

2004 年度 修 士 論 文

道路交通騒音伝搬における遮音壁先端部の減衰効果の数値予測

Numerical prediction of the additional attenuation values

due to the tops of edge modified barriers

in propagation of road traffic noise

高村 紀行

Takamura, Noriyuki

東京大学大学院新領域創成科学研究科

環境学専攻 社会文化環境コース



# 目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	2
1.3	論文の構成	2
第2章	道路交通騒音の数値予測法	5
2.1	はじめに	5
2.2	道路交通騒音の予測計算法	6
2.2.1	予測計算の原理	6
2.2.2	伝搬計算の概要	7
2.3	音場の基礎方程式	7
2.4	境界要素法による音場の定式化	8
2.4.1	音場の境界条件	8
2.4.2	Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式に基づくマトリクス方程式の導出	9
2.4.3	局所座標への変換	12
2.5	高速多重極境界要素法による音場の定式化	13
2.5.1	高速多重極アルゴリズムの導入	13
2.5.2	影響関数の定式化	15
2.6	まとめ	16
第3章	FMBEM の遮音壁解析への適用に関する検討	17
3.1	はじめに	17
3.2	FMBEM 解析の効率化に関する検討	17
3.2.1	解析手法	17
3.2.2	結果と考察	19
3.3	FMBEM 解析の精度確保に関する検討	22
3.3.1	解析手法	22
3.3.2	結果と考察	22

3.4	まとめ	27
第4章	回折減衰量の算出の妥当性についての検討	29
4.1	はじめに	29
4.2	縮尺模型実験との精度比較	29
4.2.1	解析手法	29
4.2.2	結果と考察	31
4.3	側方回折波の影響を抑制するために必要な壁長さに関する検討	38
4.3.1	解析手法	38
4.3.2	結果と考察	39
4.4	まとめ	44
第5章	減衰補正量の数値予測に関する検討	45
5.1	はじめに	45
5.2	解析手法	45
5.3	結果と考察	47
5.3.1	解析減衰量の挙動の把握	47
5.3.2	減衰補正量の挙動の把握	54
5.3.3	減衰補正量の指向性に関する考察	61
5.4	まとめ	68
第6章	総括	69

参考文献

謝辞

付録 A 修士論文要旨

付録 B 学会発表論文

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究の背景

幹線道路，高速道路における自動車騒音については，近年住民運動や訴訟問題が発生したことから重要な社会問題として取り上げられるようになり，その重要性が認識されて来てはいるが，モータリゼーションの普及等に伴い，今後ますます大きな課題となることが予想される。

このような道路交通騒音問題への対策法は，騒音の発生源に対する低騒音化や，排水性舗装による伝搬対策，高架裏面あるいは掘割道路側面を吸音することによる反射対策，建物の遮音・防音性能の向上など様々だが，最も一般的なものとして遮音壁が挙げられる。道路用遮音壁は 1970 年頃から多用されるようになり，騒音の程度に応じて 8m にも及ぶ巨大なものも設置されるようになってきている。しかし，このような遮音壁の巨大化は，建設費用の増大や眺望の悪化，日照障害など，各種の弊害を引き起こすことから，近年では先端形状や音響特性を工夫することでより大きな減衰効果を得る，いわゆる先端改良型遮音壁の研究が盛んに進められるようになり [1, 2, 3, 8, 14, 18]，一部は実用化に至っている [10, 13, 19]。

一方，「環境基本法」や「環境影響評価法」，「騒音に係る環境基準」等，環境行政面での大きな変化を背景として  $L_{Aeq}$  に基づく道路交通騒音の評価並びに予測手法の重要性が高まったことから  $L_{Aeq}$  を評価量としたエネルギーベースの道路交通騒音予測モデルである ASJ Model 1998 が日本音響学会により発表された。その後，予測計算の精緻化，予測精度の向上を目指して調査研究が進められ，2004 年には ASJ RTN-Model 2003 [11] が発表され今日に至っている。この予測計算法は，一般道路，道路特殊部も含めて，ほとんどすべての構造・形態の道路を対象としており，現在我が国における道路交通騒音の予測に広く用いられている「道路環境影響評価の技術手法」 [7, 15] においても全面的に採用されている。

この ASJ RTN-Model 2003 において先端改良型遮音壁を取り扱う場合には，先端部装置による付加的減衰効果（以下，減衰補正量）を求める必要がある [11]。実用化されている 5 種類の先端形状に関しては，減衰補正量がチャートとして整理され

ていることから簡便に伝搬計算を行なうことが可能であるが、その他の形状に関してはまず減衰補正量を予測する必要がある。現状では、この予測は縮尺模型実験で行なわれているが [9]、モデルが必然的に巨大となりコストがかかる上、設定変更への対応も容易ではないなど、問題点も多い。

一方、数値解析は任意形状に対応可能、パラメトリックスタディが容易に行なえるなど多くの利点を有している。後述するように、ASJ R1N-Model 2003 における伝搬計算の基本は、ユニットパターンと呼ばれる移動音源に対する音圧の時刻暦を求めることであり、移動音源に対する伝搬性状が計算可能な3次元数値解析技術の援用は、遮音壁の研究開発はもとより、道路交通騒音予測においても大変有意義であると言える。その際の大きな問題点としては計算量・必要記憶容量の膨大化が挙げられ、現在までは2次元音場を想定している場合がほとんどであるが [4, 5]、近年、大規模音場解析を目的として開発された高速多重極境界要素法（以下、FMBEM） [17, 20] を用いることにより3次元数値解析の実用化が可能であると考えられる。

## 1.2 研究の目的

以上のような背景を踏まえ、本研究の目的を以下のように設定する。

- 1) 遮音壁解析における FMBEM の計算効率の向上を図り、手法の適用範囲を拡大すること
- 2) FMBEM による遮音壁解析の妥当性を検証すること
- 3) ケーススタディにより、3次元音場における減衰補正量の挙動を把握し、減衰補正量予測のための知見を得ること

## 1.3 本論文の構成

第1章では、道路交通騒音問題の現状や、騒音対策の動向、予測手法の現状と課題等、研究の背景を概観し、本研究の位置付け及び目的を述べる。また、本論文の構成を示す。

第2章では、まずはじめに ASJ R1N-Model 2003 における伝搬計算の概要について述べる。また、音場の基礎方程式について述べ、境界要素法 (BEM) による音場の定式化を行なう。その後、高速多重極アルゴリズム、および階層セル構造について概説した後に、BEM 影響関数の FMBEM による再定式化を行なう。

第3章では、FMBEM の遮音壁解析への適用に関する検討を行なう。まず、遮音

壁解析に特化した効率化手法を提案・実装し、従来のFMBEMによる解析結果との比較を通してその有効性を検証する。次に、遮音壁解析における特異性として生じる、低周波数域における解析精度の低下に関して、ケーススタディにより挙動を把握すると共に、精度確保のための適切な設定条件を導出する。

第4章では、遮音壁による減音効果の計算の妥当性の検証を行なう。まず、既往の縮尺模型実験による実測値との比較により、FMBEMによる遮音壁解析の妥当性を検証する。次に、解析モデルの有限性に起因する遮音壁側方からの回折波が計算結果に与える影響を数値的に検討し、適切な解析モデルの設定に関して言及する。

第5章では、減衰補正量の数値予測のための基礎的検討という位置付けでケーススタディを行ない、減衰補正量の挙動を把握すると共に、その指向特性について考察を加える。

第6章は総括であり、本論文の成果、及び今後の課題について述べる。





## 第2章

# 道路交通騒音の数値予測法

### 2.1 はじめに

道路交通騒音の予測に関して、我が国では日本音響学会による道路交通騒音の予測モデルである ASJ モデルが一般的に使われている。この ASJ モデルは ASJ Model 1975 が発表された年の前年の昭和 49 年から現在に至るまで、適用範囲の拡大、予測計算の精緻化、予測精度の向上を目指して研究・開発が進められてきた。その成果として、平成 16 年 4 月に ASJ RIN-Model 2003 が発表されている [11]。本章では、減衰補正量の予測の基礎となる ASJ モデルによる道路交通騒音の予測計算の概要を述べる。また、本研究で用いる高速多重極境界要素法 (FMBEM) について、はじめに音場の基礎方程式について述べ、境界要素法 (BEM) による音場の定式化を行なう。次に、高速多重極アルゴリズム及び階層セル構造の導入について概説し、BEM の各影響関数を FMBEM により再定式化する。

なお、本論文では一貫して時間因子として  $\exp(-j\omega t)$  を用いる。

## 2.2 道路交通騒音の予測計算

### 2.2.1 予測計算法の原理

$L_{Aeq}$  を評価量とするエネルギーベースの道路交通騒音の予測計算においては、対象とする道路上を無指向性点音源と見なせる1台の自動車が行ったときの騒音の時間変化（ユニットパターン）及びその時間積分値を求めることが基本となる。その結果に交通条件（交通量及び車種構成）を考慮して、予測点における騒音のエネルギー的な時間平均値を求める。

### 2.1.2 伝搬計算の概要

ASJ RTN-Model 2003 では幾何音響学と実験及び経験式に基づく実用計算法が伝搬予測の基本となる。予測計算の基本となるユニットパターンの求め方の概要を述べる。まず、対象とする道路をいくつかの区間に分割する。次に一つの分割区間に着目し、その中点から所定の予測点までの音の伝搬を計算する。具体的には、道路上を1台の自動車が行った時、 $i$ 番目の予測点で観測されるA特性音圧レベルは $L_{A,i}$ は、無指向性点音源からの半自由空間における音の伝搬と各種の要因による減衰を考慮して、次式で与えられる。

$$L_{A,i} = L_{WA,i} - 8 - 20 \log_{10} r_i + \Delta L_{cor,i} \quad (2.1)$$

但し、 $L_{A,i}$ ： $i$ 番目の音源位置から予測点に伝搬する騒音のA特性音圧レベル [dB]， $L_{WA,i}$ ： $i$ 番目の音源位置における自動車走行騒音のA特性音響パワーレベル [dB]， $r_i$ ： $i$ 番目の音源位置から予測点までの直達距離 [m]， $\Delta L_{cor,i}$ ： $i$ 番目の音源位置から予測点に到る音の伝搬に影響を与える各種の減衰要素に関する補正量 [dB] で、次式で表される。

$$\Delta L_{cor} = \Delta L_{dif} + \Delta L_{grnd} + \Delta L_{air} \quad (2.2)$$

但し、 $\Delta L_{dif}$ ：回折の伴う減衰に関する補正量 [dB]， $\Delta L_{grnd}$ ：地表面効果による減衰に関する補正量 [dB]， $\Delta L_{air}$ ：空気の音響吸収による減衰に関する補正量 [dB]

音源点と予測点の間に遮音壁等の音響障害物がある場合は、回折に伴う減衰効果を補正量として考慮する必要がある。本研究ではこの補正量のことを回折減衰量と呼ぶことにする。なお、ASJ RIN-Model 2003 においては、先端改良型遮音壁の回折減衰量は仮想直壁の回折減衰量に先端部装置による減衰効果に関する付加的な補正量である減衰補正量を単純加算する次式が提案されている。

$$\Delta L_{\text{dif,emb}} = \Delta L_{\text{dif,eb}} + \Delta L_{\text{c,dir}} \quad (2.3)$$

但し、 $\Delta L_{\text{dif,emb}}$ ：先端改良型または張り出し型遮音壁の回折減衰量 [dB]、 $\Delta L_{\text{dif,eb}}$ ：先端改良型または張り出し型遮音壁と同一の高さを持つ仮想直壁の回折減衰量 [dB]、 $\Delta L_{\text{c,dir}}$ ：仮想直壁の先端から予測点の方向に対する壁効果の指向性に関する補正量（減衰補正量） [dB]。

### 2.3 音場の基礎方程式

空気を均質かつ粘性がないものと仮定すると、空気中を伝搬する音波に関する波動方程式が以下のように成り立つ。

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = \nabla^2 \Psi \quad (2.4)$$

但し、 $\Psi$ ：速度ポテンシャル、 $c$ ：空気中の音速。

音圧  $P$  及び粒子速度ベクトル  $\mathbf{V}$  は速度ポテンシャルにより以下のように表される。

$$P = \rho \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{V} = -\nabla \Psi \quad (2.6)$$

但し、 $\rho$ ：空気密度。

波動方程式の線形性より、 $P$  及び  $\mathbf{V}$  は共に Eq.(2.4) を満たす。

ここで時間因子を  $\exp(-j\omega t)$  として調和振動を仮定し,  
 $\Psi(\mathbf{r}, t) = \psi(\mathbf{r})\exp(-j\omega t)$  とおくと, 次の Helmholtz 方程式が得られる.

$$\nabla^2 \psi + k^2 \psi = 0 \quad (2.7)$$

但し,  $k = \omega/c = 2\pi f/c = 2\pi/\lambda$ : 波数,  $\omega$ : 角周波数,  $f$ : 周波数,  $\lambda$ : 波長.  
 同様に  $P(\mathbf{r}, t) = p(\mathbf{r})\exp(-j\omega t)$ ,  $\mathbf{V}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{v}(\mathbf{r})\exp(-j\omega t)$  とおくと,  $p, \mathbf{v}$  は共に Eq.(2.7) を満たし, Eqs.(2.2, 2.3) から以下の式が得られる.

$$p = -j\omega\rho\psi \quad (2.8)$$

$$\mathbf{V} = -\nabla\Psi \quad (2.9)$$

Eqs.(2.5, 2.6) から,  $p$  と  $\mathbf{v}$  の関係は次式で表される.

$$\nabla p = j\omega\rho\mathbf{v} \quad (2.10)$$

無限空間中の点  $\mathbf{r}_q$  に置かれた強さ  $\pm 1$  の点音源が点  $\mathbf{r}_p$  に生じるポテンシャルを基本解と呼び, 次式の解である.

$$\nabla^2 \psi + k^2 \psi = -\delta(\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_q) \quad (2.11)$$

3次元音場における基本解は次式で表される.

$$G(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_q) = \frac{\exp(jkr_{pq})}{4\pi r_{pq}} \quad (2.12)$$

## 2.4 境界要素法による音場の定式化

### 2.4.1 音場の境界条件

Fig.2.1 に示すような, 滑らかな境界面  $\Gamma$  を持つ 3次元音場を想定する. 境界は, 剛壁境界  $\Gamma_0$ , 振動境界  $\Gamma_1$ , 吸音境界  $\Gamma_2$  の 3種類からなるものとする. 吸音境界では局所作用を仮定する. Eq.(2.10) より, 各種境界では次の境界条件式が成り立つものとする.

$$\frac{\partial p(\mathbf{r}_q)}{\partial n_q} = 0 \quad q \in \Gamma_0 \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial p(\mathbf{r}_q)}{\partial n_q} = j\omega\rho v(\mathbf{r}_q) \quad q \in \Gamma_1 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial p(\mathbf{r}_q)}{\partial n_q} = -jkp(\mathbf{r}_q)/z(\mathbf{r}_q) \quad q \in \Gamma_2 \quad (2.16)$$

但し,  $\partial/\partial n_q$ : 点  $q$  における境界面の内向き法線方向微分,  $v$ : 法線方向振動速度 (内向きを正),  $z$ : 比音響インピーダンス.

以上の式において, 剛壁境界と振動境界は第2種境界条件 (Neumann 問題), 吸音境界は第3種境界条件 (Robin 問題) である.

#### 2.4.2 Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式に基づくマトリクス方程式の導出

Eq.(2.7) に重み関数  $G$  をかけて音場領域  $\Omega$  で積分し, さらに Green の定理を適用すると以下の Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式が得られる.

$$C(\mathbf{r}_p)\psi(\mathbf{r}_p) = \int_{\Gamma} \left( \psi(\mathbf{r}_q) \frac{\partial G(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_q)}{\partial n} - \frac{\partial \psi(\mathbf{r}_q)}{\partial n} G(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_q) \right) dS \quad (2.16)$$

但し,  $C(\mathbf{r}_p)$ : 点  $p$  が領域  $W$  を見込む立体角の  $4\pi$  に対する割合. 領域内の点  $s$  にソース点がある場合, 上式は以下のようなになる.

$$C(\mathbf{r}_p)\psi(\mathbf{r}_p) = \psi_D(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_s) + \int_{\Gamma} \left( \psi(\mathbf{r}_q) \frac{\partial G(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_q)}{\partial n} - \frac{\partial \psi(\mathbf{r}_q)}{\partial n} G(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_q) \right) dS \quad (2.17)$$

但し,  $\psi_D$ : ソース点からの寄与.

解析対象とする3次元音場 Fig.2.1 が3次元 Helmholtz 方程式を満たす場合, 音圧に関する Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式が境界上の点  $p$  について以下のように成り立つ.

$$\frac{1}{2} p(\mathbf{r}_p) = p_D(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_s) + \int_{\Gamma} \left( p(\mathbf{r}_q) \frac{\partial G(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_q)}{\partial n_q} - \frac{\partial p(\mathbf{r}_q)}{\partial n_q} G(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_q) \right) dS \quad (2.18)$$

ここで3次元音場基本解は Eq.(2.12) で表され, その法線方向微分は以下の式で表される.

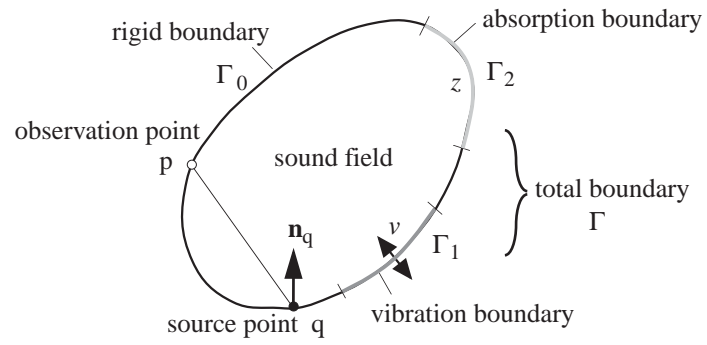


Fig. 2.1 Illustration of a sound field with three kinds of boundary.

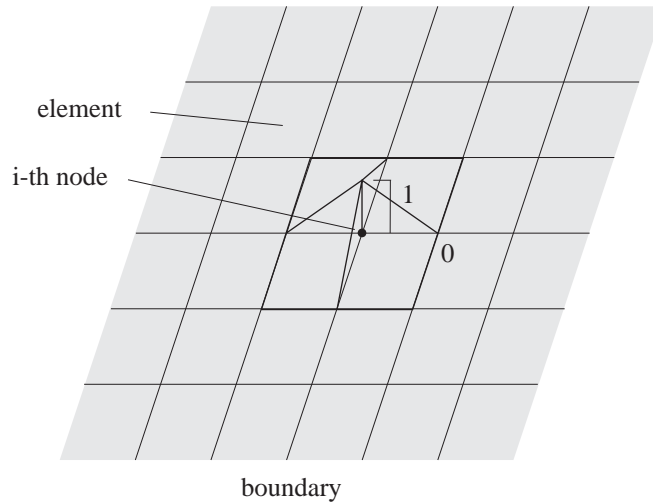


Fig. 2.2 Illustration of an interpolation function.

$$\frac{\partial G(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_q)}{\partial n_q} = \frac{(-1 + jkr_{pq}) \exp(jkr_{pq})}{4\pi r_{pq}^2} \cos(\mathbf{n}_q, \mathbf{r}_{pq}) \quad (2.19)$$

また,  $p_D$  が点音源の場合次式で表される.

$$p_D(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_s) = -j\omega\rho QG(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_s) \quad (2.20)$$

但し,  $Q$ : 点音源の体積速度.

ここで, Eq.(2.18) を数値的に解くために, 境界を有限個の境界要素に離散化する. 境界要素内には境界の形状を記述するためのメッシュポイントと要素内での関数値を記述するための節点を設定する. 各節点には対応する内挿関数  $N$  を設ける. 内挿関数は節点の関数値 (既知) より要素内の任意の点の関数値を求めるために用いられる. 対応する節点では値1をとり, その他の節点においては値0をとる性質を持つ. Fig.2.2 は4角形1次要素の場合の内挿関数を模式的に示したものである. 要素内の任意の関数値  $u$  は, 節点の関数値  $u_j$  と内挿関数  $N_j$  の線形結合により以下のように近似される.

$$u(\mathbf{r}) = \sum_{j=1}^n N_j(\mathbf{r})u_j \quad (2.21)$$

但し,  $n$ : 要素内の総節点数.

Eq.(2.18) に境界条件として Eq.(2.13, 2.14, 2.15) を代入し離散化すると, 以下のマトリクス方程式が得られる.

$$(\mathbf{E} + \mathbf{B} + \mathbf{C}) \cdot \mathbf{p} = j\omega\rho(\mathbf{A} \cdot \mathbf{v} + \mathbf{Qd}) \quad (2.22)$$

但し,  $\mathbf{p}$ : 音圧ベクトル (未知数),  $\mathbf{v}$ : 振動速度ベクトル (既知数),  $\mathbf{d}$ : 直接音ベクトル (既知数).

各行列の成分 (以下, 影響関数と呼ぶ) 及び直接音ベクトルの成分は次式により表される.

$$E_{ij} = -\frac{1}{2}\delta_{ij} \quad (2.23)$$

$$A_{ij} = A(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) = \int_{\Gamma_i} N_j(\mathbf{r}_q)G(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_q)dS_q \quad (2.24)$$

$$B_{ij} = B(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) = \int_{\Gamma_i} N_j(\mathbf{r}_q) \frac{\partial G(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_q)}{\partial n_q} dS_q \quad (2.25)$$

$$C_{ij} = C(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) = jk \int_{\Gamma_i} N_j(\mathbf{r}_q) \frac{G(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_q)}{z(\mathbf{r}_q)} dS_q \quad (2.26)$$

$$d_i = d(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s) = G(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s) \quad (2.27)$$

但し,  $\delta$ : Kronecker のデルタ,  $\mathbf{r}_i$ : 節点  $i$  の位置ベクトル,  $N_j$ : 節点  $j$  の内挿関数. 領域内の任意の点における音圧については, 領域内の点  $\mathbf{r}$  に関する以下の積分方程式に基づいて求められる.

$$p(\mathbf{r}_r) = p_D(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s) + \int_{\Gamma} \left( p(\mathbf{r}_q) \frac{\partial G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_q)}{\partial n_q} - \frac{\partial p(\mathbf{r}_q)}{\partial n_q} G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_q) \right) dS \quad (2.28)$$

即ち, Eq.(2.22) により算出された境界上の音圧ベクトル  $\mathbf{p}$  を用い, 次式により点  $\mathbf{r}$  の音圧を算出する.

$$p(\mathbf{r}_r) = (\mathbf{b}^t(\mathbf{r}_r) + \mathbf{c}^t(\mathbf{r}_r)) \cdot \mathbf{p} - j\omega\rho(\mathbf{a}^t(\mathbf{r}_r) \cdot \mathbf{v} + QG(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_s)) \quad (2.29)$$

ここで, ベクトル  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$ , である各影響関数は

$$a_j(\mathbf{r}_r) = A(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_j) \quad (2.30)$$

$$b_j(\mathbf{r}_r) = B(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_j) \quad (2.31)$$

$$c_j(\mathbf{r}_r) = C(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_j) \quad (2.32)$$

として求められる.

### 2.4.3 局所座標への変換

前述の影響関数 Eq.(2.24, 2.25, 2.26) の積分計算は, 次式のような局所座標系  $\xi, \eta$  へ変換することで行なわれる.

$$\int_{\Gamma} f(\mathbf{r}) dS = \int_{\xi, \eta} f(\xi, \eta) |\mathbf{J}(\xi, \eta)| d\xi d\eta \quad (2.33)$$

$$\mathbf{J}(\xi, \eta) = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \xi} \times \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \eta} \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \xi} = \left( \frac{\partial x}{\partial \xi}, \frac{\partial y}{\partial \xi}, \frac{\partial z}{\partial \xi} \right) \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \eta} = \left( \frac{\partial x}{\partial \eta}, \frac{\partial y}{\partial \eta}, \frac{\partial z}{\partial \eta} \right) \quad (2.36)$$



ここで、要素内の任意の点の座標  $\mathbf{r}$  は、要素内に設けた接点の座標  $\mathbf{r}_j$  と形状関数  $M_j$  の線形結合として以下のように近似される。

$$\mathbf{r}(\xi, \eta) = \sum_{j=1}^m M_j(\xi, \eta) \mathbf{r}_j \quad (2.37)$$

但し、 $m$ : 要素内の総節点数、 $M_j$ : 節点  $j$  の形状関数、 $\mathbf{r}_j$ : 節点  $j$  の座標。  
内挿関数と形状関数が一致するものをアイソパラメトリック要素と呼び、境界要素法ではしばしば用いられる。一方、要素上で音圧や振動速度を一定とする一定要素(0次要素)もよく用いられる。この場合は内挿関数と形状関数は一致しない。なお、本研究の解析では四角形一定要素を用いることとする。

## 2.5 高速多重極境界要素法による音場の定式化

### 2.5.1 高速多重極アルゴリズムの導入

前節において最終的に得られたBEMのマトリクス方程式 Eq.(2.22) では、離散化した全要素間でポテンシャルの寄与を評価していることになる。そのため計算量は反復法を用いた場合だと行列ベクトル積程度の  $O(N^2)$  となり、記憶容量も行列を保持する必要から  $O(N^2)$  となる。一方、高速多重極アルゴリズムを適用したFMBEMでは、マトリクス方程式 Eq.(2.22) に反復法を用いる場合に、行列を生成することなく行列ベクトル積の演算を行なう。具体的には、セルによる要素のグループ化を通して要素群からのポテンシャルの寄与をセル代表点の多重極展開として集積し、セル間で影響を評価することになる。これより、行列ベクトル積の演算部は効率化され、計算量及び必要記憶容量は大幅に低減される。さらに、FMBEMはFig.2.3に示すような8分木構造のセルの階層化構造を導入し、多重極展開を他段階に適用することでより一層の効率化が図られている。

ここでFMBEMによる影響評価の方法について述べる。高速多重極アルゴリズムの多段階化はFig.2.4に示すように6つのステップから構成されている。以下では、レベル及びセルサイズに関して、レベルがより大きい、即ち各セルサイズがより小さい方を下位と呼び、反対にレベルがより小さい、即ち各セルサイズがより大きい方を上位と呼ぶことにする。以下に各ステップの具体的な内容を列挙する。  
ステップ1: 最下位レベル内の要素群の寄与を各セルの中心点の寄与に変換して集積する。

ステップ2: 下位レベル群の寄与をそれらを束ねる上位レベルのセル中心点の寄与に変換して集積する。

ステップ3: 相互作用セル群からの影響を集積する。

ステップ4: 上位レベルのセルに対する影響を下位レベルのセル群の各中心点に対する影響に変換する。

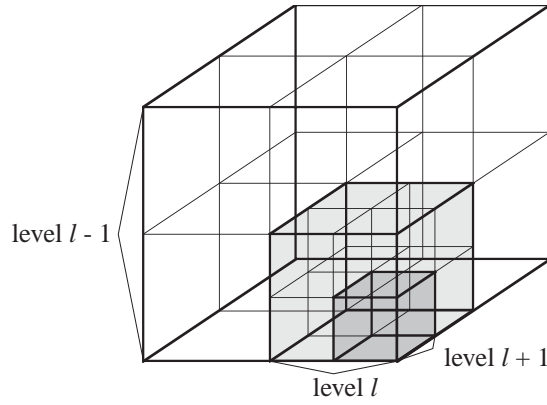


Fig. 2.3 Hierarchical cell structure for a three-dimensional problem.

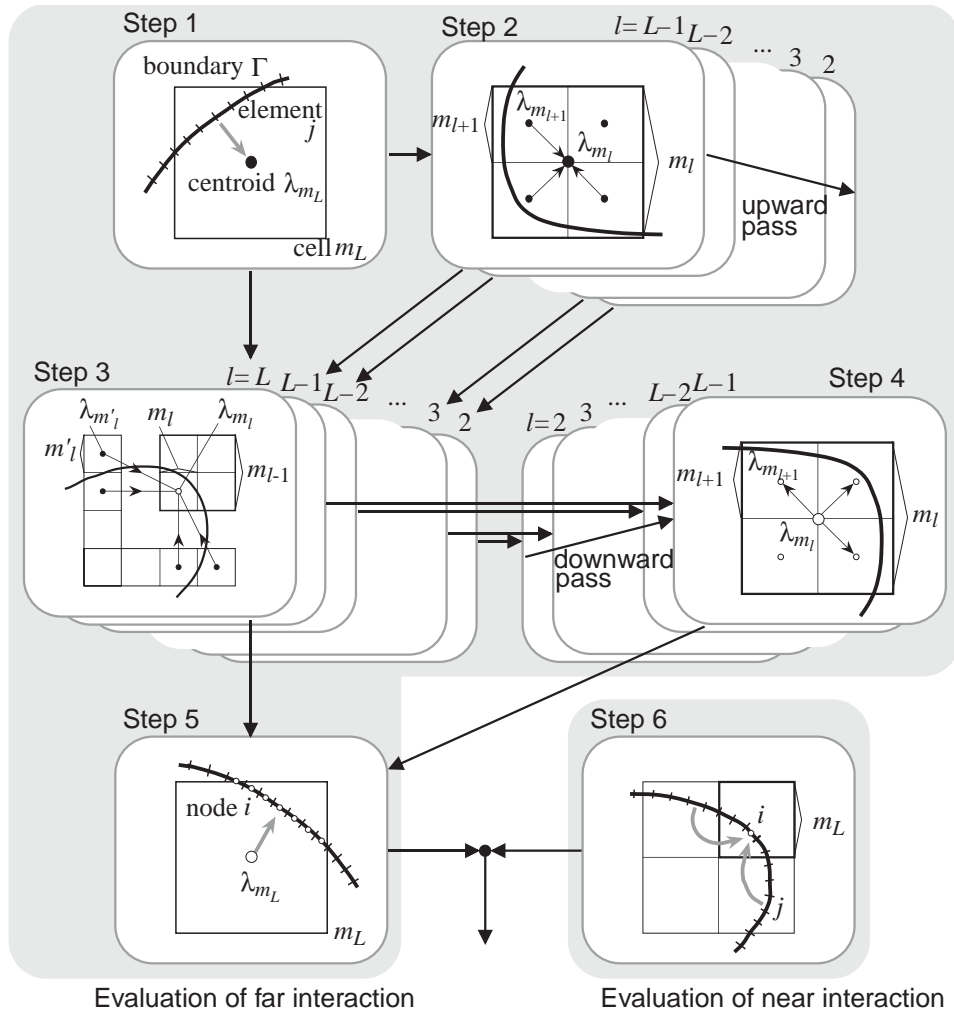


Fig. 2.4 Schematic diagram of MLFMA.

