

# 音響管配列を用いたソフトなT型防音壁の遮音性能に関する研究

金, 哲煥  
株式会社四元音響設計事務所

<https://doi.org/10.11501/3134564>

---

出版情報：九州芸術工科大学，1997，博士（工学），課程博士  
バージョン：  
権利関係：

氏名・本籍(国籍) 金 哲 煥 (大韓民国)  
学位の種類 博士(工学)  
学位記番号 甲第17号  
学位授与の日付 平成10年3月18日  
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当  
学位論文題目 音響管配列を用いたソフトなT型防音壁の遮音性能に関する研究

究

審査委員会 幹事 教授 藤原 恭 司  
委員 教授 津村 尚 志  
委員 教授 鈴木 俊 行

#### 論文内容の要旨

道路交通騒音を制御することにおいて、現在最もよく用いられている手段の一つが防音壁である。しかし近年になって、交通量が増えつつ、しかもスピードの上限をアップした高速道路の建設や新幹線のような高速鉄道もさらにそのスピードを増やしている。このような状況の中、従来の防音壁では十分な遮音がとれなくなった場合が多くなり、建物の高層化などの原因で都市内を走る高速道路や鉄道沿いの防音壁もその高さが伸びる一方である。しかし、遮音量を増やす目的で、音源側の防音壁の上部の形状が道路内の方へ曲がり込み、道路を囲んでいる形になってしまって、まるでトンネルのような防音壁もできる状況になった。防音壁の高さが高くなるほど遮音量は増えるものの、建設における経済的な費用や構造上の強度、維持・管理におけるコストなどの問題だけでなく、防音壁沿いの住民への日照の欠如、運転者や乗客に与える圧迫感や退屈さ、さらに道路内部の換気を悪化させるなど、人間に直接与える被害が社会的問題にまでなっている。このような理由で、最近では防音壁の高さを変えず、より良い遮音性能を持つ防音壁を開発しようとする企画で様々な研究が盛んに行われている。本研究は、このような背景により防音壁の高さを変えず、より良い遮音性能を持つ防音壁を開発することを目的とする。

防音壁の遮音効果を向上させるための様々な形の防音壁が試されている中、T型防音壁は単純な形である割には良い遮音効果を示していることがよく知られている。そこで本研究では、藤原らによって提案された1/4波長音響管配列によるソフトな表面をT型防音壁の上端において実現し、上端がソフトな表面となるT型防音壁を提案、その遮音効果について数値計算及び模型実験によって検討を行った。

研究内容としては、まず、(1)単一深さの音響管配列の単体としての効果を検討するため、境界要素法を用いて数値解析を行い、理想的にソフトな表面の効果と比較し、藤原らによって提案された音響管配列によるソフトな表面の効果を検証した。本研究における数値解析の手段として用いた境界要素法は、防音壁が設置された散乱音場のような、開領域を含む開放音場問題を計算的方法で解析するに適した方法としてよく知られている。特に、防音壁の形状が複雑になればなるほどその効果を解析的な方法で求めることは不可能に近く

なると言える。こういう面で境界要素法は優れた長所を持っている。特に、地面条件を完全反射性と仮定し、鏡像法を用いて音場をモデリングすると相当の計算容量を節約することができ、本研究全般における数値解析は鏡像法の 2 次元境界要素法を用いた。次に、(2) 音響管配列を T 型防音壁の上端に設け、防音壁としての遮音効果について数値解析及び模型実験により検討を行い、その特性を調べた、その後、(3) 音響管配列による効果の周波数依存性を解決するため配列の形を変形し、変形された配列の単体としての効果を数値解析及び模型実験で検討した。最後に、(4) 変形された音響管配列を防音壁に取り付け、ソフトな効果は多少減少するが、効果の周波数依存性を大幅に改善した。音響管配列によるソフトな T 型防音壁の遮音効果を数値解析及び模型実験によって確認した。

以上の結果により、剛な T 型防音壁の上端に音響管を配列することによって、T 型防音壁の遮音効果をほぼ全周波数領域で大幅に改善された。

#### 論文審査の結果の要旨

近年高速道路、主要幹線道路沿線での交通騒音は日増しに大きくなり、音環境として重大な問題となってきている。この状況を緩和する手段として防音壁が用いられているが、従来の単純な防音壁では大きな遮音性能を得るためには、その高さを高くする必要があり、新設計画高速道路では自動車騒音レベルの上昇に伴い、高さ 9m、断面長 14m にもおよぶ防音壁が計画されている。この様な一般的な防音壁の利用状況に対して、防音壁の高さは低く抑さえても、遮音性能は十分あるような新しい考えに基づく防音壁が求められている。本研究はこの様な状況で行われたもので、従来より遮音性能がよいとされてきた T 字型防音壁を基本として、表面の音圧が極端に小さくなる“ソフト”な表面を持たせることと合わせて、より高さの低い効果的な防音壁の実現しようとしたものである。

第 1 章では研究の背景、防音壁研究の動向分析、本研究の目的について記しており、背景としては新しく計画され建設が始まっている第 2 東名高速道路に建設予定の巨大な防音壁について述べ、これらに対して高さは低くても遮音性能の良い防音壁に関して従来より行われている研究について調査している。またそれに基づき本研究の目的として従来の防音壁に比べ高さは半分程度で、遮音性能は同程度である新しい防音壁構造を見出だすことを上げている。

第 2 章では本研究で防音壁による音波回折現象を解析するために必要な手法としての境界要素法 (Boundary Element Method) について、その基本となる Helmholtz Huygens 積分の定式化に始まり、境界要素法に用いられる方程式を定式化している。BEM による解析では解析境界範囲が有限領域に限定されるおり、地面上に防音壁が建設される場合には無限領域となるので、それを克服する手法としての鏡像法の適用についても定式化している。

第 3 章では本論文の中心となる音響的にソフトな表面の実現に関して、1/4 波長音響管配列を利用する意味について述べ、その有効性を数値計算により検討している。結果として音響管を配列することで周波数範囲に限定はあるがその配列はソフトな音響条件を満たす

ことを明らかにしている。

第4章では第3章で検討した音響管配列を防音壁エッジに取り付け、T字型防音壁を構成し、その遮音性能が従来型の防音壁や剛なT字型防音壁に比べどの程度上昇したかを、数値計算と二次元音場を利用した縮尺模型実験により検証している。結果としては、ソフトな条件を満たす周波数範囲においては非常に大きな遮音性能が得られることが認められた。

第5章では自動車騒音のように広帯域の騒音に対して、ソフトな条件を満たすため、異なる共鳴周波数を持つ多数の音響管を配列することを考えた。これについて数値計算と縮尺模型実験によりその妥当性を検証した。

第6章では第5章で得られた結果をT字型防音壁に適用し、異なる共鳴周波数を持つ多数の音響管をT字型防音壁の頂部に配列した。その防音壁の遮音性能を従来のもとの比較として、数値計算と三次元縮尺模型実験により検討した。その結果、実物で5m、T字幅2m程度のソフトなT字型防音壁は高さ9m、全断面長14mの防音壁と500Hz以上の周波数域において同等の遮音性能があることを明らかにした。

第7章は全体のとりまとめを記している。

以上のように、本研究は従来交通騒音を低減させるには防音壁の高さを高くする必要があったことに対して、高さとしては半分程度のもので等価な遮音性能を得られる構造を提案し、その有効性を数値計算、縮尺模型実験を通して実証した。最終試験、公開発表会においては数多くの質問に対して適切な返答があった。

よって、審査員全員が別添資料のように本論文は博士論文に値するものと認めた。

#### 最終試験の結果の要旨

最終試験においては、各審査委員から基本方程式の定式化の妥当性、実験手法の妥当性、実験結果の信頼性問題など、多くの質疑に対して申請者から十分な回答が得られた。

また公開発表には関連分野の専門家を含む30数名の参加者を得、申請者の発表に対して、新しく考案された防音壁の実用化の問題、耐候性に関する問題、風による雑音発生に関する問題等数多くの質疑に対し、それぞれについて申請者より納得のいく回答が得られた。

よって審査員合議の結果、最終試験は合格と決定した。

# 目 次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 最近の防音壁関連研究の動向	4
1.3 研究の目的	6
1.4 論文の構成	8
第2章 境界要素解析	11
2.1 はじめに	11
2.2 2次元境界積分方程式の定式化	11
2.3 鏡像法を用いた境界要素モデリング	14
第3章 音響管配列によって実現されたソフトな表面	19
3.1 はじめに	19
3.2 音響管配列とソフトな表面	20
3.2.1 ソフトな表面	20
3.2.2 1/4波長音響管によるソフトな表面の近似的実現	20
3.3 音響管配列によるソフトな表面の有効性	25
3.3.1 数値解析モデル	25
3.3.2 音響管配列近傍の音圧レベルの空間分布	27
3.3.3 音響管配列の挿入損失の周波数特性	31
3.4 音響管の数と表面の効果	34
3.5 まとめ	39
第4章 ソフトなT型防音壁の試み	40
4.1 はじめに	40
4.2 数値解析モデルおよび解析音場	40
4.3 数値解析結果	46
4.3.1 挿入損失の周波数特性	46
4.3.2 挿入損失の空間分布	53
4.4 模型実験	66
4.4.1 実験モデル	66
4.4.2 実験結果	70
4.4.2.1 挿入損失の周波数特性	70
4.4.2.2 挿入損失の空間分布	73
4.5 まとめ	77

第5章 有効帯域を広げるための音響管配列	78
5.1 はじめに	78
5.2 多数の設計周波数と持つ音響管配列	79
5.2.1 数値解析モデル	79
5.2.2 多数の設計周波数を持つ音響管配列の効果	79
5.3 2次元模型実験	83
5.3.1 実験モデル	83
5.3.2 実験結果	85
5.4 底面の形状が異なる音響管配列の効果	90
5.4.1 数値解析モデル	90
5.4.2 音響管配列の底面の形状の影響	92
5.5 まとめ	94
第6章 長さの異なる音響管配列を持つT型防音壁	95
6.1 はじめに	95
6.2 高さ3mの防音壁	96
6.2.1 挿入損失の周波数特性	98
6.2.2 挿入損失の空間分布	100
6.3 高さ5mの防音壁	104
6.3.1 上部の幅1mの防音壁	104
6.3.1.1 挿入損失の周波数特性	106
6.3.1.2 挿入損失の空間分布	108
6.3.2 上部の幅2mの防音壁	112
6.3.2.1 挿入損失の周波数特性	114
6.3.2.2 挿入損失の空間分布	116
6.4 広帯域騒音に対する効果	120
6.5 3次元模型実験	128
6.5.1 実験モデル	128
6.5.2 実験結果	136
6.6 実用化に対する検討	146
6.6.1 数値解析モデルおよび解析音場	146
6.6.2 数値解析結果	149
6.8 まとめ	157
第7章 総括	158
参考文献	161
謝辞	166
付録：様々な防音壁の遮音効果の比較	

# 第1章

## 序論

### 1.1 研究の背景

自動車道や鉄道などからの交通騒音を制御することにおいて、最もよく用いられている手段の一つが防音壁であろう。防音壁は音源からの直接音を物理的に遮断するだけでなく、音源を視野から隠すことによる心理的な効果もあわせ持ち、交通騒音の遮音対策として一般に用いられている。しかし近年になって、交通量が増えつつ、しかもスピードの上限をアップした高速道路の企画、建設や新幹線のような高速鉄道もさらにそのスピードを増している。このような状況の中、従来の防音壁では十分な遮音が取れなくなった場合が多くなり、建物の高層化などの原因で都市内を走る高速道路や鉄道沿いの防音壁もその高さが伸びる一方である。現在、日本の高速道路に建てられている防音壁の高さは一般に3mであり、場合によっては5mのものも普通に建てられている。また、最近では都心付近を通過する高速道路では高さが8mにもなる防音壁を見掛けることもはや珍しいことではない。しかも、遮音量を増やす目的で、音源側の防音壁の上部の形状が道路内の方へ曲がり込み、道路を囲んでいる形になってしまって、まるでトンネルのようになった防音壁もある(Photo 1.1 参照)。実際、現在建設中の第2東名神高速道路(東京～名古屋～神戸)では、車の制限スピードの上限を140km/hにアップするため、Figure 1.1のような高さが9～10m、道路側に曲がり込

んだ屋根の幅が約6~7mにも及ぶ巨大な防音壁の建設が計画されている。しかし、防音壁の高さが高くなるほど遮音量は増えるものの、建設における経済的な費用や構造上の強度、維持・管理におけるコストなどの問題だけでなく、防音壁沿いの住民への日照の欠如、運転者や乗客に与える圧迫感や退屈さ、さらに道路内部の換気を悪化させるなど、人間に直接与える被害が社会的問題にまでなっている。このような理由で、次節に述べるように、最近では防音壁の高さを変えず、より大きな遮音性能を持つ防音壁を開発しようとする様々な研究が盛んに行われている。このような状況の中、より大きい遮音性能を持つ防音壁を開発しようとする研究目標の目安の一つとして、本研究では Figure 1.1 に示されているような第2東名神高速道路に設置される予定の巨大な防音壁を高さ5m程度に抑えることの可能性を追求してみる。

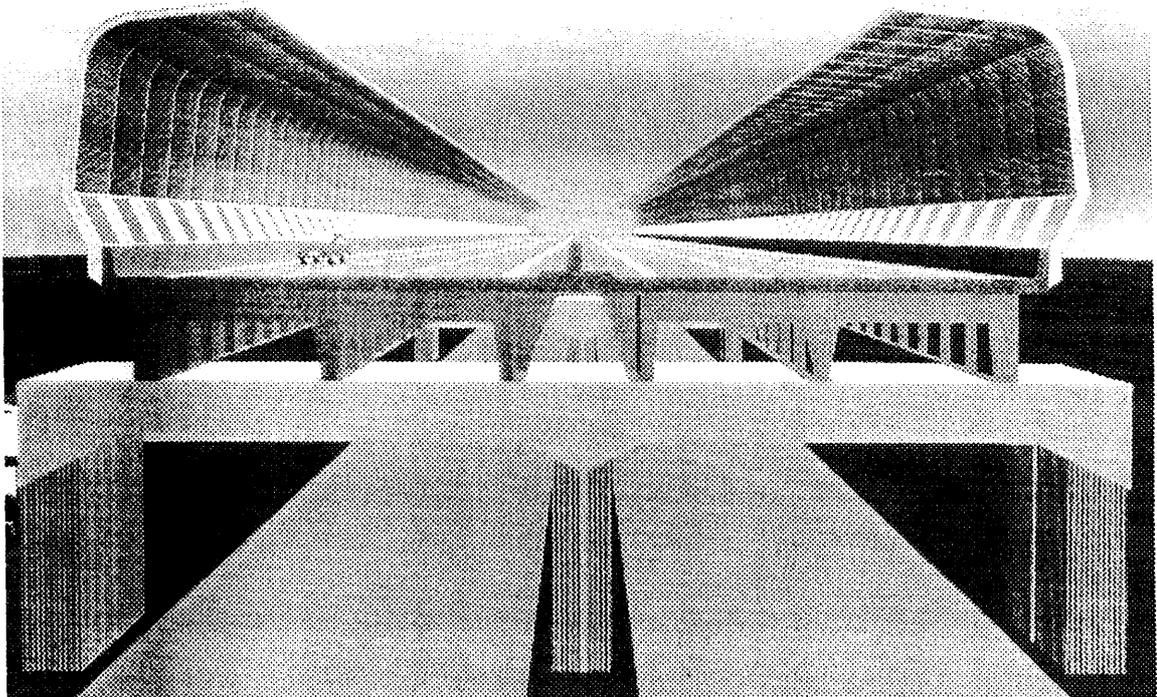


Figure 1.1 Noise barrier on the Dai2-To-Mei-Shin highway (Image).

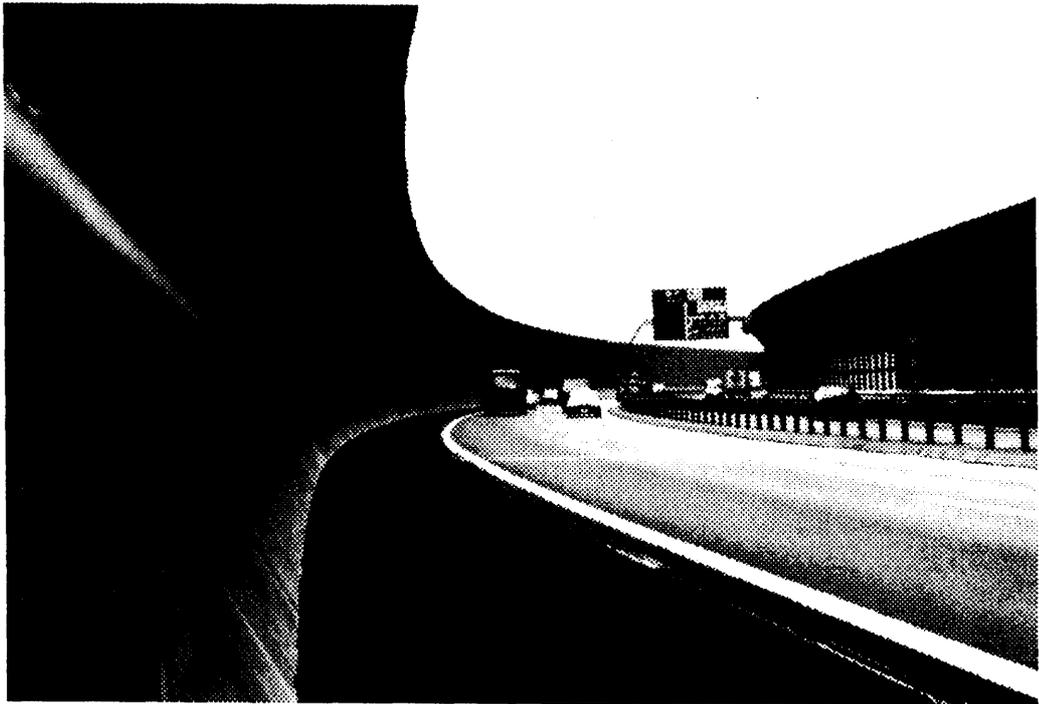


Photo 1.1 Highway noise barriers built near to urban areas (in Japan).

## 1.2 最近の防音壁関連研究の動向

近年行われている防音壁の遮音性能改善に関する研究では、経済性を考えて、既存の防音壁に何らかの音響的な工夫を凝らした装置を取り付けることにより、防音壁の遮音効果を向上させようとする研究の動きが活発になっている。これらの研究に共通した基本的な考え方は、防音壁のエッジからの回折音を減衰させる、つまり受音側に対する仮想音源としてのエッジポテンシャルを減衰させようとするのが研究の目安となっている。その中には、防音壁のエッジポテンシャルを別の音源(2次音源)を用いて消そうとする、アクティブ型防音壁の研究[1-4]も含まれている。本節では、それらの研究の中から本研究との関連性が高い、代表的な幾つかの研究例を選んで、その研究の動向や特徴を探ってみる。Mayら[5,6]は、高速道路沿いの剛な垂直型防音壁はその高さが1m高くなるにつれて遮音効果は約1.5dBしか上がらなく、既存の防音壁により約5~10dBの減音効果を得ようとするれば、かなりの高さの防音壁になると指摘している。そこで、彼らは実験により、防音壁上端の形状として、T型やY型、矢先型などの遮音効果を調べ、防音壁の上部の幅を広げることによって防音壁の遮音効果が大きくなると報告している。その中でも、T型防音壁は非常に良い遮音効果を持ち、高さ4.9mの剛な垂直型防音壁に幅2.44mの吸音性「キャップ」を取り付けてT型防音壁にした結果、遮音効果が6dB(剛なキャップの場合は4dB)も上昇したと報告している。その後、Hothersallら[7]は、Mayらによって報告されたT型やY型、矢先型などの防音壁について境界要素法を用いた2次元モデルで数値解析を行い、その遮音効果を確認している。しかし、剛なT型防音壁の場合、キャップの幅が0.2m以下になると挿入損失にはさほど影響がないと報告されている。藤原ら[8]は、音波の回折によって防音壁の頂点が新たな音源になることに着目、防音壁のエッジポテンシャルを減衰させる方法として、防音壁の頂点にグラスウール製の円筒エッジを取り付けて模型実験

を行い、吸音性円筒エッジを取り付けた効果として約 7~8dB の減音が得られたと報告している。さらに、グラスウール製の円筒エッジを実用化させた、吸音性シリンダー[9]を高速道路沿いの防音壁に取り付けてその効果を調べた結果、約 2~3dB の遮音効果が得られたという研究結果も報告している。この減音量を剛な垂直型防音壁の高さに換算すると約 2m に相当する効果だと評価されている。Crombie ら[10,11]は、垂直型防音壁の上部にサイドパネルを取り付けた多重エッジを持つ防音壁を提案し、多重回折により遮音効果が向上したという研究例を報告している。彼らが提案した多重エッジを持つ防音壁の最大のメリットは、既に建てられた防音壁でもパネルを取り付けるだけで遮音効果が約 2~3dB 大きくなるという、取り付けの簡単さの割に高い効果が得られるという点を取り上げている。Watts ら[12]は、Iida ら[13]が提案した音響干渉装置を既存の防音壁に取り付け、道路交通騒音を想定した周波数スペクトルを持つ音源を用い、実物実験と境界要素法を用いた数値解析の両方で音響干渉装置の効果を調べた結果、得られた効果 1.9dB の中で 1.2dB(数値計算では 1.5dB の中で 1.0dB)は装置による音響干渉の影響ではなく、彼らが提案した多重エッジ[11]による影響であると主張している。大久保ら[14]は、藤原ら[15-17]によって提案された 1/4 波長音響管配列によるソフトな表面の原理を応用した、ソフトな円筒エッジを持つ防音壁を提案、音響管の開口部での音響干渉を用いて防音壁のエッジポテンシャルを減衰させた研究結果を報告している。報告によると、吸音材などを一切使わずに、周波数によっては 10dB 以上の減衰効果があるとしている。しかし、音響管による音波の干渉を用いる構造上の理由で、周波数によって「音圧増幅作用」を持っており、全周波数帯域にわたってエッジポテンシャルを減衰させているわけではないという、効果の周波数依存性を最大の欠点として取り上げている。以上の調べによると、研究報告の大部分が防音壁のエッジポテンシャルを減らすための工夫に焦点が絞られており、現在行われている防

音壁関連研究の流れの中で，中心テーマとなっているには間違いないと考えられる。

### 1.3 研究の目的

防音壁の遮音効果を向上させるための様々な形の防音壁が試されている中，T型防音壁は単純な形である割に良い遮音効果を示していることが前節で調べた幾つかの研究において報告されている[5-7]。それから藤原らは，1/4波長音響管を垂直型防音壁の表面に配列させることでソフトな表面を実現し，それにより防音壁の遮音効果を向上させたという研究結果を報告している[15-17]。これらの研究結果を参考にして，本研究では，T型防音壁の上端に1/4波長音響管を配列させ，上端がソフトな表面となるT型防音壁を実現し，障壁による回折音を低減させることを研究の目的とする。Figure 1.2 に本研究で提案する音響管配列によって近似的に実現されたソフトなT型防音壁の基本形の断面を示す。

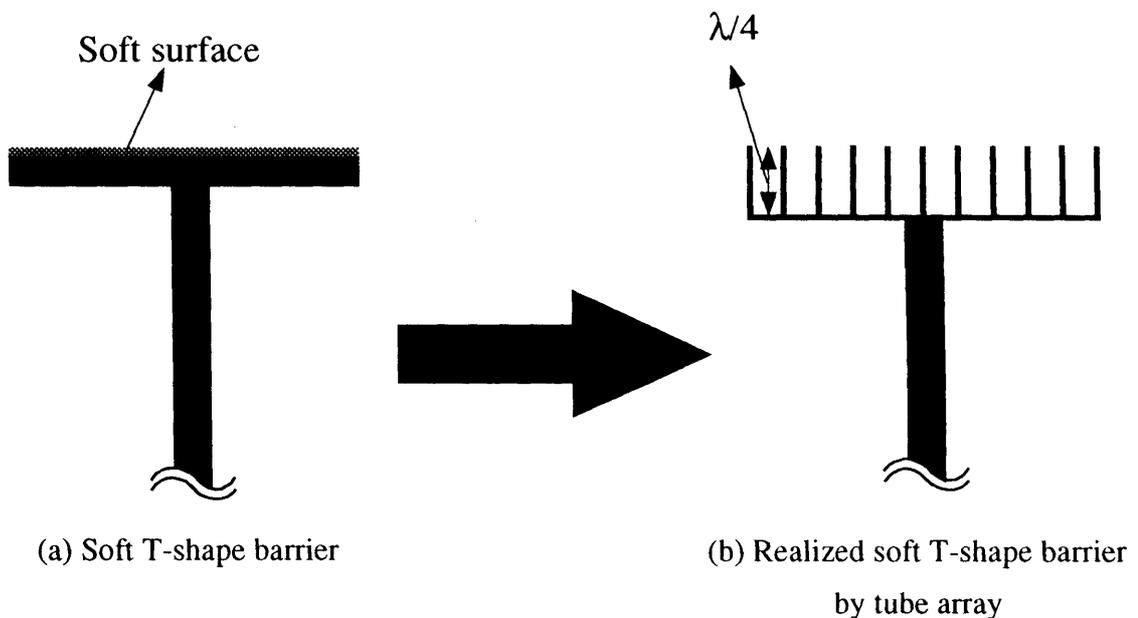


Figure 1.2 The soft T-shape noise barrier realized by acoustic tube array on the top surface.

## 1.4 論文の構成

前述した研究内容による本論文の構成を Figure 1.3 に示す。第 2 章において、本研究全般における数値解析に用いた境界要素法について説明する。最初、境界要素法を適用するための境界積分の定式化について簡単に説明した後、本研究における数値解析に適用した、鏡像法を用いた境界要素法のモデリングについて紹介する。

第 3 章においては、制限された幅に収まるよう単一深さの音響管を配列し、その効果を理想的にソフトな表面の効果と比較して数値解析を行い、音響管配列によるソフトな表面の効果を検証する。その後、配列される音響管の数や幅を変化させ、それにつれて配列の効果がどう変化するかについて検討を行う。第 4 章においては、上端に単一深さの音響管配列と 2 種類の深さの音響管配列を持つ T 型防音壁の遮音効果を解析し、同じ高さの垂直型防音壁や同じ高さと同幅を持つ剛な T 型防音壁、完全吸音性の T 型防音壁および理想的にソフトな T 型防音壁の遮音効果と比較して数値解析を行う。また、音響管配列の深さで決まる設計周波数付近の遮音効果に注目して、単一深さと 2 種類の深さの音響管配列を持つ防音壁の遮音効果を数値解析および 2 次元模型実験により検討し、周波数の範囲は限定されるものの、ソフトな T 型防音壁の実現を確認する。第 5 章においては、音響管配列によって実現されたソフトな表面の周波数依存性を緩和させるため、多数の設計周波数を持つ音響管配列を提案し、その効果を数値解析により検討を行う。純粋な音響管配列だけの効果を考察するため、この場合も第 3 章と同様に音響管配列だけの効果を調べる。結果として、深さが段々変わって行くような音響管配列は効果の最大値は多少減少するものの、低周波領域の一部を除いたほぼ全領域である程度安定的な周波数特性を持つことを、数値解析および模型実験により確認する。第 6 章においては、第 5 章の結果として得られた深さが段々変わり、多数の設計周波数を持つ音響管配列を防音壁の上端に取り付け、その効果について検

討を行う。防音壁の高さは、増えていく交通量などを考えて3mと5mの2種類を想定する。さらに、5m防音壁の場合は幅1mと2mの2種類の音響管配列を想定し、その効果を数値解析で検討する。また、高さ5m、幅2mの音響管配列を持つ防音壁に対しては、1/10模型を用いた3次元模型実験でその効果を確認し、実用化に対する基礎的な評価の一つとして、第2東名神高速道路に建設予定である巨大な防音壁の遮音性能との比較、検討を行う。最後に、第7章において、第2章から第6章までの結果を総括としてまとめる。

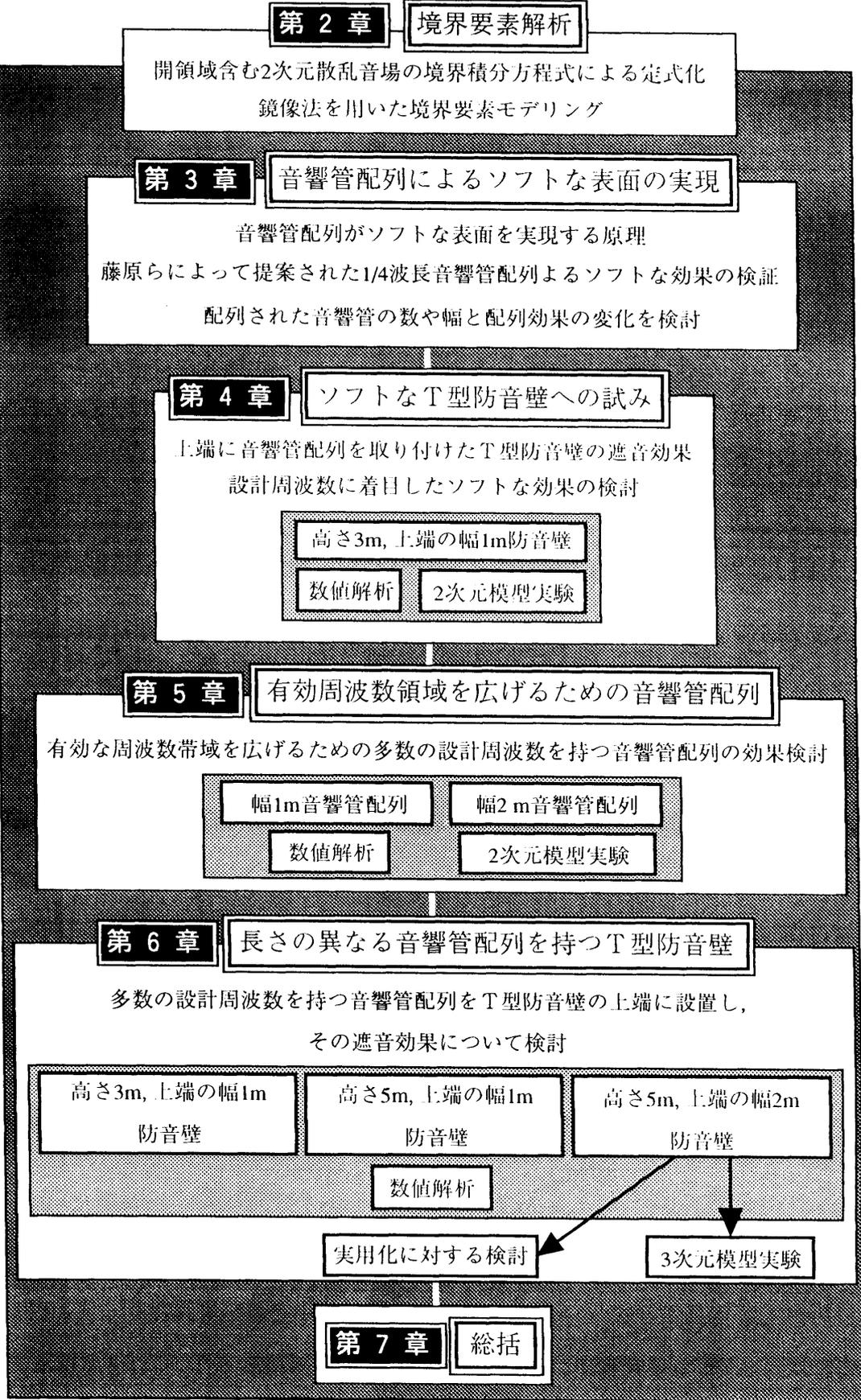


Figure 1.3 Structure of the study.

