

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1章 音響放射特性に指向性を持つ音源 の存在

我々の身近に存在する音源のうち、音響放射特性が完全に無指向性な音源となるものは、はたして如何なるものがあるであろうか。実験室実験用機材のスピーカにしても、厳密に無指向性となるものはない。

実験機材ばかりでなく、我々の生活環境を取り巻く騒音源の放射特性にも、指向性があるとみなされるものばかりであろう。例えば、自動車走行騒音に関して日本自動車研究所や阪神道路公団を中心としたグループが指向性を調査している。また、工場騒音に関して模型による実験を行い、その指向特性を把握している。本章では、これら指向性音源の例について述べる。

1.1 道路交通騒音 –水平方向に強い指向特性をもつ音源の例–

1.1.1 自動車研究所・阪神道路公団による調査報告例

押野ら [11] は、走行中の自動車の進行方向に垂直な面における指向特性について、さらに筑井ら [12] は3次元的な指向特性を明らかにしている。これらは、日本自動車研究所のテストコースに門構えのゲートを設置し、マイクロホンを複数個取り付けたそのゲートを走行速度 40km/h 前後で通過する乗用車、小型貨物車、大型車の音圧レベルを 50ms 間隔で計測したものである。

ゲート状に測定した音圧レベルを指向特性のデータ、すなわち半球面状のものに換算する手段は次に示すものである。門構えの各マイクロホン位置での音圧レベルを求め、騒音源を車両中心高さ 0 m 位置にある無指向性音源とみなす。また距離減衰に関しては Pachiaudi[10] と同様に半自由空間を伝搬する際の $20 \log_{10} r$ を仮定することにより、車両中心高さ 0 m 位置から 7.5 m の半球面上の音圧レベルに補正するという手段である。このように測定データを補正することにより、定常走行のタイヤ・路面騒音のレベル分布は左右対称であり、車両上方の音圧レベルが他の放射方向のレベルに比べて低いことが判った。特に、進行方向に垂直な面でみると、車両真上と路面近傍との音圧レベル差は 9~12dB 程度あり、従来から考えられてきたように自動車走行騒音は水平方向に強い指向性を持つことが明らかとなった。

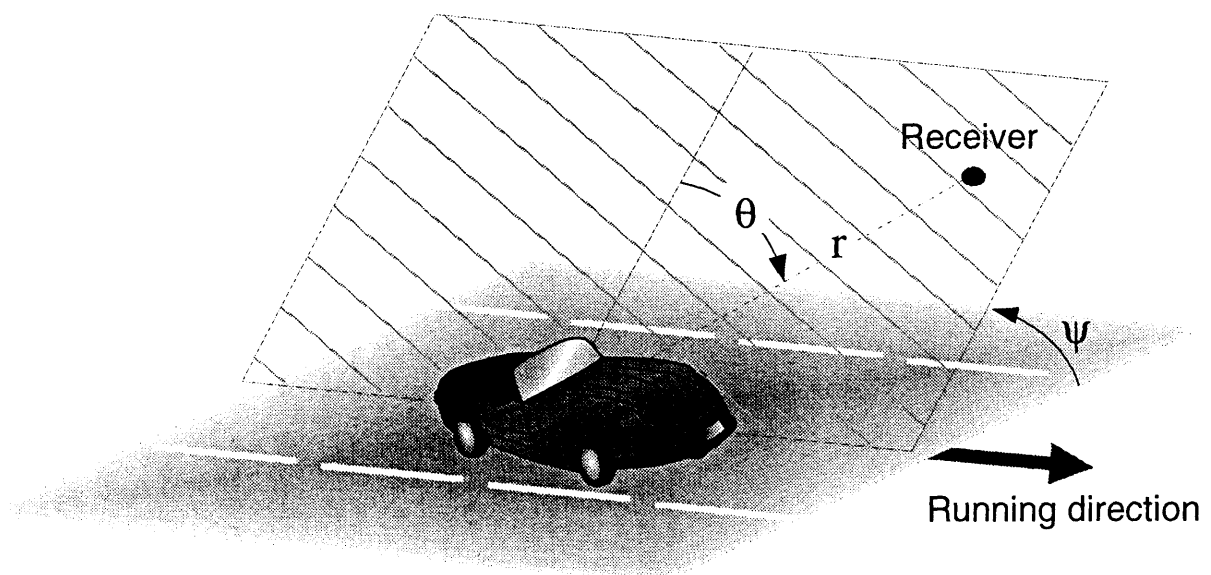


Fig. 1.1 走行中の自動車の指向特性表現のための座標系

更に、筑井ら [12] は回帰分析を用いて、車両周辺の音圧レベルの表現も試みている。走行車両の指向性を表すための座標系は、**Fig. 1.1** に示すような移動座標系 [16] を適用している。大量のデータを統計処理することにより、次式で表される受音点での音圧レベル $L_P(r, \theta, \psi)$ の算出式を得ている。

$$L_P(r, \theta, \psi) = L'_P(r) + \Delta L_P(\theta, \psi) \quad (1.1)$$

r : 車両中心高さ 0 m 位置から受音点までの距離

θ : 前後方向の音響放射角度

ψ : 進行方向に垂直な面における、鉛直方向から見た音響放射角度 (1.2)

ここで、(1.1) 式右辺第 1 項の $L'_P(r)$ は、車両を無指向性音源とみなしたときの距離 r における音圧レベルに相当しており、 θ にも ψ にも依存していない。これに対し、右辺第 2 項を指向特性を表す項とし、次式により回帰表現している。

$$\begin{aligned} \Delta L_P(\theta, \psi) = & a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2 + a_3\theta^3 + a_4\theta^4 + a_5\psi \\ & + a_6\psi\theta + a_7\psi\theta^2 + a_8\psi\theta^3 + a_9\psi\theta^4 \end{aligned} \quad (1.3)$$

a_0, \dots, a_9 : Regression coefficient[12]

ここで、250 Hz, 500 Hz, 1k Hz, 2k Hz, 4k Hz およびオーバーオールにおける (1.3) 式による重相関係数は 0.9 前後という高い数値を示しており、走行車両の指向特性は (1.3) 式により、表現されることとなる。(1.3) 式をグラフで表示したのが、**Fig. 1.2** と **Fig. 1.3** であり、500 Hz, 1k Hz, 2k Hz およびオーバーオールでの乗用車と大型車の指向特性を示している。 θ を固定してグラフをみると全ての周波数域において ψ の値が大きいくほど音圧レベルが小さくなる、すなわち上方向になるほど指向性が弱くなることがわかる。定常走行している自動車の音源位置が車輪と路面の摩擦が生じる位置であるため、音源からの上方向の放射がボディにより遮られる。このため、上方向の指向性が弱いことは従来から考えられてはいた。筑井らにより、自動車の放射する騒音は単に上方向の指向性が弱いというだけでなく、鉛直から水平方向になるにつれ強くなる指向性を持つこと、また、その指向性の強度まで明らかとなった。