ステップ5: 最下位レベルに対する影響をセル内の各節点に対する影響に変換する。

ステップ6: 最下位レベル内の各節点に対して近傍セル群内の要素群からの影響を集積する。

以上のステップを通して全要素間の影響を評価することが可能となる。

### 2.5.2 影響関数の定式化

前節で定式化したBEMの影響関数をFMBEMに対応付けた形に最定式化する。

$$G(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_q) = \Psi^t(k, \mathbf{r}_{pq}) \mathbf{a}_G \quad (2.38)$$

但し,  $\mathbf{a}_G = [jk / \sqrt{4\pi} \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots]^t$

上式に多重極展開係数の3段階の変換を施し, 変換行列表現を用いると, 基本解の多重極展開表現である次式が得られる。

$$\begin{aligned} G(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_q) &= \Phi^t(k, \mathbf{0}) \cdot \Lambda(k, \mathbf{r}_{pL}) \cdot \Xi(k, \mathbf{r}_{LM}) \cdot \Lambda(k, \mathbf{r}_{Mq}) \cdot \mathbf{a}_G \\ &= \frac{jk}{16\pi^2} \int E_{pL}(\mathbf{k}) T_{LM}(\hat{\mathbf{k}}) E_{Mq}(\mathbf{k}) d\hat{\mathbf{k}} \end{aligned} \quad (2.39)$$

さらに, 上式に多段階多重極展開アルゴリズムを適用することで, 多重極展開が多段階化された次式が得られる。

$$\begin{aligned} G(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_q) &= \frac{jk}{16\pi^2} \int E_{p\lambda_{mL}}(\mathbf{k}) \prod_{l=1}^{L-1} E_{\lambda_{m_{l+1}\lambda_{ml}}}(\mathbf{k}) \\ &\quad \cdot T_{\lambda_{m_l\lambda_{m_l}}(\hat{\mathbf{k}}) \prod_{l=1}^{L-1} E_{\lambda_{m_l\lambda_{m_{l+1}}}}(\mathbf{k}) E_{\lambda_{m_L}q}(\mathbf{k}) d\hat{\mathbf{k}} \end{aligned} \quad (2.40)$$

但し,  $\mathbb{I}$ : ステップ3を実行するセルのレベル

また, 関数  $E$  については以下の関係式が成立する。

$$\frac{\partial E_{\lambda_{m_L}q}(\mathbf{k})}{\partial n_q} = jk(\mathbf{n}_q \cdot \hat{\mathbf{k}}) E_{\lambda_{m_L}q}(\mathbf{k}) \quad (2.41)$$

従って, Eq.(2.18)における基本解の点  $q$  での法線方向微分は次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial G(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_q)}{\partial n_q} &= \frac{-k^2}{16\pi^2} \int E_{p\lambda_{mL}}(\mathbf{k}) \prod_{l=1}^{L-1} E_{\lambda_{m_{l+1}\lambda_{ml}}}(\mathbf{k}) \\ &\quad \cdot T_{\lambda_{m_l\lambda_{m_l}}(\hat{\mathbf{k}}) \prod_{l=1}^{L-1} E_{\lambda_{m_l\lambda_{m_{l+1}}}}(\mathbf{k}) E_{\lambda_{m_L}q}(\mathbf{k}) (\mathbf{n}_q \cdot \hat{\mathbf{k}}) d\hat{\mathbf{k}} \end{aligned} \quad (2.42)$$

従って, BFにおけるEq.(2.24, 2.25, 2.26)の各影響関数はEq.(2.40, 2.42)を代入することにより以下のように表される。

$$\begin{bmatrix} A_{ij} \\ B_{ij} \\ C_{ij} \end{bmatrix} = \frac{jk}{16\pi^2} \oint E_{i\lambda_{mL}}(\mathbf{k}) \prod_{l=1}^{L-1} E_{\lambda_{m_{l+1}}\lambda_{m_l}}(\mathbf{k}) \cdot T_{\lambda_{m_l}\lambda_{m_{l+1}}}(\hat{\mathbf{k}}) \prod_{l=1}^{L-1} E_{\lambda_{m_l}\lambda_{m_{l+1}}}(\mathbf{k}) \begin{bmatrix} \alpha_{\lambda_{m_l}j}(\mathbf{k}) \\ \beta_{\lambda_{m_l}j}(\mathbf{k}) \\ \gamma_{\lambda_{m_l}j}(\mathbf{k}) \end{bmatrix} d\hat{\mathbf{k}} \quad (2.43)$$

ここで,

$$\alpha_{\lambda_{m_l}j}(\mathbf{k}) = \int_{\Gamma_1} N_j(\mathbf{r}_q) E_{\lambda_{m_l}q}(\mathbf{k}) dS_q \quad (2.44)$$

$$\beta_{\lambda_{m_l}j}(\mathbf{k}) = jk \int_{\Gamma} N_j(\mathbf{r}_q) E_{\lambda_{m_l}q}(\mathbf{k}) (\mathbf{n}_q \cdot \hat{\mathbf{k}}) dS_q \quad (2.45)$$

$$\gamma_{\lambda_{m_l}j}(\mathbf{k}) = jk \int_{\Gamma_2} N_j(\mathbf{r}_q) \frac{E_{\lambda_{m_l}q}(\mathbf{k})}{z(\mathbf{r}_q)} dS_q \quad (2.46)$$

である.

## 2.6 まとめ

本章では, ASJ RTN-Model 2003 による道路交通騒音の伝搬計算法について概説した後に, 本研究で用いる高速多重極境界要素法 (FMBEM) の解析アルゴリズムについて説明した. はじめに音場の基礎方程式について述べ, 境界要素法 (BEM) による音場の定式化を行なった. その後, 高速多重極アルゴリズム, および階層セル構造の導入による, BEM 影響関数の FMBEM による再定式化について述べた.

## 第3章

# FMBEMの遮音壁解析への適用に関する 検討

### 3.1 はじめに

一般に、遮音壁解析のような問題を3次元的に取り扱う場合、計算量及び必要記憶容量が膨大となることから、計算機資源の制約により解析範囲が限定されるのが現状である。また、FMBEMによる遮音壁解析においてはセル階層化レベルの設定によって解析精度が低下するケースが生じることが予想されるため、精度確保のための適切な設定条件を導出する必要があると言える。本章ではFMBEMの遮音壁解析への適用に関する検討として、まず計算量及び必要記憶容量の低減を目的とした効率化手法を提案し、その有効性を検証する。次に、解析精度を確保するためのセル階層化レベルの設定条件について検討する。

### 3.2 FMBEM 解析の効率化に関する検討

長大な遮音壁のような解析対象では、境界形状（節点分布）が1次元的事となることから、1次元節点分布の問題における効率化 [21] は非常に有効であると考えられる。また、Fig. 3.1 に示すような直線道路を想定した場合、完全反射性の地表面と遮音壁中央で壁と直交する鉛直面の2つの対称面を有することから、対称形音場解析における効率化手法 [22] も適用可能と思われる。本節では、1次元節点分布問題における効率化手法と対称形音場解析の効率化を組み合わせた手法を提案・実装するとともに、計算効率に関して前者の効率化のみを適用したFMBEM解析の結果との比較を行ない、その有効性を検証する。

#### 3.2.1 解析方法

中心から側端部までの長さ  $D_m$ 、高さ  $h_m$ 、厚み  $0.1\text{ m}$  の遮音壁とその外部に置かれた音源点からなる解析モデルを Fig. 3.1 に示す。解析対象と階層セル構造の位置関係が計算効率へ及ぼす影響を見るため、問題の要素数及び要素サイズは一定としたうえで  $D/h$  を変化させて検討を行なう。対称面の取り扱いに関しては、Fig. 3.1 における地表面 ( $xy$  平面) と鉛直面 ( $yz$  平面) の2つの平面を対称面とする場合 ( $sym2$ )、地表面のみ対称面とする場合 ( $sym1_{xy}$ )、鉛直面のみ対称面とする場

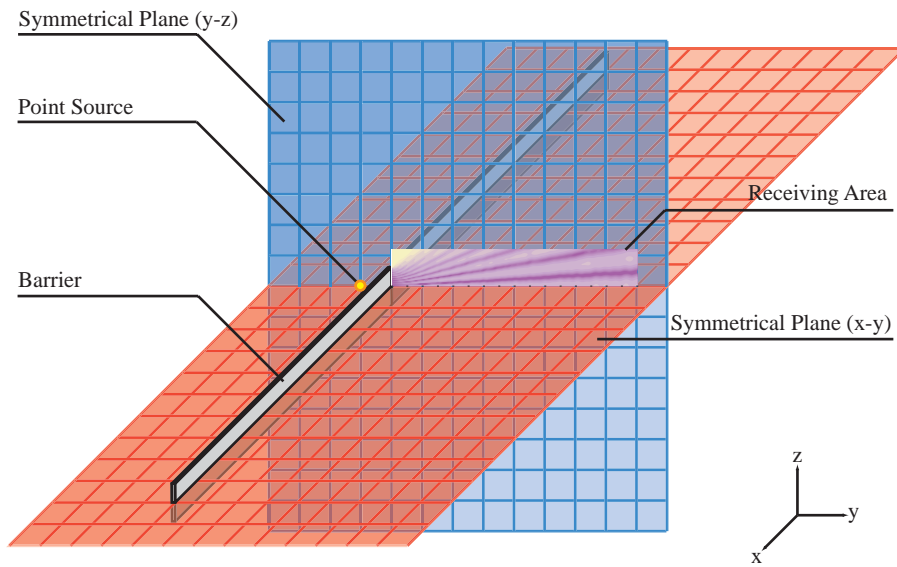


Fig. 3.1 Geometry of the numerical model and three kinds of symmetrical plane.

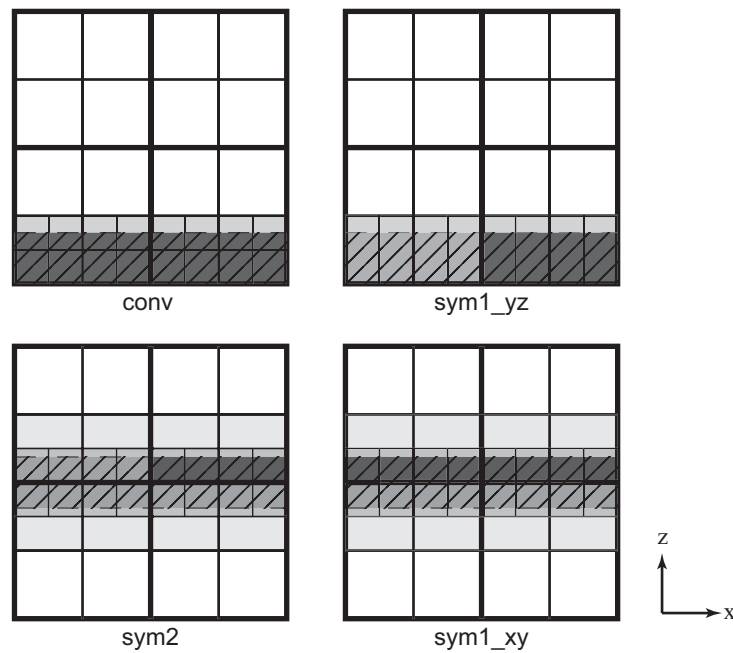


Fig. 3.2 Hierarchical cell structures and geometry of barriers in cells for three kinds of symmetrical FMBEM and conventional FMBEM.

合 ( sym1\_yz ) の 3 種類を設定し, 1 次元的節点分布問題における効率化手法のみを適用した場合 ( conv ) も含めた比較検討を行なう. なお, 対称形手法では対称面をセルの一面に合わせて配置させるため, Fig. 3.2 のように conv と sym1\_yz, 及び sym2 と sym1\_xy がルートセルに対してそれぞれ同様の配置となる.

境界条件は全面剛,境界要素は四角形一定要素を使用し,解析モデルの厚みを考慮して0.1m以下,かつ波長の1/6以下となるように離散化する.なお,解析周波数は125Hzと1kHzとする.

### 3.2.2 結果と考察

#### 計算時間

各手法による計算時間を Fig. 3.3(a,b) に, conv による計算時間に対する比率を Fig. 3.3(c,d) に示す.全体的な傾向としては, conv が最も効率が悪く,概ね sym1\_xy, sym1\_yz, sym2 の順に計算時間が短くなるのがわかる.また,手法及び周波数によらず,同じ自由度であっても  $D/h$  が大きいほど計算効率が落ちることがわかる. conv との比を見ると, sym2 では125Hzにおいては, $D/h=1$ で約1/6, $D/h=80$ で約3/10まで低減されていることがわかる.一方,1kHzでは, $D/h=1$ で1/6, $D/h=80$ で3/5程度の効率化となっている.また,1kHzでは,sym2及びsym1\_xyで $D/h$ が大きいときに効率が悪くなる傾向が見られるが,解析モデルの階層セル構造が異なる sym1\_yz ではその傾向が見られず, $D/h=80$ では sym1\_yz より sym2の方が効率が悪くなることを確認できる.

#### 必要記憶容量

必要記憶容量を Fig. 3.4(a,b) に, conv の必要記憶容量に対する比率を Fig. 3.4(c,d) に示す.計算時間と同様に,概ね conv が最も値が大きく sym2 が一番小さいことがわかる.また,手法及び解析周波数に依らず, $D/h$ が大きくなるほど必要記憶容量が増加することも計算時間と同様である. conv との比率については, sym2, 125Hzでは, $D/h=1$ で3/10, $D/h=80$ で7/10程度まで,1kHzでは, $D/h=1$ で3/10, $D/h=80$ で4/5程度まで効率化されている.また, $D/h=1$ のとき sym1\_xy と sym1\_yz は一致するのに対し, $D/h$ が大きくなると sym1\_xy の方が悪くなる.これより,1面对称化の場合は解析対象の対称面に接する面積が大きくなるほど効率が悪くなると言える.

以上より,遮音壁のように $D/h$ が大きくなる対象において1面对称化手法を用いる場合, sym1\_xy のように地表面に対して対称化を適用すると,解析対象の対称面に接する面積が大きくなり計算効率が悪くなることから, sym1\_yx のように遮音壁中央を通る壁に直交する鉛直面を対称面として扱う方がよいことがわかった.また,2面对称化は概ね高い効率を示すものの,解析モデルの形状によっては1面对称化の方が効率的になるケースが存在することが示された.なお,次節以降の検討では, $D/h=32.5$ ,解析周波数500Hz帯域以下の解析を行なうことから sym2 を解析手法として用いることとする.

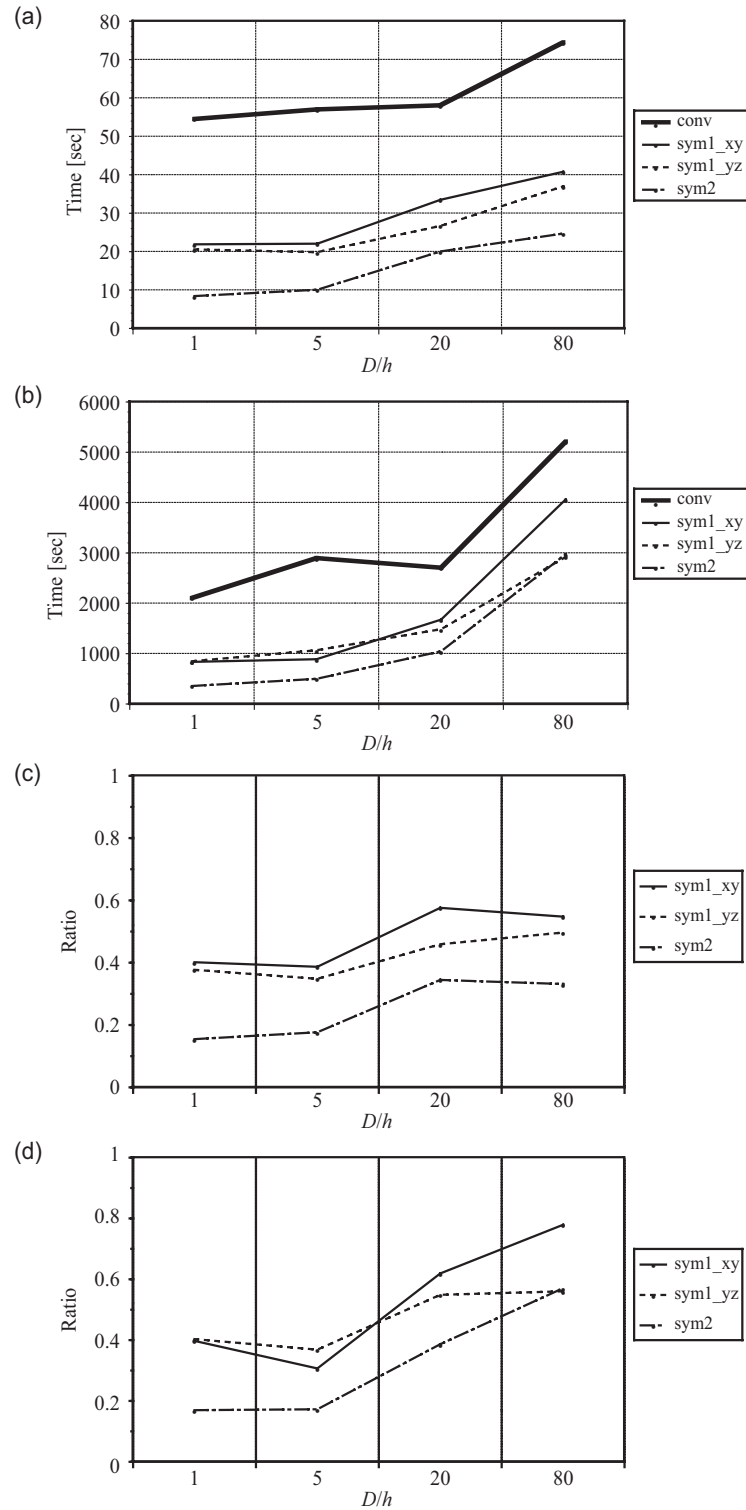


Fig. 3.3 Computational time by using three types of symmetrical FMBEM (sym1\_xy, sym1\_yz, sym2) and conventional FMBEM (conv) at (a) 125Hz and (b) 1kHz, and the ratio of computational time by using three types of symmetrical FMBEM (sym1\_xy, sym1\_yz, sym2) to conventional FMBEM (conv) at (c) 125Hz and (d) 1kHz.



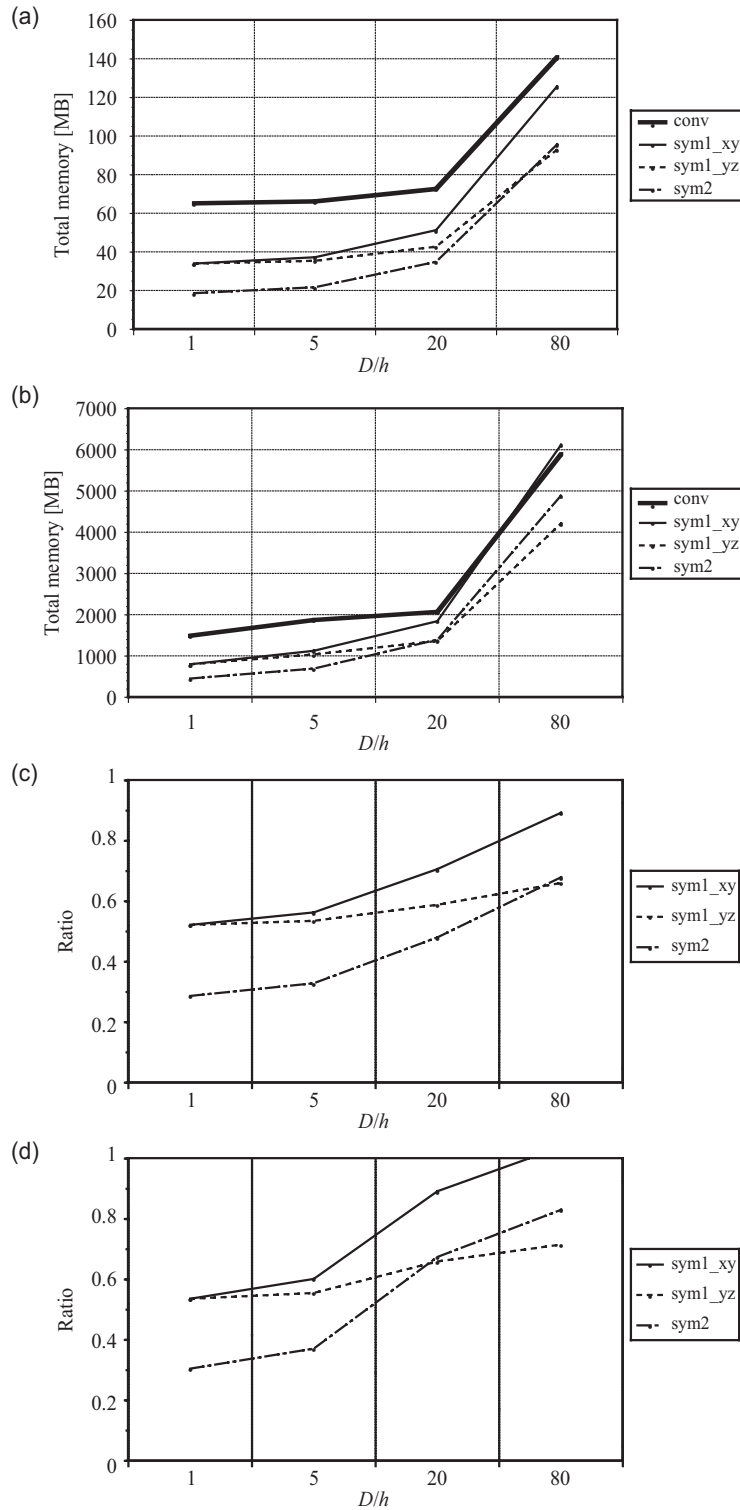


Fig. 3.4 Memory requirements for three types of symmetrical FMBEM ( $sym1_{xy}$ ,  $sym1_{yz}$ ,  $sym2$ ) and conventional FMBEM ( $conv$ ) at (a) 125Hz and (b) 1kHz, and the ratio of memory requirements for three types of symmetrical FMBEM ( $sym1_{xy}$ ,  $sym1_{yz}$ ,  $sym2$ ) to conventional FMBEM ( $conv$ ) at (c) 125Hz and (d) 1kHz.

### 3.3 FMBEM解析の精度確保に関する検討

FMBEMによる解析では、最下位レベルセルの寸法が解析周波数の波長に対して小さすぎると多重極展開の精度が低下することが知られている [23]。一方、計算効率を最適化するセル階層化レベルについては、最下位レベルセル内の平均節点数に着目した設定方法が提案されている [20]。解析周波数(波長)に応じて要素分割を変更する場合には、この方法により階層化レベルを決定する場合でもセル寸法が小さくなりすぎることはなく、十分な精度が確保できる。しかし、遮音壁のような薄い物体の解析においては、数値積分の精度確保のため要素サイズが物体の厚みにより規定されることとなり、必然的に低周波数域でも問題の自由度が大きくなるが、このような場合に上述の設定方法を適用すると、解析波長と比較してセル寸法が小さくなってしまふことから、低周波数域で解析精度が低下することが予想される。そこで本節では、数値解析によるケーススタディを通して、低周波数域においてセル階層化レベルの設定が計算精度に与える影響を把握し、計算精度確保のために必要なセル階層化レベルの設定方法を検討する。具体的には、評価量として解析波数 $k$ とセルを内包する球の直径 $D$ の積である無次元波数 $kD$ を用いることとし、セル階層化レベルとの関係から解析精度確保に必要な $kD$ の値について言及する。

#### 3.3.1 解析方法

解析モデルを Fig. 3.5 に示す。ここでは、壁高一定(4m)の下で壁の長さ $D$ を変えることで問題の自由度を変化させることとし、セル階層化レベルを変化させて解析を行ない、解析精度を確保するために必要な $kD$ の値を導出する。受音点は遮音壁中央からの長さ $R$ が100 mの範囲に1mごと設置している。解析対象とする遮音壁形状は直壁、境界条件は剛境界とする。要素サイズは0.1mに設定し、四角形一定要素を用いて離散化する。なお、解析周波数は100Hzとする。

#### 3.3.2 結果と考察

それぞれの解析対象の計算条件を Table 3.1 に、解析により得られた回折減衰量を Fig. 3.6, 3.7 に示す。Fig. 3.6 (a) を見てみると、セル階層化レベル(CLEVEL)が7以下の結果は概ね一致しているのに対し、CLEVEL = 8の場合は明らかに他と異なることがわかる。セル階層化レベルが小さいほど球面積分点の補間による誤差が蓄積されにくいこと、レベルが7以下の結果の対応がよいことを考えると、CLEVEL = 8の場合は多重極展開の精度低下が生じていると言える。その他のケースにおいても同様の傾向が見られる。 $kD$ の値との関連で見ると、 $kD$ が2以上の場合は問題の自由度によらず視覚的な差異は確認されないことがわかった。

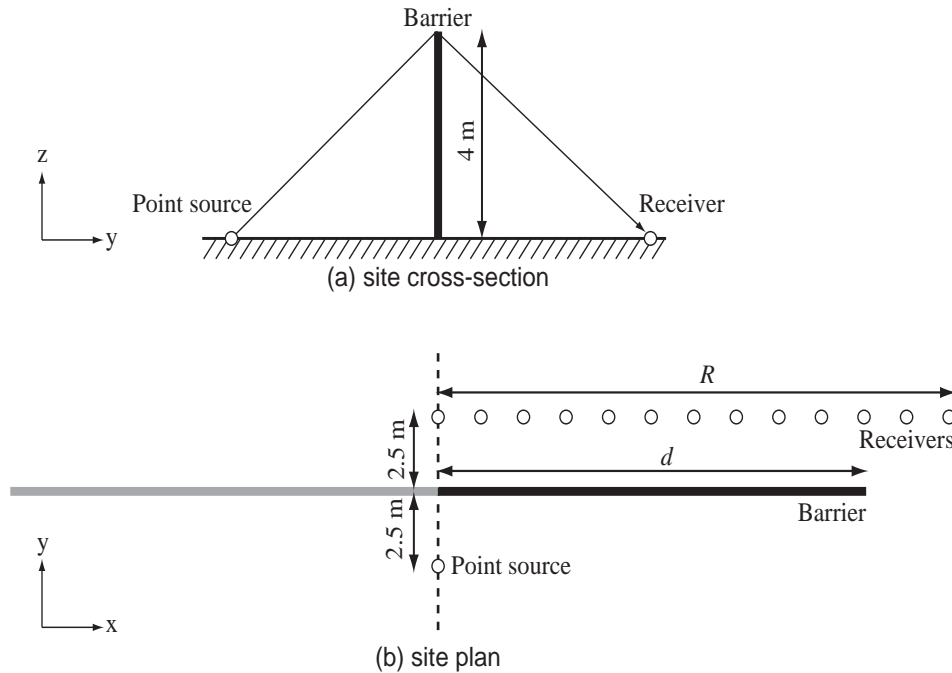


Fig. 3.5 Geometry of the numerical model. (a) site cross-section. (b) site plan.

定量的評価

セル階層化レベルの設定が結果に与える影響を定量的に評価するため，セル階層化レベルをできるだけ小さく設定したときの結果を基準とし，受音点ごとの誤差平均 (eq. 3.1) 及び全受音点の音圧レベルのエネルギー合成値の差 (eq. 3.2) を求めた．結果を Fig. 3.8 に示す．受音点ごとの誤差平均では問題の自由度による差は見られない． $kD$  が 2 以上の場合には，およそ 0.1dB 以内になることがわかる．全受音点での音圧レベルのエネルギー合成値の誤差でも同様の傾向を示しており， $kD$  2 以上では誤差は概ね 0.05dB 以内に納まることがわかる．以上より，本研究の解析範囲においては  $kD = 2$  以上となるようにセル階層化レベルを設定すれば，低周波数域における解析精度が保障されると考えられる．次章以降ではこの設定を用いることとする．

$$Error = 10 \log_{10} \left( \frac{\sum_i (E_{\text{dif},i} - E_{\text{dif},0,i})}{N} + 1 \right) \text{ [dB]} \tag{3.1}$$

$$Error = 10 \log_{10} \left| \frac{\sum_i E_{\text{dif}+d,i}}{\sum_i E_{\text{dif}+d,0,i}} \right| \text{ [dB]} \tag{3.2}$$

但し， $E_{\text{dif},i}$  :  $i$  番目の受音点における回折減衰量， $E_{\text{dif},0,i}$  : セル階層化レベルをできるだけ小さくしたときの  $i$  番目の受音点における回折減衰量， $E_{\text{dif}+d,i}$  :  $i$  番目の受音点における相対音圧レベルのエネルギー， $E_{\text{dif}+d,0,i}$  : セル階層化レベルをできるだけ小さくしたときの  $i$  番目の受音点における相対音圧レベルのエネルギー， $N$  : 受音点の個数．

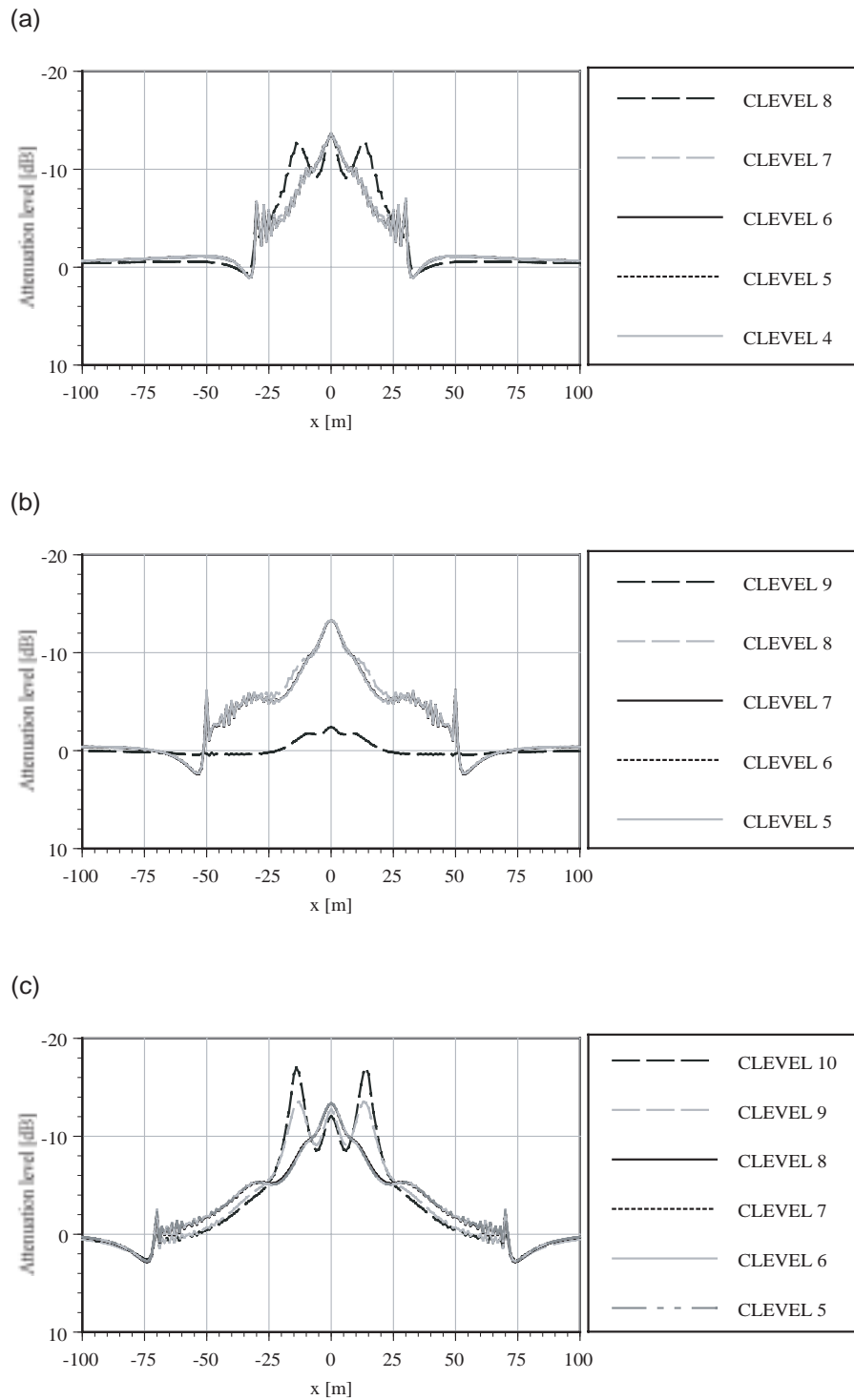


Fig. 3.6 Effect of hierarchical cell structure levels on calculated results: (a)  $d = 30\text{m}$ , (b)  $d = 50\text{m}$ , and (c)  $d = 70\text{m}$ .

