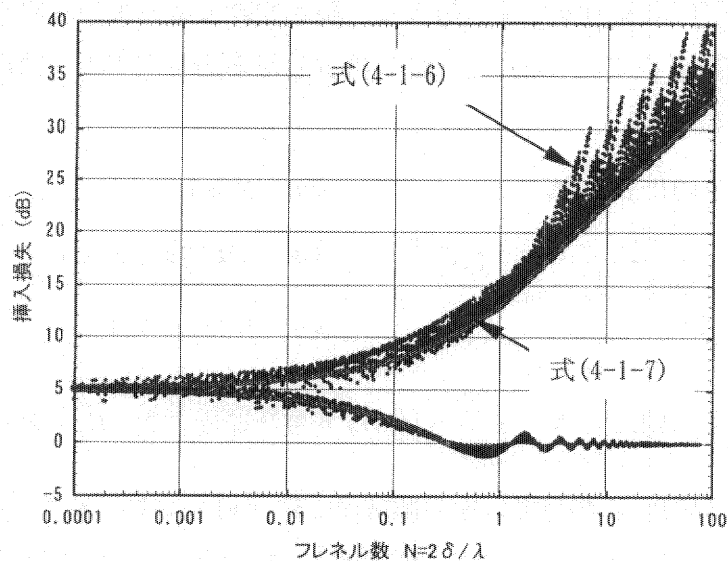


図 4-1-4. 波動解と前川の実験チャートの比較

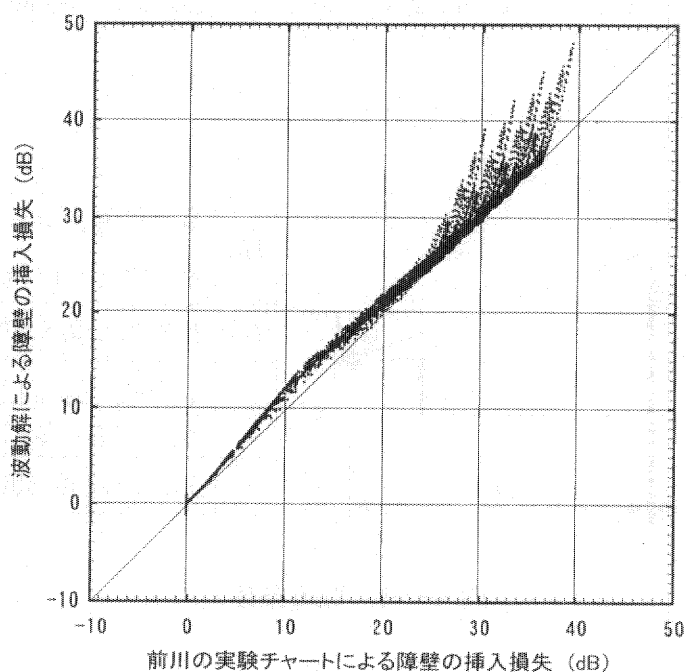


図 4-1-5. 無指向性点音源に関する障壁の挿入損失

## 4. 2 半波長離れた2つの点音源からなる指向性音源に対する障壁の挿入損失

## 4. 2. 1 2つの点音源周囲の音圧分布

松本の研究を参考にして、近接した2つの点音源の振幅と位相を調整することにより指向性点音源のモデル化を考える。

図4-2-1に示すように半波長の間隔で2つの無指向性点音源 $Q_1$ と $Q_2$ を配置する。2つの点音源の位相差を $\varphi$ とすると、そのときの観測点 $P$ の音場 $\phi$ は次式で表せる。

$$\phi = A_1 \frac{e^{ikR_1}}{R_1} + A_2 \frac{e^{i(kR_2 + \varphi)}}{R_2} \quad (4-2-1)$$

ここで、 $A_i (i=1,2)$ は音源 $Q_i$ の振幅、 $R_i$ は音源 $Q_i$ から観測点 $P$ までの距離(m)、 $k$ は波長定数である。

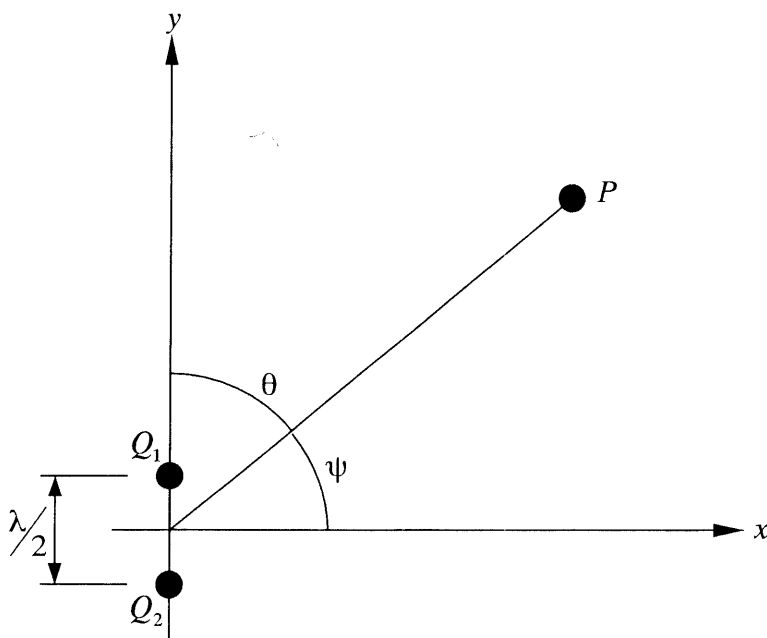


図4-2-1. 2つの点音源周囲の音圧分布

近接した2つの無指向性点音源を1つの指向性点音源と考え、点音源の振幅と位相を変化させたときの指向性点音源の指向特性を計算した。指向特性は音源からの距離によって変化するため、ここでは指向特性の計算値が十分安定するように非現実的ではあるが、2つの点音源の中心から半径1000mの同心円上に観測点 $P$ を設定した。

2つの音源の振幅( $A_1, A_2$ )は、(+1.0,+0.1)、(+1.0,+0.5)、(+1.0,+1.0)の3ケースを考えた。計算周波数は1kHzとした。

図4-2-2は、位相差 $\varphi = \pi$ のときの、半径1000mの同心円上の相対音圧レベルである。また



図 4-2-3 は、 $\varphi=0$  のときの相対音圧レベルである。

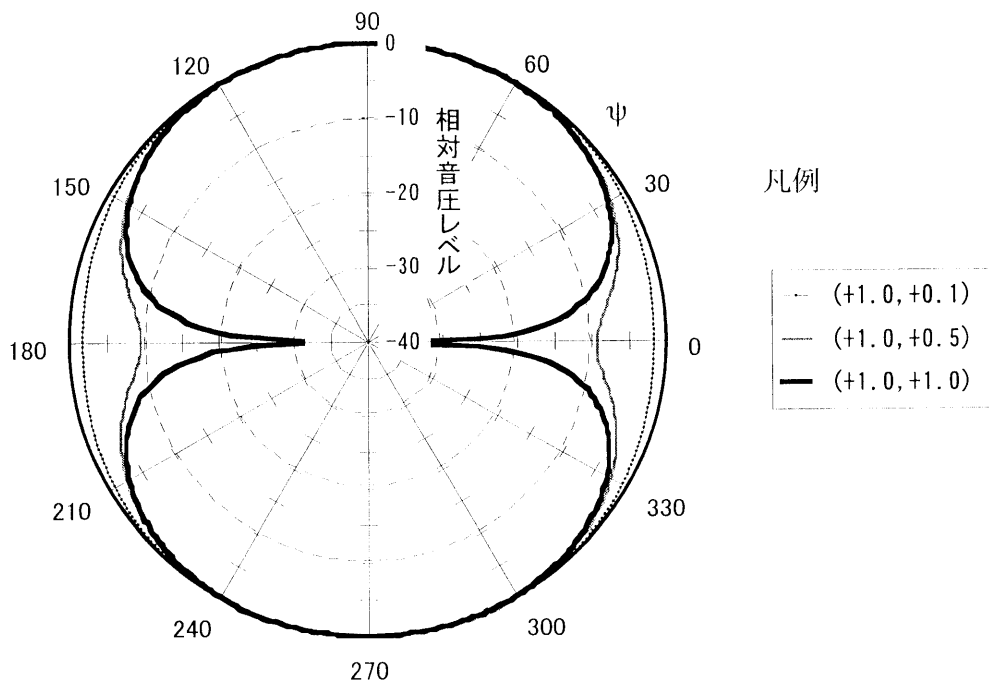


図 4-2-2. 音源の指向特性の計算例 ( $\varphi = \pi$  の場合)

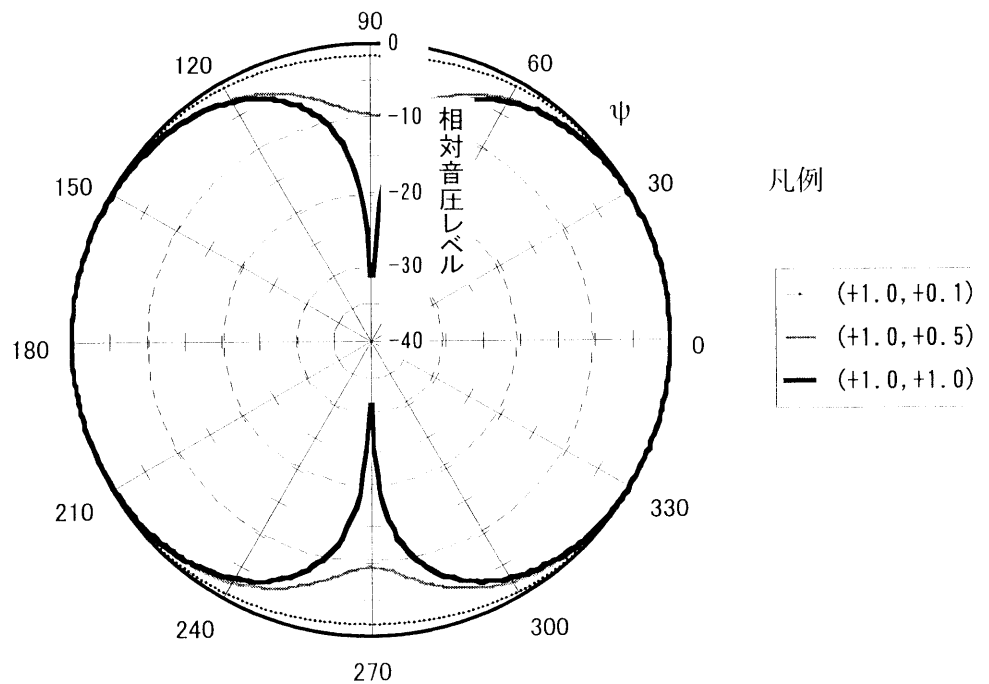


図 4-2-3. 音源の指向特性の計算例 ( $\varphi = 0$  の場合)

凡例中の  $(v, w)$  は 2 つの点音源の振幅 ( $A_1, A_2$ ) を表す。

4. 2. 2  $\cos^n \theta$  の指向性音源のモデル化

エネルギーモデルでの騒音予測においては、 $\cos^n \theta$  の指向性音源を仮定することがある。例えば、鉄軌道騒音の予測では高架構造物音の音源を  $\cos^n \theta$  のランダム位相点音源列と考える [4-17]。また本研究でも第6章において境界エネルギー積分法による予測を行うが、境界エネルギー積分法では境界面（反射面）に  $\cos \theta$  の指向性音源を仮定する。

ここでは、 $\cos \theta$  の指向性音源に対する遮音壁の遮蔽効果の計算モデルを検討するために  $\cos \theta$  の指向性を図 4-2-1 に示す 2 つの点音源で近似する。

$\varphi = \pi$  で 2 つの逆位相点音源の振幅を変化させたときの指向特性と  $\cos \theta$  の指向特性を比較して図 4-2-4 に示す。観測点は 2 つの音源の幾何中心を中心とする半径 1000m の同心円上で、計算周波数は 1kHz である。

$\theta = 90^\circ$  付近をのぞけば音源  $Q_1$  と  $Q_2$  の振幅 ( $A_1, A_2$ ) を (+1.0, +0.5) としたときの指向特性と  $\cos \theta$  の指向特性はほぼ一致している。

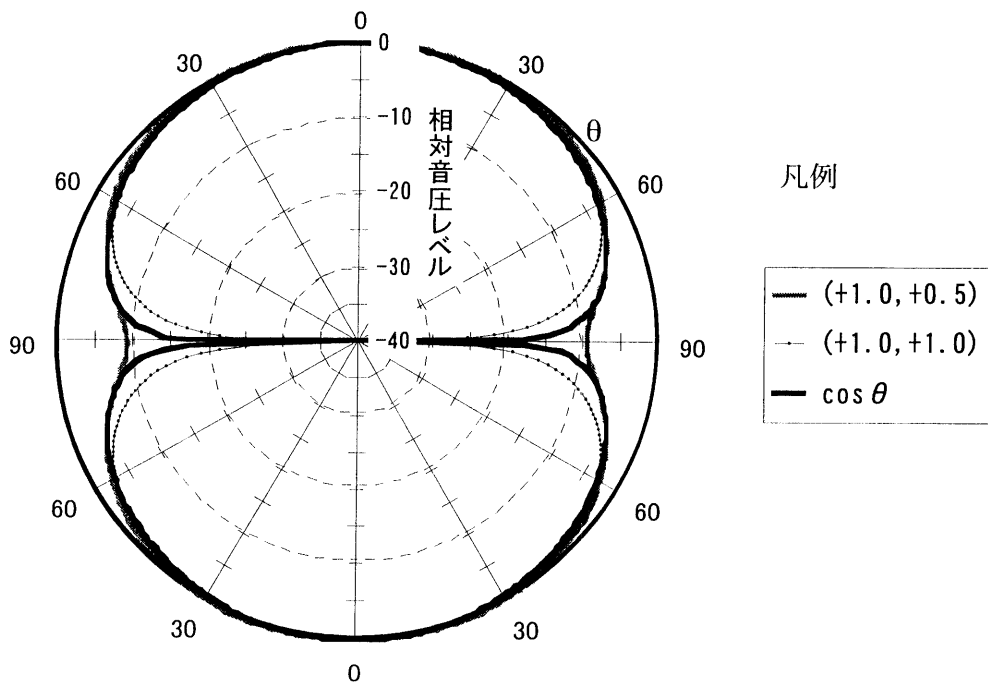


図 4-2-4.  $\cos \theta$  の指向特性と 2 つの逆位相点音源の指向特性の比較 ( $\varphi = \pi$ )