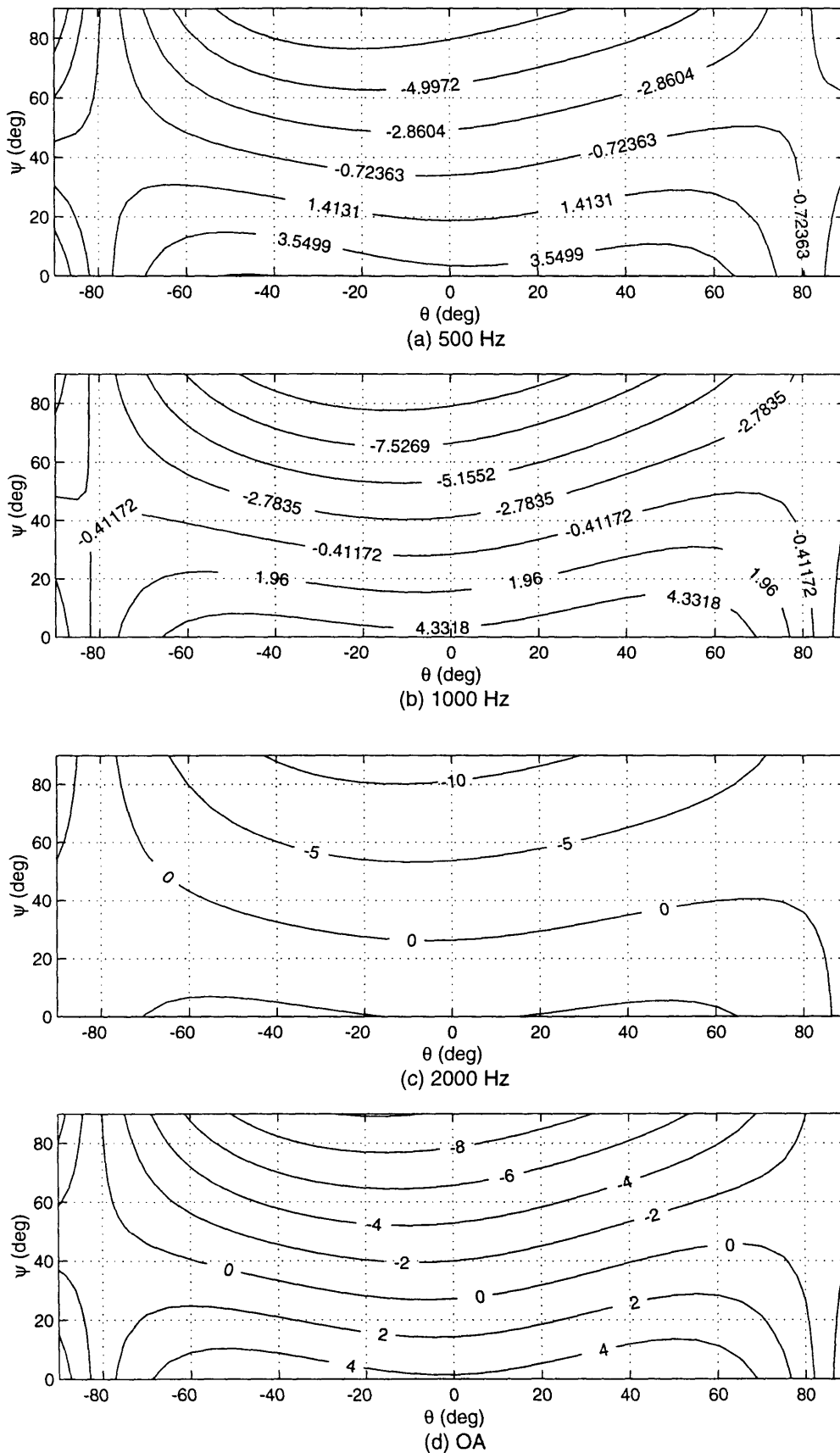


Fig. 1.2 大型車の指向特性 -筑井ら [12] による調査結果-

1.1. 道路交通騒音 -水平方向に強い指向特性をもつ音源の例-

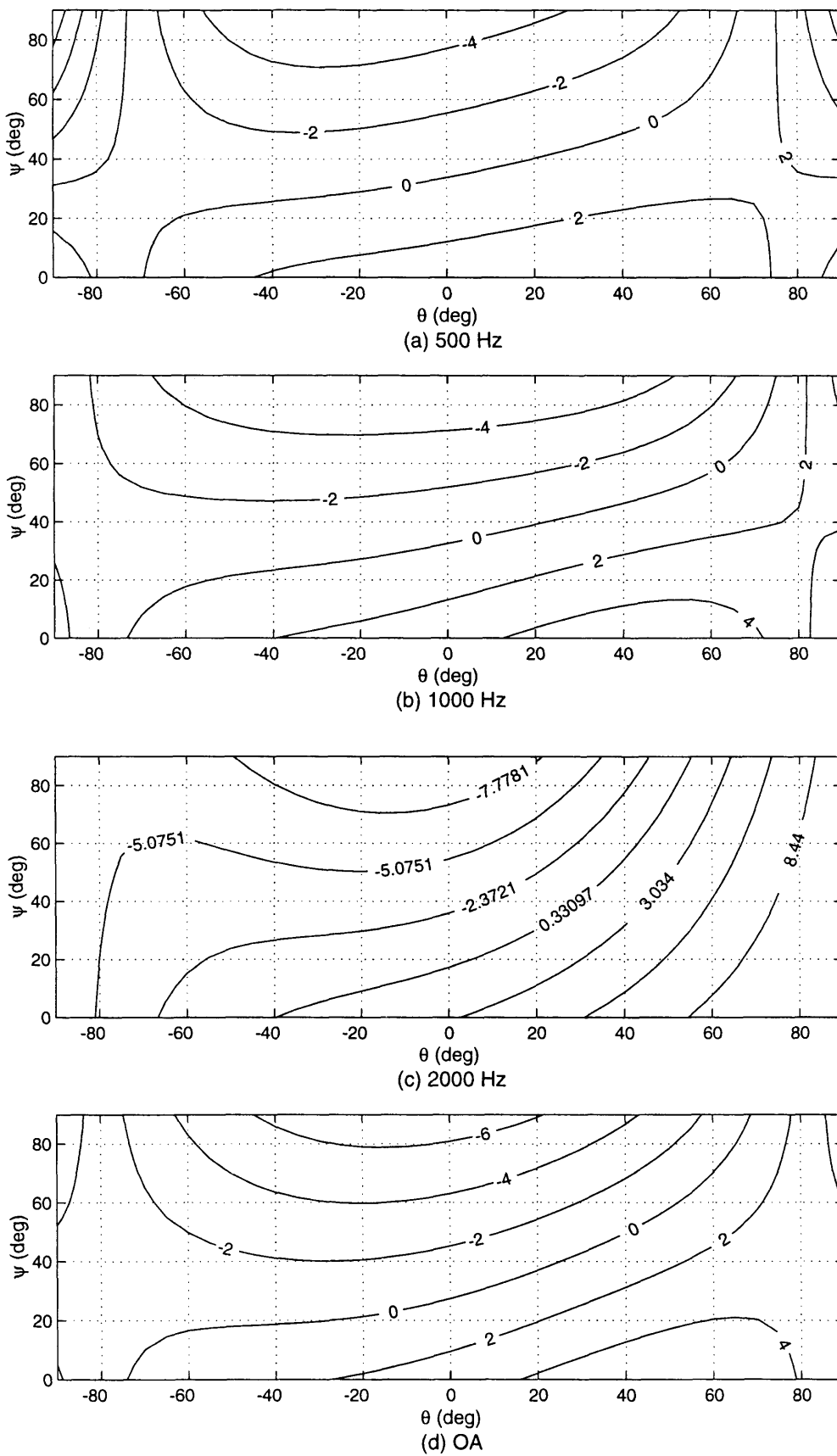


Fig. 1.3 乗用車の指向特性 -筑井ら [12] による調査結果-

また、テストコースを走行している自動車ではなく、一般道を走行している任意の自動車の指向特性を調査した報告例もある。福島ら [17] が車両の走行速度が 90 km/h 前後という自動車専用道路である阪神道路 7 号北神戸線において、やはり門構えに設置したゲートにマイクロホンを複数個取り付けて指向性を調査している。筑井らと同様に調査データを半球面状の音圧レベルに補正した後 (1.3) 式により回帰し、指向特性を近似している。しかし、福島らの結果では、重相関係数がオーバーオールで 0.5 前後と低くなっていた。この理由に関しては検討はなされていないが、94 台の計測数という程度であり、統計処理の母集団としてのサンプル数が少ないために、重相関係数が低めになったと推測される。Fig. 1.4 にはオーバーオールでの乗用車と大型車の指向特性を示している。