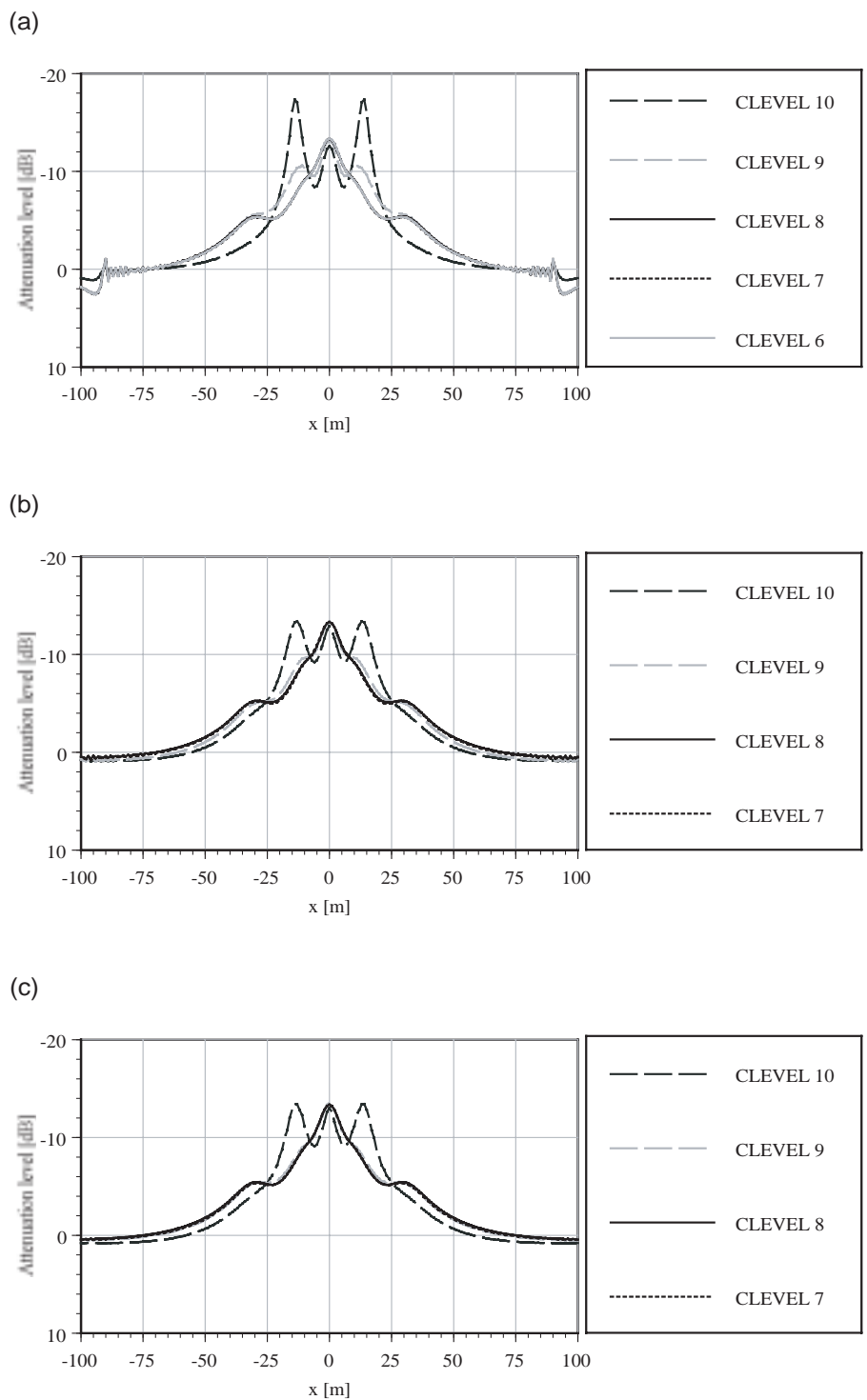
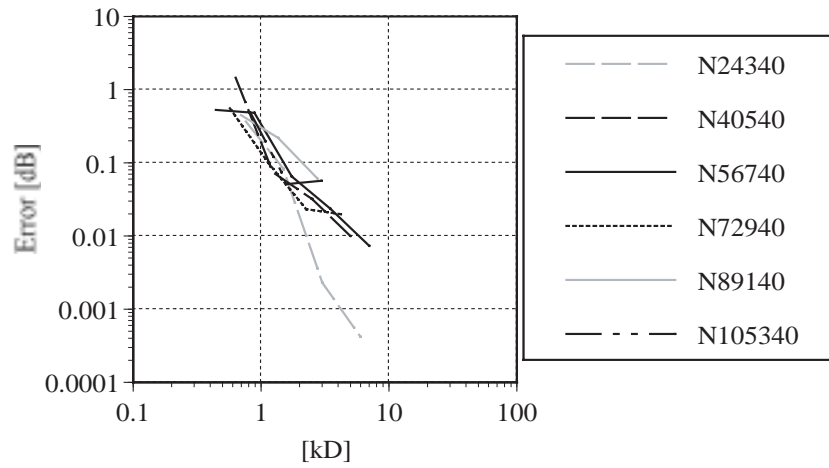


Fig. 3.7 Effect of hierarchical cell structure levels on calculated results: (a)  $d = 90\text{m}$ , (b)  $d = 110\text{m}$ , and (c)  $d = 130\text{m}$ .

Table 3.1  $N$  is degree of freedom (DOF).  $L$  is the lowest level number of hierarchical cell structure.  $M$  is the average number of nodes in a cell at the lowest level  $L$ , and  $kD$ .

$L$	$d 30$		$d 50$		$d 70$		$d 90$		$d 110$		$d 130$	
	$kD$	$M$	$kD$	$M$	$kD$	$M$	$kD$	$M$	$kD$	$M$	$kD$	$M$
10	—	—	—	1	0.44	3	0.57	6	0.70	9	0.82	12
9	—	1	0.63	3	0.89	14	1.14	23	1.36	35	1.61	51
8	0.76	11	1.23	29	1.74	55	2.25	95	2.75	140	3.26	207
7	1.49	42	2.50	105	3.48	221	4.50	379	5.51	464	6.49	822
6	3.01	152	5.00	422	7.00	886	8.99	1139	—	—	—	—
5	5.98	507	10.01	1266	13.99	3546	—	—	—	—	—	—
4	12.00	1521	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

(a)



(b)

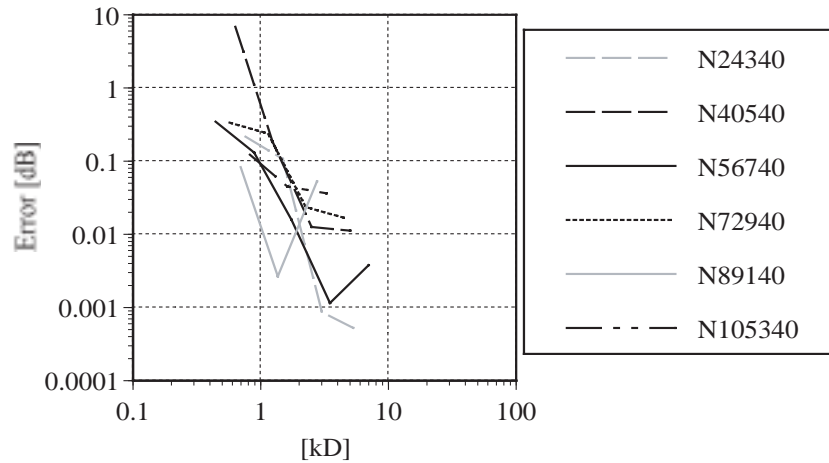


Fig. 3.8 Differences between the results on condition that  $L$  is the smallest in case study and other results ( $L$  is a hierarchical structure level.): (a) averages of differences at each receiving points and (b) differences of summation of sound energy at each receiving points.

### 3.4 まとめ

本章では、FMBEMの遮音壁解析への適用に関する検討として、計算量及び必要記憶容量の低減のための効率化手法を提案し、従来手法との比較によりその有効性を検証した。また、問題の特異性として生じる低周波数域での解析精度の低下に関して、セル階層化レベルの設定が与える影響をケーススタディにより把握するとともに、精度確保のためのセル階層化レベルの設定条件を導出した。

解析モデルの対称性を考慮した効率化手法を3種類提案・実装し、比較検討を行なった結果、計算量・必要記憶容量共に、2面对称化が概ね最も効率的になること、解析対象の長さとの高さの比が大きくなるほど効率化の程度が下がること、階層セル構造と解析対象の位置関係によって効率化の傾向が異なり、1面だけに対称化を適用するほうが2面对称化よりも高効率となるケースが存在することがわかった。また、1面对称化では、解析対象の対称面に接する面積が大きいほど必要記憶容量が増加することが明らかにされた。

低周波数域における解析精度とセル階層化レベルの関係については、今回の解析範囲においては問題の自由度によらず $kD=2$ 以上とすることにより、誤差が十分収束することが明らかとなった。





## 第4章

# 回折減衰量の算出の妥当性 についての検討

### 4.1 はじめに

第2章で述べた通り，減衰補正量は先端改良型遮音壁の回折減衰量と直壁の回折減衰量の差として表されるため，回折減衰量の算出が減衰補正量の算出の基礎となる．本章では，はじめに，縮尺模型実験による実測値との比較を通してFMBEMによる解析結果の妥当性を検証する．次に，解析モデルの有限性に起因する遮音壁側端部から回りこむ回折波（以下，側方回折波）の回折減衰量に与える影響について数値解析によるケーススタディを通して検討し，その影響を抑制するために必要な解析モデルの設定を導出する．

### 4.2 縮尺模型実験との精度比較

FMBEMによる解析精度については，理論解との厳密な比較による検証が行なわれているが[20]，遮音壁解析のような実問題への適用の際には，実測値との比較・検討が必要と思われる．本節では，坂本らによる縮尺模型実験の実測値[16]との比較を通して，FMBEMによる数値解析結果の妥当性を検証する．

#### 4.2.1 解析方法

解析対象の音源点，遮音壁（全長180 m），受音点の位置関係をFig. 4.1に示す．音源点，受音点は完全反射性の地表面上に設置し，受音点は遮音壁中央から片側80 mの長さに1 mごと設置する．解析対象とする遮音壁形状をFig. 4.2に示す．境界条件はType 1とType 2は全面剛，Type 3は受音点側の円弧部分が吸音境界，それ以外は剛境界とする．要素サイズは0.1 mとし，四角形一定要素とする．また，吸音境界条件には縮尺模型実験で用いられたフェルト（2 mm）の吸音率[24]に相当する比音響インピーダンスを帯域ごとに与える．

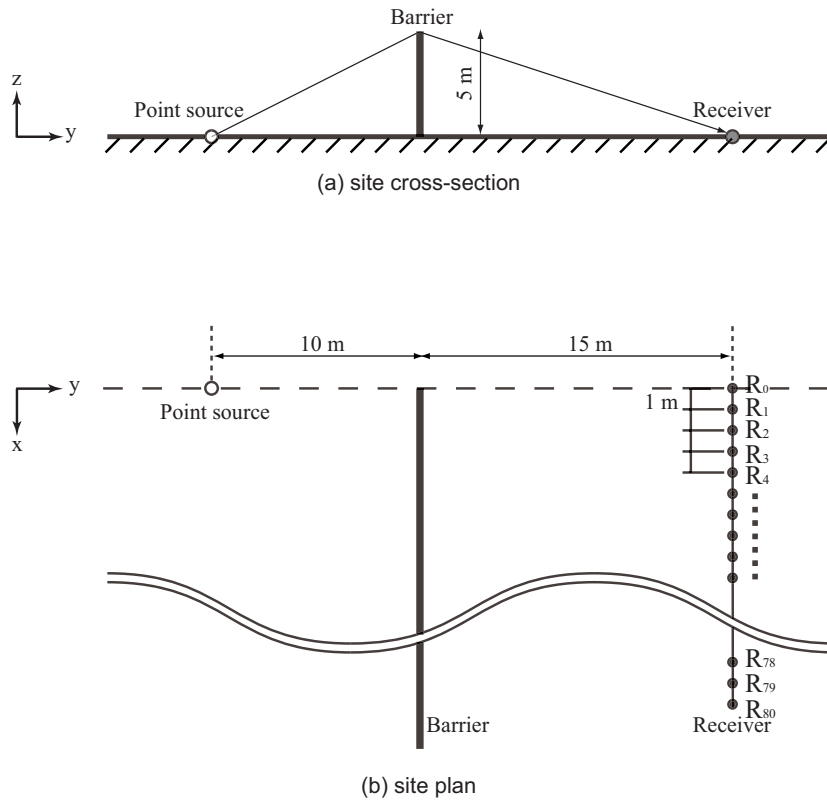


Fig. 4.1 Geometry of the numerical model: (a) site cross-section and (b) site plan.

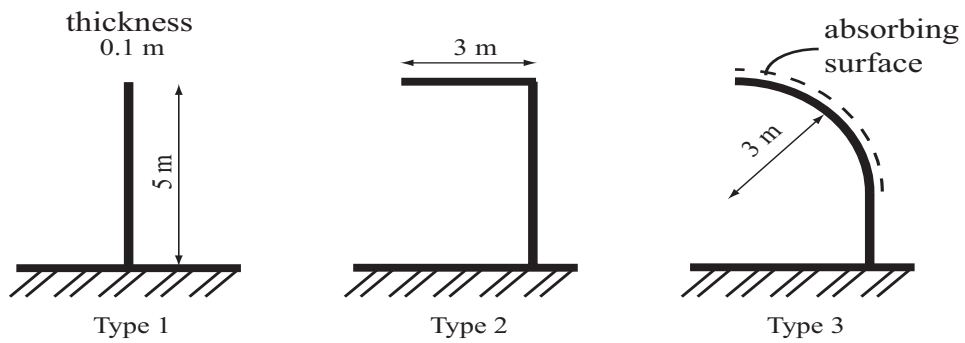


Fig. 4.2 Three types of barriers.

#### 4.2.2 結果と考察

各タイプの回折減衰量を Fig. 4.3 , © Fig. 4.14 に示す . 図中には , 縮尺模型実験による実測値 ( 1/3 オクターブ帯域値 ) と , FMBEM による単一周波数解析結果 , およびそれらの帯域平均値を併せて示している .

##### 単一周波数解析結果と帯域平均値の比較

Type 1 の結果について見てみると , 125Hz ( Fig. 4.4 ) では , 遮音壁中央面から離れた受音点において単一周波数解析結果に揺らぎが見られる . これは側方回折波の影響によるものと考えられる . 一方 , 500Hz ( Fig. 4.6 ) では中央面から 20m , 40m 付近に比較的大きな揺らぎが見られる . これは遮音壁上端部の 2 つのエッジからの回折波の干渉によるものと思われ、解析波長に対して壁厚が相対的に大きくなる高周波数域ほど顕著に現れることがわかる ( 第 5 章参照 ) . 以上のように , 単一周波数解析の結果では側方回折波及び壁厚に起因する 2 種類の揺らぎが現れるのに対し , 帯域平均値では前者の影響が比較的に見られなくなることがわかる .

##### 実測値と数値解析結果の比較

実測値と数値解析結果の帯域平均値を比較すると , Type 1 では 63 , 125Hz 帯域は精度良く対応しているのに対して ( Fig. 4.3, 4.4 ) , 周波数が高くなるほど差が大きくなる傾向が見られる ( Fig. 4.5, 4.6 ) . これは , 高周波数域では解析波長に対する遮音壁の厚みが相対的に大きくなることに起因していると考えられる . このように , 高周波数帯域で受音点位置によっては顕著な差異が生じうるものの , 受音点全体の回折減衰量の挙動は実測値と概ね対応していることがわかる . Type 2 の結果 ( Fig. 4.7 ~ 4.10 ) も Type 1 の結果と同様な傾向が見られる . また , 吸音境界を有する Type 3 では , Type 1 の場合と同様に高周波数帯域ほど対応が悪くなること , 数値解析結果の方が概ね減衰効果が高くなる様子が見て取れる ( Fig. 4.11 ~ 4.14 ) . しかし , 他のタイプと同様に回折減衰量の大きな挙動は概ね対応しており , 数値解析における吸音条件として , 比音響インピーダンスを近似的に与えていることを考慮すると比較的良好に対応していると言える .

以上より , FMBEM による遮音壁解析の結果は , 遮音壁の形状や境界条件によらず , 概ね妥当な値となることが確認されたと言える .

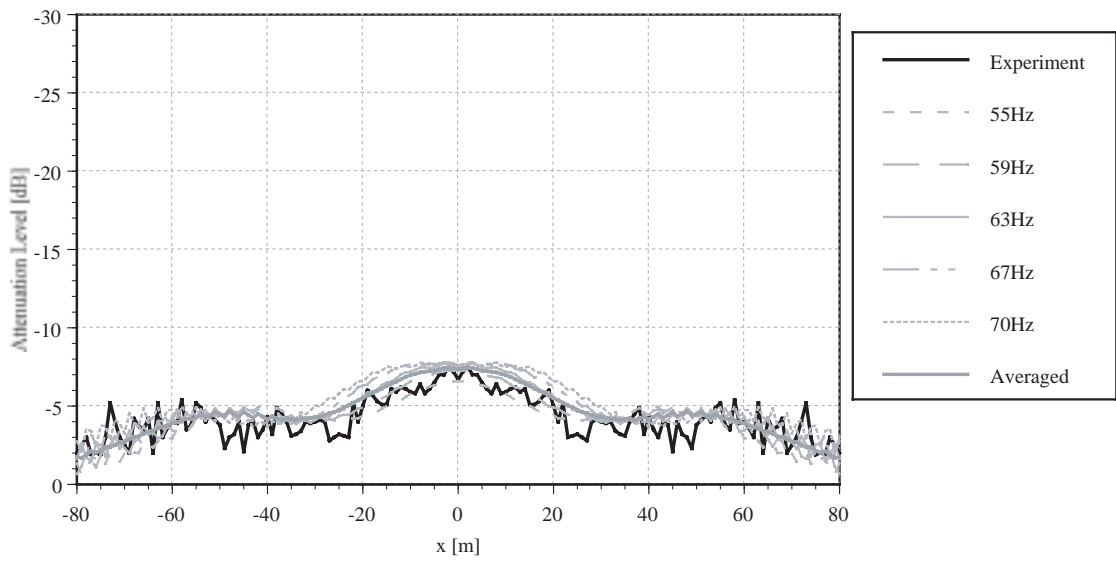


Fig. 4.3 Attenuation levels for Type 1 at 63Hz 1/3 octave-band.

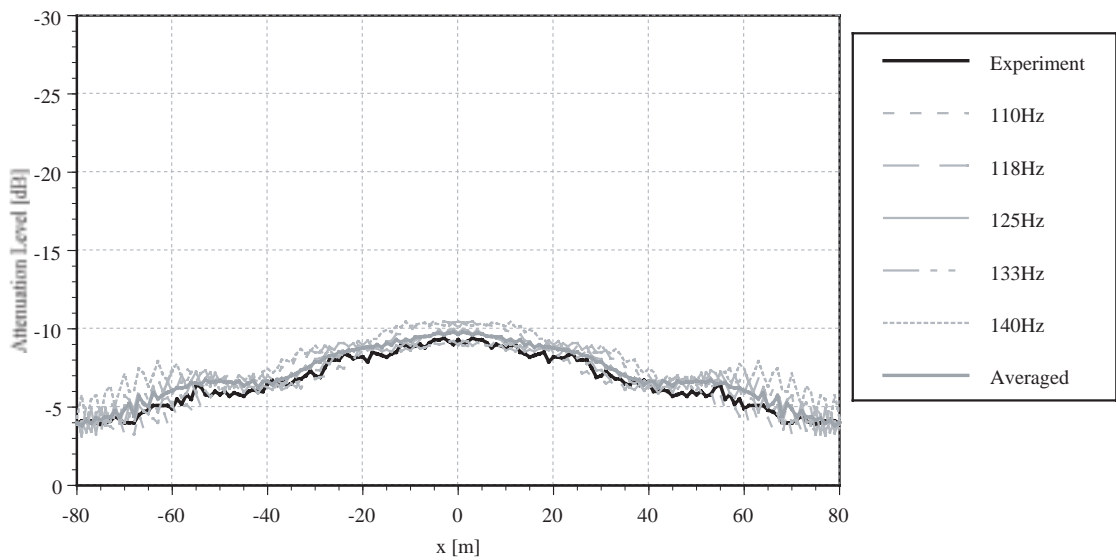


Fig. 4.4 Attenuation levels for Type 1 at 125Hz 1/3 octave-band.

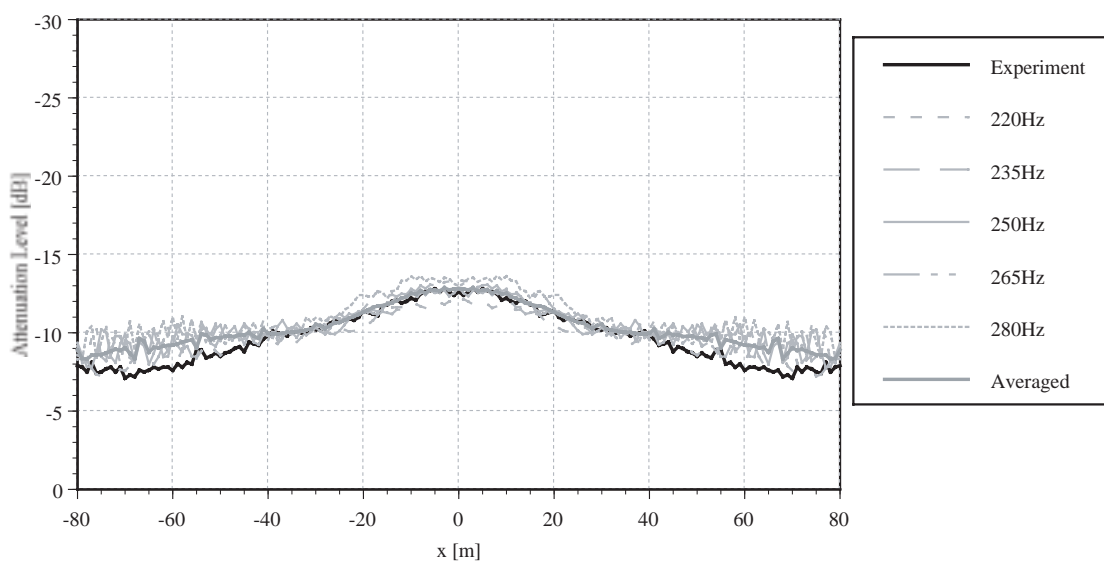


Fig. 4.5 Attenuation levels for Type 1 at 250Hz 1/3 octave-band.

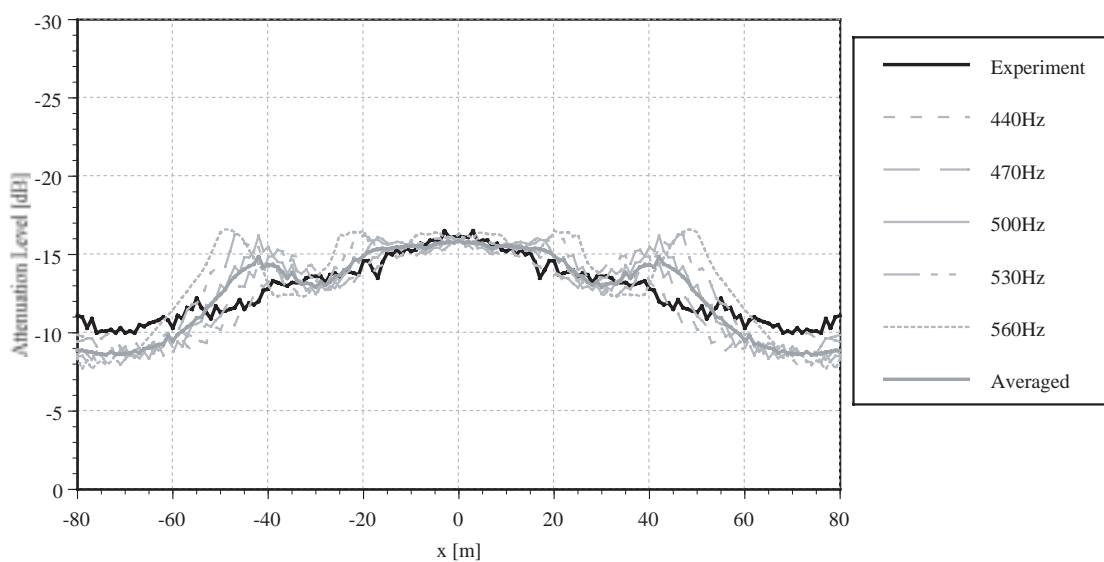


Fig. 4.6 Attenuation levels for Type 1 at 500Hz 1/3 octave-band.

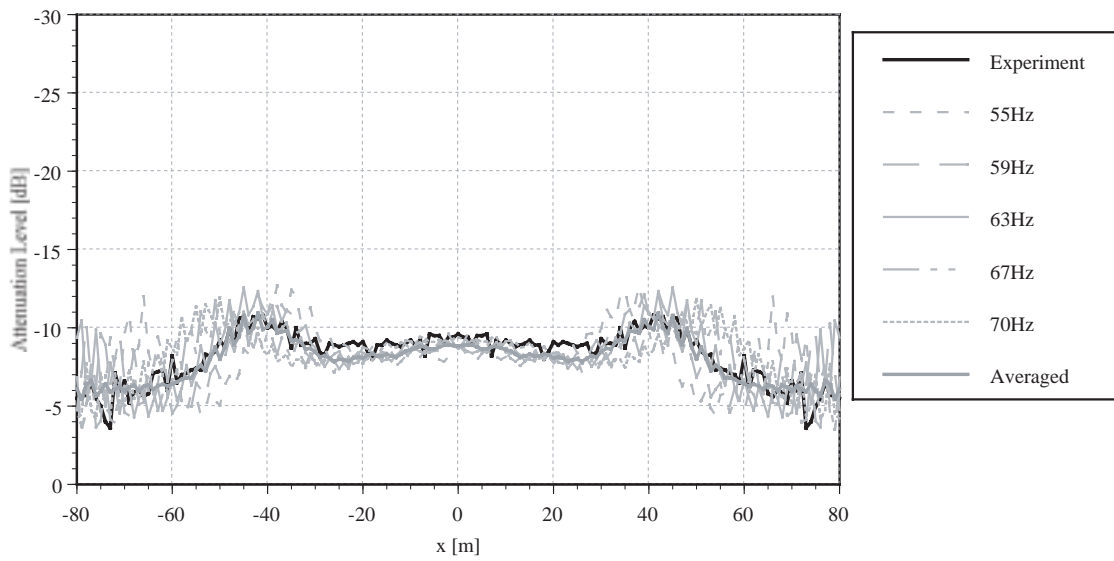


Fig. 4.7 Attenuation levels for Type 2 at 63Hz 1/3 octave-band.

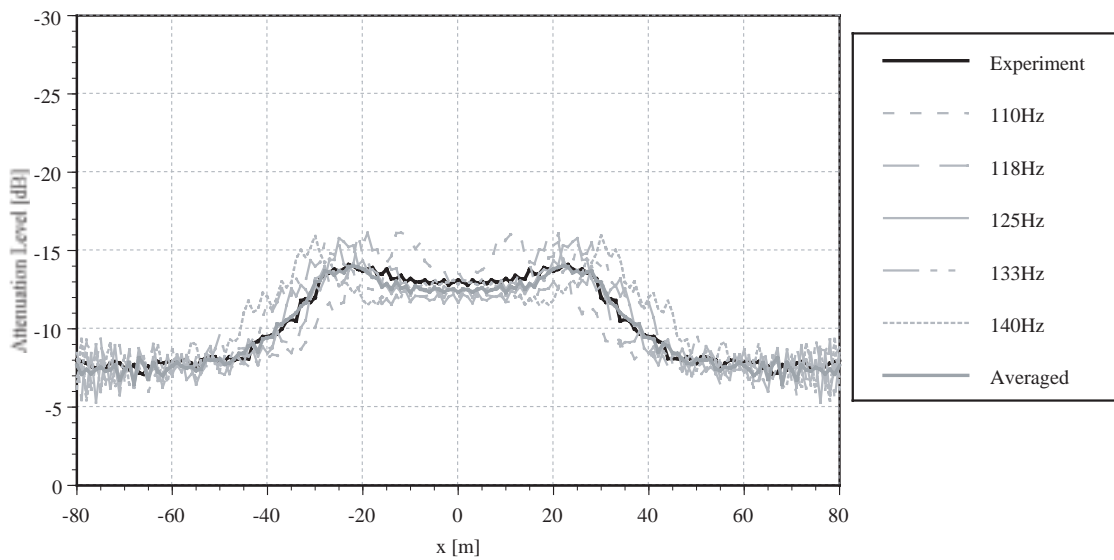


Fig. 4.8 Attenuation levels for Type 2 at 125Hz 1/3 octave-band.

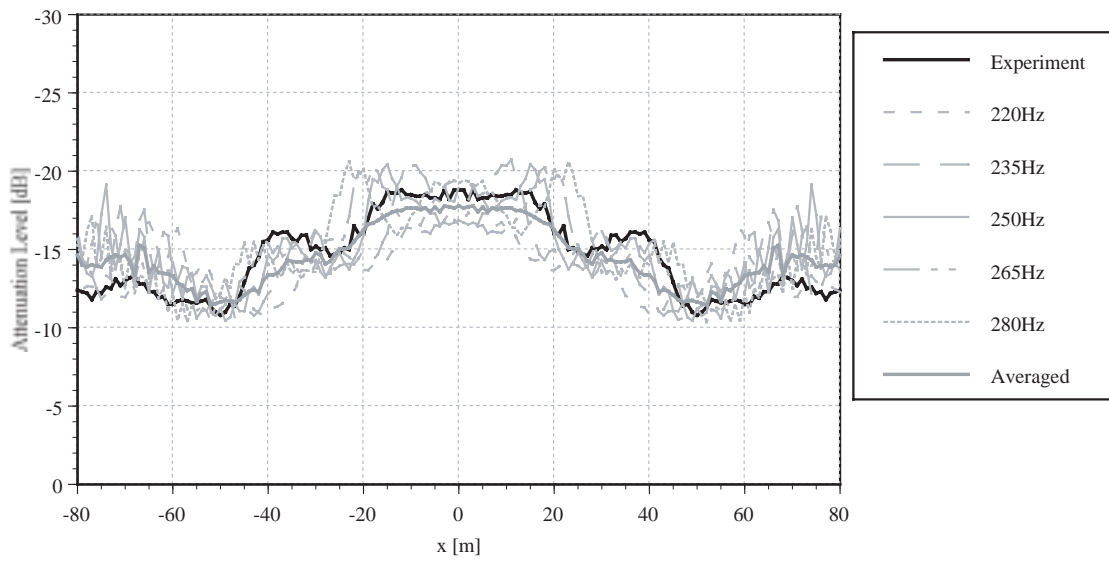


Fig. 4.9 Attenuation levels for Type 2 at 250Hz 1/3 octave-band.