凡例中の  $(v, w)$  は 2 つの点音源の振幅 ( $A_1, A_2$ ) を表す。

同様に、 $\cos^2 \theta$ の指向性音源について2つの逆位相点音源の指向特性と比較して図4-2-5に示す。2つの逆位相点音源でもっとも指向性が強くなるのは音源の振幅( $A_1, A_2$ )を(+1.0,+1.0)としたときであるが、それよりも $\cos^2 \theta$ の指向性音源の指向性の方が強い。したがって、 $\cos^2 \theta$ 以上に指向性が鋭くなれば2つの逆位相点音源では近似できない。

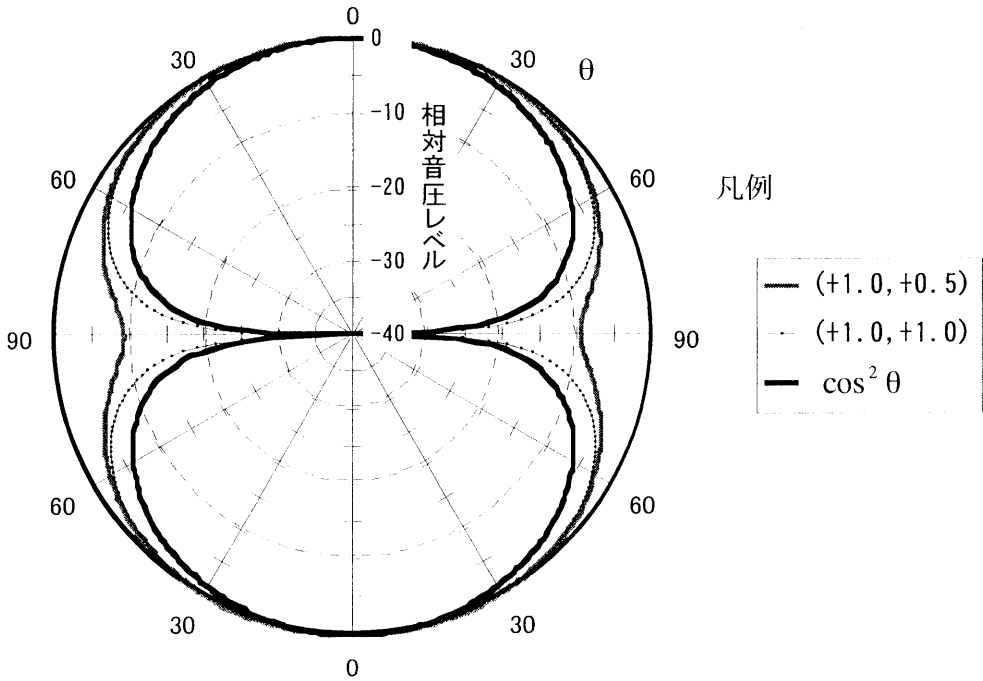


図4-2-5.  $\cos^2 \theta$ の指向特性と2つの逆位相点音源の指向特性の比較 ( $\varphi = \pi$ )

凡例中の ( $v, w$ ) は2つの点音源の振幅 ( $A_1, A_2$ ) を表す。

### 4. 2. 3 障壁の挿入損失

#### (1) 上下方向に強い指向性をもち音源よりもエッジが高い場合

図4-2-2に示したような上下方向に強い指向性をもつ指向性音源に対する障壁の挿入損失について検討する。

2つの点音源の位相差 $\varphi = \pi$ とする。各音源について漸近解を用いて障壁周囲の音場を計算し両者を合成した音場 $\phi$ と、自由空間の音場 $\phi_0$ から次式により指向性音源に対する障壁の挿入損失を求めた。

$$\Delta L_d = -10 \cdot \log_{10} \left| \frac{\phi}{\phi_0} \right|^2 \tag{4-2-2}$$

ここで、

$\Delta L_d$  : 障壁の挿入損失(dB)

計算諸元は図4-1-3に示したとおりであり、図4-1-3の $Q$ の位置に図4-2-1の $Q_1$ を、 $Q_1$ が

ら半波長下に  $Q_2$  を考えた.

無指向性点音源に近い  $(A_1, A_2) = (+1.0, +0.1)$  の場合の計算結果を図 4-2-6 に示す. なお、図では  $Q_1$  についての経路差  $\delta$  を用いて整理している.

$N > 10$  の範囲では、指向性音源に対する遮蔽効果を前川チャート (式(4-1-7)) で計算するのは危険側の予測となる場合がある.  $N$  が 10 未満までであれば前川チャートとの対応はよい.

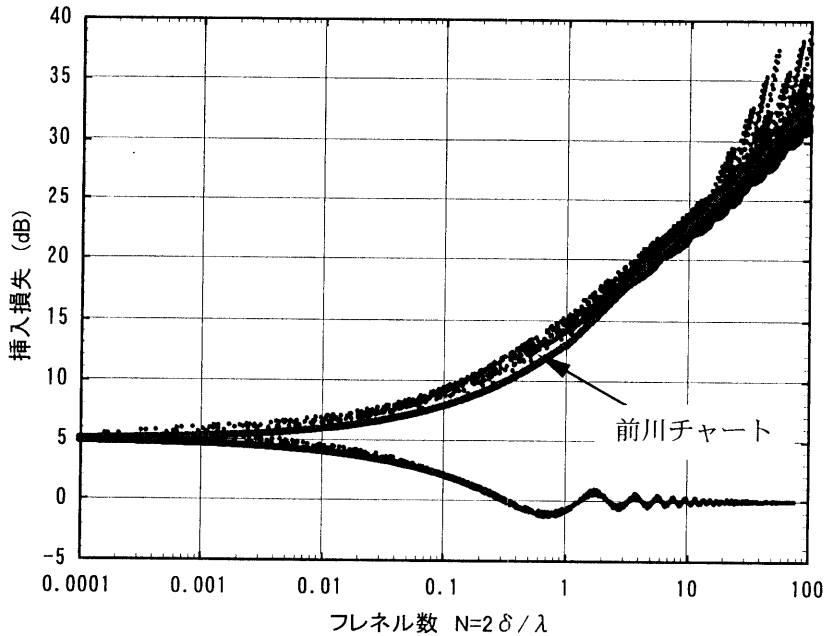


図 4-2-6. 指向性音源に対する障壁の遮蔽効果 ( $(A_1, A_2) = (+1.0, +0.1)$ ,  $\varphi = \pi$  の場合)

次に、 $\cos \theta$  の指向特性に近い  $(A_1, A_2) = (+1.0, +0.5)$  の場合の計算結果を図 4-2-7 に、2つの点音源の振幅が等しく逆位相のダイポール音源の場合 ( $(A_1, A_2) = (+1.0, -1.0)$ ) の計算結果を図 4-2-8 に示す. 特に  $(A_1, A_2) = (+1.0, +1.0)$  の場合に障壁を設置することにより挿入損失が大幅に減少するケースが見られるが、これらはいずれも音源の指向性にディップが生じる  $\psi \approx 0^\circ$  ( $\theta \approx 90^\circ$ ) の場合である. 障壁がない場合には干渉により音圧が小さかったのが、障壁を設置することにより障壁の遮蔽効果よりも干渉による減衰が緩和された影響の方が大きくなり挿入損失が減少したものである.

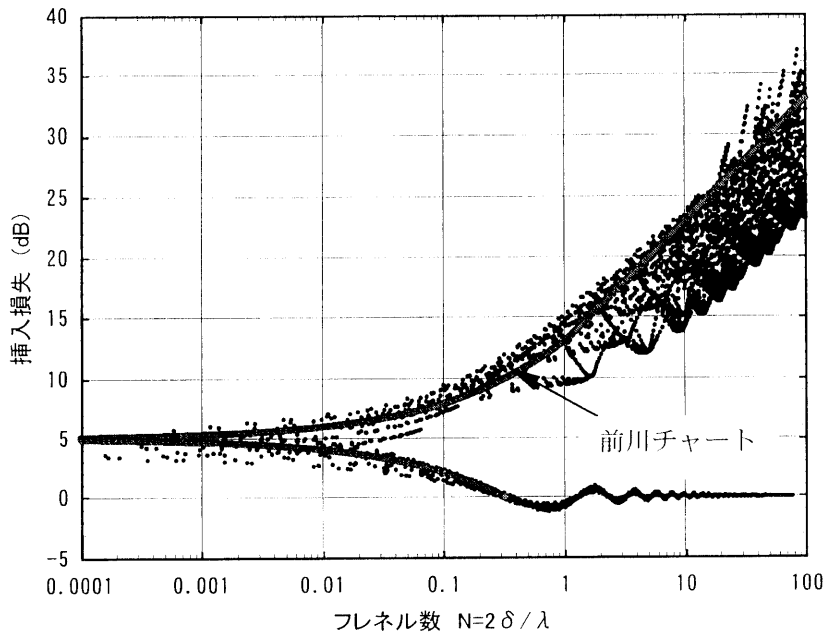


図 4-2-7. 指向性音源に対する障壁の遮蔽効果 ( $(A_1, A_2) = (+1.0, +0.5)$ ,  $\varphi = \pi$  の場合)

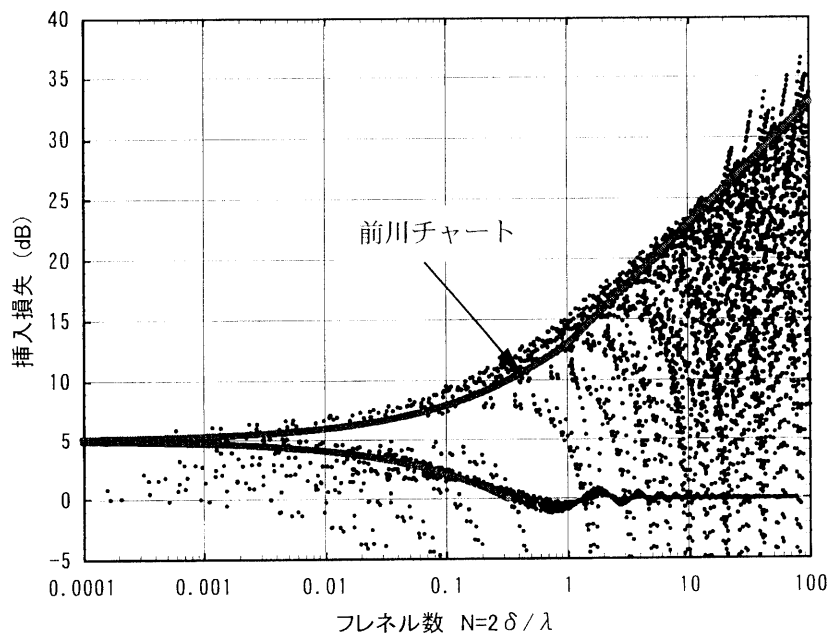


図 4-2-8. 指向性音源に対する障壁の遮蔽効果 ( $(A_1, A_2) = (+1.0, +1.0)$ ,  $\varphi = \pi$  の場合)

(2) 上下方向に強い指向性をもち音源よりもエッジが低い場合

これまでの検討は障壁の頂点から上に離れるほど指向性が強い場合であった。これとは反対に図 4-2-9 に示すように壁の頂点から上に離れるほど指向性が弱くなる場合も考えられる。例えば6章で検討する高架裏面反射音のように  $\cos \theta$  の反射指向特性の反射面が障壁よりも上にある場合がこれに相当する。

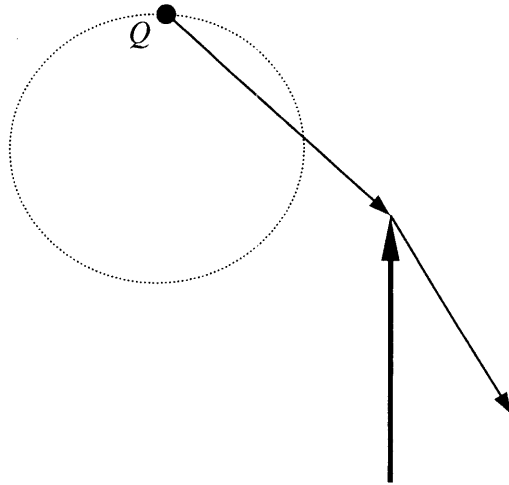


図 4-2-9. 上下方向に強い指向性を持ち音源よりもエッジが低い場合

第 6 章で高架裏面反射音の予測モデルで  $\cos \theta$  の指向性音源と仮定するため、ここでは  $\cos \theta$  の指向性音源に対する障壁の挿入損失について考える。図 4-2-10 に示すように、無指向性点音源  $Q_1$  の半波長下に逆位相の音源  $Q_2$  を考える。  $Q_1$  と  $Q_2$  の振幅 ( $A_1, A_2$ ) は  $\cos \theta$  の指向特性に近い (+1.0, +0.5) とした。図 4-2-10 に示す計算諸元で障壁の挿入損失を算出した。