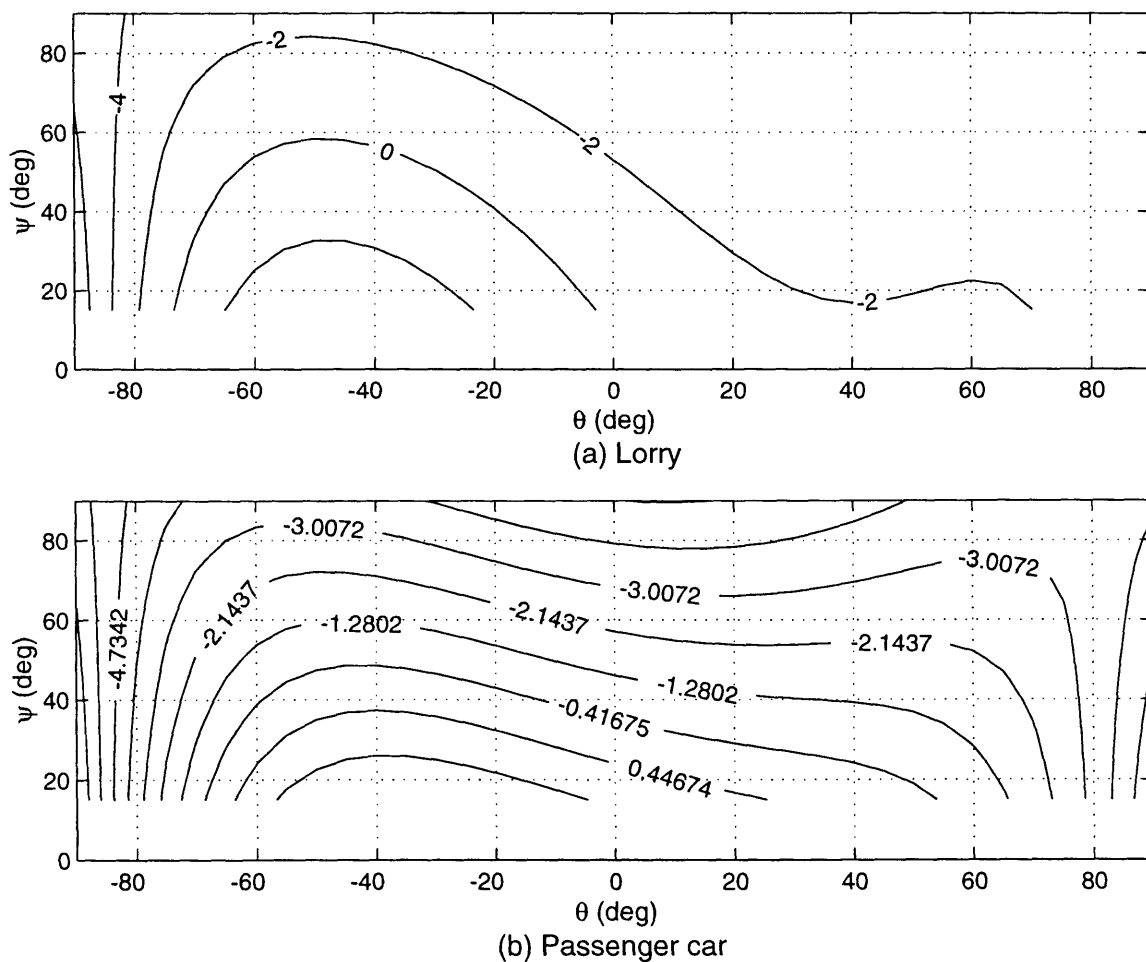


Fig. 1.4 自動車の指向特性 (OA) -福島ら [17] による調査結果-

福島らは、更に各マイクロホン位置でのユニットパターンを用いて、線音源 (非干渉性点音源列) と見なしたときの音圧レベルをも推定し、線音源としての指向特性を検討している。その結果、次式で表せる受音点での音圧レベルの算出式を得ている。

$$L_P(r, \psi) = L'_P(r) + \Delta L_P(\psi) \quad (1.4)$$

ここで、(1.4) 式右辺第 1 項は車両を無指向性音源とみなしたときの距離 r における音圧レベルであり、第 2 項を指向特性を表す項とし次式により回帰表現している。

$$\Delta L_P(\psi) = b_0 + b_1\psi + b_2\psi^2 + b_3\psi^3 \quad (1.5)$$

b_0, \dots, b_3 : Regression coefficient[17]