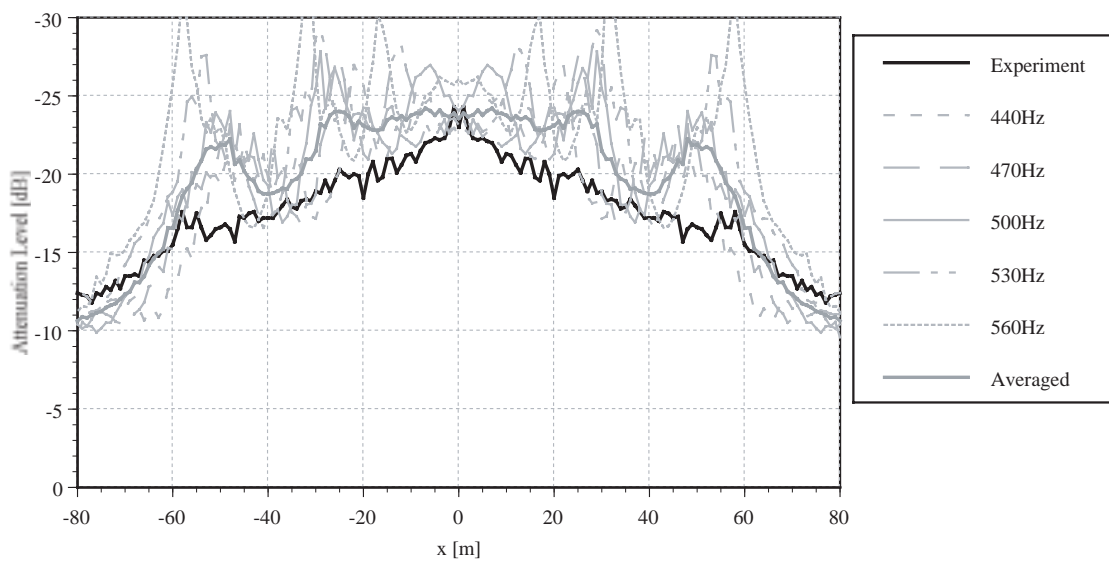


Fig. 4.10 Attenuation levels for Type 2 at 500Hz 1/3 octave-band.

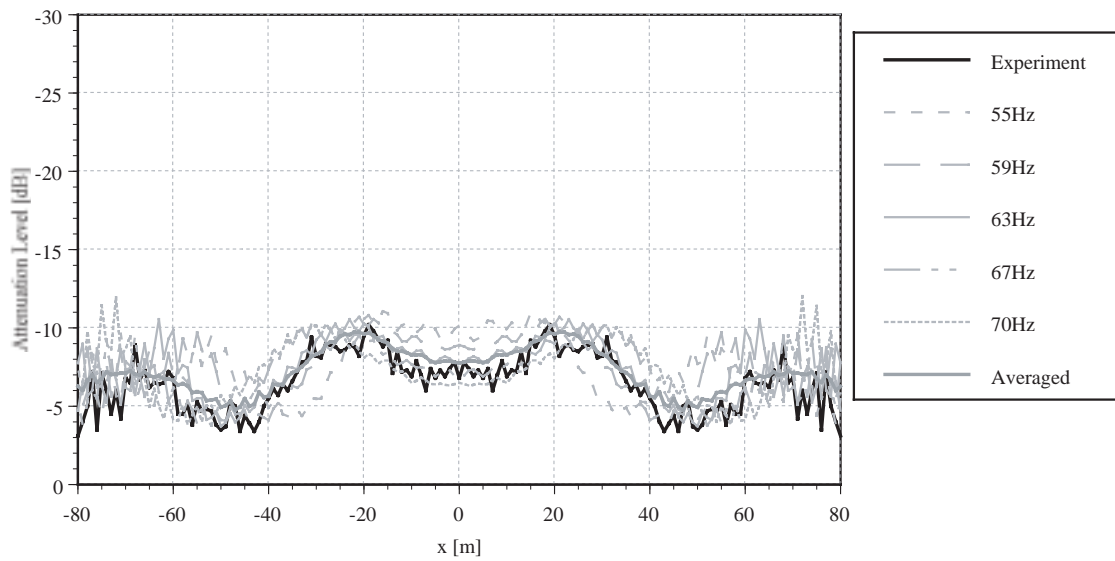


Fig. 4.11 Attenuation levels for Type 3 at 63Hz 1/3 octave-band.

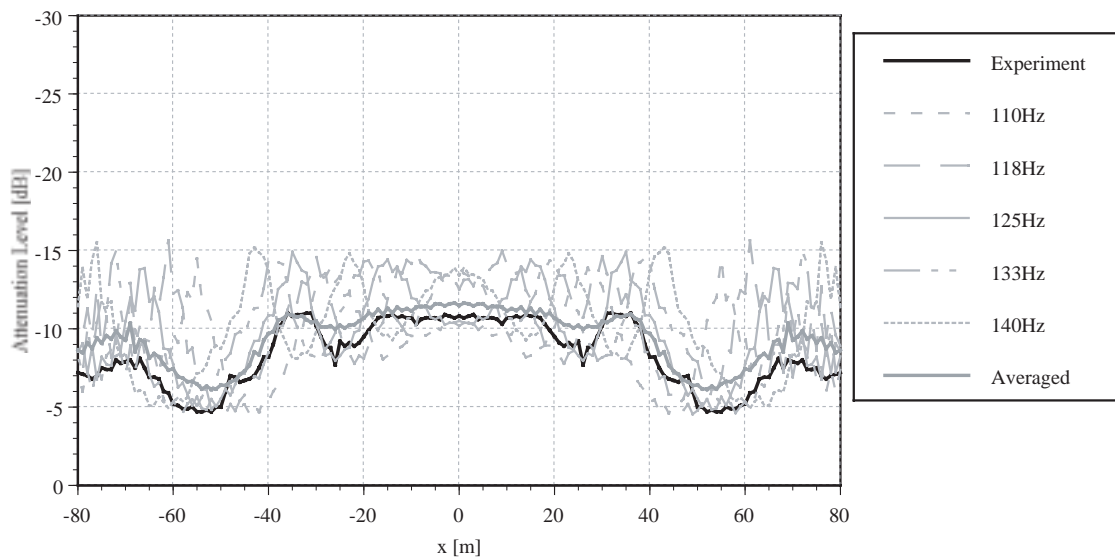


Fig. 4.12 Attenuation levels for Type 3 at 125Hz 1/3 octave-band.



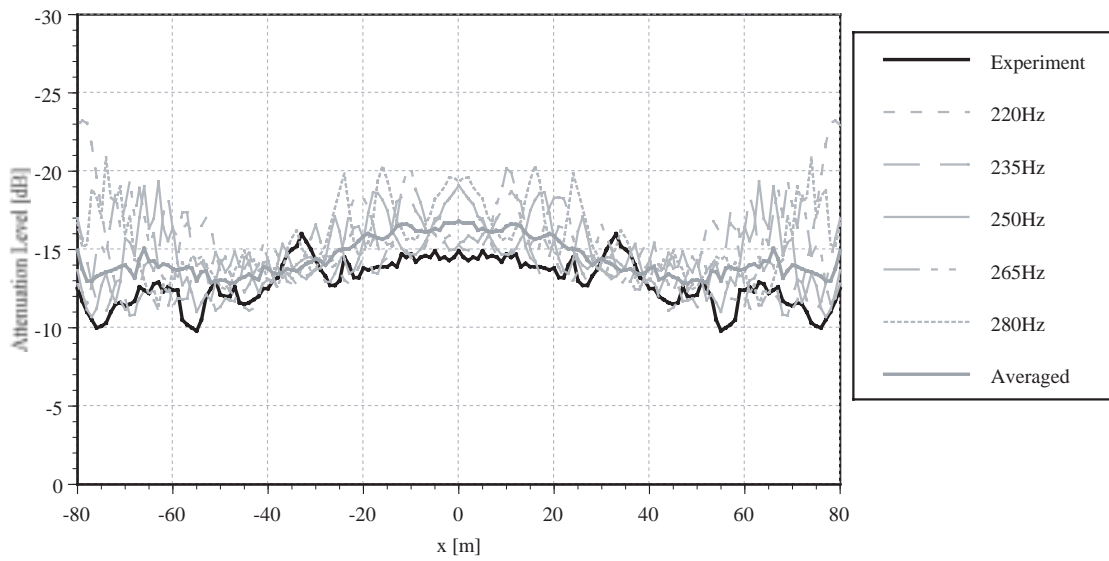


Fig. 4.13 Attenuation levels for Type 3 at 250Hz 1/3 octave-band.

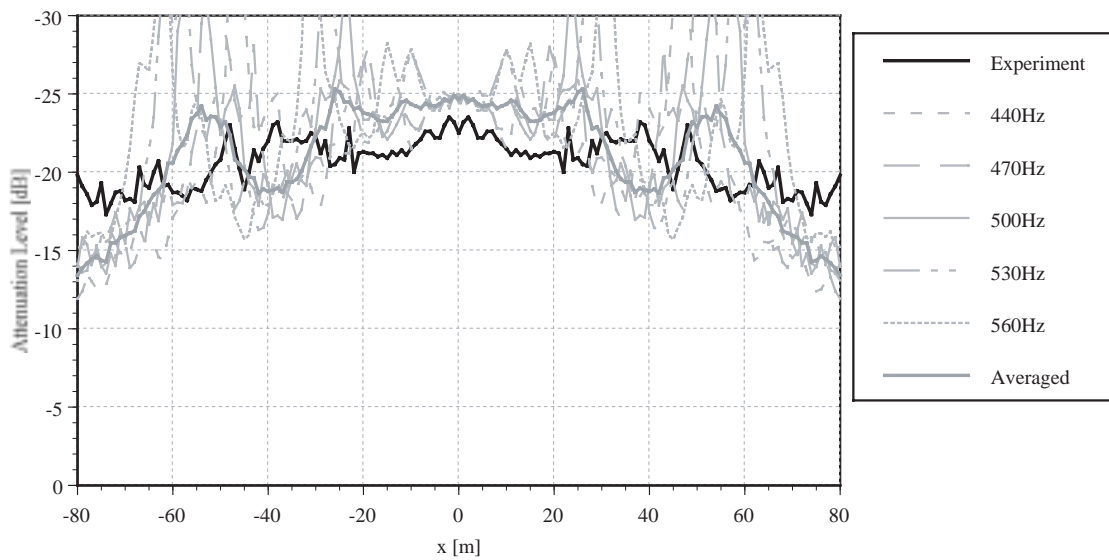


Fig. 4.14 Attenuation levels for Type 3 at 500Hz 1/3 octave-band.

### 4.3 側方回折波の影響を抑制するために必要な壁長さに関する検討

道路交通騒音の予測ではユニットパターン(予測点で観測される音圧の時刻暦)を求めることが基本となるが、通常は遮音壁を十分長いものと仮定した状態で求められる。しかし、数値解析においては有限長モデルを解析対象とするため遮音壁側端部から回りこむ側方回折波の影響が含まれることとなる。そこで本節では、側方回折波が受信点音圧に及ぼす影響を把握するとともに、側方回折波の影響を抑制するために必要な遮音壁長さについて、音源点・受信点の位置関係との関連で考察する。

#### 4.3.1 解析方法

完全反射性の地表面上に置かれた遮音壁と音源点、受信点列からなる解析モデルを Fig. 4.15 に示す。遮音壁は、中央から側端部までの長さ  $D$  を 30m から 130m まで 20m ごとに変化させた 6 ケースを想定する。壁から受信点列までの距離の違いによる影響をみるために、受信点列を 2.5m と 7.5m の 2 通り設定する。受信点は 1 m ごと設置している。また、先端改良型遮音壁のように遮音壁上方から回り込む

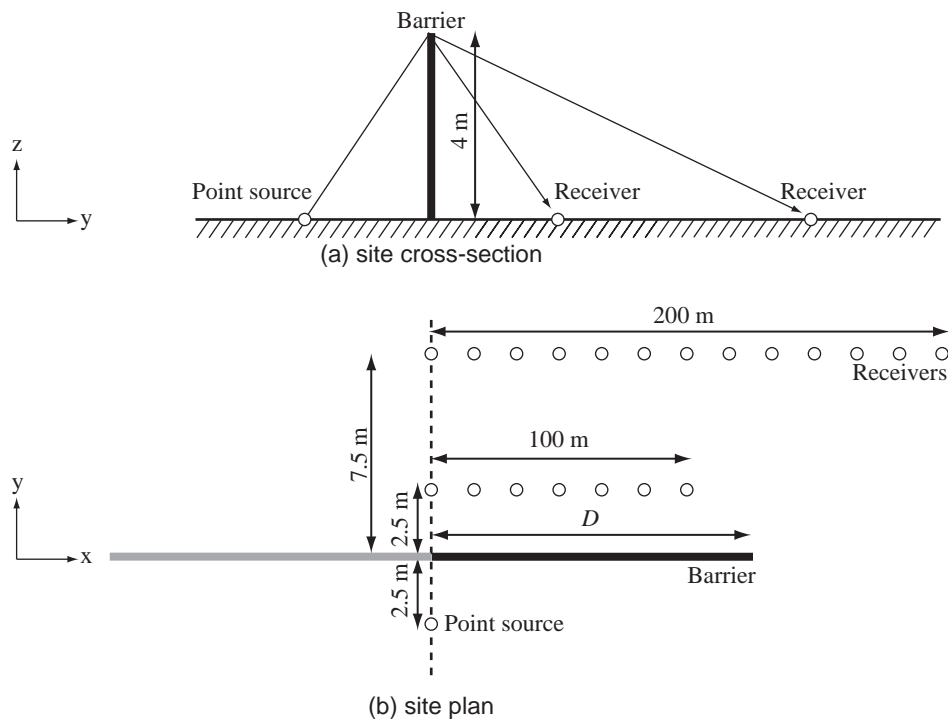


Fig. 4.15 Geometry of the numerical model : (a) site cross-section. (b) site plan.

回折波に対する減衰効果が高い場合には、相対的に側方回折波の影響が大きくなることが考えられる。そこで、遮音壁形状は厚み 0.1 m の直壁 (Type S) と張り出し長さ 0.5 m の張り出し型 (Type L) の 2 種類設定し、形状による違いを検討した。なお、境界条件は全面剛とする。また、要素サイズは 0.1 m とし、四角形一定要素を用いる。

#### 4.3.2 結果と考察

Type S の結果を Fig. 4.16, 4.17 に、Type L の結果を Fig. 4.18, 4.19 に示す。なお、結果は回折減衰量の値で、1/3 オクターブ帯域値である。

##### D の違いによる影響

どの結果でも、 $D$  とおよそ等しい受音点位置で揺らぎが見られ、これらは側方回折波の影響によると考えられる。これらの揺らぎは遮音壁中央から離れるにつれて振幅が大きくなり、 $D$  とおよそ等しい受音点位置を超えた辺りで急激に減衰効果が下がることがわかる。これより、 $D$  は受音点列長さと同程度以上必要であると言える。

##### 周波数の違いによる影響

急激に減衰効果が下がる受音点位置を周波数の違いにより比較すると、高周波数域になるほど側方回折波の影響は遮音壁中央からより離れた受音点で現れることがわかる。従って、低周波数ほど側方回折波の影響を受けやすいといえる。

##### 壁から受音点列までの距離の違いによる影響

受音点距離 7.5m の場合の方が、遮音壁中央からより離れた受音点で側方回折波の影響が現れることがわかる。従って、受音点列が遮音壁に近づくほど側方回折波の影響は大きいと考えられる。

##### 遮音壁形状の違いによる影響

張り出しによる減衰効果が最も大きい 500Hz 帯域の結果においても、張り出しの有無による側方回折波の影響の違いはほとんど見られない。

以上より、側方回折波の影響を抑制するためには  $D$  を受音点列長さ以上に設定する必要があること、低周波数域ほど、及び、受音点が遮音壁に近づくほどその影響は大きくなることがわかった。また、遮音壁の先端部形状は側方回折波の影響にはほとんど関与しないことが確認された。以上の検討結果を踏まえ、次章の検討では受音点長さと同しくなるように  $D$  を設定する。

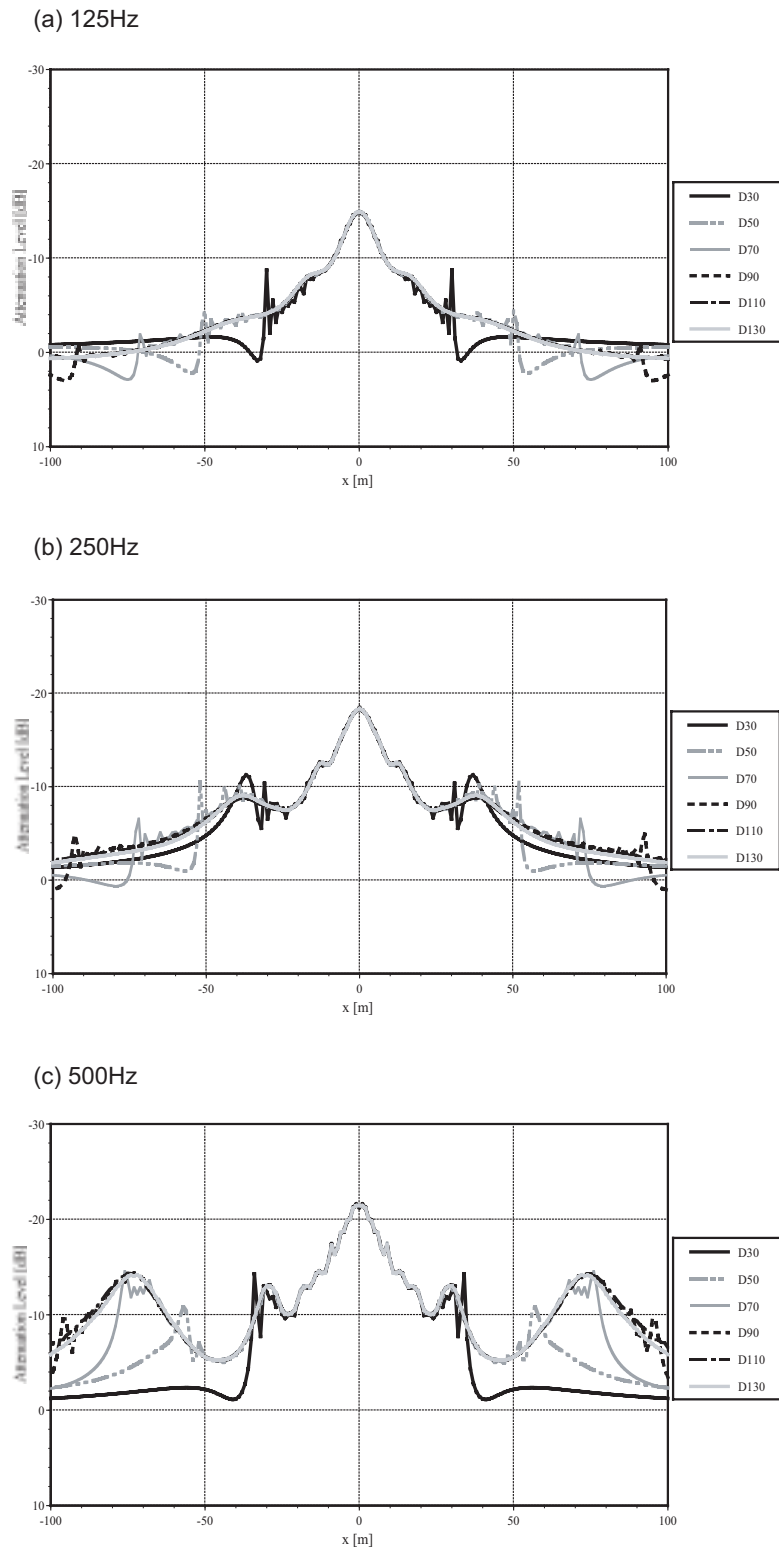


Fig. 4.16 Attenuation levels for Type S with changing side length  $D$  on condition that the distance from barrier to receivers is 2.5m, at (a) 125Hz, (b) 250Hz, and (c) 500Hz 1/3 octave-band.

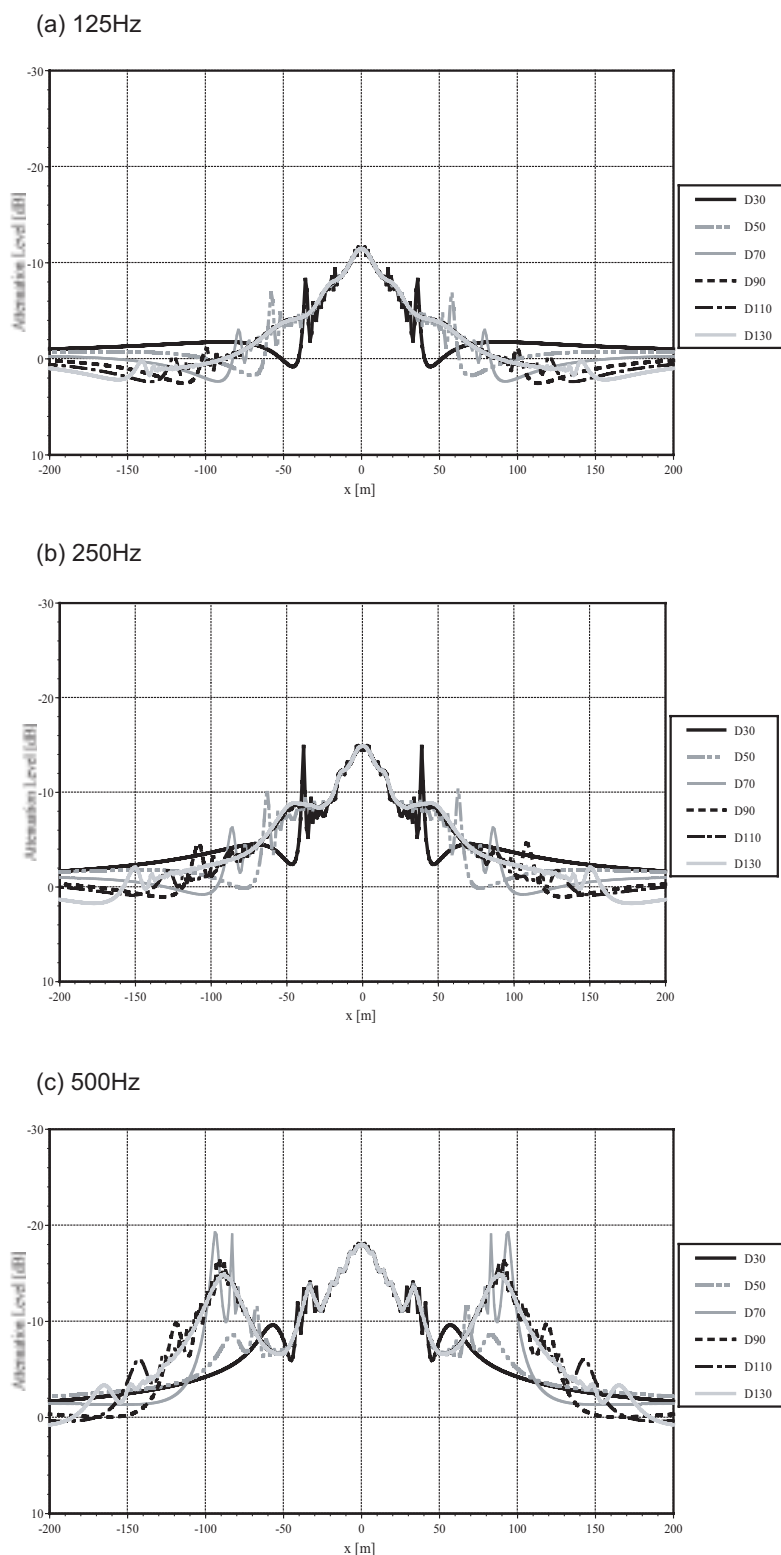


Fig. 4.17 Attenuation levels for Type S with changing side length  $D$  on condition that the distance from barrier to receivers is 7.5m, at (a) 125Hz, (b) 250Hz, and (c) 500Hz 1/3 octave-band.

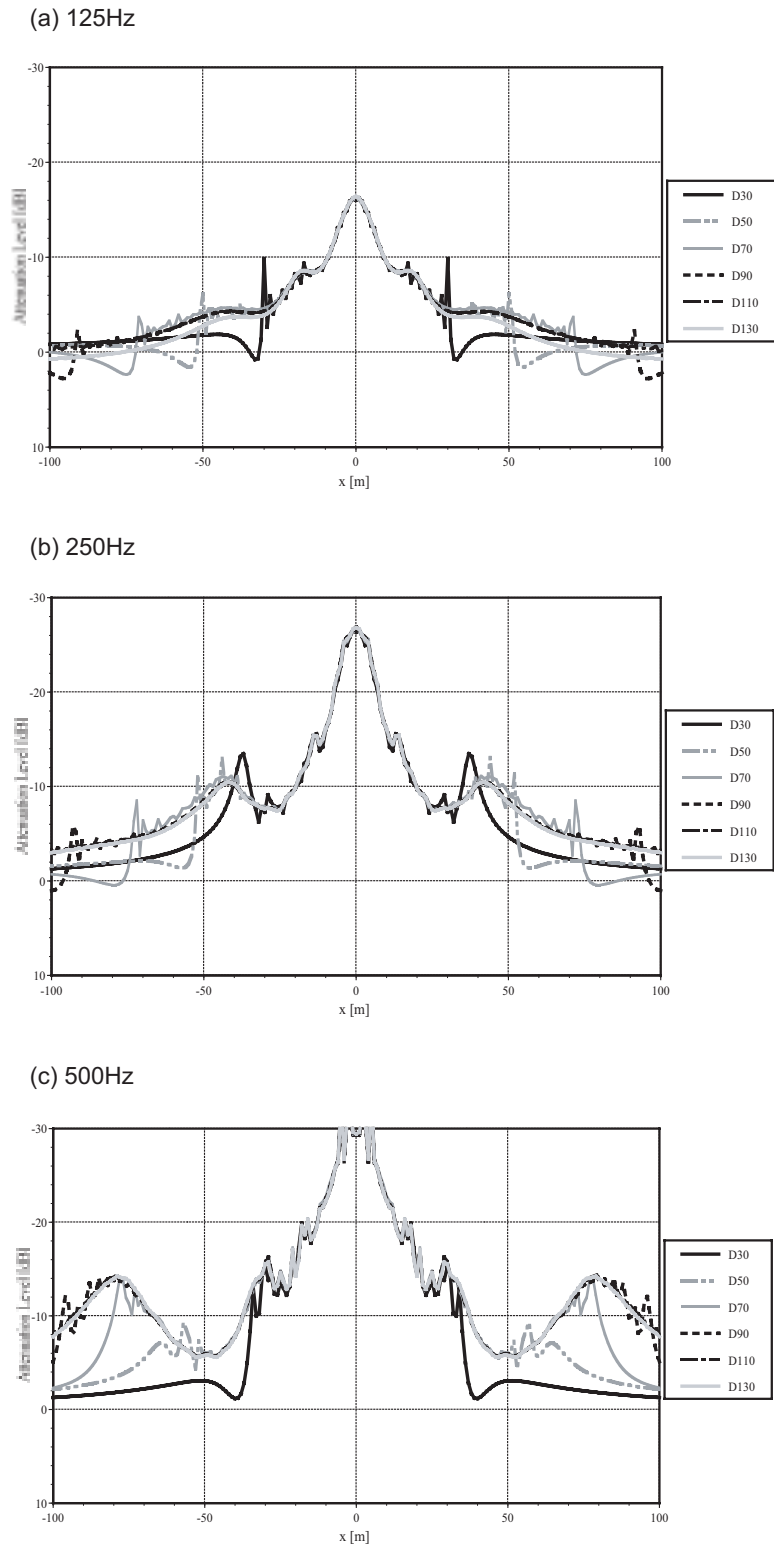


Fig. 4.18 Attenuation levels for Type L with changing side length  $D$  on condition that the distance from barrier to receivers is 2.5m, at (a) 125Hz, (b) 250Hz, and (c) 500Hz 1/3 octave-band.

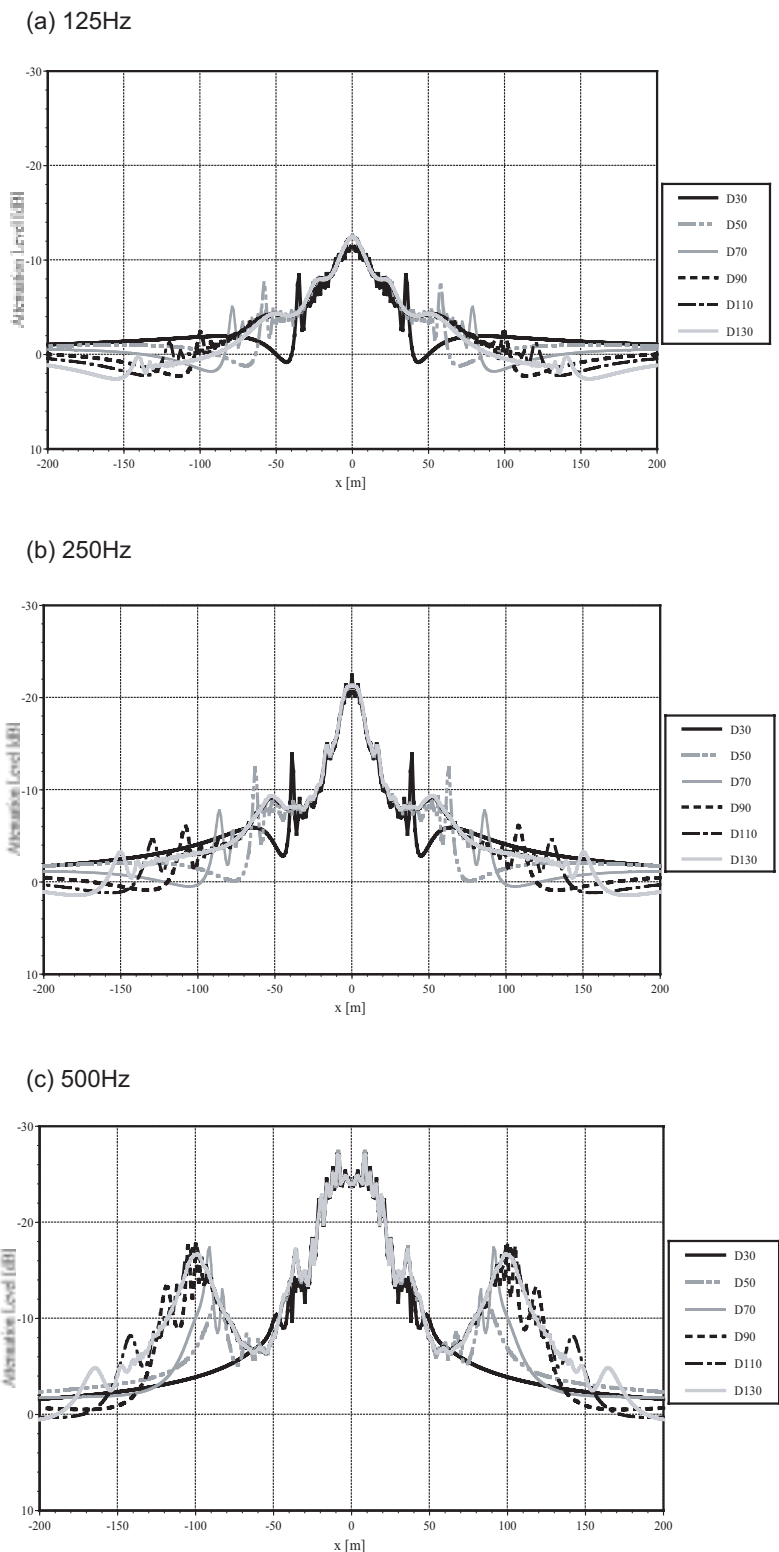


Fig. 4.19 Attenuation levels for Type L with changing side length  $D$  on condition that the distance from barrier to receivers is 7.5m, at (a) 125Hz, (b) 250Hz, and (c) 500Hz 1/3 octave-band.