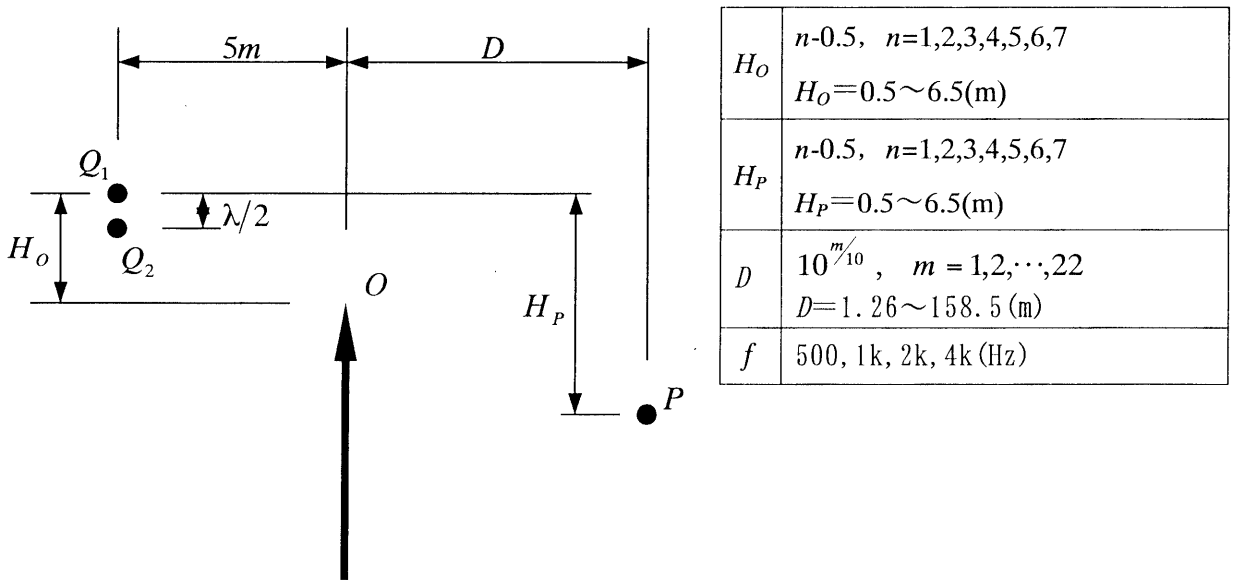


図 4-2-10. 計算諸元

計算結果を図4-2-11に示す。

$\cos \theta$  の指向性音源の場合も、 $N > 0$  において、障壁の挿入損失は前川の実験チャート（式(4-1-7)）よりも大きな値となる。

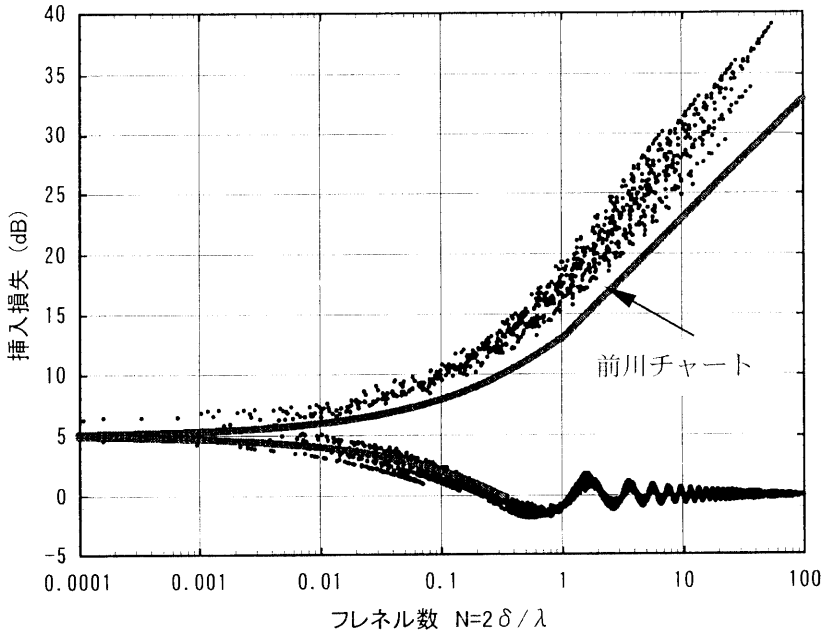


図4-2-11. 指向性音源に対する障壁の遮蔽効果 ( $(A_1, A_2) = (+1.0, +0.5)$ ,  $\varphi = \pi$  の場合)

### (3) 水平方向に強い指向性をもつ場合

図4-2-3に示したような水平方向に強い指向性をもつ指向性音源に対する障壁の挿入損失について検討する。このような音圧分布を示すケースとしては、図4-2-12に示すように地面上 $\lambda/4$ の位置に点音源がある場合が考えられる。

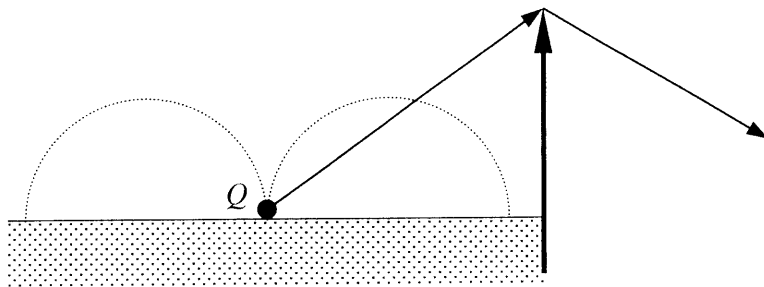


図4-2-12. 水平方向に強い指向性をもつ場合（音源Qが地面上 $\lambda/4$ にある場合）

図 4-1-3 の音源・障壁・観測点配置で、音源  $Q$  の半波長下に同位相の点音源がある場合を考える。障壁の挿入損失の計算結果を以下に示す。なお、計算周波数は 500,1k,2k,4kHz の 4 周波数とした。図 4-2-13 は、 $(A_1, A_2) = (+1.0, +0.1)$  の場合の計算結果である。

$N > 0$  の場合には、障壁の挿入損失は前川の実験チャートよりもおおよそ 1~2dB 大きな値となっている。

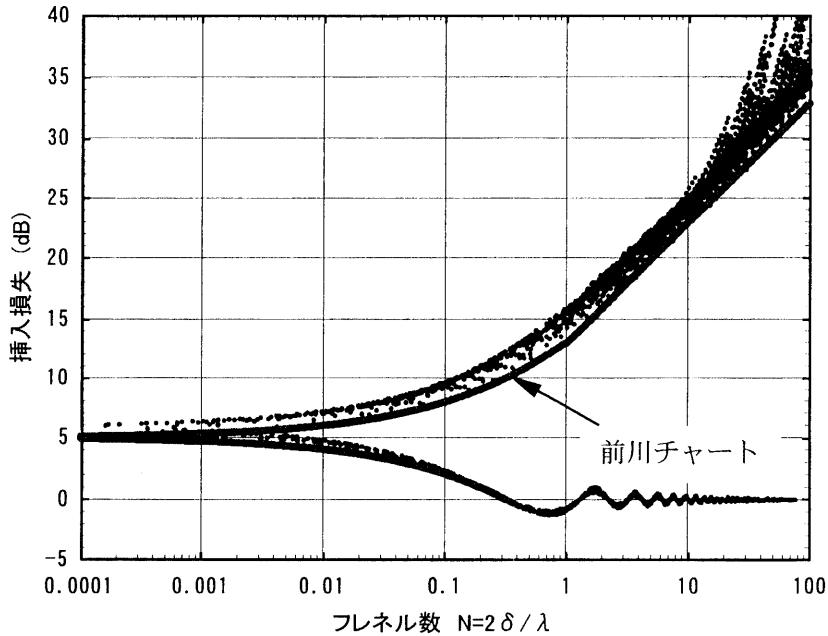


図 4-2-13. 指向性音源に対する障壁の遮蔽効果 ( $(A_1, A_2) = (+1.0, +0.1)$ ,  $\varphi = 0$  の場合)

次に  $(A_1, A_2) = (+1.0, +0.5)$  の場合の計算結果を図 4-2-14 に示す。

$N > 0$  の場合には障壁の挿入損失は前川の実験チャート (式(4-1-7)) よりもおおよそ 2~5dB 大きな値となっており、 $(A_1, A_2) = (+1.0, +0.1)$  のときよりも指向性の影響は大きい。



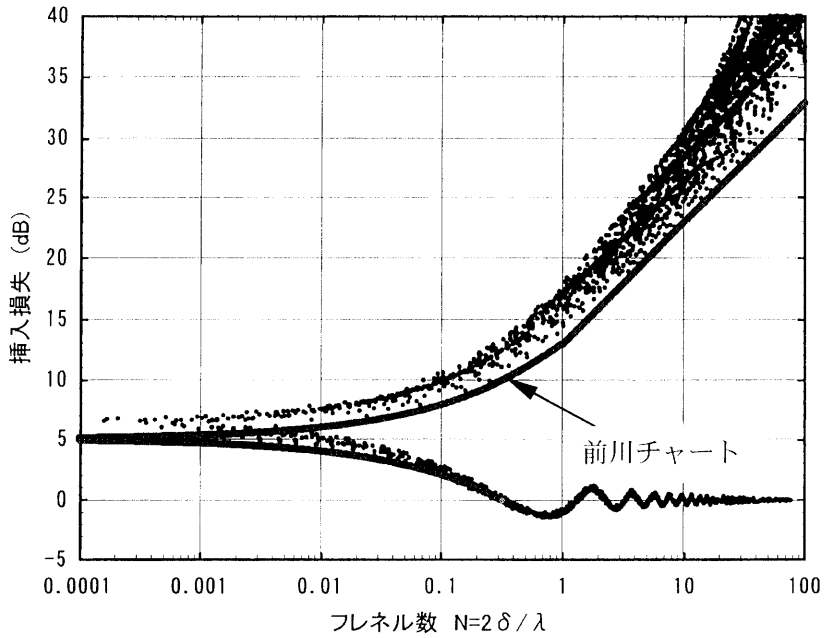


図 4-2-14. 指向性音源に対する障壁の遮蔽効果 ( $(A_1, A_2) = (+1.0, +0.5)$ ,  $\varphi = 0$  の場合)

$(A_1, A_2) = (+1.0, +1.0)$  の場合の計算結果を図 4-2-15 に示す。

$N > 0$  の場合には、障壁の挿入損失は前川の実験チャート (式(4-1-7)) よりもおおよそ 2~7dB 大きな値となっており、 $(A_1, A_2) = (+1.0, +0.5)$  のときよりもさらに指向性の影響は大きい。

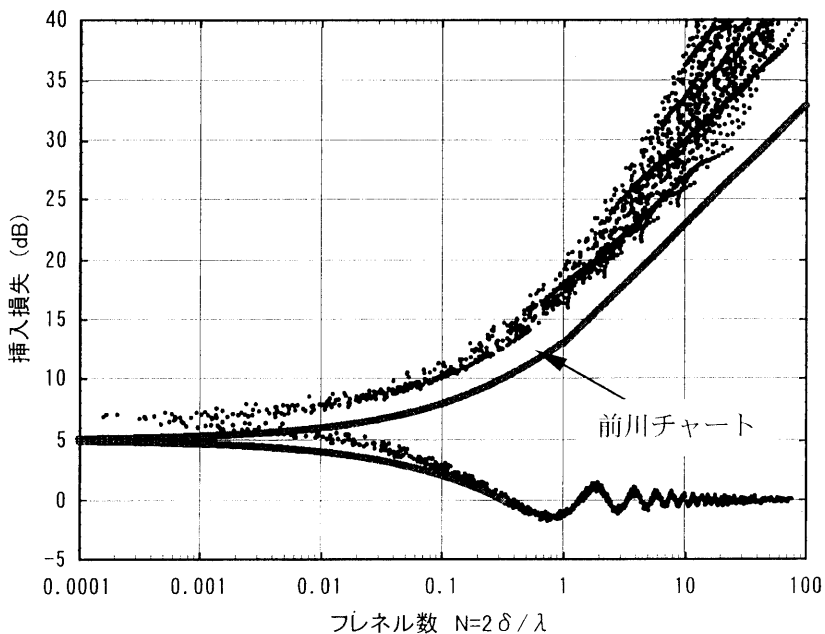


図 4-2-15. 指向性音源に対する障壁の遮蔽効果 ( $(A_1, A_2) = (+1.0, +1.0)$ ,  $\varphi = 0$  の場合)

## 4. 2. 4 障壁の挿入損失のエネルギー計算モデル

## (1) エネルギー計算モデル

指向性音源に対するエネルギー計算モデルとして次のようなモデルを考える。

$$L = L_w(\theta_p) - 11 - 20 \cdot \log_{10} l_p + \Delta L_d + \Delta D \quad (4-2-3)$$

ここで、 $L$ は観測点 $P$ での音圧レベル(dB)、 $L_w(\theta_p)$ は音源 $Q$ から観測点 $P$ 方向のみかけのパワーレベル(dB)、 $l_p$ は音源 $Q$ から受音点 $P$ までの直線距離(m)、 $\Delta L_d$ は無指向性音源に対する障壁の挿入損失(式(4-1-7))(dB)、 $\Delta D$ は音源の指向性の影響に関する補正值(dB)である。

$\Delta D$ の計算は松本の方法を用いて、図4-2-16に示すように音源 $Q$ から仰角 $\theta_p$ 方向と $\theta_o$ 方向の指向性の音圧レベル差として次式で与えた。

$$\Delta D = \begin{cases} \Delta L_{\text{dir}}(\theta_o) - \Delta L_{\text{dir}}(\theta_p) & , \text{ for } N \geq 0 \\ 0 & , \text{ for } N < 0 \end{cases} \quad (4-2-4)$$

ここで、 $\Delta L_{\text{dir}}(\theta_p)$ は観測点 $P$ 方向の指向特性(dB)、 $\Delta L_{\text{dir}}(\theta_o)$ は障壁のエッジ $O$ 方向の指向特性(dB)である。

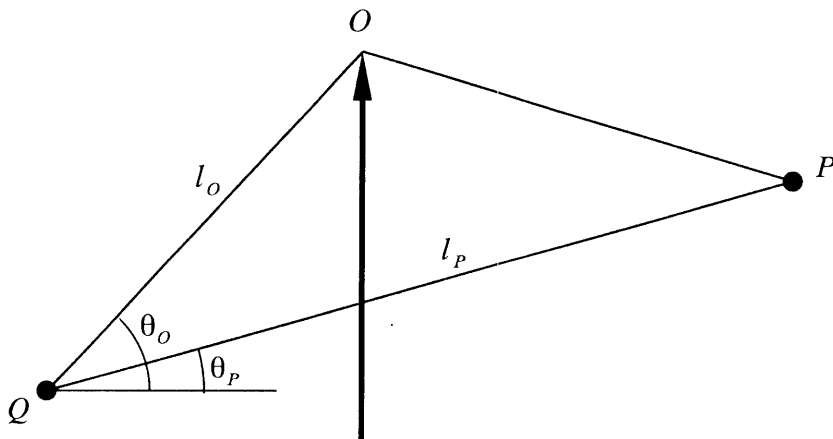


図4-2-16. 音源 $Q$ 、観測点 $P$ 、障壁頂点 $O$ の配置

モデル式(4-2-3),(4-2-4)の妥当性を検討するために、これらの計算式によるエネルギー計算値と、2つの点音源による波動計算値とを比較した。

なお $\Delta L_{\text{dir}}(\theta_p)$ および $\Delta L_{\text{dir}}(\theta_o)$ は波動計算により求めるが、波動計算では音源からの距離が異なれば同じ角度であっても $\Delta L_{\text{dir}}(\theta_p)$ および $\Delta L_{\text{dir}}(\theta_o)$ は変化する。そこで、以下のように $\Delta L_{\text{dir}}(\theta_p)$ および $\Delta L_{\text{dir}}(\theta_o)$ を与えた。