## 第 2 章

# 境界要素解析<sup>[18-27]</sup>

### 2.1 はじめに

本研究全般における数値解析に用いた 2 次元境界要素法およびモデリングについて簡単に説明する。境界要素法(Boundary Element Method, BEM)は、微分方程式で表わされた支配方程式を Green の公式を用いて、境界条件を含む境界上の積分方程式に変換する方法である境界積分方程式法(Boundary Integral Equation Method, BIEM)に有限要素法(Finite Element Method, FEM)の離散化手法を組み合わせた解析方法として、イギリスの Southampton 大学で生まれた数値解析法である。このため、原理的には考える問題の境界表面だけを要素分割すればよいことになり、有限要素法や有限差分法(Finite Differential Method, FDM)のような領域型解法に比べて入力データの数や、計算時間を大幅に短縮できるという特徴を持っている。また無限領域を含む問題を要素分割の数を増やすことなく、理論的に正しい仮定のもとに解析できるという利点を持っている。

### 2.2 2次元境界積分の定式化

Figure 2.1 に境界積分の定式化のため想定した 2 次元の散乱音場を示す。境界面  $\Gamma$  に囲まれた領域を  $\Omega_{in}$ 、 $\Gamma$  と無限の仮想境界面  $\Gamma^\infty$  に囲まれた領域を  $\Omega$  とし、その領域  $\Omega$  を音場とする。

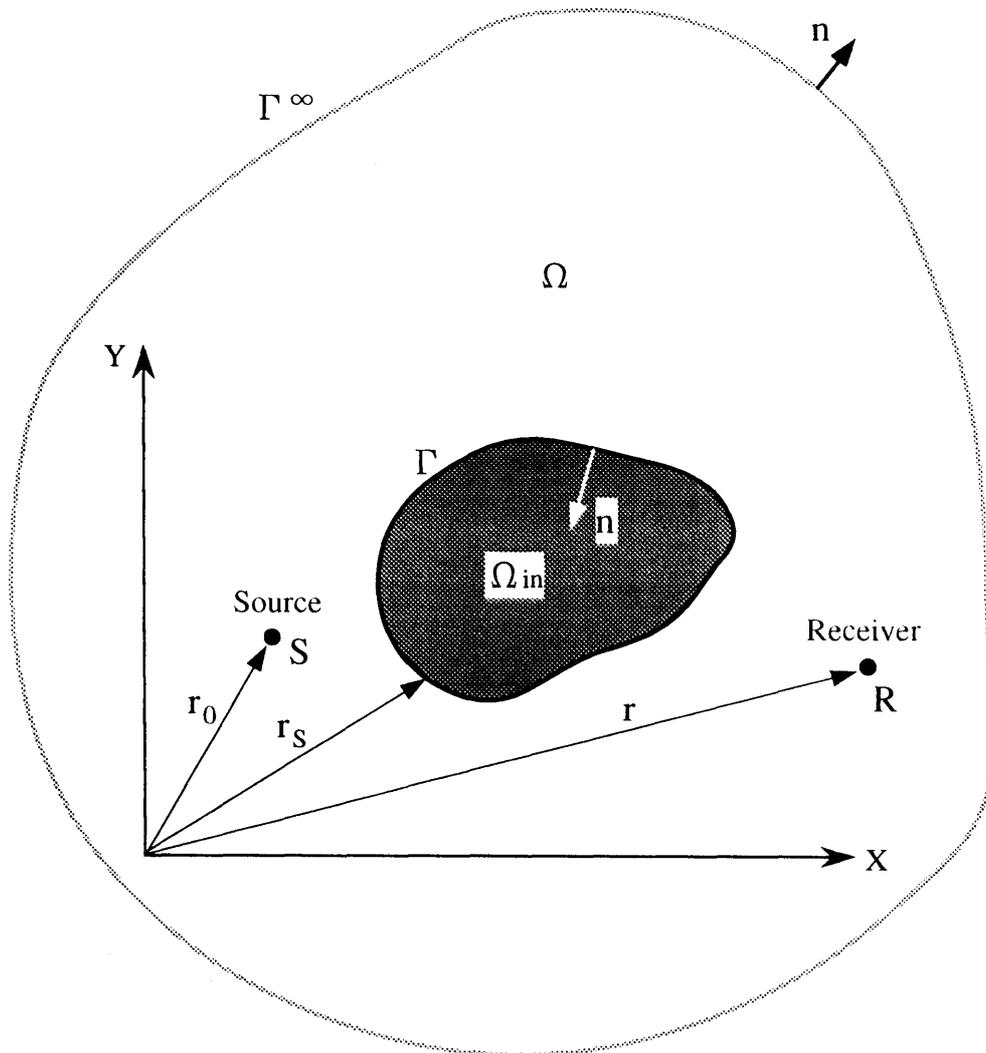


Figure 2.1 Geometry and definition of symbols.

音場は定常状態を想定し、解析の便宜上時間項  $e^{i\omega t}$  はすべて省略するものとする。音場  $\Omega$  内での音源の位置を  $\mathbf{r}_0(x_0, y_0)$  とすると、音源による任意位置  $\mathbf{r}(x, y)$  での音圧  $p(\mathbf{r})$  は次のように Helmholtz 方程式を満足する。

$$(\nabla^2 + k^2) p(\mathbf{r}) = 0 \quad (2.1)$$

ここで、 $k$  は波数(wave number)を表す。それから、任意の関数  $u, v$  が各々微分可能な関数とすると、Green の第 2 定理は次式で表わされる。

$$\int_{\Omega} (v \nabla^2 u - u \nabla^2 v) d\Omega = \int_{\Gamma} \left( v \frac{\partial u}{\partial n} - u \frac{\partial v}{\partial n} \right) d\Gamma \quad (2.2)$$

ここで、 $n$  は音場  $\Omega$  の境界  $\Gamma$  と  $\Gamma^\infty$  での外向き法線の単位ベクトルを表す。(2.1)式に Green の第 2 定理を適用するため、2次元音場の Green 関数  $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$  を次のように表す。

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = \frac{1}{4i} \left\{ H_0^{(2)}(k|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|) \right\} \quad (2.3)$$

ここで、 $H_0^{(2)}$  は 0 次第 2 種 Hankel 関数である。Green 関数  $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$  は 2次元音場  $\Omega$  内で次の方程式を満足する。

$$(\nabla^2 + k^2) G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = -\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \quad (2.4)$$

ここで、 $\delta$  は Delta 関数であり、次のような性質を持っている。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) d\mathbf{r} = 1, \quad (\mathbf{r} = \mathbf{r}_0) \quad (2.5)$$

$$\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) = 0, \quad (\mathbf{r} \neq \mathbf{r}_0)$$

それから、無限遠方での音圧は次のような Sommerfeld の放射条件を満たすものとする。

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r^\epsilon \left( \frac{\partial \phi}{\partial r} - ik\phi \right) = 0 \quad (2.6)$$

ただし、 $\phi$  は音圧を表す関数（速度ポテンシャルに比例する。）、 $\epsilon$  は 1/2（3次元の場合は 1）の値を持つ係数である。Green 関数  $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$  と(2.2)式で表した Green の定理

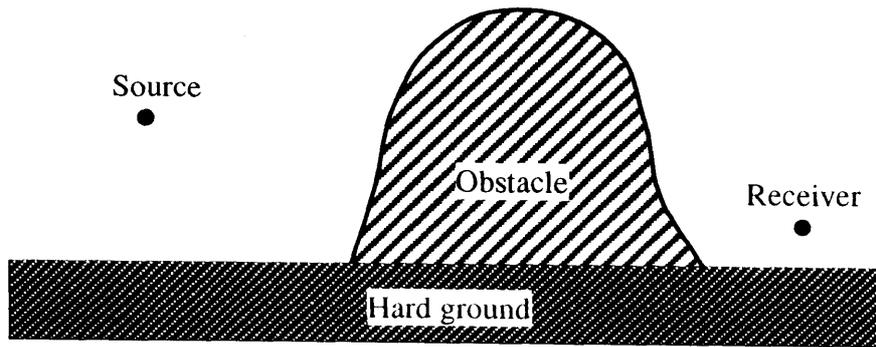
を用いて(2.1)式を変形すると，次のような積分が得られる．

$$\begin{aligned} \varepsilon(\mathbf{r})p(\mathbf{r}) = & G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) \\ & + \int_{\Gamma} \left( p(\mathbf{r}_S) \frac{\partial G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)}{\partial n(\mathbf{r}_S)} - G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S) \frac{\partial p(\mathbf{r}_S)}{\partial n(\mathbf{r}_S)} \right) d\Gamma \end{aligned} \quad (2.7)$$

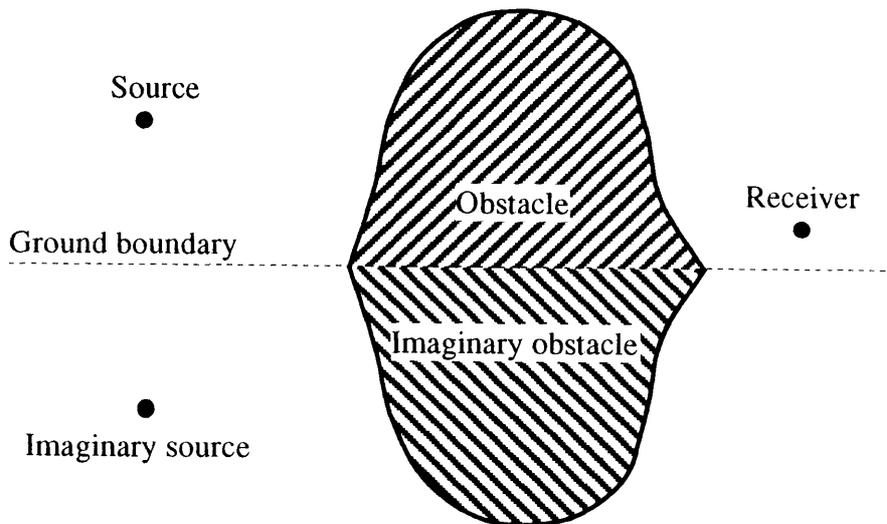
ただし， $\mathbf{r}_S(x_S, y_S)$ は境界面 $\Gamma$ 上の任意位置を表すベクトルである． $\varepsilon(\mathbf{r})$ は Delta 関数を積分するとき生じる係数であって， $\mathbf{r}$ が領域 $\Omega_{in}$ 内に位置する場合は“0”，音場 $\Omega$ 内に位置する場合は“1”，境界面 $\Gamma$ 上に位置する場合は“ $\theta / 2 \pi$ ，”（ $\theta$ は $\mathbf{r}$ が位置する境界面の開き角，3次元の場合は“ $\Theta / 4 \pi$ ”（ $\Theta$ は $\mathbf{r}$ が位置する境界面の開き立体角））の値を持つ．この式は， $\Omega$ 内の音圧 $p(\mathbf{r})$ は直接音成分 $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$ と境界 $\Gamma$ 上の音圧 $p(\mathbf{r}_S)$ ，およびその方向微分 $\partial p(\mathbf{r}_S) / \partial n(\mathbf{r}_S)$ の値を用いて，それらの積分により与えられることを意味する．この境界要素法の出発点となる(2.7)式を Helmholtz-Huygens 積分と呼ぶ．

### 2.3 鏡像法を用いた境界要素モデリング

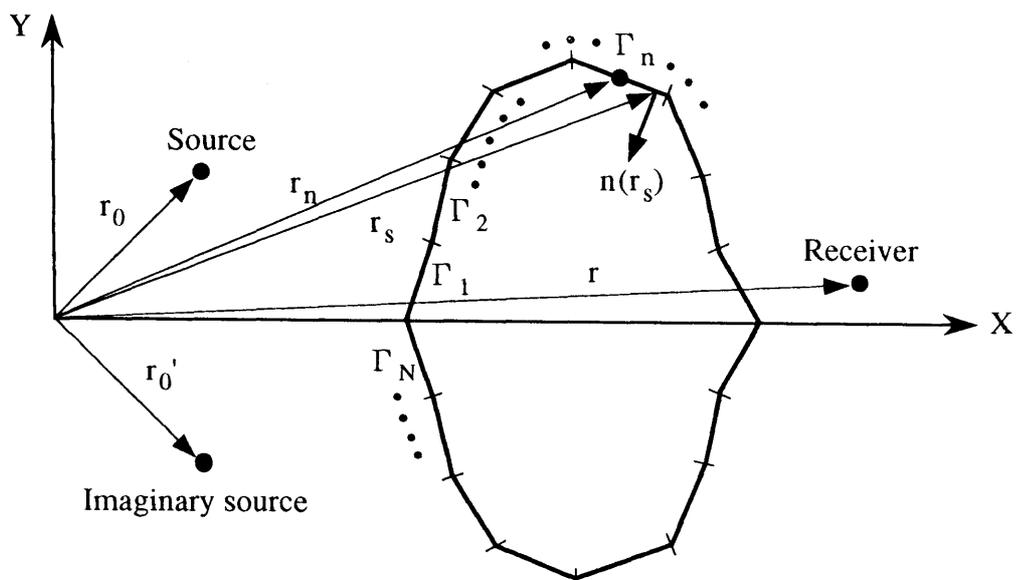
本研究では地面上に防音壁が建てられている散乱音場を解析するのを目的とし，解析の便宜のため地面境界条件を完全反射性の表面とする．完全反射性地面を含む解析のモデリングにおいては2次元の鏡像法を用いることにする．Figure 2.2に境界要素法を用いて数値解析を行うためのモデリング手法を図解する．完全反射性地面に音響的散乱体がおいてある場合(a)，反射性地面の境界面を境目にして散乱体と音源の鏡像を想定する(b)，(b)に示された散乱体と散乱体の鏡像を含む境界面 $\Gamma$ を $N$ 個の境界要素 $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3 \cdots \Gamma_n \cdots \Gamma_N$ で分割し(c)，前節で得られた Helmholtz-Huygens 積分の離散化式に適用する．ただし，計算結果が十分な精度を保つためには分割された各要素の長さは $\lambda/5$ ，あるいは $\lambda/8$ を超えてはならないとされている[28][29]．



(a) An acoustic obstacle on the ground.



(b) A mirror-image model.



(c) Boundary element model and definition of symbols.

Figure 2.2 Two-dimensional modelling for boundary element analysis.

(2.7)式の右辺を演算するに当たって,

$$\frac{\partial}{\partial n(\mathbf{r}_S)} \left\{ H_0^{(2)}(k|\mathbf{r}_S - \mathbf{r}|) \right\} = -k \cdot \cos \theta \cdot H_1^{(2)}(k|\mathbf{r}_S - \mathbf{r}|) \quad (2.8)$$

であるから,

$$\frac{\partial G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)}{\partial n(\mathbf{r}_S)} = -\frac{k}{4i} \cdot \cos \theta \cdot H_1^{(2)}(k|\mathbf{r}_S - \mathbf{r}|) \quad (2.9)$$

ここで,  $\theta$  はベクトル  $\mathbf{r}_S - \mathbf{r}$  と  $\mathbf{n}(\mathbf{r}_S)$  から成す角度を表す. それから,

$$\begin{aligned} \frac{\partial p(\mathbf{r}_S)}{\partial n(\mathbf{r}_S)} &= -\rho \frac{\partial v(\mathbf{r}_S)}{\partial t} \\ &= -\frac{\rho}{Z(\mathbf{r}_S)} \frac{\partial p(\mathbf{r}_S)}{\partial t} \\ &= -i\omega\rho B(\mathbf{r}_S) p(\mathbf{r}_S) \\ &= -ik\rho c B(\mathbf{r}_S) p(\mathbf{r}_S) \\ &= -ik\beta(\mathbf{r}_S) p(\mathbf{r}_S) \end{aligned} \quad (2.10)$$

ここで,  $\rho$  は空気の密度,  $Z(\mathbf{r}_S)$  は境界面  $\Gamma$  上の任意点でのノーマル音響インピーダンス (acoustic impedance),  $B(\mathbf{r}_S)$  は音響アドミッタンス (acoustic admittance),  $\beta(\mathbf{r}_S)$  は比音響アドミッタンス (specific acoustic admittance) を表す. (2.9)式と(2.10)式を用いて(2.7)式の右辺を更に変形すると,

$$\begin{aligned} \varepsilon(\mathbf{r})p(\mathbf{r}) &= D(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) \\ &+ \int_{\Gamma} p(\mathbf{r}_S) \cdot \left\{ -\frac{k}{4i} \cdot \cos \theta \cdot H_1^{(2)}(k|\mathbf{r}_S - \mathbf{r}|) - ik\beta(\mathbf{r}_S) G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S) \right\} d\Gamma \end{aligned} \quad (2.11)$$

ただし, 完全反射性地面の存在によって直接波成分を表す(2.10)式の右辺の第1項は実音源と虚音源の二つの寄与として次式のようなになる.

$$D(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = \frac{1}{4i} \left\{ H_0^{(2)}(k|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|) + H_0^{(2)}(k|\mathbf{r}_0' - \mathbf{r}|) \right\} \quad (2.12)$$

ただし,  $\mathbf{r}_0'$  は完全反射性地面による音源の虚像  $\mathbf{r}_0' = (x_0, -y_0)$  を表す.

ここで、(2.11)式の右辺の第2項の中で境界上の音圧  $p(\mathbf{r}_s)$  を離散化された任意の要素  $\Gamma_n$  の音圧  $p(\mathbf{r}_n)$  とし、要素上の音圧は一定とする。数値解析のための離散化式に変換すると、

$$\begin{aligned} \varepsilon(\mathbf{r})p(\mathbf{r}) &= \frac{1}{4i} \left\{ H_0^{(2)}(k|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|) + H_0^{(2)}(k|\mathbf{r}_0' - \mathbf{r}|) \right\} \\ &\quad - \frac{k}{4} \cdot \sum_{n=1}^N p(\mathbf{r}_n) \cdot \int_{\Gamma_n} \left\{ \cos\theta \cdot H_1^{(2)}(k|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}|) + \beta(\mathbf{r}_s) H_0^{(2)}(k|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}|) \right\} ds(\mathbf{r}_s) \end{aligned} \quad (2.13)$$

(2.13)式から  $p(\mathbf{r})$  を求めるためにはまず、境界要素上の音圧  $p(\mathbf{r}_n)$  を求める必要がある。そこで、(2.13)式に  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_m$ , ( $m=1, 2, 3, \dots, N$ ) を代入すると、つまり、受音点の位置を境界要素の midpoint に設定すると  $N$  元の連立方程式が得られる。ここで、(2.13)式の左辺の中の  $\varepsilon(\mathbf{r}_m)$  は  $1/2$  になる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot p(\mathbf{r}_m) &= \frac{1}{4i} \left\{ H_0^{(2)}(k|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_m|) + H_0^{(2)}(k|\mathbf{r}_0' - \mathbf{r}_m|) \right\} \\ &\quad - \frac{k}{4} \cdot \sum_{n=1}^N p(\mathbf{r}_n) \cdot \int_{\Gamma_n} \left\{ \cos\theta \cdot H_1^{(2)}(k|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_m|) + \beta(\mathbf{r}_s) H_0^{(2)}(k|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_m|) \right\} ds(\mathbf{r}_s) \end{aligned} \quad (2.14)$$

$(m=1, 2, 3, \dots, N)$

これをマトリックスで表すと、

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2} + A_1(\mathbf{r}_1) & A_2(\mathbf{r}_1) & \cdots & A_N(\mathbf{r}_1) \\ A_1(\mathbf{r}_2) & \frac{1}{2} + A_2(\mathbf{r}_2) & \cdots & A_N(\mathbf{r}_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_1(\mathbf{r}_N) & A_2(\mathbf{r}_N) & \cdots & \frac{1}{2} + A_N(\mathbf{r}_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p(\mathbf{r}_1) \\ p(\mathbf{r}_2) \\ \vdots \\ p(\mathbf{r}_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D(\mathbf{r}_1) \\ D(\mathbf{r}_2) \\ \vdots \\ D(\mathbf{r}_N) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

ただし、

$$D(\mathbf{r}_m) = \frac{1}{4i} \left\{ H_0^{(2)}(k|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_m|) + H_0^{(2)}(k|\mathbf{r}_0' - \mathbf{r}_m|) \right\} \quad (2.16)$$

$(m=1, 2, 3, \dots, N)$

$$A_n(\mathbf{r}_m) = \frac{k}{4} \cdot \int_{\Gamma_n} \left\{ \cos\theta \cdot H_1^{(2)}(k|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_m|) + \beta(\mathbf{r}_s) H_0^{(2)}(k|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_m|) \right\} ds(\mathbf{r}_s) \quad (2.17)$$

$(m=1, 2, 3, \dots, N), (n=1, 2, 3, \dots, N)$

(2.14)式から求められた  $p(\mathbf{r}_n)$  を(2.13)式に代入することによって求めようとする受音点での音圧  $p(\mathbf{r})$  が得られる。以上が境界要素法により散乱体が存在する回折音場を数値解析する方法の概略である。実際、本研究における数値解析に用いた境界要素法のプログラムでは、Figure 2.2(c)に示した鏡像法を用いた境界要素モデリングの特徴上、(2.15)式で示したマトリックスの大きさを半分に減らしている。つまり、境界要素や音源の位置が X-軸を中心軸として対称となる性質により、実音源と虚音源による散乱体の虚像の要素上の音圧は、実音源と虚音源による散乱体の実像の要素上の音圧と同じものとなる。こういう性質を用い、計算容量や計算時間を節約することができる。

## 第3章

# 音響管配列によって実現されたソフトな表面

### 3.1 はじめに

本章では、「ソフトな表面とはどういう表面か」について概略的に説明した後、音響管配列がソフトな表面を実現する原理とその効果について説明する。単一音響管の中を平面波が伝搬するとき、音響管内の粒子速度や音圧の分布の数式表現を用い、 $1/4$ 波長音響管の開口部の音響インピーダンスがゼロになる原理を説明する。その後、第2章で定式化した境界積分とその離散化方程式を用いた2次元境界要素法を用いて数値解析を行い、音響管配列によって近似的に実現されたソフトな表面の効果について検討する。数値計算の際、音響管配列と同じ外形と寸法を持つ障害物を想定し、障害物の表面条件を変えることで、剛な表面、完全吸音性表面、理想的にソフトな表面を持つ障害物を考える。これらのそれぞれ異なる表面条件を持つ各障害物と音響管配列を完全反射性と想定した地面上に設置し、線音源から放射される純音に対して、それらの近傍音場について数値解析を行う。理想的にソフトな表面を持つ障害物の近傍音場と音響管配列の近傍音場について比較を行い、音響管配列の有効性を検討する。最後に、音響管の数と幅を変え、それらによる効果の変化について検討する。

## 3.2 音響管配列とソフトな表面

### 3.2.1 ソフトな表面

音響管配列とソフトな表面についての議論を始める前に、まず「ソフトな表面」について概略的に説明する。

一般に、音響材料の表面を呼ぶとき、音響的に「剛な表面」とか吸音率いくらの「吸音性表面」のような表現が良く使われる。剛な表面とは粒子速度(あるいは、体積速度)がゼロになる境界条件を持ち、表面に入射する音波は全部反射してしまう性質を持つ表面を意味する。一方、吸音性表面は、入射波の一部は吸収、一部は反射する性質を持つ表面を意味する。特に、入射波を全部吸収し、反射波が生じない表面を「完全吸音性表面」という。これらに対して「ソフトな表面」は、表面音圧がゼロになる境界条件を持つ表面を意味し、音響的に剛な表面に対比する表現として定義することができる。従って、表面の音響インピーダンスは剛な表面では無限大、ソフトな表面ではゼロになる。しかし、音エネルギーの反射においては、ソフトな表面は剛な表面と共に完全反射性の表面となる。一般に垂直入射条件での複素音圧反射率  $r$  は境界面のノーマル比音響インピーダンス  $z$  を用いて、

$$r = \frac{z-1}{z+1} \quad (3.1)$$

で与えられ、エネルギー反射率は、

$$|r|^2 = \left| \frac{z-1}{z+1} \right|^2 \quad (3.2)$$

で与えられ、 $z = \infty$ でも  $z = 0$ でも両者において  $|r|^2 = 1$ である。

### 3.2.2 1/4 波長音響管によるソフトな表面の近似的実現

前述のような性質を持つソフトな表面を藤原らは音響管配列によって実現している[30-32]。音響管配列がソフトな表面を実現する原理を Figure 3.1 に表す。

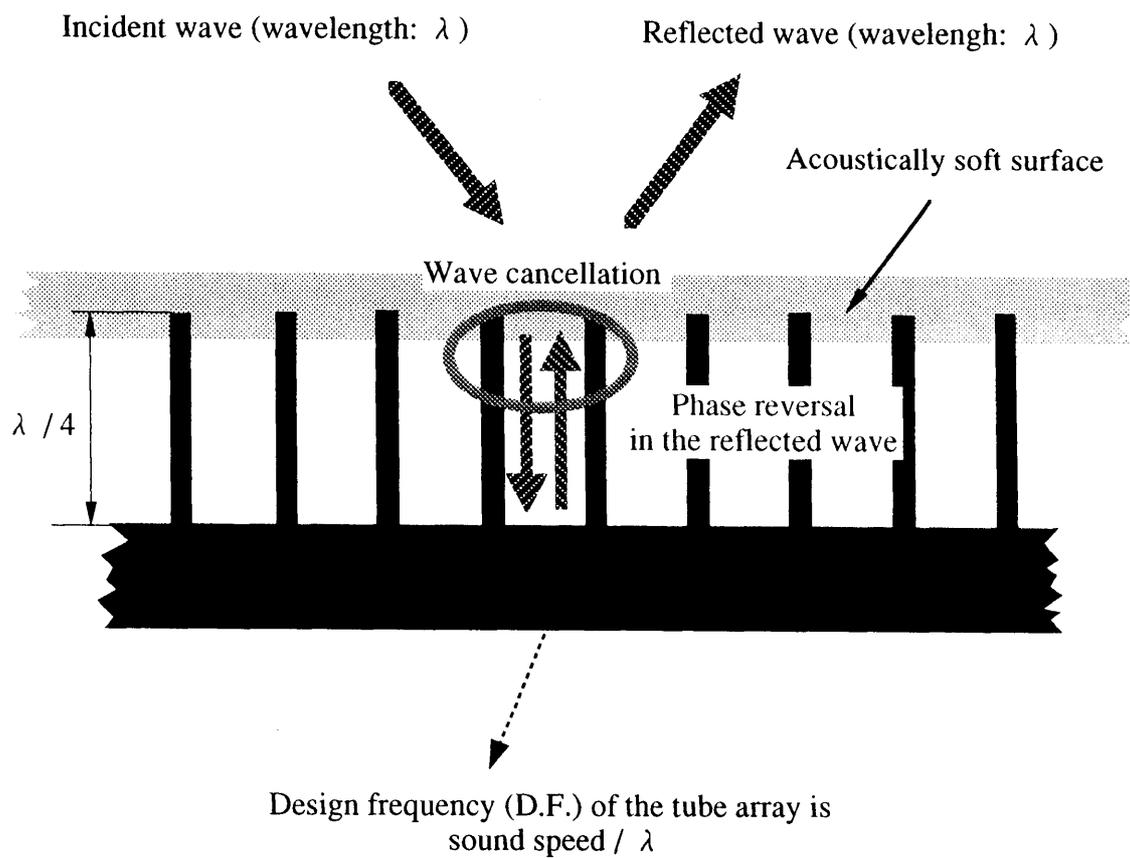


Figure 3.1 An acoustically soft surface realized by an array of tubes.

