

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6章

高架裏面反射音の

エネルギー計算モデル

平面道路上に高架道路が併設された道路では下の道路（下路）を走行する自動車から発生する騒音が高架道路（上路）の裏面で反射し下方へ伝搬する高架裏面反射音が生じる。特に下路の道路端に遮音壁が設置され直接音が遮蔽される場合には、相対的に高架裏面反射音の影響が大きくなる。

従来は高架裏面反射音の予測は、高架裏面に有限幅の平坦面を仮定し回折に関しエネルギーの加減則が成り立つことを前提としたスリット法〔6-1〕がよく用いられてきた。スリット法は反射面が平坦な場合には波動解を比較的よく近似する〔6-2〕。しかし、都市内の高架道路でもっとも多いのはI桁構造であり、次いで箱桁構造であるが、I桁構造の高架道路は道路床版をI型の主桁鋼板（I桁）で下から支持した構造で、主桁の高さは1.5～2m程度が一般的である。また主桁以外にも主桁と直角に設置された横桁やL型あるいはT型の構造部材が複雑に組み合わさっている。また箱桁構造の高架道路も道路床版を2～3mの箱形鋼桁で支持した構造である。道路交通騒音の主要な周波数域は500～1kHzであるのに対し、I桁や箱桁の諸元は数波長になり無視できないほど大きく、高架裏面全体としては凹凸を形成している。したがって高架裏面を平坦な反射面と考えてスリット法を適用するには無理があり、I桁や箱桁高架道路裏面での反射音を精度よく予測するモデルがぜひとも必要となる。

本章では、多重反射が考えられる場合のエネルギーベースでの予測モデルである境界エネルギー積分法〔6-3〕を高架裏面反射音の予測に適用し、その妥当性を検討する。

6.1節では、I桁高架道路裏面での反射特性について、2次元境界要素法を用いて数値解析し、反射特性が余弦則で近似できることを明らかにする。

6.2節では高架裏面を余弦則の反射指向特性を有する反射面とし、境界エネルギー積分法を適用し、計算値と測定値を比較して妥当性を検討する。

6. 1 高架道路裏面でのエネルギー反射特性

ここでは2次元問題として高架道路裏面での反射特性を扱う。最初に2次元境界要素法によりI桁構造高架道路裏面での反射指向特性を把握する。次に、境界要素法の計算結果を踏まえて、*Lambert*の余弦則にしたがう反射指向特性を有する反射面を仮定した2次元のエネルギーベース反射モデルを導き、境界要素法の計算結果との比較によりその妥当性を示す。

6. 1. 1 反射音の波動解析

(1) 対象とした高架道路

都市内の高架道路でもっとも多いのは4～6車線幅員の鋼I桁構造形式および鋼箱桁構造形式である。4車線幅員相当のI桁構造高架道路の例を図6-1-1に、箱桁構造高架道路の例を図6-1-2に示す。高架道路裏面には主桁のほか横桁などの構造部材が多数ある。また図には示していないが点検路などの付属設備も設置されていることも多い。このように都市内で一般にみられる高架道路の裏面は音響的にみて単純ではなく、また支間長や幅員により部材の諸元が変わるため解析において標準的な部材諸元を設定することは意味をもたない。

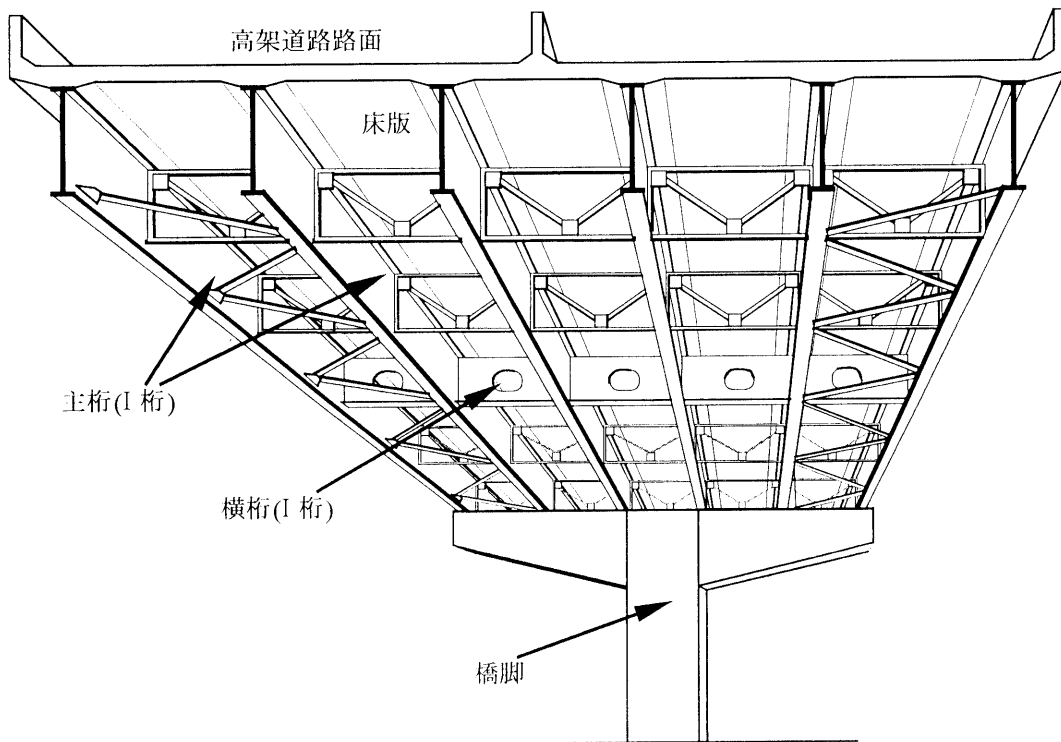


図6-1-1(1). 代表的な都市内の高架道路裏面の例 (I桁構造高架道路)

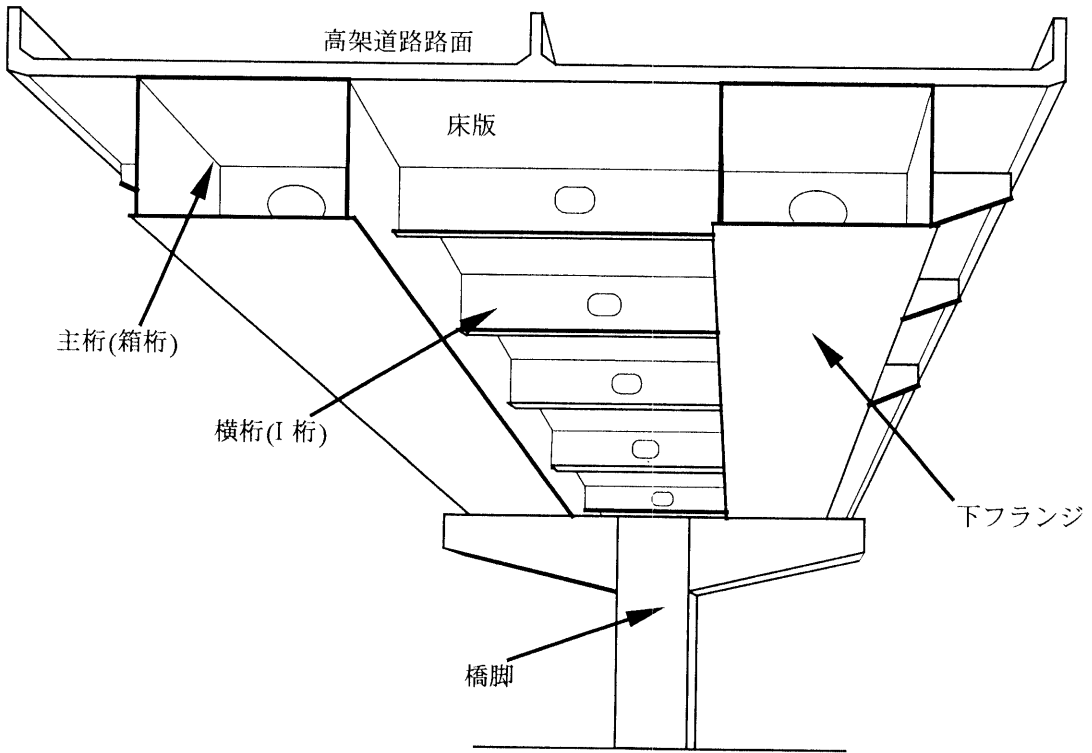


図 6-1-1(2). 代表的な都市内の高架道路裏面の例 (箱桁構造高架道路)

本研究では横桁・点検路などを無視して、特に面積が大きい床版および高欄と主桁のみからなる図 6-1-2 に示す形状に単純化した高架道路を想定する。

なお、高架道路裏面での反射指向特性は反射面の大きさにも関係するが、ここでは境界要素の数が少なくすむ 4 車線相当の高架道路をとりあげる。

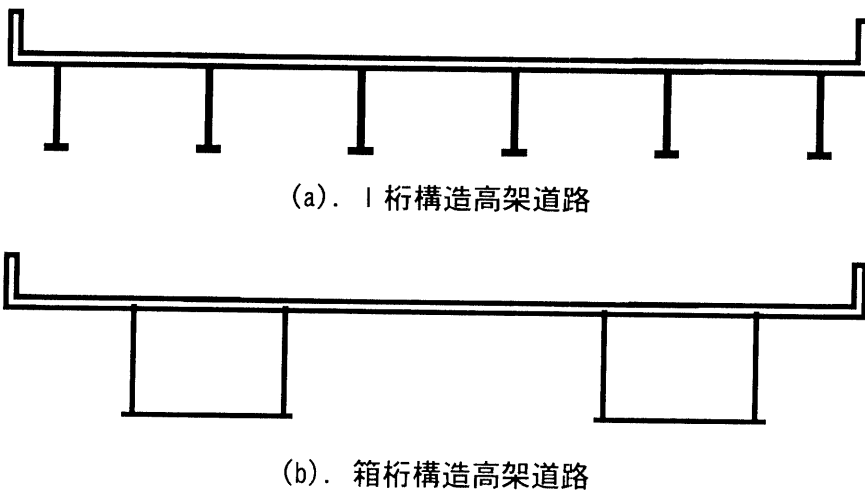


図 6-1-2. 数値計算において単純化した高架道路

(2) 境界要素法による解析

第3章と第5章で境界要素法については詳述したので、ここでは本節に関連する点を中心に述べる。図6-1-3に示すような単純化した高架構造物（表面： S ）と音源 Q および任意の観測点 P を考える。Kirchhoffの積分定理によれば任意の点 P での速度ポテンシャル $U(P)$ は以下のように表せる。なお、ここでは正弦波を考えており、時間項は $e^{j\omega t}$ とし、以下の数式表現においては省略している。

$$U(P) = \int_S \left\{ U(s) \frac{\partial G(P;s)}{\partial \mathbf{n}_s} - \frac{\partial U(s)}{\partial \mathbf{n}_s} G(P;s) \right\} ds + G(P;Q) \quad (6-1-1)$$

ここで、 $G(P;s)$ は点 s から点 P への伝搬を表す自由空間でのGreen関数、 \mathbf{n}_s は境界 S 上の点 s における内向き法線ベクトル、 $\partial/\partial \mathbf{n}_s$ は内向き法線方向の偏微分、 $G(P;Q)$ は直接波成分である。

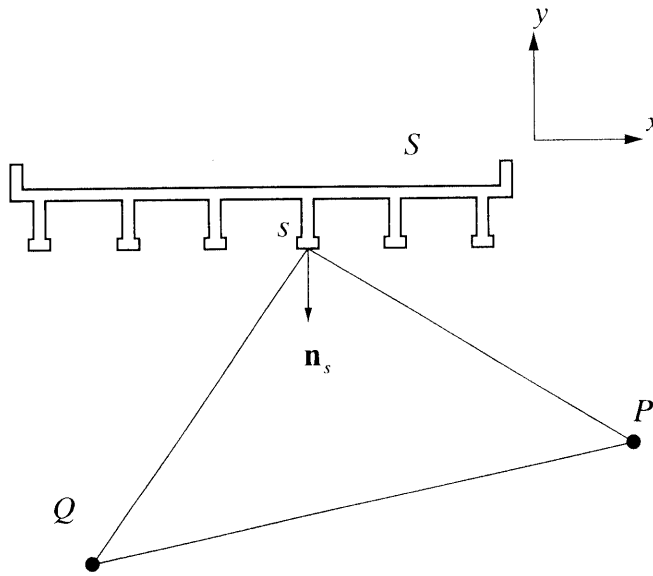


図6-1-3. 2次元境界要素法による数値計算

2次元問題では式(6-1-1)の $G(P;s)$ は次式で与えられる。

$$G(P;s) = \frac{1}{4j} H_0^{(2)}(kr) \quad (6-1-2)$$

ここで $H_0^{(2)}$ は0次第2種Hankel関数、 k は波数、 r は点 P から点 s までの距離(m)である。

高架構造物表面を剛であるとする。このとき式(6-1-1)の $\partial U(s)/\partial \mathbf{n}_s$ は0となる。更に点 P を S 上の点 S_p にとると式(6-1-1)は以下のように表せる。

$$\frac{U(S_p)}{2} = \int_S \left\{ U(s) \frac{\partial G(S_p;s)}{\partial \mathbf{n}_s} \right\} ds + G(S_p;Q) \quad , \quad S_p \in S \quad (6-1-3)$$

道路構造物表面 S を微小な要素 σ_i ($i = 1 \sim N$) に分割する. 各要素 σ_i 上では $U(s)$ は一定とし, σ_i の中心を s_i とすると積分方程式(6-1-3)は以下のような連立方程式で表せる.

$$\frac{U(s_i)}{2} = \sum_{j=1}^N U(s_j) \int_{\sigma_j} \frac{\partial G(s_i; s)}{\partial \mathbf{n}_s} ds + G(s_i; Q) \quad (6-1-4)$$

この連立方程式を解き $U(s_i)$ を求め, 次式により任意の点 P での高架構造物での反射波の速度ポテンシャル $U_s(P)$ を求めた.

$$U_s(P) = \sum_{j=1}^N U(s_j) \int_{\sigma_j} \frac{\partial G(P; s)}{\partial \mathbf{n}_s} ds \quad (6-1-5)$$

$U_s(P)$ を用いて次式により高架構造物での反射波の音圧 $p(P)$ および音響エネルギー密度 $E(P)$ を算出した.

$$p(P) = j\omega\rho U_s(P) \quad (6-1-6)$$

$$E(P) = \frac{\rho}{2} \left(u_e^2(P) + \frac{p_e^2(P)}{(\rho c)^2} \right) \quad (6-1-7)$$

$$u(P) = - \left(\frac{\partial U_s(P)}{\partial x} \mathbf{i}_x + \frac{\partial U_s(P)}{\partial y} \mathbf{i}_y \right) \quad (6-1-8)$$

ここで, ρ は空気の密度(kg/m^3), c は空気中の音速(m/s), $u(P)$ および $u_e(P)$ は点 P での粒子速度およびその実効値(m/s), $p_e(P)$ は点 P での実効音圧(Pa), \mathbf{i}_x および \mathbf{i}_y は図 6-1-3 における x 軸方向および y 軸方向の単位ベクトルである. 式(6-1-8)の計算は差分により数値解析した.

解析対象とした単純化した高架道路構造物の諸元を図 6-1-4 に示す.

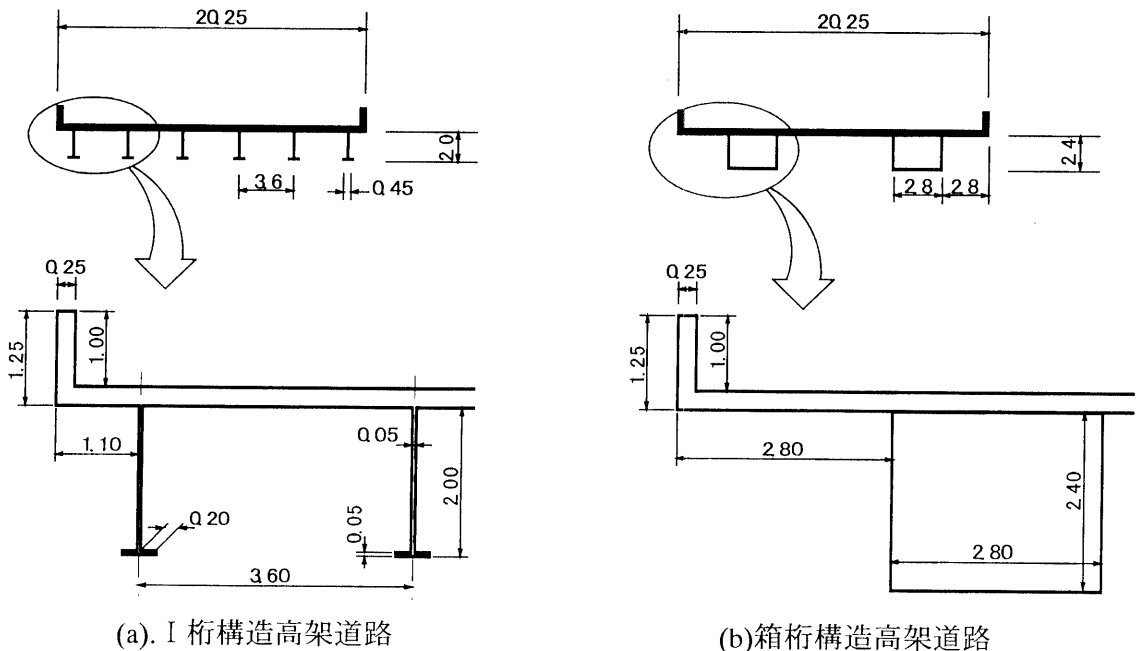


図 6-1-4. 解析対象とした単純化した高架道路構造物の諸元

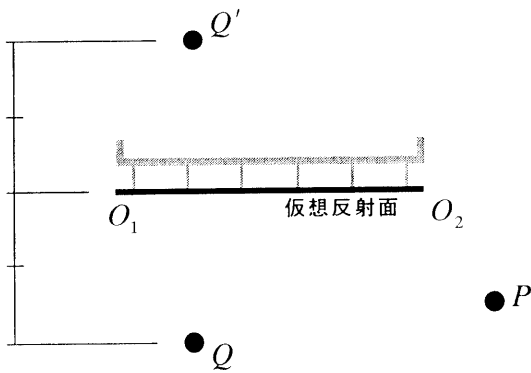
(3) スリット法による計算

スリット法による高架裏面での反射音の計算方法を以下に示す。スリット法では平坦な反射面を仮定し、その反射面に対する音源の虚像を考え、反射面の幅に相当する開口からの伝搬を扱う。

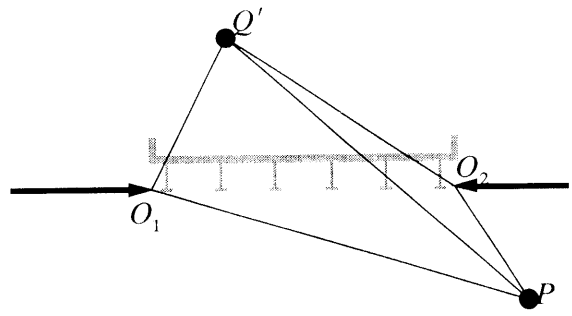
本章では、図 6-1-5(a)に示すように高架裏面の桁下に高架道路幅の平坦で有限幅の反射面を仮定する。反射面の両端を O_1, O_2 とする。仮定した反射面に対する音源 Q の虚像 Q' を考える。このとき、 Q' から観測点 P への伝搬を図 6-1-5(b)のように、スリットの開口 $O_1 \sim O_2$ からの伝搬と考える。ここでの有限な開口の影響 ΔL_{slit} を次式で計算する。

$$\Delta L_{\text{slit}} = 10 \log_{10} \left\{ 10^{\frac{\Delta L_{d2}}{10}} - 10^{\frac{\Delta L_{d1}}{10}} \right\} \quad (6-1-9)$$

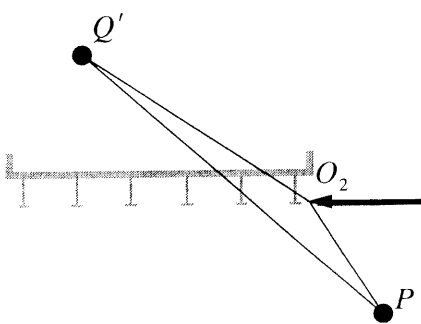
ここで、 ΔL_{d1} および ΔL_{d2} は図 6-1-5(c)のように仮定の障壁を考えたときの遮蔽効果であり、前川の実験チャートにより計算する。



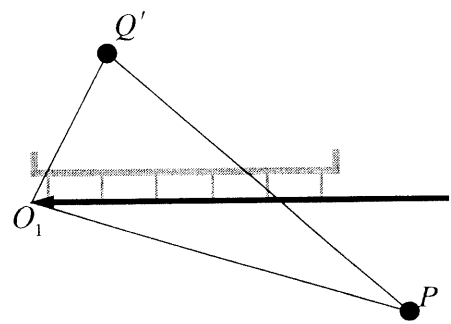
(a). 仮想反射面の設定



(b). スリットの設定



(c). ΔL_{d2} 計算のための障壁の仮定

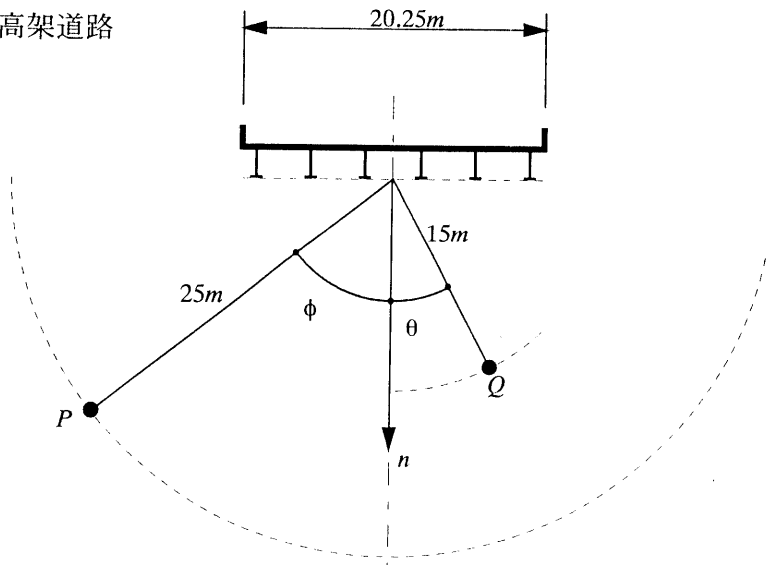


(d). ΔL_{d1} 計算のための障壁の仮定

図 6-1-5. スリット法による高架裏面反射音の計算

音源および観測点の位置を図 6-1-6 に示す. 反射指向特性は音源から反射面までの距離や反射面から観測点までの距離によっても変化する. 本研究では, 2 層構造道路の下路の路面と上路の裏面の高低差は一般には 10~15m の場合が多いことから, 音源は道路中心軸と桁の最下面の交点を中心とし, 下向き方向を $\theta = 0^\circ$ とした半径 15m の円弧上の $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ の 3 点に設定した. また, 観測点は半径 25m の円弧上に $-89^\circ \sim +89^\circ$ まで 1° 間隔で設定した. なお観測点が半径 50m の円弧上にある場合も計算したが, 音圧あるいは音響エネルギー密度の相対的な分布は半径 25m の結果とよく似た傾向にあったので, 以下では半径 25m での結果について述べる.