Fig. 1.5 には、乗用車と大型車に関して線音源と見なしたことの指向特性を示す。水平方向に強い指向性が現れているのが明確に見てとれる。

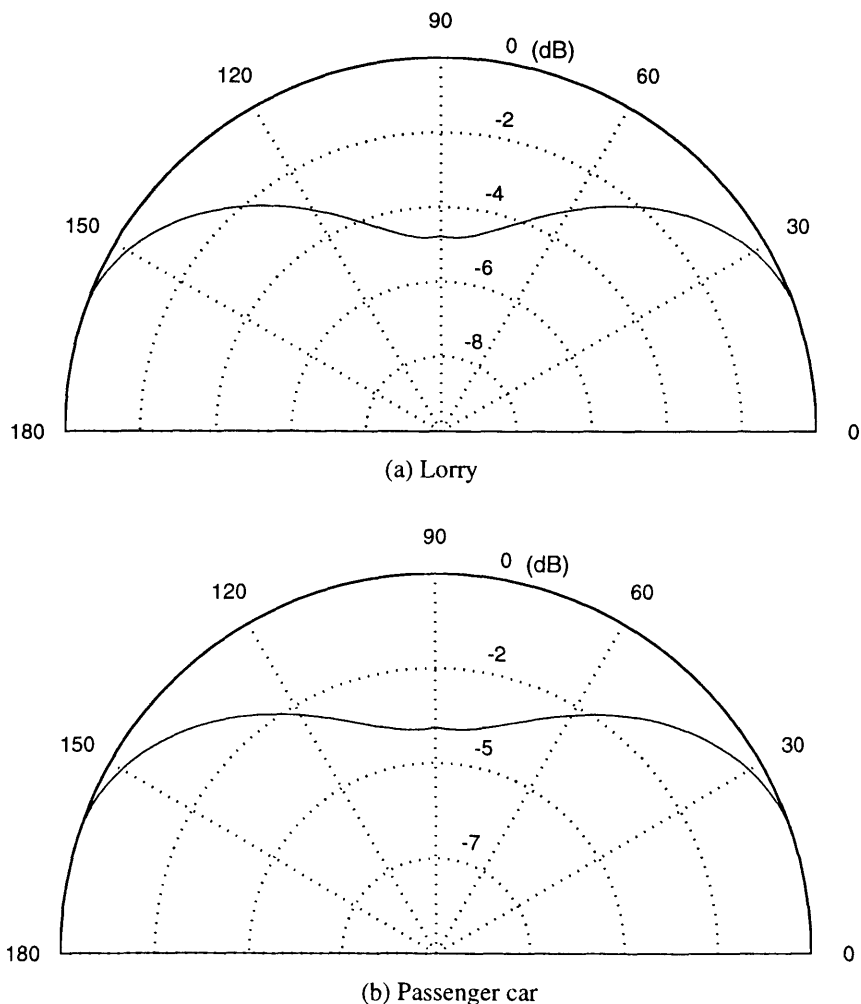


Fig. 1.5 自動車点を点音源列とみなしたときの二次元的な指向特性 –福島ら [17] による–

以上示した2件の調査結果は、いずれも、1998年から1999年にかけて報告されたものである。定常走行中の自動車の放射する騒音が進行方向の断面で見ると水平方向に強い指向性を示すことは、今や、広く認められる調査結果となった。しかし、以下に示すような問題点もある。

まず、第1点目の問題点。門構えのゲートにおける音圧レベルを、障害物のない半自由空間における減衰量 $20 \log_{10} r$ を用いて、車両中心高さ0 m位置から7.5 mの半球面上に換算する方法は近似であり、車両中心高さ0 mを音源とすること、また、半自由空間における距離減衰を適用することに、どの程度の精度があるのかは検討されていない

次に、第2点目の問題点。3次元の指向性を表す(1.1)式によると、指向特性を表す $\Delta L_P(\theta, \psi)$ は音源からの距離に依存しないということを仮定している。しかし、自動車ボディの近接空間に位置する領域においては、よほどの低周波音でない限り、指向特性が音源からの距離に関わらず一様とは考えにくい。従って、指向性が安定するような遠方音場を仮定している回帰式である(1.1)式は、門構えのゲートにおける測定データをもとにしているため、ゲートに近い半球面上では精度の高い表現となつてはいるが、ゲートから離れた半球面上における適用の保証はない。このことは、福島らの線音源とみなした場合の指向特性に関しても、同様に当てはまり、(1.5)式の適用範囲は限定があるものと思われる。

これら問題点を要約すると、門構えのゲートの音圧データを半球面上のデータをする手法と、指向特性が音源からの距離に関わらず一様としている点に問題がある。門構えのゲートではなく、幾通りかの半径の半円状のゲートを用いて測定するなどの方法により、正確な指向特性のデータが得られることが望まれる。

1.1.2 数値計算による自動車騒音指向特性の把握

自動車から放射される騒音を、右側と左側にある車輪から放射されるとものと考え、二次元音場のもと右輪・左輪をそれぞれ無指向性の線音源と見なす。2つの線音源は位相的にランダムな非干渉性であるとして、自動車ボディ周辺の指向特性を解析する手法を考えた。

まず、2つの音源を地面に接して置く。トラックを想定し、2つの音源を距離にして2.5 m 離れたとき、如何なる指向性を生じるかを見る。1000 Hz において、2つの音源による音圧レベルのエネルギー和をとった分布図を Fig. 1.6 に示している。2つの音源の中心から半径5 m あたりまで、水平方向に強い指向性が見られる。しかし、指向性の強度としては弱いもので、前節で示した自動車走行騒音の指向性の実態とは似ていない。

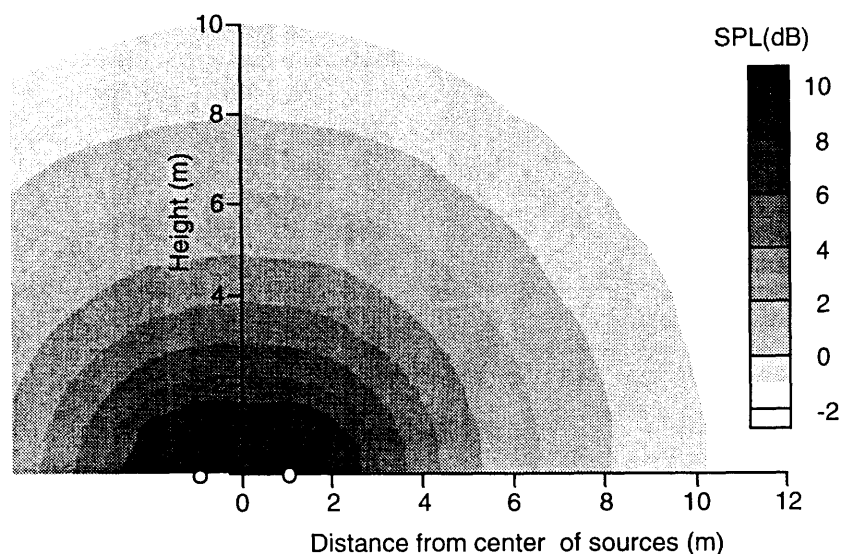


Fig. 1.6 半自由空間上の線音源のエネルギー加算による指向性

次に現状をもっと正確に模擬するため、自動車騒音が主な発生源であるタイヤの上にボディが載っている状態で放射されていることを簡略化することを考えた。Fig. 1.7 に示すように、音源の上に一般乗用車のボディに相当する剛な方形を置く。そして、右輪と左輪からの音圧を二次元境界要素法* を用いて計算し、エネルギー的に加算する操作を行った。Fig. 1.8 に、2つの音源の中点を中心とした同心円上での指向性を示す。周波数が500 Hz のときには、ボディに近いほど指向性は水平方向に強くなる傾向が見られる。ボディから十分離れた半径28 m の円周上では弱まっているものの、まだ水平方向に強い指向性は存在している。一方、2000 Hz のときは、ボディ断面形状に比べて波長が短いので回折傾向が弱まり、指向特性は更に水平方向に強いものと