#### 4.4 まとめ

本章では，縮尺模型実験による実測値との比較を通して FMBEM による遮音壁解析結果の妥当性を検証した後に，解析モデルの有限性に起因する側方回折波の回折減衰量に与える影響についてケーススタディを通して検討し，適切な解析モデルの設定について考察した．

縮尺模型実験による実測値との比較により，低周波数域では両者がよく対応すること，遮音壁上端部の2つのエッジからの回折波の影響により，高周波数域になるほど受音点位置によっては差が生じること，その差は張り出し型の場合により顕著に現れることがわかった．以上のように高周波数域では受音点位置によって顕著な差が生じる場合があるが，受音点全体の回折減衰量の挙動については遮音壁先端部の形状・音響特性によらず実測値と概ね一致することが示された．

次に，側方回折波の回折減衰量に与える影響についての検討を行なった．その結果，側方回折波の影響は低周波数域，及び壁に近い受音点においてより大きく現れることがわかった．また，遮音壁先端部の形状はほとんど関与しないことがわかった．側方回折波の影響を抑制するためには壁の長さを受音点列長さと同程度以上取る必要があることが示された．



## 第 5 章

# 減衰補正量の数値予測に関する検討

### 5.1 はじめに

2次元音場を想定した場合，減衰補正量は壁頂部から音源点及び受音点の方向（角度）のみに依存する指向特性によって表現できることが示唆されているが[12]，3次元音場においても同様の知見が得られれば減衰補正量の精緻な予測が可能となり有用であると考えられる．そこで本章では，3次元音場における減衰補正量の挙動，及びその指向特性について把握することを目的として数値解析により検討を行なう．

### 5.2 解析方法

完全反射性の地表面上に置かれた音源点・受音点からなる解析モデルを Fig. 5.1 に示す．受音点は壁と並行に等間隔に設置し，第 2 章で述べたユニットパターンを求める．ここで，遮音壁高さを  $h$ ，遮音壁から音源点までの距離を  $r_s$ ，遮音壁から受音点列までの距離を  $r_r$ ，受音点列の長さを  $R$  で表す．受音点列は遠近 2 条件（near, far）を設定した．また，壁頂部から音源点・受音点双方への方向（角度）を固定した条件で  $h$  を 3 水準（4m, 3m, 2m）を設定し，異なる  $h$  における減衰補正量を比較することで指向性について検討する．各条件のパラメータの値を Table 5.1 に示す．解析対象は Fig. 5.2 に示す 5 タイプを設定した．Type a と b はそれぞれ壁の厚みが 0 m と 0.1 m の直壁，Type c と d は張り出し型遮音壁（張り出し部分の長さ 0.5 m）で Type d の頂部は吸音面（完全吸音）としている．Type e は分岐型遮音壁である．Type a 以外は壁厚は全て 0.1 m，境界条件は Type d の頂部を除き全て剛境界とした．境界要素は四角形一定要素を用いており，サイズは壁厚を考慮して周波数によらず 0.1 m とした．解析は 1/9 オクターブ帯域中心周波数で行い，それらを合成して得られる 1/3 オクターブ帯域値で評価する．

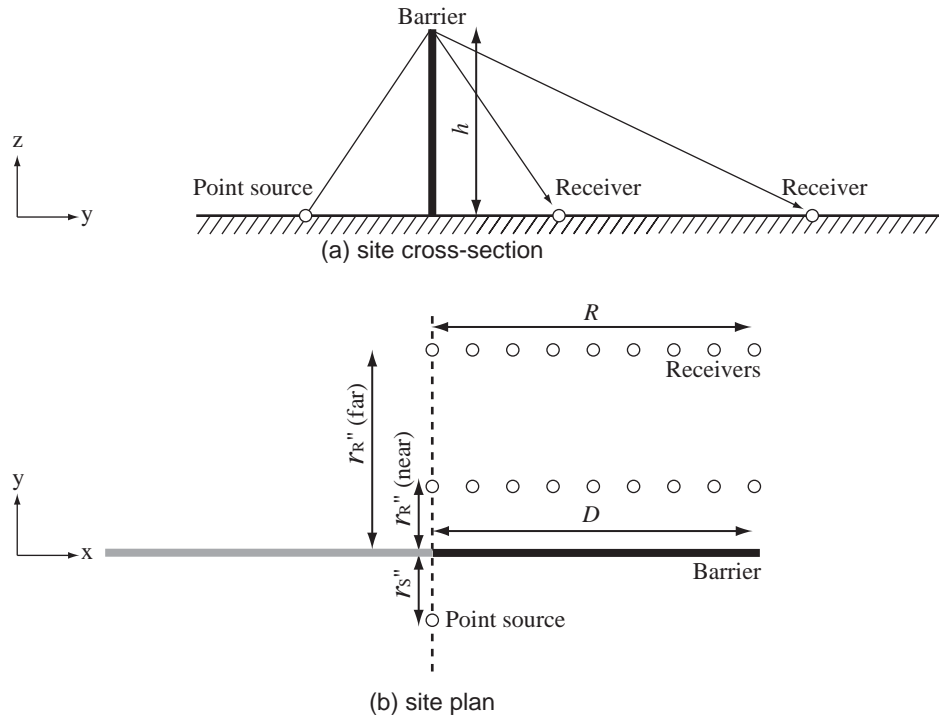


Fig. 5.1 Geometry of the numerical model: (a) site cross-section and (b) site plan.

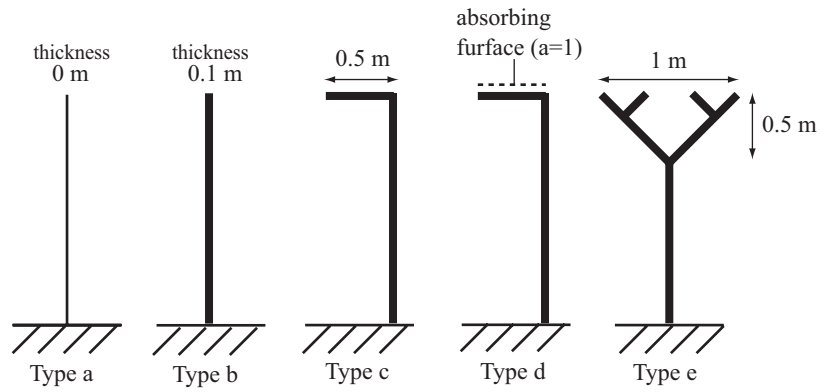


Fig. 5.2 Five types of barriers.  $a$  is absorption coefficient.

$h$	$r_s''$	$r_R''$ (near)	$r_R''$ (far)	$R$	$D$
4	2.5	2.5	7.5	100	100
3	1.875	1.875	5.625	75	75
2	1.25	1.25	3.75	50	50

Table 5.1 Relationship among  $h, r_s'', r_x'', R$  and  $D$  in the numerical model.

## 5.3 結果と考察

### 5.3.1 回折減衰量の挙動の把握

回折減衰量の結果を Fig. 5.3 ~ 5.20 に示す .

#### 125Hz

$h = 4 \text{ m}$  , 受音点列 *near* での 125Hz の結果 ( Fig 5.3 ) では , どのタイプも同様の挙動を示していること , Type d が減衰効果が最も大きく , Type a が最も小さいことがわかる . 壁高の違いをしてみると , 傾向には差が見られず , 値は概ね  $h = 4 \text{ m}$  の場合が最も小さくなっている . また , *far* と比較すると *near* の方が値が小さい , 即ち減衰効果が高いことがわかる . これは他の周波数帯域においても同様であった .

#### 250Hz

$h = 4 \text{ m}$  , 受音点列 *near* での 250Hz の結果 ( Fig 5.9 ) を見ると , 形状によって異なる挙動を示しており , 受音点位置によっては大きな揺らぎが見られる . 壁厚 0 m 及び 0.1 m の直壁 Type a, b を比較すると , Type b で見られる揺らぎが Type a では見られないことから , この揺らぎは壁の厚みに起因して生じると考えられる . また , 揺らぎの発生位置は遮音壁形状・壁高・受音点列までの距離によって各々異なることがわかる .

#### 500Hz

$h = 4 \text{ m}$  , 受音点列 *near* での 500Hz の結果 ( Fig 5.15 ) を見ると , 250Hz と同様に形状によって傾向が大きく異なることが分かる . また , 各タイプとも 250Hz と比べて揺らぎの数が多くなっているが , Type a では生じていないことが確認できる . また , Type d では正面入射時から側端部に近づくほど大きな揺らぎが生じなくなることが特徴的である . この傾向は他のタイプでは見られない . 壁高の違いについては , 揺らぎの生じる位置が壁高に応じて異なることが見て取れる . また , *near* における Type d では側端部に近づく揺らぎが生じないのに対して , *far* の条件では僅かに生じていることが確認できる .

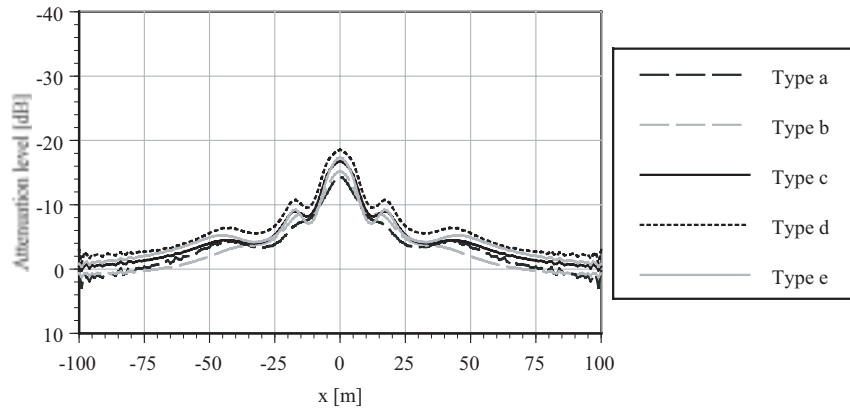


Fig. 5.3 Attenuation levels for five types of barriers at 125 Hz 1/3 octave band, on condition that  $h = 4\text{m}$ ,  $r_x'' = 2.5\text{m}$  (near).

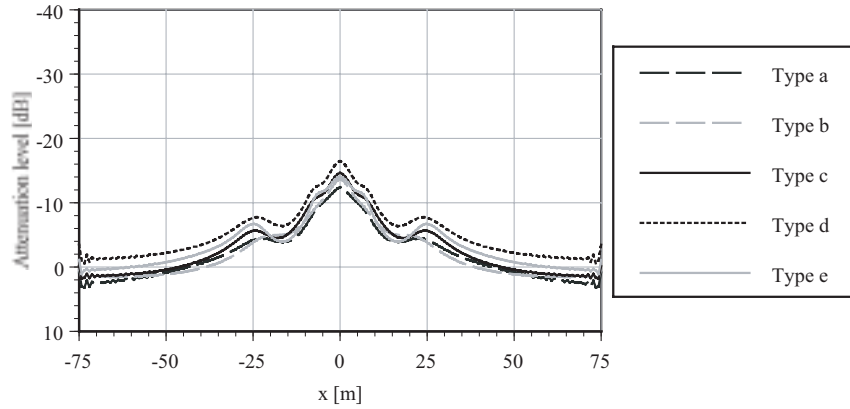


Fig. 5.4 Attenuation levels for five types of barriers at 125 Hz 1/3 octave band, on condition that  $h = 3\text{m}$ ,  $r_x'' = 1.875\text{m}$  (near).

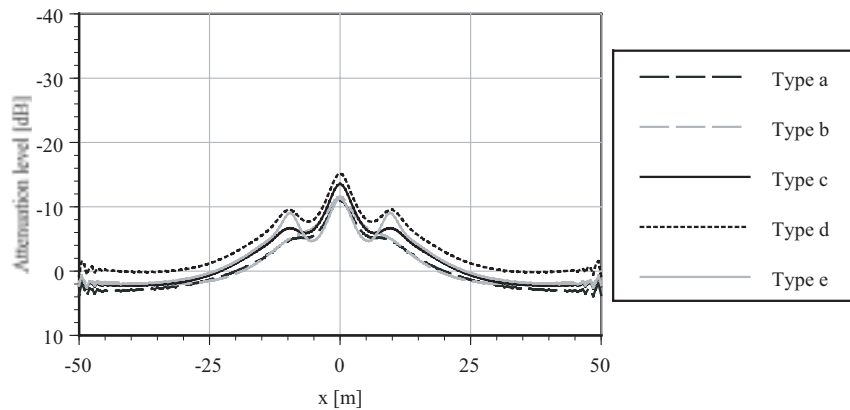


Fig. 5.5 Attenuation levels for five types of barriers at 125 Hz 1/3 octave band, on condition that  $h = 2\text{m}$ ,  $r_x'' = 1.25\text{m}$  (near).

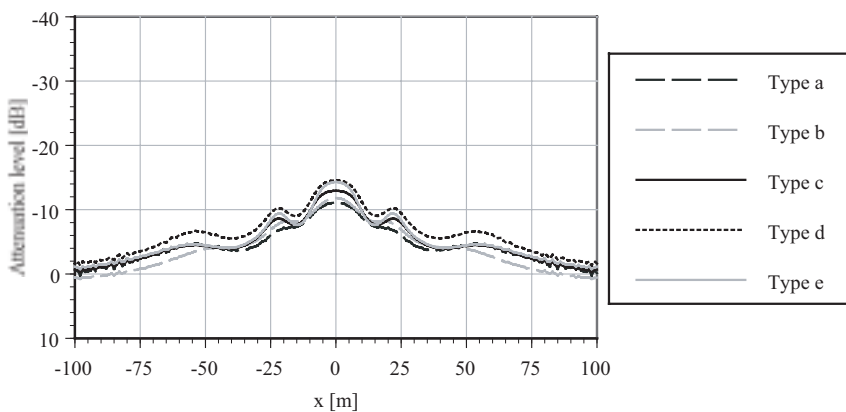


Fig. 5.6 Attenuation levels for five types of barriers at 125Hz 1/3 octave band, on condition that  $h = 4\text{m}$ ,  $r_x'' = 7.5\text{m}$  (far).

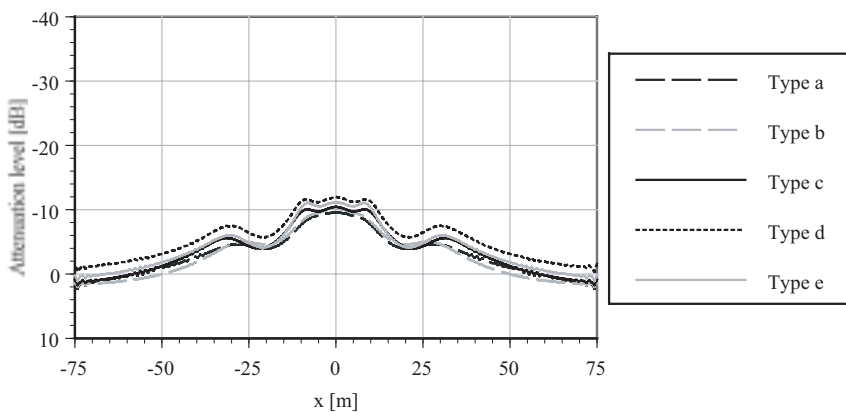


Fig. 5.7 Attenuation levels for five types of barriers at 125Hz 1/3 octave band, on condition that  $h = 3\text{m}$ ,  $r_x'' = 5.625\text{m}$  (far).

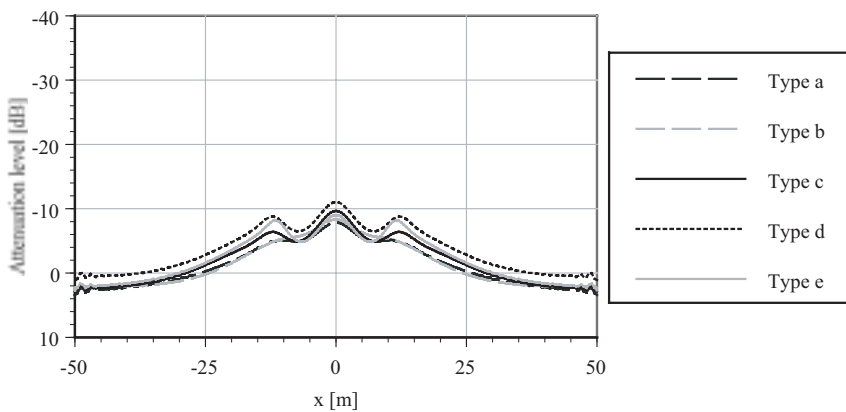


Fig. 5.8 Attenuation levels for five types of barriers at 125Hz 1/3 octave band, on condition that  $h = 2\text{m}$ ,  $r_x'' = 3.75\text{m}$  (far).

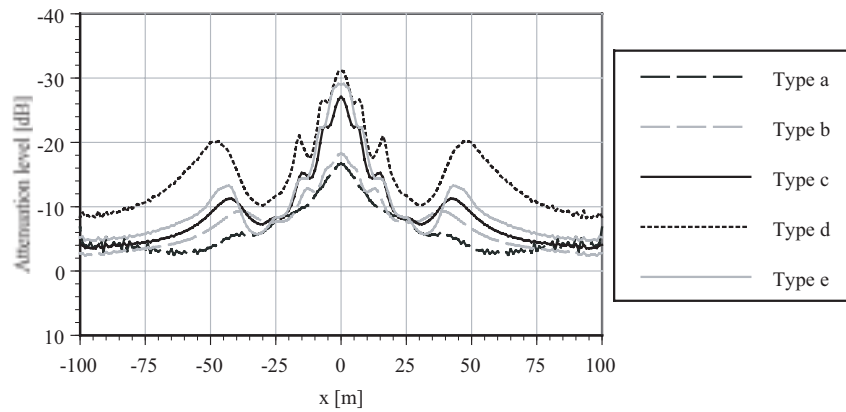


Fig. 5.9 Attenuation levels for five types of barriers at 250Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 4\text{m}$ ,  $r_x'' = 2.5\text{m}$  (near).

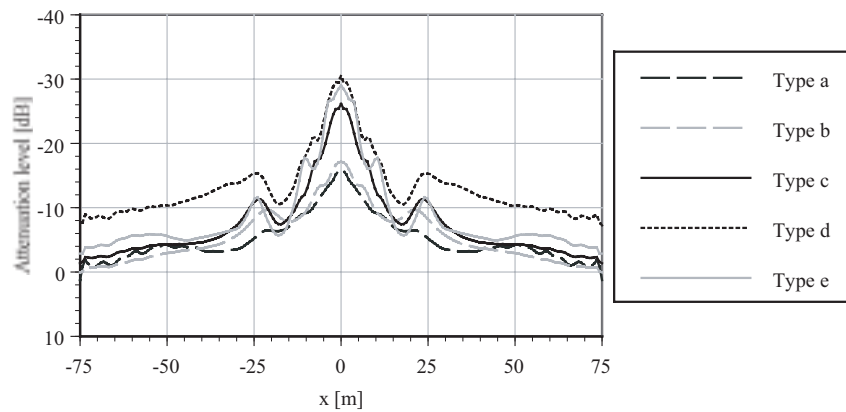


Fig. 5.10 Attenuation levels for five types of barriers at 250Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 3\text{m}$ ,  $r_x'' = 1.875\text{m}$  (near).

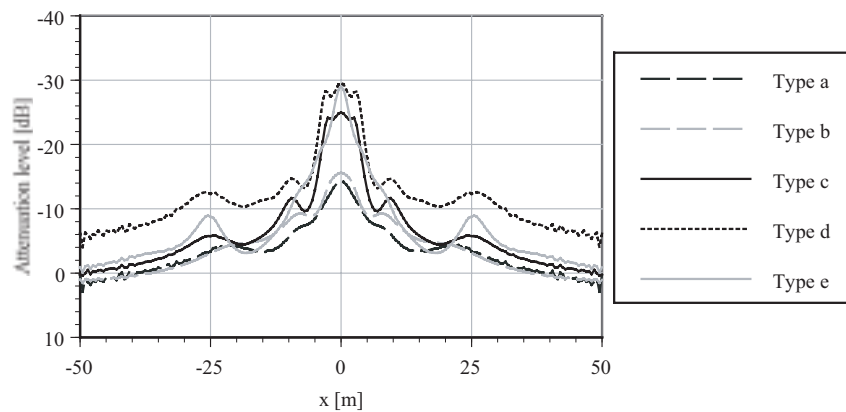


Fig. 5.11 Attenuation levels for five types of barriers at 250Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 2\text{m}$ ,  $r_x'' = 1.25\text{m}$  (near).

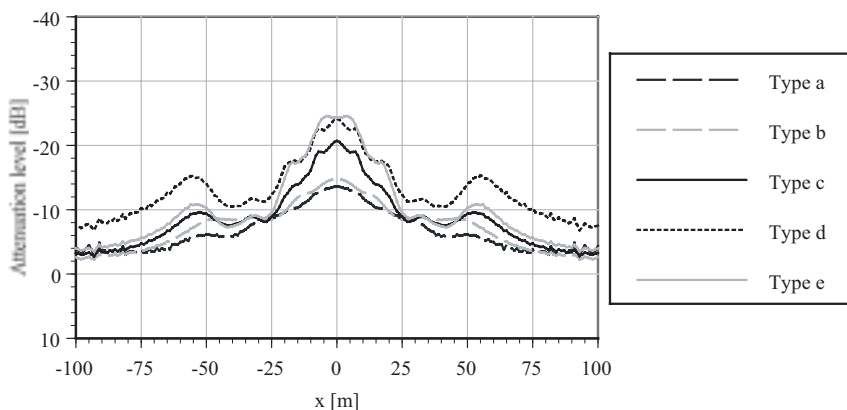


Fig. 5.12 Attenuation levels for five types of barriers at 250Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 4\text{m}$ ,  $r_x'' = 7.5\text{m}$  (far).

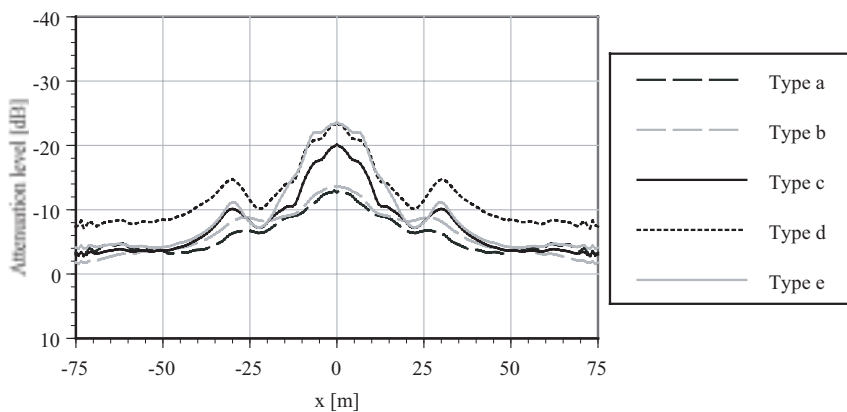


Fig. 5.13 Attenuation levels for five types of barriers at 250Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 3\text{m}$ ,  $r_x'' = 5.625\text{m}$  (far).

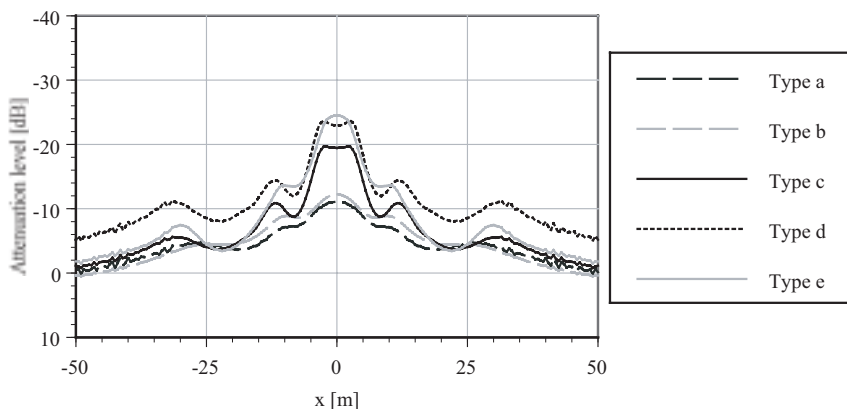


Fig. 5.14 Attenuation levels for five types of barriers at 250Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 2\text{m}$ ,  $r_x'' = 3.75\text{m}$  (far).

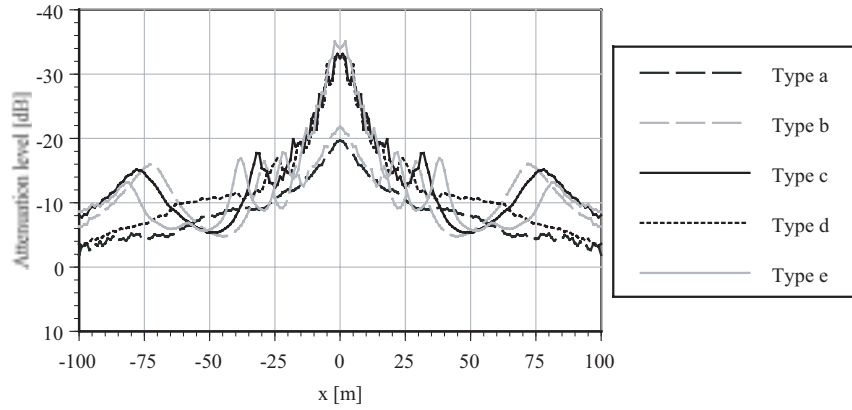


Fig. 5.15 Attenuation levels for five types of barriers at 500Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 4\text{m}$ ,  $r_x'' = 2.5\text{m}$  (near).

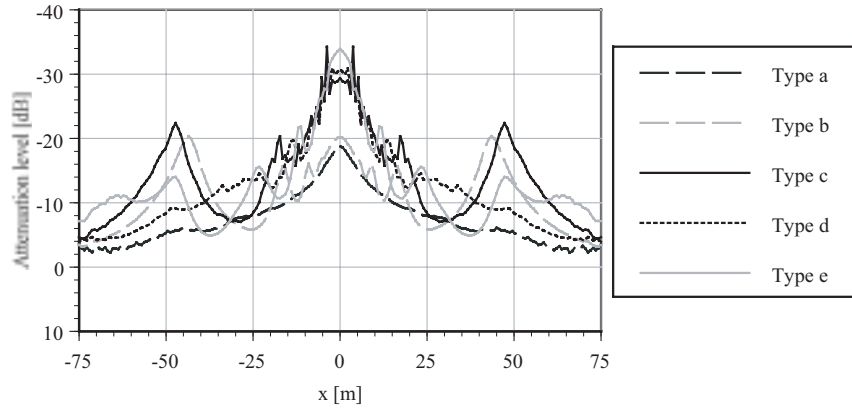


Fig. 5.16 Attenuation levels for five types of barriers at 500Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 3\text{m}$ ,  $r_x'' = 1.875\text{m}$  (near).

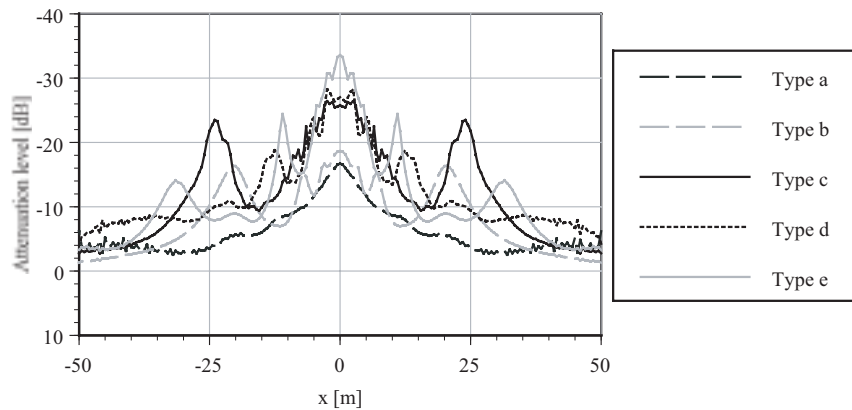


Fig. 5.17 Attenuation levels for five types of barriers at 500Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 2\text{m}$ ,  $r_x'' = 1.25\text{m}$  (near).



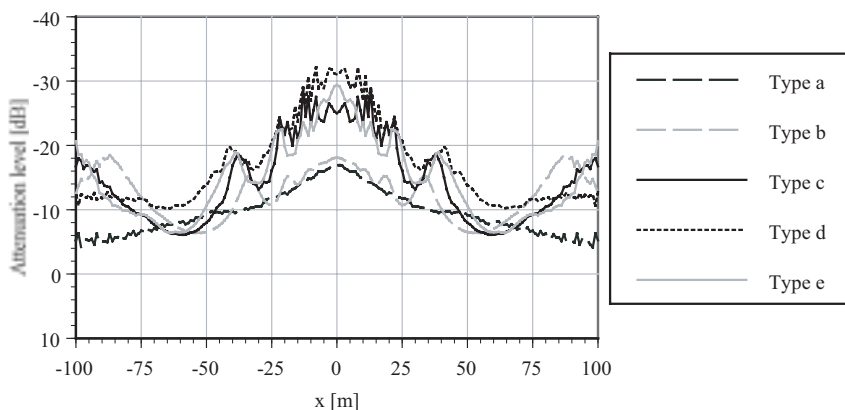


Fig. 5.18 Attenuation levels for five types of barriers at 500Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 4\text{m}$ ,  $r_x'' = 7.5\text{m}$  (far).