(a) I 桁構造高架道路



(b) 箱桁構造高架道路

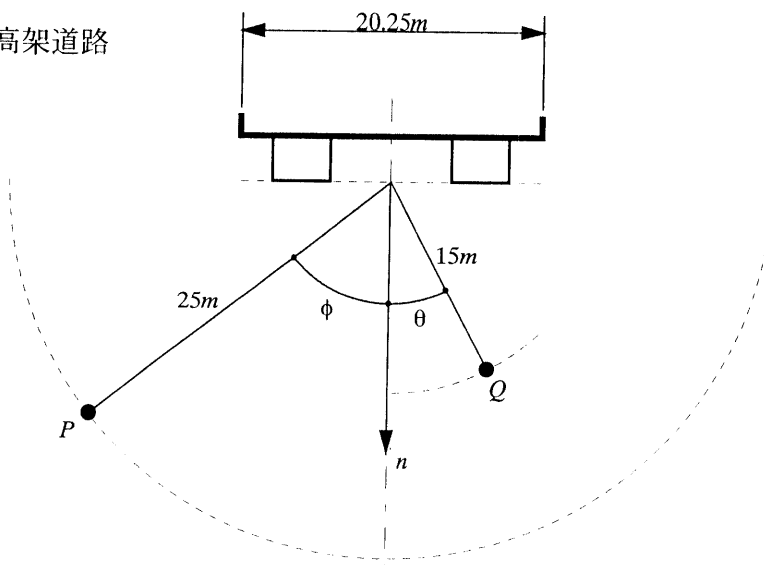


図 6-1-6. 音源および観測点の配置

計算対象とした周波数帯域は道路交通騒音の主要な帯域を含む，中心周波数が250,500,1kHzの3つの1/1オクターブバンドとした．実際の計算は1/9オクターブバンド中心周波数について行い，各周波数での音圧レベルおよび音響エネルギー密度レベルの計算値をパワー合成し，1/1オクターブバンドの値を算出した．

なお，ここでの数値計算は反射指向特性の傾向を見るのが目的である．したがって，計算周波数の設定においては，2.3節で検討したように等比間隔で計算した方が等間隔で計算するよりも誤差の分布する範囲は広いが誤差の最大値は小さくなることから，1/9オクターブバンド中心周波数を計算周波数とした．

また速度で分類しない場合の道路交通騒音のスペクトル〔6-4〕およびA特性補正値を重み付けし，道路交通騒音のスペクトルを有する広帯域雑音と考えたときの音圧レベルおよび音響エネルギー密度レベルも算出した．

分割要素の大きさに関しては，要素の大きさが波長の1/5以下であれば十分な精度が保たれることが報告されており〔6-5,6〕，高架裏面反射音のレベル分布の傾向を把握するうえでは波長の1/5程度の分割要素で問題ないと考えられる．本研究での最高計算周波数は1361Hzであり，このときの波長の1/5は約5cmに相当する．実際の高架構造物のI桁は2cm程度の板厚であるが，数値計算上の要素分割を考慮し板厚を5cmとした高架道路を想定し，1分割要素の大きさを5cmとして計算した．

(3) 数値計算結果

a. I桁構造高架道路

250,500,1kHzを中心周波数とする1/1オクターブバンドの相対音圧レベル分布を図6-1-7(1)～(2)に示す．また，図には桁下面に高架道路幅の平坦な鏡面を仮定してスリット法で計算した結果もあわせて示す．2次元境界要素法の計算値と比較するために，スリット法の計算は仮定した鏡面に対する音源の虚像位置に道路進行方向に1m間隔で±800mの範囲にランダム位相の点音源列を設定し，また仮定した反射面端部での回折の計算には前川の実験チャートの山本による近似式を用いた．

図6-1-7には音圧レベル分布とあわせて音源・道路構造物・観測点の配置も示している．また図に示す音圧レベルは，全ての観測点での音圧の2乗和を基準とした相対音圧レベル $L_0(\phi_i)$ であり，次式により求めた．

〔境界要素法による計算結果〕

$$L_0(\phi_i) = 10 \cdot \log_{10} \frac{|p(\phi_i)|^2}{\sum_{j=-89}^{+89} |p(\phi_j)|^2} \quad (6-1-10)$$

〔スリット法による計算結果〕

$$L_0(\phi_i) = 10 \cdot \log_{10} \frac{10^{L(\phi_i)/10}}{\sum_{j=-89}^{+89} 10^{L(\phi_j)/10}} \quad (6-1-11)$$

ここで、 $p(\phi_i)$ は角度 ϕ_i の観測点での境界要素法による音圧の計算値 (Pa)、 $L(\phi_i)$ は角度 ϕ_i の観測点でのスリット法による音圧レベル (dB) であり、次式により計算した。

$$L(\phi_i) = -20 \cdot \log_{10} r_{QP} + \Delta L_{\text{slit}} \quad (6-1-12)$$

なお、 r_{QP} は Q から P までの直線距離である。

2次元境界要素法による音場計算は干渉性線状音源に対する厳密解に相当する境界積分方程式を近似的に数値解析することに相当する。一方、道路交通騒音の L_{Acq} は非干渉性線状音源からの音圧レベルである。したがって2次元境界要素法の計算値をそのまま道路交通騒音の L_{Acq} と見なすことはできない。しかし第3章で検討したように、2次元境界要素法による障壁の挿入損失が観測点を含む線状音源に垂直な横断面上に仮定した点音源に対する障壁の挿入損失とほぼ一致すること、および L_{Acq} に関しては観測点直前付近の音源の寄与が大きいことを考えあわせると、2次元境界要素法で求めた音圧分布は高架裏面反射音の L_{Acq} 分布を大まかには近似していると考えられる。

入射角 θ が 15° のときには、境界要素法とスリット法はよく似た傾向を示している。しかし $\theta = 45^\circ$ の場合には、境界要素法による計算値は、 $\phi = -60 \sim +50^\circ$ の音圧レベルが大きく、 ϕ が 90° に近づくとつれて音圧レベルが小さくなっている。一方、スリット法による計算値は、 $\phi > +30^\circ$ の音源側観測点で境界要素法の計算値に比べ $7 \sim 20\text{dB}$ 小さく、 $\phi < -15^\circ$ の観測点に到達する反射音は $0 \sim 10\text{dB}$ 大きい。特に $\phi = +45 \sim +50^\circ$ の観測点で境界要素法とスリット法の差が大きい。この傾向は $250, 500, 1\text{kHz}$ のいずれにもみられ、また周波数が高くなるほど境界要素法の計算値は凹凸が大きくなる傾向にある。

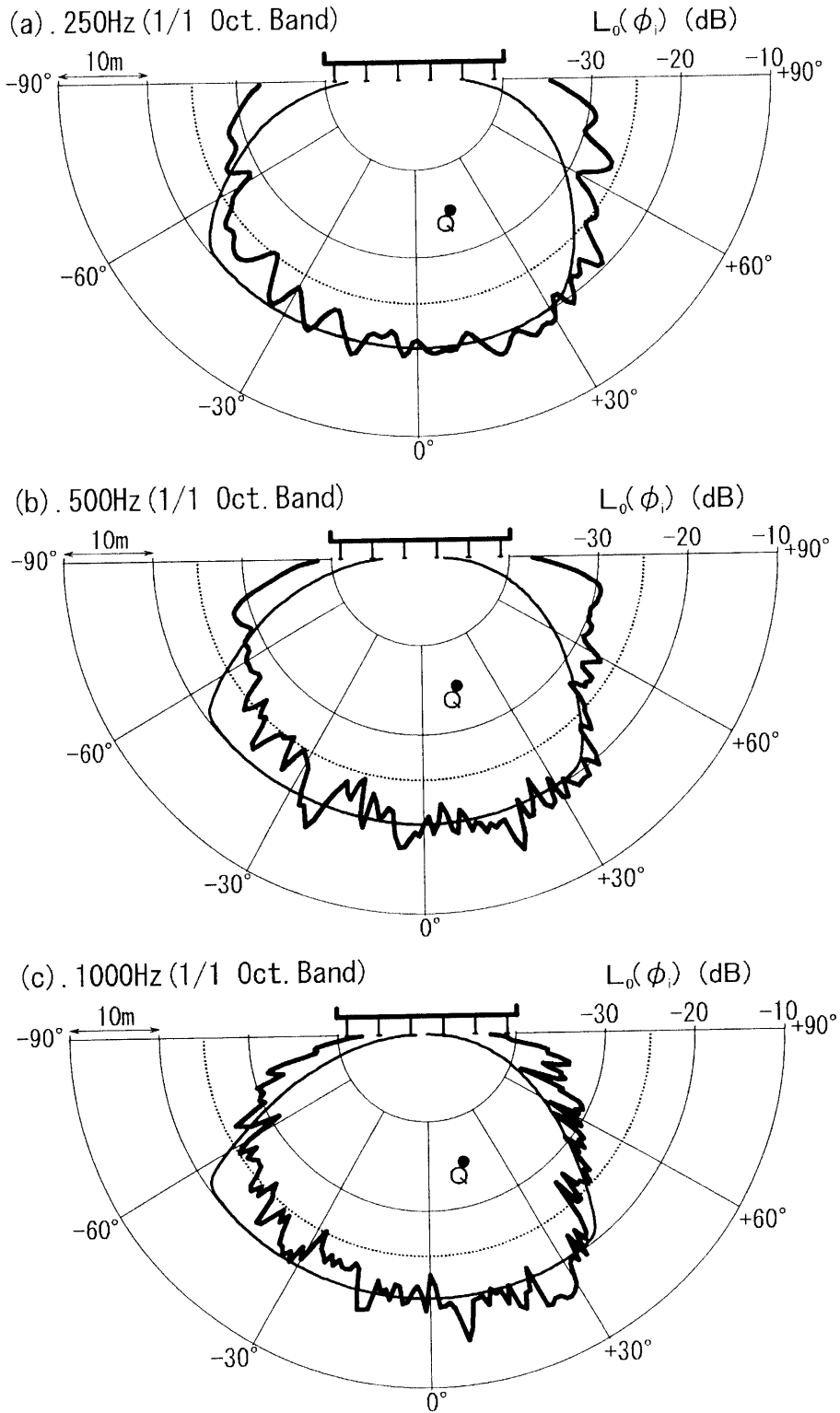


図 6-1-7(1). 2次元境界要素法とスリット法による1桁高架裏面での反射指向特性

入射角 : $\theta = 15^\circ$

凡例 **——** : 2次元境界要素法

—— : スリット法

図の-25dB の位置の点の列が観測点 P

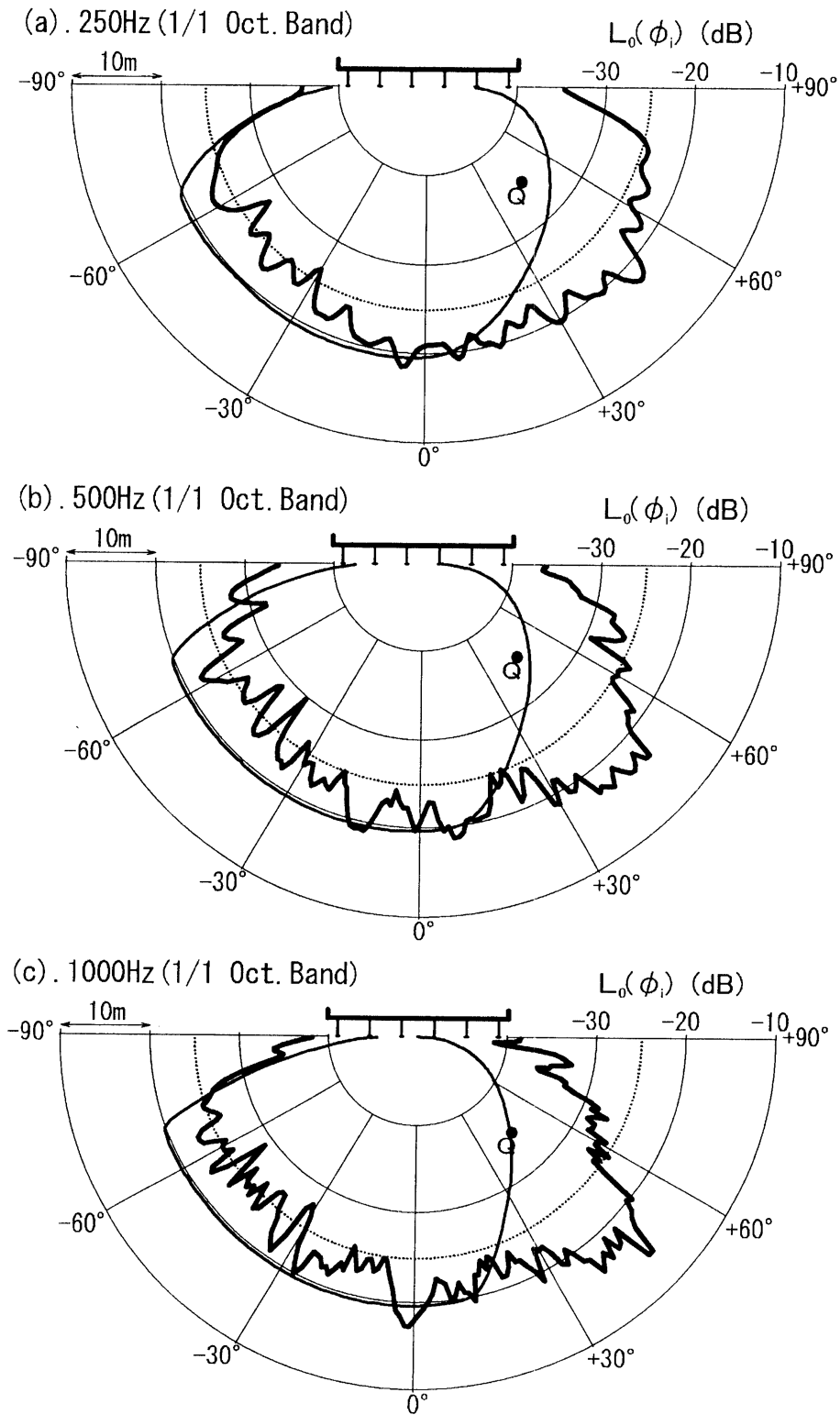


図 6-1-7(2) . 2次元境界要素法とスリット法によるI桁高架裏面での反射指向特性

入射角： $\theta = 45^\circ$

凡例 **——** : 2次元境界要素法

—— : スリット法

図の-25dB の位置の点の列が観測点P

500Hzと1kHzの境界要素法の計算結果で音源側に返ってくる反射音が大きい理由を2次元での幾何学的音線トレースにより検討した。高架道路構造物での反射音の軌跡を図6-1-8に示す。なお、図は音源から0.8°間隔に音線を発生して計算した結果であり、音源からの音線がはじめて高架道路構造物に当たるまでの軌跡は省略している。音源側に反射音が返ってくるのは主にI桁側面と床版面で各1回反射した音線であり、音源付近が焦点のような軌跡となっている。

同様に、音線の間隔を0.01°とし音線法で算出した高架裏面での反射音の音圧レベル分布を図6-1-9に示す。計算値は、全ての観測点での音線の数の総和を基準としてデシベル表示している。音線法の計算結果にも音源側に返ってくる反射音が多いことがわかる。1kHzの音波の波長は0.34mであり、I桁の高さ(2m)の約1/6である。周波数が高くなるほど音波の鏡面反射成分が多くなることから、1kHzあるいは500Hzでは幾何音響的な伝搬に近い反射をしていると考えられる。

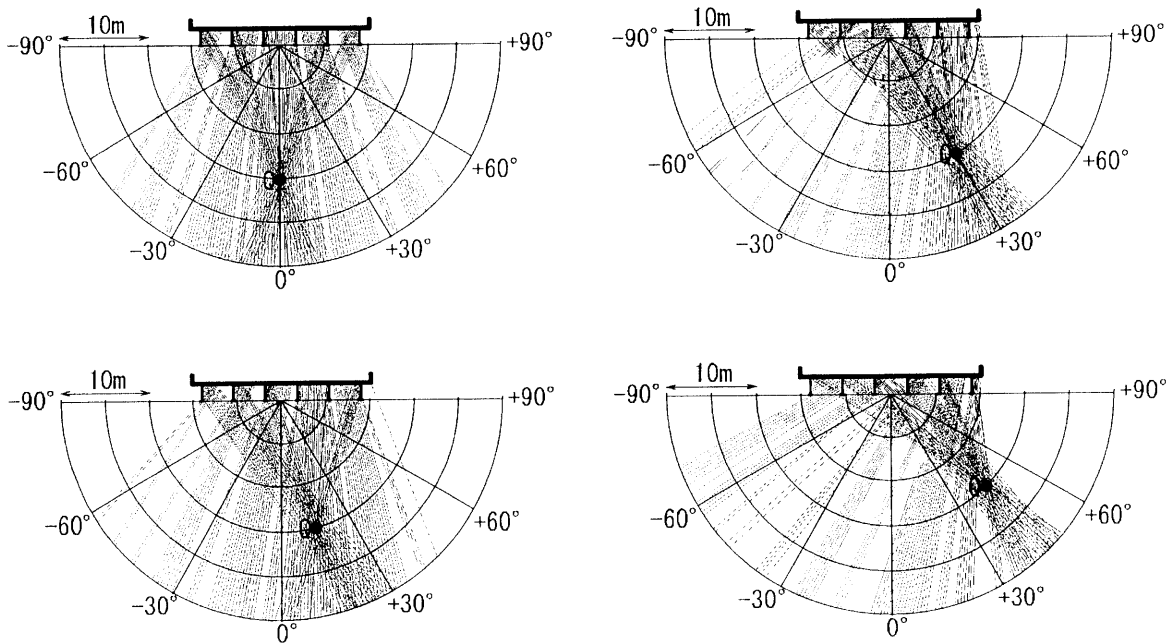


図 6-1-8. 幾何学的音線トレースによる高架裏面反射音の軌跡

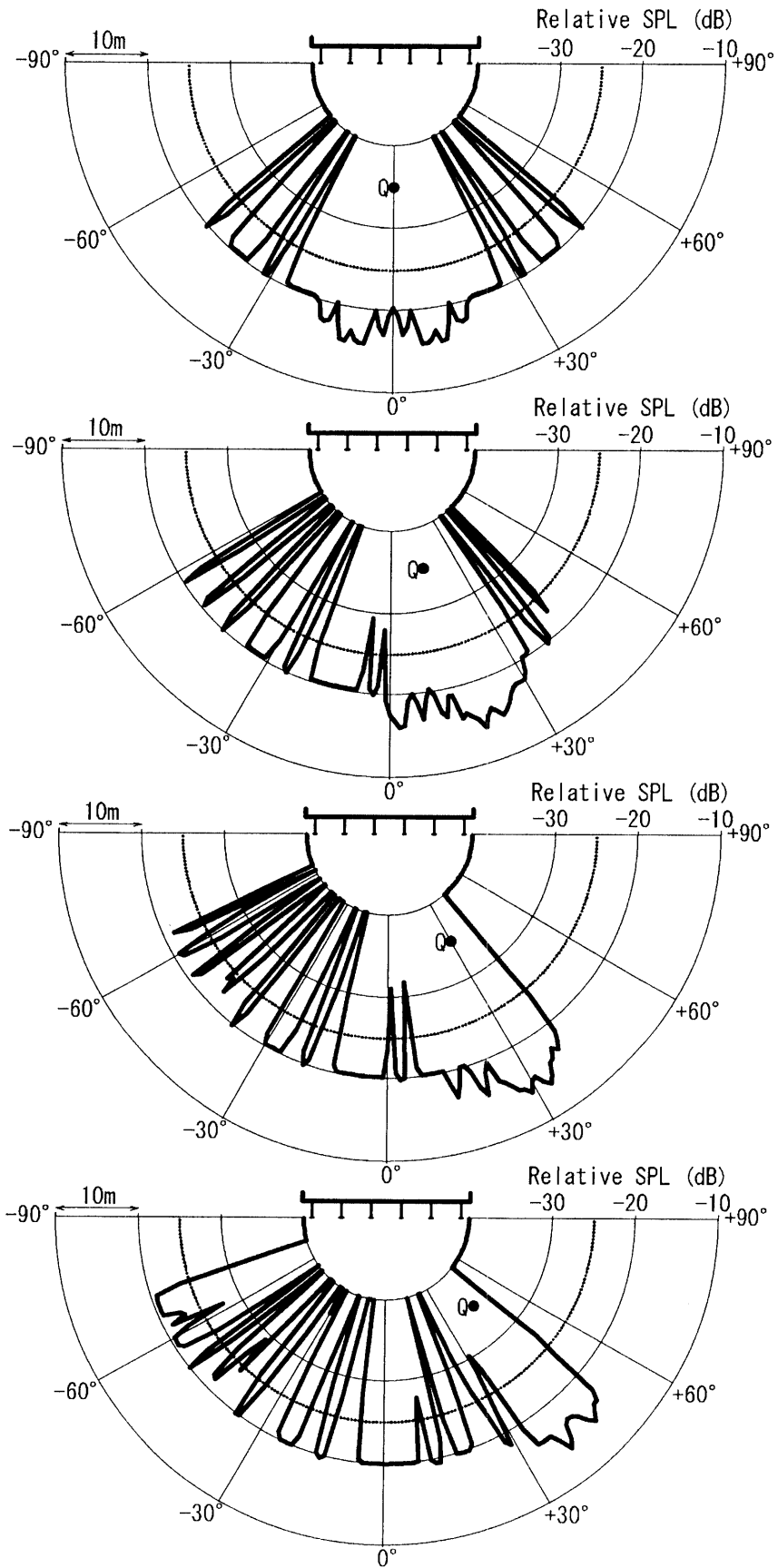


図 6-1-9. 幾何学的音線トレースによる高架裏面反射音の音圧分布

対象とする信号を道路交通騒音のスペクトルを有する広帯域雑音と考え、1/9 オクターブバンド中心周波数（27 周波数）での計算結果に道路交通騒音のスペクトルおよびA特性補正を行って算出した反射音の音圧分布を図 6-1-10 に示す。同図には、桁下位置に高架幅の鏡面を仮定し、スリット法で計算した結果もあわせて示す。音源位置は $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ の 3 ケースである。

境界要素法による計算値が最大となる観測点位置は、音源が $\theta = 15^\circ$ のときが $\phi = 15 \sim 30^\circ$ 付近、 $\theta = 30^\circ$ のときが $\phi = 25 \sim 35^\circ$ 付近、 $\theta = 45^\circ$ のときが $\phi = 50^\circ$ 付近であり、音源方向に大きな反射音が返ってきている。また音圧レベルの最大値から 10dB 以内の反射音が到達する範囲は、 $\theta = 15^\circ$ のときが $\phi = -60 \sim +50^\circ$ の範囲、 $\theta = 30^\circ$ のときが $\phi = -60 \sim +60^\circ$ の範囲、 $\theta = 45^\circ$ のときが $\phi = -70 \sim +70^\circ$ の範囲で θ が大きくなるにつれて反射音が到達する範囲が広がる傾向にある。また、全体的な傾向としては高架道路軸を中心とした左右対称に近い音圧分布である。

一方、スリット法の計算は高架裏面に平坦な反射面を想定しているため、幾何的に音線が到達する領域の音圧レベルが大きい。音圧レベルの最大値から 10dB 以内の反射音が到達する範囲は、 $\theta = 15^\circ$ のときが $\phi = -65 \sim +50^\circ$ の範囲、 $\theta = 30^\circ$ のときが $\phi = -70 \sim +45^\circ$ の範囲、 $\theta = 45^\circ$ のときが $\phi = -75 \sim +35^\circ$ の範囲であり、境界要素法の計算結果に見られた音源側への反射音は見られない。境界要素法との差が大きくなる観測点の範囲は、例えば $\theta = 45^\circ$ のときは $\phi = +30 \sim +89^\circ$ の観測点であり、最大で約 20dB、平均で約 15dB 程度スリット法の方が小さく、 $\phi = -15 \sim -75^\circ$ の観測点では、最大で約 7dB、平均で約 4dB スリット法の方が大きい。

以上のことから、I 桁高架裏面での反射は散乱反射の傾向を示しており、高架裏面を平坦な 1 枚の反射面に置き換えてスリット法で計算するには無理がある。

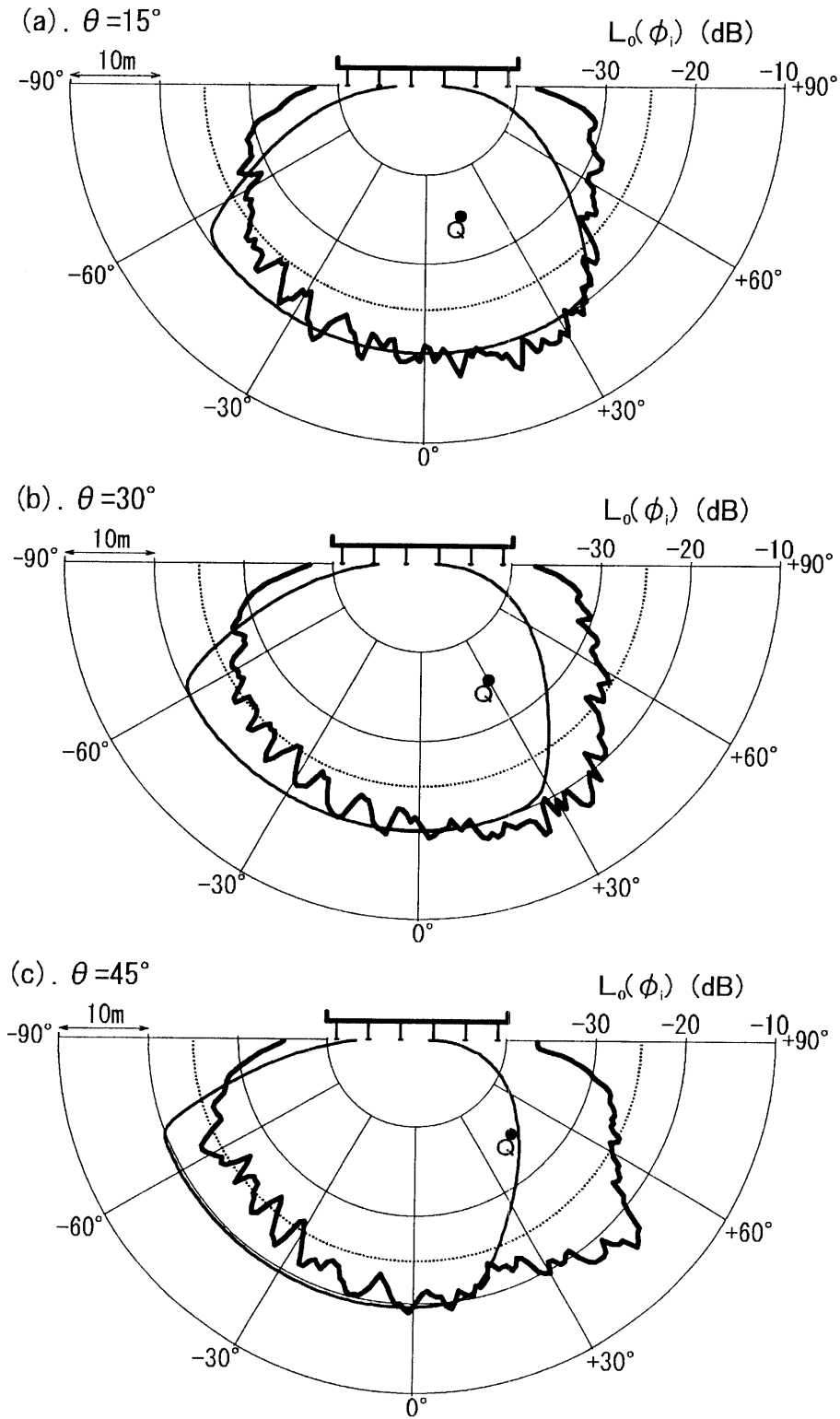


図 6-1-10.2 次元境界要素法とスリット法による 1 桁高架裏面での道路交通騒音の反射指向特性

凡例 ——— : 2次元境界要素法

----- : スリット法

図の-25dB の位置の点の列が観測点 P

b. 箱桁構造高架道路

250,500,1kHz を中心周波数とする 1/1 オクターブバンドの相対音圧レベル分布を図 6-1-11(1)~(2)に示す。また、桁下面に高架道路幅の平坦な鏡面を仮定してスリット法で計算した結果もあわせて示す。スリット法の計算は I 桁構造高架道路の場合と同じである。図 6-1-11 には音圧レベル分布とあわせて音源・道路構造物・観測点の配置も示している。また図に示す音圧レベルは、全ての観測点での音圧の 2 乗和を基準とした相対音圧レベル $L_0(\phi_i)$ であり、式(6-1-10)および式(6-1-11)により算出した。

入射角 θ が 15° のときには、境界要素法とスリット法はよく似た傾向を示している。しかし $\theta = 45^\circ$ では境界要素法による計算値は、 $\phi = -60 \sim +50^\circ$ の音圧レベルが大きく、 ϕ が $\pm 90^\circ$ に近づくとつれて音圧レベルが小さくなっている。一方、スリット法による計算値は、 $\phi > +30^\circ$ の音源側観測点で境界要素法の計算値に比べ最大で 15dB 小さい。特に $\phi = +35 \sim +55^\circ$ の観測点で境界要素法とスリット法の差が大きい。この傾向は 250,500,1kHz のいずれにもみられ、また周波数が高くなるほど境界要素法の計算値は凹凸が大きくなる傾向にある。I 桁構造と比べると箱桁構造の場合は、例えば音源 Q が 45° のときの $\phi = -65^\circ, -45^\circ, -10^\circ, -15^\circ, -50^\circ$ のように特定の方向に反射波が伝搬している。