入射波が、音響管開口部から内部を伝搬し、底部で反射され、再び開口部に達して、新たな入射波と干渉する。このとき、位相が反転されて打ち消される最低の周波数、すなわち音響管の深さが1/4波長に一致する周波数を本研究における設計周波数と定義する。従って、設計周波数とその奇数倍の周波数の音波が入射するとき、音響管配列の開口部では音圧がゼロとなりソフトな表面を近似的に実現することになる。しかし、この周波数以外ではソフトな表面の効果を期待するのは概念的に不可能であり、この故に全周波数領域で効果を持つ理想的にソフトな表面を音響管配列を用いて実現することは非常に困難である。それから、音響管配列が設計周波数とその奇数倍の周波数付近でソフトな表面を実現するためには、音響管内に伝搬する音波は平面波であることが条件となる。音響管内に平面波が伝搬するためには、一般に知られている条件[33],

$$D < 0.59\lambda \quad (3.3)$$

を満たす必要がある、ただし、 $D$ は音響管の直径、 $\lambda$ は音響管内を伝搬する音波の波長である。この条件を満たさない音波は音響管内を一次元的に伝搬しないため、音響管の開口部における入射波と反射波が打ち消し合いにくくなる。Figure 3.2に一般に知られている、音響管内の粒子速度分布(b)と音圧分布(c)を表す。管内において同一周波数の2つの波(入射波と反射波)が相互に干渉し合った結果であり、このような状態の波を定在波(standing wave)という。この状態で音響管の開口端でのインピーダンスは次式で知られている。

$$z_{x=0} = -j\rho c \cdot \cot kL \quad (3.4)$$

ただし、 $k$ は波数(wave number)を表す。(3.4)式から、 $z_{x=0} = -j\rho c \cdot \cot kL = 0$ を満たすには、 $\cot kL = 0$ すなわち、

$$kL = \frac{\pi}{2} + n\pi, \quad (n=0, 1, 2, 3, \dots) \quad (3.5)$$

あるいは,

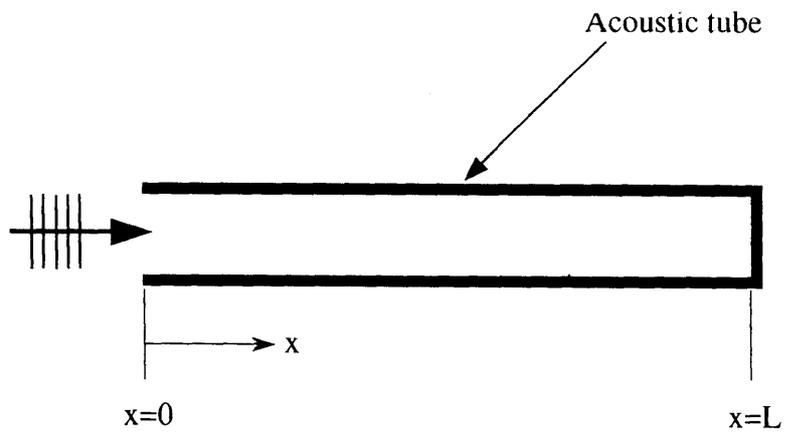
$$\frac{2\pi}{\lambda} \cdot L = \frac{\pi}{2} + n\pi, \quad (n=0, 1, 2, 3, \dots) \quad (3.6)$$

つまり,

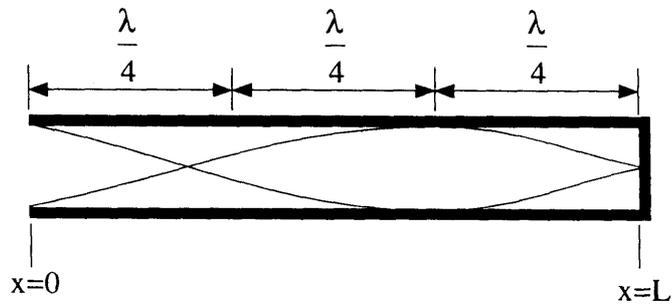
$$L = \left( \frac{1}{4} + \frac{n}{2} \right) \cdot \lambda, \quad (n=0, 1, 2, 3, \dots) \quad (3.7)$$

になって、音響管の長さが $\lambda/4$ とその奇数倍のとき(3.4)式で表される、音響管の開口端でのインピーダンスはゼロとなる。

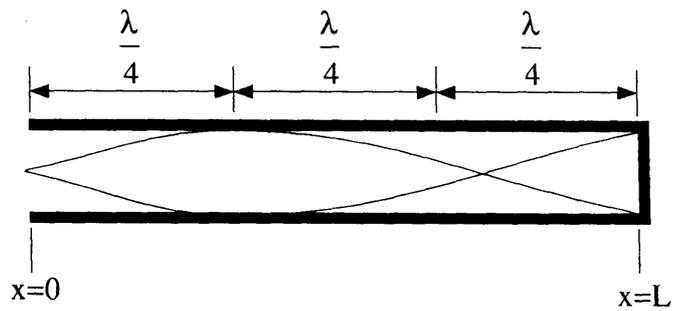
以上、述べた根拠で $1/4$ 波長音響管で構成された音響管配列は、前述で定義した設計周波数とその奇数倍の周波数付近でソフトに近い条件の表面を持つことができる。



(a) Plane wave propagation in an acoustic tube.



(b) Particle velocity distribution.



(c) Sound pressure distribution.

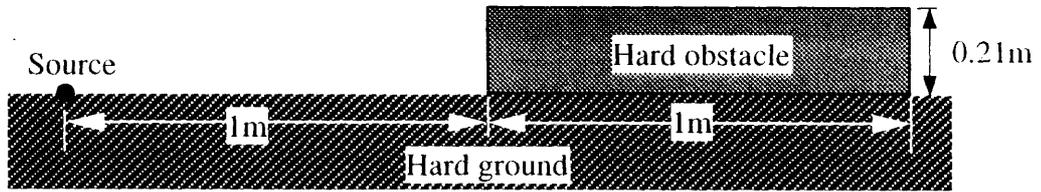
Figure 3.2 Particle velocity and sound pressure distributions in an acoustic tube.

### 3.3 音響管配列によるソフトな表面の有効性

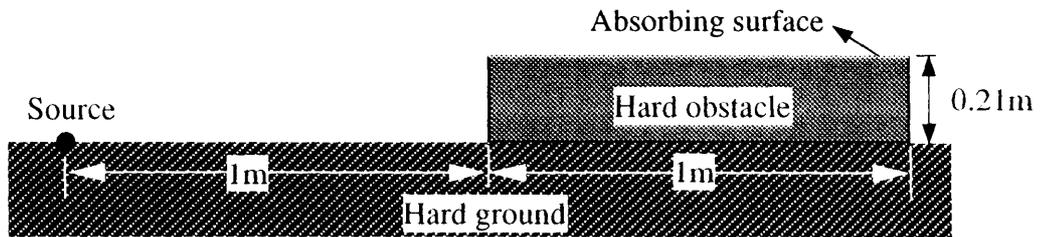
本節では、第2章にて説明した境界要素法を用いて、音響管配列およびこれと同じ外形寸法の3種類の理想的な表面条件を持つ音響的障害物を想定し、これらの音場に与える影響と音響管配列による影響を比較して検討を行う。

#### 3.3.1 数値解析モデル

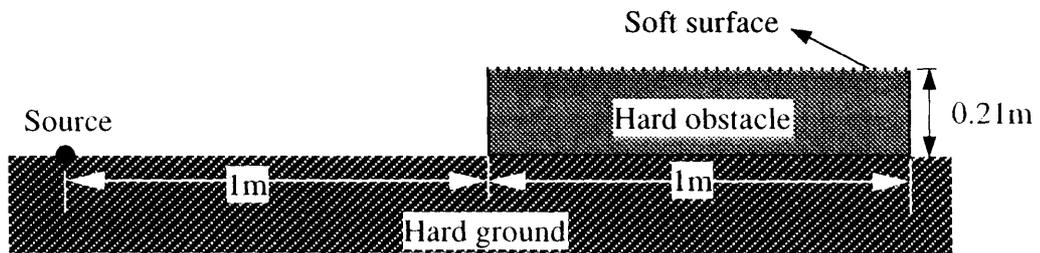
Figure 3.3 に、数値解析モデルとなる音響管配列と、これと比較して解析を行う音響的障害物モデルおよび、解析を行うために想定した音源とモデルとの位置関係を示す。(a)は全体が剛な表面の障害物、(b)は上端面だけが完全吸音性表面の障害物、(c)は上端面だけが理想的にソフトな表面の障害物、それから(d)が深さ 20cm の音響管 10 個で構成された音響管配列を示す。音響管配列の仕切りや底面は全部音響的に剛な表面とする。仕切りの壁の厚さは 1cm、両端の 2 個を除いた音響管の幅は 9cm となっている。音響管配列が幅 1m 内に収まるよう音響管配列の両端の音響管 2 個だけの幅を 8.5cm とする。ここで、設定した音響管配列の深さ 20cm は特別な意味を持っている訳ではなく、任意で決めたものである。ただし、この深さの音響管配列は  $425\text{Hz} (= 340[\text{m/s}]/20[\text{cm}] \times (1/4))$  の設計周波数を持つことになる。(d)のような形の音響管配列を本研究における音響管配列の基本型とする。この形の音響管配列を基本型とする理由は、騒音の音響管内での平面波伝搬のしやすさや、模型製作上の容易さ、それから T 型防音壁に適用する際の実用性などを考えたためである。数値解析のとき設定した各表面の境界条件は、剛な表面の場合はアドミッタンス(admittance)の実数部と虚数部共にゼロ、完全吸音性表面の場合はアドミッタンスの実数部を空気の固有アドミッタンスと同様に  $1/\rho c$ 、虚数部をゼロ、それからアドミッタンスが無限大の理想的にソフトな表面の場合は、アドミッタンスの実数部を  $1,000,000 \times (1/\rho c)$ 、虚数部をゼロと設定した。



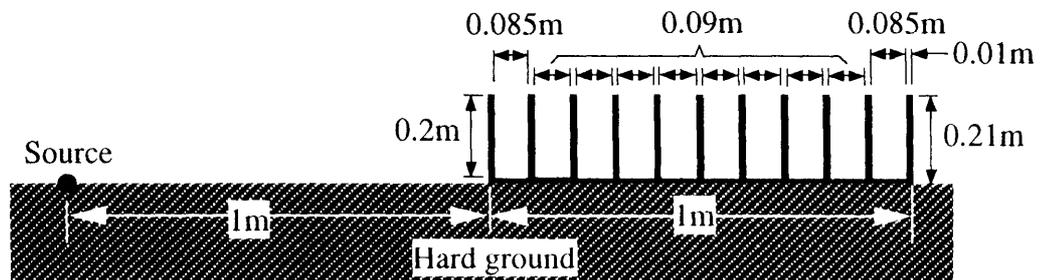
(a) A hard obstacle with hard surface on the ground.



(b) A hard obstacle with absorbing upper surface on the ground.



(c) A hard obstacle with soft upper surface on the ground.



(d) A tube array on the ground.

Figure 3.3 The profile of acoustical obstacles and geometries for calculations.

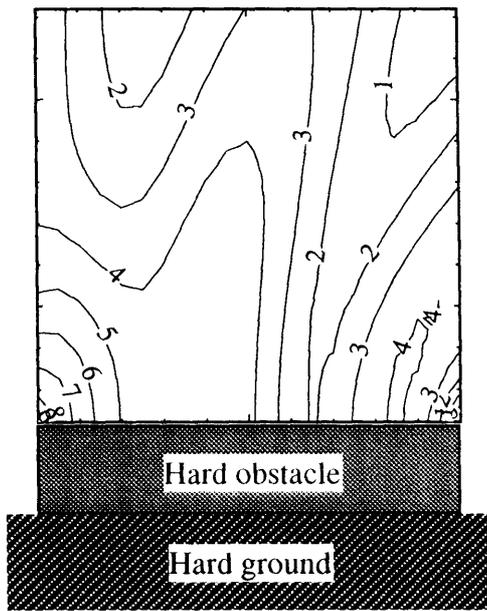
以上で設定した計算モデルに境界要素法を適用する際の境界要素の長さは 0.02m とし、最も短い要素となる音響管の壁の厚さ 0.01m との差が大きくなるようにした(最長要素対最短要素の長さの比=2:1)。この故、本研究全般における計算に用いた要素の長さは、2kHz 以下の周波数では 0.02m(2kHz の波長の約 1/8.5)、2kHz 以上 4kHz までの周波数では 0.015m(4kHz の波長の約 1/5.7)とする。このように設定した要素の長さは計算の精度を保つには妥当な値だと思われる[34,35]。それから、解析を行うことに当たり、2次元モデルを用いるため、音源は純音を放射する線音源と設定する。

### 3.3.2 音響管配列近傍の音圧レベルの空間分布

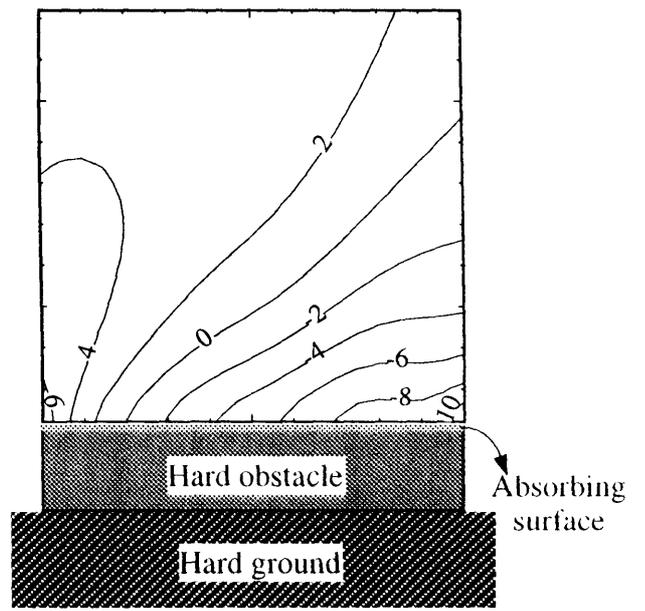
Figure 3.4 は Figure 3.3 に示した 2次元音場における理想的な表面条件を持つ各障害物や音響管配列上部の音圧レベル分布を表す計算結果である。完全反射性の地面上に設定された音源は 400Hz の純音を放射しているとする。示された音圧レベルは自由音場 1m 離れた点で基準化された音圧レベルである。(d)に示された音響管配列の音響管の深さ(20cm)が 400Hz の 1/4 波長(約 21cm)に近いので、(c)の理想的にソフトな表面上部の音圧レベル分布と(d)の音響管配列の上部の音圧レベルの分布はかなり似た結果を示している。この結果から、設計周波数付近の音波に限るものの、音響管配列によってソフトな表面を実現することが可能であることが確認できる。音響管開口部に近接する音場においては配列された仕切りの影響で(c)の理想的にソフトな表面に比べると多少複雑な分布になっているが、表面近くにおける音圧低減の様子はほぼ一致している。(b)の完全吸音性の表面と(c)の理想的にソフトな表面上部の音圧レベル分布を比較してみると、分布の形状は似ているものの、表面近くの音圧レベルが理想的にソフトな表面の方が非常に低くなっているのが分かる。(c)、(d)両方共に、表面近くにおける音圧レベルの変化が急激になり、僅か数センチにおける低下する値は 20dB 近くにも及んでいる。この変化の度合は(b)の完全吸音性表面付近の音圧変化と

は明確に違い、(d)の音響管配列は(c)のソフトな表面を実現していることが分かる。

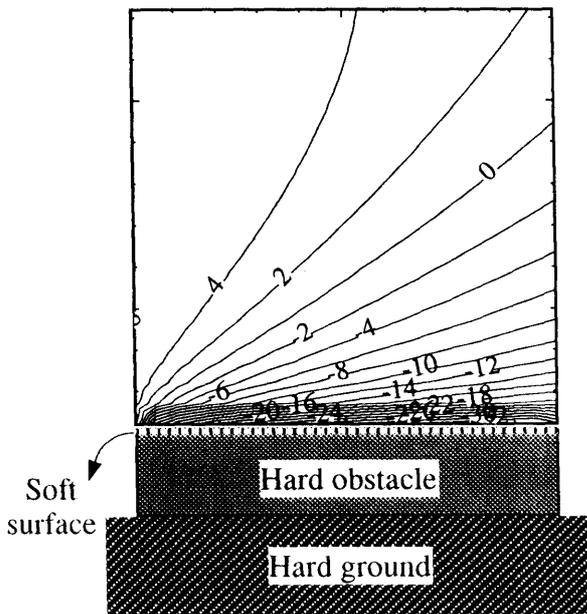
Figure 3.5 は、Figure 3.3 の(d)のように設定した音場における、配列された音響管の開口部近傍での音圧レベル分布を表す計算結果である。(a)が音源の周波数が Figure 3.4 の場合と同じく 400Hz の場合、それから(b)は配列された音響管の設計周波数に合わせた 425Hz の場合である。示された音圧レベルも Figure 3.4 の場合と同じく、自由音場 1m 離れた点で基準化された音圧レベルである。図は、各音響管毎の縦中心線の上に音響管の開口部から上下 10cm の範囲を 1cm 間隔、つまり計 21 個の受信点における音圧レベルを計算した結果を表したものである。グラフの見方は、各音響管毎の中心線から左側がマイナス、右側がプラスの値の音圧レベルを意味する。示されたグラフの中の値自体は相対的レベル値を表すので大きな意味はなく、分布の様子だけが意味を持ち、音響管の開口部付近での相対的音圧レベルが周りに比べて非常に低くなって、一つの表面を形成していることが分かる。この表面こそが音響管配列によって実現されたソフトな表面である。音源の周波数が音響管配列の設計周波数に合っているだけ、(b)の方が(a)よりはるかに低く、明確にソフトな表面が形成されている。Figure 3.4, Figure 3.5 の結果から、音響管配列はソフトな表面を近似的に実現していることが確認できる。



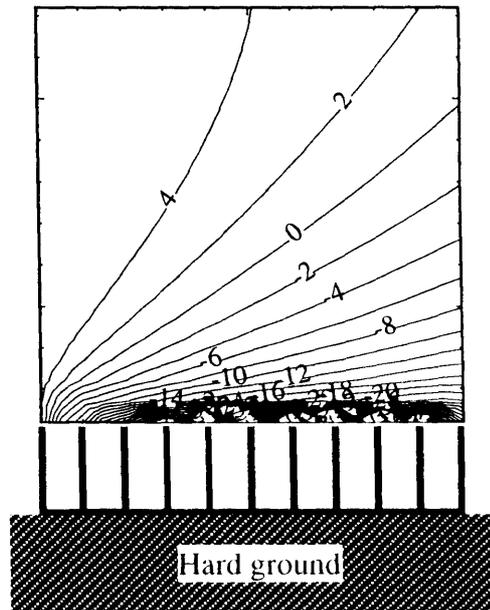
(a) SPL contour above the hard surface.



(b) SPL contour above the absorptive surface.

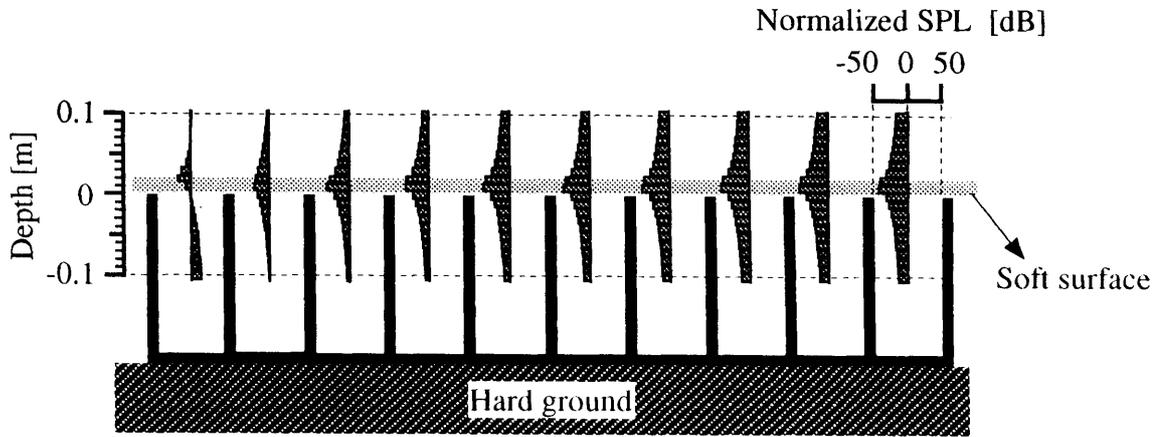


(c) SPL contour above the soft surface.

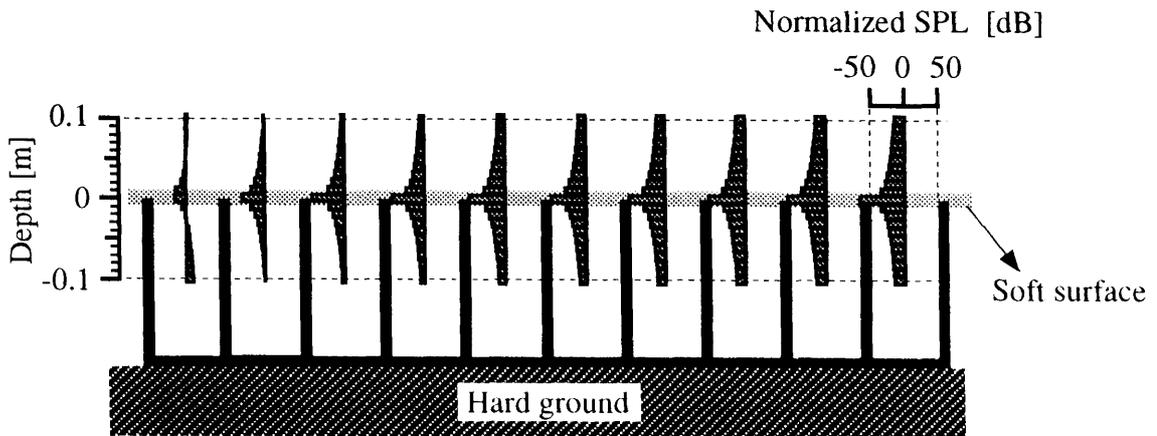


(d) SPL contour above the tube array.

Figure 3.4 Calculated SPL contours for the geometries shown in Figure 3.3. The frequency of the source is 400Hz.



(a) Calculate SPL when the frequency of the source is 400Hz.



(b) Calculated SPL when the frequency of the source is 425Hz.

Figure 3.5 Calculated SPL distributions near the open ends of the arrayed tubes for the geometry shown in figure 3.3(d)

### 3.3.3 音響管配列の挿入損失の周波数特性

Figure 3.6 は Figure 3.3 に示した(a),(b),(c)の3種類の理想的な表面を持つ障害物および(d)の音響管配列の挿入損失の周波数特性を比較して表した計算結果である。各障害物および音源、受音点との位置関係をグラフの下にあわせて示す。各周波数ごとの挿入損失は次式によって計算されている。

$$IL = 20 \log \frac{p_g}{p_b} \quad (3.8)$$

ここで、 $p_g$  は地面上に何も無いときに受音点で観測される音圧、 $p_b$  は地面上に3種類の理想的な表面を持つ障害物や音響管配列をおいた場合に受音点で観測される音圧を表す。Figure 3.6 の周波数特性をみると、(3)の理想的にソフトな表面は(2)の完全吸音性表面に比べて、解析された周波数帯域の全域で高い挿入損失値を示し、減音効果が大きいのが分かる。一方、(4)の音響管配列の場合は約 378, 1130, 1940, 2400Hz 付近でピークを表し、この周波数付近では理想的にソフトな表面とほぼ等しい効果が得られている。第1ピーク付近において、ソフトな表面の効果との差が 1dB 未満になる周波数範囲は約 360~470Hz, 第2ピーク付近においては約 1130~1300Hz となる。音響管配列によって近似的に実現されたソフトな効果の許容値を 1dB とすると、この周波数範囲ではソフトな効果が現れていると考えられる。許容値 1dB はモデリングによる計算誤差などを考慮すると十分考えられる値である。第2ピークの 1130Hz と第3ピークの 1940Hz は第1ピークのほぼ3倍および5倍の周波数になっている。また、第4ピークの 2400Hz は第1ピークの周波数の奇数倍からずれている。これは音響管内に平面波伝搬が生じる周波数の範囲を越えているために音響管の共鳴周波数から外れてずれていると考えられ、このような高周波数域で音響管配列がソフトな表面を実現する周波数を予測するのは困難であろう。実際、幅 0.09m の音響管内を平面波で伝搬できる周波数を(3.3)式を用いて求めてみると、

$f_{\text{plane}} < 2229\text{Hz} (= 340[\text{m/sec}]/(0.09[\text{m}]/0.59))$ となる。それから、ピークが現れる周波数の直前には同じ外形寸法を持つ剛な表面の障害物より挿入損失の値が小さい、効果のディップが現れている。これは配列された音響管に共鳴が起こる直前音響管の放射インピーダンスが急に大きくなることに起因すると考えられる。

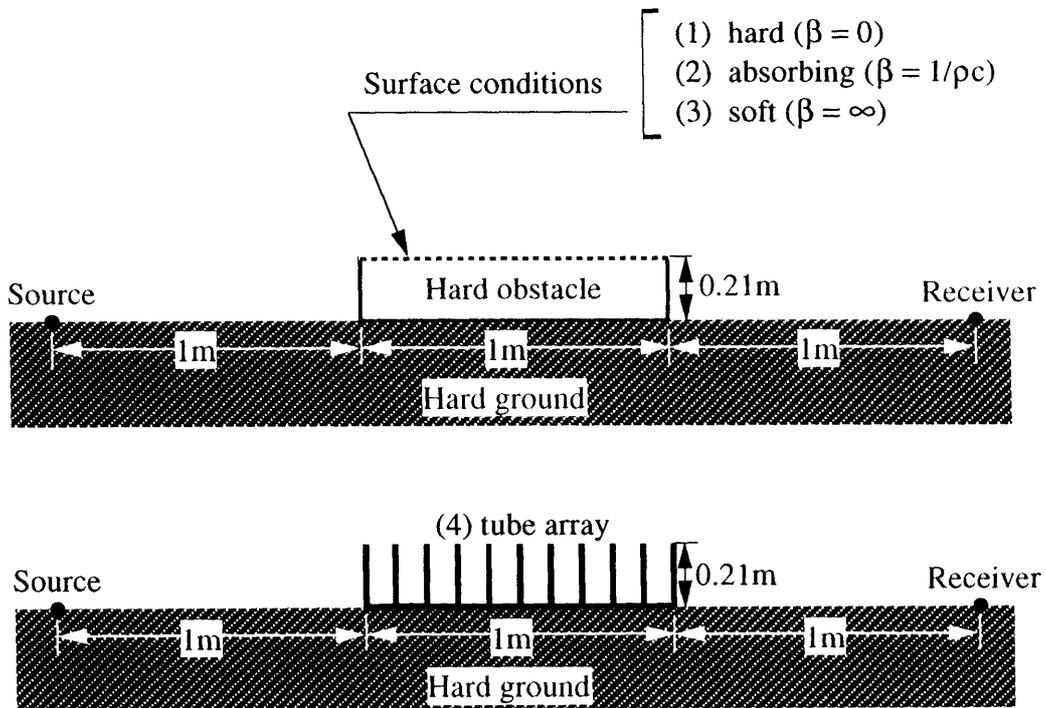
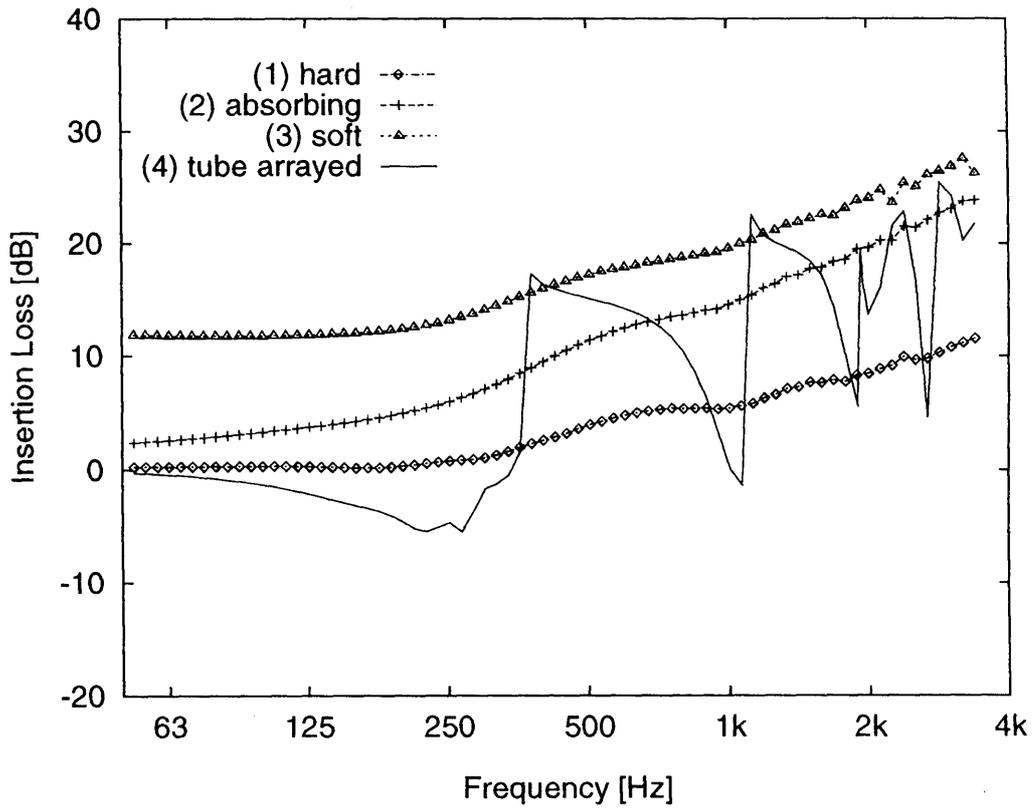


Figure 3.6 Calculated spectra of insertion loss for the geometries shown.