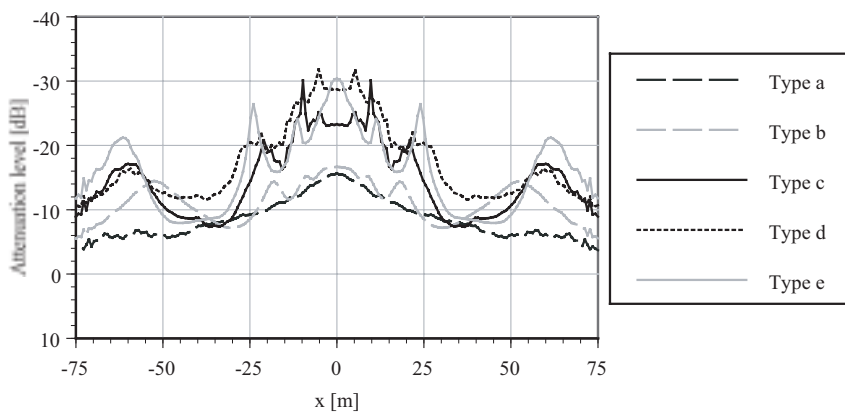


Fig. 5.19 Attenuation levels for five types of barriers at 500Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 3\text{m}$ ,  $r_x'' = 5.625\text{m}$  (far).

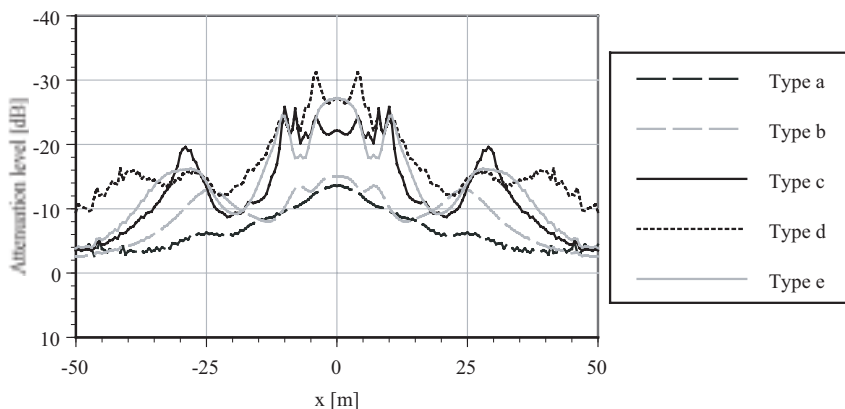


Fig. 5.20 Attenuation levels for five types of barriers at 500Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 2\text{m}$ ,  $r_x'' = 3.75\text{m}$  (far).

### 5.3.2 減衰補正量の挙動の把握

Type c,d,e の減衰補正量を Fig. 5.21 ~ 5.38 に示す。なお、減衰補正量は Type b の回折減衰量との差として算出した。

#### 125Hz

Fig. 5.21 を見ると、遮音壁中央付近で若干の変動が見られるものの、受音点位置によらず概ね一定の値となっていることがわかる。他のケースでも同様の傾向が確認できる。また、タイプによる差が少ないこと、頂部吸音の影響により Type d の減衰効果が一番高いことが見て取れる。また、壁高の違い、受音点列までの距離の違いによる影響はあまり見られない。

#### 250Hz

正面入射付近で減衰効果が高いこと、遮音壁中央から離れた受音点で大きく値が変動することが見て取れる。また、概ね Type d の減衰効果が最も大きくなっているのは 125Hz の場合と同様であるが、壁高の違い、受音点列までの距離の違いによる影響も見られる。概して、受音点列 *near* の場合の方が値の変動が大きいことがわかる。

#### 500Hz

概ね、正面入射付近の減衰効果が一番高いこと、正面入射付近では細かい揺らぎが見られるのに対し、遮音壁中央から離れた受音点では変動の周期が大きくなることがわかる。また、全体的には形状の違いにより傾向が異なるのに対して、受音点列 *near* の正面入射付近ではタイプによる差異が比較的少ないことが確認できる。一方、受音点列 *far* ではタイプによって正面入射付近の挙動が大きく異なる。また、壁高、及び受音点列までの距離の影響も顕著であり、250Hz の場合と同様、受音点列 *near* の場合に値が大きく変動する傾向が見られる。

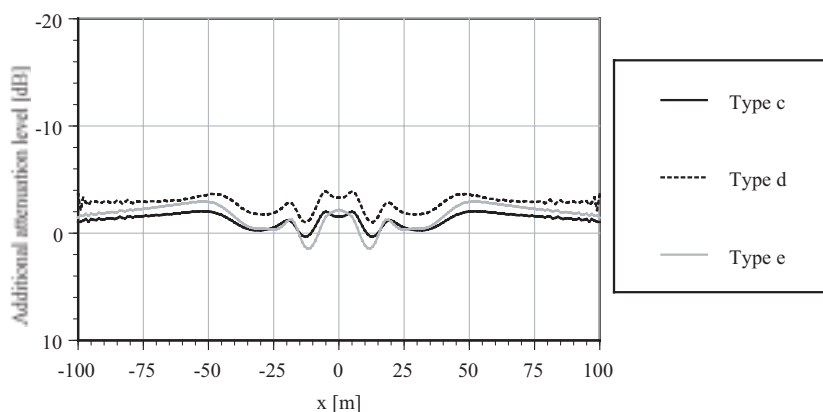


Fig. 5.21 Additional attenuation levels for three types of barriers at 125Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 4\text{m}$ ,  $r_x'' = 2.5\text{m}$  (near).

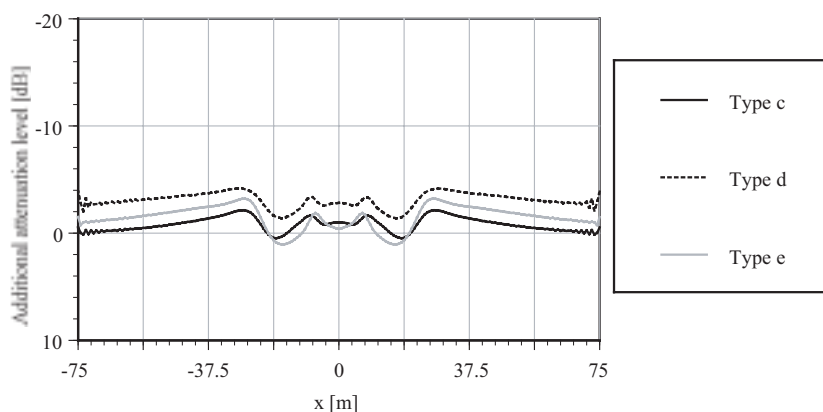


Fig. 5.22 Additional attenuation levels for three types of barriers at 125Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 3\text{m}$ ,  $r_x'' = 1.875\text{m}$  (near).

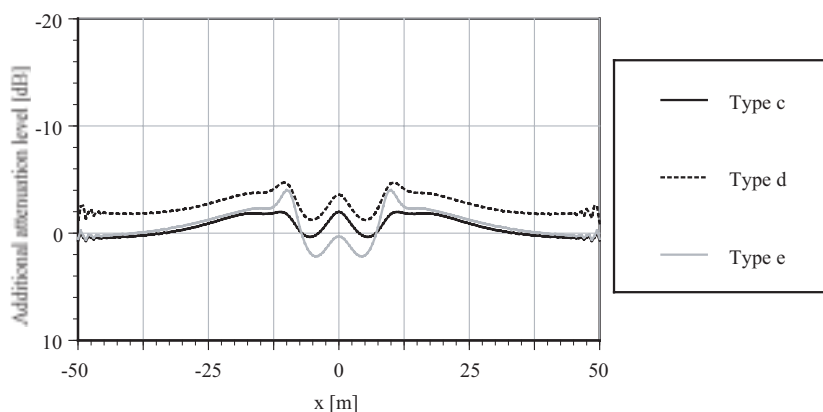


Fig. 5.23 Additional attenuation levels for three types of barriers at 125Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 2\text{m}$ ,  $r_x'' = 1.25\text{m}$  (near).

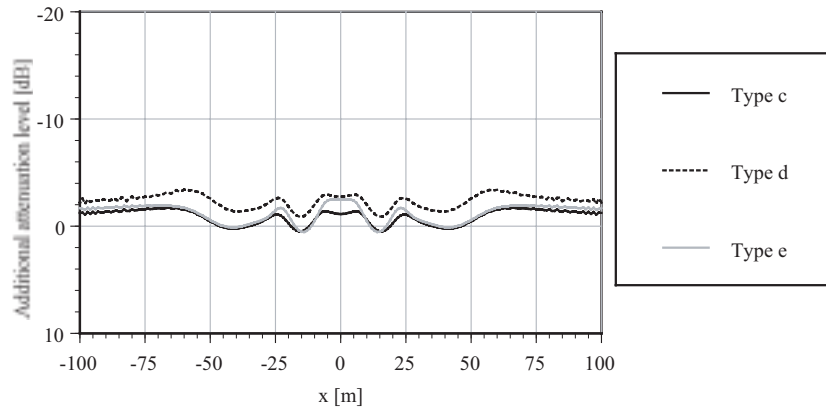


Fig. 5.24 Additional attenuation levels for three types of barriers at 125Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 4\text{m}$ ,  $r_x'' = 7.5\text{m}$  (far).

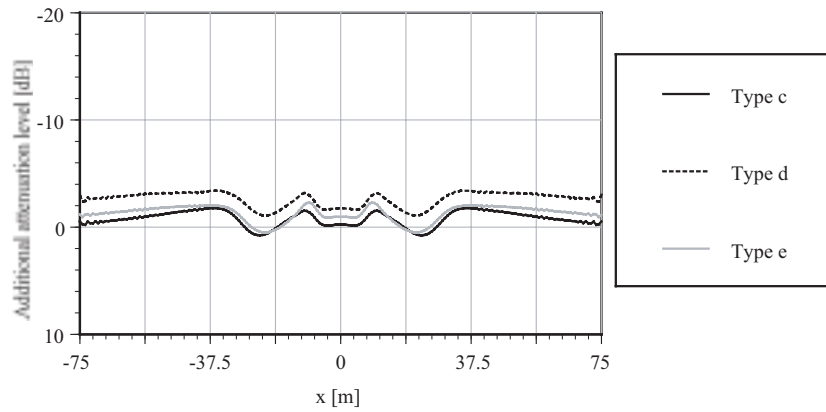


Fig. 5.25 Additional attenuation levels for three types of barriers at 125Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 3\text{m}$ ,  $r_x'' = 5.625\text{m}$  (far).

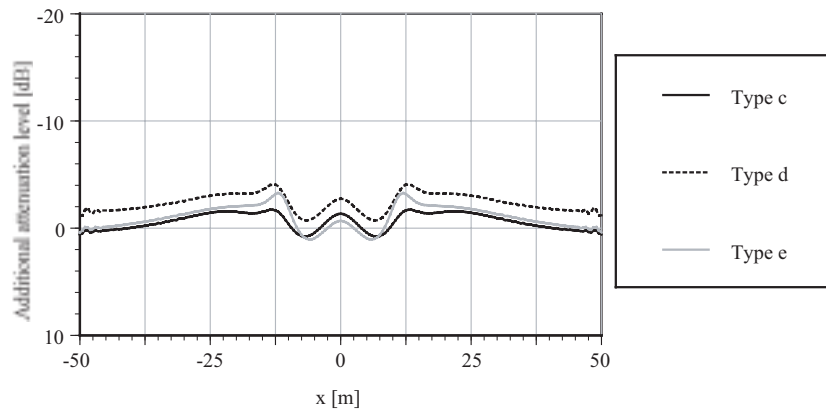


Fig. 5.26 Additional attenuation levels for three types of barriers at 125Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 2\text{m}$ ,  $r_x'' = 3.75\text{m}$  (far).

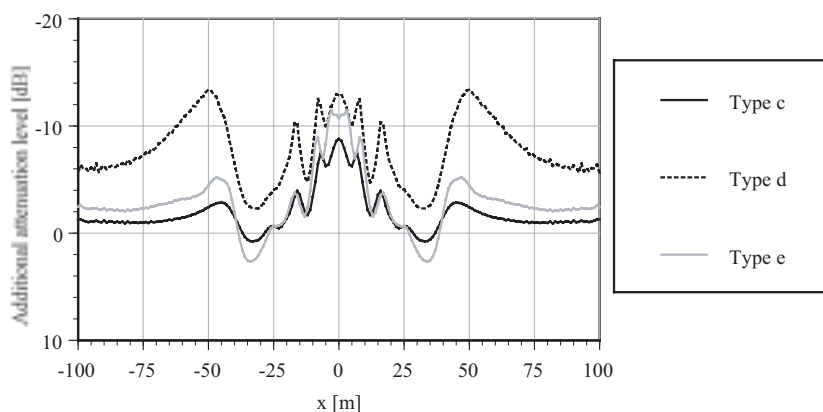


Fig. 5.27 Additional attenuation levels for three types of barriers at 250Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 4\text{m}$ ,  $r_x'' = 2.5\text{m}$  (near).

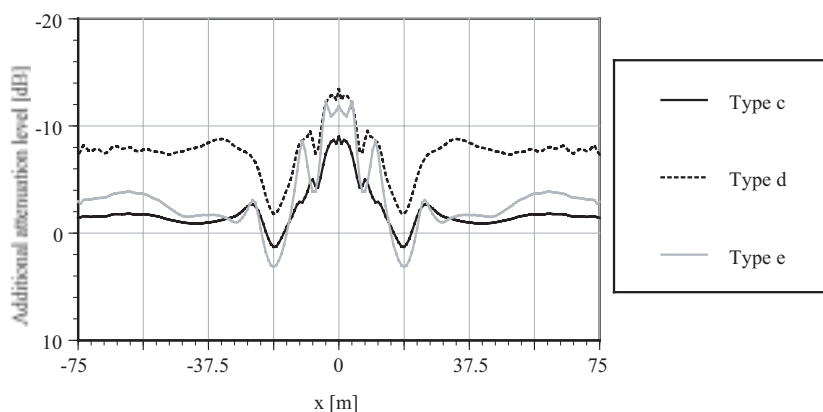


Fig. 5.28 Additional attenuation levels for three types of barriers at 250Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 3\text{m}$ ,  $r_x'' = 1.875\text{m}$  (near).

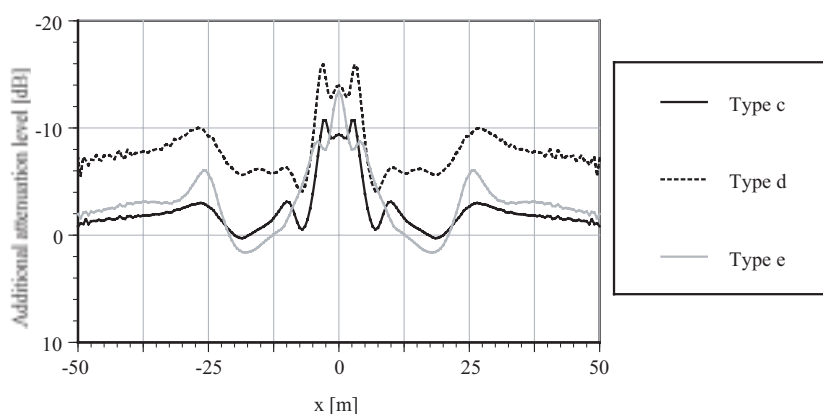


Fig. 5.29 Additional attenuation levels for three types of barriers at 250Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 2\text{m}$ ,  $r_x'' = 1.25\text{m}$  (near).

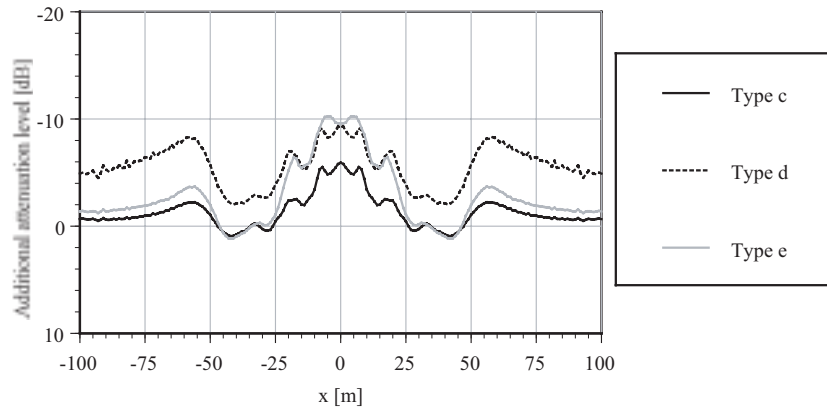


Fig. 5.30 Additional attenuation levels for three types of barriers at 250Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 4\text{m}$ ,  $r_x'' = 7.5\text{m}$  (far).

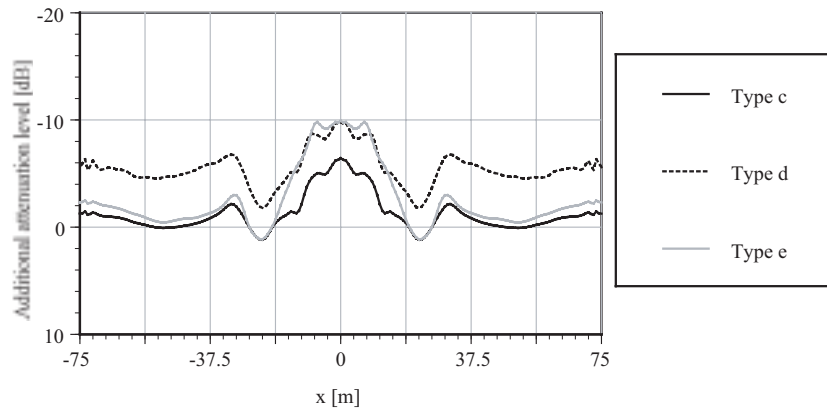


Fig. 5.31 Additional attenuation levels for three types of barriers at 250Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 3\text{m}$ ,  $r_x'' = 5.625\text{m}$  (far).

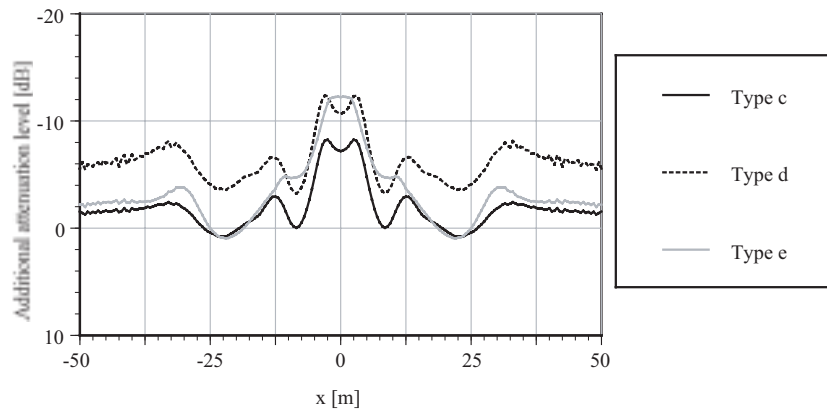


Fig. 5.32 Additional attenuation levels for three types of barriers at 250Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 2\text{m}$ ,  $r_x'' = 3.75\text{m}$  (far).

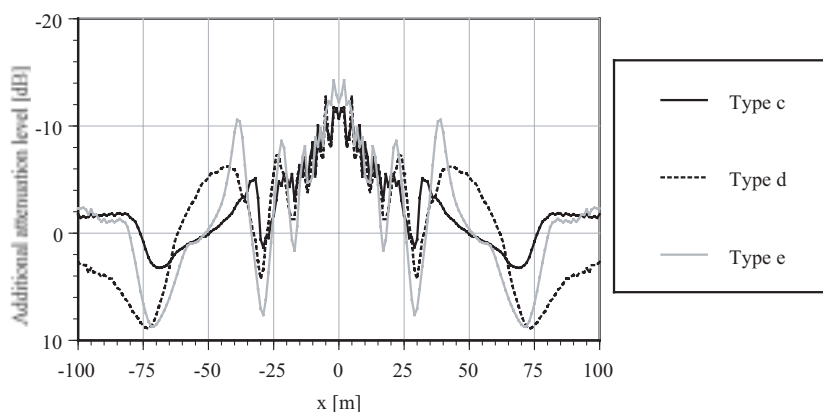


Fig. 5.33 Additional attenuation levels for three types of barriers at 500Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 4\text{m}$ ,  $r_x'' = 2.5\text{m}$  (near).

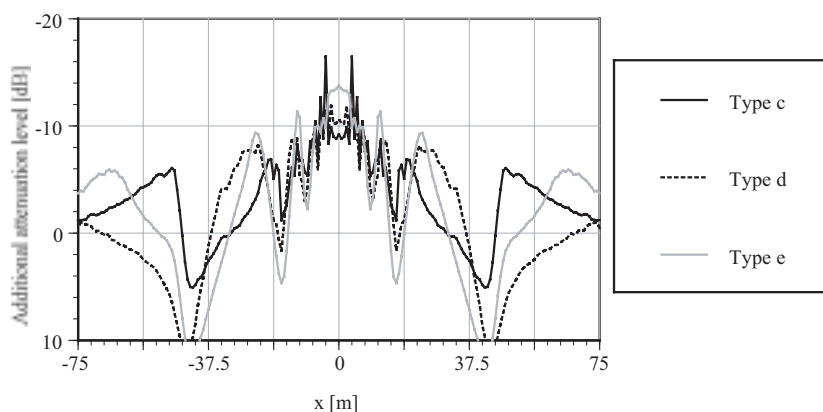


Fig. 5.34 Additional attenuation levels for three types of barriers at 500Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 3\text{m}$ ,  $r_x'' = 1.875\text{m}$  (near).

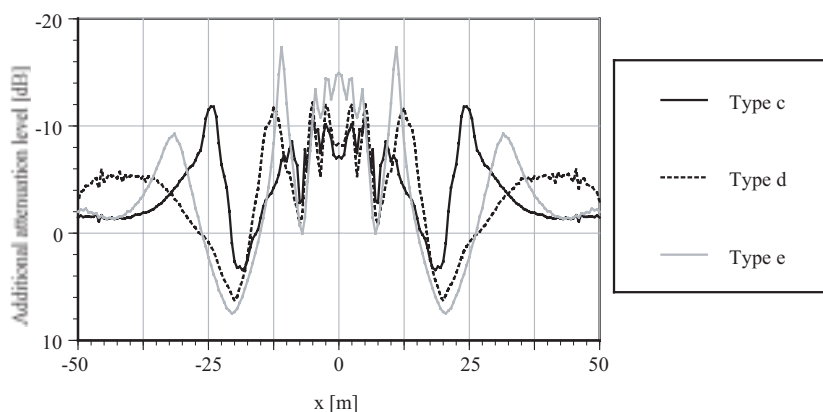


Fig. 5.35 Additional attenuation levels for three types of barriers at 500Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 2\text{m}$ ,  $r_x'' = 1.25\text{m}$  (near).

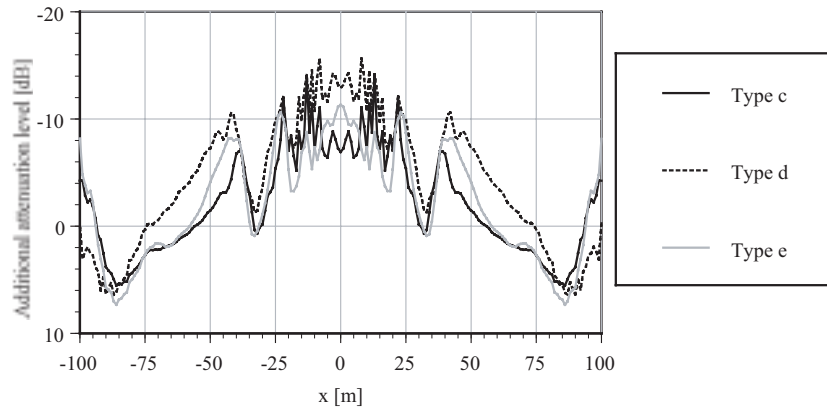


Fig. 5.36 Additional attenuation levels for three types of barriers at 500Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 4\text{m}$ ,  $r_x'' = 7.5\text{m}$  (far).

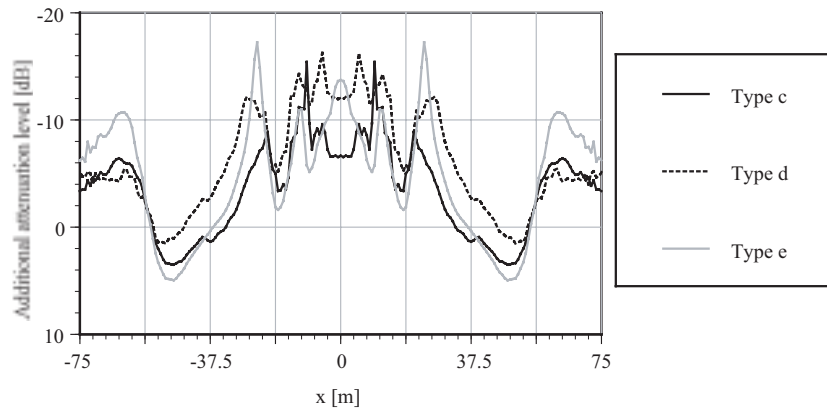


Fig. 5.37 Additional attenuation levels for three types of barriers at 500Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 3\text{m}$ ,  $r_x'' = 5.625\text{m}$  (far).

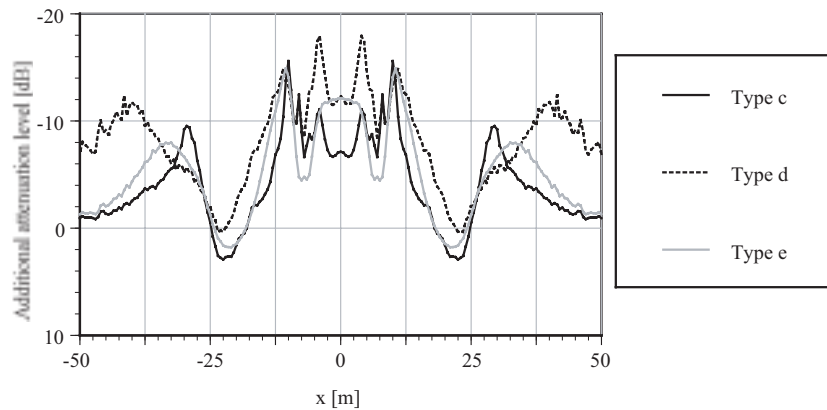


Fig. 5.38 Additional attenuation levels for three types of barriers at 500Hz 1/3 octave-band, on condition that  $h = 2\text{m}$ ,  $r_x'' = 3.75\text{m}$  (far).



## 5.3.3 減衰補正量の指向性に関する検討

減衰補正量の指向性について検討するため、壁高の異なる条件での各々の減衰補正量の差を算出した。壁高の差の条件 ( $3\text{ m} - 4\text{ m}$ )、( $2\text{ m} - 3\text{ m}$ )、( $2\text{ m} - 4\text{ m}$ ) での減衰補正量の差を Fig. 5.39 ~ 5.56 に示す。

125Hz では形状によらず 2dB 以内に納まっていることがわかる。また、250Hz では、受音点位置によっては 5dB 程度差が見られるものの、正面位置付近の受音点においては概ね 2dB 以内に納まっている。これは、2次元音場における正面入射時の減衰補正量が角度指向性を持つという既往の知見 [12] と一致する結果である。一方、500Hz では、条件によって傾向が異なり、( $3\text{ m} - 4\text{ m}$ ) 及び ( $2\text{ m} - 3\text{ m}$ ) の場合は受音点位置によっては大きな差が生じているが、正面位置付近では 2dB 以内の差に納まっていると言える。一方、( $2\text{ m} - 4\text{ m}$ ) では正面位置でも形状によって 5dB 程度の差が生じていることがわかるが、遮音壁中央面から遠い受音点と比較すると小さな値となっていることが確認された。

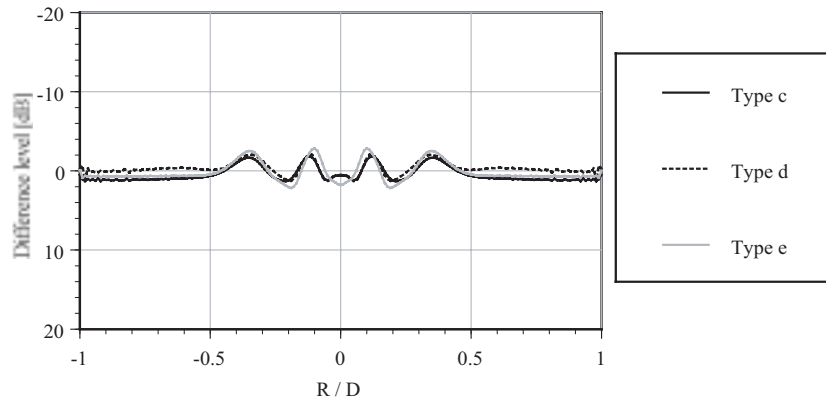


Fig. 5.39 Difference between additional attenuation levels for three types of barriers of two different heights (3m - 4m) and  $r_x''$  (near) at 125Hz 1/3 octave-band.

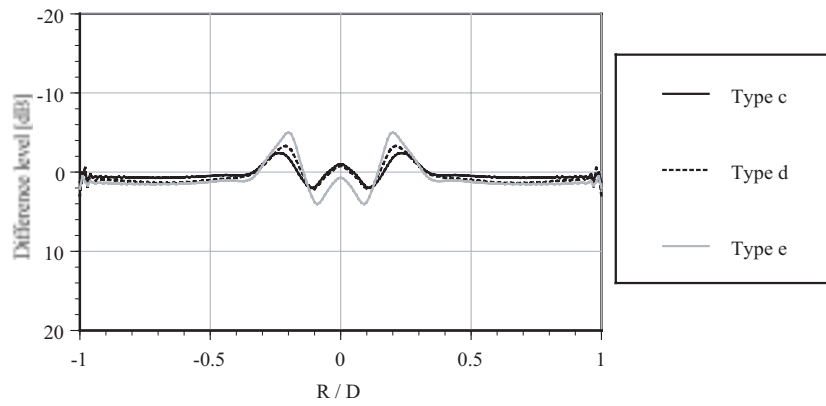


Fig. 5.40 Difference between additional attenuation levels for three types of barriers of two different heights (2m - 3m) and  $r_x''$  (near) at 125Hz 1/3 octave-band.

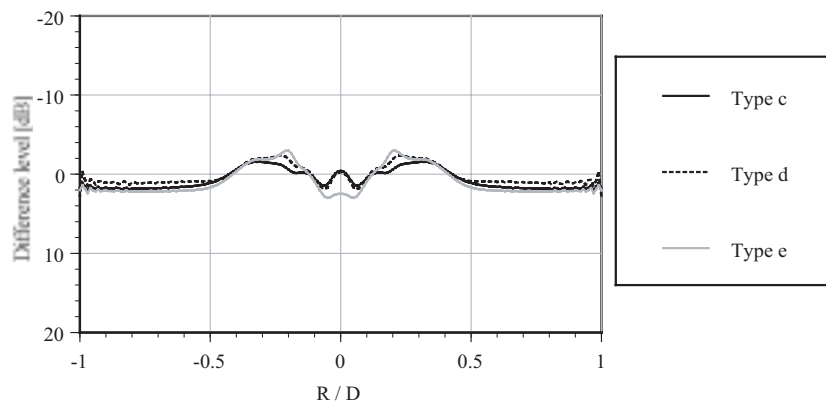


Fig. 5.41 Difference between additional attenuation levels for three types of barriers of two different heights (2m - 4m) and  $r_x''$  (near) at 125Hz 1/3 octave-band.