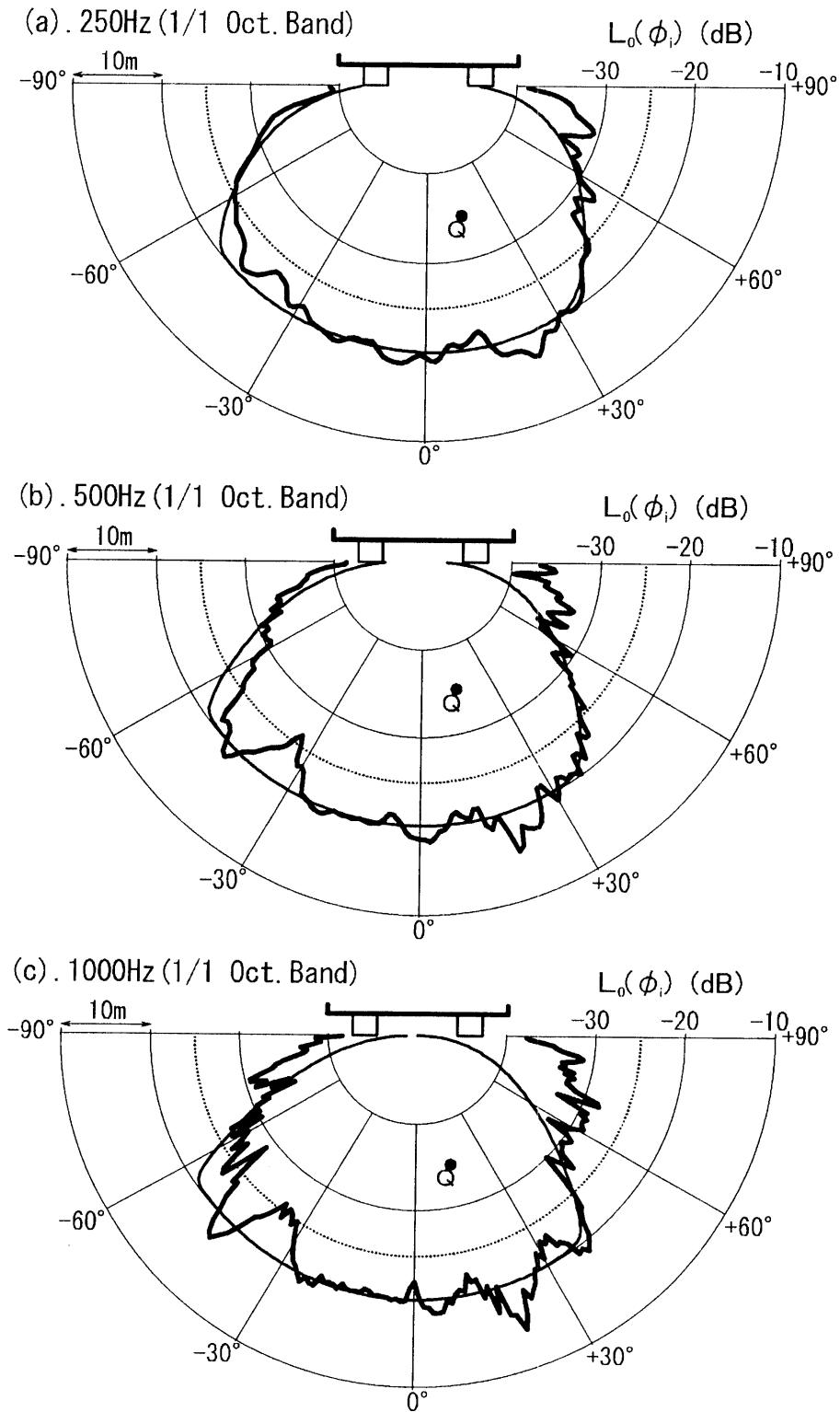


図 6-1-11(1). 2次元境界要素法とスリット法による箱桁高架裏面での反射指向特性

入射角： $\theta = 15^\circ$

凡例 **——**：2次元境界要素法

——：スリット法

図の -25dB の位置の点の列が観測点 P

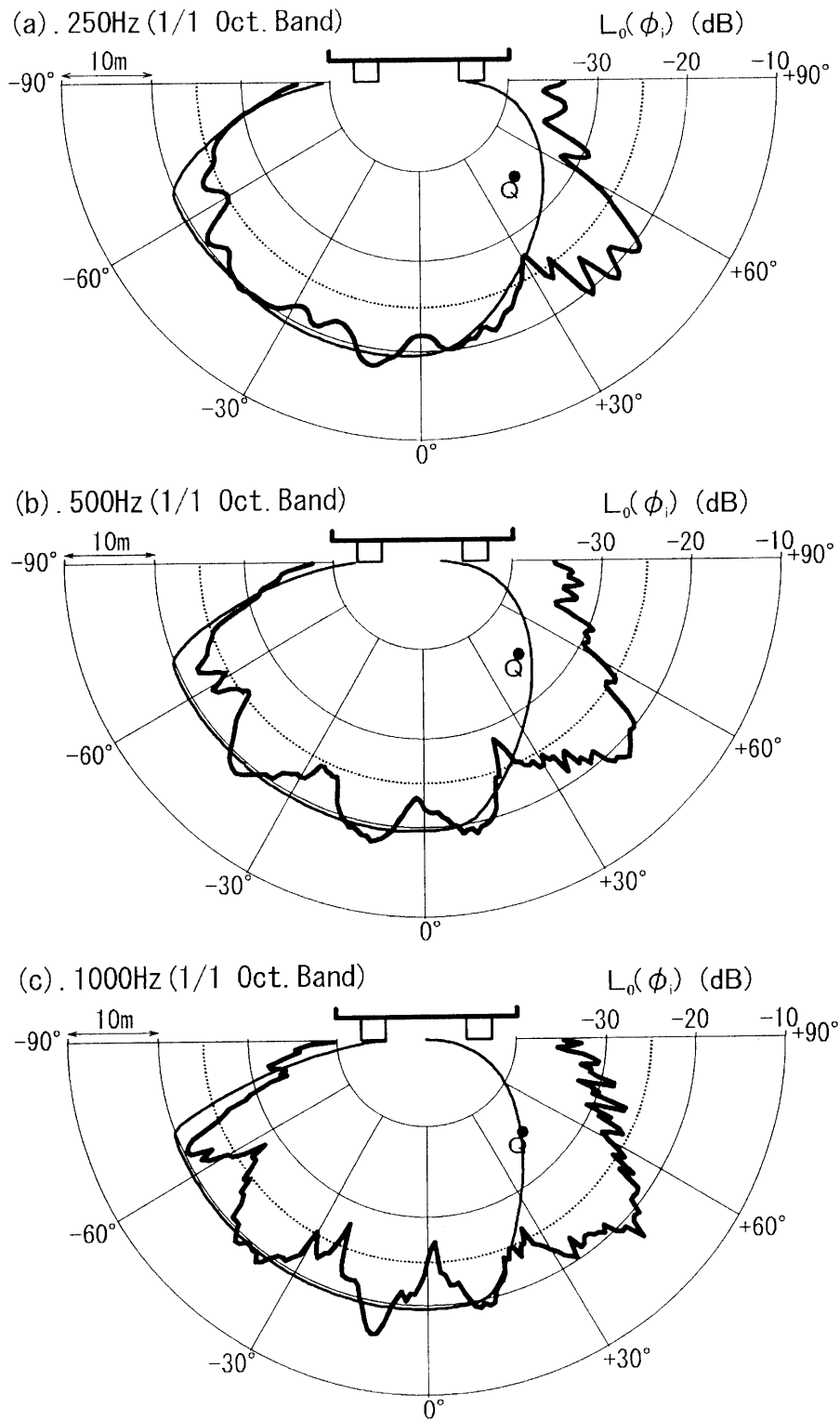


図 6-1-11 (2). 2次元境界要素法とスリット法による箱桁高架裏面での反射指向特性

入射角: $\theta = 45^\circ$

凡例 — : 2次元境界要素法

— : スリット法

図の-25dB の位置の点の列が観測点 P

I 桁構造高架道路と同様に 2 次元での幾何学的音線トレースによる高架道路構造物での反射音の軌跡を図 6-1-12 に示す。図は音源から 0.5° 間隔に音線を発生して計算した結果で、音源からの音線がはじめて高架道路構造物に当たるまでの軌跡は省略している。音源側に反射音が返ってくるのは主に箱桁側面と床版面で各 1 回反射した音線である。

音線の間隔を 0.01° とし音線法で算出した高架裏面での反射音の音圧レベル分布を図 6-1-13 に示す。計算値は、全ての観測点での音線の数の総和を基準としてデシベル表示している。音線法の計算結果にも音源側に返ってくる反射音が多いことがわかる。I 桁構造の場合と同様に周波数が高くなるほど音波の鏡面反射成分が多くなり、1kHz あるいは 500Hz では幾何音響的な音線法に近い反射をしている。

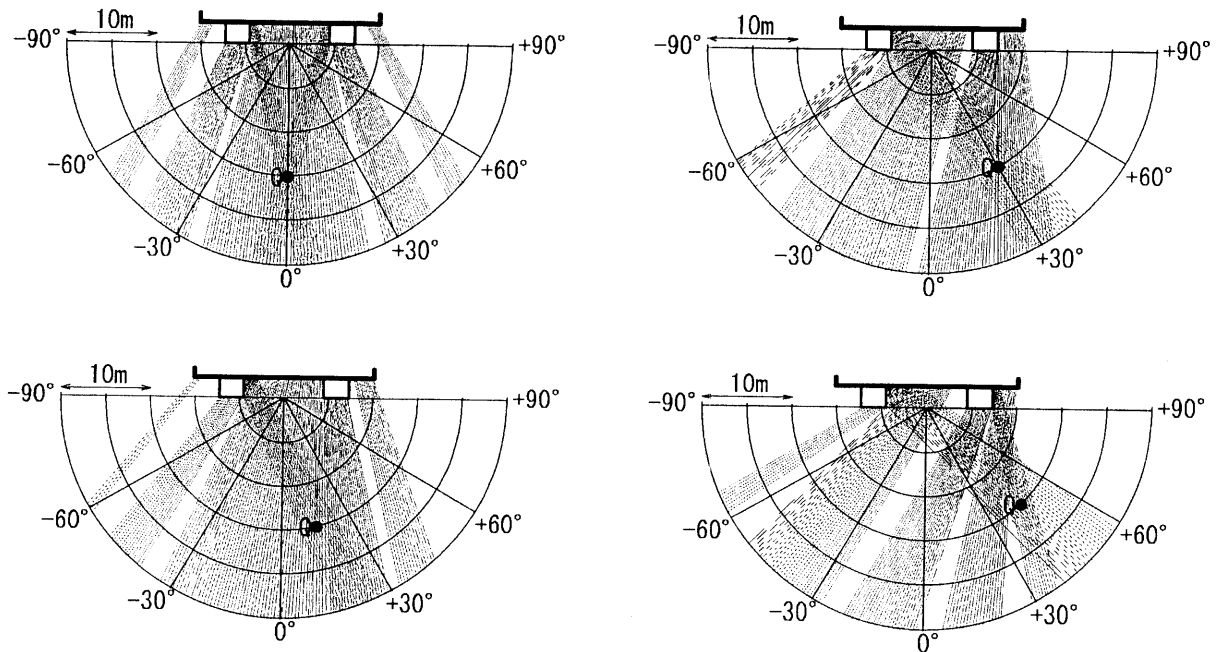


図 6-1-12. 幾何学的音線トレースによる箱桁構造高架裏面での反射音の軌跡

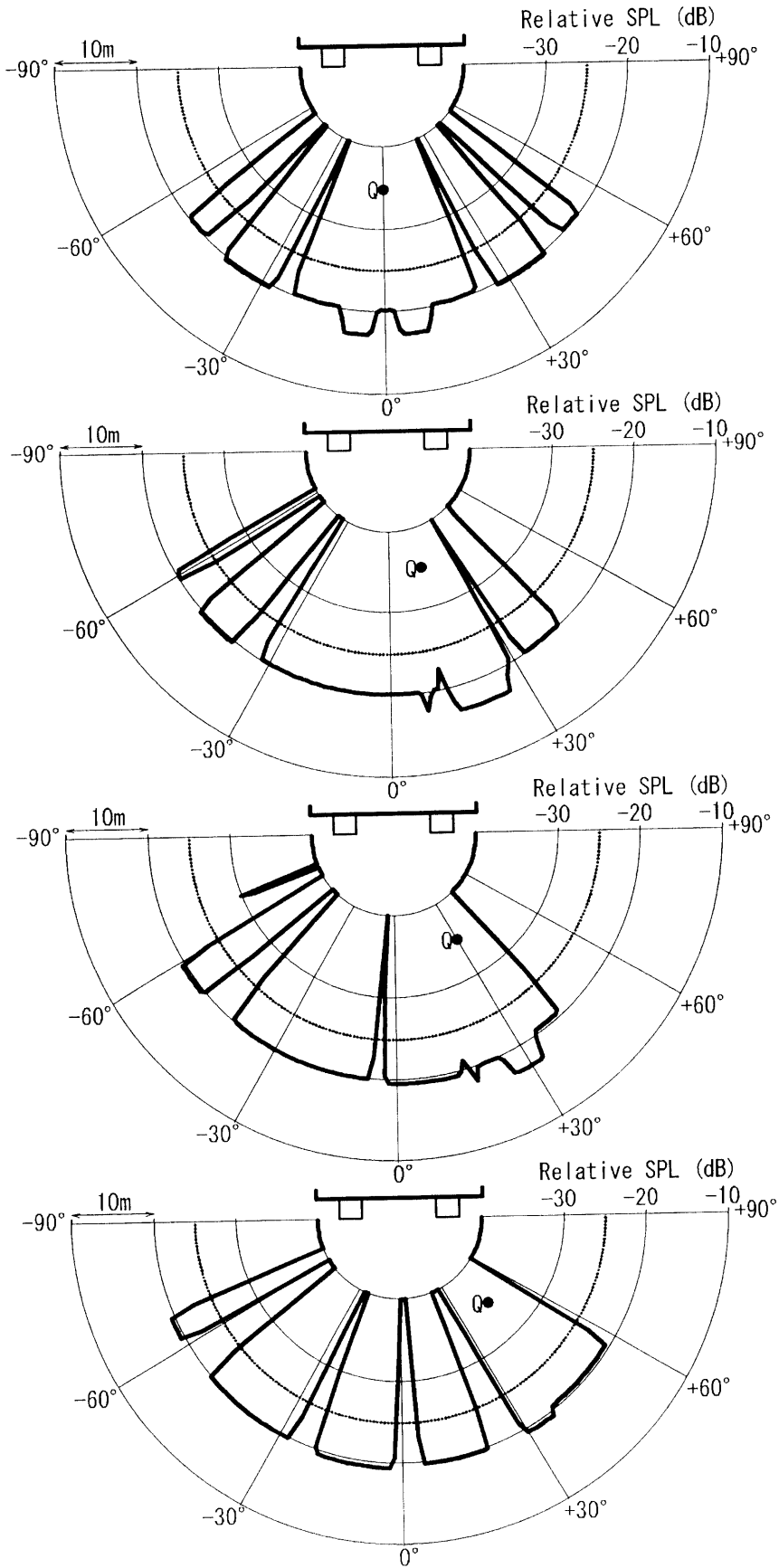


図 6-1-13. 幾何学的音線トレースによる箱桁構造高架裏面での反射音の音圧分布

1/9 オクターブバンド中心周波数での計算結果に道路交通騒音のスペクトルおよびA特性補正を行って算出した反射音の音圧分布を図6-1-14に示す。同図には、桁下位置に高架幅の鏡面反射面を仮定し、スリット法により計算した結果もあわせて示す。音源位置は $\theta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ の3ケースである。

境界要素法による計算値が最大となる観測点位置は、音源が $\theta=15^\circ$ のときが $\phi=20^\circ$ 付近、 $\theta=30^\circ$ のときが $\phi=5^\circ$ 付近と $25\sim 35^\circ$ 付近、 $\theta=45^\circ$ のときが $\phi=-20^\circ$ 付近と 45° 付近であり、いずれも音源方向に大きな成分の反射音が返ってきている。また音圧レベルの最大値から10dB以内の反射音が到達する範囲は、 $\theta=15^\circ$ のときが $\phi=-55\sim +45^\circ$ の範囲、 $\theta=30^\circ$ のときが $\phi=-65\sim +45^\circ$ の範囲、 $\theta=45^\circ$ のときが $\phi=-70\sim +60^\circ$ の範囲で、I桁構造の場合と同様、 θ が大きくなるにつれて反射音が到達する範囲が広がる傾向にある。

一方、スリット法の計算は高架裏面に平坦な反射面を想定しているため、入射方向とは反対方向の音圧レベルが大きくなる。音圧レベルの最大値から10dB以内の反射音が到達する範囲は、 $\theta=15^\circ$ のときが $\phi=-65\sim +50^\circ$ の範囲、 $\theta=30^\circ$ のときが $\phi=-70\sim +45^\circ$ の範囲、 $\theta=45^\circ$ のときが $\phi=-75\sim +35^\circ$ の範囲であり、境界要素法の計算結果に見られた音源側への反射音は見られない。境界要素法との差が大きくなる観測点の範囲は、例えば $\theta=45^\circ$ のときは $\phi=+30\sim +89^\circ$ の観測点であり、最大で約15dB、平均で約10dB程度スリット法の方が小さく、 $\phi=0\sim -60^\circ$ の観測点ではスリット法の方が大きくなることが多く、最大で約7dB大きい。しかし入射角 θ が 30° 以内であれば比較的近似はよい。

以上のことから、箱桁構造高架裏面でも高架裏面を平坦な1枚の反射面に置き換えてスリット法で計算するには無理な場合がある。

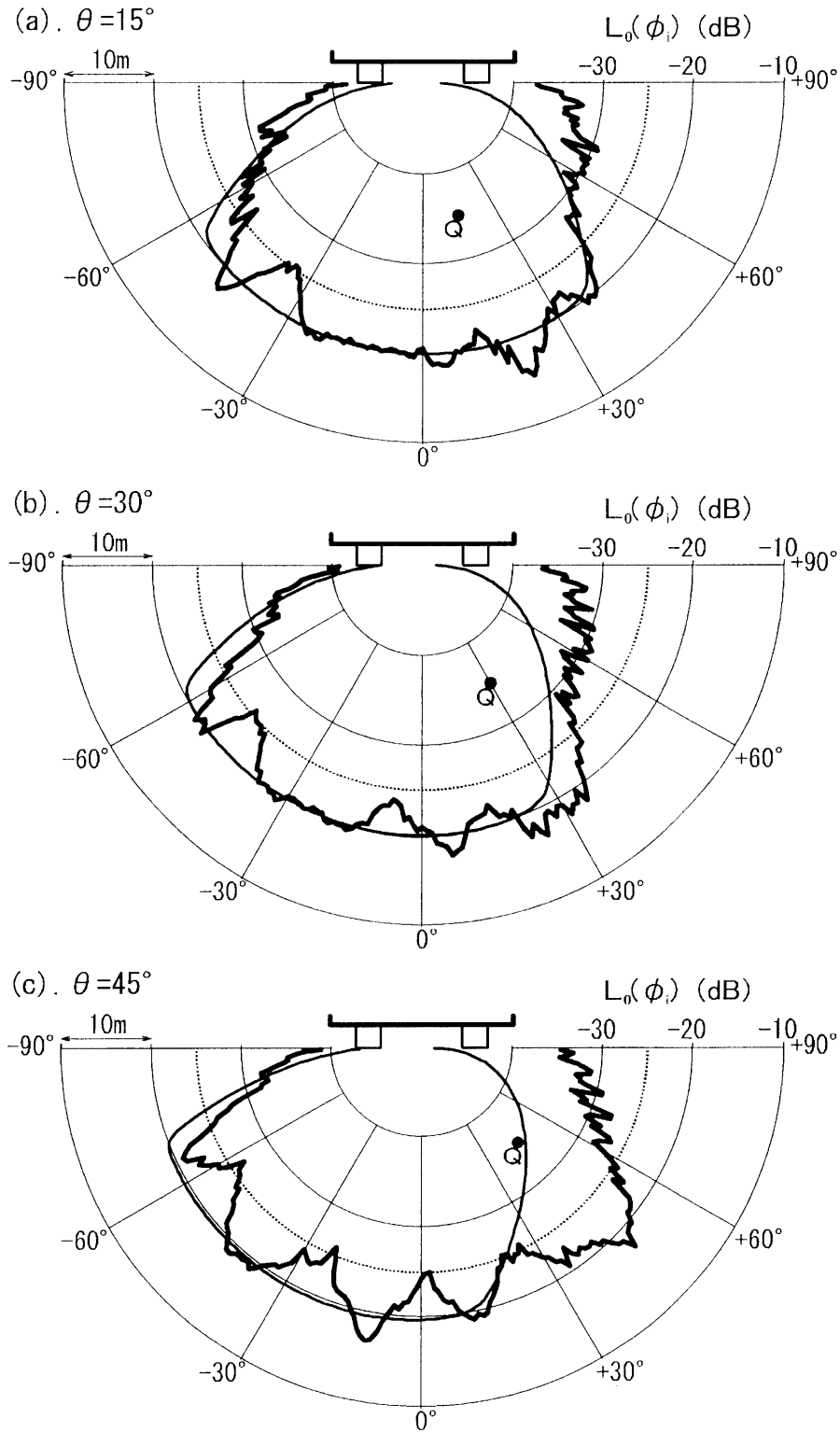


図 6-1-14. 2次元境界要素法とスリット法による箱桁高架裏面での道路交通騒音の反射指向特性

凡例 ———— : 2次元境界要素法

————— : スリット法

図の-25dBの位置の点の列が観測点 P

6. 1. 2 乱反射を仮定したエネルギーモデル

(1) 高架裏面での反射指向特性の仮定

全体的な傾向としては境界要素法の計算結果は高架道路軸を中心とした左右対称に近い分布をしており、幅広い範囲に乱反射している。また観測点が $\pm 90^\circ$ に近づくにつれて反射音の音圧レベルは小さくなる傾向にある。このことから、I桁あるいは箱桁高架道路裏面の反射特性として余弦則を仮定するのもひとつの近似方法と考えられる。

ここでは凹凸のある高架道路裏面が *Lambert* の余弦則にしたがう散乱反射面であると仮定してエネルギーベースの予測モデルを検討する。

(2) 点音源に対する裏面反射モデル

高架道路の桁の最下面に道路幅員の平面を考え、この面の反射特性が *Lambert* の余弦則にしたがうとする。高架道路の橋軸直角方向を X ，橋軸方向を Y ，下路の音源の移動方向（道路軸）を y とし、自由空間において図 6-1-15 に示す音源・観測点・反射面の配置を考える。このとき、点音源 Q から高架裏面の微小要素 ΔB で反射し観測点 P に到達する音波の音響エネルギー密度 ΔE (J/m^3) は以下のように表せる。

$$\Delta E = \frac{W \cdot (1 - \alpha(f)) \cdot \Delta B \cdot \cos \theta \cdot \cos \phi}{4c\pi r^2 \cdot \pi R^2} \quad (6-1-13)$$

ここで、 W は点音源 Q の音響出力 (W)， $\alpha(f)$ は周波数 f (Hz) の反射面のエネルギー吸音率， c は音速 (m/s) であり， θ は散乱反射面の法線ベクトル n と微小要素 ΔB の中心から音源 Q へのベクトルが成す角度， ϕ は法線ベクトル n と ΔB の中心から観測点 P へのベクトルが成す角度， r および R は ΔB の中心から Q, P それぞれまでの距離 (m) である。

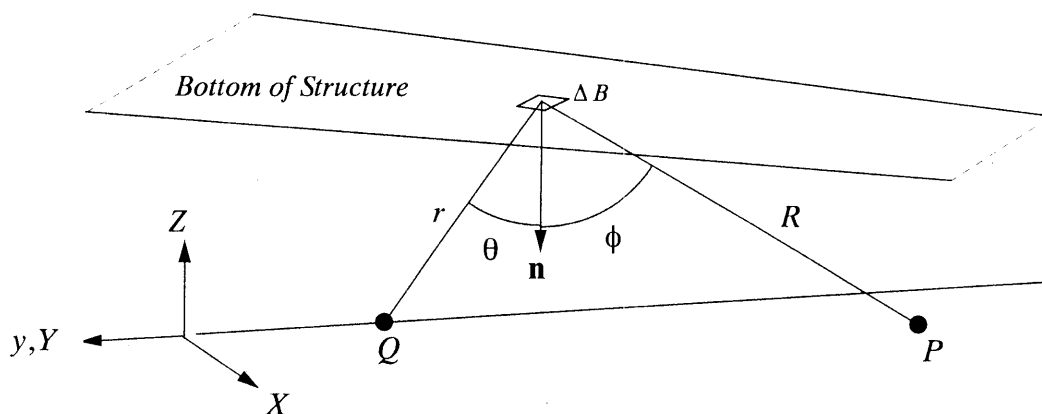


図 6-1-15. 反射モデルのパラメータ

裏面は完全反射面と考え $\alpha(f)=0.0$ とする. 高架裏面全体からの反射音の音響エネルギー密度 E は式(6-1-13)を高架裏面全体 B について積分することで次式により数値的に計算できる.

$$E = \frac{W}{4c\pi^2} \int_B \frac{\cos\theta \cdot \cos\phi}{r^2 R^2} dB \quad (6-1-14)$$

したがって, 高架裏面反射音の音響エネルギー密度レベル L_E は次式により与えられる.

$$\begin{aligned} L_E &= 10 \cdot \log_{10} \frac{E}{E_0} \\ &= L_W - 16 + 10 \cdot \log_{10} \int_B \frac{\cos\theta \cdot \cos\phi}{r^2 R^2} dB \end{aligned} \quad (6-1-15)$$

ここで, E_0 は基準の音響エネルギー密度(J/m^3), L_W は音源の音響パワーレベル(dB)である.