### 3.4 音響管の数とソフトな表面

配列された音響管の第 1 共鳴周波数とその奇数倍の周波数付近で音響管配列はソフトな表面の効果を持つことが確認された。音響管の配列でソフトな表面を実現するため、Figure 3.3(d)に示した深さ 0.2m の音響管 10 個の配列を基本型とし、解析を行って来た。この基本型とした音響管配列の幅とは、約 2.2kHz までの音波が音響管内を平面波で伝搬できる範囲内での実用性や模型製作における便利さなどだけを考えて大まかに決めた寸法であると前述した。しかし、もし基本型とした音響管配列より音響管の数を減らしてその効果があまり変わらないとすると、音響管の数が少ない方が実用化するには有利であり、逆に、もしも音響管の数を増やして配列の効果が劇的に大きくなるとすると、経済的には少々不利であっても大きい効果を持つ防音壁を実現することができる。そこで本節では、音響管の数や幅が変わることによって音響管配列の挿入損失がどのように変化するかについて検討を行う。Figure 3.7 は深さ 0.2m、幅 0.09m の音響管を 1 個から 10 個まで、その数を増しながら周波数特性を調べた計算結果を示す。つまり、一個一個の音響管の幅は変えずに、配列全体の幅を 0.11m(1 個)から 1m(10 個)まで変えることになる。ただし、音源と受音点の位置は音響管配列の両端から各々 1m 離れた地面に設定し、いずれも音響管配列に対する入射角は一定にする。グラフの下に音響管の配列、音源、受音点の位置関係を示す。配列の中心を原点とし、音響管の数が増えていくにつれて音源と受音点は配列の両端からの距離を一定に維持しながら原点から遠くなる。計算結果によると、音響管の数が増えていくにつれて挿入損失が向上すると同時にピークとディップの差も次第に大きくなっていくことが分かる。この結果から、音響管の数が少なくても配列の効果は現れることと音響管の数が多くなるほどその効果も大きくなることが分かる。

次に、音響管配列全体の幅は 1m で一定とし、それを構成する個々の音響管の幅を変えることにつれての配列の挿入損失の変化について検討する。Figure3.8 にその計算結果を示す。グラフの下に解析モデルと音源・受音点の位置関係を示す。第 1 共鳴周波数を表す最初のピークは、(1)が 356Hz, (2)が 378Hz, (3)が 400Hz に現れている。音響管の数が 14 個である(3)の場合、第 1 共鳴周波数が 400Hz, 第 2 共鳴周波数が 1200Hz, 第 3 共鳴周波数が 2017Hz, そして第 4 共鳴周波数が 2853Hz となり、第 1 共鳴周波数の奇数倍の周波数とほぼ一致している。いずれも音響管の深さを 0.2m としているので、この深さに対応する設計周波数は、 $(340[\text{m/s}]/0.2[\text{m}]) \times (1/4) = 425[\text{Hz}]$  になる。しかし、この設計周波数とグラフ上の最初のピークを示す周波数が一致しないのは音響管の開口端補正問題を考慮しなかったためである。無限に広いバツフルの中に半径  $a$  の一つの円形音響管が付いている場合の開口端補正は理論的に次の式で求められている[36].

$$\Delta L = \frac{8a}{3\pi} \approx 0.85a \quad (3.9)$$

また、バツフルがついてない円管の開口端補正は実験によって、

$$\Delta L \approx 0.6a \quad (3.10)$$

となっている。ここで、(3.10)式を用いて第 1 共鳴周波数を計算すると、(1)が 345Hz, (2)が 374Hz, (3)が 390Hz になる。解析を行った周波数の間隔や(3.10)式の係数の精度を考えるとこれらの共鳴周波数は Figure 3.8 の結果とよく合致しているといえよう。このことから、音響管配列によるソフトな効果のピークが現れる周波数を予測するにはバツフルのない円管の開口端補正をすることで十分であることが分かる。また、音響管の数が多くて配列される音響管の幅が狭くなると、平面波として伝搬できる周波数も高くなり、(2)の幅 0.09m の音響管配列は約 2kHz, (3)の幅 0.06m の音響管配列は約 3kHz まで平面波が伝搬できるので約 2kHz までの両方の効果はほぼ変わらないこ

と分かる。Figure3.7, Figure3.8 の結果から、音響管の数が多く幅が狭い方が第1共鳴周波数の奇数倍の周波数とピーク周波数がよく一致し、ソフトな表面としての効果も高いことが分かる。しかし、音響管の数が多いとそれだけ音響管配列の重さが重くなり、製作におけるコストも高くなる。音響管配列を実際にT型防音壁の上端に設ける場合に防音壁にかかる荷重や経済性といった点を考えると、効果は多少減少するが、むしろ音響管の数が少なく幅が広い方が望ましい。こういう訳で、基本型としたFigure3.3(d)の10個の音響管で構成された幅1mの音響管配列は、効果および実用性の両面で妥当な寸法であると考えられる。ソフトな表面の効果という面からみても、Figure 3.7の(1)と(2)の違いは効果がピークとなる周波数が若干ずれているだけで、それ以外に大きな差異はみられない。そこで、以下の章では10個の音響管で構成された音響管配列について検討を進める。

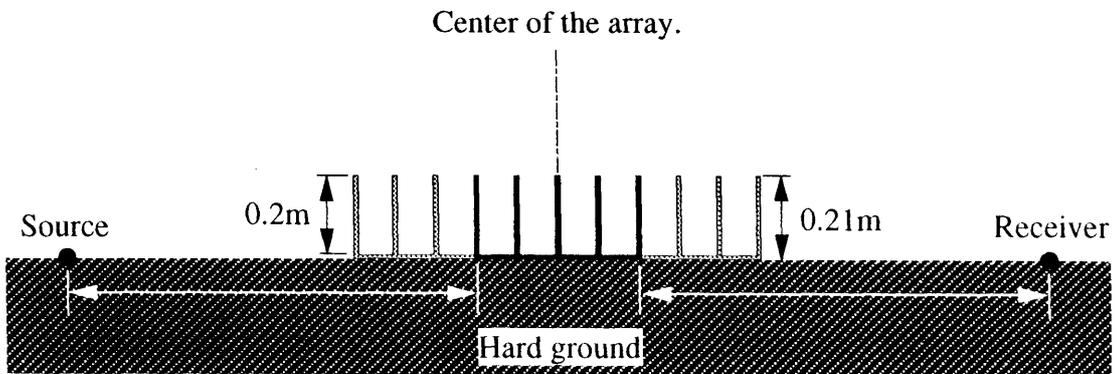
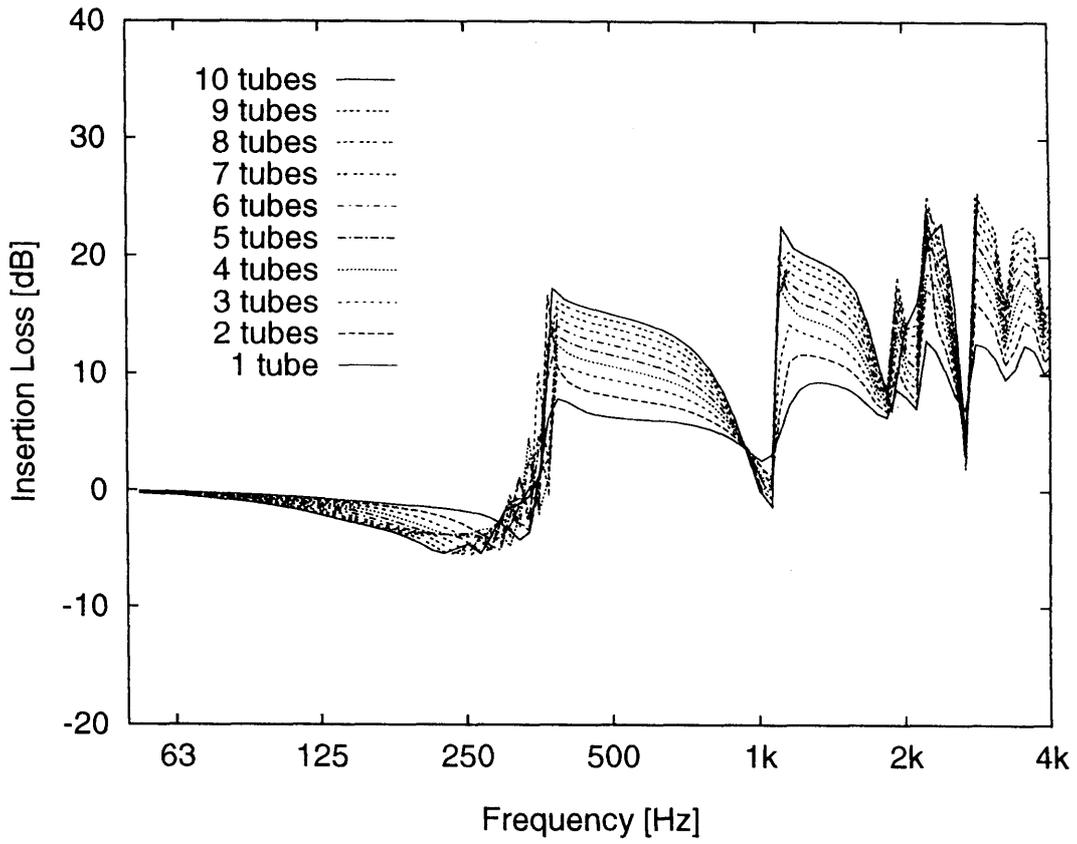
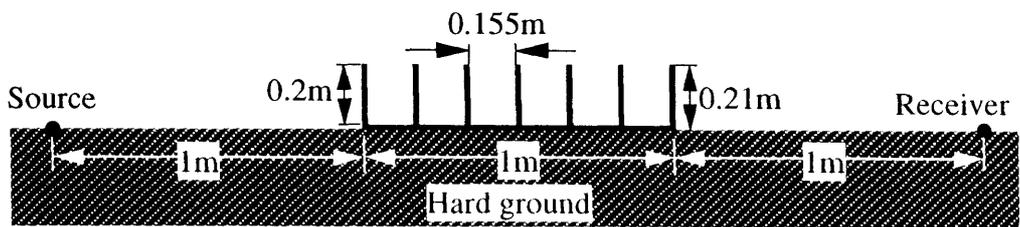
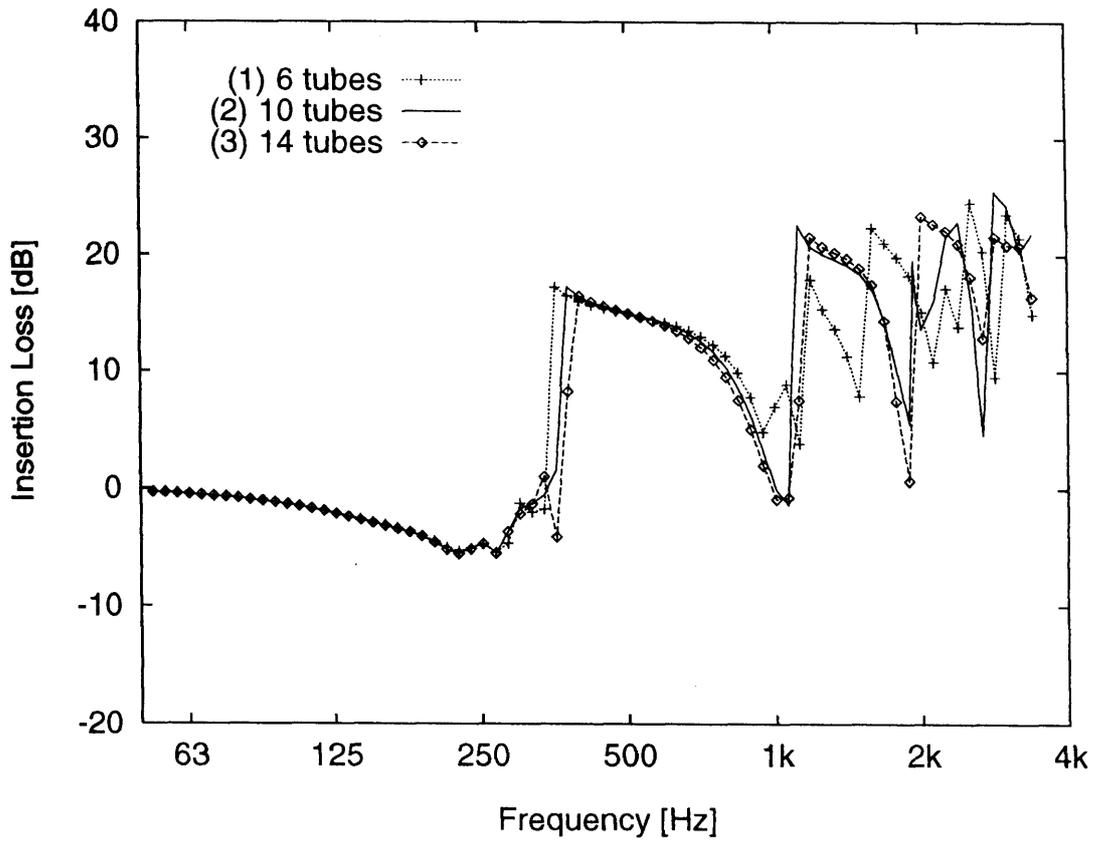
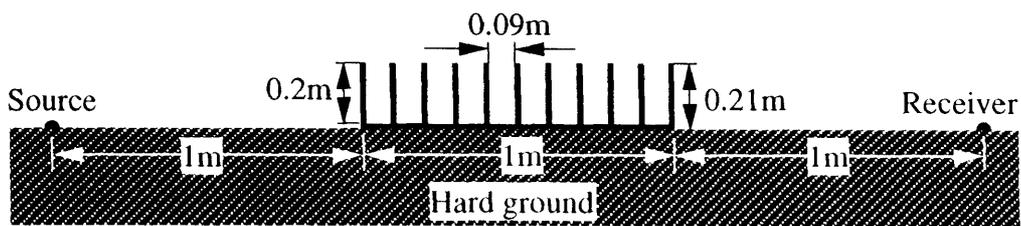


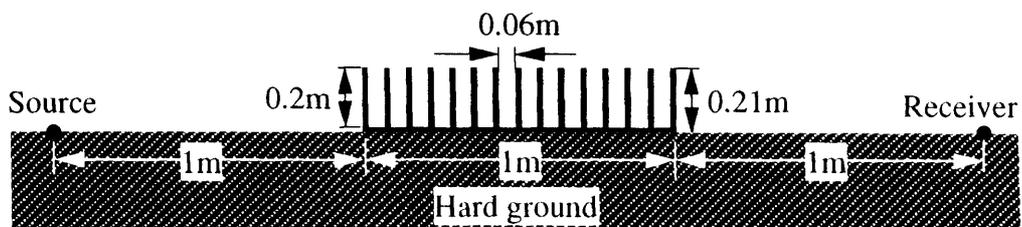
Figure 3.7 The change of spectra of insertion loss due to the number of tubes for the geometry shown.



(1) Array of 6 tubes.



(2) Array of 10 tubes.



(3) Array of 14 tubes.

Figure 3.8 The change of spectra of insertions loss for the geometries shown.

### 3.5 まとめ

音響的にソフトな表面が完全吸音性表面より減音効果があることから、音響管の配列によって表面音圧をゼロにさせる方法が既に提案された。本章では2次元境界要素法を用いた数値解析でその効果を調べた。その結果、設計周波数付近で音響管配列は理想的にソフトな表面に近い効果を持つことが確認された。音響管の数と配列の効果との関係を調べた結果、音響管の数が多いほど配列の効果も大きくなることが確認された。しかし、現実には決められた長さの範囲に配列される音響管の数は限定されてしまう。そこで、配列される音響管の幅を変えて決められた長さの範囲で音響管の数と配列の効果との関係を調べた結果、音響管の数より音響管の幅の変化が配列の挿入損失に与える影響が大きいことが分かった。

## 第4章

# ソフトなT型防音壁の試み

### 4.1 はじめに

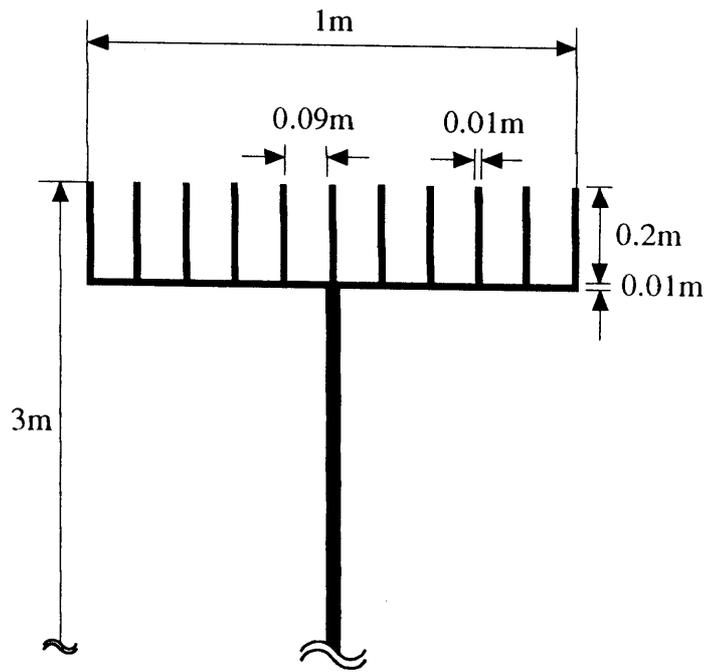
T型防音壁はその形状の単純さの割に良い遮音性能を持つことが幾つかの研究から報告されている[37-39]. これは剛な垂直型防音壁の上端に水平な平板, すなわち「キャップ」を取り付けることにより回折角が大きくなるのがその主な原因として取り上げられる. さらに, 同じ幅であってもキャップの上面を吸音性にすることで遮音量が大幅に大きくなるのが May[40]らの実験結果から明らかにされている. そこで本章では, 前章において検討を行った音響管配列をT型防音壁の上端に設け, 上端がソフトな表面の効果を持つT型防音壁の実現を試みる.

### 4.2 数値解析モデルおよび解析音場

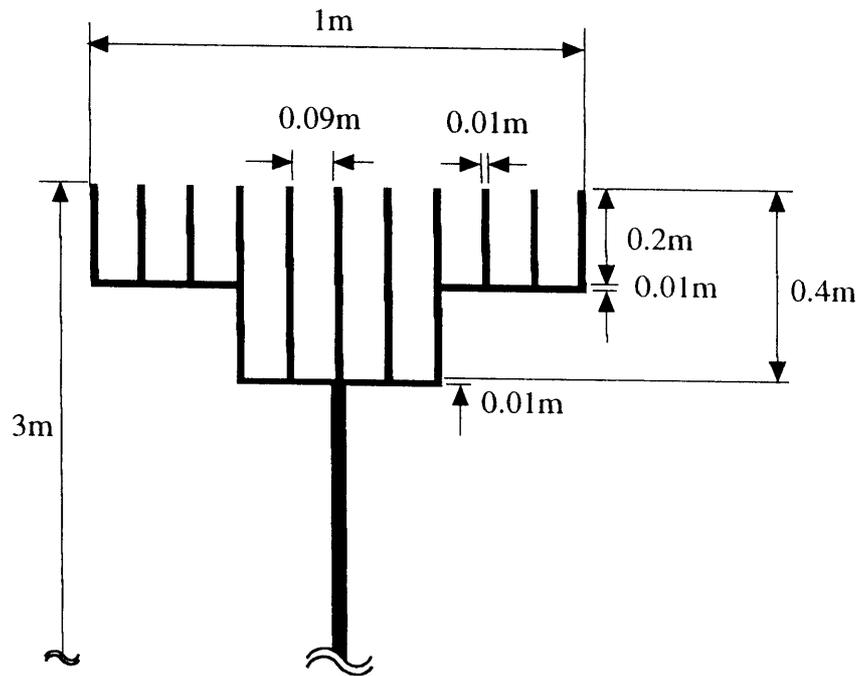
上端部がソフトな表面になるようT型防音壁の上端部に音響管配列を設けた防音壁の数値解析モデルを Figure 4.1 に示す. (a)は基本型の音響管配列を設けた防音壁, (b)は2種類深さを持つ音響管配列を持つ防音壁を表す. (b)の外郭形状はもはやT型からやや離れてしまうが, 基本的な考え方としてT型防音壁の上端に音響管を配列したことから, 本研究の範囲では(b)防音壁もT型として分類する. 基本型の音響管配列を持つ(a)の防音壁に加えて, (b)の防音壁のような2種類深さの音響管配列を持つ防音壁の

遮音効果を比較して検討することによって、前章の結果から予測される(a)の防音壁の効果の周波数依存性がどのように変化するのかが検討できる。前章の Figure 3.6 では、音響管配列の挿入損失は設計周波数の約半分の周波数域で剛で単純な障害物障害物よりも小さくなっている。このような挿入損失の減少を補うため、その周波数域に新たな設計周波数を持つ音響管を加えることを考えたわけである。(a)の防音壁に設けた音響管配列の深さは 20cm で、設計周波数が  $425\text{Hz}(=340[\text{m/s}]/(20[\text{cm}]\times 4))$ 、それから(b)防音壁に設けた音響管配列の深さは 20cm と 40cm で設計周波数は 425Hz と  $212\text{Hz}(=340[\text{m/s}]/(40[\text{cm}]\times 4))$ の二つになる。Figure 4.1 に示した 2 種類の防音壁の遮音効果と比較して検討を行う防音壁の数値解析モデルを Figure 4.2 に表す。(a)が剛な垂直型防音壁、(b)が Figure 4.1 に示した防音壁と同じ高さを持つ剛な T 型防音壁、(c)は(b)の T 型防音壁の上端部の表面の境界条件を完全吸音性と設定した吸音性防音壁、(d)は(b)の T 型防音壁の上端部の表面の境界条件を理想的にソフトな表面とした防音壁を表す。ここで、本研究全般における防音壁の名前の付け方について説明しておく。Figure 4.1(a)の「h3ODFw1」は示された防音壁が、高さ 3m(h3: 3m-height)、一つの設計周波数(One Design Frequency)の音響管配列を持つ、上端の幅が 1m(w1: 1m-width)の防音壁であることを意味する。同様に、(b)の「h3TDFw1」は、高さ 3m、二つの設計周波数(Two Design Frequency)の音響管配列を持つ、上端の幅が 1m の防音壁を表す。Figure 4.2(a)の「h3HP」は、高さ 3m の剛な垂直型(Hard Plane)防音壁、(b)の「h3HTw1」は、高さ 3m、上端の幅 1m の剛な T 型(Hard T-shape)防音壁、(c)の「h3ATw1」は、高さ 3m、上端の幅 1m、上端表面の境界条件が完全吸音性の T 型(Absorptive T-shape)防音壁、(d)の「h3STw1」は、高さ 3m、上端の幅 1m、上端表面の境界条件が理想的にソフトな T 型(Soft T-shape)防音壁であることを意味する。(c)と(d)の防音壁上端部表面の数値解析における境界条件は第 3 章の Figure 3.3 の(b)と(c)に示した完全吸音性表面と理想的にソフトな表面の

境界条件設定と同様にした。Figure 4.3 に Figure 4.1 や Figure 4.2 に示した防音壁を設置して数値解析を行う 2 次元音場を示す。完全反射性の剛な地面を想定し、純音を放射する線音源を防音壁の中心から 5m 離れた地面上に設定、遮音効果の周波数特性を調べるための受音点は防音壁の中心から 25m 離れた地面上に設定する。音源と受音点を地面上に設定する理由は、地面反射による干渉の影響により効果の周波数スペクトルや空間分布が複雑となり、表面音響条件の差による効果の変化が見出しにくくなることを避けるためである。それから、遮音効果（挿入損失）の空間分布を調べるために設定した受音点は、防音壁から 1～30m、地面上 0～10m の領域を受音領域として取り、この領域内を 0.5m 間隔で計 1239(59×21)個の受音点を設置し、(3.13)式を用いて挿入損失値を計算した。



(a) h3ODFw1-barrier



(b) h3TDFw1-barrier

Figure 4.1 The profiles of soft T-shape noise barrier realized by the array of tubes.