- ①. 障壁がない自由空間において、漸近解による波動計算で観測点 $P$ および障壁の頂点 $O$ の位置の音圧レベル $L(\theta_p)$ および $L(\theta_o)$ を算出する。
- ②. 次に、2つ点音源のうち振幅が大きい音源を $Q_1$ とし、 $Q_1$ の位置を指向性点音源

の位置とし、 $Q_1$  から観測点  $P$  および障壁の頂点  $O$  までの距離  $l_P$  および  $l_O$  を求める。

- ③. 次式により幾何拡散による減衰を補正して  $\Delta L_{\text{dir}}(\theta_P)$  および  $\Delta L_{\text{dir}}(\theta_O)$  を求める。

$$\Delta L_{\text{dir}}(\theta_P) = L(\theta_P) + 20 \cdot \log_{10} l_P \quad (4-2-5)$$

$$\Delta L_{\text{dir}}(\theta_O) = L(\theta_O) + 20 \cdot \log_{10} l_O \quad (4-2-6)$$

なお、式(4-2-3)での  $\Delta L_d$  の計算は、 $Q_1$  の位置に点音源を考えて計算した。

## (2) エネルギー計算モデルの妥当性の検証

式(4-2-3)と式(4-2-4)のエネルギー計算モデルの妥当性を検証するために、波動計算による障壁の挿入損失と比較した。

### a. 上下方向に強い指向性をもち音源よりもエッジが高い場合

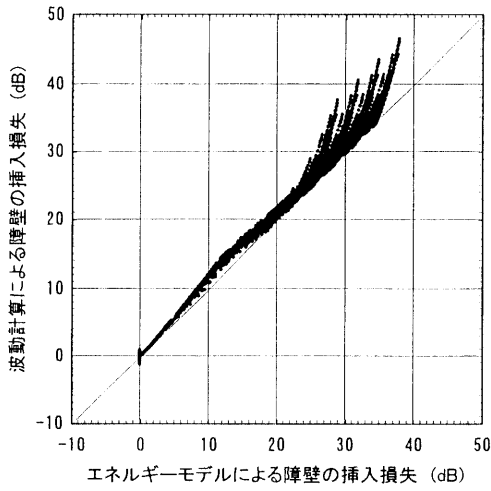
図 4-2-2 に示すような上下方向に強い指向性をもち音源よりもエッジが高い場合について、エネルギーモデルでの計算結果と波動計算結果を比較し図 4-2-17 に示す。計算条件は図 4-1-3 に示すとおりである。

(a)は無指向性点音源に近い  $(A_1, A_2) = (+1.0, +0.1)$  で位相差  $\varphi = \pi$  の場合である。エネルギーモデルと波動解による挿入損失の計算値はほぼ一致しており、またエネルギーモデルの方がやや安全側となる傾向にある。

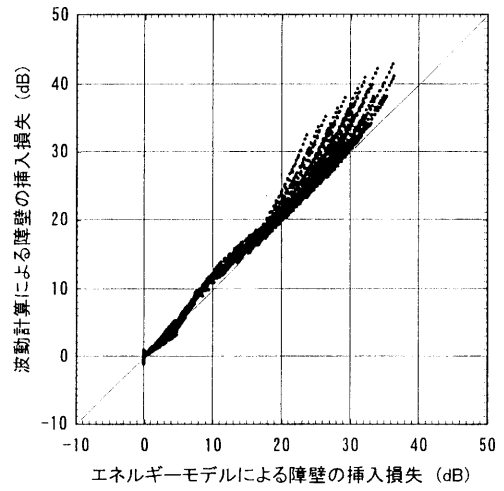
(b)は  $\cos \theta$  の指向性に近い  $(A_1, A_2) = (+1.0, +0.5)$  の場合である。(a)と同様、エネルギーモデルの方がやや安全側となる傾向にあるが、エネルギーモデルと波動解はほぼ一致している。

(c)はもっとも指向性が強い  $(A_1, A_2) = (+1.0, +1.0)$  の場合である。この場合もエネルギーモデルと波動解による挿入損失の計算値はほぼ一致しており、またエネルギーモデルの方がやや安全側となる傾向にある。また、図 4-1-5 の無指向性点音源に対する前川チャートと波動解の比較結果と比べても、両者の対応にそれほど大きな違いは見られない。騒音防止設計において一般には前川チャートが用いられることを考えると、式(4-2-3),(4-2-4)は妥当なモデルであると判断できる。

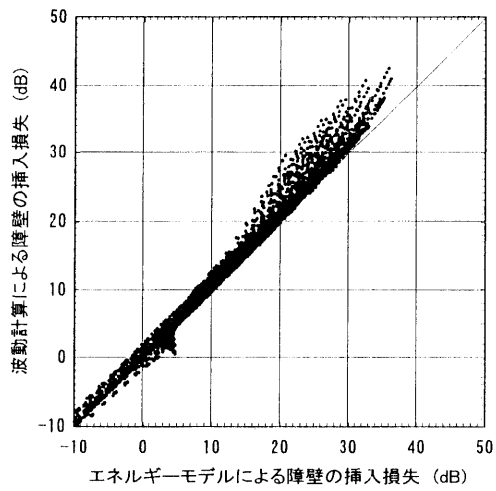
4. 2 半波長離れた2つの点音源からなる指向性音源に対する障壁の挿入損失



(a).  $(A_1, A_2) = (+1.0, +0.1)$



(b).  $(A_1, A_2) = (+1.0, +0.5)$



(c).  $(A_1, A_2) = (+1.0, +1.0)$

図 4-2-17. エネルギーモデルの妥当性の検証 ( $\varphi = \pi$  の場合)

b. 上下方向に強い指向性をもつ音源よりもエッジが低い場合

$\cos \theta$  の指向特性をもつ音源が障壁よりも上にある場合の障壁の遮蔽効果についてエネルギー計算モデルの妥当性を検討する。

図 4-2-10 の計算諸元で波動計算により求めた障壁の挿入損失とエネルギーモデルより求めた障壁の挿入損失を比較した結果を図 4-2-18 に示す。

エネルギーベースによる計算結果と波動による計算結果はよく一致している。したがって、 $\cos \theta$  の指向特性をもつ音源に対しても障壁の遮蔽効果はこのエネルギーモデルで計算できる。

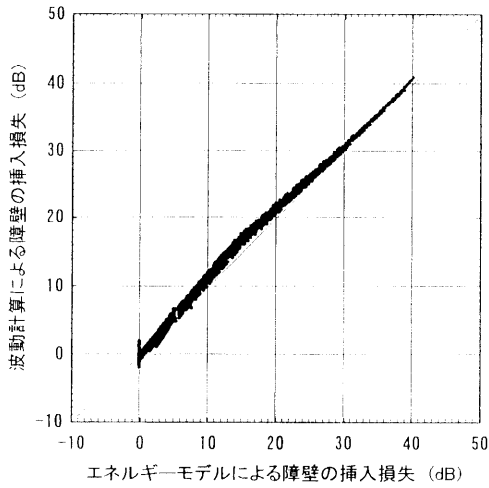


図 4-2-18. エネルギーモデルの妥当性の検証 ( $(A_1, A_2) = (+1.0, +0.5)$ ,  $\varphi = \pi$  の場合)

## c. 水平方向に強い指向性をもつ場合

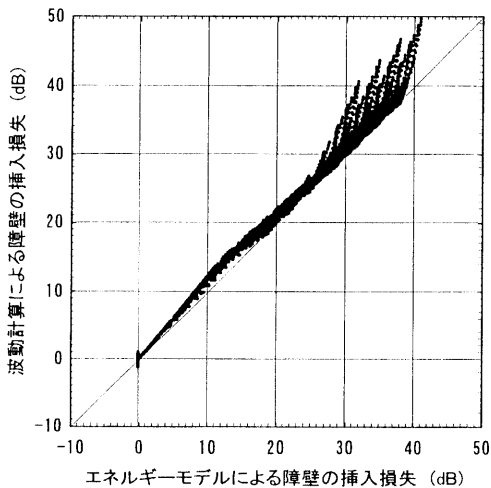
図 4-2-3 に示したような水平方向に強い指向性をもつ指向性音源に対する障壁の挿入損失についてエネルギーモデルの妥当性を検討する。計算条件は図 4-1-3 のとおりである。

計算結果を図 4-2-19 に示す。

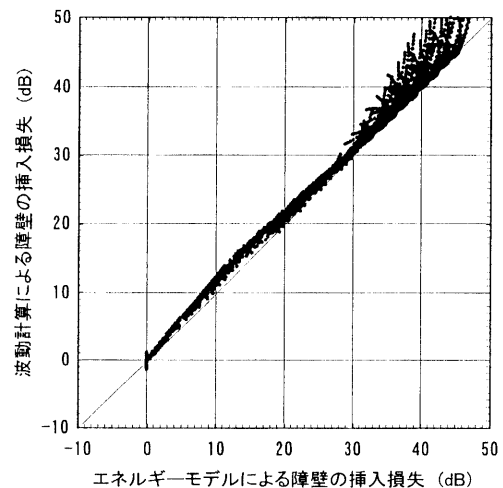
(a)は  $(A_1, A_2) = (+1.0, +0.1)$  の場合である。エネルギーモデルと波動解による挿入損失の計算値はほぼ一致しており、またエネルギーモデルの方がやや安全側となる傾向にある。

(b)は  $\cos \theta$  の指向性に近い  $(A_1, A_2) = (+1.0, +0.5)$  の場合である。この場合もエネルギーモデルの方がやや安全側となるが、エネルギーモデルと波動解はほぼ一致している。

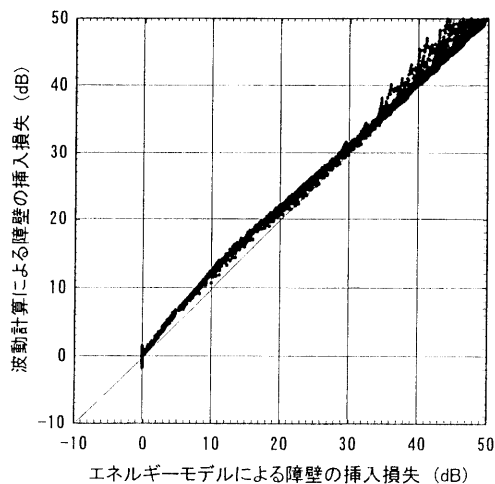
(c)はもっとも指向性の影響が顕著に表れる  $(A_1, A_2) = (+1.0, +1.0)$  の場合である。エネルギーモデルと波動解はほぼ一致しており、またエネルギーモデルの方がやや安全側となる傾向にある。このような場合でもエネルギーモデルは妥当であると判断できる。



(a).  $(A_1, A_2) = (+1.0, +0.1)$



(b).  $(A_1, A_2) = (+1.0, +0.5)$



(c).  $(A_1, A_2) = (+1.0, +1.0)$

図 4-2-19. エネルギーモデルの妥当性の検証 ( $\varphi=0$  の場合)

4. 3 任意の間隔の2つの点音源からなる指向性音源に対する障壁の挿入損失

4. 3. 1 音源周囲の音圧分布

図 4-3-1 に示すように  $2h$  離れた2つの同振幅同位相点音源  $Q_1, Q_2$  を考える. この2つの点音源の配置方向を  $y$  軸とし,  $Q_1$  と  $Q_2$  の中間点を原点  $o$  とする.  $y$  軸と直角に原点を通るように  $x$  軸を考える.  $o$  を中心とした半径  $R_0$  上に観測点  $P$  を考え  $P$  の座標を  $(x_P, y_P)$  とする.  $Q_1$  から  $P$  までの距離を  $R_1$ ,  $Q_2$  から  $P$  までの距離を  $R_2$  とすると,  $P$  での  $Q_1$  と  $Q_2$  からの音圧  $\phi$  は, 以下のとおりとなる.

$$\begin{aligned} \phi &= A \left\{ \frac{e^{ikR_1}}{R_1} + \frac{e^{ikR_2}}{R_2} \right\} \\ &= A \frac{e^{ikR_1}}{R_1} \left\{ 1 + \frac{R_1}{R_2} e^{ik(R_2-R_1)} \right\} \end{aligned} \tag{4-3-1}$$

$$R_1 = \sqrt{x_P^2 + (y_P - h)^2} = \sqrt{R_0^2 + h^2 - 2R_0h \sin \psi} \tag{4-3-2}$$

$$R_2 = \sqrt{x_P^2 + (y_P + h)^2} = \sqrt{R_0^2 + h^2 + 2R_0h \sin \psi} \tag{4-3-3}$$

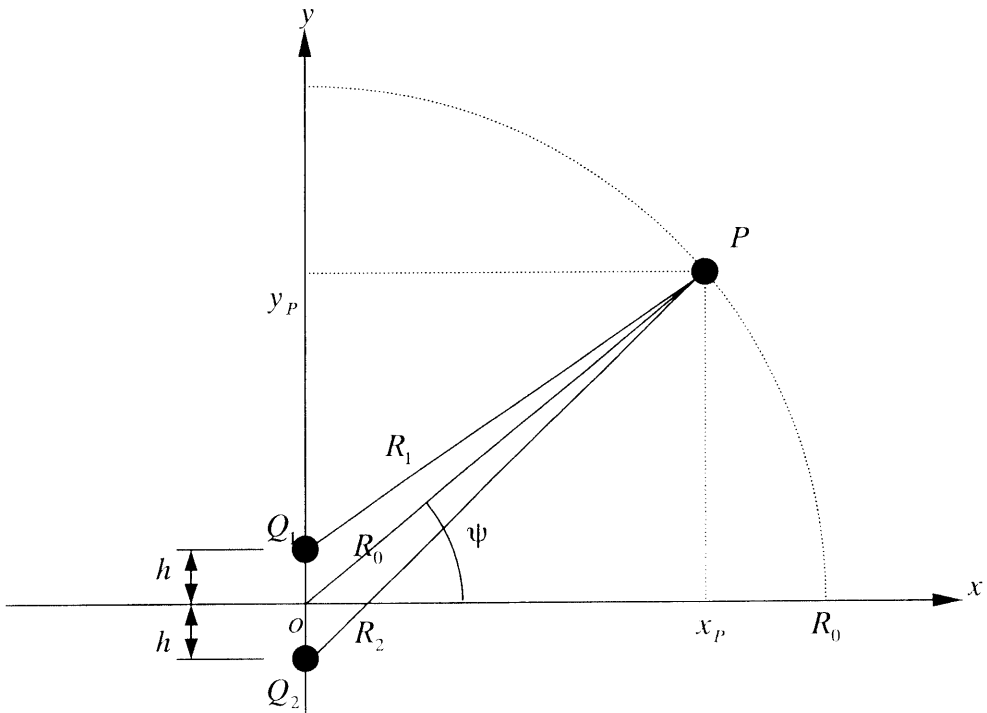


図 4-5-9. 2つの同位相点音源周囲の音圧計算

また  $\psi=0$  のときの音圧  $\phi_0$  は以下のとおりである.

$$\phi_0 = 2A \frac{e^{ik\sqrt{R_0^2+h^2}}}{\sqrt{R_0^2+h^2}} \quad (4-3-4)$$

以上より,  $\phi_0$  を基準としたときの相対音圧レベル  $\Delta L_{\text{dir}}(\psi)$  は次式で表せる.