(3) 無限長非干渉性線状音源に対する裏面反射モデル

式(6-1-15)は散乱反射面である高架裏面について面積分する必要があり実用的な計算式ではない. ところで, 道路交通騒音の評価量は L_{Aeq} であるため, ここでは音源を非干渉性線状音源あるいはランダム位相点音源列として扱い, 式(6-1-15)を解析的に展開し簡便な計算式を誘導する.

高架道路幅員および高架高さが一定で, 橋軸方向 Y と音源 Q の移動方向 y が同じとした場合, すなわち道路横断面での構成が一定の場合を考える.

非干渉性線状音源 Q_{line} を無指向性のランダム位相点音源列と考えると, 高架裏面反射音の音響エネルギー密度 E_{line} は式(6-1-14)より以下のように表せる.

$$E_{line} = \frac{W_{line}}{4c\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{X_1}^{X_2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos\theta \cdot \cos\phi}{r^2 R^2} dy \cdot dX \cdot dY \quad (6-1-16)$$

ここで, W_{line} は線音源の単位長さ当たりの音響出力(W/m), X_1 および X_2 は散乱反射面の両端の X 座標(m)である.

式(6-1-16)は解析的に以下のように変形でき積分を含まない形で表せる.

$$\begin{aligned} E_{line} &= \frac{W_{line} hH}{4c\pi^2} \cdot \int_{X_2}^{X_1} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{1}{\left\{ (X - x_Q)^2 + (Y - y_Q)^2 + H^2 \right\}^{3/2}} \right. \\ &\quad \left. \times \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dy}{\left\{ (X - x_p)^2 + (Y - y)^2 + h^2 \right\}^{3/2}} \right] dY dX \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{W_{\text{line}} hH}{2c\pi^2} \int_{x_2}^{x_1} \frac{1}{(X-x_p)^2+h^2} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dY}{\{(X-x_Q)^2+(Y-y_Q)^2+H^2\}^{3/2}} dX \\
&= \frac{W_{\text{line}} hH}{c\pi^2} \int_{x_2}^{x_1} \frac{dX}{\{(X-x_p)^2+h^2\}\{(X-x_Q)^2+H^2\}} \\
&= \frac{W_{\text{line}} hH}{c\pi^2 l^2 l'^2} \left\{ 2(x_p-x_Q) \cdot \log_e \frac{r_2 R_1}{r_1 R_2} + \frac{d^2-h^2+H^2}{h} \Theta_P + \frac{d^2-H^2+h^2}{H} \Theta_Q \right\} \\
&\equiv \frac{W_{\text{line}} hH}{c\pi^2 l^2 l'^2} \Omega \tag{6-1-17}
\end{aligned}$$

$$\Omega = 2(x_p-x_Q) \cdot \log_e \frac{r_2 R_1}{r_1 R_2} + \frac{d^2-h^2+H^2}{h} \Theta_P + \frac{d^2-H^2+h^2}{H} \Theta_Q \tag{6-1-18}$$

式(6-1-17)および式(6-1-18)の変数は図 6-1-16 に示すとおりであり、 h および H は Q_{line} および P から散乱反射面 B を含む平面までの垂線の長さ(m)、 l および l' は Q_{line} から P および P の散乱反射面 B を含む平面に対する鏡像 P' までの距離(m)、 x_Q および x_P は Q_{line} および P の x 座標(m)、 d は Q_{line} から P までの水平距離(m)、 r_i および R_i ($i=1,2$) は Q_{line} および P から散乱反射面の両端までの距離(m)、 Θ_Q および Θ_P は Q_{line} および P から散乱反射面の両端を見込む角度(rad)である。なお、いずれの変数も観測点 P を含む横断面での値である。

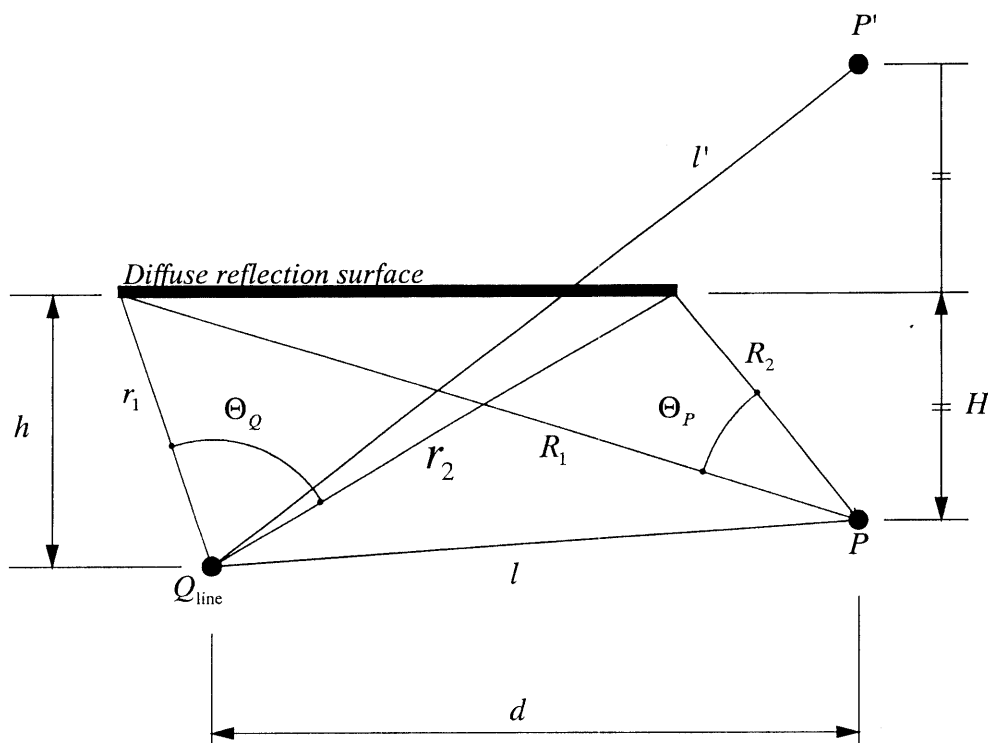


図 6-1-16. 計算式中的変数

したがって、断面形状が一定で連続な散乱反射面での無限長非干渉性線状音源からの反射音の音響エネルギー密度レベル $L_{E, \text{line}}$ は次式により与えられる。

$$\begin{aligned} L_{E, \text{line}} &= 10 \log_{10} \frac{E_{\text{line}}}{E_0} \\ &= L_{W, \text{line}} - 10 + 10 \log_{10}(hH\Omega) - 20 \log_{10}(l \cdot l') \end{aligned} \quad (6-1-19)$$

ここで、 E_0 は基準とする音響エネルギー密度(J/m^3)、 $L_{W, \text{line}}$ は非干渉性線状音源の単位長さ当たりのパワーレベル(dB/m)である。

ところで、無限に長い直線道路を複数の等パワーの無指向性点音源が等速度で移動するときの L_{eq} は次式で表せる〔6-7〕。

$$L_{\text{eq}} = L_W + 10 \log_{10} \frac{1}{2Dl} \quad (6-1-20)$$

ここで、 L_W は点音源の平均音響パワーレベル(dB)、 D は平均車頭間隔(m)である。

一方、音源を無限長非干渉性線状音源と考えた場合には以下のようにも表せる。

$$L_{\text{eq}} = L_{W, \text{line}} + 10 \log_{10} \frac{1}{2l} \quad (6-1-21)$$

したがって、 $L_{W, \text{line}}$ と L_W は以下の関係にある。

$$L_{W, \text{line}} = L_W - 10 \log_{10} D \quad (6-1-22)$$

反射音の音響エネルギー密度レベル $L_{E, \text{line}}$ を与える式(6-1-19)は周波数に依存していない。前述の境界要素法の計算結果も 250~1kHz の周波数帯域では大きくは周波数に依存していないので、式(6-1-19)を適用することは妥当なものと考えられる。

(4) 数値計算結果

a. I 桁構造高架道路

計算対象とした高架道路構造物の諸元は図 6-1-4 に、音源と観測点の配置は図 6-1-6 に示すとおりである。いずれも境界要素法による計算の場合と同じである。散乱反射面は桁下位置に高架道路幅員をもつ平面とした。

音源が $\theta = 0, 15, 30, 45^\circ$ の場合の、250, 500, 1kHz を中心周波数とする 1/1 オクターブバンドにおける散乱反射を仮定したエネルギーモデル（散乱反射モデルとよぶ）による音響エネルギー密度の計算値と境界要素法による計算値を比較して図 6-1-17(1)~(4)に示す。

計算値は、全ての観測点での音響エネルギー密度の総和を基準とした相対エネルギー密度レベルとして以下のように求めた。

$$L_0(\phi_i) = 10 \cdot \log_{10} \frac{E_{\text{line}}(\phi_i)}{\sum_{j=-89}^{+89} E_{\text{line}}(\phi_j)} \quad (6-1-23)$$

ここで、 $L_0(\phi_i)$ は角度 ϕ_i の観測点での相対音響エネルギー密度レベル(dB)、 $E_{\text{line}}(\phi_i)$ は角度 ϕ_i の観測点での音響エネルギー密度であり、式(6-1-7)あるいは式(6-1-17)、式(6-1-18)により計算した値である。

250Hz では境界要素法と散乱反射モデルの差は $\pm 5\text{dB}$ 以内であり散乱反射モデルは境界要素法の計算結果をほぼ近似している。また 500Hz と 1kHz では $\phi = +40 \sim +50^\circ$ の観測点で境界要素法の計算値に大きな反射成分がみられる。この範囲では 500Hz で最大 6dB、1kHz で最大 8dB、平均的にはいずれの周波数帯域も 5dB ほど散乱反射モデルの計算値が小さい。また特に 1kHz において $\phi > +55^\circ$ の観測点では最大 8dB ほど散乱反射モデルの計算値が大きい。それ以外の観測点では境界要素法の干渉によるディップを除けばおおむね散乱反射モデルと境界要素法の計算値の差は 5dB 以内である。

境界要素法による音圧レベルの計算値(図 6-1-7)と音響エネルギー密度レベルの計算値(図 6-1-17)を比較すると、ディップが生じる角度に違いが見られるが、全体的なレベル分布はよく似ている。スリット法の計算値は音圧レベルであり、散乱反射法の計算値は音響エネルギー密度レベルであるため直接は比較できないが、境界要素法の計算値を介在して比較することでスリット法と散乱反射モデルの妥当性を検討する。

図 6-1-7 に示すスリット法と境界要素法の計算結果(音圧レベル)では、特に $\theta = 45^\circ$ のときに両者の差が大きく、 $\phi > +30^\circ$ の観測点でスリット法は境界要素法に比べ 7~20dB 小さい。また、 $\phi < -15^\circ$ の観測点ではスリット法の計算値が境界要素法の計算値よりも最大 10dB 大きい。

一方、図 6-1-17 の音響エネルギー密度レベルの計算結果では、散乱反射モデルと境界要素法の計算値の差は、最大で 10dB、ほとんどの観測点角度で 5dB 以内におさまっている。特に 250Hz の計算結果では両者はよく似た傾向を示している。散乱反射モデルと境界要素法の差は最大で 7dB 程度であり、ほとんどの観測点で 5dB 以内の差である。

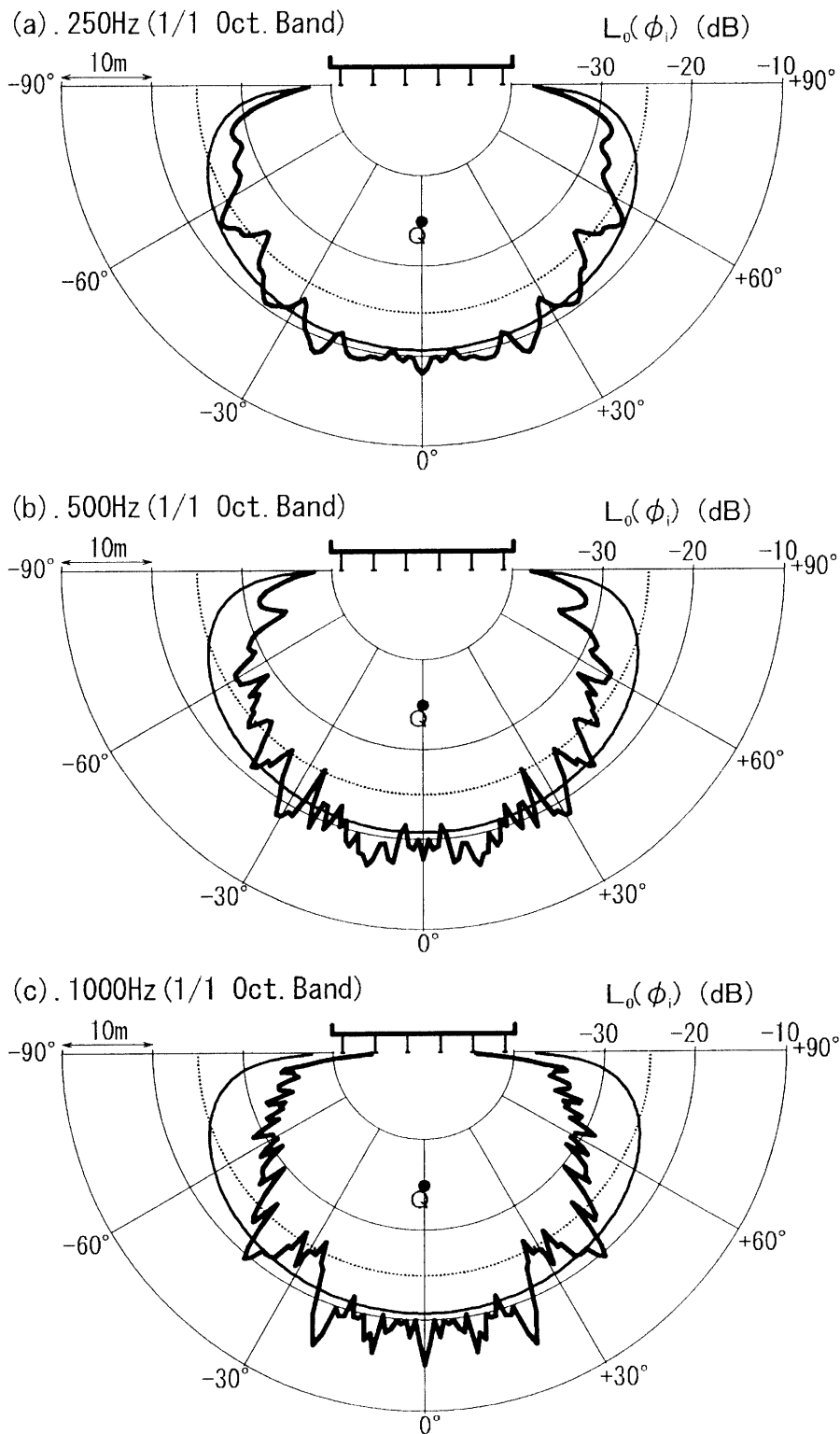


図 6-1-17(1). 2次元境界要素法と散乱反射法による1桁高架裏面での反射指向特性

入射角： $\theta = 0^\circ$

凡例 **——**：2次元境界要素法

- - - -：散乱反射法

図の-25dBの位置の点の列が観測点 P

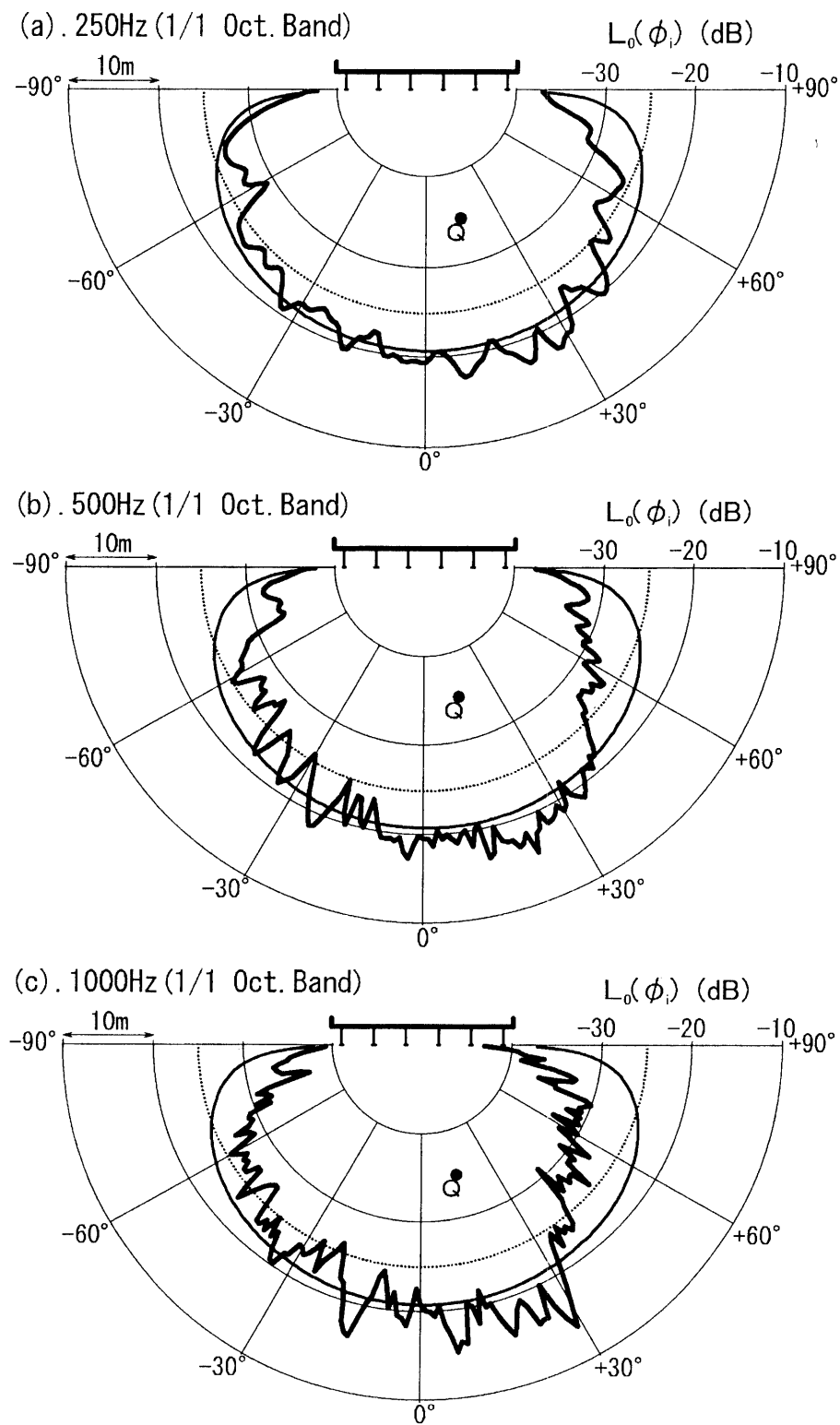


図 6-1-17(2). 2次元境界要素法と散乱反射法による1桁高架裏面での反射指向特性

入射角： $\theta = 15^\circ$

凡例 ———— : 2次元境界要素法

————— : 散乱反射法

図の-25dB の位置の点の列が観測点 P

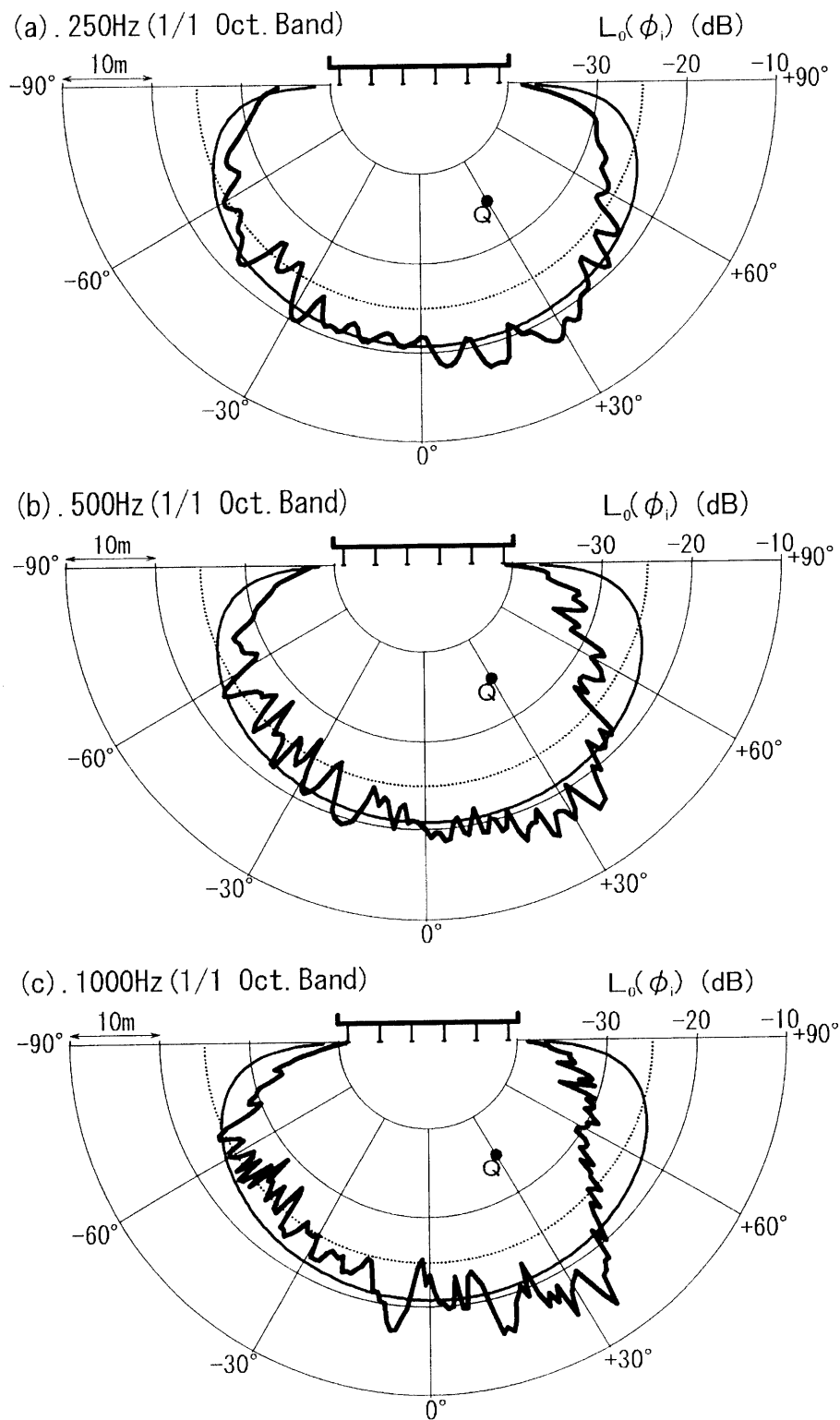


図 6-1-17(3). 2次元境界要素法と散乱反射法による1桁高架裏面での反射指向特性

入射角: $\theta = 30^\circ$

凡例 ——— : 2次元境界要素法

----- : 散乱反射法

図の-25dBの位置の点の列が観測点P

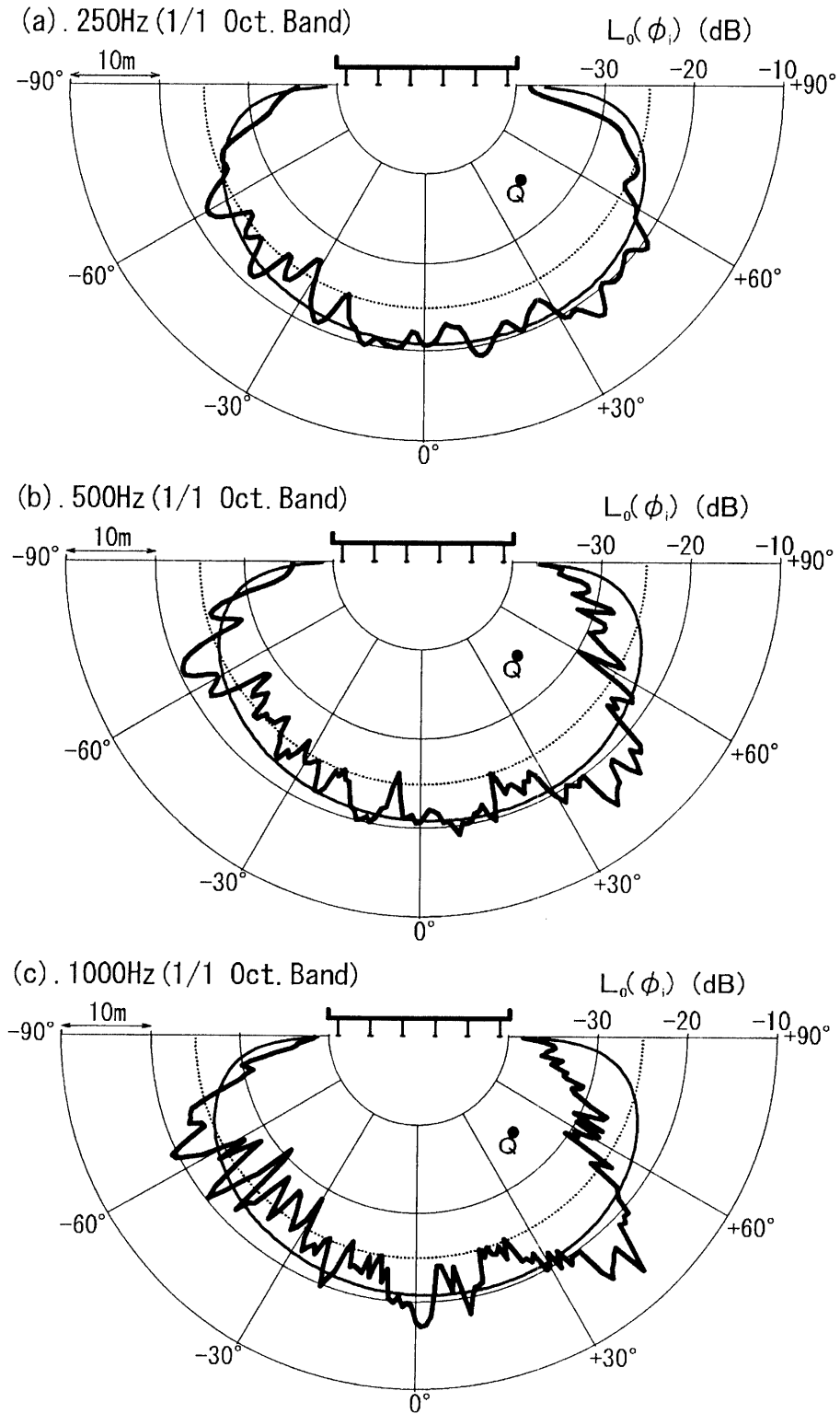


図 6-1-17(4) . 2次元境界要素法と散乱反射法によるI桁高架裏面での反射指向特性

入射角： $\theta = 45^\circ$

凡例 ———— : 2次元境界要素法

————— : 散乱反射法

図の-25dBの位置の点の列が観測点P

道路交通騒音のスペクトルを有する広帯域雑音と考えたときの反射音のA特性重みつけ音響エネルギー密度分布を図6-1-18示す。音源は $\theta=15^\circ$ 、 30° 、 45° の3ケースである。