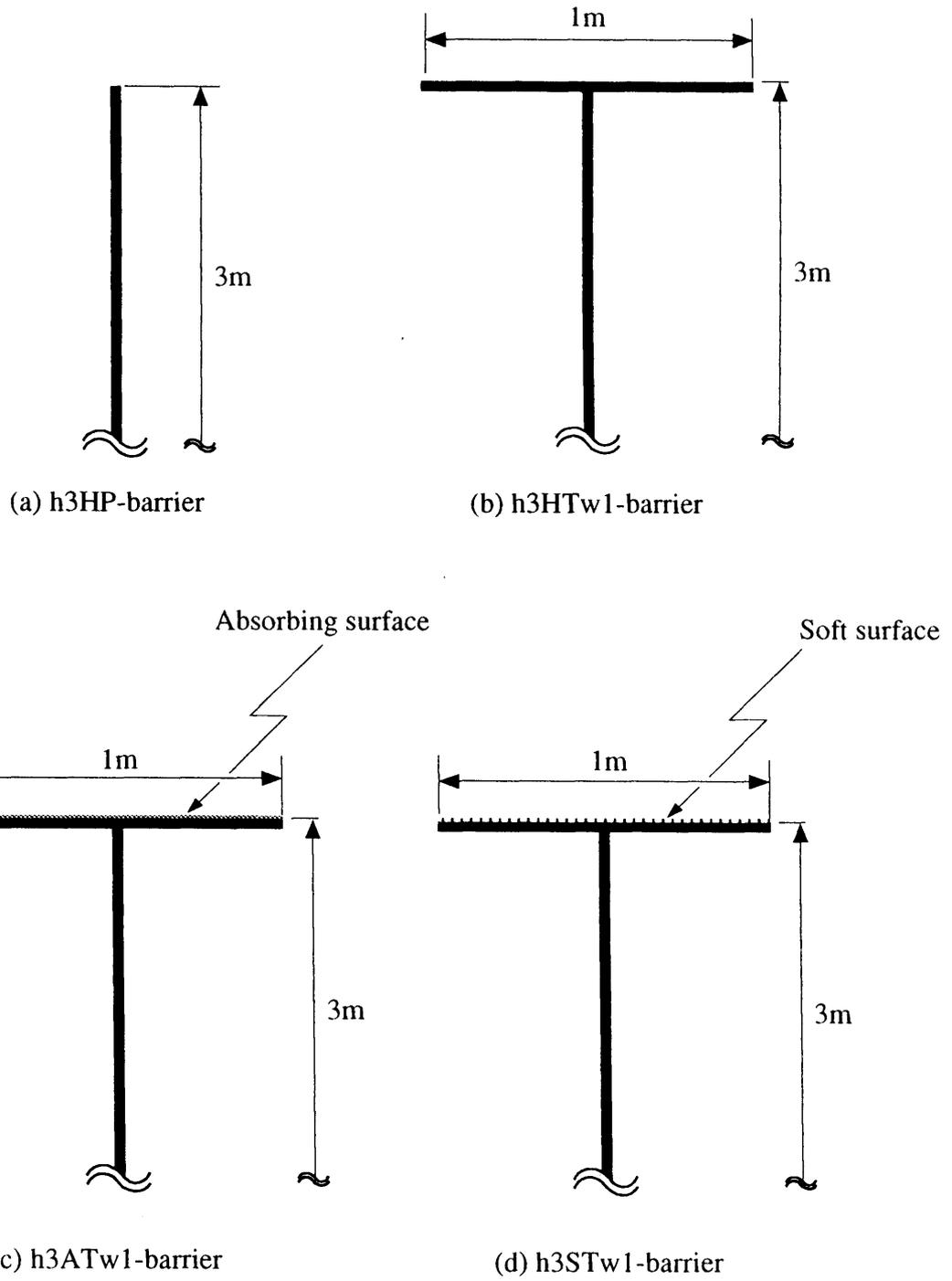
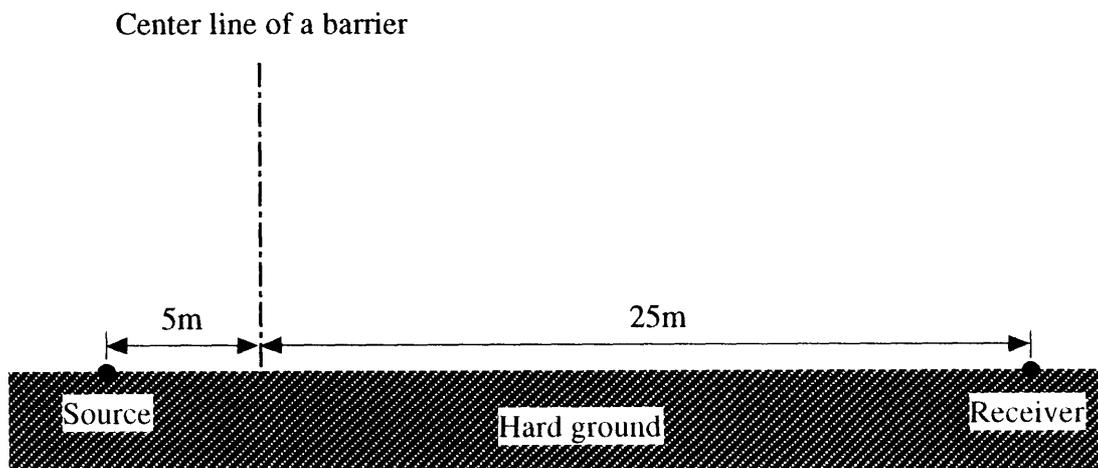
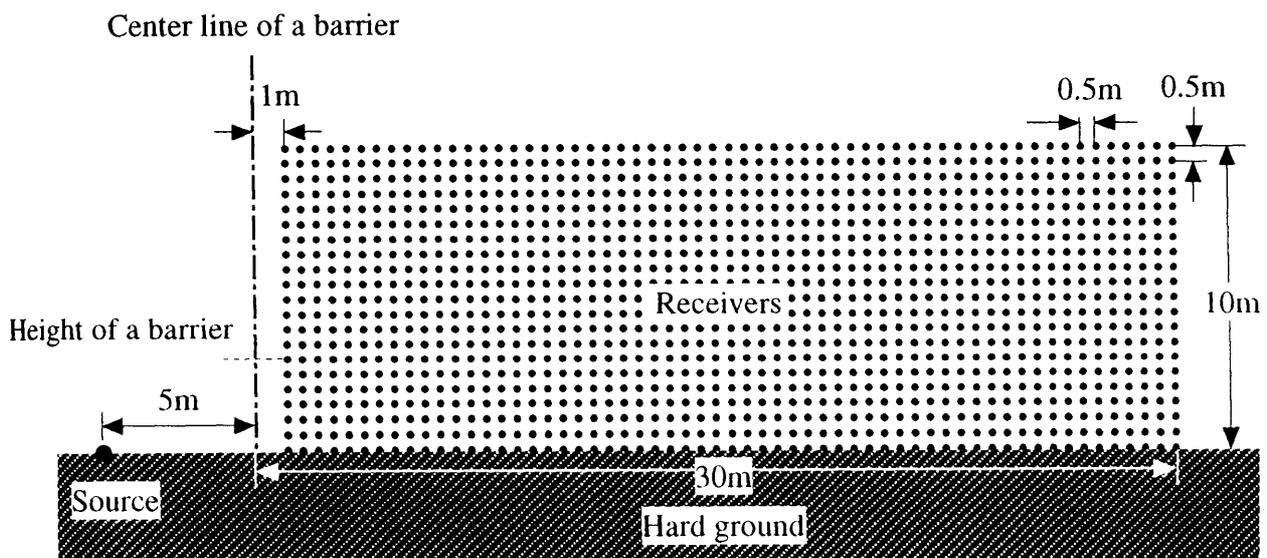


Figure 4.2 The barrier profiles considered in the calculations.



(a) Geometry for calculating spectra of insertion loss.



(b) Geometry for calculating spatial contours of insertion loss.

Figure 4.3 Geometry of two dimensional sound field for calculations.

## 4.3 数値解析結果

### 4.3.1 挿入損失の周波数特性

本研究において、防音壁の挿入損失の計算値を周波数スペクトルとして表す際は、1/15 オクターブバンドと 1/3 オクターブバンド両方を用いることにする。1/3 オクターブバンドで表す計算方法を Figure 4.4 に示す。(a)は 1/15 オクターブバンドの純音で表した挿入損失の周波数特性、(b)は(a)から得られた結果を 1/3 オクターブバンド毎に帯域平均して求め結果をバンドレベルとして表した一例である。ここで、帯域平均とは、(a)に表された 1/15 オクターブバンドの純音で求めた挿入損失の周波数スペクトルを、1/3 オクターブバンドの中心周波数とその前後 2 つずつの値、つまり計 5 つの SPL 値をエネルギー平均して一つの 1/3 オクターブバンドのレベル値として表したものである。SPL 平均の計算においては、周波数のバンド幅を考慮した次式を用いた。

$$L_{ave} = 10 \log \left\{ \frac{1}{\Delta F} \sum_{i=1}^5 \left( \log^{-1} \frac{L_i}{10} \right) \cdot \Delta f_i \right\} \quad (4.1)$$

ただし、

$L_{ave}$  : 1/3 オクターブバンドの SPL.

$\Delta F$  : 1/3 オクターブのバンド幅.

$L_i$  : 1/15 オクターブバンドの中心周波数における SPL.

$\Delta f_i$  : 1/15 オクターブのバンド幅.

を表す。このように、効果の周波数特性を帯域毎に平均された 1/3 オクターブバンドと共に評価することによって、騒音源のスペクトルが純音成分が著しい場合だけでなく、雑音成分が強い場合に防音壁の効果を同時に推定することができる。

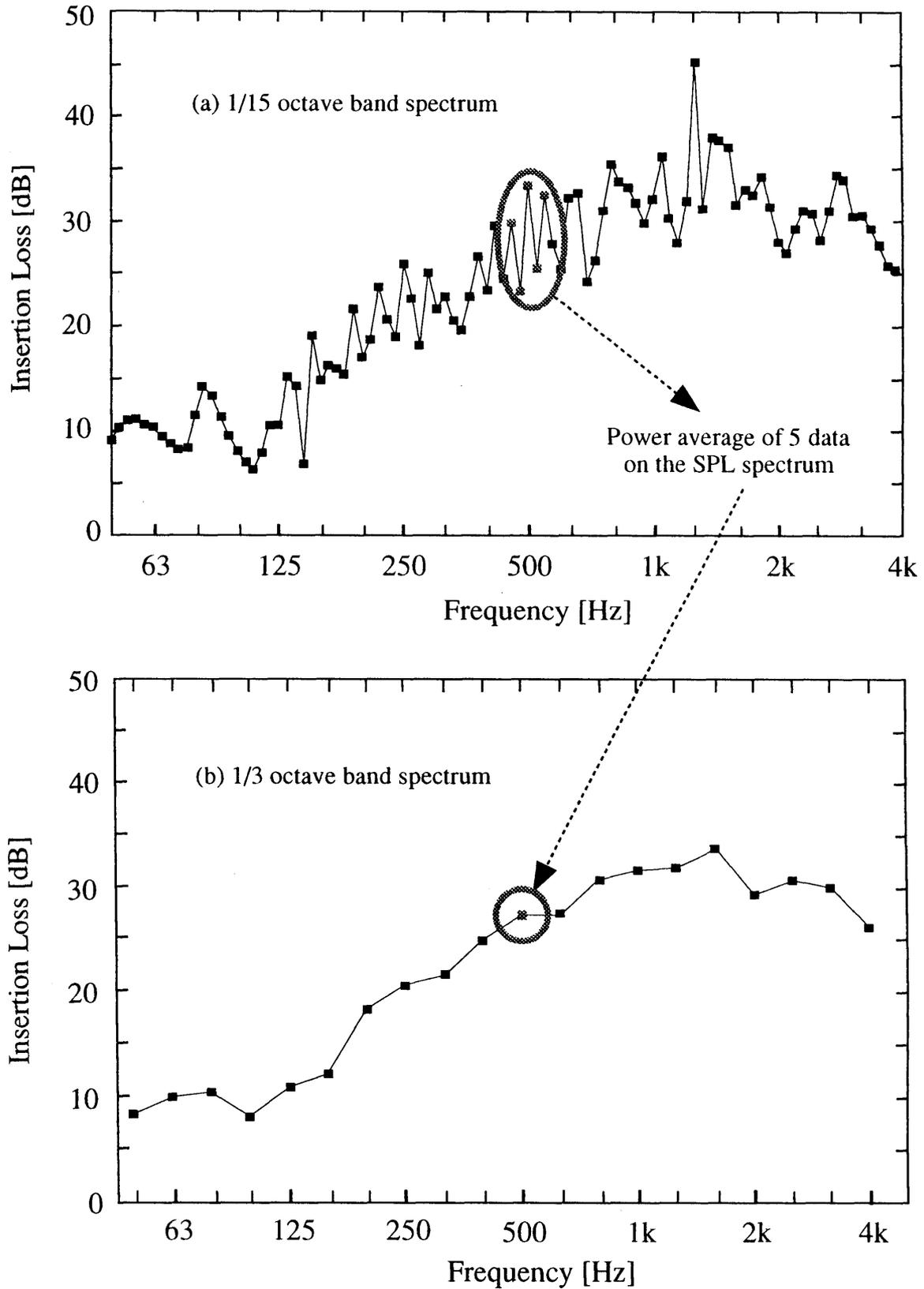
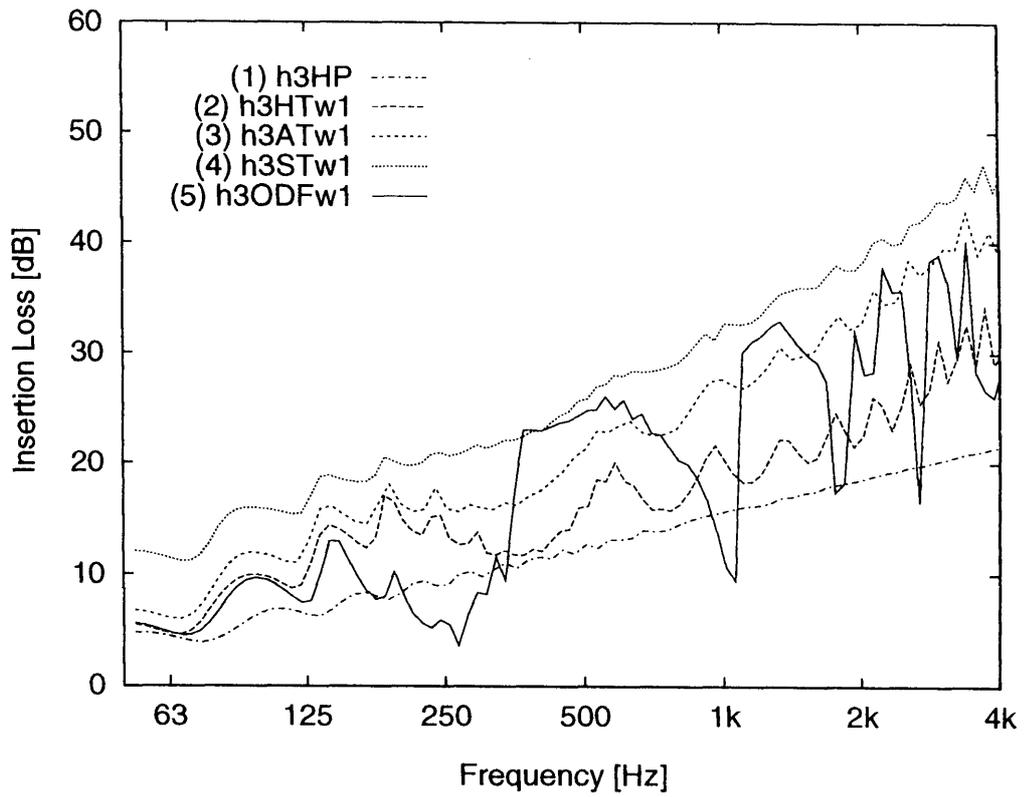


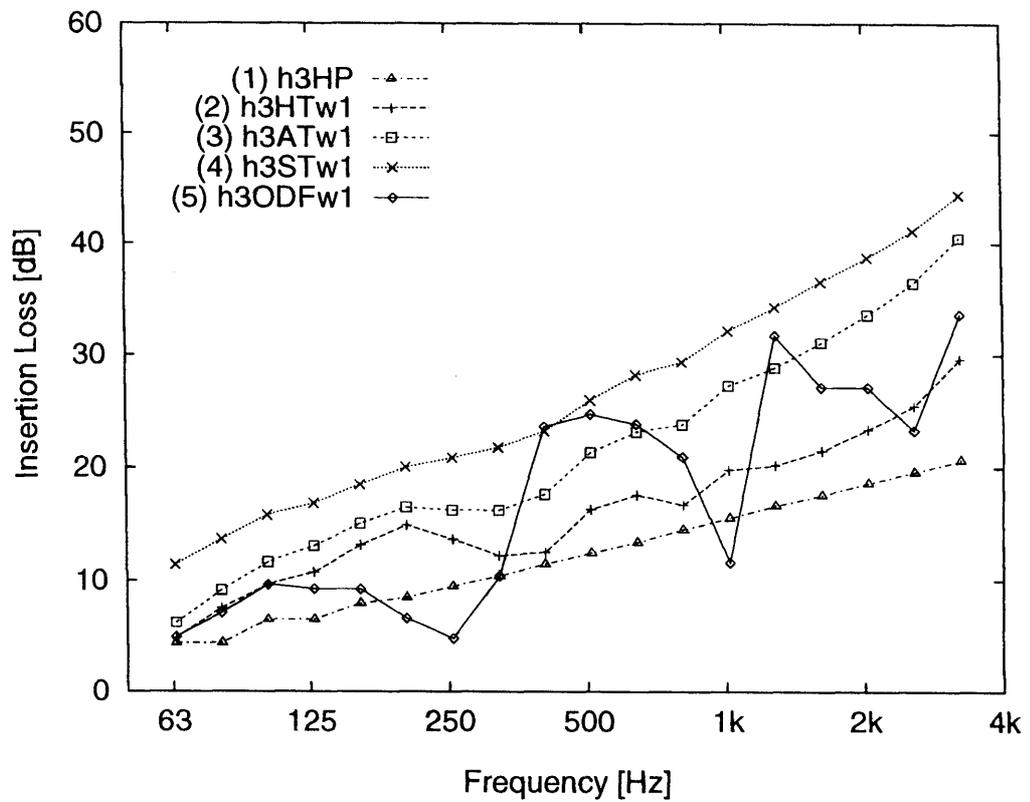
Figure 4.4 Band average of 1/15 octave band spectrum for making 1/3 octave band spectrum.

Figure 4.5 には Figure 4.3(a)のように設定した音場の受音点において、Figure 4.1(a)に示した h3ODFw1 防音壁の挿入損失の周波数特性を調べるための計算結果を表す。図中(5)の実線が h3ODFw1 防音壁の周波数スペクトルを表し、Figure 4.2 に示した四つの防音壁の周波数スペクトルと比較している。Figure 4.5(a)が 1/15 オクターブバンド毎の純音で求めた挿入損失スペクトル、(b)が Figure 4.4 で説明した帯域平均で求めた帯域レベルを 1/3 オクターブバンドのバンドレベルで表した結果である。計算結果からみると、h3ODFw1 防音壁の設計周波数が 425Hz のため、425Hz とその奇数倍の周波数付近では非常に大きい遮音効果を表わしており、これは音響管配列だけの効果を調べた Figure 3.5 の結果の中でピークやディップが現れる周波数とほぼ一致している。特に、約 350～600Hz の帯域と約 1200～1500Hz の帯域では h3STw1 防音壁とほぼ変わらない遮音効果を示している。Figure 4.5 の結果から、h3ODFw1 防音壁は約 350～600Hz と 1200～1500Hz の周波数範囲のソフトな T 型防音壁といえよう。Figure 4.6 は Figure 4.3(a)のように設定した音場の受音点において、Figure 4.1(b)に示した h3TDFw1 防音壁の挿入損失周波数特性を表す。図中(5)の実線が h3TDFw1 の周波数スペクトルを表し、Figure 4.5 と同じく各種防音壁の周波数スペクトルと比較している。計算結果からみると、h3TDFw1 防音壁は 212Hz と 425Hz の二つの設計周波数を持っているため、212Hz とその奇数倍の周波数付近および 425Hz とその奇数倍の周波数付近でソフトな表面の効果を持つのが予測される。実際結果として、Figure 4.5 では 250Hz 近傍での効果が小さかったのが Figure 4.6 では大きくなっている。しかし、1kHz 付近の効果は小さなピークが一つ現れているだけで大きいディップはそのまま残っている。このディップは 425Hz を設計周波数としている 20cm 深さの音響管配列によるものであることが Figure 4.5 や Figure 3.5 の結果から分かる。この原因についてはまだ明確にはなっていないが、音響管内に 3.2 節で説明した定在波が生じる直前、音響管の放射インピーダンスが非

常に大きくなって音響管内の音圧が急に上がるためではないかと考えられる。これは、Figure 4.5 や Figure 4.6 の計算結果をみると、ピークが現れる直前には必ずディップが生じていることから推測できる。Figure 4.6 の結果からみると、効果のピークになっている周波数が約 190, 400, 600, 1.2k, 1.4k, 2k, 2.2k, 2.5k, 2.8k, 3.4kH 付近となっている。この周波数は大概、音響管配列の設計周波数である 212Hz, 425Hz とその奇数倍の周波数付近になる。それから音響管の数が半分になっただけに効果となるピークのレベルが Figure 4.5 の結果に比べてやや低くなっていて、上端が完全吸音性表面の T 型防音壁とほぼ等しい効果を示していることが分かる。Figure 4.7 には h3ODFw1, h3TDFw1 防音壁の遮音効果を比較して表す。図中(1)の点線が h3ODFw1 防音壁、それから(2)の実線が h3TDFw1 防音壁の挿入損失の周波数特性を表す。もう一つの設計周波数 212Hz を持つことによって h3ODFw1 防音壁の挿入損失の周波数スペクトルに現れていた激しいディップのレベルがかなり上がっていることが分かる。h3ODFw1 の周波数スペクトルにおいて深いディップであったのが、h3TDFw1 防音壁のスペクトルにおいて 10dB 近く上がっているのは、約 1k, 1.8k, 2.6kHz 付近であって、いずれも h3TDFw1 防音壁の設計周波数の一つである 212Hz の奇数倍の周波数付近となっている。この一連の結果から、音響管配列を持つ防音壁は音響管配列の設計周波数を調整することによって効果のピークとなる周波数帯域を選択することができるし、音響管配列の設計周波数を増やすことによって効果のピークのレベルは少々下がるが、ディップのレベルを上げ、全体的な効果を向上させるのもできることが分かった。

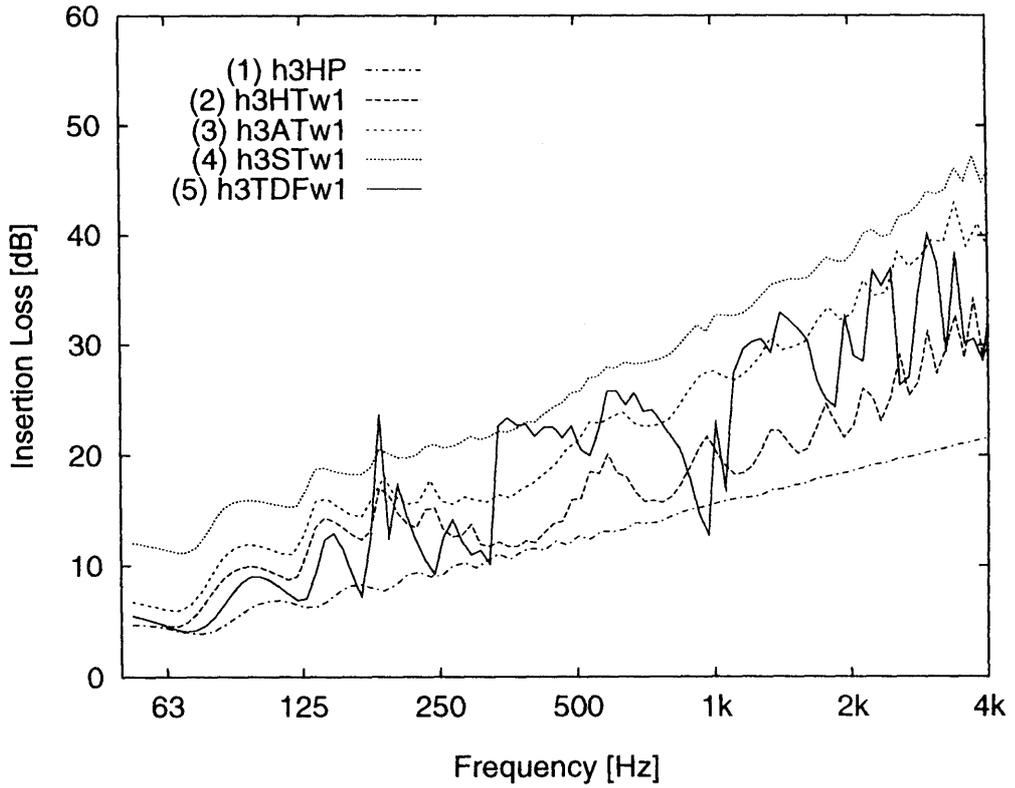


(a) 1/15 octave band spectra.

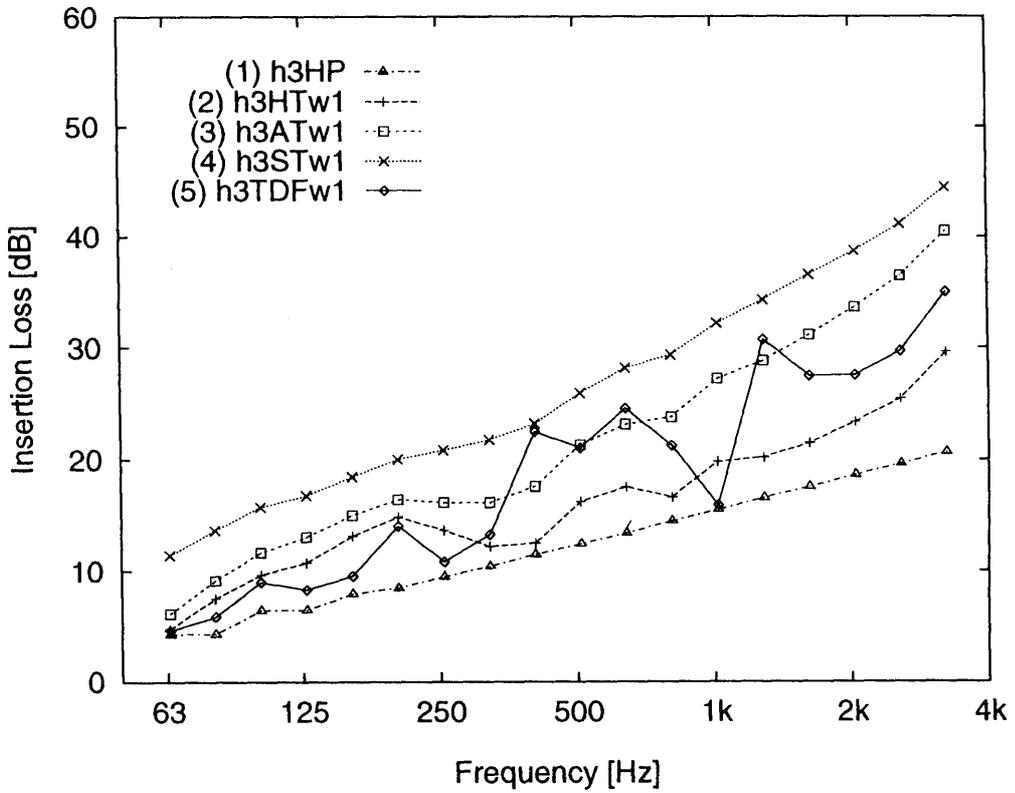


(b) 1/3 octave band spectra.

Figure 4.5 Calculated spectra of insertion loss for the barriers shown in Figures 4.1(a) and 4.2.

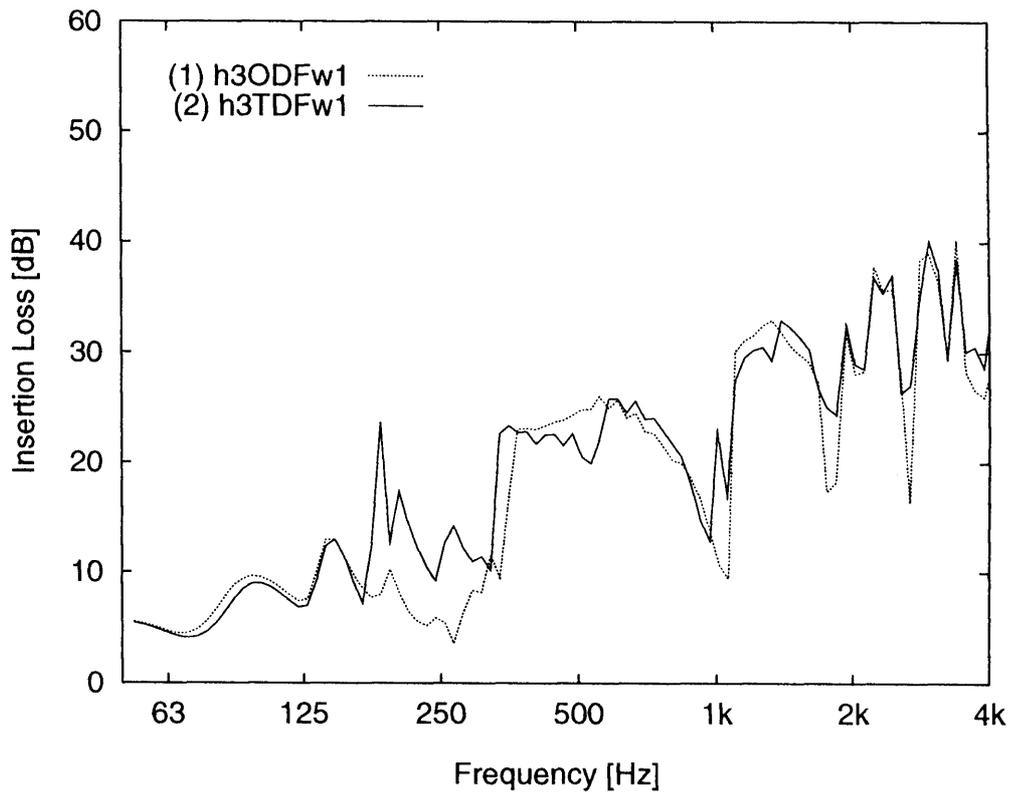


(a) 1/15 octave band spectra.