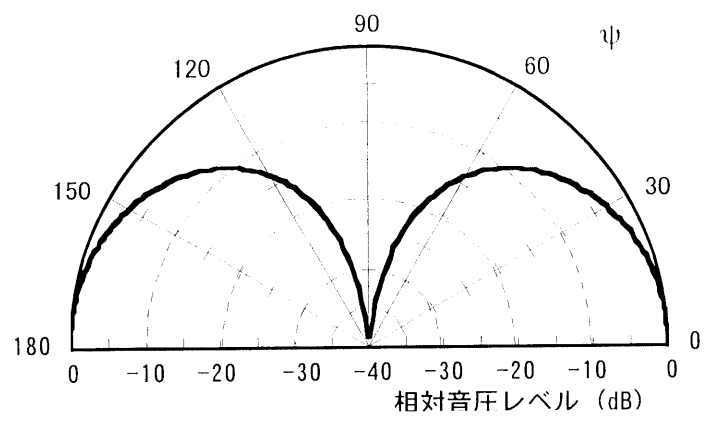
$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{dir}}(\psi) &= 10 \log_{10} \left| \frac{\phi}{\phi_0} \right|^2 \\ &= 10 \log_{10} \frac{R_0^2+h^2}{4R_1^2} \left[ 1 + \frac{R_1^2}{R_2^2} + 2 \frac{R_1}{R_2} \cos k(R_2 - R_1) \right] \end{aligned} \quad (4-3-5)$$

$h=\lambda/4$ ,  $\lambda/2$ ,  $\lambda$  のときの音源周囲の相対音圧レベル分布を図 4-3-2 に示す. 観測点  $P$  は, 原点  $o$  を中心とし, 相対音圧レベル分布が十分安定するように半径 1000m の同心円上に設定した. 計算周波数は 1kHz である.

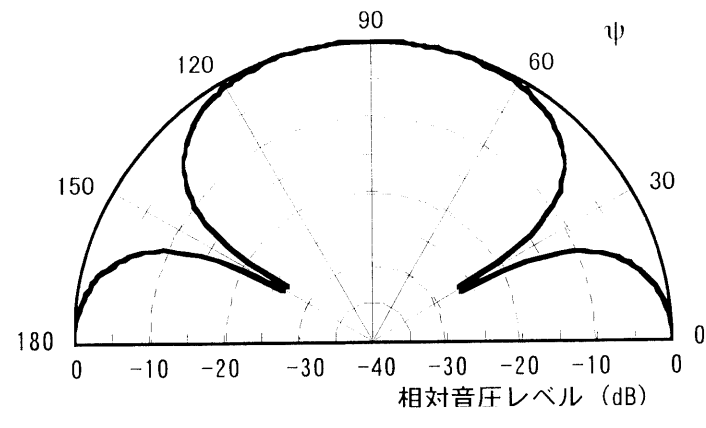
$h=\lambda/4$  のときには,  $\psi=90^\circ$  でディップがある  $\infty$  型の分布特性である.  $h$  が大きくなるにつれて音圧レベル分布は複雑になる.  $h=\lambda/2$  のときには,  $\psi=30^\circ$  と  $150^\circ$  付近に,  $h=\lambda$  のときには,  $\psi=12.5^\circ, 45^\circ, 135^\circ, 167.5^\circ$  付近にディップが生じている. 松本は指向性の変動が激しい場合には, 距離により指向性が変化し安定しないことを報告している. また, 障壁のエッジでの音圧レベルを用いて計算できる条件として, 音源からエッジまでの距離で指向性が安定している必要があることを報告している.

剛な反射面上  $h$  の位置に点音源が設置された場合の音場は, 自由空間で  $2h$  離れた2つの同位相同振幅の点音源による音場と等しい. したがって, 反射面の影響を近似的に指向性音源として扱うことができるのは音源が反射面からある距離以内の場合に限られると考えられる.

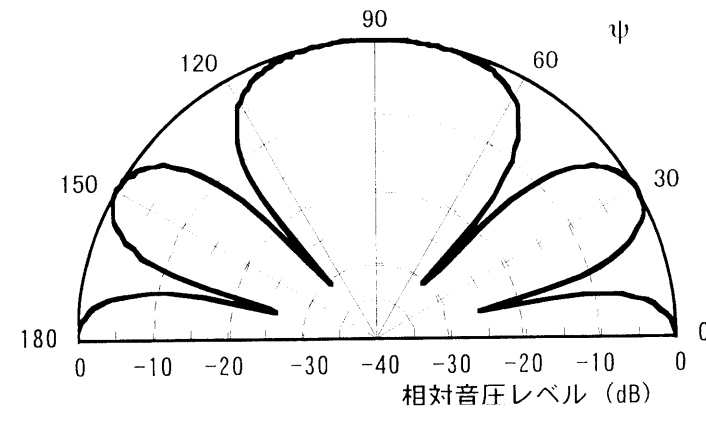




(a).  $h = \lambda/4$



(b).  $h = \lambda/2$



(c).  $h = \lambda$

図 4-3-2. 剛な反射面上の点音源周りの音圧分布

4. 3. 2 障壁の挿入損失

図 4-3-3 に示すように、無指向性点音源  $Q_1$  の  $2h$  下に同位相同振幅の点音源  $Q_2$  を考える。  
4.2 節と同様の手法で、図 4-3-3 に示す計算諸元で障壁の挿入損失を算出した。

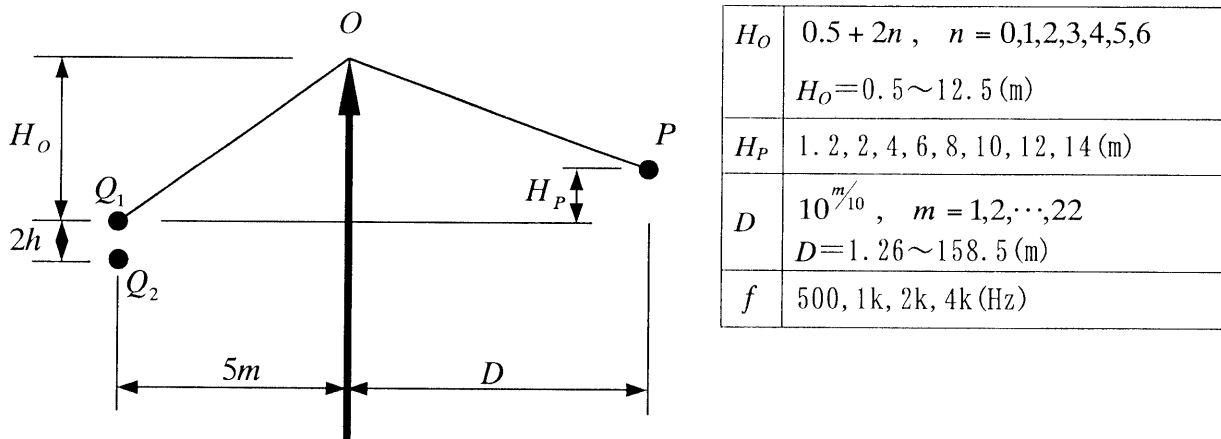
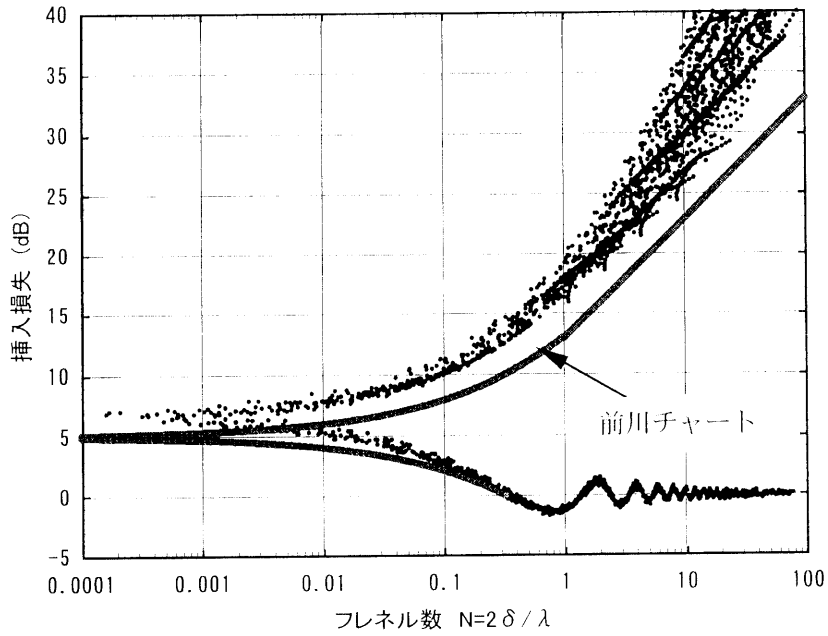


図 4-3-3. 計算条件

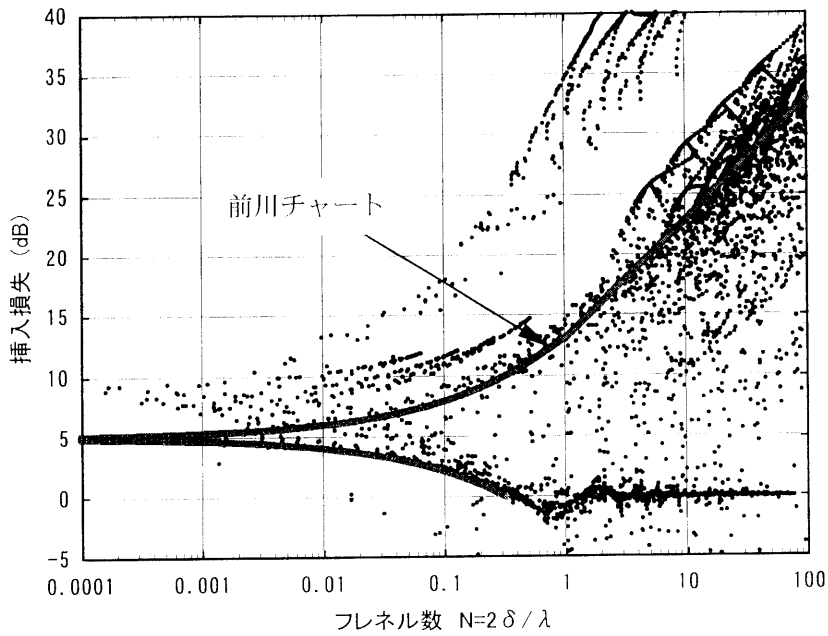
$h = \lambda/4, \lambda/2, \lambda, 2\lambda$  ( $Q_1$  と  $Q_2$  の間隔  $2h$  が  $\lambda/2, \lambda, 2\lambda, 4\lambda$ ) のときの計算結果を以下に示す。  
なお、 $h = \lambda/4$  ( $Q_1$  と  $Q_2$  の間隔  $\lambda/2$ ) のケースは 4.2 節での検討ケースと同じであるが、他のケースと比較するために再掲する。

$h = \lambda/4$  (間隔  $\lambda/2$ ) のときは  $N$  が大きくなるにつれてデータの分布範囲が広がる。  $N > 0$  では分布の下限は前川の実験チャート (式(4-1-7)) よりも約 3dB 大きい。

$h = \lambda/2$  (間隔  $\lambda$ )、 $h = \lambda$  (間隔  $2\lambda$ )、あるいは  $h = 2\lambda$  (間隔  $4\lambda$ ) の場合には、前川チャートとは大きく異なっており、前川チャートでの計算はできない。