いずれの場合も $-70 < \phi < +45^\circ$ の範囲では散乱反射モデルと境界要素法の計算値の差はおおよそ5dB以内である。境界要素法の計算値には、 $\theta=15^\circ$ のときで $\phi=10\sim 30^\circ$ の範囲に、 $\theta=30^\circ$ のときで $\phi=15\sim 35^\circ$ の範囲に、 $\theta=45^\circ$ のときで $\phi=35\sim 55^\circ$ の範囲に大きな反射波が到達しており、音源方向に大きな反射波が返ってくるような傾向にある。この範囲での散乱反射モデルと境界要素法の差は、 $\theta=15^\circ$ で最大6dB、 $\theta=30^\circ$ と 45° のときで最大7dBである。

スリット法の計算値は音圧レベルであり、散乱反射モデルは音響エネルギー密度であるため、両者を直接は比較できないが、境界要素法による音圧レベルと音響エネルギー密度レベルの計算値の傾向がよく似ていることから、境界要素法の計算値を介在してスリット法と散乱反射モデルを比較する。図6-1-10のスリット法と境界要素法の計算結果（音圧レベル）、および図6-1-18の散乱反射モデルと境界要素法の計算結果（音響エネルギー密度レベル）を比較すると、 $\theta=15^\circ$ の場合には、 $\phi > 50^\circ$ あるいは $\phi < -60^\circ$ の側方の観測点で境界要素法との差が大きく、スリット法は過少に、散乱反射モデルは過大に計算している。

音源が側方に行くほどスリット法よりも散乱反射モデルの方が境界要素法との対応はよい。特に図6-1-10(c)の $\theta=45^\circ$ の場合には、 $\phi > +30^\circ$ の観測点でスリット法は境界要素法に比べ最大で約20dB、平均で約15dB小さく、 $\phi = -15\sim -75^\circ$ の観測点では最大で7dB、平均で約4dB大きい。一方、図6-1-18の音響エネルギー密度レベルの計算結果では、散乱反射モデルと境界要素法の計算値の差は最大7dB、ほとんどの観測点で5dB以内の差である。

以上より、I桁高架構造の場合には、高架裏面の反射特性として散乱反射を仮定する方が、桁下に平坦な鏡面を考えてスリット法で計算するよりも妥当であることが示された。

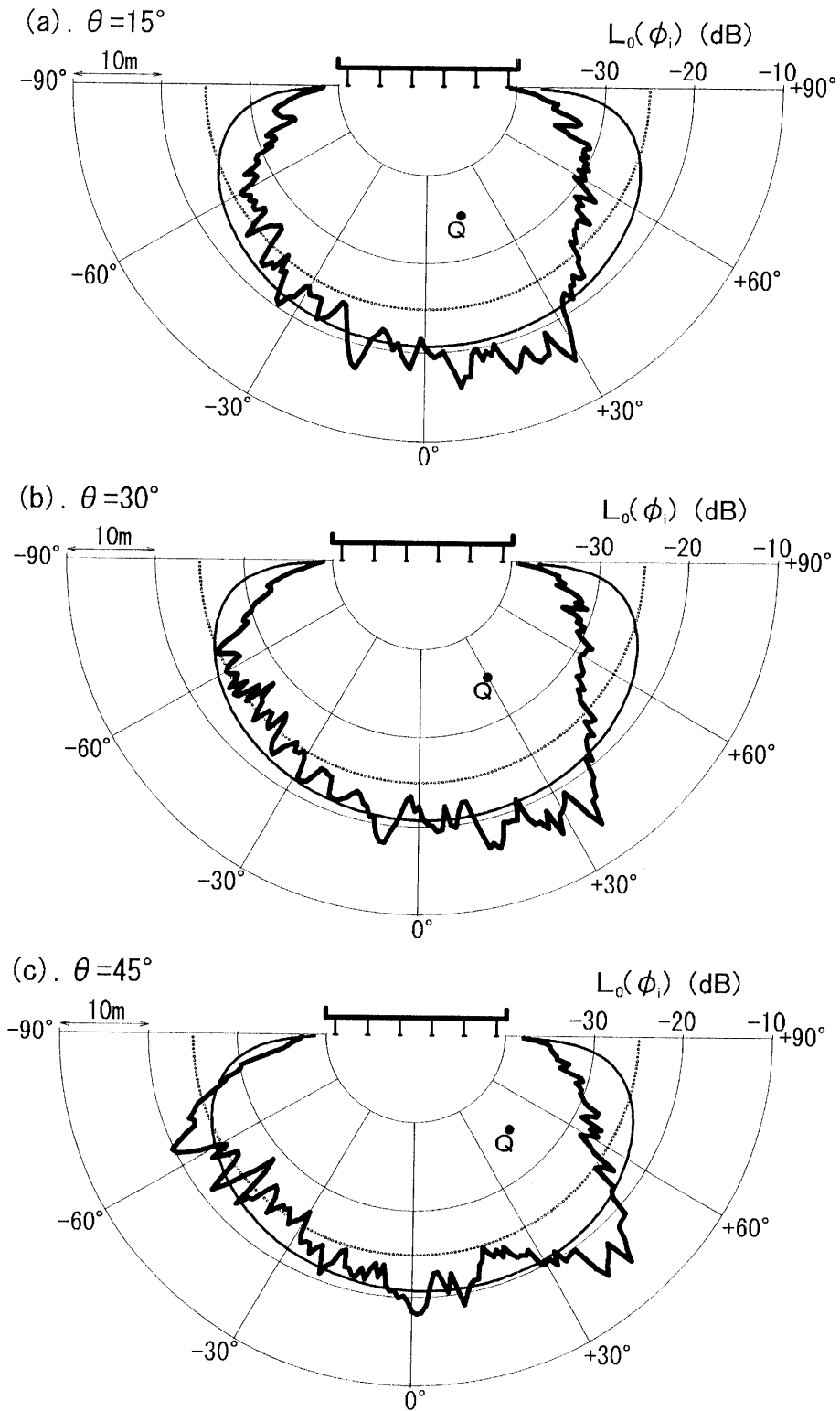


図 6-1-18. 2次元境界要素法と散乱反射法による1桁高架裏面での道路交通騒音の反射

凡例 ———— : 2次元境界要素法

————— : 散乱反射法

図の-25dBの位置の点の列が観測点P

b. 箱桁構造高架道路

計算対象とした高架道路構造物の諸元は図 6-1-4(b)に、音源と観測点の配置は図 6-1-6 に示すとおりである。散乱反射面は桁下位置に高架道路幅員をもつ平面を仮定した。

音源が $\theta = 0, 15, 30, 45^\circ$ の場合の、250, 500, 1kHz を中心周波数とする 1/1 オクターブバンドにおける散乱反射モデルによる音響エネルギー密度の計算値と境界要素法による計算値を比較して図 6-1-19(1)~(4)に示す。計算値は、式(6-1-23)により全ての観測点での音響エネルギー密度の総和を基準とした相対エネルギー密度レベルで表している。

250Hz では境界要素法と散乱反射モデルの差はほぼ $\pm 5\text{dB}$ 以内であるが、入射角 θ が大きくなると境界要素法の計算結果には入射角側に反射する成分は少なく散乱反射モデルではその方向の反射音を過大に評価することになる。また周波数が高くなるにつれて特定の方向に反射する成分が顕著になってくるが、散乱反射モデルは反射角 ϕ が $-60^\circ \sim +45^\circ$ の範囲では比較的良好に境界要素法の計算結果を近似している。

図 6-1-11 のスリット法の計算結果と比較すると、入射角 θ が 15° のときはスリット法の法が近似としてはよいが、 θ が 45° になるとスリット法では反射角 $\phi = 45^\circ$ 付近の成分が考慮できない。全体的には散乱反射モデルの近似は反射角 ϕ が $-60^\circ \sim +45^\circ$ の範囲で比較的良好である。

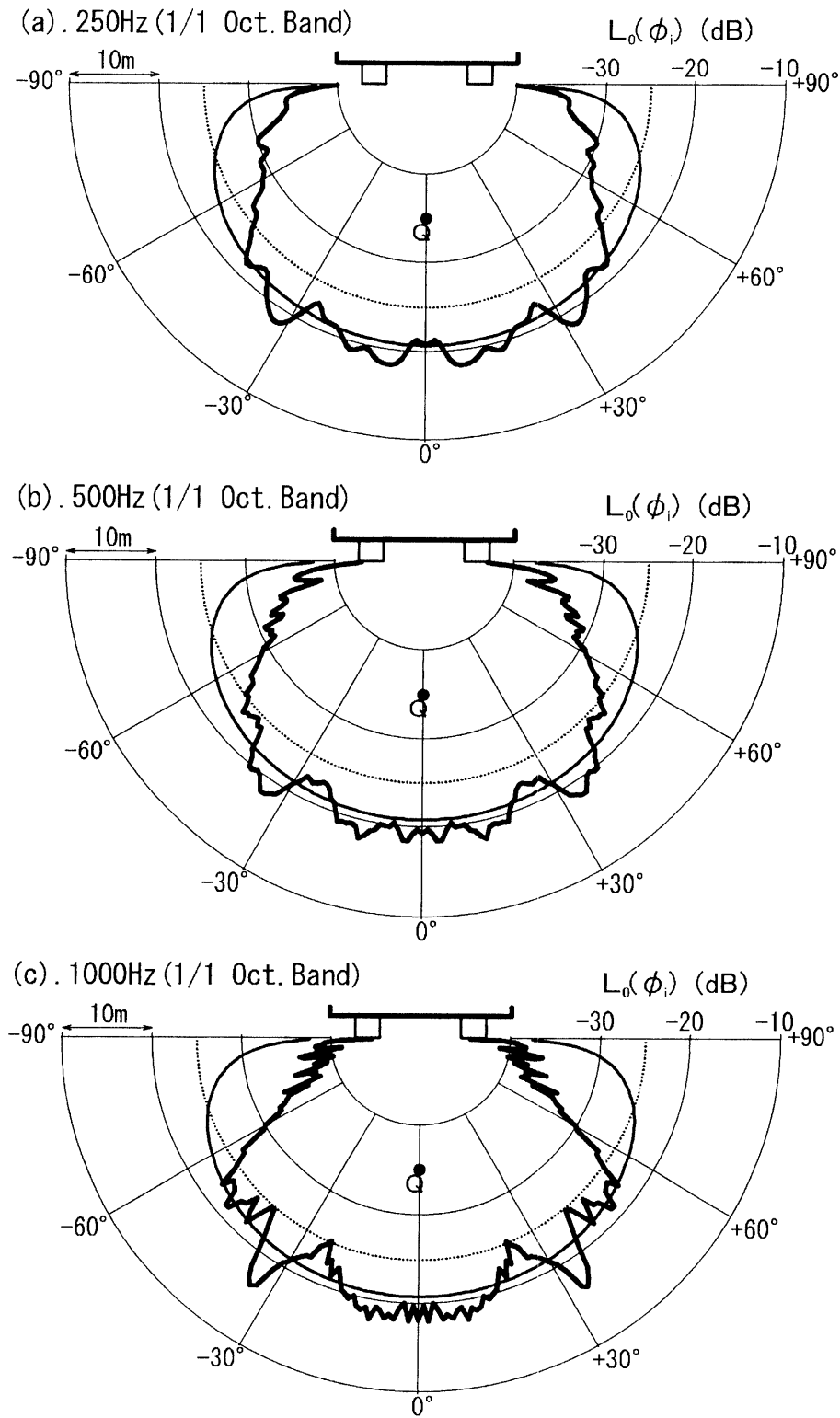


図 6-1-19(1). 2次元境界要素法と散乱反射法による箱桁高架裏面での反射指向特性

入射角: $\theta = 0^\circ$

凡例 ——— : 2次元境界要素法

——— : 散乱反射法

図の-25dBの位置の点の列が観測点P

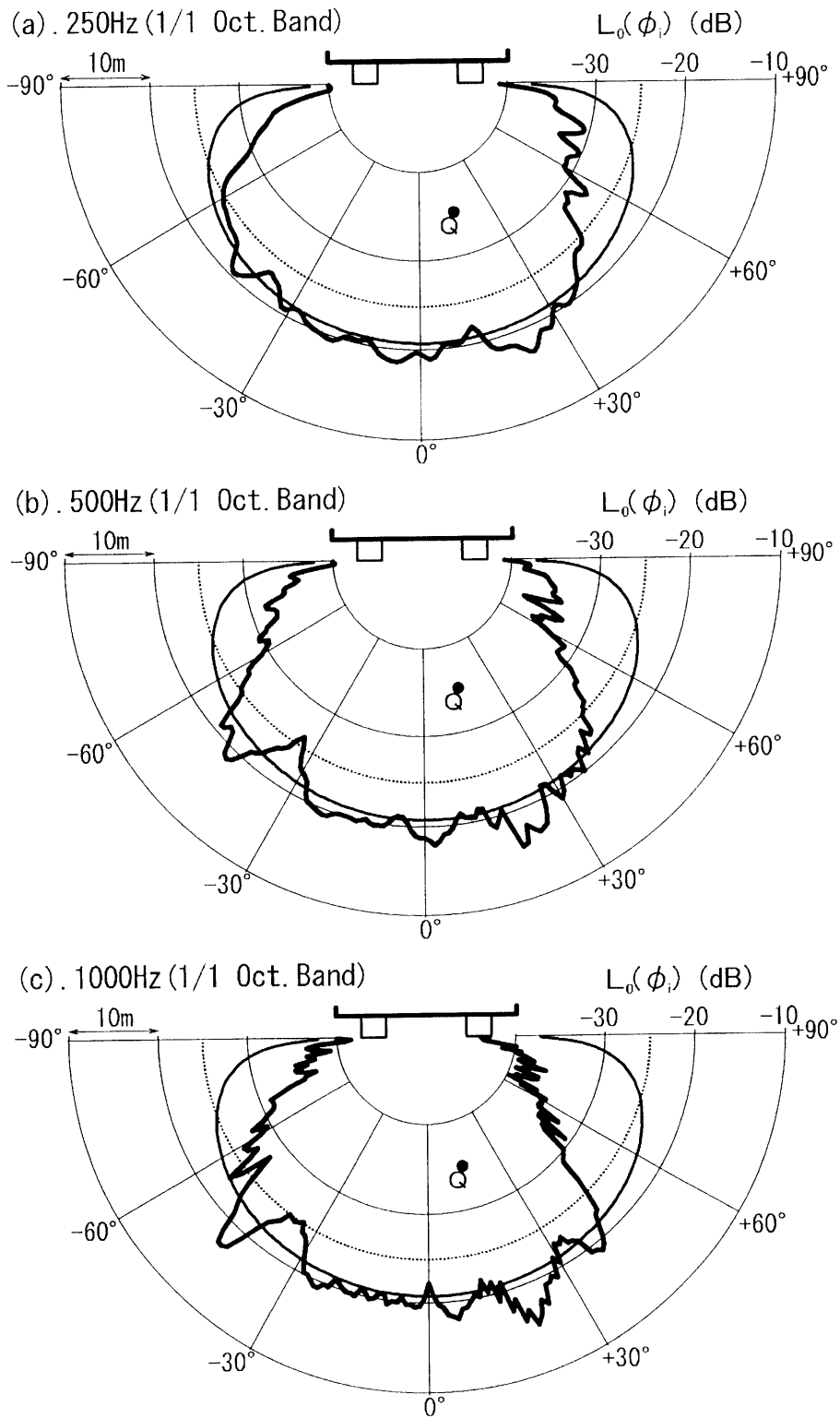


図 6-1-19(2). 2次元境界要素法と散乱反射法による箱桁高架裏面での反射指向特性

入射角: $\theta = 15^\circ$

凡例 ——— : 2次元境界要素法

————— : 散乱反射法

図の-25dBの位置の点の列が観測点P

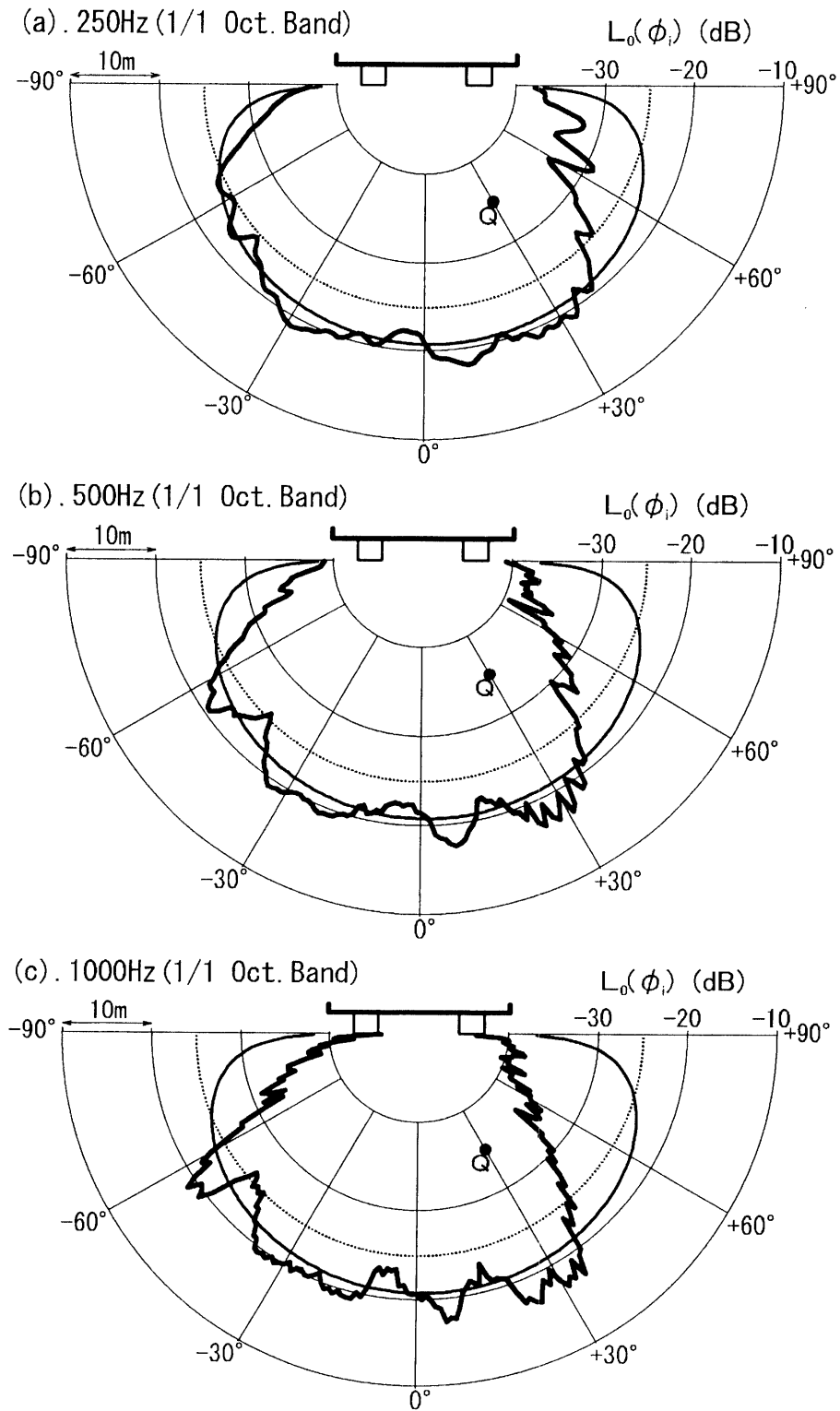


図 6-1-19(3). 2次元境界要素法と散乱反射法による箱桁高架裏面での反射指向特性

入射角： $\theta = 30^\circ$

凡例 **——** : 2次元境界要素法

- - - - : 散乱反射法

図の-25dB の位置の点の列が観測点 P

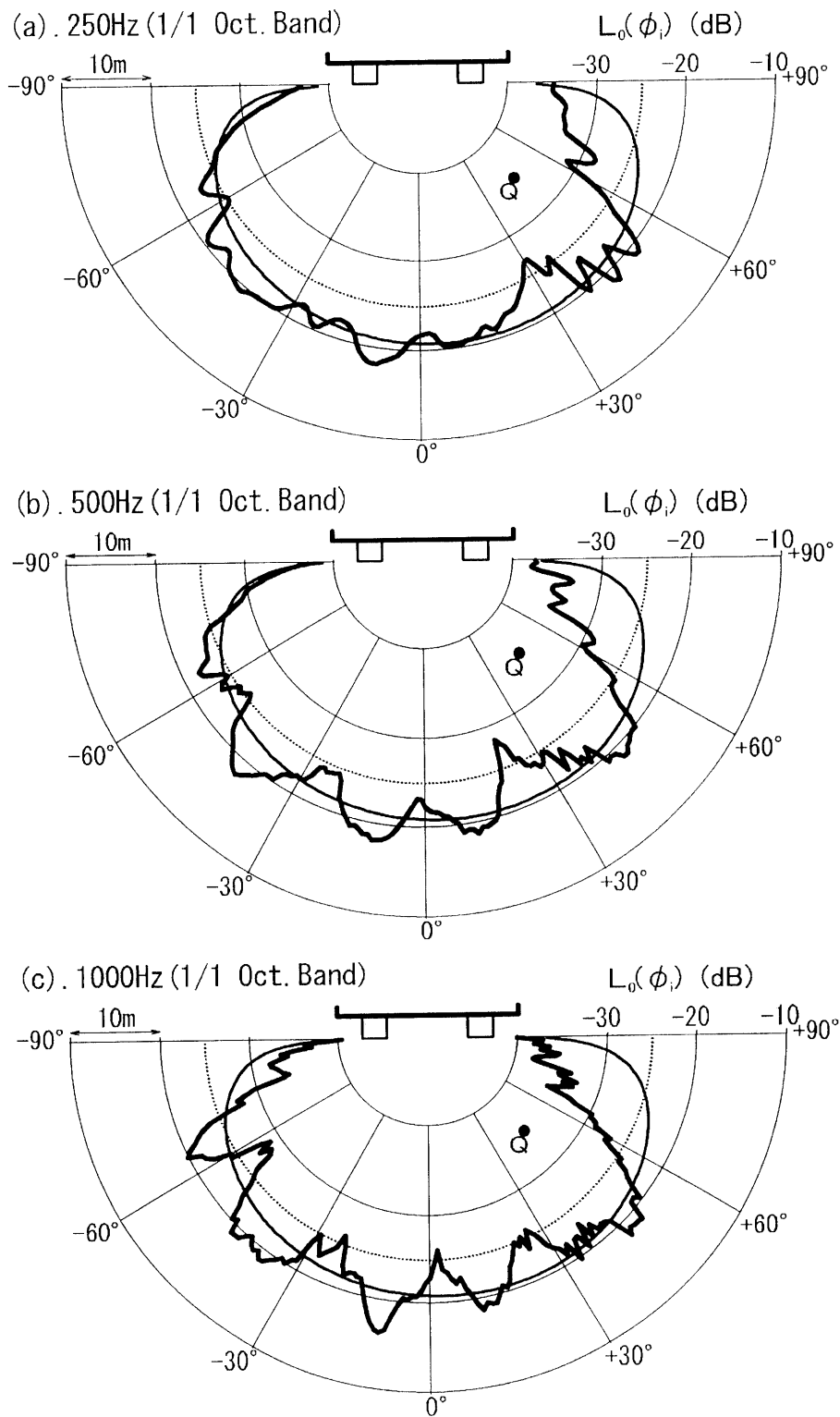


図 6-1-19(4). 2次元境界要素法と散乱反射法による箱桁高架裏面での反射指向特性

入射角: $\theta = 45^\circ$

凡例 ——— : 2次元境界要素法

----- : 散乱反射法

図の-25dBの位置の点の列が観測点 P

道路交通騒音のスペクトルを有する広帯域雑音と考えたときの反射音のA特性重みつけ音響エネルギー密度分布を図6-1-20示す。音源は $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ の3ケースである。

いずれの場合も $-70 < \phi < +45^\circ$ の範囲では散乱反射モデルと境界要素法の計算値の差はおおよそ5dB以内である。境界要素法の計算値には、 $\theta = 15^\circ$ のときで $\phi = 20^\circ$ 付近に、 $\theta = 30^\circ$ のときで $\phi = 25 \sim 35^\circ$ の範囲に、 $\theta = 45^\circ$ のときで $\phi = 45^\circ$ 付近に大きな反射波が到達しており、音源方向に大きな反射波が返ってくるような傾向にある。この範囲での散乱反射モデルと境界要素法の差は、最大5dBである。

図6-1-14のスリット法と境界要素法の計算結果（音圧レベル）と図6-1-20の散乱反射モデルと境界要素法の計算結果（音響エネルギー密度レベル）を比較すると、 $\theta = 15^\circ$ あるいは 30° の場合にはスリット法の方が近似はよい。 $\theta = 45^\circ$ の場合は $\phi = -90 \sim +60^\circ$ の範囲では散乱反射モデルと境界要素法の差は $\pm 5\text{dB}$ 以内であり、スリット法よりも近似はよい。

以上より、I桁高架構造ほどではないが、箱桁構造高架道路の場合も散乱反射の傾向を示している。ただし、反射角 ϕ が $+60^\circ$ 以上になると散乱反射法での近似はよくないので注意が必要である。