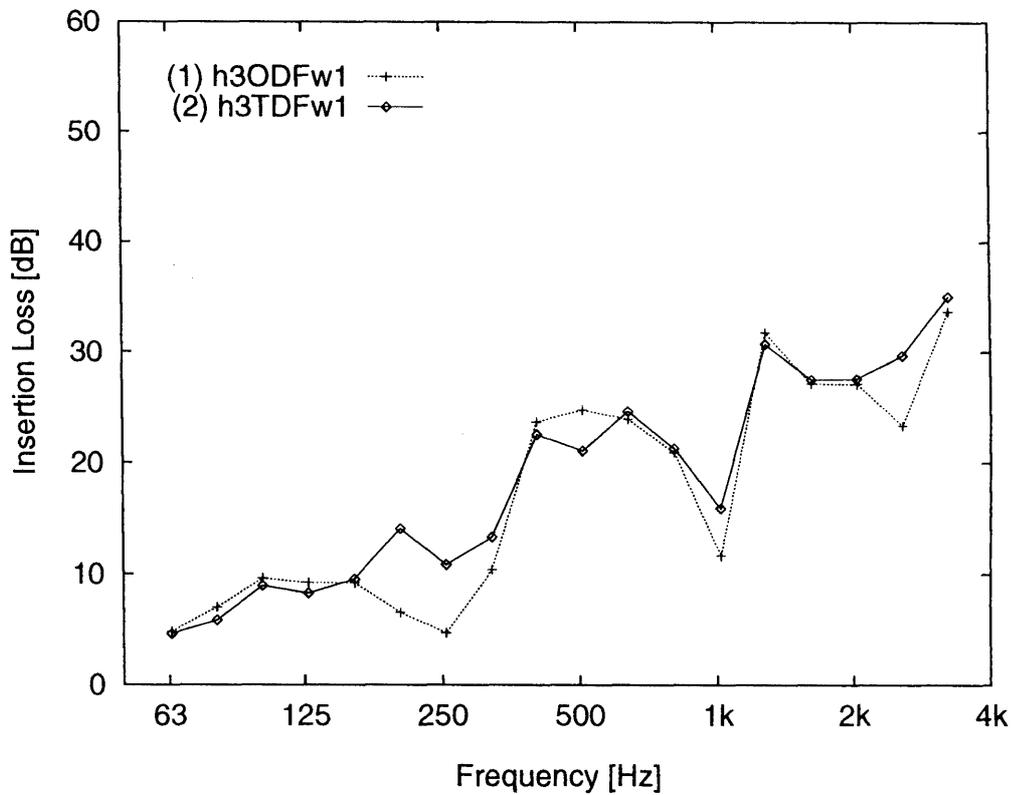


(b) 1/3 octave band spectra.

Figure 4.6 Calculated spectra of insertion loss for the barriers shown in Figures 4.1(b) and 4.2.



(a) 1/15 octave band spectra.



(b) 1/3 octave band spectra.

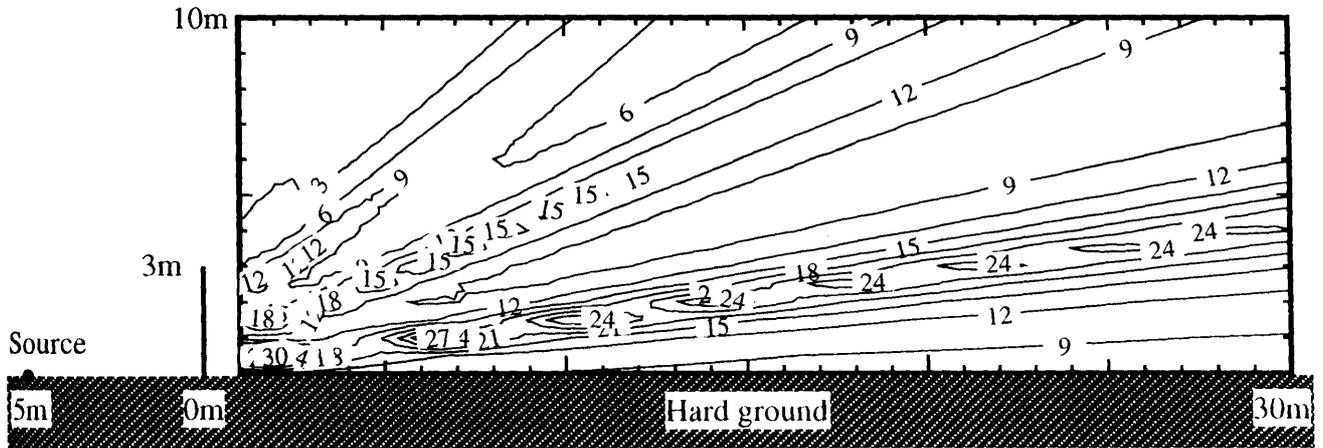
Figure 4.7 Comparison of spectra of insertion loss between two barriers shown in Figures 4.1(a) and (b).

#### 4.3.2 挿入損失の空間分布

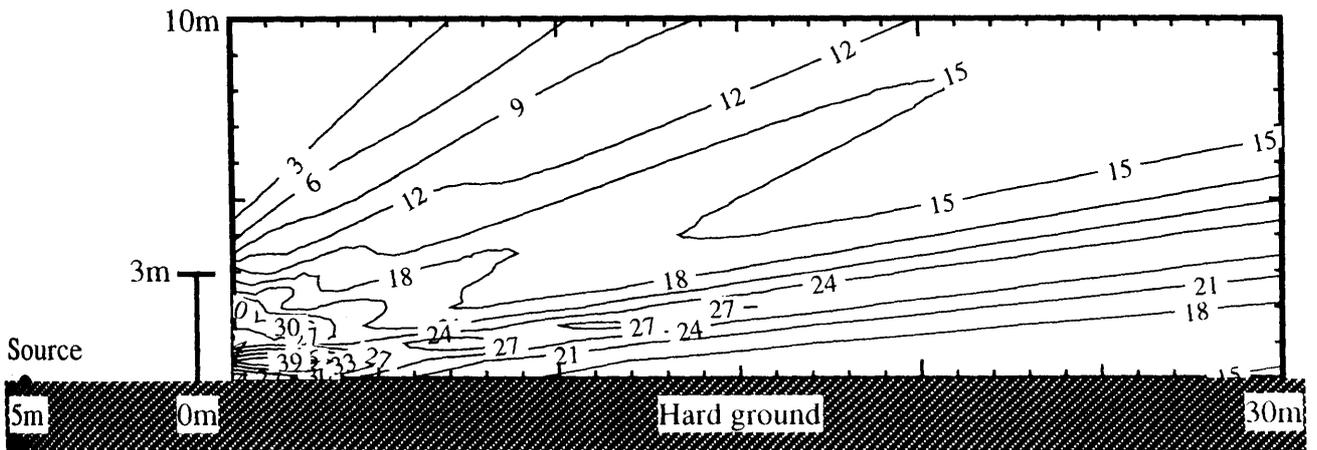
前節において検討を行った防音壁の効果とは、受音点が地面上に設定された場合であって、一つの受音点での防音壁の遮音特性をもってそれが全てと断定することは極めて危ない。May[40]らの実験や Hothersall[41]らの計算によると、防音壁の遮音効果が受音点と防音壁との距離によって変わる、いわゆる遮音効果の「距離特性」が報告されている。本研究では距離特性の変わりに、受音点を2次元空間のある範囲の領域の中で移動させ、各受音点における挿入損失の空間分布を数値解析し、遮音効果の「空間特性」を調べることにする。音源と受音領域の位置関係は Figure 4.3(b)に示したとおりで、音源は周波数特性を調べる場合と同様に防音壁の中心から 5m 離れた地面上に、それから受音点は反対側に防音壁の中心から 1~30m、地面上 0~10m の領域を 0.5m 間隔で設置している。計 1239 点(横 59 点×縦 21 点)の受音点における防音壁がある場合とない場合の差を取り、挿入損失値を求めた。Figures 4.8 (1), (2), (3)~4.10 (1), (2), (3)には計算結果の分布を、Table 4.1 には分布の算術平均値をまとめて表す。Figures 4.8 (1), (2), (3)は純音を放射する線音源の周波数が 200Hz の場合、Figures 4.9 (1), (2), (3)は 400Hz の場合、Figures 4.10 (1), (2), (3)は 1kHz の場合の防音壁の挿入損失の分布を表す。観測周波数とした 200Hz と 400Hz は Figure 4.1 に示した(a)の h3ODFw1 防音壁と、(b)の h3TDFw1 防音壁の設計周波数である 212Hz と 425Hz に近い周波数、それから 1kHz は、Figure 4.5(a)と Figure 4.6(a)に示した両方の防音壁の挿入損失の周波数特性の中で最も悪い効果を示す周波数から選んだものである。Figure 4.8 (3)の(b)の h3TDFw1 防音壁の効果と Figure 4.8 (2)の(b)の h3STw1 防音壁の効果と比較してみると、h3TDFw1 防音壁の場合、200Hz での効果の分布は h3STw1 防音壁の場合とほぼ一致している。Figure 4.6 の効果の周波数特性からは、200Hz 付近で h3STw1 防音壁の効果(図中(4)の点線)が h3TDFw1 防音壁の効果(図中(5)の実線)より高く評価されている(約 3dB)が、空間分布と

してみると、設計周波数の付近である 200Hz の純音では、h3TDFw1 防音壁は h3STw1 防音壁とほぼ変わらない遮音効果を示していることが分かる。Table 4.1 の平均値からみると、200Hz で、(2)-(b)の h3STw1 防音壁の平均値が 18.7dB であることに對し、(3)-(b)の h3TDFw1 の平均値は 18.3dB であって約 0.5dB の差異でしかない。Figure 4.8 (3)の(a)の h3ODFw1 防音壁の場合、200Hz の純音では Figure 4.8 (1)の(a)の h3HP 防音壁よりも小さい遮音効果の分布を示している。これは、Figure 4.5 の効果の周波数特性から見ても同じ傾向であることが分かる。この結果から、h3ODFw1 防音壁の遮音効果は 200Hz 付近では広い空間領域で遮音効果が h3HP よりも小さいと言える。Figures 4.9 (1), (2), (3)に示した計算結果は音源が 400Hz 純音の場合の防音壁背後における挿入損失の空間分布を表す。400Hz は h3ODFw1, h3TDFw1 防音壁の共通の設計周波数である 425Hz に近い為、Figure 4.9 (2)の(b)の h3STw1 防音壁遮音効果と Figures 4.9 (3)の(a), (b)の両防音壁の遮音効果はほぼ一致している。Table 4.1 の平均値からみても、400Hz において、(2)-(b)の h3STw1 防音壁が 20.5dB, (3)-(a)の h3ODFw1 防音壁が 20.7dB, (3)-(b)の h3TDFw1 防音壁が 20dB となっている。以上のように Figure 4.8 (2)の(b), 同(3)の(b)の結果と Figure 4.9 (2)の(b), 同(3)の(a), (b)の結果から、h3ODFw1, h3TDFw1 防音壁は各々の設計周波数の付近で h3STw1 防音壁とあまり変わらない遮音効果を持つのが挿入損失の空間分布からも確認された。Figures 4.10 (1), (2), (3)は音源が 1kHz の純音を放射する場合の各防音壁の効果を表す計算結果である。この結果からみると、Figure 4.10 (3)の(a)の h3ODFw1 防音壁の場合、Figure 4.5 に示した効果の周波数特性からも分かるように、示されたほぼ全空間領域で Figure 4.10 (1)の(a)の h3HP 防音壁よりも悪い効果を示している。しかし、Figure 4.10 (3)の(b)の h3TDFw1 防音壁の場合、Figure 4.6 の(a)に示された効果の周波数特性では(図中(5)の実線)1kHz 付近で h3HP 防音壁(図中(1)の一点鎖線)よりも悪い効果を示しているが、受信領域を広くして効果の空間分布からみると、

Figure 4.10 (1)の(a)の h3HP 防音壁や(b)の h3HTw1 防音壁に比べて、非常に良い遮音効果を示している。Table 4.1 に示した効果の算術平均値からみても、1kHz の純音において、(3)-(b)の h3TDFw1 防音壁は(1)-(a)の h3HP 防音壁より 7dB、(1)-(b)h3HTw1 防音壁より 3.5dB 高い効果を示している。Figure 4.5, 4.6 の効果の周波数特性と Figure 4.8 (1), (2), (3)~4.10 (1), (2), (3)の効果の空間分布両方の結果からみて、防音壁の遮音効果を一つや二つの受音点で評価するのは良くないことも分かる。

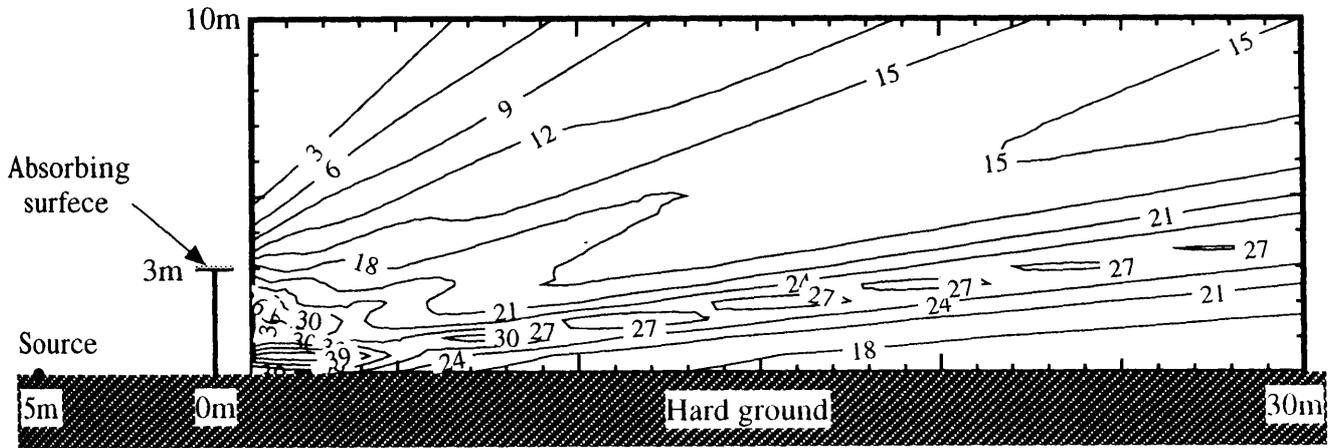


(a) Calculated contour of insertion loss for the h3HP-barrier.

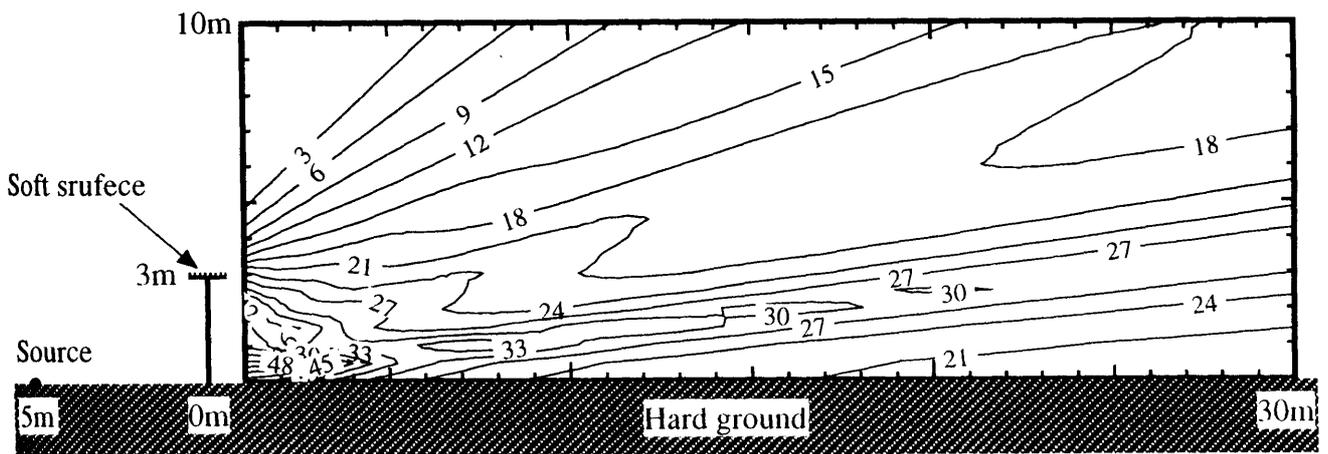


(b) Calculated contour of insertion loss for the h3HTw1-barrier.

Figure 4.8(1) Calculated contours of insertion loss for the barriers shown in Figures 4.2(a) and (b). The frequency of the source is 200Hz.

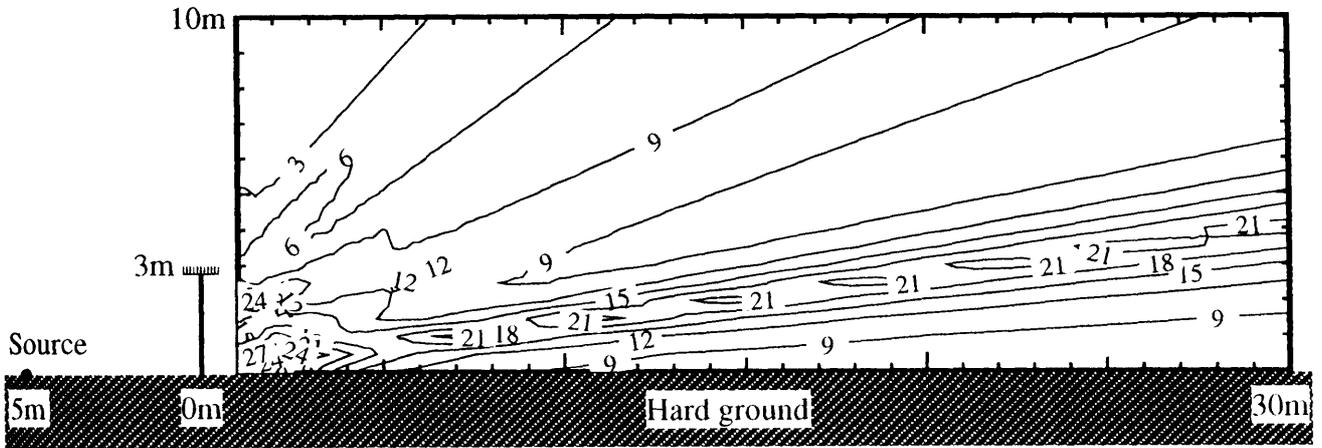


(a) Calculated contour of insertion loss for the h3ATw1-barrier.

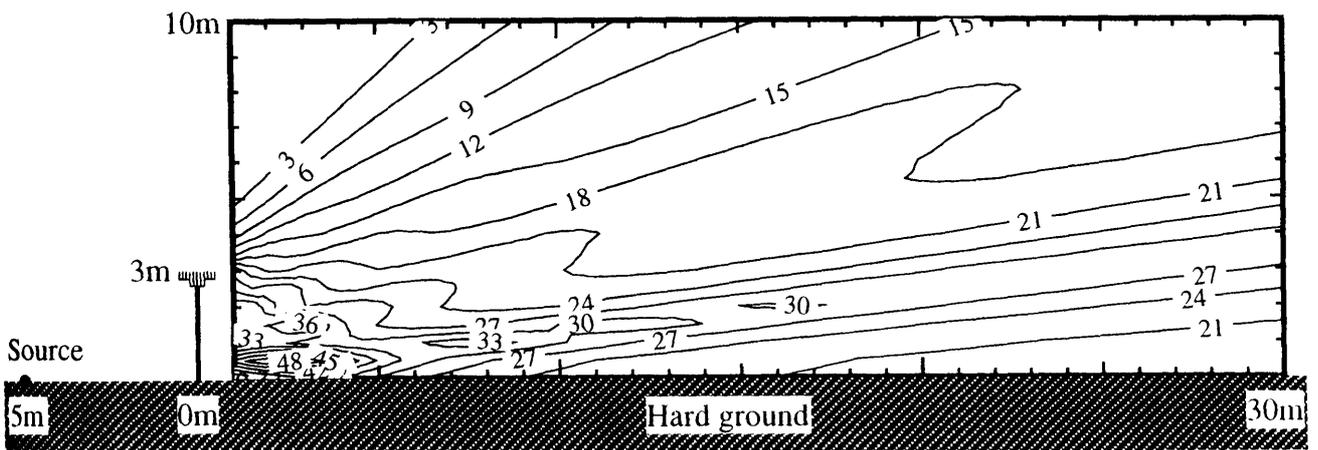


(b) Calculated contour of insertion loss for the h3STw1-barrier.

Figure 4.8(2) Calculated contours of insertion loss for the barriers shown in Figures 4.2(c) and (d).  
The frequency of the source is 200Hz.

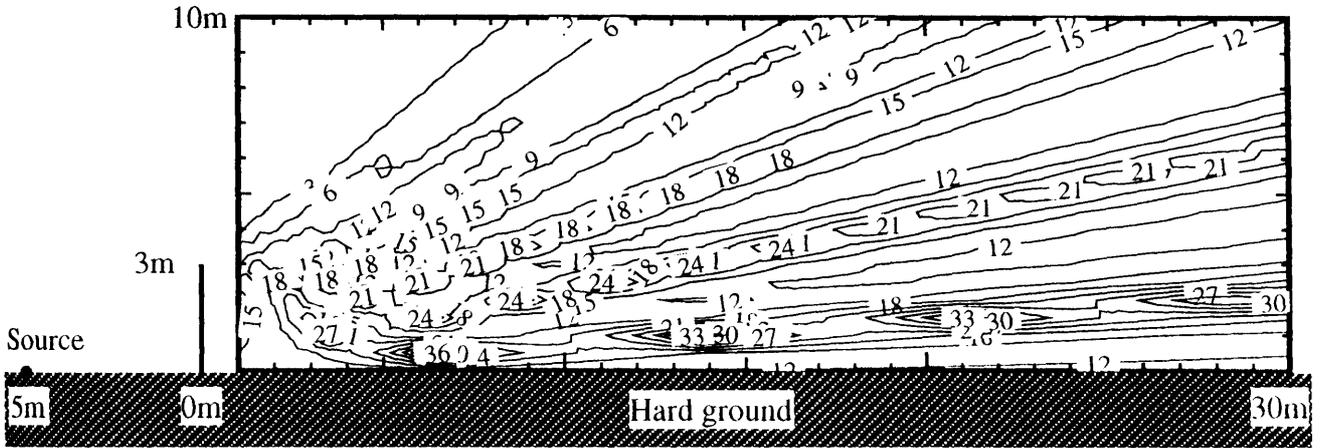


(a) Calculated contour of insertion loss for the h3ODFW1-barrier.

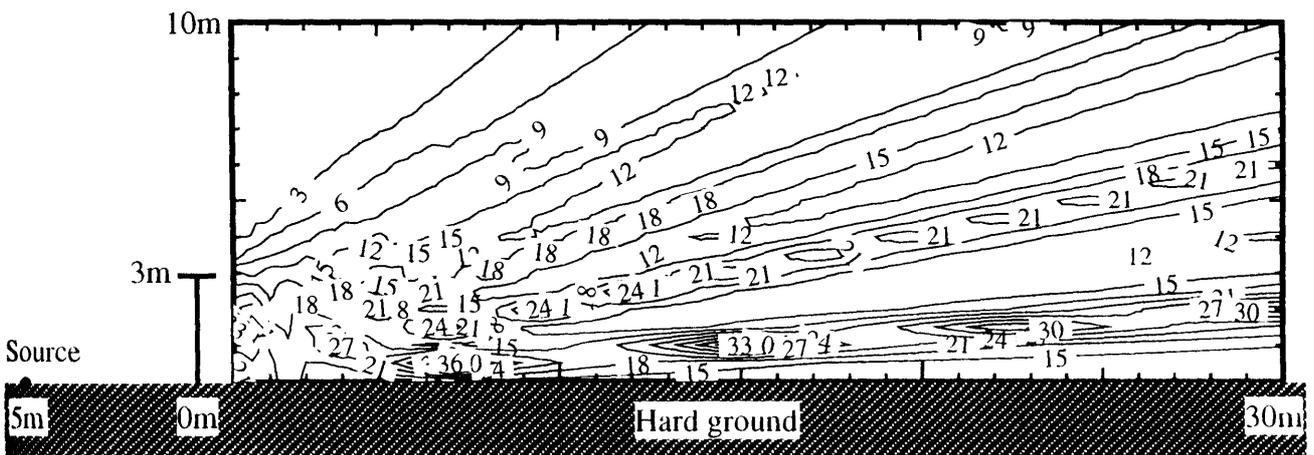


(b) Calculated contour of insertion loss for the h3TDFW1-barrier.

Figure 4.8(3) Calculated contours of insertion loss for the barriers shown in Figures 4.1 (a) and (b). The frequency of the source is 200Hz.

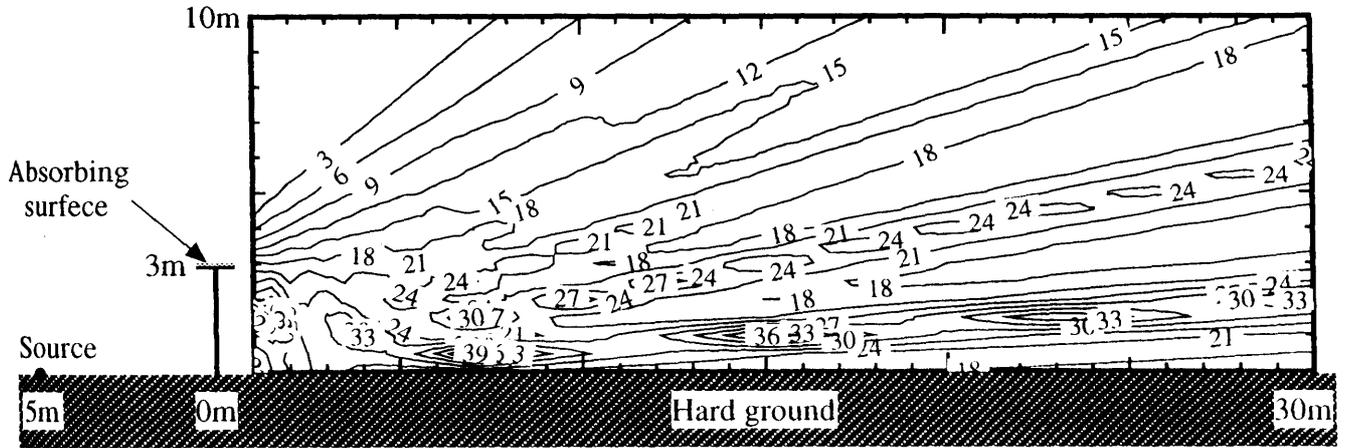


(a) Calculated contour of insertion loss for the h3HP-barrier.

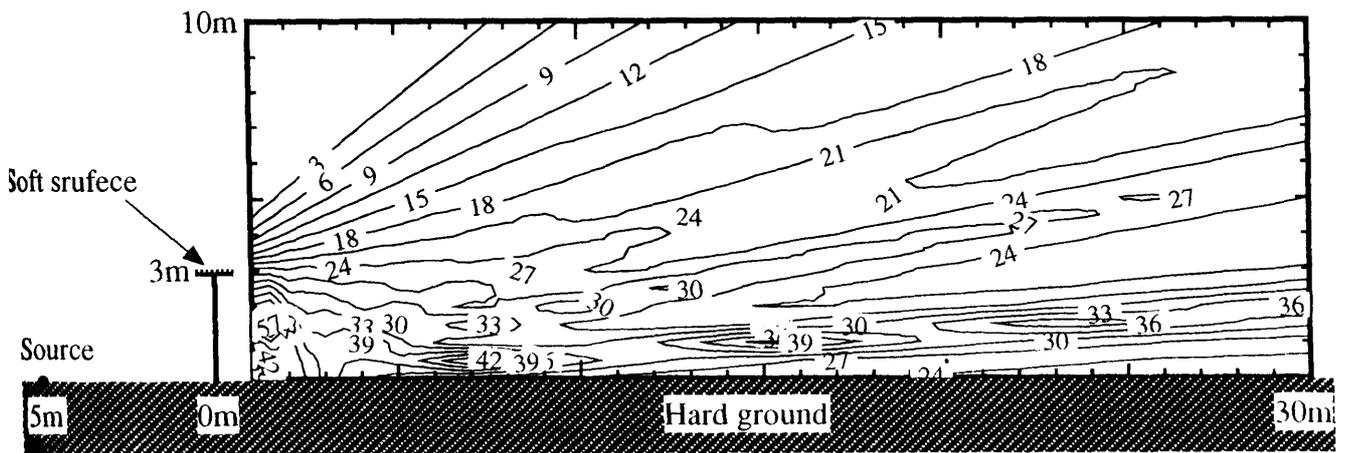


(b) Calculated contour of insertion loss for the h3HTw1-barrier.

Figure 4.9(1) Calculated contours of insertion loss for the barriers shown in Figures 4.2(a) and (b). The frequency of the source is 400Hz.

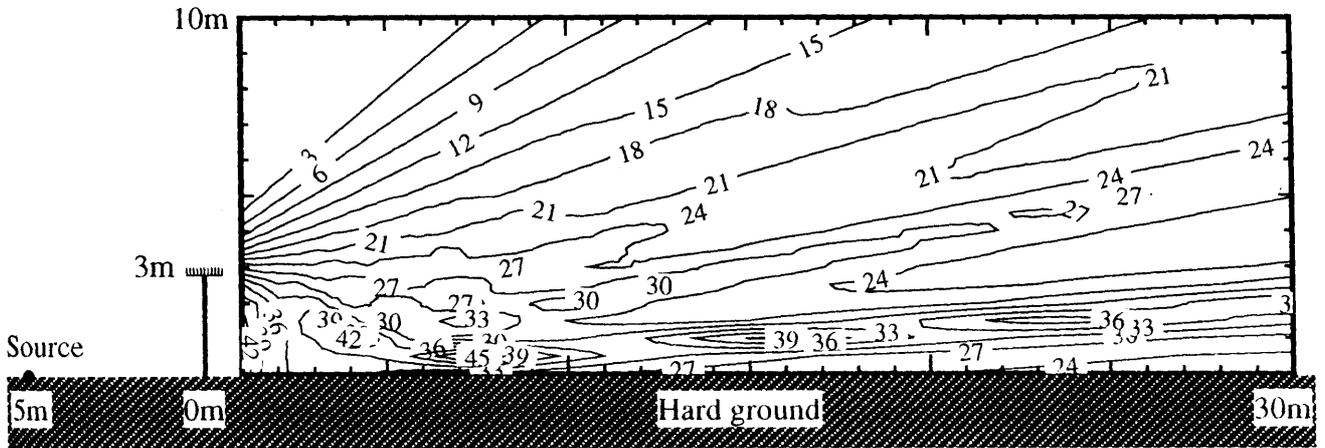


(a) Calculated contour of insertion loss for the h3ATw1-barrier.