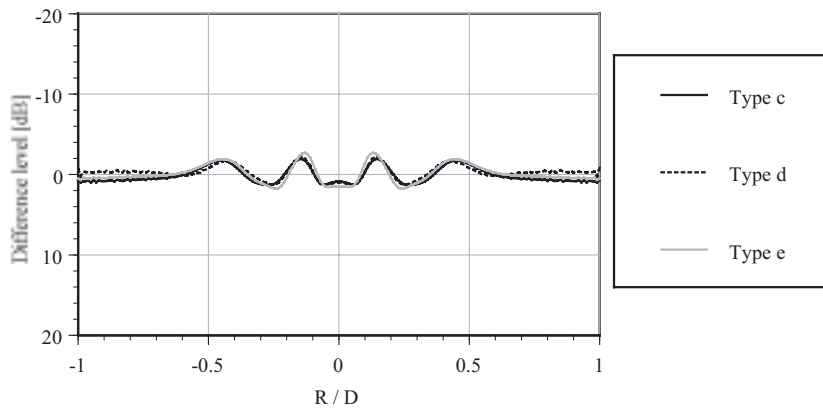


Fig. 5.42 Difference between additional attenuation levels for three types of barriers of two different heights (3m - 4m) and  $r_x''$  (far) at 125Hz 1/3 octave-band.

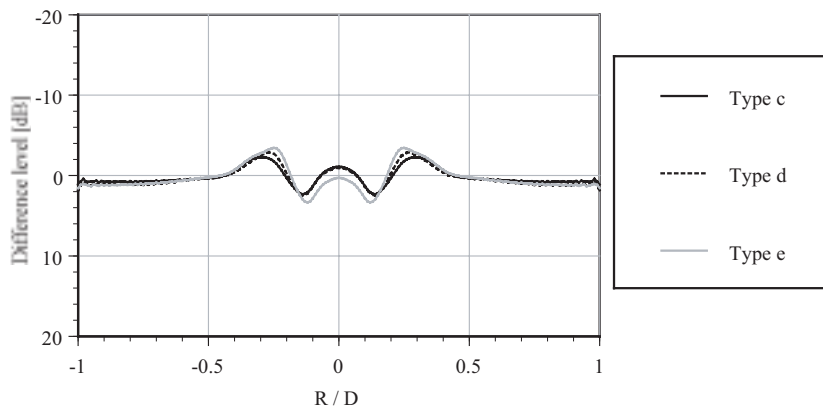


Fig. 5.43 Difference between additional attenuation levels for three types of barriers of two different heights (2m - 3m) and  $r_x''$  (far) at 125Hz 1/3 octave-band.

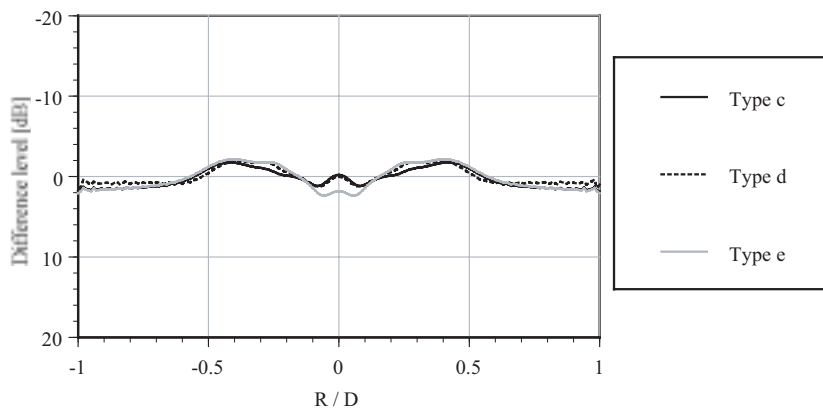


Fig. 5.44 Difference between additional attenuation levels for three types of barriers of two different heights (2m - 4m) and  $r_x''$  (far) at 125Hz 1/3 octave-band.

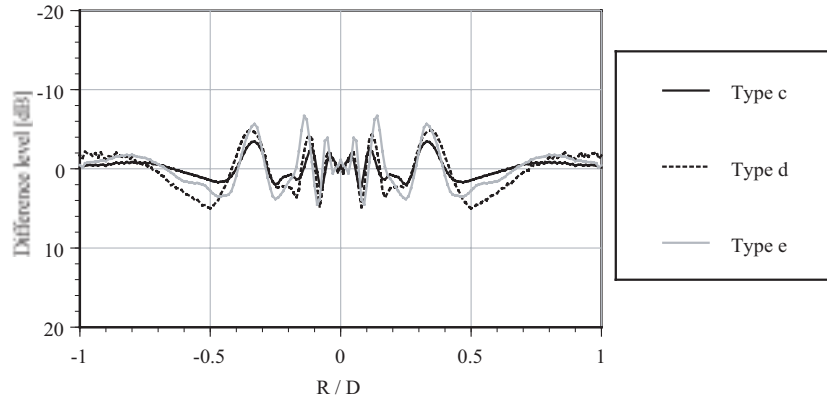


Fig. 5.45 Difference between additional attenuation levels for three types of barriers of two different heights (3m - 4m) and  $r_x''$  (near) at 250Hz 1/3 octave-band.

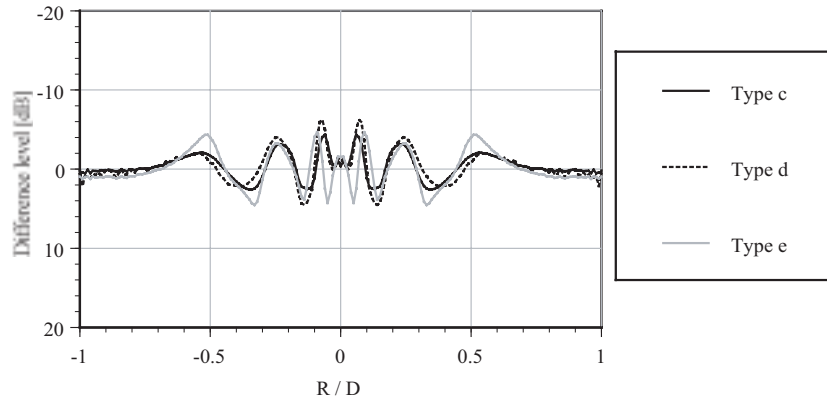


Fig. 5.46 Difference between additional attenuation levels for three types of barriers of two different heights (2m - 3m) and  $r_x''$  (near) at 250Hz 1/3 octave-band.

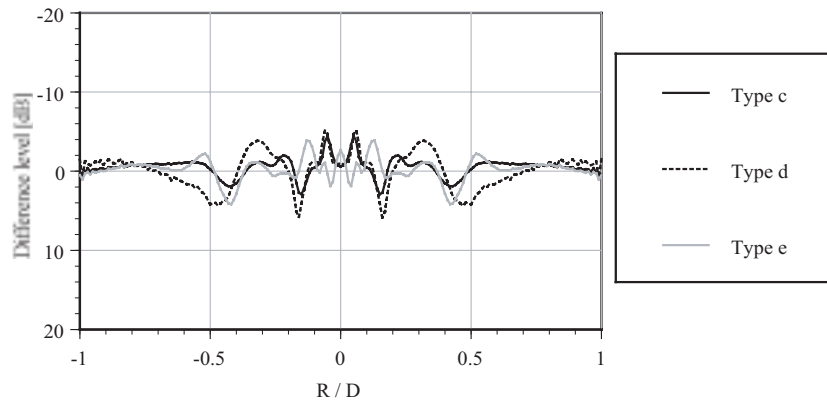


Fig. 5.47 Difference between additional attenuation levels for three types of barriers of two different heights (2m - 4m) and  $r_x''$  (near) at 250Hz 1/3 octave-band.

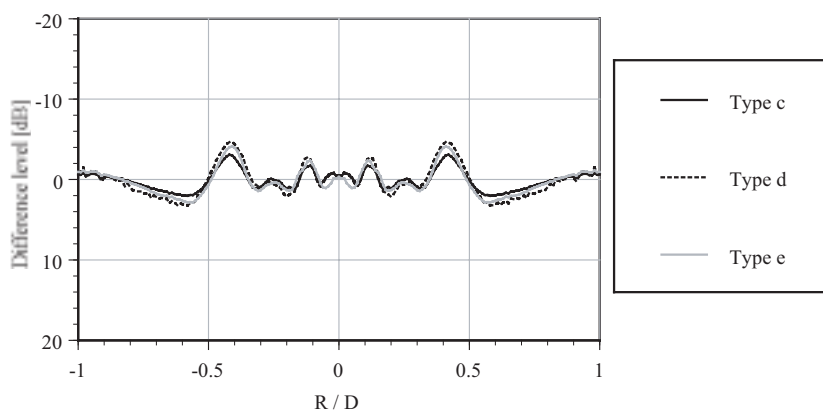


Fig. 5.48 Difference between additional attenuation levels for three types of barriers of two different heights (3m - 4m) and  $r_x''$  (far) at 250Hz 1/3 octave-band.

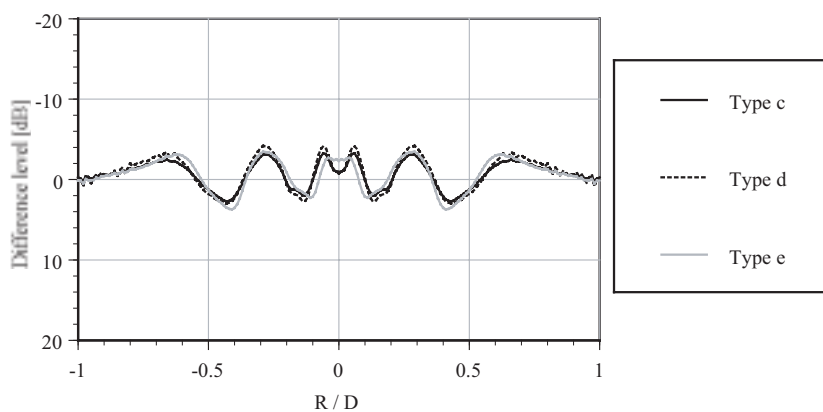


Fig. 5.49 Difference between additional attenuation levels for three types of barriers of two different heights (2m - 3m) and  $r_x''$  (far) at 250Hz 1/3 octave-band.

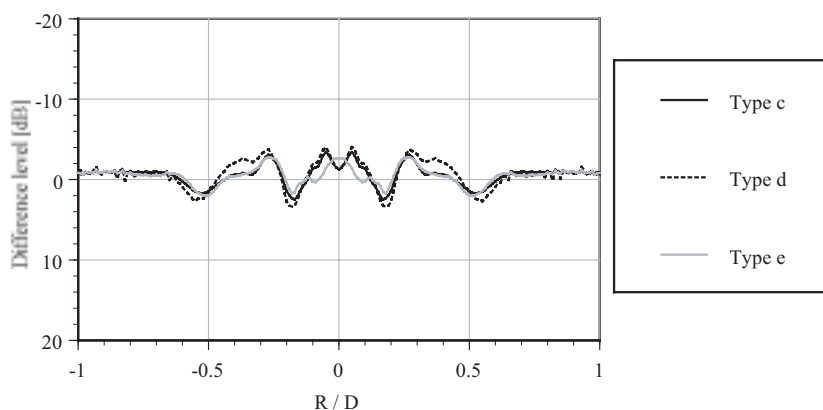


Fig. 5.50 Difference between additional attenuation levels for three types of barriers of two different heights (2m - 4m) and  $r_x''$  (far) at 250Hz 1/3 octave-band.

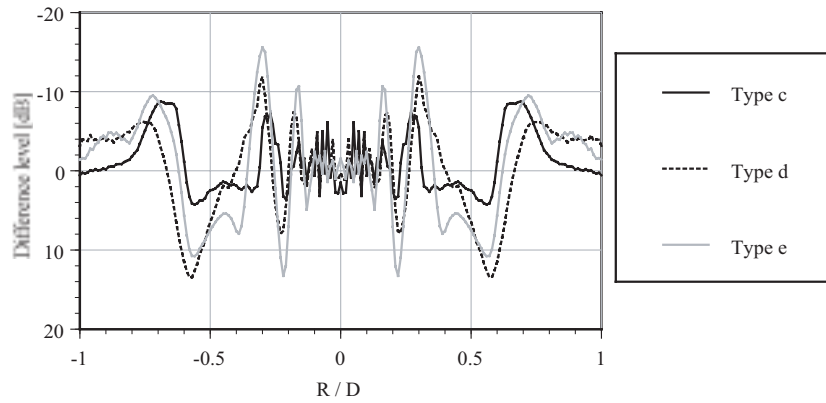


Fig. 5.51 Difference between additional attenuation levels for three types of barriers of two different heights (3m - 4m) and  $r_x''$  (near) at 500Hz 1/3 octave-band.

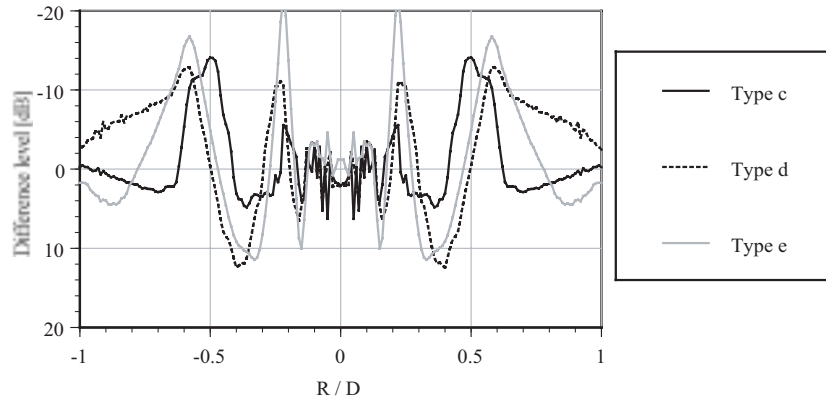


Fig. 5.52 Difference between additional attenuation levels for three types of barriers of two different heights (2m - 3m) and  $r_x''$  (near) at 500Hz 1/3 octave-band.

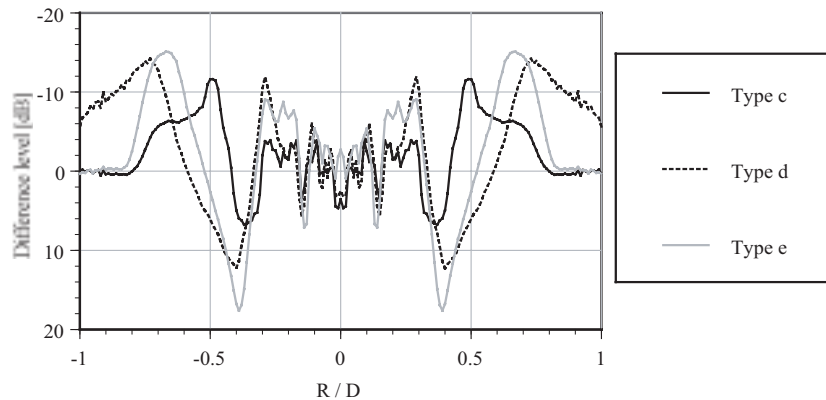


Fig. 5.53 Difference between additional attenuation levels for three types of barriers of two different heights (2m - 4m) and  $r_x''$  (near) at 500Hz 1/3 octave-band.

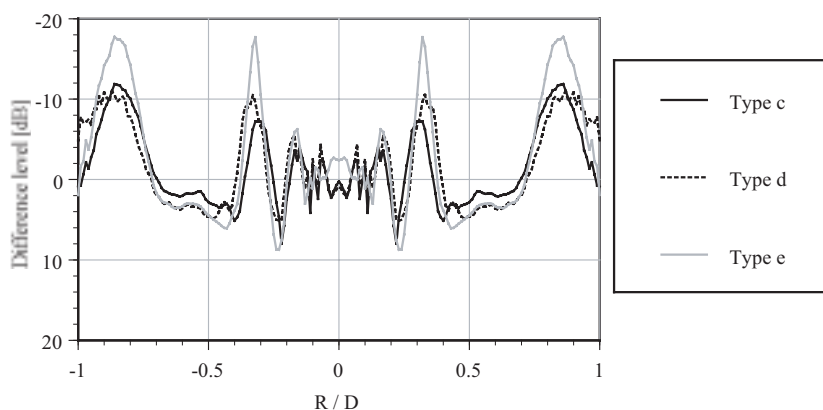


Fig. 5.54 Difference between additional attenuation levels for three types of barriers of two different heights (3m - 4m) and  $r_x''$  (far) at 500Hz 1/3 octave-band.

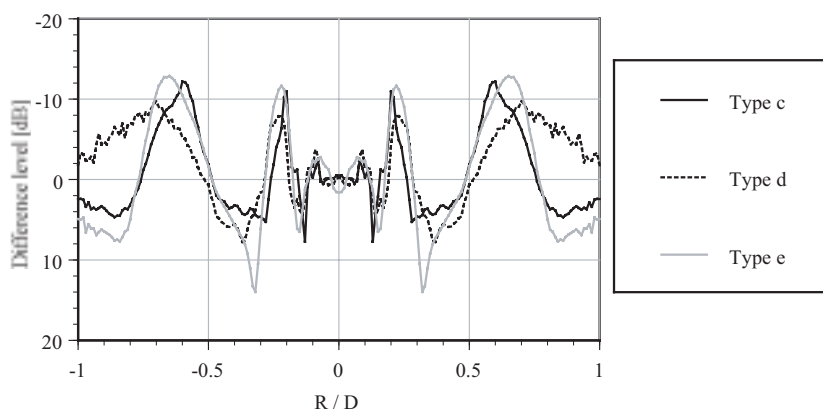


Fig. 5.55 Difference between additional attenuation levels for three types of barriers of two different heights (2m - 3m) and  $r_x''$  (far) at 500Hz 1/3 octave-band.

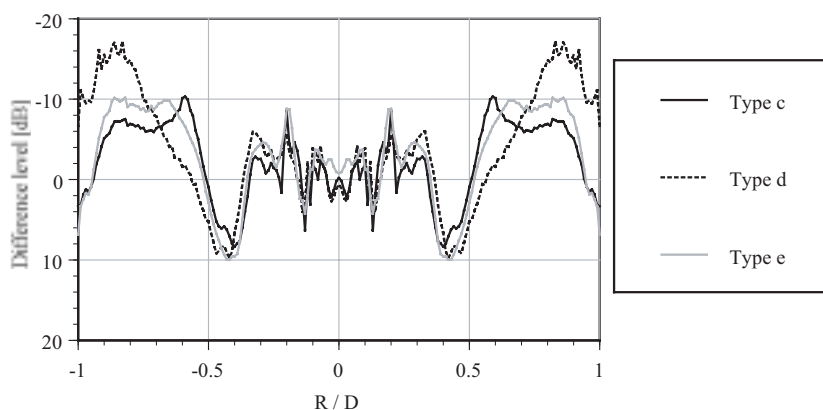


Fig. 5.56 Difference between additional attenuation levels for three types of barriers of two different heights (2m - 4m) and  $r_x''$  (far) at 500Hz 1/3 octave-band.

## 5.4 まとめ

本章では、3次元音場における減衰補正量の挙動、及びその指向特性について把握することを目的とした数値的検討を行なった。

回折減衰量に関しては、125Hzでは遮音壁形状、壁高の違いによる影響が微小であることがわかった。一方、250、500Hzでは、形状により挙動が異なること、壁厚0の直壁ではなだらかに推移するのに対して、その他のタイプでは受音点位置によって値が大きく変動すること、周波数が高いほどその傾向が顕著なことが確認された。また、壁高によっても傾向が変化することがわかった。総じて、周波数によらず、受音点列が壁に近い場合の方が減衰効果は高くなる傾向が見られた。

減衰補正量に関しては、125Hzでは受音点位置によらずほぼ一定の値をとること、遮音壁形状による差が少ないこと、壁高、受音点列までの距離の影響は微小なことが確認された。250Hzでは、正面入射付近で減衰効果が高いこと、遮音壁中央から離れるにつれて値が大きく変動することがわかった。また、壁高、受音点列までの距離の違いによる影響が見られ、概して受音点列が壁に近い場合に値が大きく変動する様子が見られた。500Hzでは、正面入射付近で減衰効果が高いこと、壁高や受音点列までの距離の影響が顕著であり、壁に近い受音点ほど値の変動が大きいことは250Hzの場合と同様であった。また、正面入射付近では細かい揺らぎが見られるのに対して、遮音壁中央から離れるにつれて変動周期が大きくなることが確認された。以上のように、高周波数ほど、遮音壁形状によって大きく異なった傾向となることが示された。

減衰補正量の指向性に関しては、125Hzでは形状によらず2dB以内に納まること、250、500Hzでは、受音点位置によっては大きな差が生じる場合があること、概して、正面位置付近では比較的差が小さいのに対して、遮音壁中央面から離れるほど差が大きくなることが確認された。



## 第6章 総括

本研究は、道路交通騒音予測への適用を大きな目標として見据えた上で、FMBEMの遮音壁解析への適用、その妥当性の検証、減衰補正量の挙動把握、及びその指向特性についての考察を目的として行なわれた。本章では、本研究によって得られた成果を総括し、今後の課題について述べる。

第1章では、道路交通騒音問題の社会的背景や現状、新型遮音壁開発の動向、ASJ RTN-Model 2003における先端改良型遮音壁の取扱いについて、減衰補正量予測の現状と課題等、研究の背景を概観した後に、本研究の位置付け及び目的を示した。

第2章では、まずはじめにASJ RTN-Model 2003における伝搬計算について概説した。また、音場の基礎方程式について述べ、境界要素法(BEM)による音場の定式化を行なった後、高速多重極アルゴリズム、および階層セル構造の導入による、BEM影響関数のFMBEMによる再定式化について述べた。

第3章では、FMBEMの遮音壁解析への適用に関する検討を行なった。

まず、解析モデルの対称性を考慮した効率化手法を3種類提案・実装し、従来のFMBEMとの比較検討を行なった。その結果、計算量・必要記憶容量共に、2面对称化が最も効率的なことで、解析対象の長さや高さの比が大きくなるほど効率化されなくなることで、階層セル構造と解析対象の位置関係によって効率化の傾向が異なり、1面だけに対称化を適用するほうが2面对称化よりも高効率となるケースが存在することがわかった。また、1面对称化では、解析対象の対称面に接する面積が大きいほど必要記憶容量が増加することが明らかにされた。

また、低周波数域における解析精度とセル階層化レベルの関係についてケーススタディを行ない、今回の解析範囲において問題の自由度によらず高精度となる設定( $kD = 2$ 以上)を導出した。

第4章では、回折減衰量算出の妥当性の検証を行なった。

はじめに、縮尺模型実験による実測値との比較を行ない、低周波数域では両者がよく対応すること、遮音壁上端部の2つのエッジからの回折波の影響により、周波数の上昇に伴って差が大きくなること、その差は張り出し型の場合により顕著に現れることを確認した。また、以上のように高域では受音点位置によって顕著

な差が生じうるものの、回折減衰量の全体的傾向については遮音壁形状・音響特性によらず概ね一致することを示した。

その後、側方回折波の回折減衰量に与える影響を数値解析により検討した。その結果、低周波数域、及び壁に近い受音点で影響がより現れることが示唆された。また、遮音壁の先端部形状はほとんど関与しないこと、影響を抑制するためには壁の長さを受音点列長さと同程度以上取る必要があることを明らかにした。

第5章では、減衰補正量の数値予測のための基礎的検討という位置付けで、減衰補正量の挙動、及び指向特性を調べるためにケーススタディを行なった。

回折減衰量については、125Hzでは遮音壁形状、壁高の違いによる影響が微小なのに対し、250、500Hzでは、形状により挙動が異なること、壁厚0の直壁ではなだらかに推移するのに対して、その他のタイプでは受音点位置により値が大きく変動すること、高周波数ほどその傾向が顕著なことを確認した。また、壁高によっても傾向が変化することがわかった。総じて、周波数によらず、受音点列が壁に近い場合の方が減衰効果は高くなる傾向が見られた。

減衰補正量については、125Hzでは受音点位置によらずほぼ一定値となること、遮音壁形状による差は少ないこと、壁高、受音点列までの距離はあまり影響しないことがわかった。250Hzでは、正面入射付近で減衰効果が高いこと、遮音壁中央から離れるにつれて値が大きく変動することが確認された。また、壁高、受音点列までの距離の違いの影響が見られ、概して受音点列が壁に近い場合に値が大きく変動することがわかった。500Hzでは、250Hzの場合と同様に、正面入射付近で減衰効果が高いこと、壁高や受音点列までの距離の影響が顕著であり、壁に近い受音点ほど大きく値が変動する様子が見られた。また、正面入射付近では細かい揺らぎが見られるのに対し、遮音壁中央から離れるほど変動周期が大きくなることを確認された。以上のように、高周波数ほど、遮音壁形状によって大きく異なった傾向となることが示された。

減衰補正量の指向性については、125Hzでは形状によらず2dB以内に納まること、250、500Hzでは、受音点位置によっては大きな差が生じうること、概ね、正面位置付近では比較的差が小さいのに対し、遮音壁中央面から離れるほど差が大きくなる傾向が見られることがわかった。

以上に示したように、減衰補正量の値は遮音壁形状やサイズ、音響特性といった様々な要因に左右され、概ね音源正面方向から離れるほど複雑な挙動となることから、斜め入射時では指向特性のみでは単純に表現することができないと考えられる。新たなパラメータの導入やエネルギー的な評価等、予測手法構築に向けた方向性の模索が今後の課題と言える。

# 参考文献

- [1] D. H. Crombie *et al.*, The performance of multiple noise barriers, *J. Sound Vibration*, Vol. 176, No.4, pp. 459-473 (1994).
- [2] 藤原恭司, 吸音性円筒エッジをもつ防音塀の遮音性能について, 日本騒音制御工学会講演論文集, pp.257-260, 1987.9.
- [3] K. Fujiwara, D. C. Hothersall, Chul-hwan Kim, Noise barriers with reactive surfaces, *Appl. Acoust.*, Vol. 53, pp.255-272 (1998).
- [4] 福島昭則, 坂本慎一, 道路交通騒音予測への2次元波動解析の適用に関する数値解析的検討, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2003-71 (2003).
- [5] 福島昭則, 坂本慎一, 2次元波動数値解析を用いた道路交通騒音予測での条件設定に関する検討, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2004-12 (2004).
- [6] 井上瑞希, 藤原恭司, 防音壁用吸音性円筒エッジの有効取り付け長に関する研究. *日本音響学会誌*, pp.258-267, 2004.
- [7] 建設省土木研究所, 道路環境影響評価の技術手法(その2), 土木研究所資料, 第3743号 (2000).
- [8] 金哲煥, 藤原恭司, ソフトなT型防音壁の遮音性能に関する研究, 日本音響学会講演論文集, pp.729-730, 1996.9.
- [9] 武藤茂美, 中崎邦夫, 山本稔, 池谷公一, 松本敏雄. 分岐型遮音壁の騒音予測計算手法について 前川チャートをベースに計算する方法, 音響学会講演論文集, pp.747-748, 3 2004.
- [10] 長船寿一他, 分岐型遮音壁による自動車交通騒音の低減効果に関する調査研究, 日本騒音制御工学会講演論文集, pp.167-170, 1996.9.
- [11] 日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会, ASJ RTN-Model 2003, 日本音響学会誌, Vol.60, pp.192-241 (2004).
- [12] 大久保朝直, 山本貢平, 先端改良型遮音壁の性能評価法に関する実験的検討, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2004-61, 2004.
- [13] 大久保朝直, 藤原恭司(九州芸工大), 上坂克巳, 木村健治(国土交通省国総研), ソフトなエッジを持つ新型遮音壁の沿道設置状況下における遮音性能, 日本騒音制御工学会講演論文集, pp.321-324, 2001.9.
- [14] 大久保朝直, 藤原恭司(九州芸工大), ソフトな円筒エッジを持つ防音壁の遮音

- 性能に関する研究，日本音響学会講演論文集，pp.801-802, 1994.10.
- [15] 財団法人道路環境研究所，道路環境影響評価の技術手法(丸善，東京，2000).
- [16] S. Sakamoto and H. Tachibana. Applicability of 2-dimensional numerical analysis for the prediction of road traffic noise. Inter-noise. pp.772-778, 2004.
- [17] T. Sakuma and Y. Yasuda: Fast multipole boundary element method for large-scale steady-state sound field analysis, Part 1: Setup and Validation, *Acoustica/acta acustica* Vol.88, pp.28-38, 2003.
- [18] 渡辺敏幸他，分岐型遮音壁の騒音低減メカニズム，日本騒音制御工学会講演論文集，pp.171-174, 1996.9.
- [19] G. R. Watts, Acoustic performance of a multiple edge noise barrier profile at motorway sites, *Appl. Acoust.*, Vol. 47, pp.47-66 (1996) .
- [20] Y. Yasuda and T. Sakuma: Fast multipole boundary element method for large-scale steady-state sound field analysis, Part 2: Examination of numerical items, *Acoustica/acta acustica* Vol.89, pp.28-38, 2003.
- [21] 安田洋介，佐久間哲哉，FMBEM による遮音壁の 3 次元解析 境界形状に適合したセル構造による効率化 ，日本音響学会梗概論文集， pp.833-834, 9 2003.
- [22] 安田洋介，佐久間哲哉，大規模音場解析に向けた FMBEM の開発 対象形となる音場の解析における効率化 ，日本建築学会学術講演梗概集(環境工学 1), pp.179-180, 9 2003.
- [23] 吉田研一，西村直志，小林昭一，多重極積分方程式を用いたクラックによる 3 次元弾性波動散乱問題の解析，*応用力学論文集*，Vol3, pp.143-150, 8 2000.
- [24] 牛山歩，安田洋介，坂本慎一，橘秀樹，吸音材が偏在した室における残響減衰特性 - 音響模型実験による検討 - ，日本音響学会講演論文集 pp. 961-962 2004.9 .