* 境界要素法の計算手法については、付録 A で詳細に述べる。

なっている。

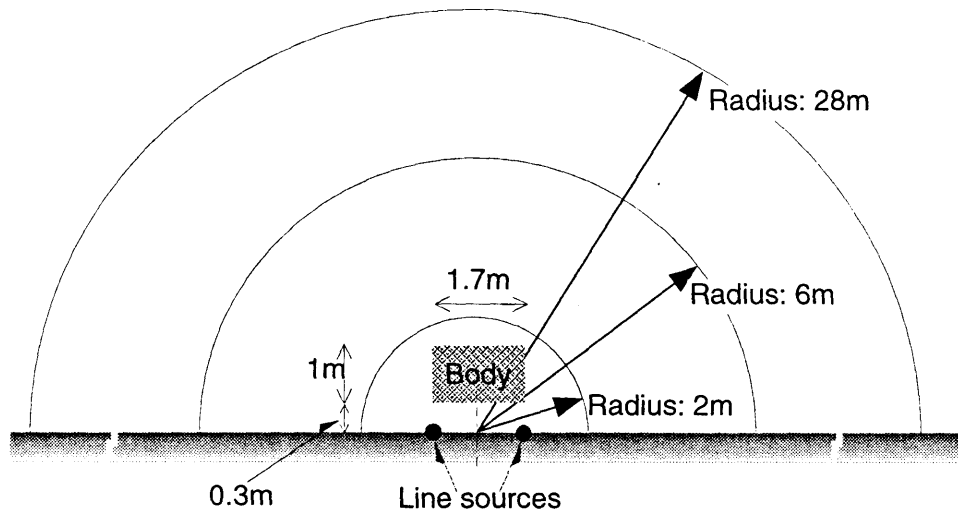


Fig. 1.7 自動車相当ボディサイズと指向性の受音領域

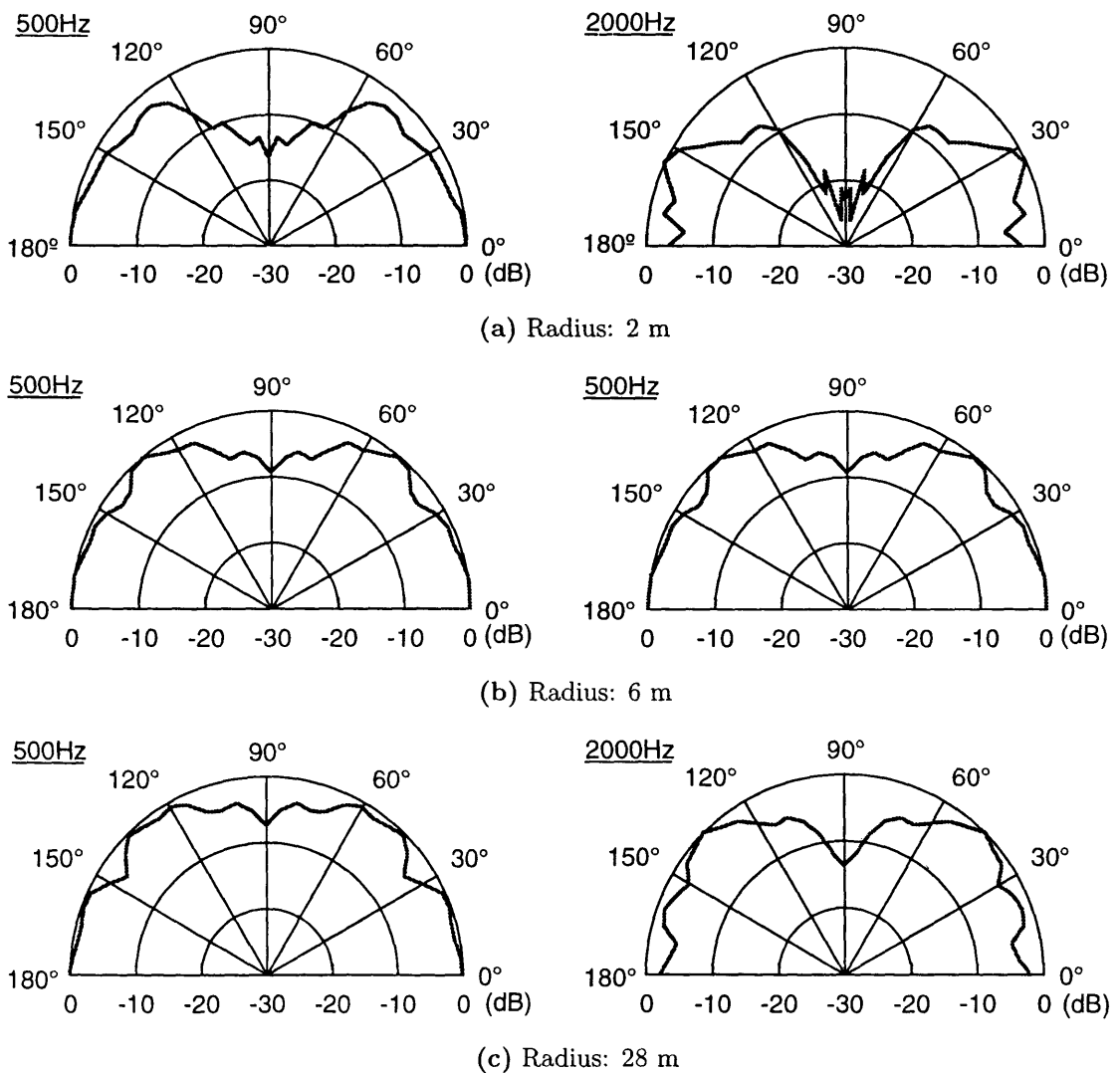


Fig. 1.8 乗用車サイズのボディ存在時の指向特性

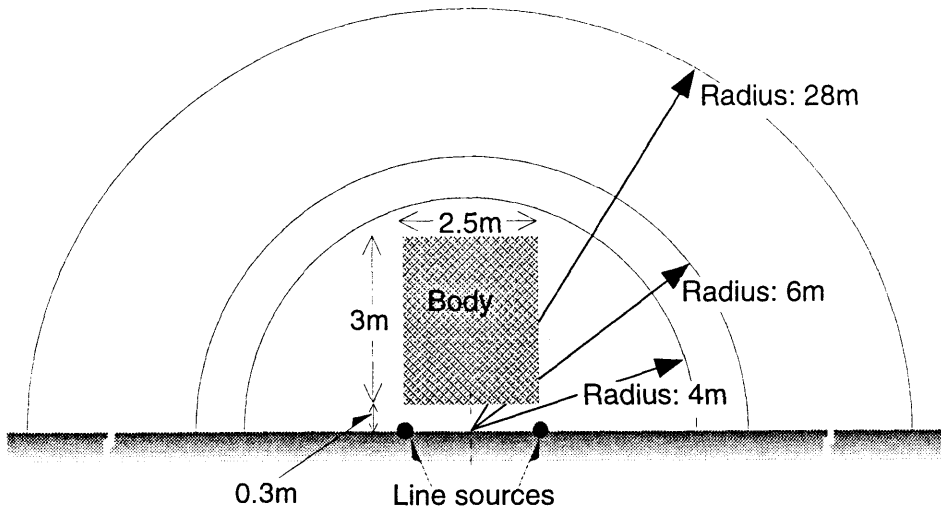


Fig. 1.9 大型トラック相当ボディサイズと指向性の受音領域

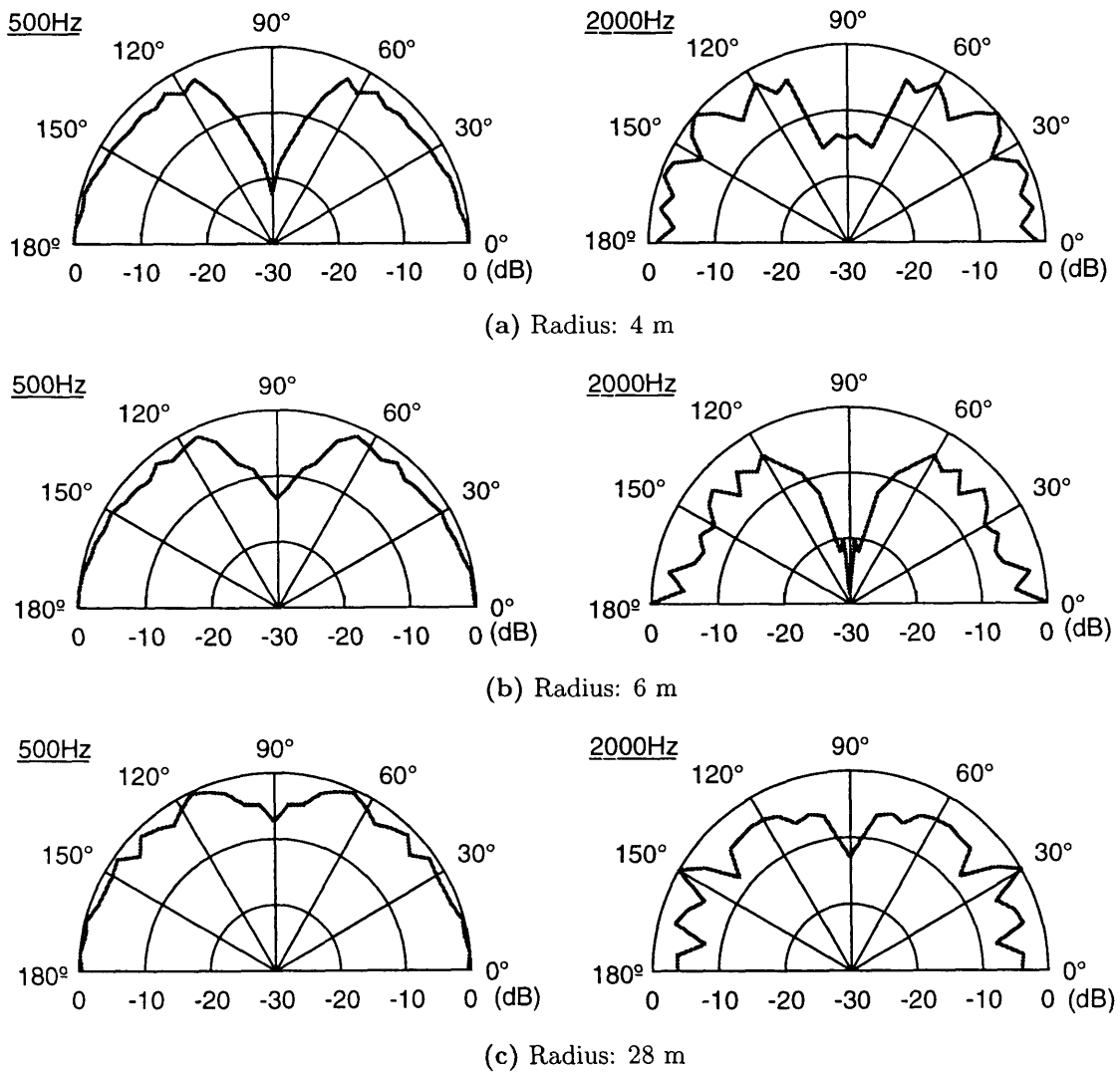


Fig. 1.10 大型トラックサイズのボディ存在時の指向特性

更に、Fig. 1.9に示すように、音源の上にトラックのボディを簡略化した剛な大きな方形を配置する場合の計算を行った。Fig. 1.10に、その指向性を示す。ボディ近傍では指向性は乗用車サイズの場合に比べて強くなっているが、ボディから十分離れた28 m円周上ではトラックサイズと乗用車サイズの図を比べても指向性にはほとんど違いは現れていない。しかし、500 Hzで見ると指向性は距離によって弱くなる傾向が見られ、距離によって指向性の強さが大きく変わっている。一方、2000 Hzではそのような距離によって指向性の強度が変わるような傾向は見られない。従って、指向性の強度は、ボディ形状と波長とのバランスで決定され、距離に関する単純な関数としては表現できてはいない。

ここで示している数値解析による指向特性と、先に1.1.1節で述べた調査報告による指向特性とが異なっている。この原因としては、数値解析によると二次元的な指向性を捉えたために、自動車ボディの3次元的な形状から生ずる音波の回折現象を正確に再現することはできていなかったためと考えられる。しかし、音源の上に方形のボディが存在する場合には、水平方向に強い指向性が明確に再現されており、現象を簡略なモデルとして捉える手法としては有効であり、二次元モデルであるため計算スピードの面でも効率的である。