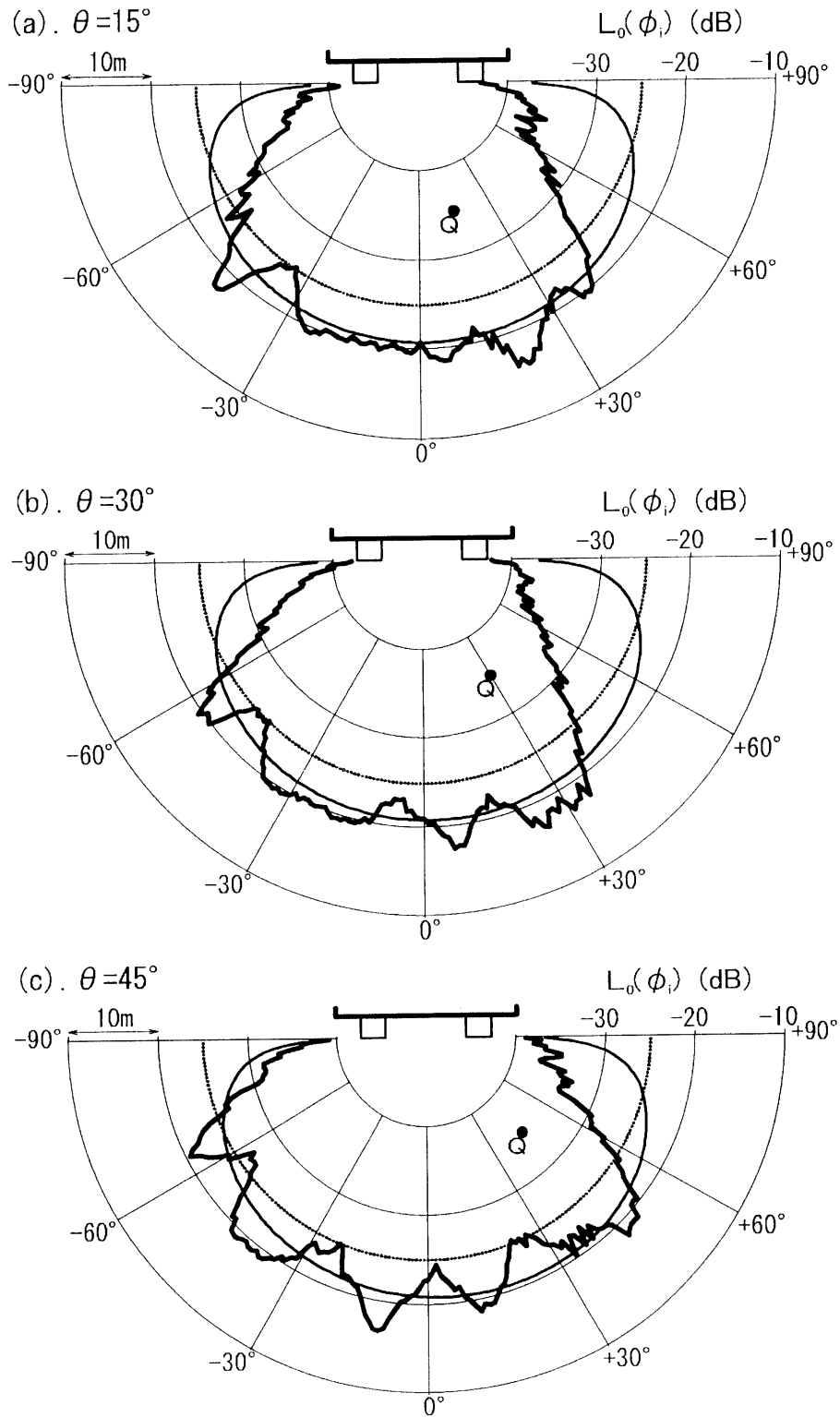


図 6-1-20.2 次元境界要素法と散乱反射法による箱桁高架裏面での道路交通騒音の反射

凡例 ——— : 2次元境界要素法

----- : 散乱反射法

図の-25dBの位置の点の列が観測点 P

6. 2 境界エネルギー積分法を用いた高架裏面反射音の予測

道路交通騒音を予測する上では、高架道路裏面と下路の路面あるいは地面での反射も考える必要がある。前節ではI桁あるいは箱桁高架道路裏面での反射特性が余弦則でおおよそ近似できることを述べた。本節では高架道路裏面を余弦則の反射特性をもつ散乱反射面とし、下路あるいは地面を平坦な反射面と考えて境界エネルギー積分法を適用し、道路沿道への伝搬を検討する。

計算値と測定値を比較し、境界エネルギー積分法を適用することの妥当性を検討する。

6. 2. 1 境界エネルギー積分法

(1) 点Pにおけるエネルギー密度の積分表示

検討に用いた境界エネルギー積分法について述べる。

図6-2-1に示すように、境界 S で囲まれた内部に点音源 Q と観測点 P を考える。境界 S 上に微小要素 s と s' を考え、 s の中心から内部に向かう法線ベクトルを \mathbf{n}_s とする。点 X と Y の距離を R_{XY} 、点 X から s の中心への入射角を θ_{Xs} 、 s の中心から点 Y への反射角を ϕ_{sY} とする。

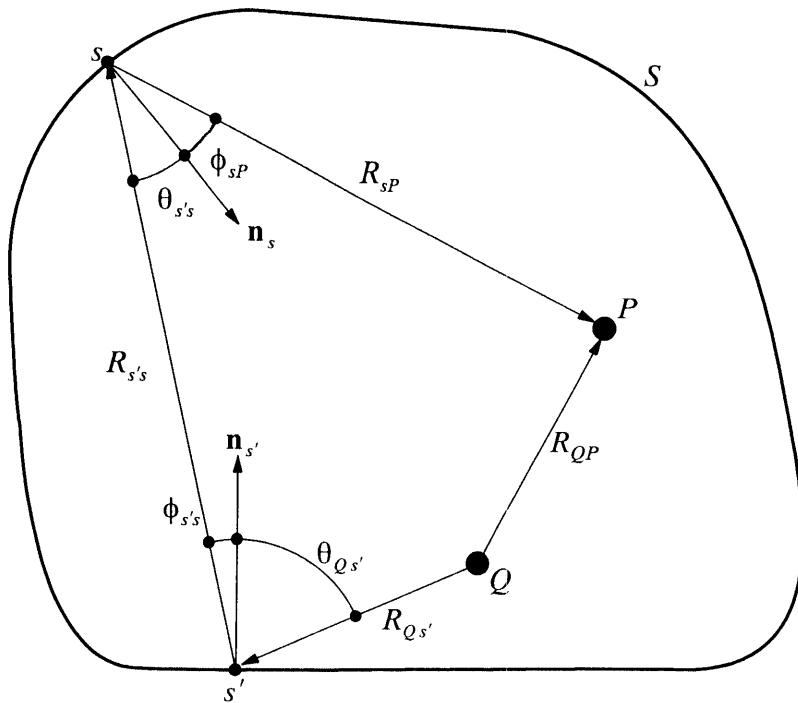


図6-2-1. 境界エネルギー積分法

点 P に入射する音響エネルギー密度 $B(P)$ は、直接音成分 $B_d(P)$ と境界 S からの反射音成分 $B_s(P)$ の和として次式のように表せる。

$$B(P) = B_d(P) + B_s(P) \quad (6-2-1)$$

伝搬における減衰を η で表し伝搬係数とよぶ。 X から Y への伝搬過程における伝搬係数を η_X^Y とし、 X でのエネルギー吸音率を α_X 、音源 Q の音響出力を W とすれば、 $B_d(P)$ および $B_s(P)$ は次式で与えられる。

$$B_d(P) = W \cdot \eta_Q^P \quad (6-2-2)$$

$$B_s(P) = \int_S B(s) \cdot (1 - \alpha_s) \cdot \eta_s^P ds \quad (6-2-3)$$

ここで、 $B(s)$ は s に入射する音響エネルギー密度で、次式で与えられる。

$$B(s) = B_d(s) + \int_S B(s') \cdot (1 - \alpha_{s'}) \cdot \eta_{s'}^s ds' \quad (6-2-4)$$

$$B_d(s) = W \cdot \eta_Q^s \quad (6-2-5)$$

境界面 S を面積 σ_i ($i = 1 \sim N$) の微小な要素に分割する。 σ_i の中心を $\hat{\sigma}_i$ とし、 σ_i 上では $B(s)$ は一定とし $B(\hat{\sigma}_i)$ で表す。このとき積分方程式(6-2-4)は以下のような連立方程式で表せる。

$$B(\hat{\sigma}_i) = B_d(\hat{\sigma}_i) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N B(\hat{\sigma}_j) \cdot (1 - \alpha_{\hat{\sigma}_j}) \cdot \eta_{\hat{\sigma}_j}^{\hat{\sigma}_i} \cdot \sigma_j \quad (6-2-6)$$

未知数は $B(\hat{\sigma}_i)$ ($i = 1 \sim N$) であり、式(6-2-6)の N 元連立方程式を解くことにより $B(\hat{\sigma}_i)$ を求めることができる。観測点 P での音響エネルギー密度は $B(\hat{\sigma}_i)$ ($i = 1 \sim N$) を用いて次式で求まる。

$$B(P) = B_d(P) + \sum_{j=1}^N B(\hat{\sigma}_j) \cdot \sigma_j \cdot (1 - \alpha_{\hat{\sigma}_j}) \cdot \eta_{\hat{\sigma}_j}^P \quad (6-2-7)$$

(2) 伝搬係数 η_X^Y

$\hat{\sigma}_X$ に入射した音響エネルギーのうちの $(1 - \alpha_{\hat{\sigma}_X})$ が反射し $\hat{\sigma}_X$ から $\hat{\sigma}_Y$ へ伝搬する場合を考える。伝搬過程で反射指向性、幾何拡散、回折、空気吸収を考え、境界 S のエネルギー反射特性が Lambert の余弦則で近似できるとすれば、 $\eta_{\hat{\sigma}_X}^{\hat{\sigma}_Y}$ は次のように表せる。

$$\eta_{\hat{\sigma}_X}^{\hat{\sigma}_Y} = \frac{2 \cos \phi_{\hat{\sigma}_X \hat{\sigma}_Y} \cos \theta_{\hat{\sigma}_X \hat{\sigma}_Y} \cdot D_{\hat{\sigma}_X}^{\hat{\sigma}_Y} \cdot A_{\hat{\sigma}_X}^{\hat{\sigma}_Y}}{2\pi c R_{\hat{\sigma}_X \hat{\sigma}_Y}^2} \quad (6-2-8)$$

$$D_{\hat{\sigma}_X}^{\hat{\sigma}_Y} = 10^{\Delta L_d / 10} \quad (6-2-9)$$

$$A_{\hat{\sigma}_X}^{\hat{\sigma}_Y} = 10^{\Delta L_{air} / 10} \quad (6-2-10)$$

ここで、 $D_{\hat{\sigma}_x}^{\hat{\sigma}_y}$ は $\hat{\sigma}_x$ から $\hat{\sigma}_y$ へ伝搬するときの遮蔽によるエネルギー減衰率、 $A_{\hat{\sigma}_x}^{\hat{\sigma}_y}$ は空気吸収によるエネルギー減衰率である。また、音源 Q から観測点 P への伝搬における伝搬係数 η_Q^P 、音源 Q から $\hat{\sigma}_x$ への伝搬における伝搬係数 $\eta_Q^{\hat{\sigma}_x}$ 、および $\hat{\sigma}_x$ から観測点 P への伝搬における伝搬係数 $\eta_{\hat{\sigma}_x}^P$ は次式で表される。

$$\eta_Q^P = \frac{D_Q^P \cdot A_Q^P}{4\pi c R_{QP}^2} \quad (6-2-11)$$

$$\eta_Q^{\hat{\sigma}_x} = \frac{\cos \theta_{Q\hat{\sigma}_x} D_Q^{\hat{\sigma}_x} \cdot A_Q^{\hat{\sigma}_x}}{4\pi c R_{Q\hat{\sigma}_x}^2} \quad (6-2-12)$$

$$\eta_{\hat{\sigma}_x}^P = \frac{2 \cos \phi_{\hat{\sigma}_x P} \cos \theta_{\hat{\sigma}_x P} D_{\hat{\sigma}_x}^P \cdot A_{\hat{\sigma}_x}^P}{2\pi c R_{\hat{\sigma}_x P}^2} \quad (6-2-13)$$

式(6-2-8)および式(6-2-11)～式(6-2-13)をデシベル表示すると以下のようなになる。

$$\begin{aligned} 10 \log_{10} \eta_{\hat{\sigma}_x}^{\hat{\sigma}_y} &= 10 \log_{10} (2 \cos \phi_{\hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_y}) + 10 \log_{10} (\cos \theta_{\hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_y}) \\ &\quad - 8 - 2010 \log_{10} R_{\hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_y} + \Delta L_d + \Delta L_{\text{air}} \end{aligned} \quad (6-2-14)$$

$$10 \log_{10} \eta_Q^P = -11 - 2010 \log_{10} R_{QP} + \Delta L_d + \Delta L_{\text{air}} \quad (6-2-15)$$

$$10 \log_{10} \eta_Q^{\hat{\sigma}_x} = 10 \log_{10} (\cos \theta_{Q\hat{\sigma}_x}) - 11 - 2010 \log_{10} R_{Q\hat{\sigma}_x} + \Delta L_d + \Delta L_{\text{air}} \quad (6-2-16)$$

$$\begin{aligned} 10 \log_{10} \eta_{\hat{\sigma}_x}^P &= 10 \log_{10} (2 \cos \phi_{\hat{\sigma}_x P}) + 10 \log_{10} (\cos \theta_{\hat{\sigma}_x P}) \\ &\quad - 8 - 2010 \log_{10} R_{Q\hat{\sigma}_x} + \Delta L_d + \Delta L_{\text{air}} \end{aligned} \quad (6-2-17)$$

式(6-2-15)は幾何拡散による減衰と遮蔽効果および空気吸収による減衰である。式(6-2-16)は式(6-2-15)に加えて、反射面を見込む角度の補正が加わっている。また式(6-2-14)あるいは式(6-2-17)は式(6-2-16)に加えて、反射角 $\phi_{\hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_y}$ あるいは $\phi_{\hat{\sigma}_x P}$ に関する補正項が加わっているが、これは指向性に関する補正項 ΔL_{dir} と考えることができる。したがって、騒音の伝搬モデルは本研究で対象とするエネルギーモデルそのものである。

6. 2. 2 高架裏面反射音への適用

ここでは、図 6-2-2 に示すように平面道路上に I 桁構造高架道路が併設された場合の高架裏面反射音を含む道路交通騒音の予測モデルについて考察する。

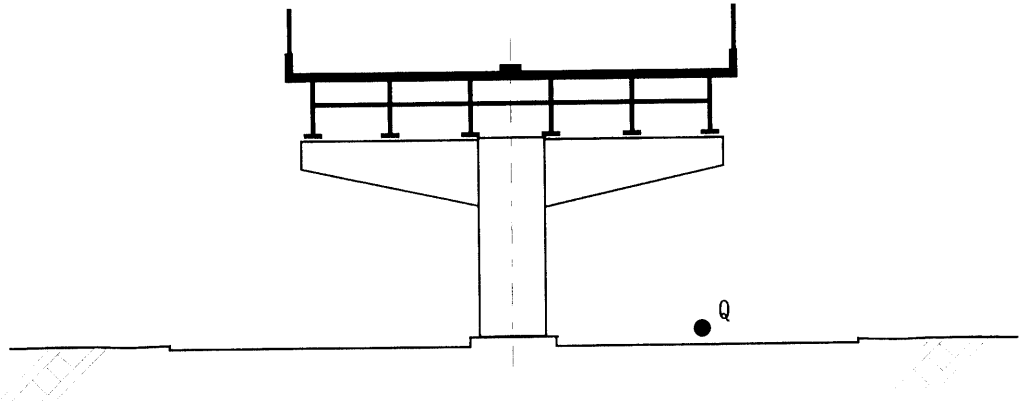


図 6-2-2. 検討対象とした高架併設道路

6.1 節の検討により、I 桁構造の高架裏面での反射特性が余弦則で近似できることが分かっている。そこで、高架裏面を余弦則に従う反射特性を有する平坦面とし、平面道路と地面を平坦な正反射面とする。また平面道路路面および地表面は同一平面であるとする。

高架裏面に仮定した散乱反射面を N 個の要素に分割すると、高架裏面と平面道路路面あるいは地面での反射は、図 6-2-3 に示すように、高架裏面に仮定した散乱反射面（要素数 N ）と、その平面道路路面に対する虚像（要素数 N ）の間での伝搬と考えることができる。

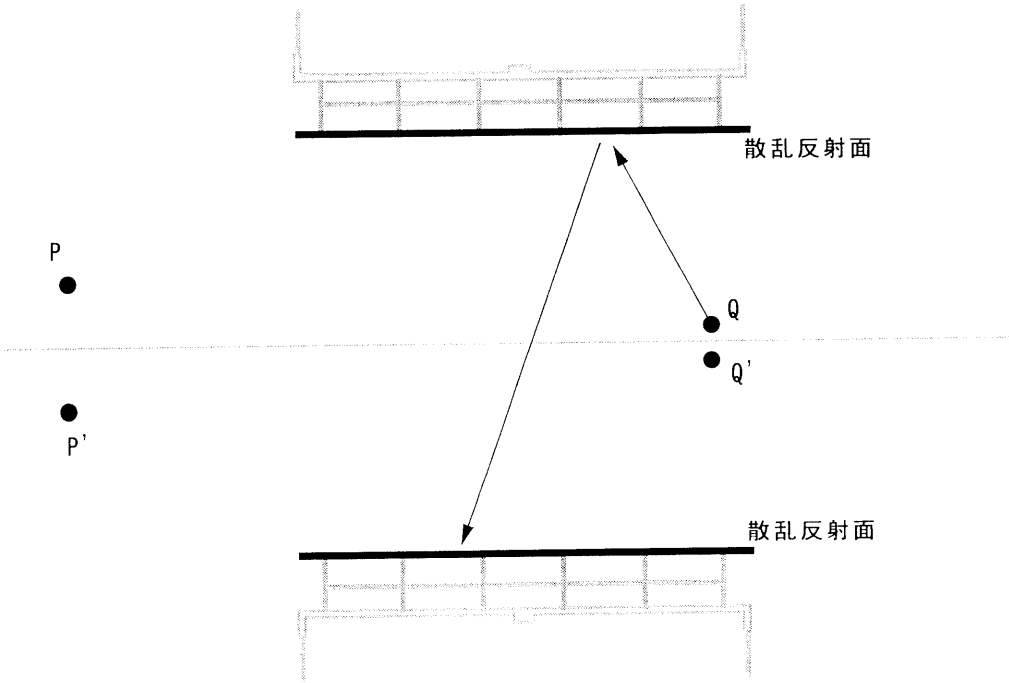


図 6-2-3. 高架裏面と平面道路路面での反射

ここで、平面道路あるいは地面を平坦な正反射面を仮定しているの、図 6-2-4 のように考えることができ、したがってエネルギー伝搬は以下のようにマトリクス表示できる。

$$B(\hat{\sigma}_i) = B_d(\hat{\sigma}_i) + B'_d(\hat{\sigma}_i) + \sum_{j=1}^N B(\hat{\sigma}_j) \cdot (1 - \alpha_{\hat{\sigma}_j}) \cdot \sigma_j \cdot \eta_{\hat{\sigma}_j}^{\hat{\sigma}_i} \quad (6-2-18)$$

ここで、 $B'_d(\hat{\sigma}_i)$ は $\hat{\sigma}_i$ に入射する路面での反射音のエネルギー密度で、 Q' の位置に音源を考えて式(6-2-2)および式(6-2-11)で計算できる。また、 $B(\hat{\sigma}_j) \cdot (1 - \alpha_{\hat{\sigma}_j}) \cdot \sigma_j$ は $\hat{\sigma}_j$ から放射される総エネルギーを表す。

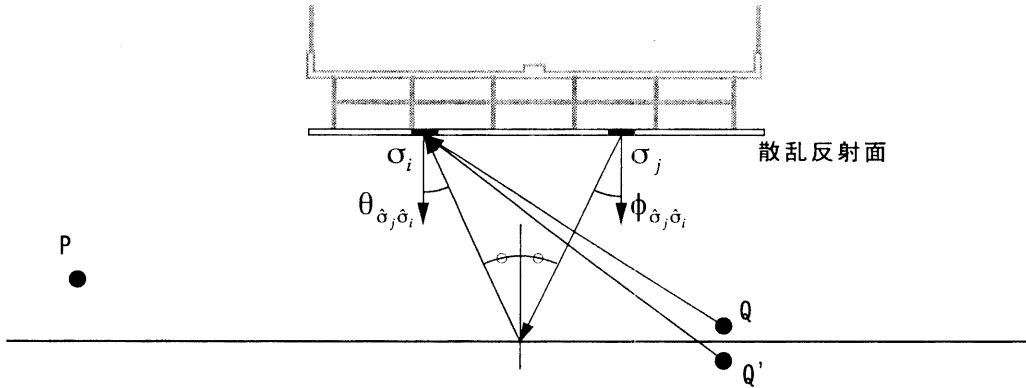


図 6-2-4. 高架裏面と平面道路路面での反射 (その 2)

平面道路路面あるいは地面のエネルギー吸音率を α_0 とすると伝搬係数 $\eta_{\hat{\sigma}_j}^{\hat{\sigma}_i}$ は次式で与えられる。

$$\eta_{\hat{\sigma}_j}^{\hat{\sigma}_i} = \frac{2 \cos \phi_{\hat{\sigma}_j, \hat{\sigma}_i} \cos \theta_{\hat{\sigma}_j, \hat{\sigma}_i} \cdot A_{\hat{\sigma}_j}^{\hat{\sigma}_i} \cdot (1 - \alpha_0)}{2\pi c R_{\hat{\sigma}_j, \hat{\sigma}_i}^2} \quad (6-2-19)$$

ここで、 $\phi_{\hat{\sigma}_j, \hat{\sigma}_i}$ は $\hat{\sigma}_j$ から $\hat{\sigma}_i$ への伝搬経路における $\hat{\sigma}_i$ への入射角、 $\theta_{\hat{\sigma}_j, \hat{\sigma}_i}$ は $\hat{\sigma}_j$ から $\hat{\sigma}_i$ への伝搬経路における $\hat{\sigma}_j$ での反射角、 $R_{\hat{\sigma}_j, \hat{\sigma}_i}$ は $\hat{\sigma}_j$ の路面に対する虚像 $\hat{\sigma}'_j$ と $\hat{\sigma}_i$ の距離、すなわち $\hat{\sigma}_j$ から $\hat{\sigma}_i$ への路面での反射音の伝搬経路長である。

未知数は $B(\hat{\sigma}_i)$ ($i = 1 \sim N$) であり、式(6-2-14)の N 元連立方程式を解くことにより $B(\hat{\sigma}_i)$ を求めることができる。観測点 P での音響エネルギー密度は図 6-2-5 の経路を考えて、 $B(\hat{\sigma}_i)$ ($i = 1 \sim N$) を用いて次式で求まる。

$$B(P) = B_d(P) + B_d(P') + \sum_{j=1}^N B(\hat{\sigma}_j) \cdot (1 - \alpha_{\hat{\sigma}_j}) \cdot \sigma_j \cdot (\eta_{\hat{\sigma}_j}^P + \eta_{\hat{\sigma}_j}^{P'}) \quad (6-2-20)$$

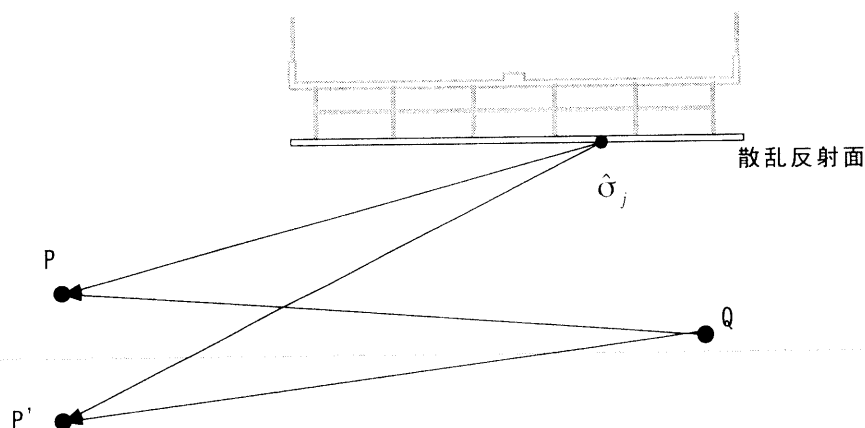


図 6-2-5. 観測点 P での音響エネルギー密度算出のための伝搬経路

次に、図 6-2-6 のように平面道路端に遮音壁が設置されている場合を考える。このとき $\hat{\sigma}_j$ から $\hat{\sigma}_i$ への伝搬において、 $\hat{\sigma}_j \rightarrow G_1 \rightarrow (O) \rightarrow \hat{\sigma}_i$ 、 $\hat{\sigma}_j \rightarrow (O) \rightarrow G_3 \rightarrow \hat{\sigma}_i$ 、 $\hat{\sigma}_j \rightarrow G_2 \rightarrow O \rightarrow G_3 \rightarrow \hat{\sigma}_i$ の 3 経路が考えられる。これらの経路に対する伝搬係数を、 $\eta_{\hat{\sigma}_j,1}^{\hat{\sigma}_i}$ 、 $\eta_{\hat{\sigma}_j,2}^{\hat{\sigma}_i}$ 、 $\eta_{\hat{\sigma}_j,3}^{\hat{\sigma}_i}$ とする。