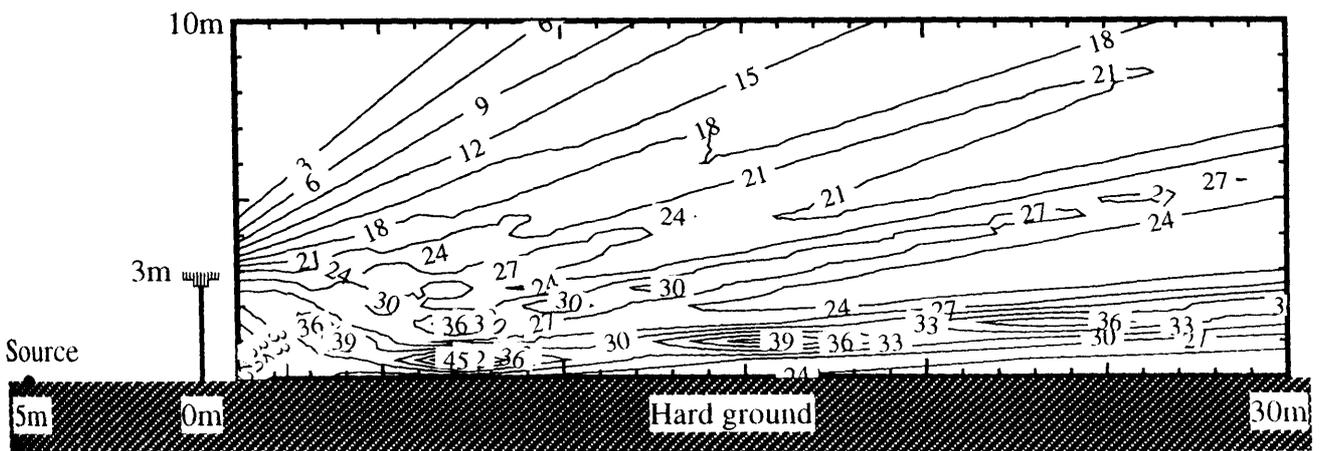


(b) Calculated contour of insertion loss for the h3STw1-barrier.

Figure 4.9(2) Calculated contours of insertion loss for the barriers shown in Figures 4.2(c) and (d).  
The frequency of the source is 400Hz.

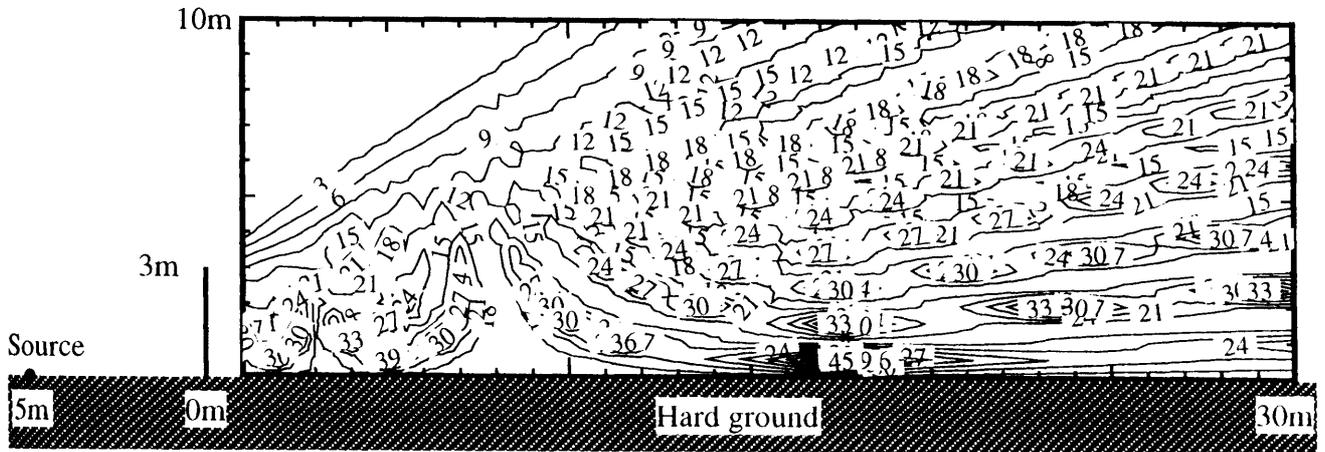


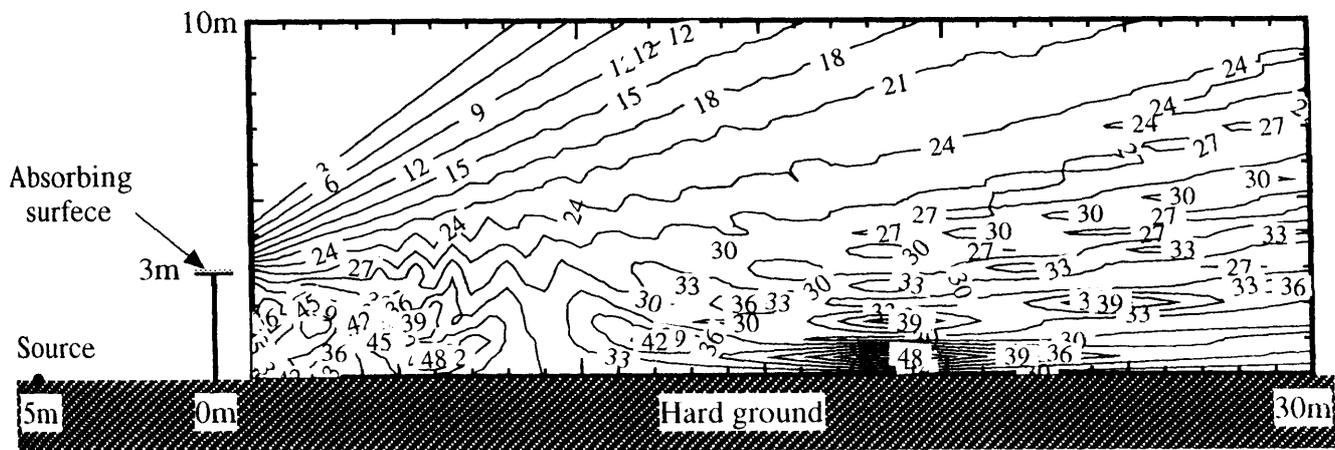
(a) Calculated contour of insertion loss for the h3ODFW1-barrier.



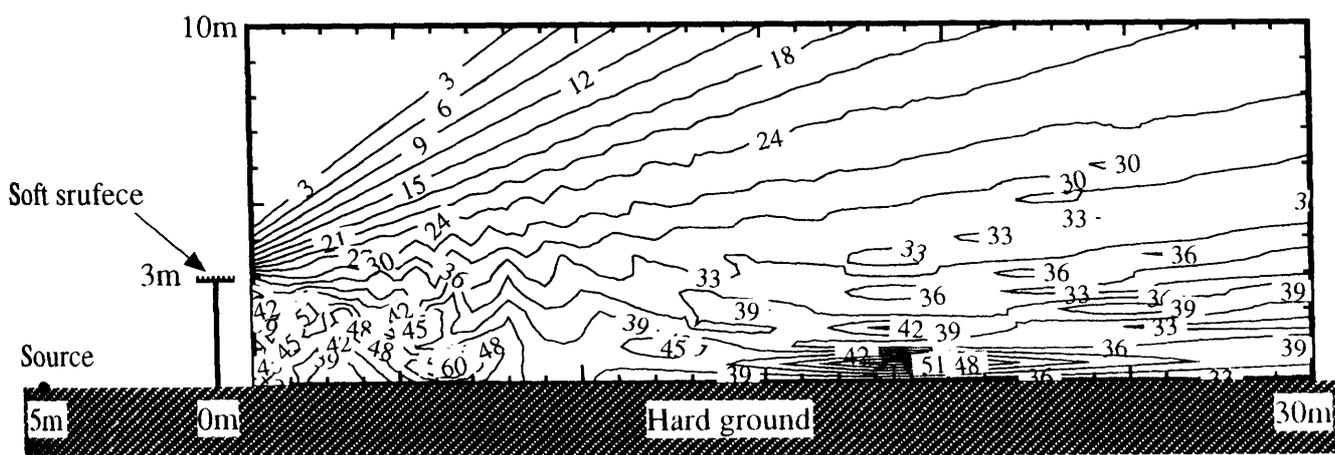
(b) Calculated contour of insertion loss for the h3TDFW1-barrier.

Figure 4.9(3) Calculated contours of insertion loss for the barriers shown in Figures 4.1 (a) and (b).  
The frequency of the source is 400Hz.



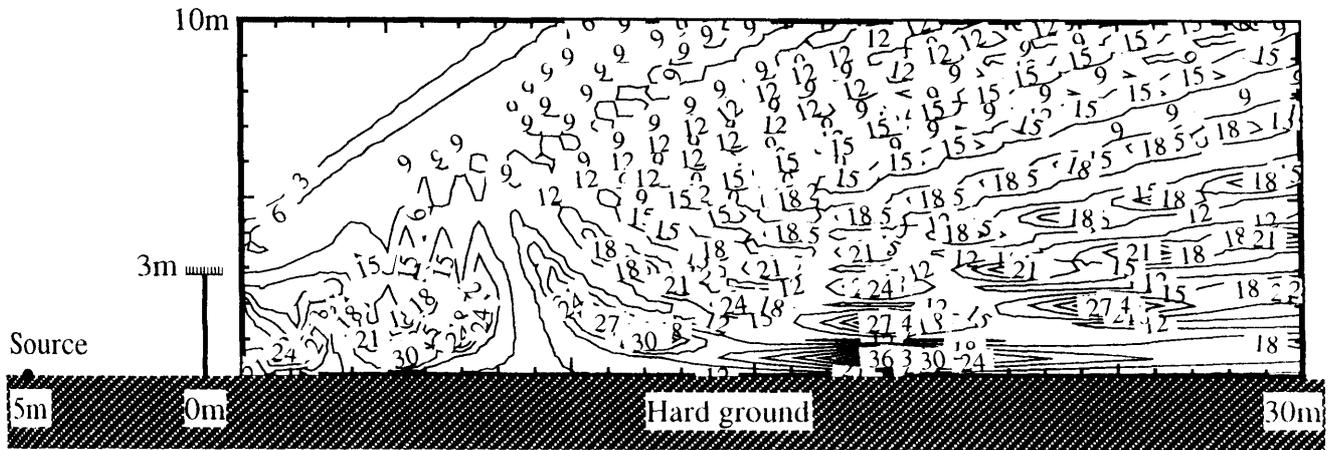


(a) Calculated contour of insertion loss for the h3ATw1-barrier.

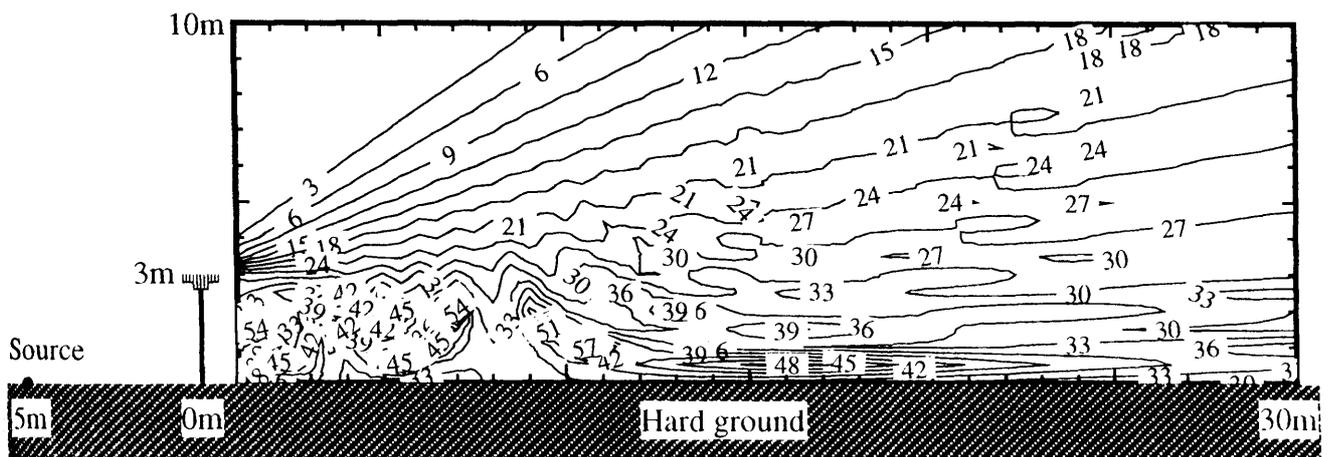


(b) Calculated contour of insertion loss for the h3STw1-barrier.

Figure 4.10(2) Calculated contours of insertion loss for the barriers shown in Figures 4.2(c) and (d). The frequency of the source is 1kHz.



(a) Calculated contour of insertion loss for the h3ODFw1-barrier.



(b) Calculated contour of insertion loss for the h3TDFw1-barrier.

Figure 4.10(3) Calculated contours of insertion loss for the barriers shown in Figures 4.1 (a) and (b). The frequency of the source is 1kHz.

Table 4.1 The arithmetical means of insertion loss for the geometries shown in Figures 4.8 (1),(2),(3), 4.9 (1),(2),(3) and 4.10 (1),(2),(3). unit : [dB]

Barriers		200Hz	400Hz	1kHz
		Figure 4.8	Figure 4.9	Figure 4.10
(1)-(a)	3hHP-barrier	10.1	12.4	15.3
(1)-(b)	3hHTw1-barrier	14.9	12.7	18.8
(2)-(a)	3hATw1-barrier	16.1	16.6	23.5
(2)-(b)	3hSTw1-barrier	18.7	20.5	26.4
(3)-(a)	3hODFw1-barrier	9.6	20.7	11.6
(3)-(b)	3hTDFw1-barrier	18.3	20.0	22.3

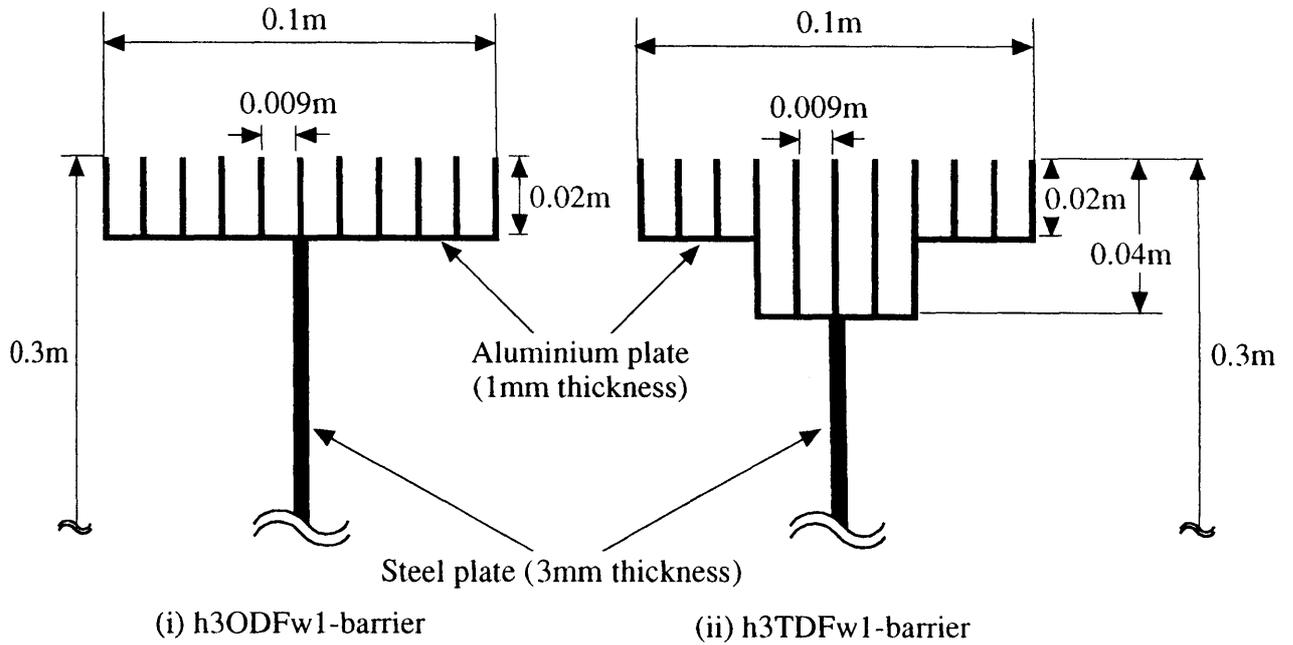
## 4.4 模型実験

音響管配列を持つ T 型防音壁の遮音効果を数値解析で調べた結果、設計周波数の付近で理想的にソフトな表面に近い遮音効果を持つのが分かった。本節ではその遮音効果を 2 次元の模型実験によって確かめることにする。

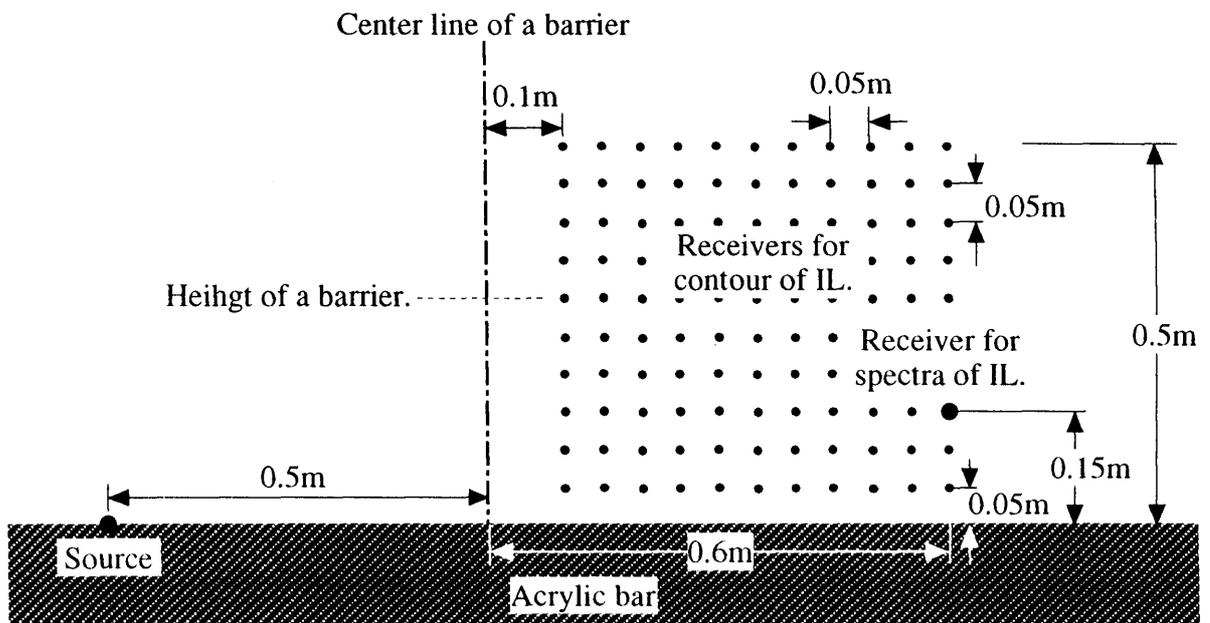
### 4.4.1 実験モデル

Figure 4.11 に実験モデルとなる 1/10 縮尺模型の防音壁模型の断面図と測定を行うために設定した 2 次元音場の概略を表す。(a)に示した防音壁の模型は、厚さ 1mm のアルミ板で製作した音響管配列を厚さ 3mm の鉄板の上部に取り付け、全体の高さを 30cm にしたものである。(b)は測定のために設定した音源と受音点の位置を表す。音源は、防音壁の中心から 50cm 離れた地面上、周波数特性を測定するための受音点は防音壁の中心から 50cm、地面から 15cm 離れた点にそれぞれ設定した。防音壁背後の挿入損失の空間分布を測定するために受音点を防音壁の中心から 10～60cm、地面から 5～50cm 領域を 5cm 間隔でマイクロホンを移動させ測定を行った。地面は厚さ 30mm のアクリル棒を設置、完全反射性地面とした。音源を地面上に設置するため、地面としたアクリル棒に穴をあけ音源となる真鍮のパイプを「地面」の下から差し込んだ。Figure 4.12 に実験を行った 2 次元模型音場と測定装置のブロックダイアグラムを示す。測定を行った 2 次元模型音場は、大きさ 2m×2m、厚さ 10mm のアクリル板 2 枚の間を約 27mm 幅を持つように固定し、その間の空間を 2 次元音場とした。また、自由音場を実現するために、周囲に密度 36kg/m<sup>3</sup>、24kg/m<sup>3</sup>のグラスウールで製作した長さ約 10cm の楔を配置した。この 2 次元模型音場の幅が約 27mm なので、この音場を平面波が伝搬できる周波数は約 6.3kHz (340[m/s]/27[mm]×1/2) までになる。音源としては市販のホーンツイータ(Fostex, model: L3T00925A2))に直径 6mm の真鍮パイプを取り付け、穴をあけた地面に差し込んだ。音源が無指向性であることの確認は本実験では省いている

が、本実験と同じ音源を用いた他の研究に当たる実験[42]により無指向性であることが確認されている。測定に用いた音源の信号は、4msec 正弦波のトーンバースト(Tone burst)を 2000Hz(8 波)～6250Hz(25 波)の周波数範囲で 125Hz 間隔で放射し、測定を行った。受信点は、直径 5mm、長さ 10mm の無指向性コンデンサマイクロホン(SONY ECM-155)を自作のスタンドに装着し、常に 2 次元平面に対して垂直方向を向くように設置した。2 次元の自由音場に入れたマイクロホンを移動させる際には、音場の外から強力磁石を用いた。



(a) The cross-sections of 1/10 scale model barrier.



(b) Geometry for experiments.

Figure 4.11 The cross-sections of 1/10 scale model noise barrier and geometry of two-dimensional sound field for experiments.

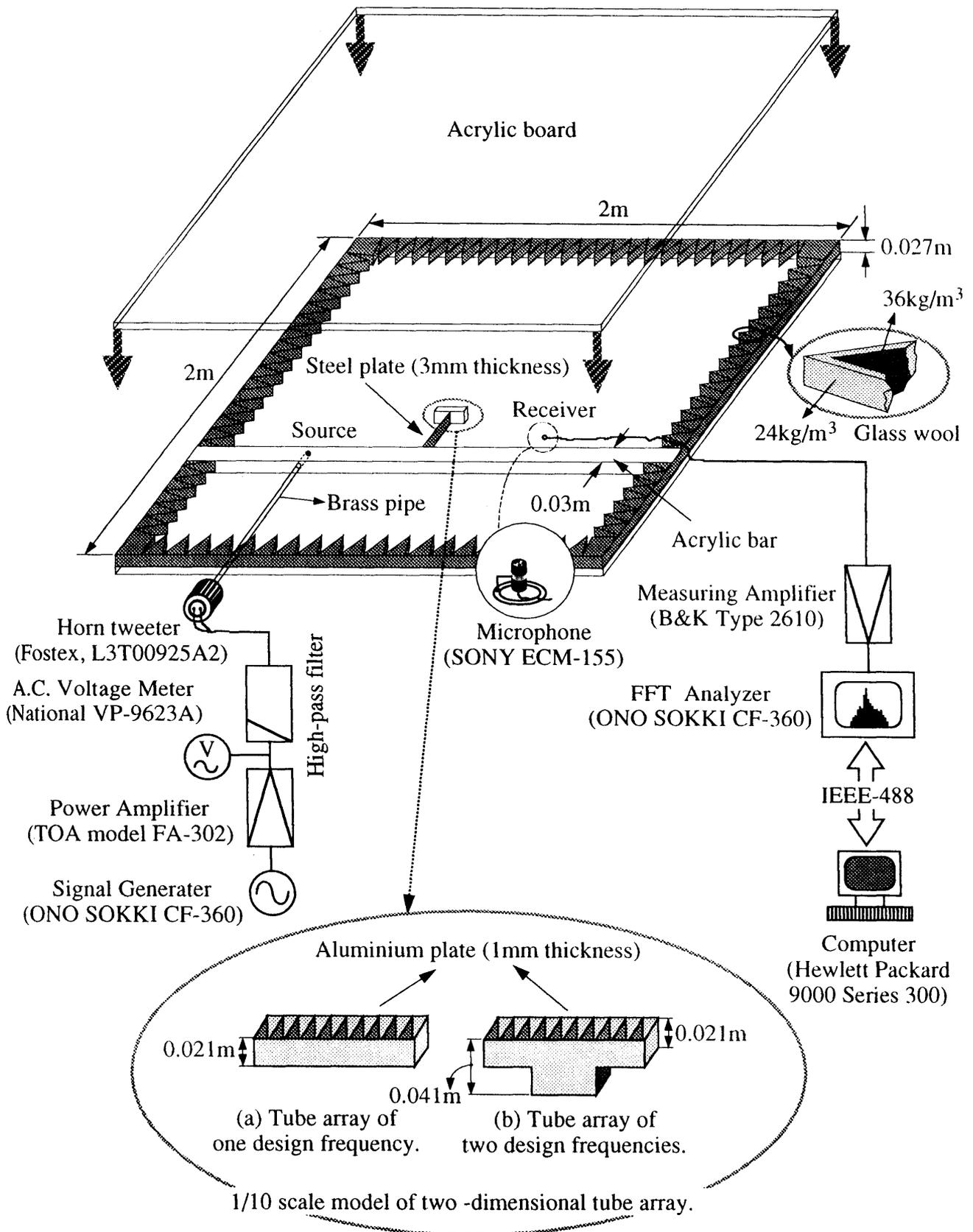
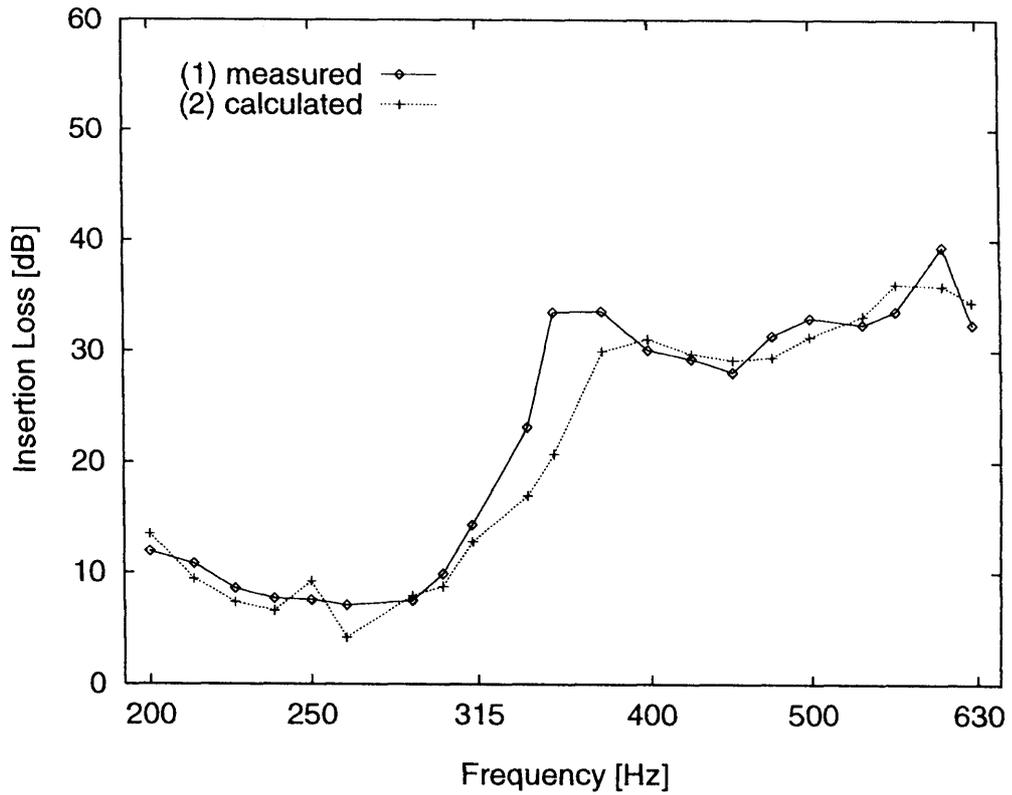


Figure 4.12 Configurations of experiments; two-dimensional anechoic chamber and measuring systems.