以上のように、自動車から放射される騒音は、進行方向の断面で見ると、水平方向に強く、鉛直方向になるにつれ弱くなるという指向特性を持つことがわかった。実測によるデータは、門構えの1つのゲートに設置したマイクロホンのデータを、指向性が安定するという遠方音場の仮定のもとに補正したものであり、指向特性の距離変化の現象をまだ捉えるに至っていない。しかし、ゲート付近の半球上の指向特性に関しては、高い信頼性はある。これから、ゲート付近だけでなく様々な距離のデータを測定した上で、近接音場・遠方音場という切り分けのもとデータを蓄積してゆくことが望ましい。境界要素法による検討に関しても、複数の自動車が頻繁に行き交う状況では、点音源列の仮定は現実からそうかけ離れてはいない。しかし、形状に関してはあまりに簡略化している。自動車の形状をなるべく忠実に三次元として再現したうえで、4つの車輪からの寄与をエネルギー加算することによれば、更に良い結果が得られる可能性がある。しかし、1.1.1節に示した福島らによる実測に基づく7.5 m半円周上の指向性(Fig. 1.5)と二次元境界要素法による6 m半円上の指向性(Fig. 1.8, Fig. 1.10)を対比すると、前者に比べ後者は90°近くになり音圧レベルが急速に低下する傾向がみられる。しかし、大まか形状には相応があり、二次元による簡易モデルでも、現状の大まかな把握は可能であると考えている。

1.2 工場建屋透過音 –鉛直方向に強い指向特性をもつ音源の例–

自動車騒音に続き、工場騒音の指向特性の把握も試みた。

工場建屋の外壁材を考えると、側壁面が厚い壁で、屋根面がそれに比べて薄い素材で構成されることが一般的である。このような建造物内部で発生した騒音は、建造物の外壁を透過して外部へと伝搬されることとなる。構造的に考えると強度の大きな側壁材に比べて強度の小さい屋根材の透過損失は小さいため、側壁より屋根から放出される騒音の音響パワーのほうが大きくなる。そこで、屋根方向、つまり鉛直方向に強い指向特性が現れると考えられる。屋根面や側壁面は一樣な素材で構成されているとは限らないが、複数の材料の透過損失を考慮した総合透過損失を適用すればよい。工場建屋などの騒音制御の対象となる建造物では、家屋などに比べて窓面の占める面積は小さい。また、屋根面に空気交換のためのモニターを設置して、屋根面のほうが総合透過損失が小さくなるような構造になっているものが多い。

このような、現状を踏まえたうえで、工場建屋のスケールモデルを作成し、指向性の測定をおこなった。Fig. 1.11 の写真に示すような、実寸にして側壁高さ 5 m、屋根片側長さ 5 m、長さ 40 m、屋根は水平面から 30° 傾いている形状の 1/10 縮尺モデルを作成した。音源としては、5 個のツイータをモデルの内部においた。内部音場でのエネルギーが、均一化されるようにツイータは等間隔に配置した。

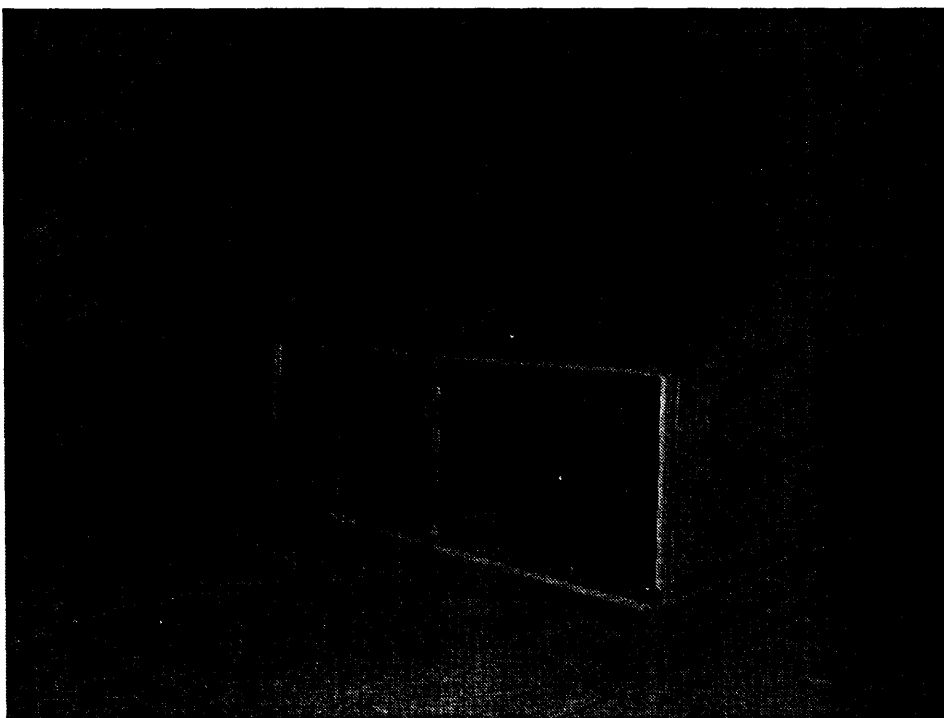


Fig. 1.11 工場建屋モデルの 1/10 縮尺模型.

1.2 工場建屋透過音 –鉛直方向に強い指向特性をもつ音源の例–

自動車騒音に続き、工場騒音の指向特性の把握も試みた。

工場建屋の外壁材を考えると、側壁面が厚い壁で、屋根面がそれに比べて薄い素材で構成されることが一般的である。このような建造物内部で発生した騒音は、建造物の外壁を透過して外部へと伝搬されることとなる。構造的に考えると強度の大きな側壁材に比べて強度の小さい屋根材の透過損失は小さいため、側壁より屋根から放出される騒音の音響パワーのほうが大きくなる。そこで、屋根方向、つまり鉛直方向に強い指向特性が現れると考えられる。屋根面や側壁面は一樣な素材で構成されているとは限らないが、複数の材料の透過損失を考慮した総合透過損失を適用すればよい。工場建屋などの騒音制御の対象となる建造物では、家屋などに比べて窓面の占める面積は小さい。また、屋根面に空気交換のためのモニターを設置して、屋根面のほうが総合透過損失が小さくなるような構造になっているものが多い。

このような、現状を踏まえたうえで、工場建屋のスケールモデルを作成し、指向性の測定をおこなった。Fig. 1.11 の写真に示すような、実寸にして側壁高さ 5 m、屋根片側長さ 5 m、長さ 40 m、屋根は水平面から 30° 傾いている形状の 1/10 縮尺モデルを作成した。音源としては、5 個のツイーターをモデルの内部においた。内部音場でのエネルギーが、均一化されるようにツイーターは等間隔に配置した。