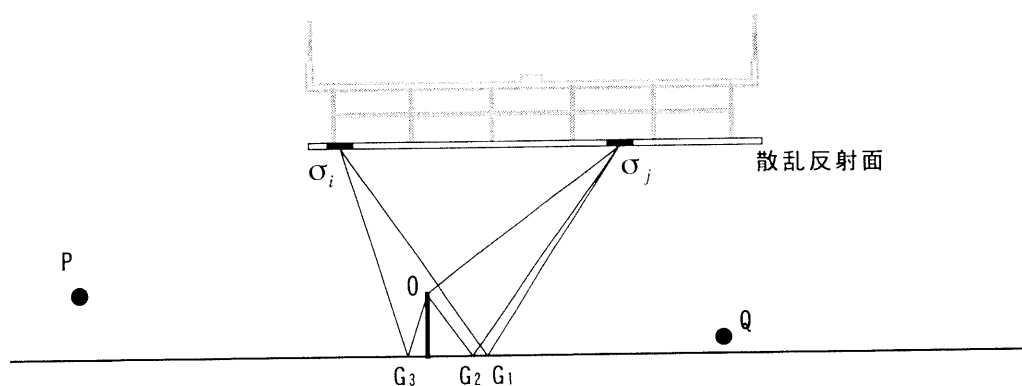


図 6-2-6. 障壁が設置された場合の伝搬経路

このとき、 $\hat{\sigma}_j$ から $\hat{\sigma}_i$ への伝搬係数 $\eta_{\hat{\sigma}_j}^{\hat{\sigma}_i}$ は次式となる。

$$\eta_{\hat{\sigma}_j}^{\hat{\sigma}_i} = \eta_{\hat{\sigma}_j,1}^{\hat{\sigma}_i} + \eta_{\hat{\sigma}_j,2}^{\hat{\sigma}_i} + \eta_{\hat{\sigma}_j,3}^{\hat{\sigma}_i} \quad (6-2-21)$$

$$\eta_{\hat{\sigma}_j,1}^{\hat{\sigma}_i} = \frac{2 \cos \phi_{\hat{\sigma}_j, \hat{\sigma}_i, 1} \cos \theta_{\hat{\sigma}_j, \hat{\sigma}_i, 1} \cdot D_{\hat{\sigma}_j, 1}^{\hat{\sigma}_i} \cdot A_{\hat{\sigma}_j, 1}^{\hat{\sigma}_i} \cdot (1 - \alpha_0)}{2\pi c R_{\hat{\sigma}_j, \hat{\sigma}_i}^2} \quad (6-2-22)$$

$$\eta_{\hat{\sigma}_j,2}^{\hat{\sigma}_i} = \frac{2 \cos \phi_{\hat{\sigma}_j, \hat{\sigma}_i, 2} \cos \theta_{\hat{\sigma}_j, \hat{\sigma}_i, 2} \cdot D_{\hat{\sigma}_j, 2}^{\hat{\sigma}_i} \cdot A_{\hat{\sigma}_j, 2}^{\hat{\sigma}_i} \cdot (1 - \alpha_0)}{2\pi c R_{\hat{\sigma}_j, \hat{\sigma}_i}^2} \quad (6-2-23)$$

$$\eta_{\hat{\sigma}_j,3}^{\hat{\sigma}_i} = \frac{2 \cos \phi_{\hat{\sigma}_j, \hat{\sigma}_i, 3} \cos \theta_{\hat{\sigma}_j, \hat{\sigma}_i, 3} \cdot D_{\hat{\sigma}_j, 3}^{\hat{\sigma}_i} \cdot A_{\hat{\sigma}_j, 3}^{\hat{\sigma}_i} \cdot (1 - \alpha_0)^2}{2\pi c R_{\hat{\sigma}_j, \hat{\sigma}_i}^2} \quad (6-2-24)$$

なお高架裏面は余弦則の指向性音源と考えることができるので、 $\hat{\sigma}_j$ から $\hat{\sigma}_i$ への伝搬において障壁で遮蔽が考えられる場合は、角度は $\hat{\sigma}_j$ あるいは $\hat{\sigma}_i$ から回折点へのベクトルと $\hat{\sigma}_j$ あるいは $\hat{\sigma}_i$ の法線ベクトルがなす角度を用いた。

観測点 P での音響エネルギー密度は図 6-2-7 経路を考えて、 $B(\hat{\sigma}_i)$ ($i = 1 \sim N$) を用いて次式で求まる。

$$\begin{aligned} B(P) = & B_d(P) + B_d(P') + B'_d(P) + B'_d(P') \\ & + \sum_{j=1}^N B(\hat{\sigma}_j) \cdot (1 - \alpha_{\hat{\sigma}_j}) \cdot \sigma_j \cdot (\eta_{\hat{\sigma}_j}^P + \eta_{\hat{\sigma}_j}^{P'}) \\ & + \sum_{j=1}^N B(\hat{\sigma}_j) \cdot (1 - \alpha_{\hat{\sigma}_j}) \cdot \sigma_j \cdot (\eta_{\hat{\sigma}_j}^P + \eta_{\hat{\sigma}_j}^{P'}) \end{aligned} \quad (6-2-25)$$

ここで、 $\eta_{\hat{\sigma}_j}^P$ および $\eta_{\hat{\sigma}_j}^{P'}$ は $\hat{\sigma}_j$ の路面に対する虚像 $\hat{\sigma}'_j$ から P あるいは P' への伝搬係数である。

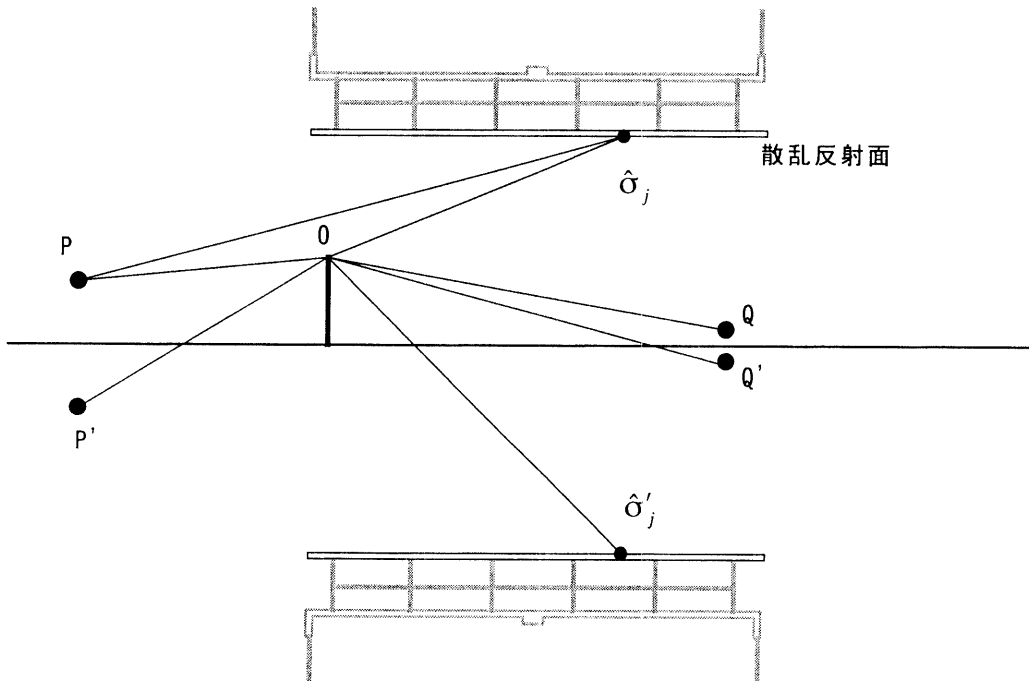


図 6-2-7. 観測点 P での音響エネルギー密度算出のための伝搬経路

6. 2. 3 現地測定

対象とした道路および測定点を図 6-2-8 と図 6-2-9 に示す。

高架道路は拡幅区間で未供用である。平面道路は 6 車線の通常舗装道路である。また平面道路端に高さ 2m の遮音壁（ブロック塀）が設置されており、測定点は遮音壁の影の領域にある。沿道は公園および工場敷地で地表面は固い土（一部、芝）であり、周囲は開放されている。図の 1~4 が測定点、S1~S6 が音源に用いた競技用スターターの位置である。

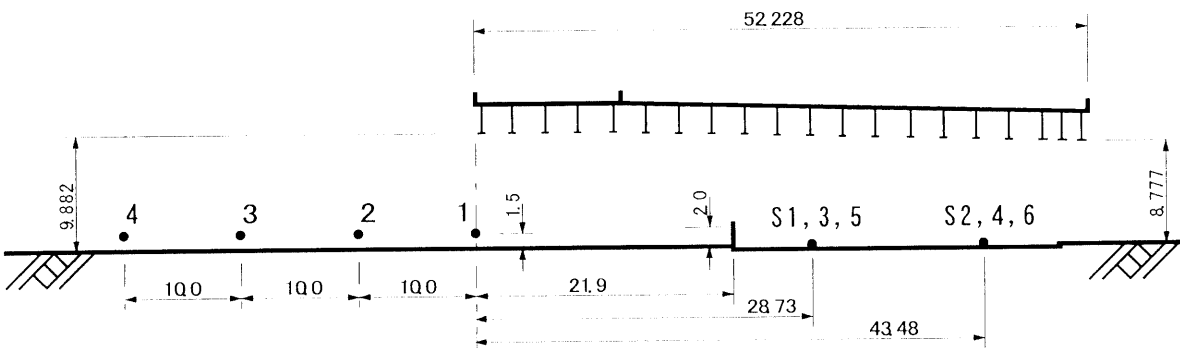


図 6-2-8. 音源と観測点の平面配置 (S1~S6 : スターター, 1~4 : 測定点)

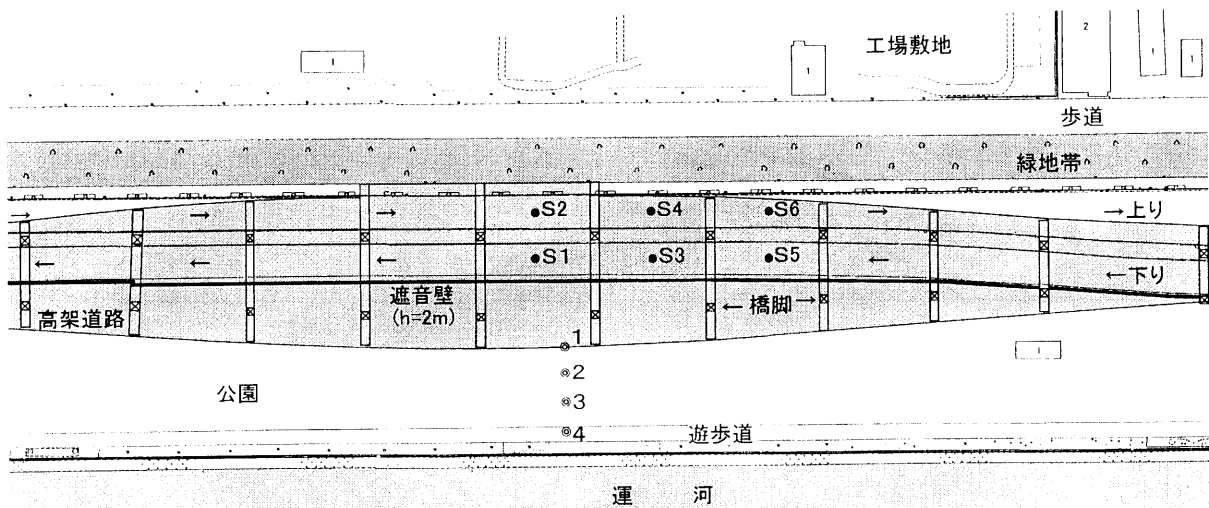


図 6-2-9. 音源と観測点の断面配置 (S1~S6 : スターター, 1~4 : 測定点)

6. 2. 4 計算値と測定値の比較

(1) 競技用スターター信号

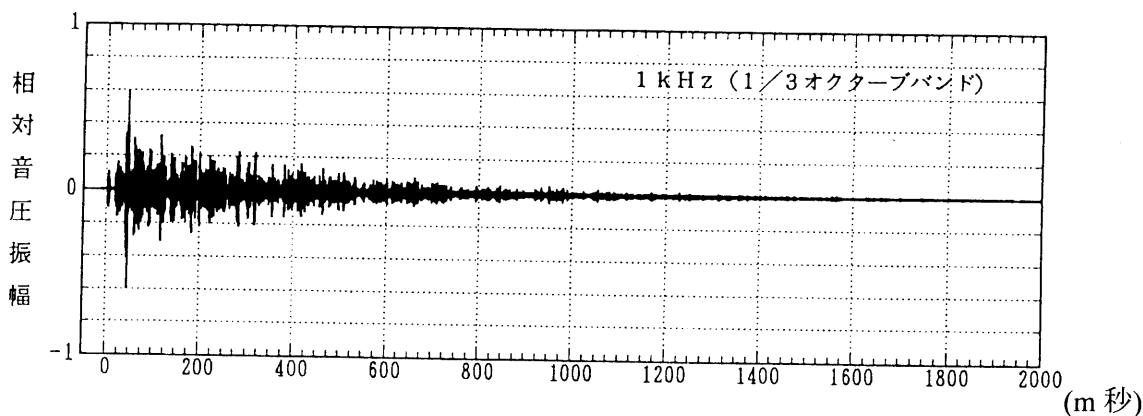
a. 振幅波形

図 6-2-8, 図 6-2-9 の S1~S6 の路面上 30cm の位置で競技用スターターを鳴らし, 測定点で音圧を測定した.

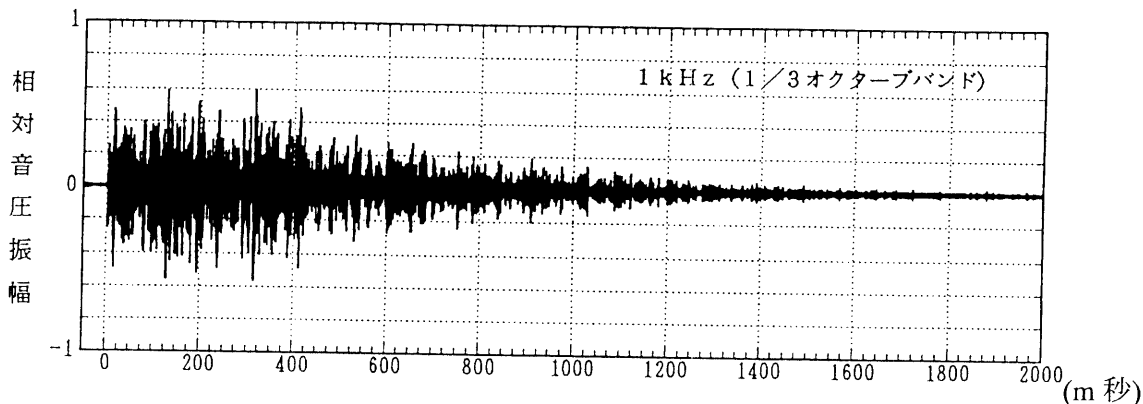
振幅波形の一例を図 6-2-10 に示す. 図では振幅の最大値を 0.6 とした相対値で示している. (a)はスターター位置が S1, 測定点が 1 で最も伝搬距離が短いケースであり, (b)はスターター位置が S6, 測定点が 4 で最も伝搬距離が長いケースである. いずれも中心周波数 1kHz の 1/3 オクターブバンドパスフィルターを通した結果である.

(a)(b)共に, 直接波(回折波)の後に直接音よりも大きな反射波が多数到達している.

また, 振幅波形をフーリエ変換し中心周波数 500Hz, 1kHz, 2kHz の 1/3 オクターブバンドの音圧レベルを算出した. スターターの側方 6m で路面上 1.2m で測定した直接波と路面での反射波の合成音圧レベルを基準とし, 各測定点について相対音圧レベルを求めた.



(a). スターター : S1, 測定点 1



(b). スターター : S6, 測定点 4

図 6-2-10. 競技用スターター信号の振幅波形

b. 計算値と測定値の比較

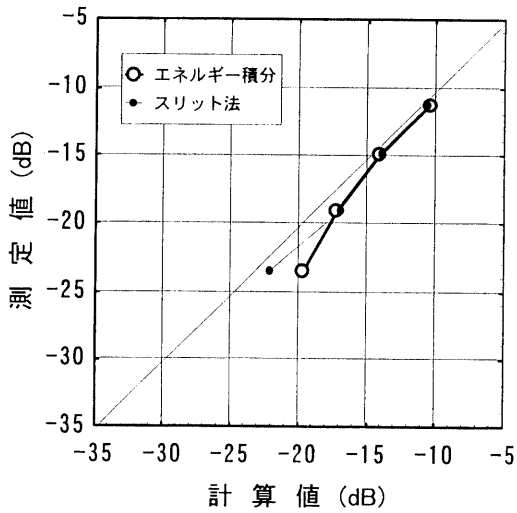
測定値と境界エネルギー積分による計算値、およびスリット法による計算値を比較して図 6-2-11～図 6-2-13 に示す。計算では路面・地面および高架裏面のエネルギー吸音率は 2% とした。境界エネルギー積分での計算では高架裏面は $2\text{m} \times 2\text{m}$ 程度の要素に分割した。またスリット法の計算では、音源の多重反射による虚像も考慮し、より高次の反射音を考慮する前後のレベル変化が 0.1dB 未満になるまで計算した。

500Hz の場合には、境界エネルギー積分での計算値は測定値に比べ、 $-1 \sim +4\text{dB}$ 大きく、特に測定点 4 の場合と、音源が S3, S4, S6 の場合に差が大きい。差が大きくなるのは反射面での反射角 θ が 90° に近づくため余弦則の仮定による誤差が大きくなることが考えられる。また音源が S3, S4, S6 の場合には伝搬経路途中に橋脚があるためその遮蔽の影響も考えられる。スリット法の計算値は測定値に比べ $0 \sim +7\text{dB}$ 大きく、特に S4 と S6 において差が大きい。

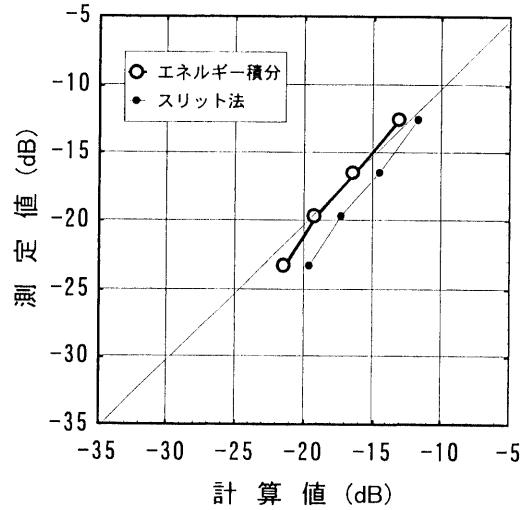
1kHz の場合には、境界エネルギー積分での計算値は測定値に比べ、 $0 \sim +6\text{dB}$ 大きく、測定点が 4 の場合と、音源が S3～S6 の場合に特に差が大きい。スリット法の計算値は測定値に比べ $+1 \sim +9\text{dB}$ 大きく、特に S4 と S6 において差が大きい。

2kHz の場合には、境界エネルギー積分での計算値は測定値に比べ、 $0 \sim +6\text{dB}$ 大きく、測定点が 4 の場合と、音源が S4～S6 の場合に特に差が大きい。スリット法の計算値は測定値に比べ $0 \sim +10\text{dB}$ 大きく、特に S4 と S6 において差が大きい。

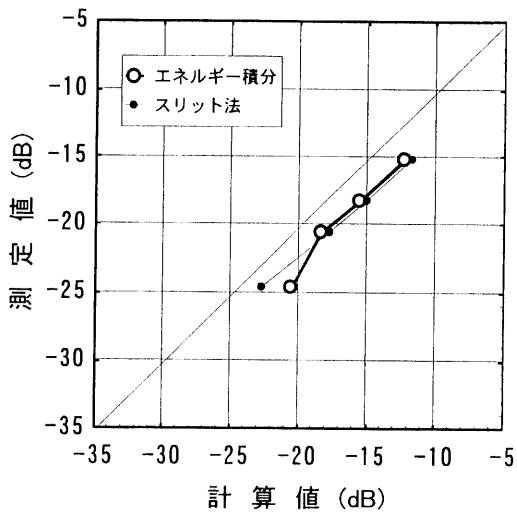
以上より、境界エネルギー積分による計算は、スリット法による計算値よりも測定値の対応がよく、I 桁高架裏面を余弦則の反射指向性をもつ反射面と仮定することの妥当性が示された。ただし、反射角が 90° に近づくとき余弦則の仮定が成り立たないことも考えられ注意が必要である。



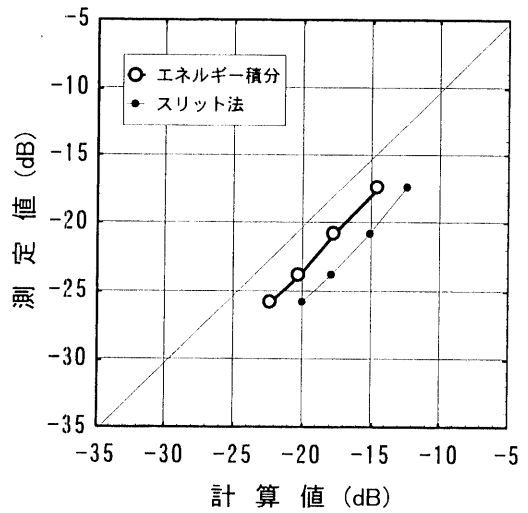
(a). 音源 S1



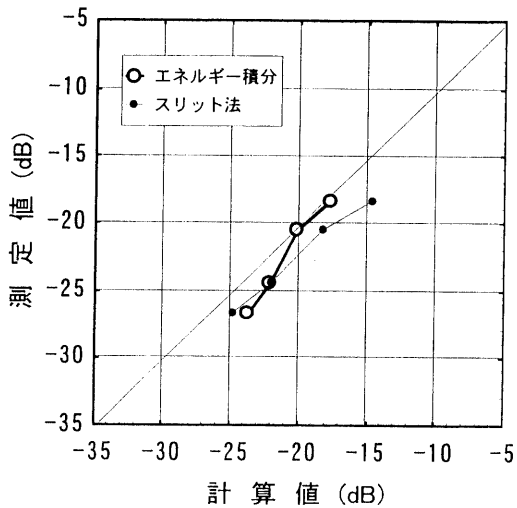
(b). 音源 S2



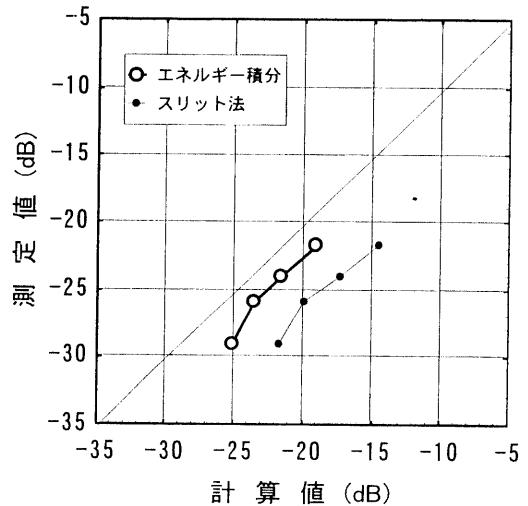
(c). 音源 S3



(d). 音源 S4

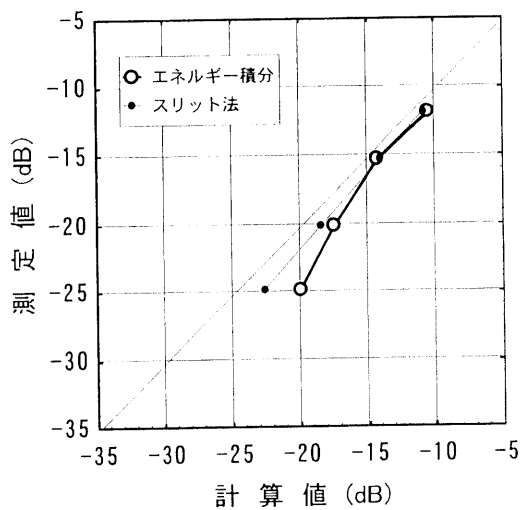


(e). 音源 S5

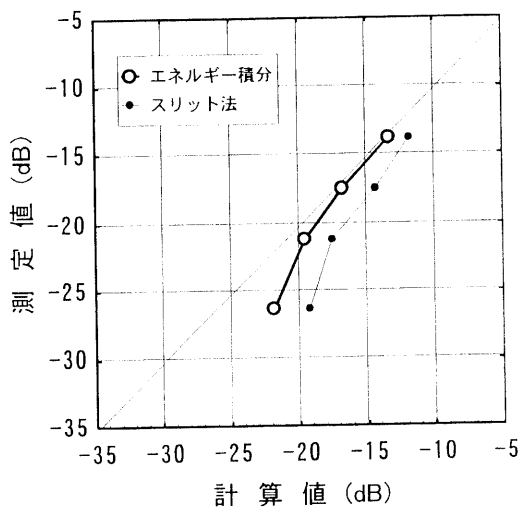


(f). 音源 S6

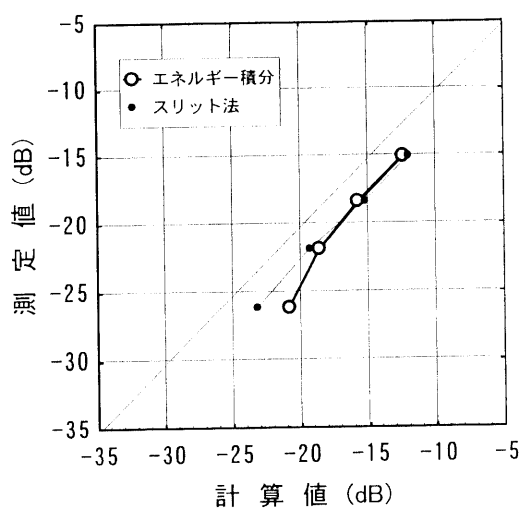
図 6-2-11. 競技用スターターの測定値と計算値の比較(500Hz)