# 謝辞

本論文は、筆者が東京大学大学院新領域創成科学研究科 環境学専攻修士課程において、同専攻助教授 佐久間哲哉先生のもとに行った研究をまとめたものです。本研究テーマの決定、論文の構成、作成に至るまで、終始、熱心かつ丁寧にご指導下さいました。心より感謝致します。

東京大学 鎌田元康教授、坂本雄三教授、平手小太郎助教授、宗方淳助手、今野雅助手には、環境系ゼミにおいて幅広い視点から適切なご助言を頂きました。ここに深く感謝致します。

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 環境学専攻助教授 崔恒先生は、本研究の副指導教官をご担当下さいまして、貴重なご助言を下さいました。ここに深い感謝の意を述べさせて頂きます。

東京大学大学院工学系研究科 建築学専攻助教授 坂本慎一先生には、既往の実測値を利用させていただいた上、本研究を進めるにあたって、度々有益なご助言を頂きました。心より感謝致します。

日本学術振興会 特別研究員（東京大学生産技術研究所）安田洋介さんは、佐久間研究室OBでもあり、筆者が修士1年のときから2年間、常にやさしく、ときには厳しく、研究において度重なるご指導の上、適切なアドバイスを賜りました。ここに深く感謝致します。

筆者とともに一丸となって論文作成に取り組んだ佐久間研究室の高部茂生さん、武田真樹さん、松永文彦さん、建築学専攻 平手小太郎研究室の宇野宏司さん、武居知裕さん、武藤秀明さん、同 坂本雄三研究室の小島悦史さん、中沢崇さん、中野隆司さん、そして、筆者の研究を見守り、色々のご支援下さった佐久間研究室ならびに建築学専攻環境系の大学院生の皆様に感謝の意を表します。

また、佐久間研究室 修士課程 荒畑暢宏さん、飯島直樹さんには論文の作成をお手伝いいただきました。どうもありがとうございました。

最後に、佐久間研究室 博士課程 小坂慶之さんは、研究に関する事柄にとどまらず、終始様々な形で筆者を支えて下さいました。研究を進めていく上で、とても心強く大きな助けとなりました。感謝の念は絶えることはありません。本当に、本当にありがとうございました。

2005年1月31日



付録 A

## 修士論文要旨





# 道路交通騒音伝搬における遮音壁先端部の減衰効果の数値予測

Numerical prediction of the additional attenuation values  
due to the tops of edge modified barriers in propagation of road traffic noise

学籍番号 36725  
氏名 高村 紀行 (Takanura, Noriyuki)  
指導教官 佐久間 哲哉 助教授

## 1. はじめに

1.1. 研究の背景 道路交通騒音の伝搬対策としては一般的に遮音壁が用いられる。近年では、先端形状や音響特性を工夫することでより大きな減衰効果を得る、いわゆる先端改良型遮音壁の研究が進められ、これらの一部は実用化されている。一方、実務的な騒音伝搬予測において一般に用いられる日本音響学会による予測モデル(以下、ASJ RTN-Model 2003)で先端改良型遮音壁を取り扱う場合、先端部装置による付加的減衰効果(以下、減衰補正量)を求める必要がある[1]。現状では、減衰補正量の予測は縮尺模型実験で行なわれているが[2]、モデルが必然的に巨大となりコストがかかる上、設定変更への対応も容易ではない。一方、数値解析に関しては、計算機資源の制限から3次元音場を想定した解析はほとんど行なわれていない。しかし、任意形状に対応可能であり設定変更も容易なこと、移動音源に対する伝搬性状が解析可能なことなどから、3次元数値解析は遮音壁の研究開発及び実務的な騒音伝搬予測の両側面において大変有用であると思われる。

1.2. 研究の目的 以上の背景を踏まえ、本研究の目的を以下のように設定する。なお、数値解析手法は大規模音場予測に向け開発された高速多重境界要素法(以下、FMBEM)[3]を用いる。

- 1) 遮音壁解析におけるFMBEMの計算効率の向上を図り、適用範囲を拡大すること
- 2) FMBEMによる遮音壁解析の妥当性を検証すること
- 3) ケーススタディにより3次元音場におけ

る減衰補正量の挙動を把握し、減衰補正量の予測手法構築のための知見を得ること

## 2. 道路交通騒音の予測手法の概要

2.1. ASJ RTN-Model 2003の予測計算法の原理  $L_{Aeq}$  を評価量とするエネルギーベースの予測計算であり、対象とする道路上を無指向性点音源と見なせる1台の自動車が行ったときの騒音の時間変化(ユニットパターン)及びその時間積分値を求めることが基本となる。その結果に交通条件(交通量及び車種構成)を考慮して、予測点における騒音のエネルギー的な時間平均値を求める。

2.2. 回折減衰量と減衰補正量 予測計算の基本となるユニットパターンを求める際、音源点と予測点の間に遮音壁等の音響障害物がある場合は、回折に伴う減衰効果を補正量として考慮する必要がある。本研究ではこの補正量のことを回折減衰量と呼ぶことにする。なお、ASJ RTN-Model 2003においては、先端改良型遮音壁の回折減衰量は仮想直壁の回折減衰量に減衰補正量を単純加算する方法が提案されている(eq.1)。

$$\Delta L_{dif,emb} = \Delta L_{dif,eb} + \Delta L_{c,dir} \quad (1)$$

但し、 $\Delta L_{dif,emb}$ :先端改良型または張り出し型遮音壁の回折減衰量[dB]、 $\Delta L_{dif,eb}$ :先端改良型または張り出し型遮音壁と同一の高さを持つ仮想直壁の回折減衰量[dB]、 $\Delta L_{c,dir}$ :減衰補正量[dB]。

3. 遮音壁の解析における効率化手法の構築 直線道路を想定した遮音壁の解析においては、対称面を2面有することから1/4自由空

間を対象とした効率的計算が可能となる。そこで、FMBEMの対称形音場における効率化手法 [4] を拡張し、2つの対称面を考慮する手法をコンピュータに実装した。本節では、通常のFMBEM解析結果との比較により、その有効性を検証する。

3.1. 解析方法 完全反射性の地表面上に置かれた長さ 20[m]、高さ 1[m]、厚み 0.1[m] の遮音壁を解析対象とする。なお、解析は 125Hz と 1kHz で行なった。

3.2. 結果と考察 計算時間及び記憶容量を計算条件と合わせて Table 1 に示す。通常の FMBEM (conv) と比較すると、本効率化手法 (sym2) では、計算時間はおよそ 2/5 以下、記憶容量は 125Hz でおよそ 1/2 以下、1kHz でおよそ 7/10 以下まで低減されていることがわかる。これより、以降の検討では本効率化手法を適用した FMBEM を用いることとする。

4. FMBEMによる遮音壁解析の妥当性の検証

FMBEMによる解析精度については、理論解との厳密な比較による検証が行なわれているが、遮音壁解析のような実問題への適用の際には、実測値との比較・検討が必要と思われる。本節では、既往の縮尺模型実験による実測値 [5] との比較を通して FMBEM による数値解析結果の妥当性を検証する。

4.1. 解析方法 解析対象を Fig.1 に示す。ここで、 $r_s''=10$ [m]、 $h=5$ [m]、 $r_r''=15$ [m]、 $R=80$ [m] とする。音源点、受音点は完全反射性の地表面上に設置し、受音点は 1[m] 毎設置している。解析対象は直壁 (Type 1)、張り出し型 (Type 2)、カーブ型 (Type 3) とし Fig.2 に示す。境界条件は Type1 と Type2 は全面剛、Type3 は受音点側の円弧部分が吸音境界、それ以外は剛境界である。また、吸音境界条件には縮尺模型実験で用いられたフェルト (2[mm]) の吸音率に相当する比音響インピーダンスを帯域ごとに与える。

4.2. 結果と考察 Type 毎の回折減衰量を Fig.3 に示す (1/3 オクターブ帯域値)。Type1 では、63Hz・125Hz で実測値と精度よく対応

Table 1 Computational efficiency for analyzing sound fields with a rigid barrier (N : degree of freedom).

Frequency	Types	N	Time [sec]	Memory [MB]
125Hz	conv	16840	58	72.7
125Hz	sym2	4210	20	34.9
1kHz	conv	67360	2707	2071.3
1kHz	sym2	16840	1046	1397.1

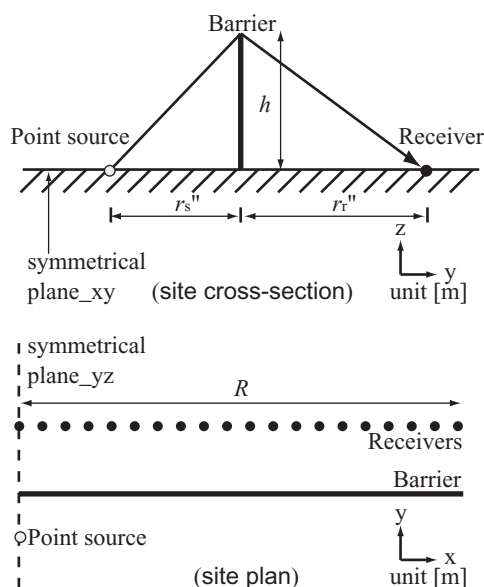


Fig. 1 Geometry of the numerical model with a barrier (site cross-section and plan).

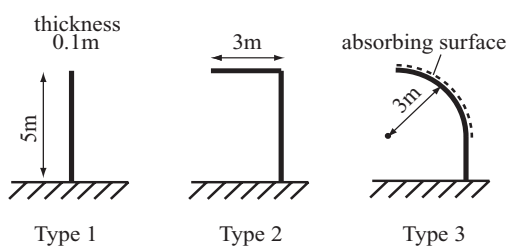


Fig. 2 Three types of barrier shapes (Type 1, 2 and 3).

しているが、高周波数域になるほど受音点位置によっては差が生じることがわかる。これは、壁の厚みに起因して生じる揺らぎが高周波数域の結果ほど顕著になるためと考えられる (詳細は第 5 章参照)。Type 2 及び Type 3 でも同様に、63Hz・125Hz で実測値と精度よく対応しているが、高周波数域の結果では受音点位置により実測値と差が生じることがわかる。しかし、どの周波数帯域も受音点全体

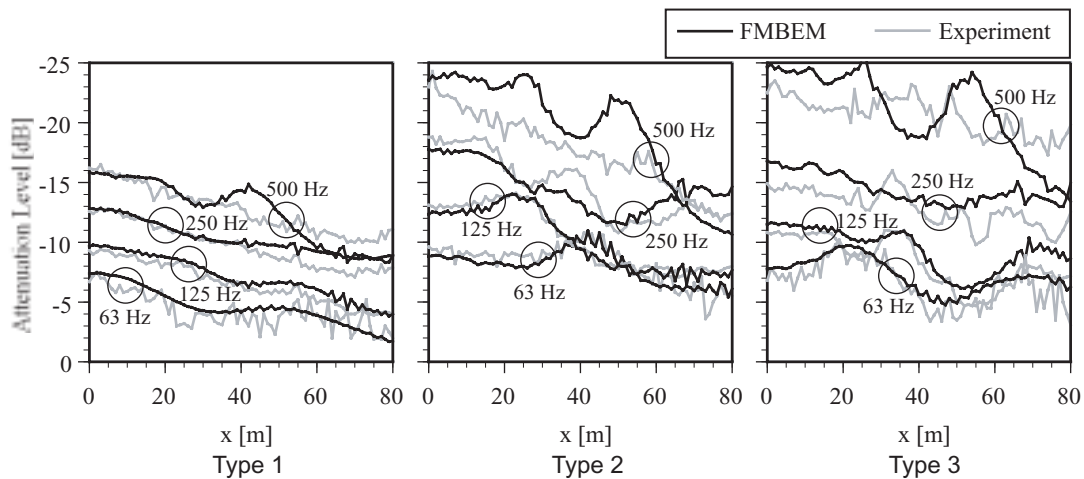


Fig. 3 Comparison between experimental results and numerical results with FMBEM.

の回折減衰量の挙動は概ね対応していると言える。以上より、FMBEMによる遮音壁解析結果と実測値は低周波数域ではTypeによらず精度よく対応すること、高周波数域では受音点位置により実測値との差が見られる場合もあるが、全体としては概ね同じような挙動を示すことが確認された。

### 5. 減衰補正量の数値予測のための基礎的検討

2次元音場を想定した場合、減衰補正量は壁頂部から音源点及び受音点の方向のみに依存する指向特性によって表現できることが数値解析により確認されている[6]。3次元音場においても同様の知見が得られれば減衰補正量の精緻な予測が可能となると考えられる。そこで本節では3次元音場における減衰補正量の挙動を把握し、その指向特性について検討を行なう。

5.1. 解析対象をFig.1に示す。遮音壁高さを $h$ 、遮音壁から音源点及び受音点までの距離をそれぞれ $r_s$ 、 $r_r$ 、受音点列の長さを $R$ で表す。壁高 $h$ を2水準設定し、壁頂部から音源点・受音点の双方の方向を固定した状態で $h$ に対応して $r_s$ 、 $r_r$ 、 $R$ を設定する。 $h=4[m]$ のとき $r_s$ 及び $r_r$ は $2.5[m]$ かつ $R$ を $100[m]$ 、 $h=2[m]$ のとき $r_s$ 及び $r_r$ は $1.25[m]$ かつ $R$ を $50[m]$ に設定した。解析対象の遮音壁形状

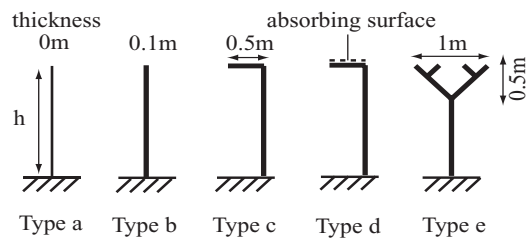


Fig. 4 Five types of barrier shapes.

をFig.4に示す。境界条件はType dの頂部(完全吸音)を除き、全て剛境界としている。解析は $1/9$ オクターブ帯域中心周波数で行った。

### 5.2. 解析結果と考察

5.2.1. 回折減衰量の挙動の把握  $h=4[m]$ の $125\text{Hz}$ 及び $500\text{Hz}$ における回折減衰量をFig.5(a)に示す( $1/3$ オクターブ帯域値)。 $125\text{Hz}$ では、どのTypeも概ね挙動が同様であるのに対し、 $500\text{Hz}$ ではTypeにより大きな揺らぎが生じることがわかる。Type aとType bを比較すると、Type aでは揺らぎがほとんど見られないことから、この揺らぎは遮音壁の厚みに起因して生じると考えられる。なお、 $h=2[m]$ においても同様の傾向が見られた。

5.2.2. 減衰補正量の挙動の把握  $h=4[m]$ の $125\text{Hz}$ 及び $500\text{Hz}$ における減衰補正量をFig.5(b)に示す。減衰補正量はType bを基準として求めている。 $125\text{Hz}$ では、受音点位置に依らず値は概ね一定であるが、 $500\text{Hz}$ では、受音点位置により値が変動し、壁中央から離れ

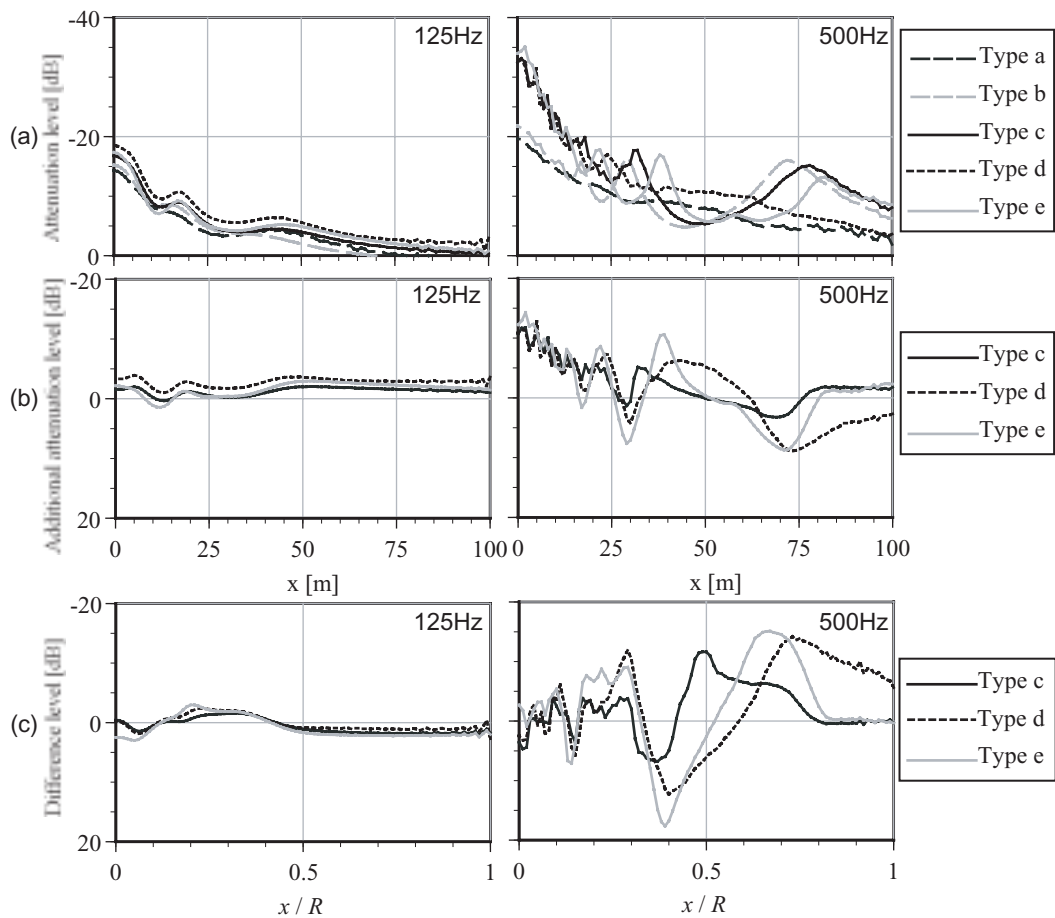


Fig. 5 (a) Diffraction attenuation levels of five Types of barrier, averaged in the 1/3 octave band of 125Hz and 500Hz. (b) Additional attenuation levels calculated for Type c, d and e, averaged in the 1/3 octave band of 125Hz and 500Hz. (c) Difference between the levels for the barrier of two different heights (2m - 4m) with the same top.

た受音点では Type により値が異なることがわかる。

### 5.2.3. 減衰補正量の指向性に関する検討

$h$  が 2[m] と 4[m] の条件でのそれぞれの減衰補正量の差を Fig.5(c) に示す。125Hz では Type に依らず差はおよそ 2dB 以内に納まっている。一方, 500Hz では壁中央付近では比較的差が小さく, これは 2次元音場を想定した既往研究の知見と一致する。しかし, 壁中央から離れた受音点では差が大きくなることわかる。

## 6. まとめ

FMBEMの解析アルゴリズムを遮音壁解析に適するよう拡張した効率化手法を提案・実装し, その有効性を検証した。また, 縮尺模型実験による実測値との比較により, その解

析結果の妥当性を検証した。その上で, 減衰補正量の挙動把握のために数値的検討を行った。その結果, 回折減衰量には壁の厚みに起因する揺らぎが高周波数域で生じることが分かった。また, 減衰補正量の指向性に関しては壁中央付近の受音点では周波数に依らず差が小さいことがわかった。

新たなパラメータの導入やエネルギー的な評価等, 予測手法構築に向けた方向性の模索が今後の課題と言える。

参考文献 [1]ASJ道路交通騒音調査研究委員会, 音響学会誌, 60, 192-241, (2004), [2]武藤他, ASJ講演論文集, 747-745, (2004.3), [3]T.Sakuma et al., Acustica/acta acustica, 88, 513-525 (2002), [4]安田他, AIJ大会学術講演論文集, D-1, 179-180, (2003), [5]S.Sakamoto et al., inter-noise, 772-778, (2004), [6]大久保他, ASJ講演論文集, 821-822, (2003.9).

付録 B

## 学会発表論文



高村 紀行 佐久間 哲哉 (東大・環境)  
安田 洋介 (東大・生研)

1. はじめに ASJ RTN-Model 2003では先端改良型遮音壁の回折減衰量に対して、直壁の回折減衰量に先端部による付加的な補正量(以下、減衰補正量)を単純加算する方法が提案されている[1]。この減衰補正量に関しては、2次元音場を想定した場合、壁頂部からの音源点および受信点の方向のみに依存する指向特性によってある程度表現可能であることが数値解析により確認されている[2]。しかしながら、ユニットパターンの予測に向けては3次元音場における減衰補正量が必要であることから、本報では3次元高速多重極境界要素法(FMBEM)を用いて点音源から各水平方向の減衰補正量を計算し、その角度依存性について検討する。

2. 検討方法

(1) 解析モデル 完全反射性の地表面上に置かれた遮音壁(全長300m)ならびにその中央部の点音源を想定し、図1に示すような対称面2面を有するモデルを解析対象とする。ここで、音源点および受信点は地表面上にあるものとし、音源点から各水平方向(方位角 $\theta_a$ )の鉛直断面内で遮音壁先端部からの角度 $\theta_s$ 、 $\theta_r$ を既定する。実際の解析では、壁高は1.5m、3mの2条件(L, H)とし、両条件で鉛直断面内で $\theta_s$ が対応するように音源点を各々壁面正面2.5、5mに配置した。受信点は $\theta_a$ を5deg毎、 $\theta_r$ を1deg毎に設定している。なお、上記設定では $\theta_s$ は一定ではなく、表1に示すように $\theta_a$ に依存する。

遮音壁先端部の形状は直壁(Type 1)、張り出し・剛(Type 2)、張り出し・吸音(Type 3)の3タイプとし、壁面の境界条件は頂部のみを吸音面( $\alpha=1$ )、他は全て剛境界とする(図2)。なお、遮音壁側端部には側方回折波の影響を抑制するために、5mの張り出し(音源側は完全吸音面)を設けている。

(2) 数値解析方法 上記モデルでは対称面2面を有することから1/4自由空間のみを対象とした効率的な計算が可能となり、FMBEMでは対称面を考慮しない場合に比べて計算量および必要記憶容量ともに約1/4となる[3]。要素分割条件は四角形一定要素、要素最大長1/6波長以下、各種設定パラメータは既報[4]に準じる。解析周波数は100Hzから500Hzまでの1/3オクターブ帯域中心周波数とした。

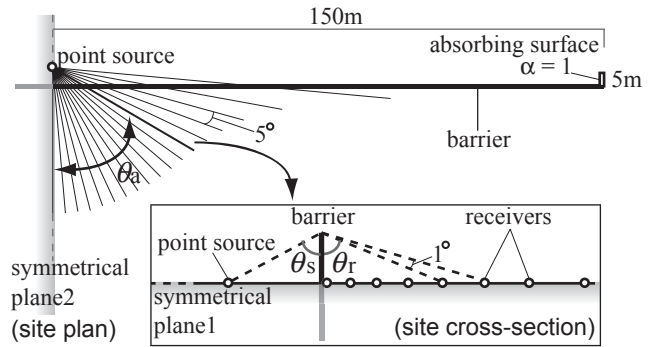


Figure 1. Geometry of the numerical model with a barrier in the double-plane-symmetrical space.

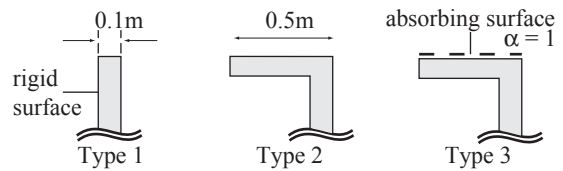


Figure 2. Three types of barrier tops (Types 1, 2 and 3).

Table 1. Relation between  $\theta_a$  and  $\theta_s$  [deg] in the geometry.

$\theta_a$	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$\theta_s$	59.3	59.7	60.8	62.8	65.5	69.1	73.5	78.5	84.1

3. 解析結果および考察

(1) 回折減衰量の帯域評価 計算結果の一例として、直壁・壁高3m (Type 1H)の回折減衰量( $\theta_a=60deg$ )を図3に示す。図中には、純音(200/250/315Hz)およびオクターブ帯域平均の計算値と、Macdonaldの式[6]による理論近似値(250Hz)を併せて示している。純音における計算値と近似値を比較すると、純音では壁厚の影響による揺らぎが周波数が高くなるほど顕著に現れているが[5]、帯域平均値では揺らぎが消え、比較的単調な特性となっている。次に、 $\theta_a$ の違いによるType 1Hの回折減衰量の帯域平均値(中心周波数250Hzのオクターブ帯域)を図4に示す。揺らぎは $\theta_a$ によらずほとんど見られない。

(2) 減衰補正量の角度依存性 Type 2および3の先端部の減衰補正量はType 1の回折減衰量を基準に算出するものとした。両タイプについて壁高2条件における減衰補正量を図5(a, b)に示す(100Hzから500Hzまでの帯域平均値、 $\theta_a=0deg$ から80degまで

\*Calculation of the additional attenuation values due to the tops of edge modified barriers by using FMBEM.  
By TAKAMURA Noriyuki, SAKUMA Tetuya (I.E.S., Univ. of Tokyo) and YASUDA Yosuke (I.I.S., Univ. of Tokyo)

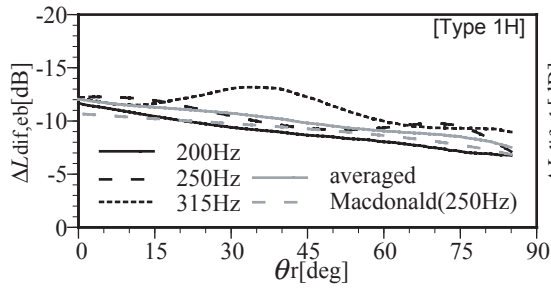


Figure 3. Diffraction attenuation levels Type 1H, calculated at  $\theta_a = 60$  deg, at single frequencies and averaged in the octave band. Theoretical approximate values at 250Hz.

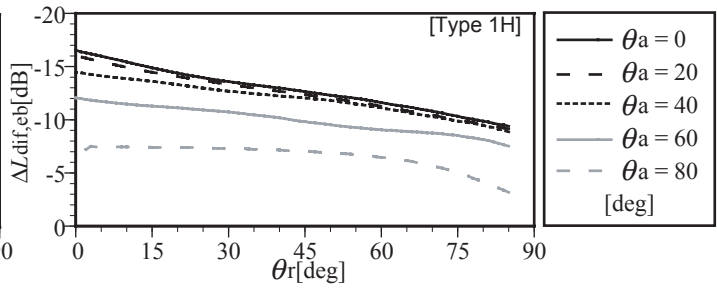


Figure 4. Diffraction attenuation levels of Type 1H, calculated at different  $\theta_a$ , averaged in the octave band of 250Hz.

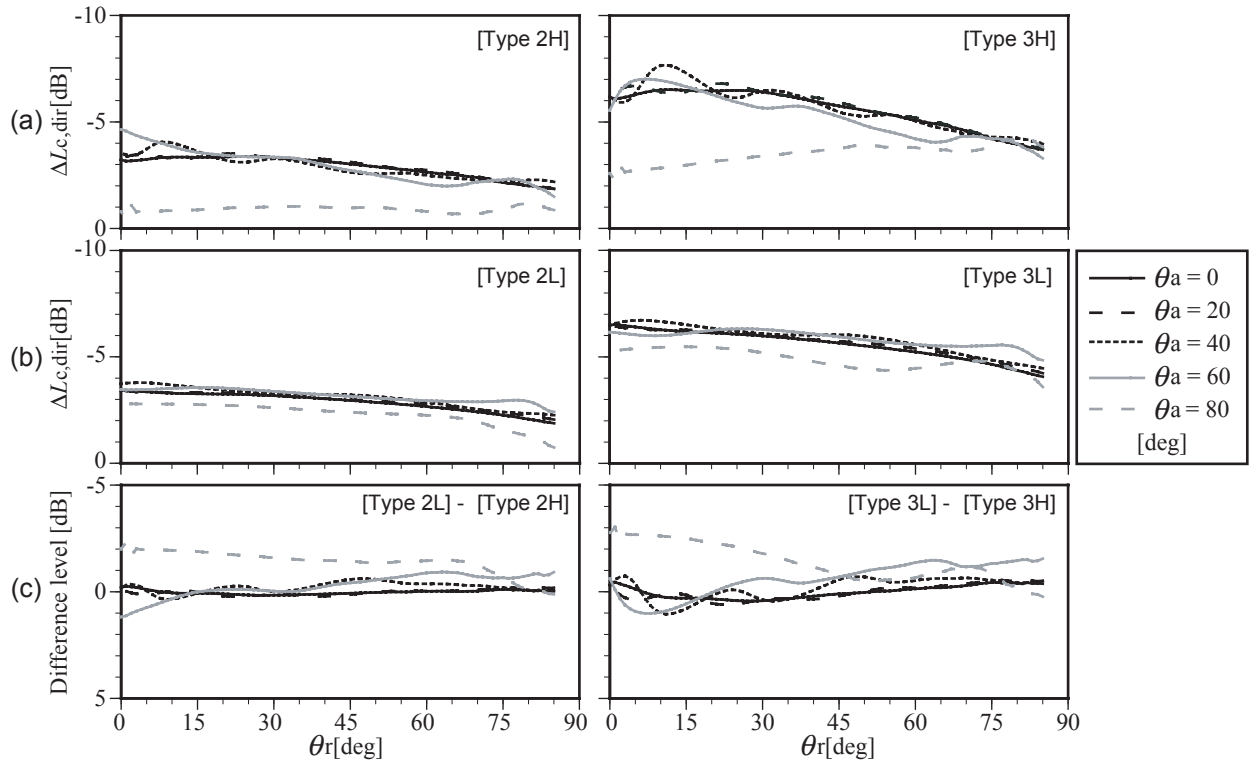


Figure 5. (a,b) Additional attenuation levels calculated for Type 2 and 3, averaged from 100 to 500Hz. (c) Difference between the levels for the barriers of two different heights (L-H) with the same top.

20deg毎) . 両タイプについて減衰補正量と $\theta_a$ との関係を見てみると、 $\theta_a$ が60deg以下では概ね値は一致しているが、 $\theta_a=80$ degの場合のみ減衰効果は小さくなっている。次に、 $\theta_r$ との関係を見てみると、 $\theta_a$ が60deg以下では $\theta_r$ が大きくなるにつれて値は単調減少している。また、Type 2に対してType 3の減衰効果は約3dB高くなっており、頂部を完全吸音にした効果がみられる。

(3) 減衰補正量への壁高の影響 図5(c)に壁高2条件の減衰補正量(a,b)の差を示す。両タイプについて減衰補正量の差と $\theta_a$ との関係を見てみると、 $\theta_a$ が60deg以下では概ね差は1dB以下となっている。一方、 $\theta_a=80$ degではType 2で最大約2dB、Type 3で最大約3dBの差があり、 $\theta_r$ が小さくなるにつれてその差は顕著になっているが、これは壁高が高い条件の方が減衰効果が小さくなっているためである。なお、ここでの壁高の変化は壁頂部から音源点および受音

点までの距離の変化に対応している。

4. まとめ 3次元FMBEMにより張り出し型遮音壁の減衰補正量を計算し、角度依存性について検討した。壁頂部から音源点および受音点双方までの距離を変化させた場合、減衰補正量は $\theta_a$ が60deg以下では概ね差はないが、 $\theta_a=80$ degでは差が見られた。これより、 $\theta_a$ が90degに近い場合の減衰補正量の取り扱いには注意を要する。また、本報では $\theta_s$ が $\theta_a$ に依存する条件で検討を行ったが、 $\theta_s$ 、 $\theta_r$ および $\theta_a$ 各々と減衰補正量の間を関係を検討する必要がある。

参考文献 [1]ASJ道路交通騒音調査研究委員会,音響学会誌,60,192-241,(2004), [2]大久保他,ASJ講演論文集,821-822,(2003.9), [3]安田他,AIJ大会学術講演論文集,D-1,179-180,(2003), [4]Y.Yasuda et al.,Acustica/acta acustica,89,28-38 (2003), [5]佐久間他,騒音・振動研究会資料,N-2003-73, [6]川井他,音響学会誌,32,319-327,(1976).