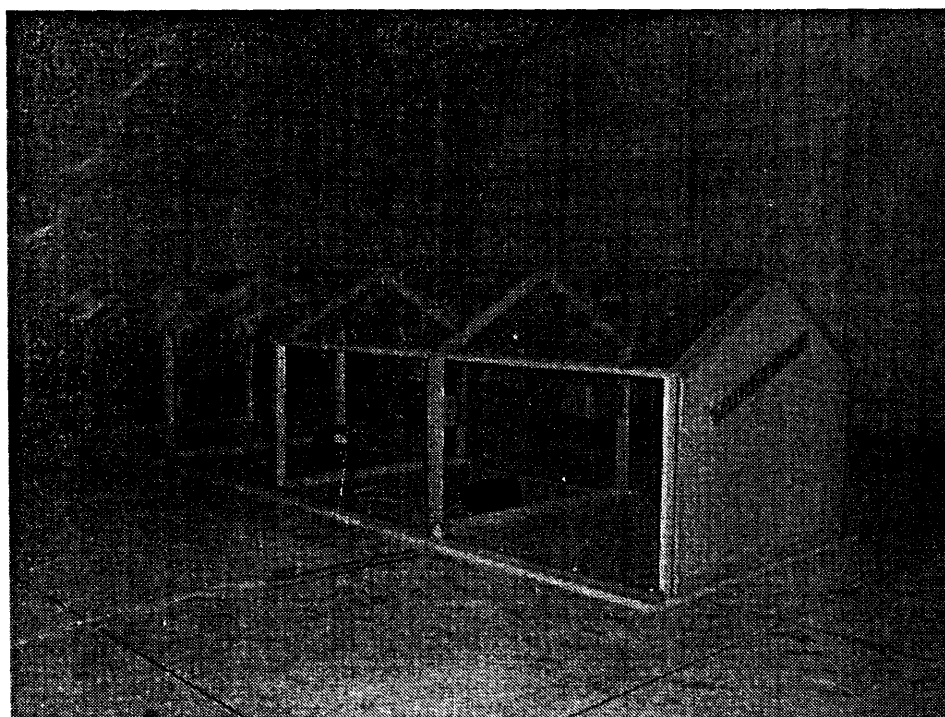


Fig. 1.11 工場建屋モデルの 1/10 縮尺模型。

内部音場の拡散性を高めるために、アンプからツイータへの出力に際して、+極と-極をランダムに接続し、その上、内部に鉄板を折り曲げて作った拡散板を多数配備した。

屋根にはアクリル1mm厚、側壁にはアクリル2mm厚を用いた。従って、垂直入射の仮定のもとでの透過損失は、屋根の方が6 dB小さくなる。1/3オクターブバンドレベルで周波数500 Hzと1000 Hzにおける指向性の測定結果を Fig. 1.12 に示す。実寸にして、模型の中心断面から半径10 m および15 m の半円状での指向性である。周波数1000 Hz、半径15 m の場合は無指向性に近い状態となっているが、他の場合は鉛直方向に強い指向性が見られている。このように、工場建屋からの透過音の指向性が鉛直方向に強いものであることが、模型実験から明らかとなった[†]。

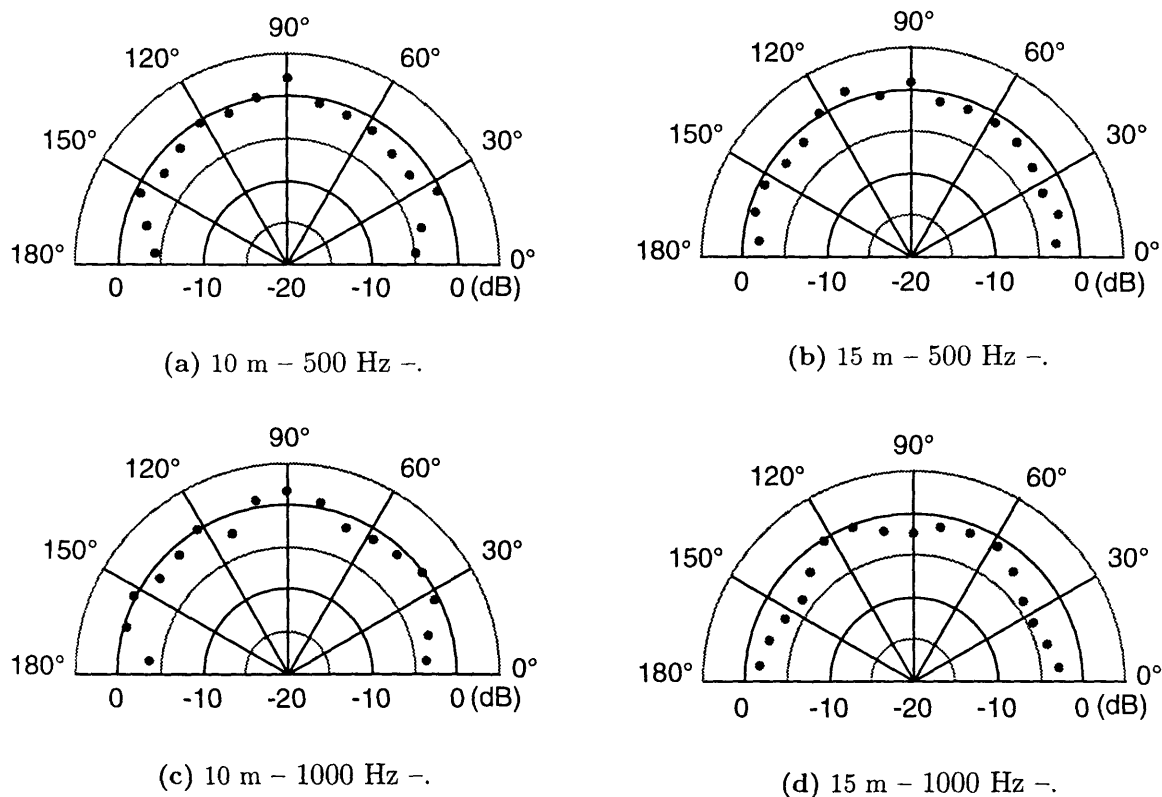


Fig. 1.12 透過音の指向性 -実寸-.

[†] 工場建屋の模型実験については4.4節や5.2.1節でまた述べる機会があり、工場建屋透過音の指向性に関する検討はそこで行う。

1.3 まとめ

道路交通騒音の音響放射は、水平方向に強い指向特性を持つ。そして、この傾向は乗用車よりもトラックなどの大型車において顕著となる調査結果を示した。一方、工場建屋の模型実験をおこない、側壁よりも屋根の透過率が小さい場一般的な構造の工場から放射される透過音は、鉛直方向に強い指向特性を持つことを明らかとした。

実際に、防音壁の挿入損失が指向性音源によるものと無指向性音源の仮定のもとで計算した数値とは異なるものとなることは簡単に確認できる [21]。この点に関する詳しい解説は第3章や第5章に譲るとして、自動車走行騒音や工場騒音の指向特性が明らかになった今、その指向性を正しく考慮し組み込んだうえで、防音壁の遮音効果の算定手法が必要である。この後、2章から5章にわたって指向性音源に対する防音壁の挿入損失の算定手法から問題点等を述べてゆく。