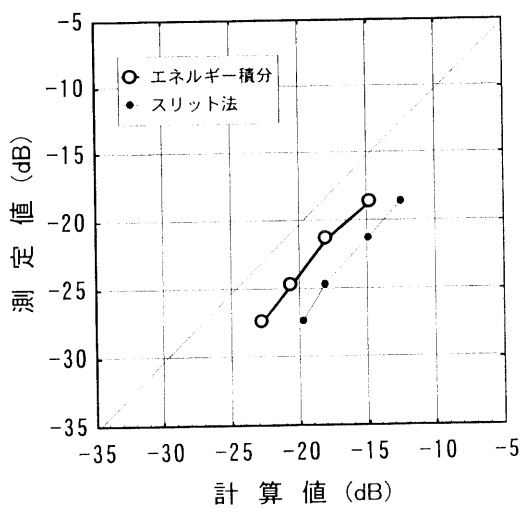
(a). 音源 S1



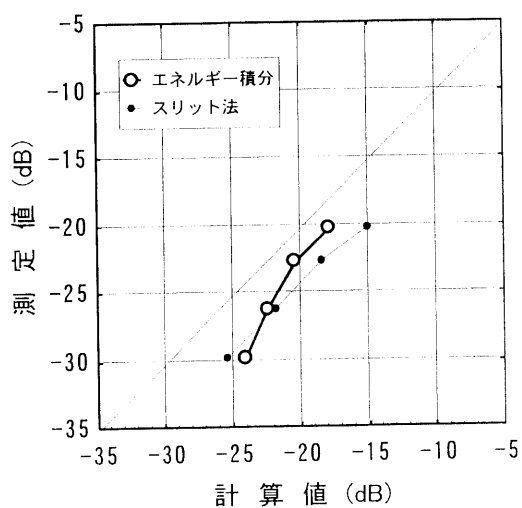
(b). 音源 S2



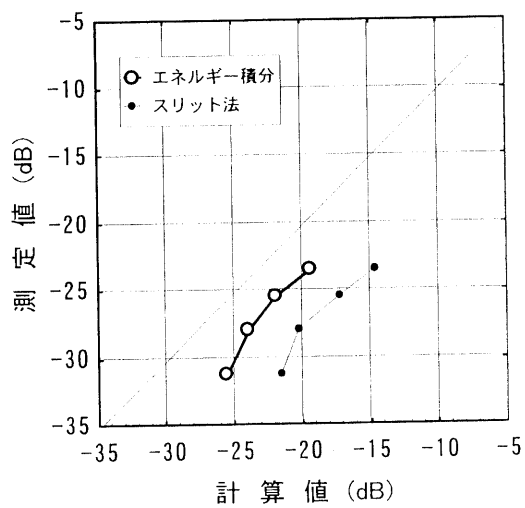
(c). 音源 S3



(d). 音源 S4

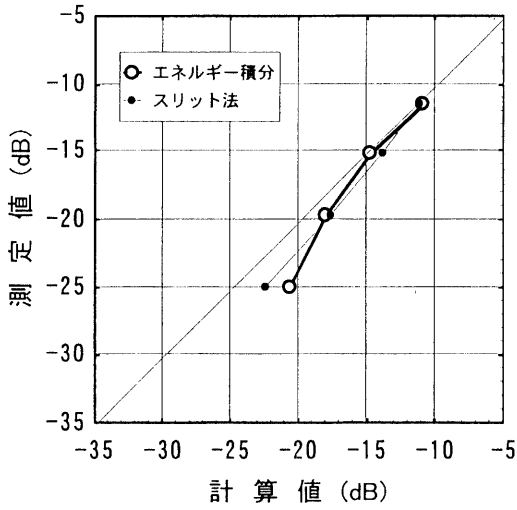


(e). 音源 S5

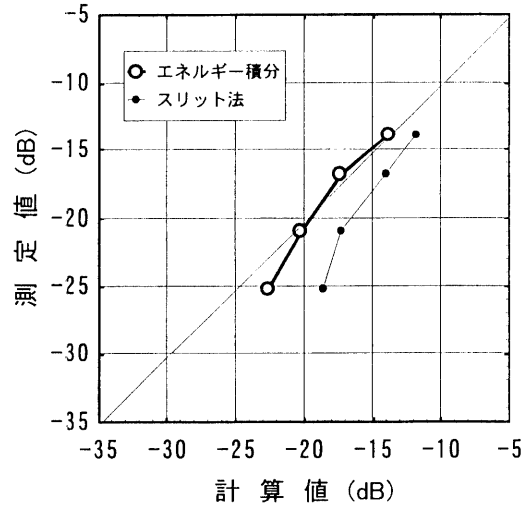


(f). 音源 S6

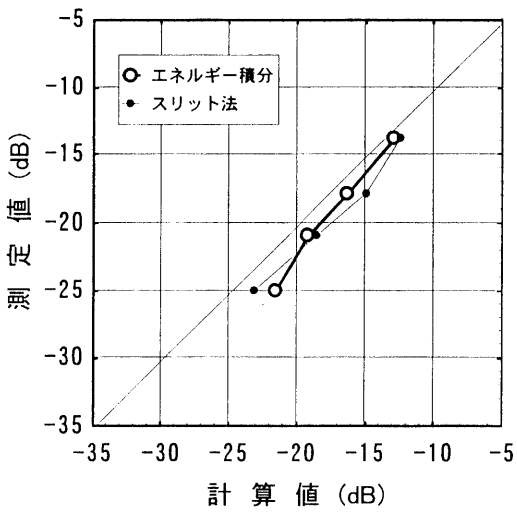
図 6-2-12. 競技用スターターの測定値と計算値の比較(1kHz)



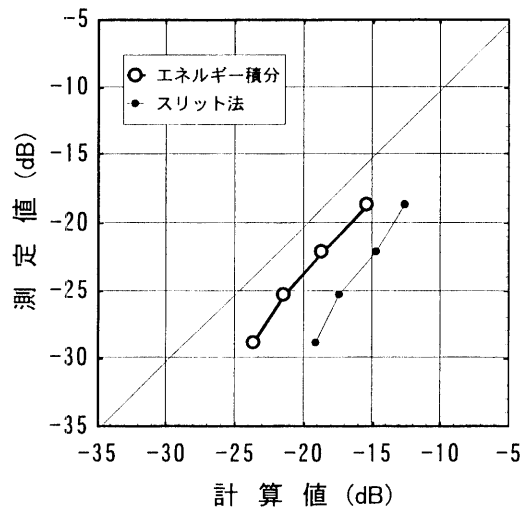
(a). 音源 S1



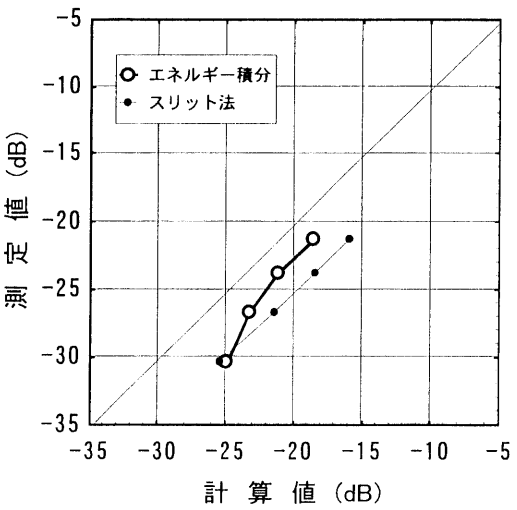
(b). 音源 S2



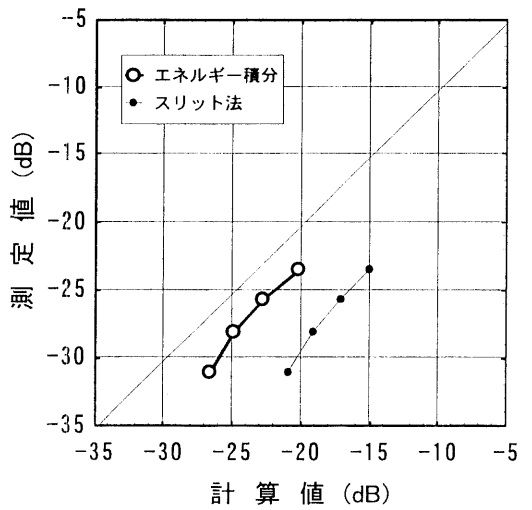
(c). 音源 S3



(d). 音源 S4



(e). 音源 S5



(f). 音源 S6

図 6-2-13. 競技用スターターの測定値と計算値の比較(2kHz)

(2) 道路交通騒音

道路交通騒音の L_{Aeq} について検討する。 L_{Aeq} の計算は上下車線の中心 (図 6-2-8 の S_x) の路面上に測定点の直前から $\pm 300\text{m}$ の範囲に 1m 間隔で点音源を配置して行った。直接音の計算は ASJ RTN-Model 1998 B 法により行い、測定時の走行速度は $70\sim 80\text{km/h}$ であったことから、パワーレベルは定常走行区間の設定式を用いた。遮蔽効果および空気吸収の計算も ASJ RTN-Model 1998 B 法の計算式を用いた。

遮蔽による補正值 ΔL_d の計算式を以下に示す。B法の ΔL_d は障壁の遮蔽効果に関する前川の実験チャートをもとに、道路交通騒音のスペクトルを重み付けしてオールパス値で与えられるため周波数の項は含まれない。計算式を以下に示す。

$$\Delta L_d = \begin{cases} -20 - 10 \cdot \log_{10} \delta & , \text{for } \delta \geq 1 \\ -5 \pm \frac{-15}{\sinh^{-1}(1)} \cdot \sinh^{-1}(|\delta|^{0.414}) & , \text{for } -0.0537 \leq \delta < 1 \\ 0 & , \text{for } \delta < -0.0537 \end{cases} \quad (6-2-26)$$

δ は経路差(m)であり、符号は $\delta > 0$ のとき"+", $\delta < 0$ のとき"-”である。

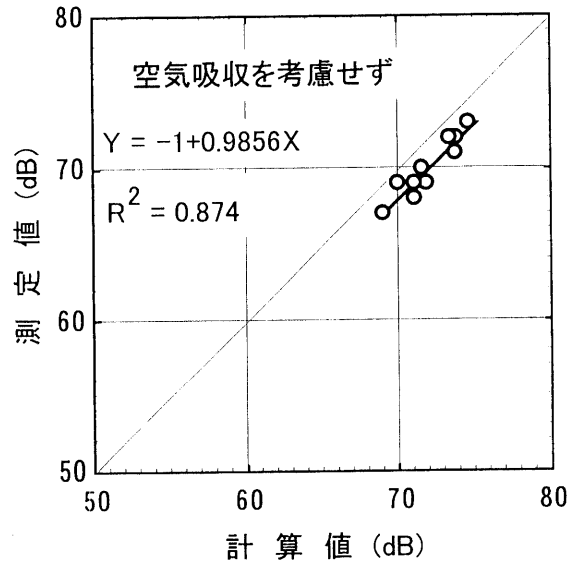
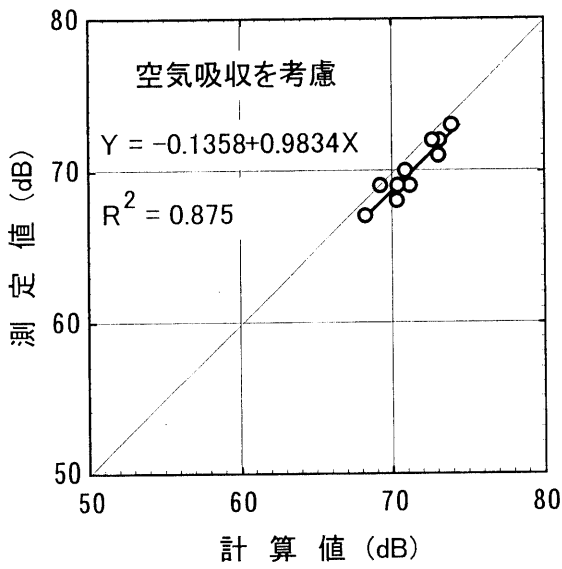
また ASJ RTN-Model 1998 B 法の空気吸収による減衰の補正值 $\Delta L_{A,air}$ の計算式を以下に示す。 ΔL_d と同様、 $\Delta L_{A,air}$ は ISO の空気吸収の計算式をもとに、道路交通騒音のスペクトルを重み付けしてオールパス値で与えられるため周波数の項は含まれない。

$$\Delta L_{A,air} = -0.3452 \left(\frac{R_{XY}}{1000} \right)^3 + 2.011 \left(\frac{R_{XY}}{1000} \right)^2 - 6.840 \left(\frac{R_{XY}}{1000} \right) \quad (6-2-27)$$

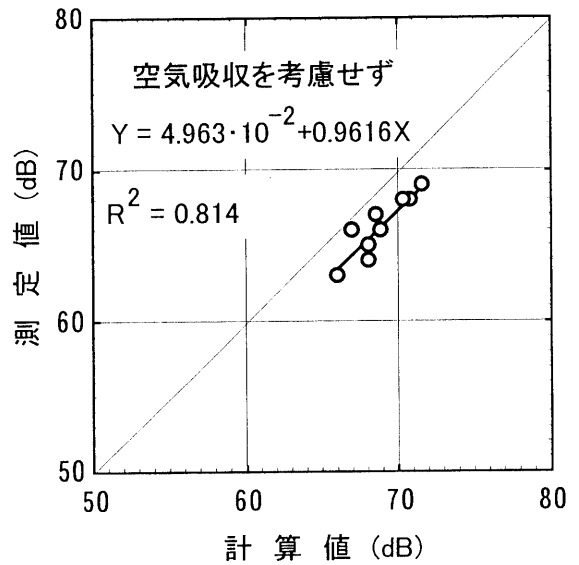
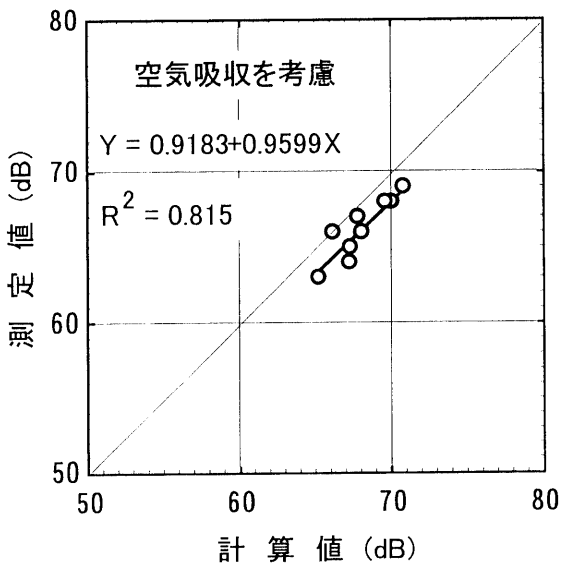
ここで、 R_{XY} は X から Y までの伝搬距離(m)である。

また、高架裏面、平面道路路面、地面共にエネルギー反射率は $\rho=0.98$ とした。

L_{Aeq} の計算値と測定値を比較して図 6-2-14(1)~(2)に示す。空気吸収を考慮したときには計算値の方が測定値よりも $1\sim 4\text{dB}$ 程度大きく、また空気吸収を考慮した方が考慮しない場合よりも 1dB 程度対応がよい。また、反射角が大きくなる測定点 4 ほど測定値と計算値の差が大きくなる傾向にある。

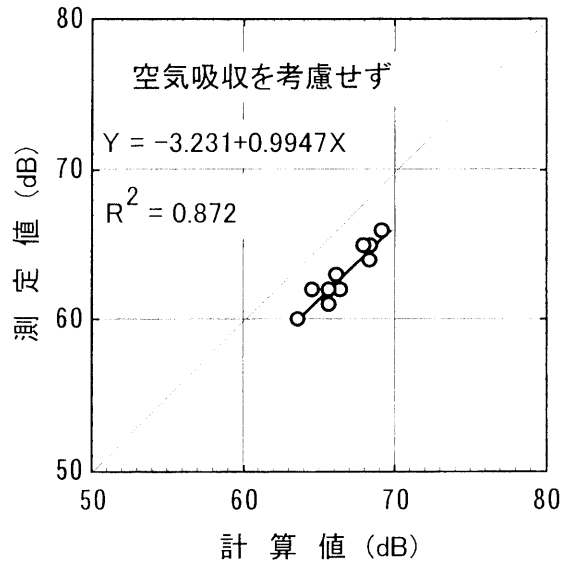
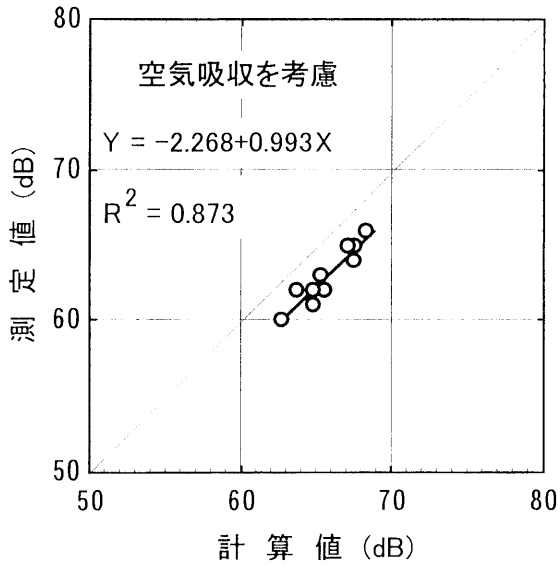


(a). 測定点 1

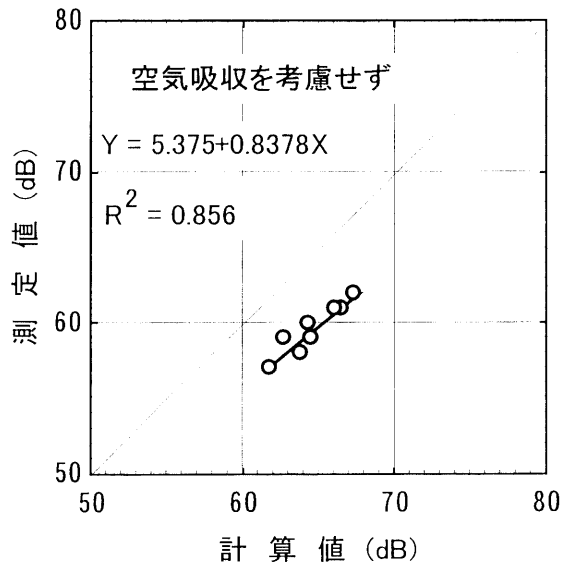
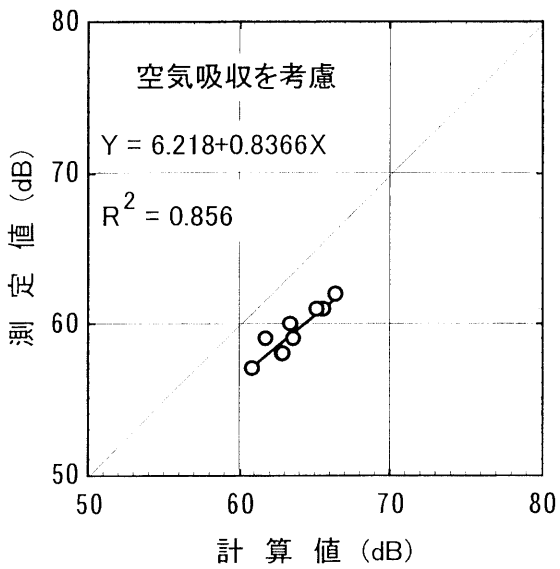


(b). 測定点 2

図 6-2-14(1). L_{Aeq} の計算値と測定値の比較



(c). 測定点3



(d). 測定点4

図 6-2-14(2). L_{Aeq} の計算値と測定値の比較

6. 2. 5 エネルギー積分表示から推測される高架裏面反射音に寄与する要因

下路の道路端に遮音壁が設置されている場合は、高架裏面反射音に対しても遮音壁での遮蔽が考えられる。そのときの微小散乱反射面 σ_j からの反射音のエネルギー密度 $B_{\text{refl}}(P; \hat{\sigma}_j)$ は、式(6-2-25)より次のように表せる。

$$B_{\text{refl}}(P; \hat{\sigma}_j) = B(\hat{\sigma}_j) \cdot (1 - \alpha_{\hat{\sigma}_j}) \cdot \sigma_j \cdot \eta_{\hat{\sigma}_j}^P \quad (6-2-28)$$

$$\eta_{\hat{\sigma}_j}^P = \frac{2 \cos \phi_{\hat{\sigma}_j P} \cdot D_{\hat{\sigma}_j}^P}{2\pi c R_{\hat{\sigma}_j P}^2} \quad (6-2-29)$$

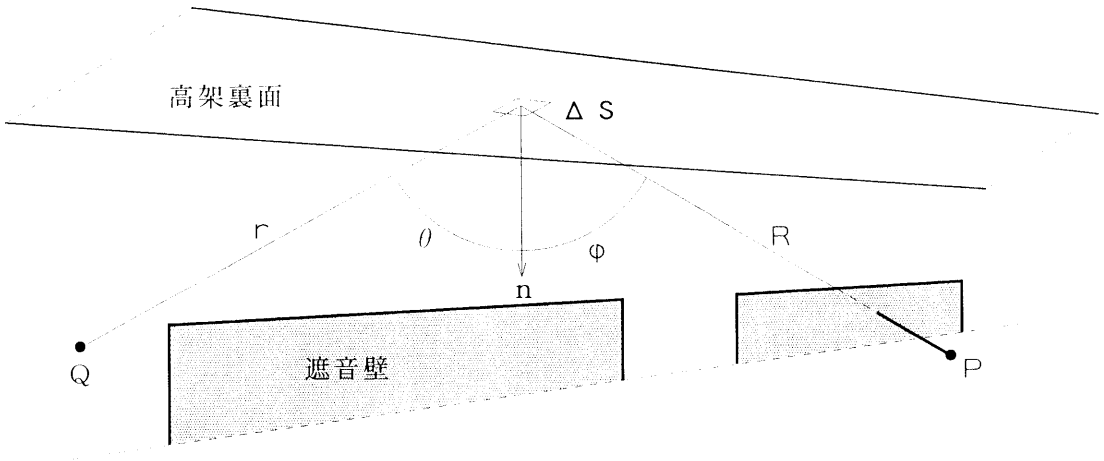
ここで、 $D_{\hat{\sigma}_j}^P$ は反射面 σ_j から伝搬してくる音波に対する障壁の遮蔽効果に関係した係数である。

高架裏面全体からの反射音のエネルギー密度は式(6-2-28)を高架裏面全体 S について積分することにより得られるが、下路の車線が多くて音源が広い範囲に分布しており高架裏面に入射する音響エネルギーは一定で、かつ拡散しており $B(\hat{\sigma}_j) \cdot (1 - \alpha_{\hat{\sigma}_j})$ が一定で \bar{B} で代表できる場合には式(6-2-28)は以下のように置き換えることができる。

$$B_{\text{refl}}(P; \hat{\sigma}_j) = \bar{B} \int_S \frac{\cos \phi_{sP} \cdot D_s^P}{\pi c R_{sP}^2} ds \quad (6-2-30)$$

ここで、被積分項中の $\cos \phi_{sP} \cdot ds / R_{sP}^2$ は観測点から微小反射面 ds を見込む立体角である。 D_s^P は遮蔽量により $0 < D_s^P \leq 1$ の値をとるが、便宜上、図 6-2-15 に示すように、観測点から反射面 ds が見える場合を $D_s^P = 1$ 、見えない場合を $D_s^P = 0$ とする。すなわち、見える場合は遮音壁の効果は無し、見えない場合は反射音は到達しないと仮定する。そのとき、式(6-2-30)の積分は観測点から見える高架裏面を見込む立体角を求めていることになる。したがって、観測点から高架裏面を見込む立体角が大きいほど高架裏面反射音の音圧レベルは大きくなる。

($D_s^P=0$ の場合)



($D_s^P=1$ の場合)

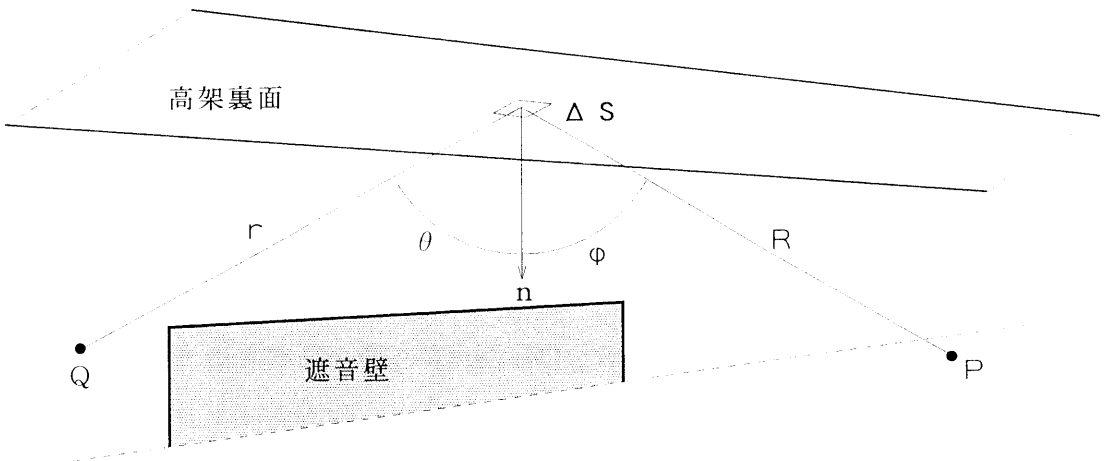


図 6-2-15. 係数 D_s^P の取り方

6. 3 第6章のまとめ

従来の道路交通騒音予測では課題とされていた平面道路上に高架道路が併設された道路での高架裏面反射音のエネルギー計算モデルを検討した。

2次元境界要素法で標準的な高架裏面での反射音のレベル分布を計算した結果、定性的にはI桁裏面や箱桁裏面に入射した音波が広い範囲に乱反射している傾向を示し、音源が高架道路中心軸からずれても音源側に大きな反射音が返ってくることがわかった。幾何学的音線トレースと比較すると、周波数が高くなるほど幾何音響的伝搬に近い反射になっている。この結果を踏まえ、高架裏面の反射特性が *Lambert* の余弦則に従うとし、エネルギーモデルを提案した。モデルの妥当性を検討するために、境界要素法による数値解析結果と比較したところ、散乱反射モデルによる計算結果は広い範囲で境界要素法の計算結果を近似しており、両者の差は5dB以内となることが多かった。また従来、高架裏面反射音の予測に用いられているスリット法による計算値と境界要素法の計算値を比較すると、スリット法が過大となるときで最大10dB、過少となるときで最大20dBの差があった。これらのことから、I桁構造や箱桁構造の場合には高架裏面の反射特性として散乱反射を仮定した計算モデルの方がスリット法よりも妥当であることが示された。

この結果を踏まえ、I桁構造高架裏面を反射特性が *Lambert* の余弦則に従う平坦面と仮定し、境界エネルギー積分法を適用し、高架裏面と地面での多重反射音の予測方法を検討した。計算結果を実際の道路での測定値と比較し、手法の妥当性を検討した。競技用スターターを用いた実験値と比較した結果、境界エネルギー積分法での計算値は測定値に比べ、-1~+6dB大きく、特に反射角が90°に近づく場合には余弦則の反射指向特性の仮定が成り立たず誤差が大きくなったと考えられる。また従来の高架裏面反射音の予測に用いられているスリット法の計算値は測定値に比べ0~+10dB大きく、境界エネルギー積分法と比較すると音源が遠い場合にスリット法の方が大きめに予測する傾向にあり、散乱反射を考えた境界エネルギー積分法の方が測定値との対応はよかった。

道路交通騒音の L_{Aeq} の測定値と境界エネルギー積分法による予測値を比較すると、空気吸収を考慮したときには計算値の方が測定値よりも1~4dB程度大きく、また空気吸収を考慮した方が測定値との対応は1dB程度改善された。また、反射角が大きくなる測定点ほど測定値と計算値の差が大きくなる傾向にあった。