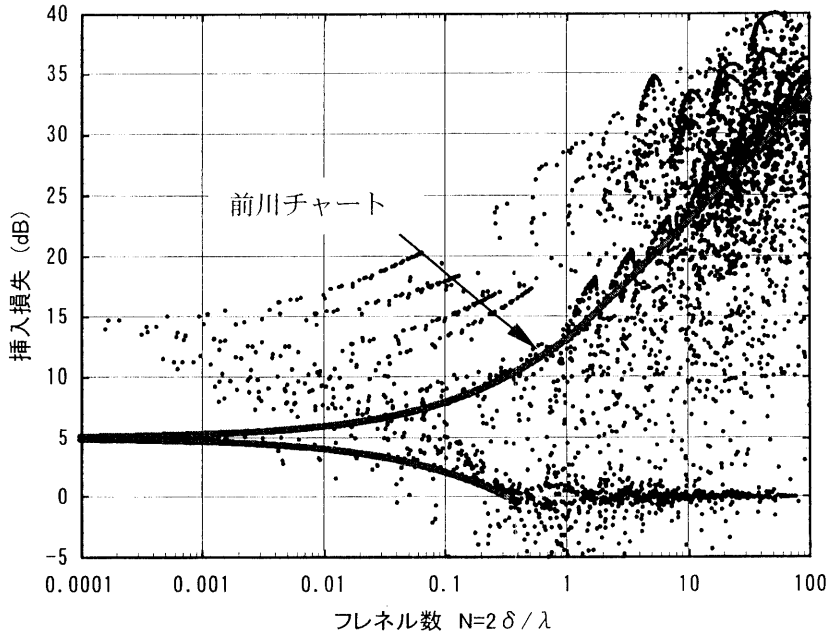
(a).  $h=\lambda/4$



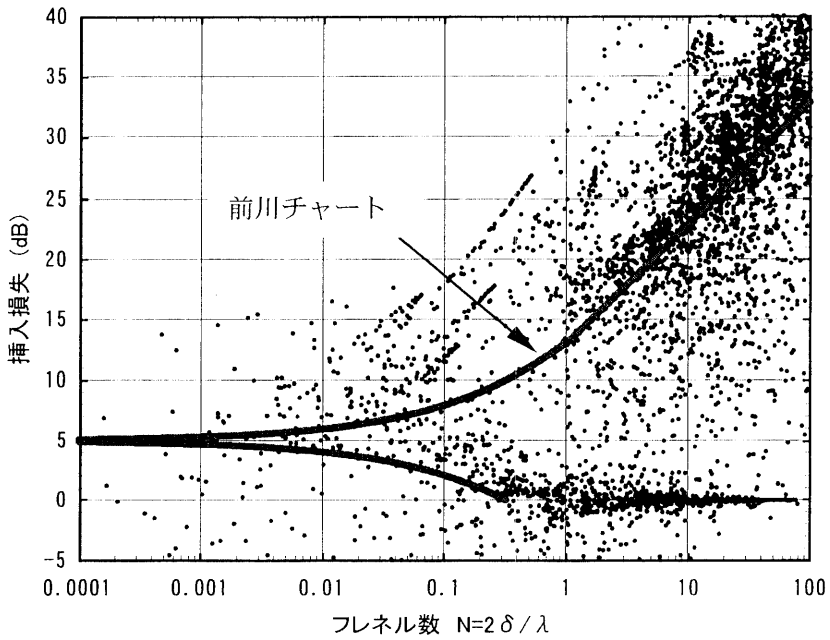
(b).  $h=\lambda/2$

図 4-3-4(1). 指向性音源に対する障壁の遮蔽効果

4. 3 任意の間隔の2つの点音源からなる指向性音源に対する障壁の挿入損失



(c).  $h = \lambda$



(d).  $h = 2\lambda$

図 4-3-4(2). 指向性音源に対する障壁の遮蔽効果

### 4. 3. 3 エネルギー計算モデルの妥当性の検証

4.2.4 で検討したエネルギー計算モデル（式(4-2-3)および式(4-2-4)）の妥当性を検証するために、波動計算による障壁の挿入損失と比較した。

計算条件は図 4-3-3 に示したとおりであり、 $Q_1$  と  $Q_2$  の間隔( $2h$ )は $\lambda/2, \lambda, 2\lambda, 4\lambda$  ( $h=\lambda/4, \lambda/2, \lambda, 2\lambda$ ) の4ケースである。計算結果を図 4-3-5 に示す。なお、 $h=\lambda/4$  ( $Q_1$  と  $Q_2$  の間隔 $\lambda/2$ ) のケースは4.2節での検討ケースと同じであるが、他のケースと比較するために再掲する。

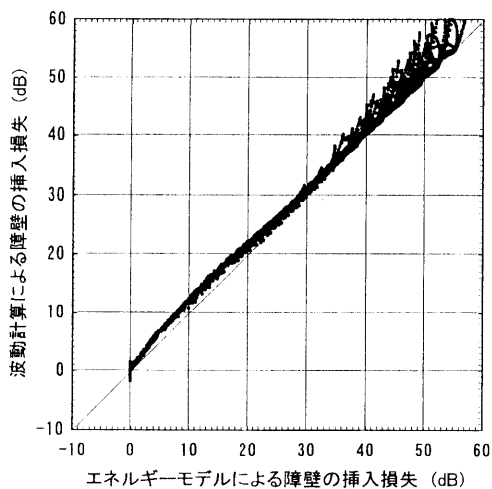
(a)は $h=\lambda/4$ の場合である。エネルギーモデルと波動解による挿入損失の計算値はほぼ一致しており、またエネルギーモデルの方がやや安全側となる傾向にある。

(b)は $h=\lambda/2$ の場合である。エネルギーモデルの方が波動解よりも3~4dB大きくなることが多い。しかし、場合によってはエネルギーモデルの方が5~10dB程度挿入損失が小さくなることもあり、エネルギーモデルでは考慮しきれない。

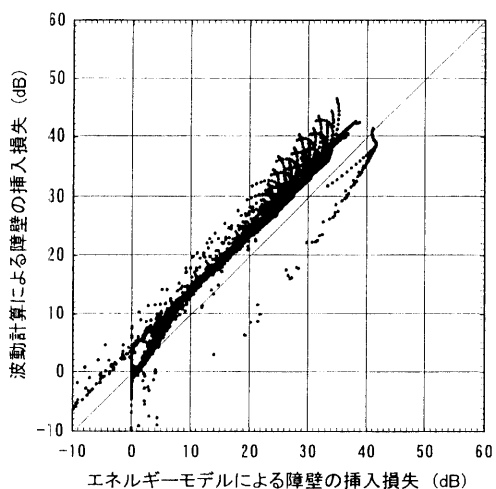
(c)は $h=\lambda$ の場合である。エネルギーモデルの方が波動解よりも7dB程度大きくなることが多い。エネルギーモデルは適用できない。

(d)は $h=2\lambda$ の場合である。エネルギーモデルの方が波動解よりも10dB程度大きくなることが多く、エネルギーモデルは適用できない。

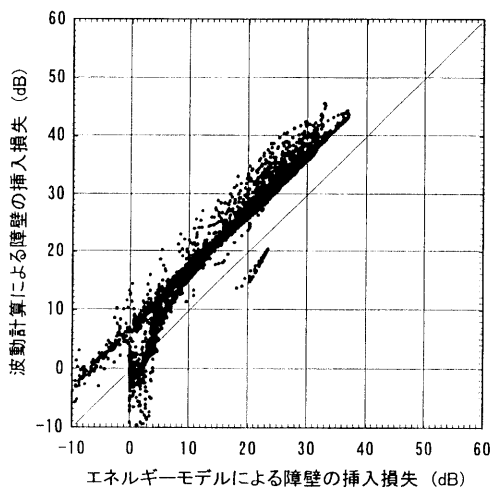
以上の計算結果から、エネルギーモデルは $h \geq \lambda/2$  の場合には適用できない。



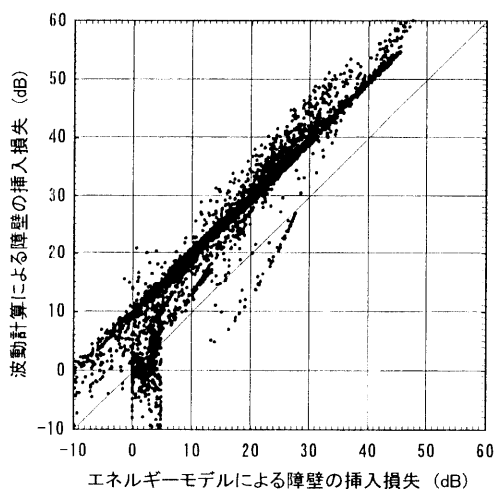
(a).  $h = \lambda / 4$



(b).  $h = \lambda / 2$



(c).  $h = \lambda$



(d).  $h = 2 \lambda$

図 4-3-5. エネルギーモデルと波動解の比較

4. 4 2つの点音源からなる指向性音源に対するエネルギーモデルの適用範囲

本節では、最初に2つの点音源による障壁周辺の音場の特徴を計算により検討する。次に松本のモデルの適用条件である「指向特性が音源からの距離によらず安定していること」[4-3]について確認する。さらに、前川の実験チャートの適用条件である「エッジ上部の音圧レベルが無指向性点音源の音圧分布に近いこと」[4-1]についても数値計算により確認し、指向性音源に対する挿入損失のエネルギーモデルの適用範囲について考察する。

4. 4. 1 障壁周辺の音場

(1) 解析手法

図4-4-1に示すように、音源  $Q$ 、障壁のエッジ  $O$ 、地表面  $G$  を考え、地表面から音源までの高さを  $h$  とする。計算領域は  $10\text{m} \times 10\text{m}$  の正方形領域とし、計算周波数は  $500\text{Hz}$ 、障壁表面と音源側地面は剛と考えた。また、観測点側地表面は考えていない。

計算には *Kouyoumjian* の漸近解を用い、位相分布とアクティブインテンシティベクトルの分布を計算した。アクティブインテンシティベクトルは近接する2点間の音圧を求め、差分により近似的に粒子速度を算出して、両者により算出した。

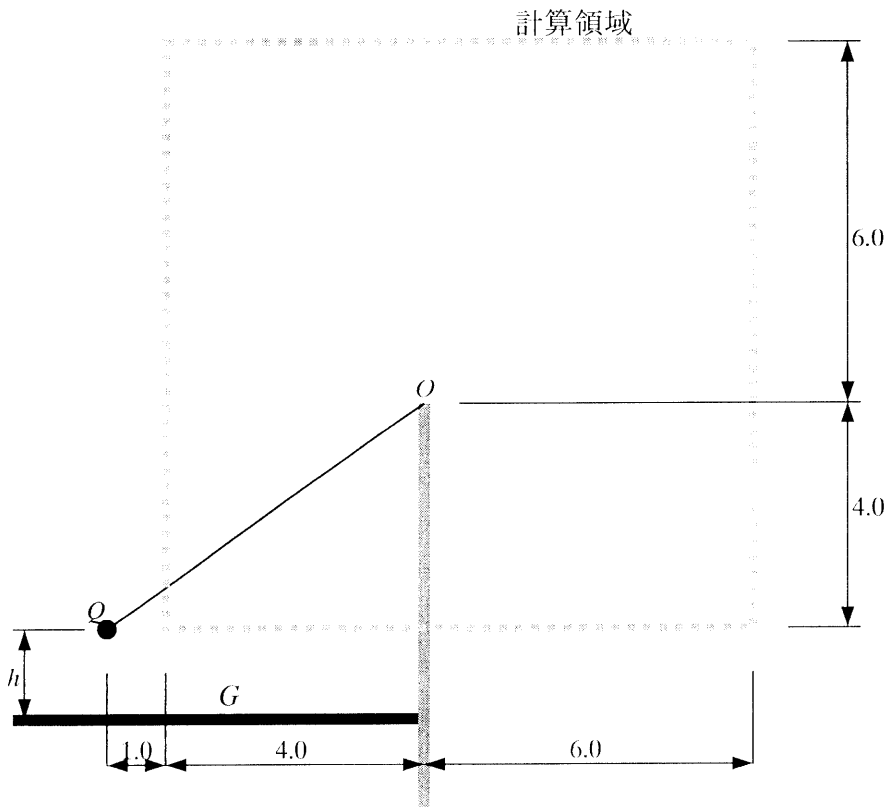


図 4-4-1. 障壁周辺の等位相分布図計算の諸元 (単位 : m)

## (2) 位相分布

文献〔4-4〕と同様に、点音源に対する障壁周辺の等位相分布図を計算した。

$h=0, \lambda/2, \lambda, 2\lambda$ の結果を図4-4-2に示す。

いずれも障壁背後ではエッジを中心とした同心円の位相分布である。音源側では直接波と障壁での反射波の干渉により複雑な位相分布となっている。また音源が見える範囲では地表面から音源が離れるにつれて位相分布が乱れることが分かる。

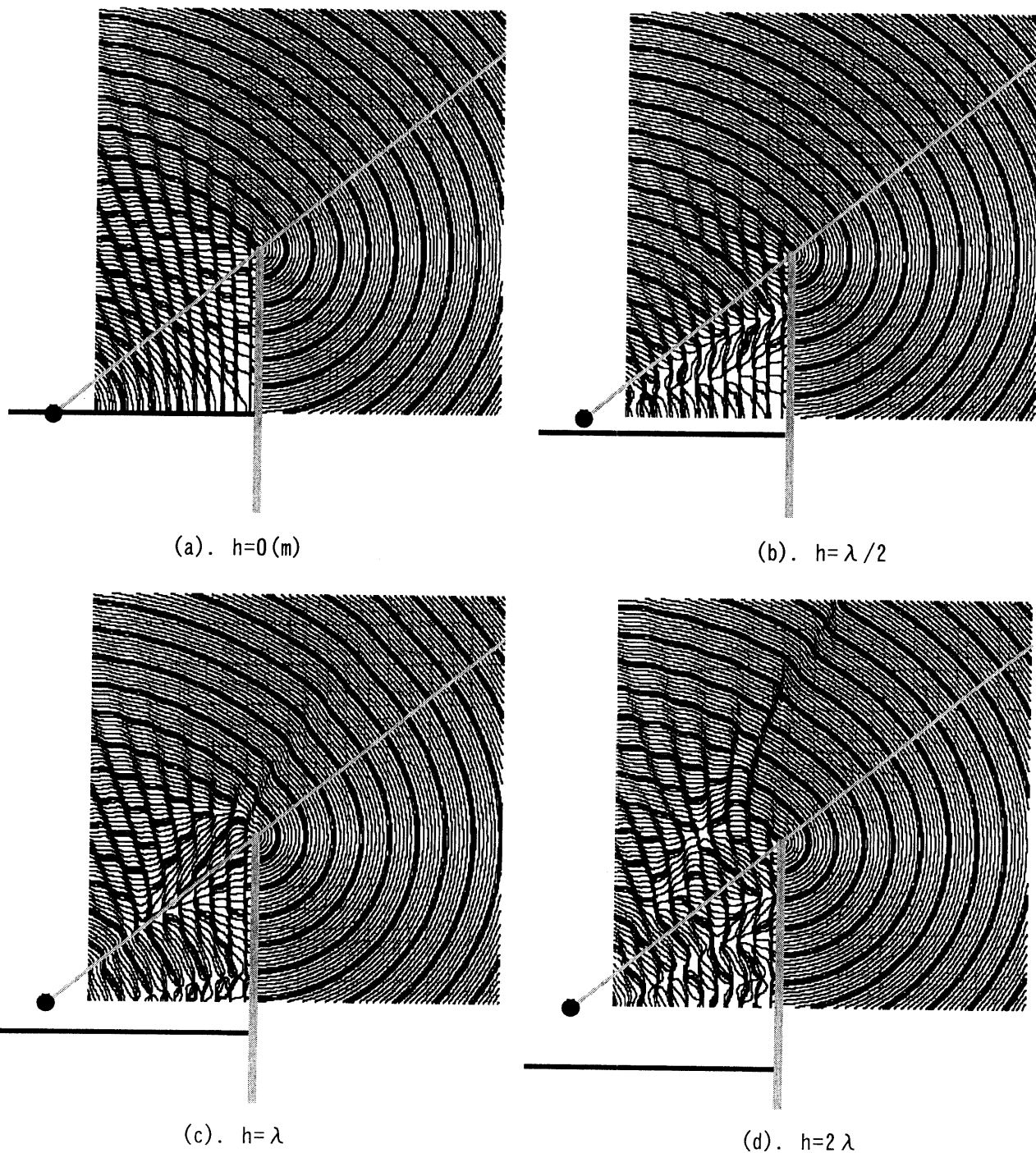


図 4-4-2. 障壁周辺の等位相分布図



### (3) インテンシティベクトル

地表面があるときのアクティブインテンシティベクトル、および地表面がないときのインテンシティベクトルを基準としたときの地表面を挿入したことによるインテンシティベクトルの変化量を図 4-4-3 に示す。なおインテンシティベクトルの変化分の長さはインテンシティベクトルの長さの 10 倍に表示している。

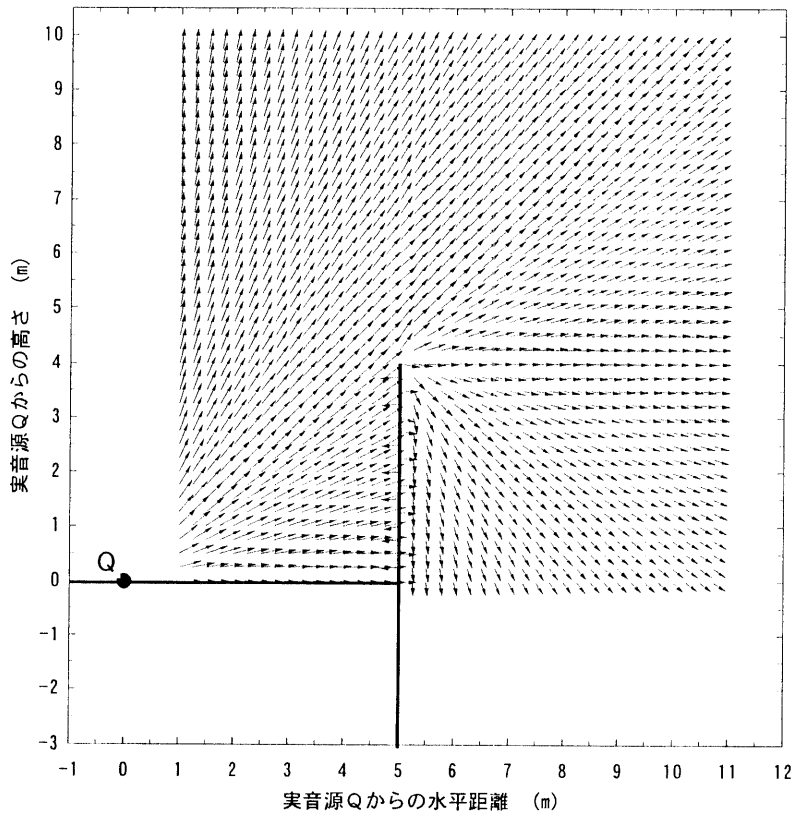
図 4-4-3(1) は地表面上に音源がある場合である。アクティブインテンシティベクトルおよびインテンシティベクトルの変化分も障壁頂点を中心として放射状に影の領域に広がっている。

図 4-4-3(2) は音源の  $\lambda/2$  下に地表面がある場合である。アクティブインテンシティベクトルは障壁の音源側では地表面での反射波によりやや乱れているが、影の領域は障壁頂点を中心として放射状に広がっている。地表面を挿入したことによるインテンシティベクトルの変化を見ると障壁の影の領域では差のベクトルは回折点に向かっており、地表面上に音源がある(1)の結果とは逆の向きである。

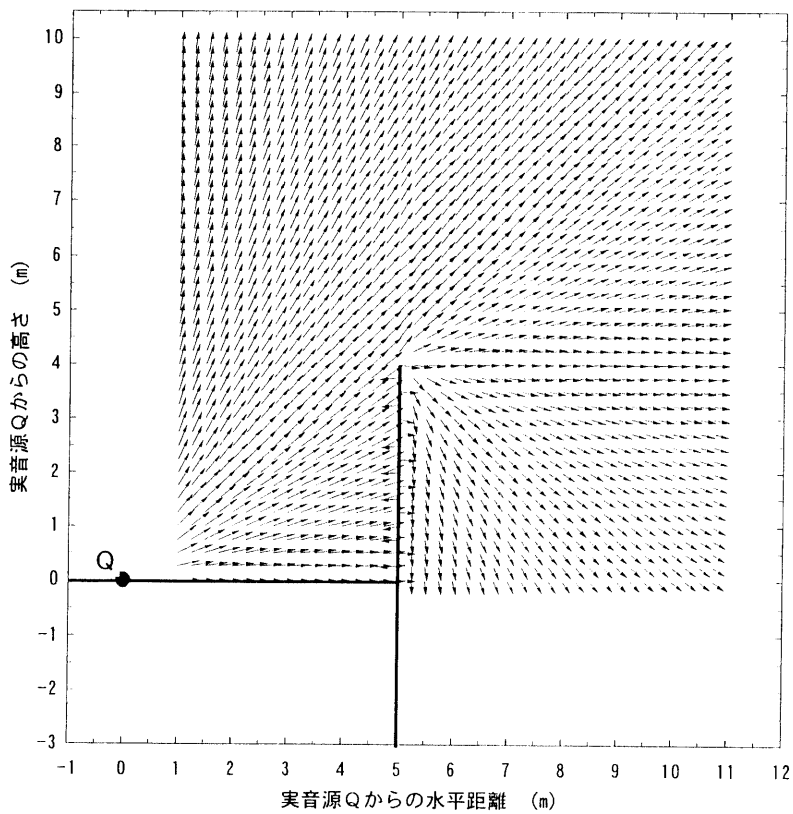
図 4-4-3(3) は音源の  $\lambda$  下に地表面がある場合である。アクティブインテンシティベクトルは障壁の音源側では地表面での反射波によりさらに乱れているが、影の領域はやはり障壁頂点を中心として放射状に広がっている。地表面によるインテンシティベクトルの変化を見ると影の領域だけでなく音源が見える領域の一部も回折点あるいは音源側にベクトルが向いている。

障壁背後のアクティブインテンシティベクトルは地表面の位置にあまり関係していないように見えるが、地表面での反射波によるインテンシティベクトルの変化分は地表面の位置により向きが異なっている。位相分布は地表面に位置に関係なく障壁の影では回折点を中心とする同心円であったが、インテンシティベクトルは地表面に位置により壁の部分でも影響を受けていることが分かる。

4. 4 2つの点音源からなる指向性音源に対するエネルギーモデルの適用範囲

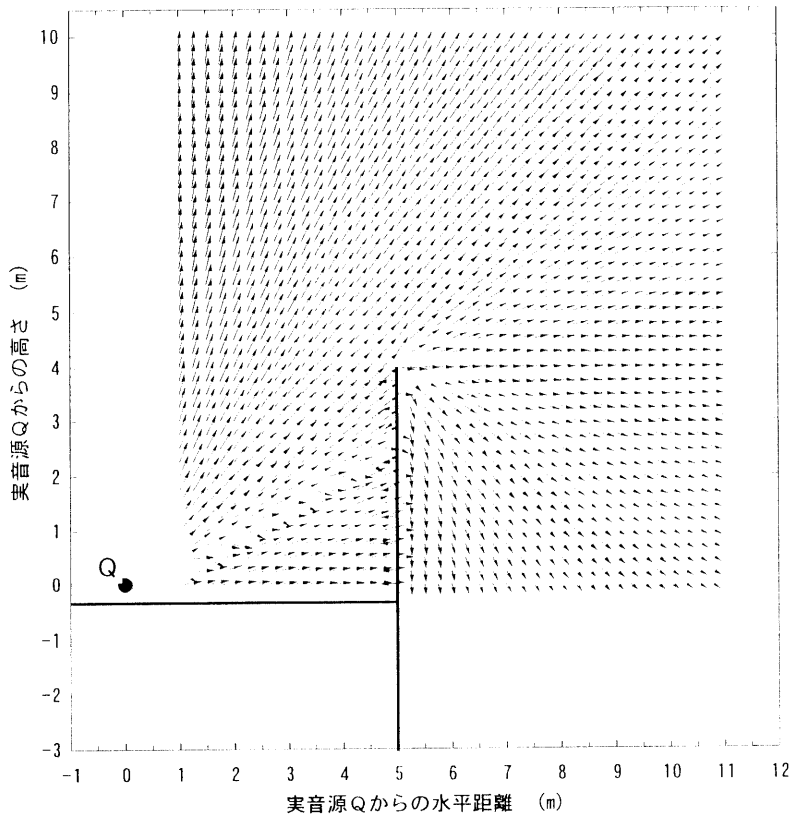


(a). インテンシティベクトル

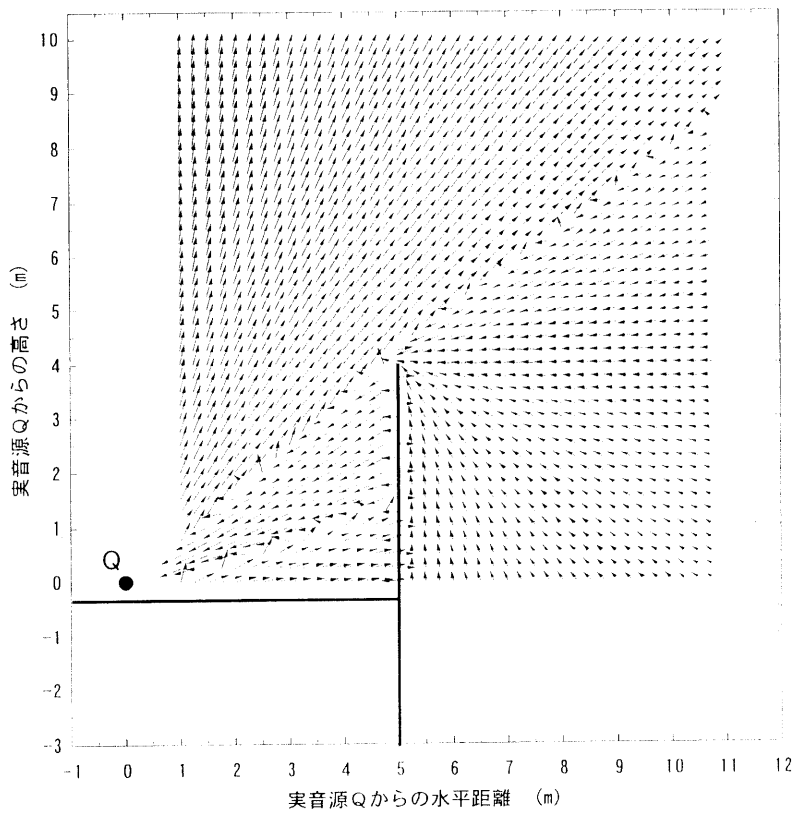


(b). 剛な地面の有無によるインテンシティベクトルの変化

図 4-4-3(1). 障壁周辺のインテンシティベクトル ( $h=0m$ )

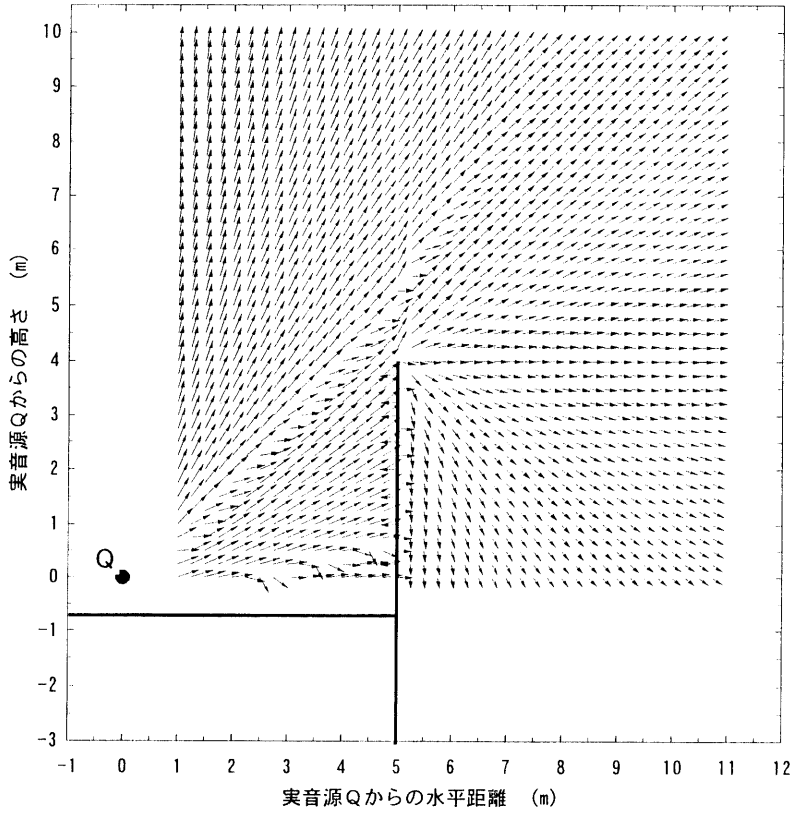


(a). インテンシティベクトル

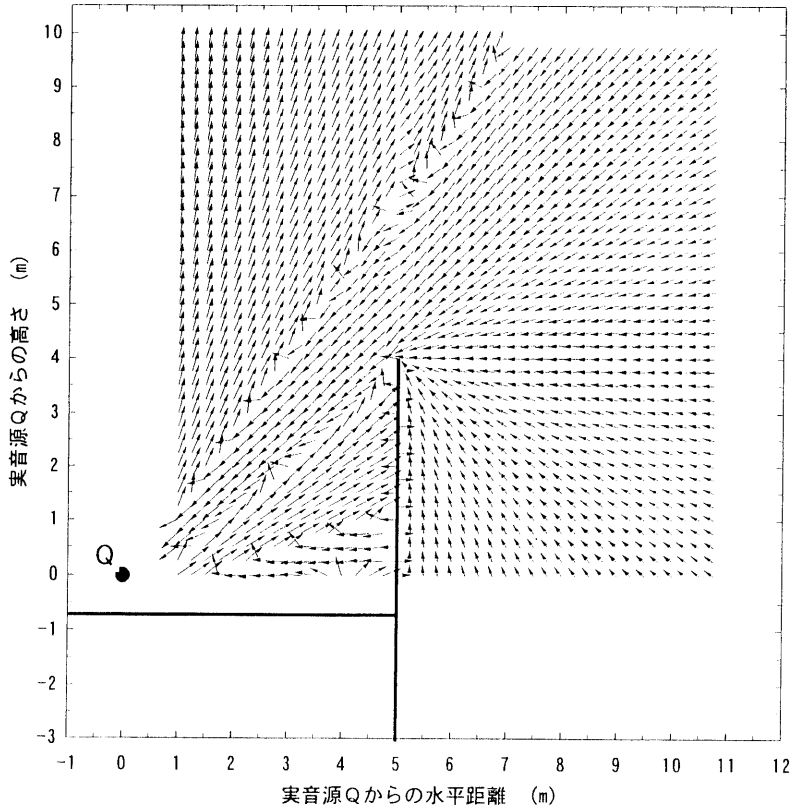


(b). 剛な地面の有無によるインテンシティベクトルの変化

図 4-4-3(2). 障壁周辺のインテンシティベクトル ( $h=\lambda/2$ )



(a). インテンシティベクトル



(b). 剛な地面の有無によるインテンシティベクトルの変化

図 4-4-3 (3). 障壁周辺のインテンシティベクトル ( $h=\lambda$ )

## 4. 4. 2 剛な反射面上の点音源の見かけの指向性

松本〔4-3〕は、障壁のエッジでの音圧レベルを用いて計算できる条件として、音源からエッジまでの距離で指向性が安定している必要があることを報告している。すなわち、音源  $Q$  からエッジ  $O$  までの距離を  $R_{QO}$  としたときに、半径  $R_{QO}$  の同心円上での指向性と半径距離を十分大きくしたときの指向性がほぼ等しい必要がある。

2つの無指向性点音源による音源周囲の音圧分布  $\Delta L_{\text{dir}}(\psi)$  の計算式は式(4-3-5)に示したとおりである。ここでは、図4-4-1の配置で、地表面の位置が変化したときの音源周囲の音圧分布  $\Delta L_{\text{dir}}(\psi)$  を観測点までの距離  $R_0$  で比較する。

$\Delta L_{\text{dir}}(\psi)$  の計算例を図4-4-4に示す。計算周波数は500Hz、 $h$  は  $n\lambda/8$  ( $n=0\sim 7$ )とし、 $R_0$  は5,10,50mの3ケースとする。また地表面は剛であると仮定する。

$h \leq \lambda/4$  であれば  $R_0$  に関係なく  $\Delta L_{\text{dir}}(\psi)$  はほぼ一定である。しかし  $h$  がそれ以上になると  $R_0$  によって  $\Delta L_{\text{dir}}(\psi)$  に差がみられ、ときに干渉のディップ付近で差が大きくなっている。

4.3節での検討で、 $h = \lambda/4$  であればエネルギーモデルで挿入損失が近似計算可能であるが、 $h \geq \lambda/2$  のときはエネルギーモデルは使用できないことが分かっている。図4-4-4で  $h = \lambda/4$  のときは  $\Delta L_{\text{dir}}(\psi)$  は  $R_0$  に関係なくほぼ一定である。一方、 $h > \lambda/4$  のときは  $\Delta L_{\text{dir}}(\psi)$  は  $R_0$  により変化する。したがって、音源側の地表面の影響をエネルギーモデルで音源の指向性として考慮できるのは  $h \leq \lambda/4$  の場合に限られる。

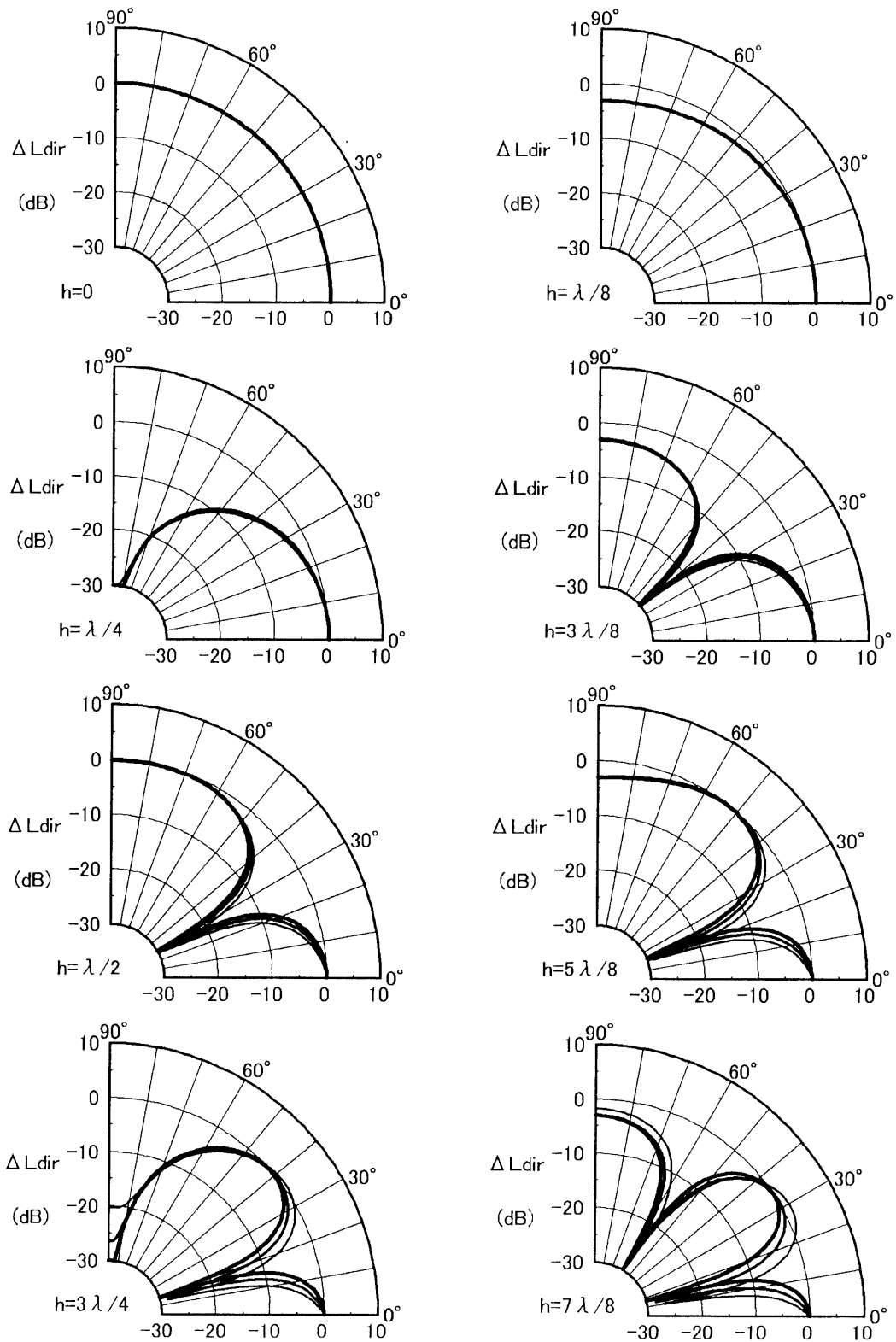


図 4-4-4. 2つの同位相点音源周辺の音圧分布の計算例

- $R_0=50\text{m}$
- $R_0=10\text{m}$
- $R_0=5\text{m}$

### 4. 4. 3 障壁上部の音圧分布

前川〔4-1〕は、前川の実験チャートが適用できる条件として、「エッジ上の音圧レベルが徐々に減衰していること」あるいは「エッジ上の音圧レベル分布が無指向性点音源の場合の分布に近いこと」を指摘している。

ここでは、図 4-4-1 の配置でのエッジ上部の音圧レベル分布を求め無指向性点音源の場合と比較した。計算周波数は 500Hz とした。結果を図 4-4-5 に示す。

$h=0$  が無指向性点音源に相当する。 $h \leq \lambda/4$  の分布は  $h=0$  のときの分布とよく似ており、障壁の挿入損失を計算するのに前川の実験チャートを使用しても問題ない。しかし、 $h$  がさらに大きくなると変動が大きくなり、 $h=3\lambda/4$  ではエッジの音圧レベルよりもエッジから 1m 以上離れた地点の音圧レベルの方が大きい。また  $h=2\lambda$  ではエッジから 0.8m 離れた地点の音圧レベルにディップがみられ、 $h=4\lambda$  ではエッジから 3.8m 離れた地点にディップがある。

したがって、前川が指摘している適用条件を満足するためには  $h \leq \lambda/2$  あるいは  $h \leq \lambda/4$  でなければならない。

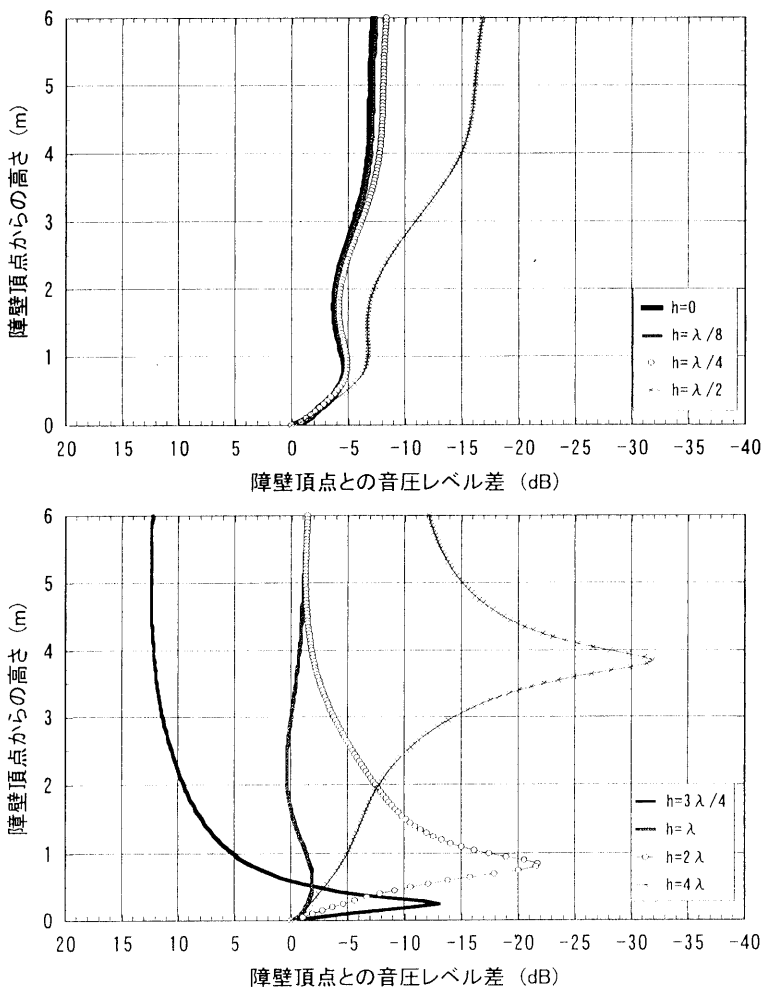


図 4-4-5. エッジの上部の音圧分布

## 4. 5 第4章のまとめ

2つの無指向性点音源の位相と振幅を調整することにより指向性音源をモデル化し、指向性音源に対する障壁の挿入損失のエネルギー計算モデルとその適用範囲を検討した。

最初に半波長の間隔で設置された2つの無指向性点音源周囲の音圧分布を計算した。騒音予測における点音源の指向性モデルとして用いられることが多い  $\cos \theta$  の指向性音源であれば2つの点音源の位相と振幅を調整することにより近似できることを示した。また、漸近解を用いて2つの点音源による音圧分布を計算した。指向性音源に対する障壁の挿入損失を騒音制御でよく用いられる前川の実験チャートと比較した。その結果、指向性が強くなるほど前川の実験チャートとの差が大きくなり、場合によっては障壁を設置したことにより騒音が増加する場合もあり得ることが分かった。指向性音源に対する障壁の挿入損失のエネルギーモデルを松本の方法を用いて検証した。半波長の間隔で設置された場合であれば松本の方法で障壁エッジでの音圧レベルを考慮することで計算できることを確認した。

次に、無指向性点音源が地表面近傍にある場合を想定し、任意の間隔で設置された2つの無指向性点音源についての障壁の挿入損失を検討した。まず障壁周りの位相分布とアクティブインテンシティベクトルの分布を数値解析により求めた。位相分布は障壁の影では地表面位置に関係なく回折点を中心とした円弧状の分布であり、またインテンシティベクトルは地表面と音源の位置関係により増減が見られた。松本のモデルの適用条件である「指向特性が音源からの距離によらず安定していること」および前川の実験チャートの適用条件である「エッジ上部の音圧レベルが無指向性点音源の音圧分布に近いこと」について検討し、音源が地表面から  $\lambda/4$  以内の場合であれば、これらの条件は満足でき、またエッジの音圧レベルを用いてエネルギーモデルで計算可能であることが分かった。