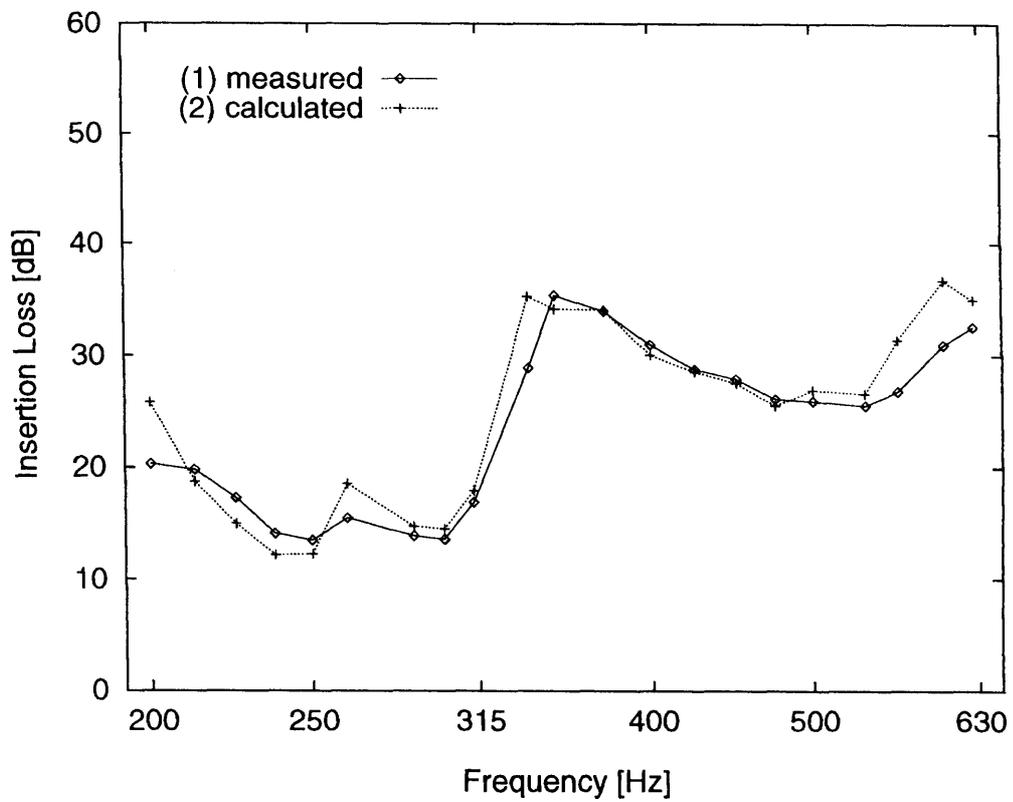
## 4.4.2 実験結果

### 4.4.2.1 挿入損失の周波数特性

Figure 4.13 に測定結果を計算結果と比較して表す。示された周波数は実寸に対する値であり、その範囲が 200～630Hz になっているのは、測定に用いた実験装置に限界があったためである。つまり、音源として用いたホーンツイータの再生周波数が 2kHz 以上で、2次元模型音場内を平面波が伝搬できる周波数が約 6.3kHz までになっているためである。しかし、観測しようとする周波数が、Figure 4.11(a)に示した両防音壁の設計周波数である 212Hz と 425Hz 付近であるため、測定対象周波数は実験周波数範囲に含まれている。Figure 4.13 の(a)が1つの設計周波数を持つ Figure 4.11(a)に示した防音壁(実寸で h3ODFw1)の挿入損失、(b)が2つの設計周波数を持つ Figure 4.11(b)に示した防音壁の挿入損失である。(a)と(b)共に測定結果と計算結果が良く対応していると思われる。Figure 4.14 に、h3ODFw1 と h3TDFw1 両防音壁の挿入損失の周波数特性を比較して表す。(a)が測定結果、(b)は計算結果を表す。Figure 4.14 の結果から、設計周波数 212, 425Hz の h3TDFw1 防音壁は 500Hz 付近では効果がやや少なくなるが、200～300Hz 付近で非常に大きく、h3ODFw1 防音壁の遮音効果が小さくなることを補っていることが分かる。

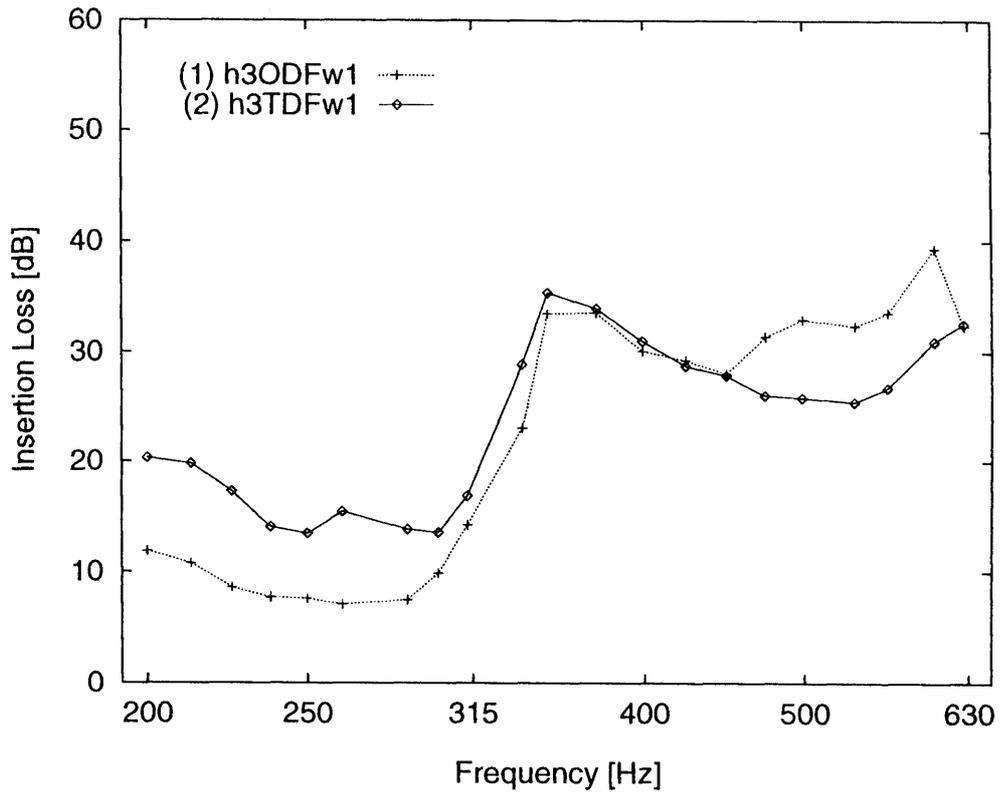


(a) For the h3ODFW1-barrier shown in Figure 4.11(a).

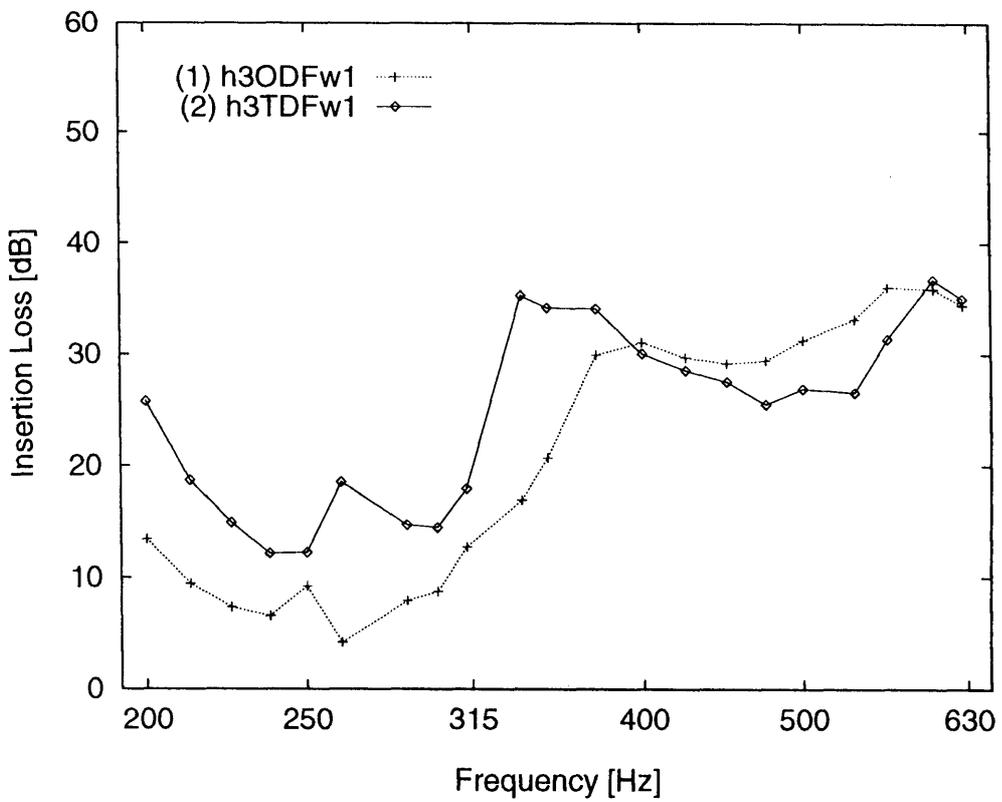


(b) For the h3TDFW1-barrier shown in Figure 4.11(a).

Figure 4.13 Measured(1) and calculated(2) spectra of insertion loss for the barriers and geometry in Figure 4.11.



(a) Measured spectra of insertion loss.

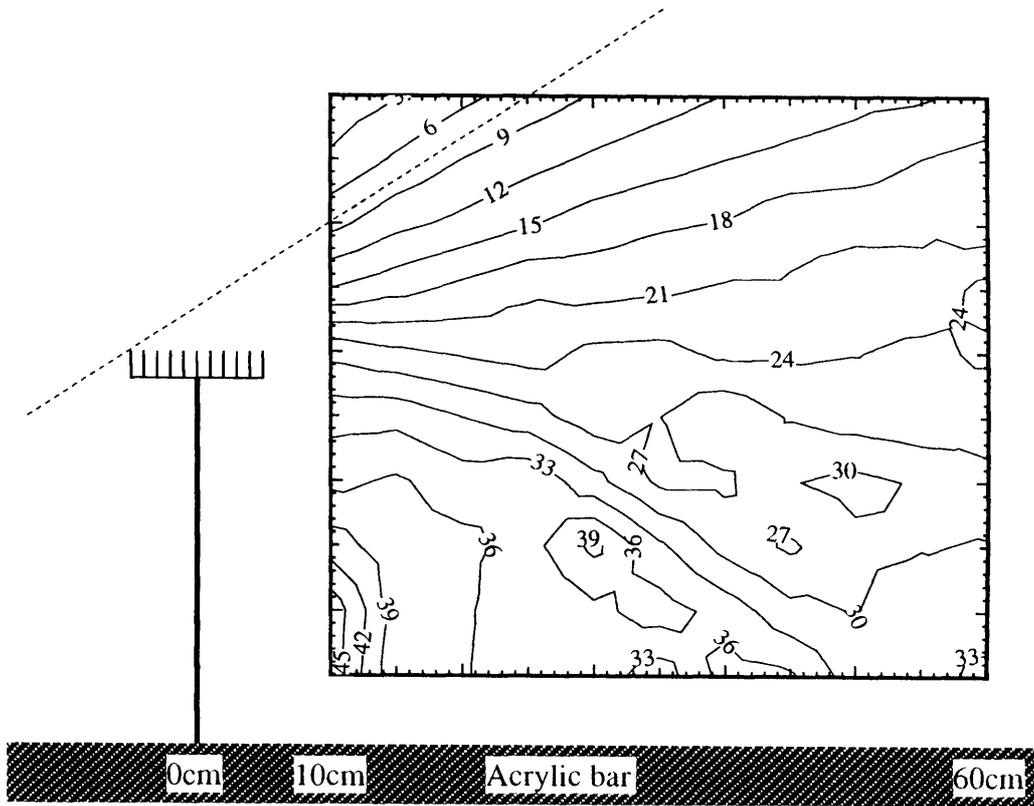


(b) Calculated spectra of insertion loss.

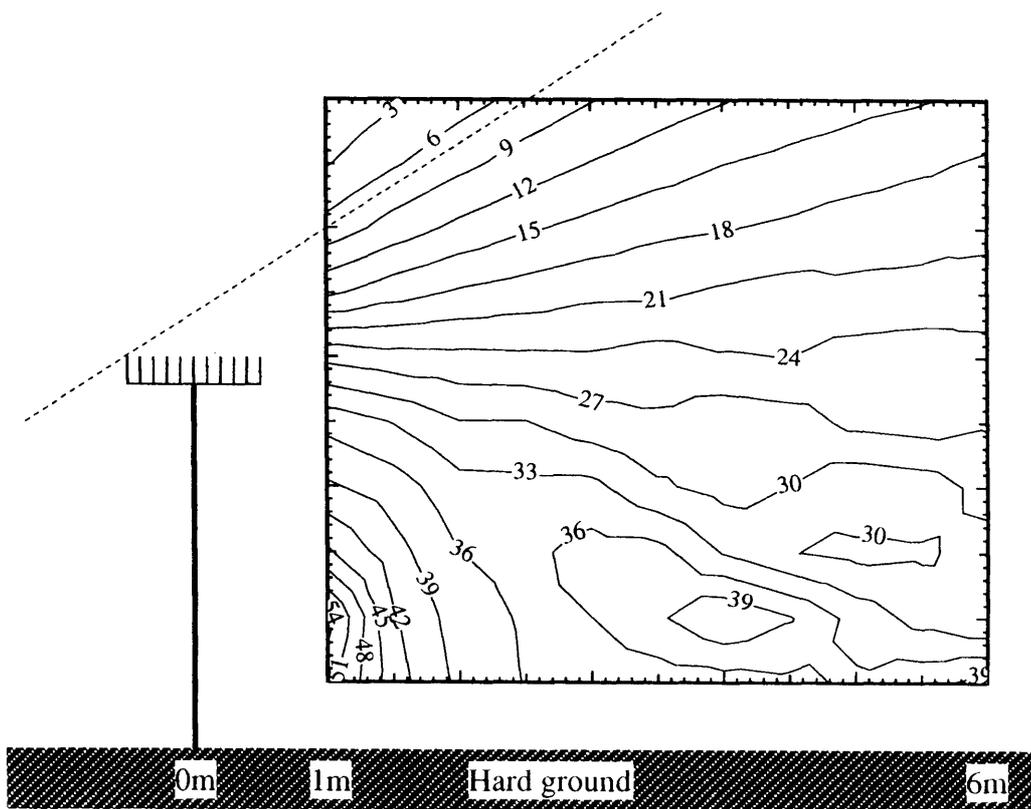
Figure 4.14 Comparison of spectra of insertion loss between two barriers shown in Figures 4.11(a) and (b).

#### 4.4.2.2 挿入損失の空間分布

Figures 4.15～4.17 に, Figure 4.11(b)に示した受音領域における挿入損失の空間分布の測定結果と計算結果を比較して表す. 測定に用いた音源の信号は, 周波数特性の測定の場合と同様に, 4msec 正弦波のトーンバーストを用いた. Figure 4.15 に 400Hz(測定では 4kHz)の純音における h3ODFw1 防音壁の挿入損失分布を, 測定結果, 計算結果の比較として示す. (a)が測定結果, (b)が計算結果である. 地面と防音壁に近い一部の領域を除いて, 測定結果と計算結果は非常に良い対応を示していると思われる. Figure 4.16 と Figure 4.17 には 200Hz(測定では 2kHz)と 400Hz(測定では 4kHz)各々の純音における h3TDFw1 防音壁の挿入損失の分布を, 測定結果, 計算結果の比較として示す. (a)が測定結果, (b)が計算結果を表す. Figure 4.16 の結果では, 大体防音壁の高さ以下の領域で, 測定結果が計算結果より 3dB くらい効果が少ない傾向が現れているが, 分布の形状はかなり似ている. しかし, Figure 4.17 の結果では測定値と計算値が非常に良い対応を示している.

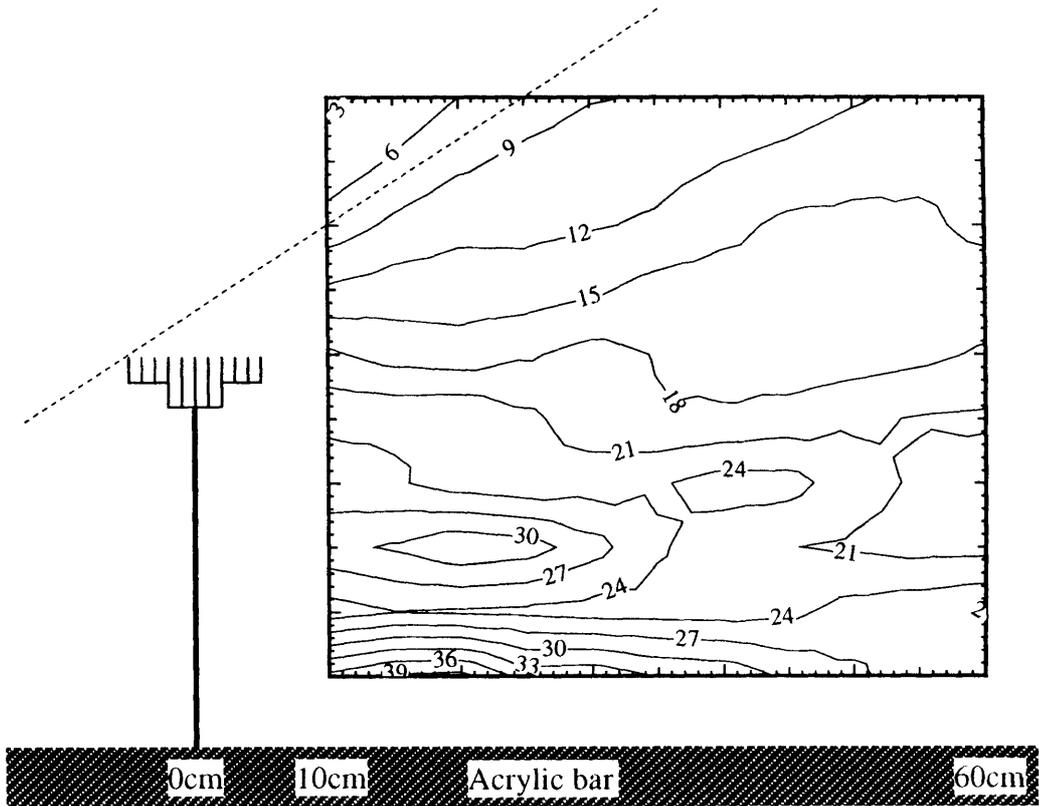


(a) Measured contour of insertion loss.

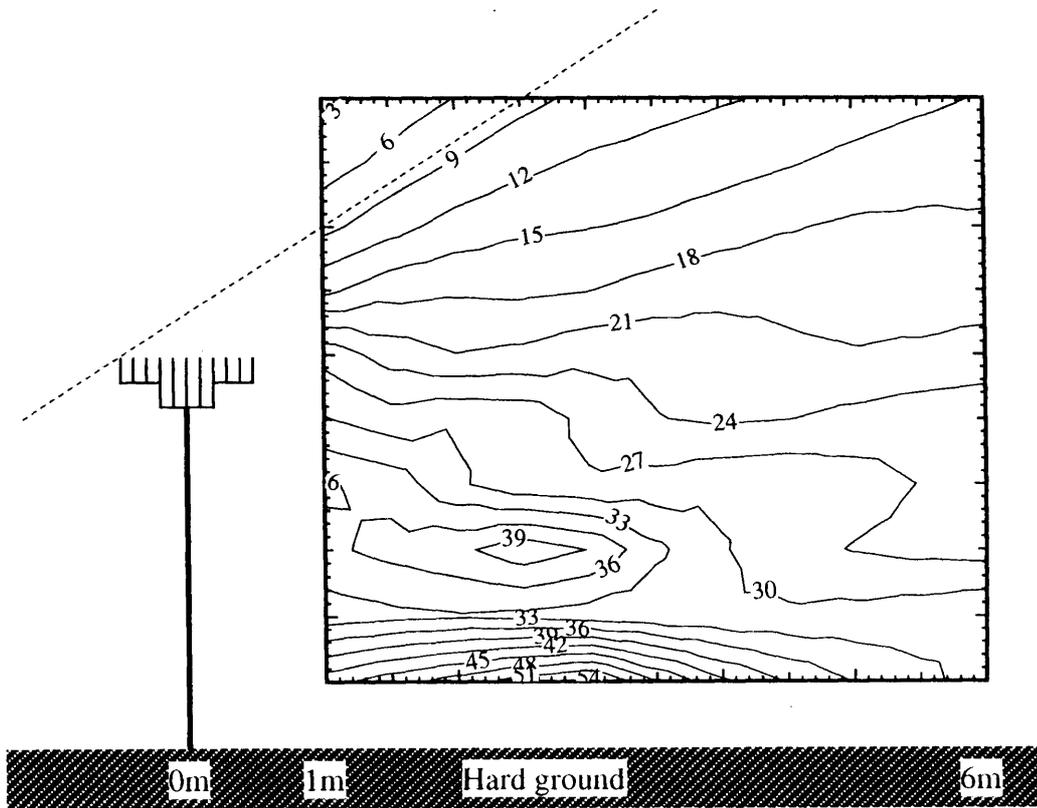


(b) Calculated contour of insertion loss.

Figure 4.15 Measured and calculated contours of insertion loss for the barrier profiles shown above. The frequency of the source is 4kHz in the experiment and 400Hz in the calculation.

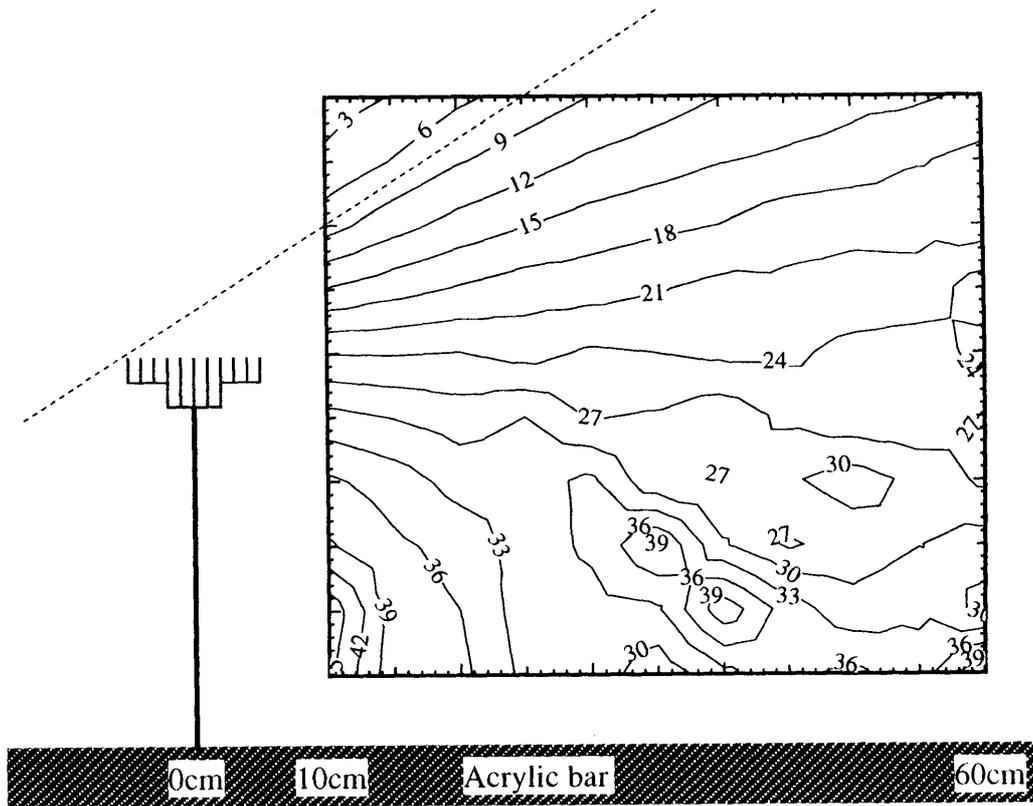


(a) Measured contour of insertion loss.

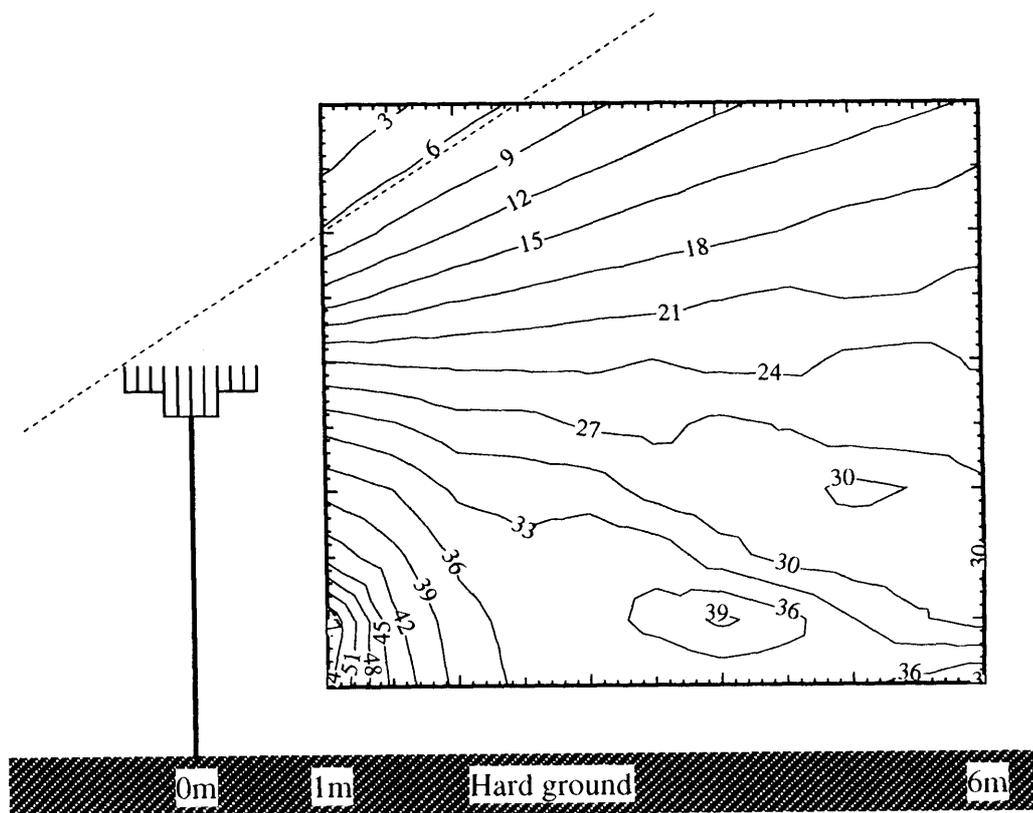


(b) Calculated contour of insertion loss.

Figure 4.16 Measured and calculated contours of insertion loss for the barrier profiles shown above. The frequency of the source is 2kHz in the experiment and 200Hz in the calculation.



(a) Measured contour of insertion loss.



(b) Calculated contour of insertion loss.

Figure 4.17 Measured and calculated contours of insertion loss for the barrier profiles shown above. The frequency of the source is 4kHz in the experiment and 400Hz in the calculation.

## 4.5 まとめ

音響管配列を持つT型防音壁の遮音効果を調べた結果、音響管配列の設計周波数付近では非常に良い遮音効果を示し、理想的にソフトな表面を持つT型防音壁とほぼ等しい遮音効果を持つことが数値解析および模型実験によって確認された。そこで、上端に音響管配列を持つT型防音壁は、設計周波数付近の帯域に限るものの、その周波数範囲ではソフトなT型防音壁を実現することができる。このような特徴から、配列される音響管の深さを調節することによって、制御する周波数帯域を調節することが可能で、制御の対象となる騒音の主な周波数成分がある帯域に集中されている場合、その設計に柔軟性のある防音壁構造が実現できた。

## 第5章

# 有効帯域を広げるための音響管配列

### 5.1 はじめに

前章での調べで、音響管配列を持つT型防音壁は音響管配列の設計周波数とその奇数倍周波数付近の帯域で非常に良い遮音効果を持つことが確認された。反面、その帯域の両側には効果の小さい、周波数によっては単純な垂直型防音壁よりも悪い効果を示す負の効果も同時に現れた。このため、もう一つの設計周波数を持つ音響管配列を用いることで、負の効果が補われることが数値解析および実験で確認された。

効果のピークとディップの差が大きい、周波数によって激しい起伏を持つ防音壁は道路交通騒音のような広帯域騒音を対象とするには望ましくないと思われる。そこで本章では、有効な周波数領域を広げるため、多くの設計周波数を持ち、できるだけ遮音効果が平坦で安定になるような音響管配列について数値解析を行い、その効果を模型実験で確かめる。

## 5.2 多数の設計周波数を持つ音響管配列

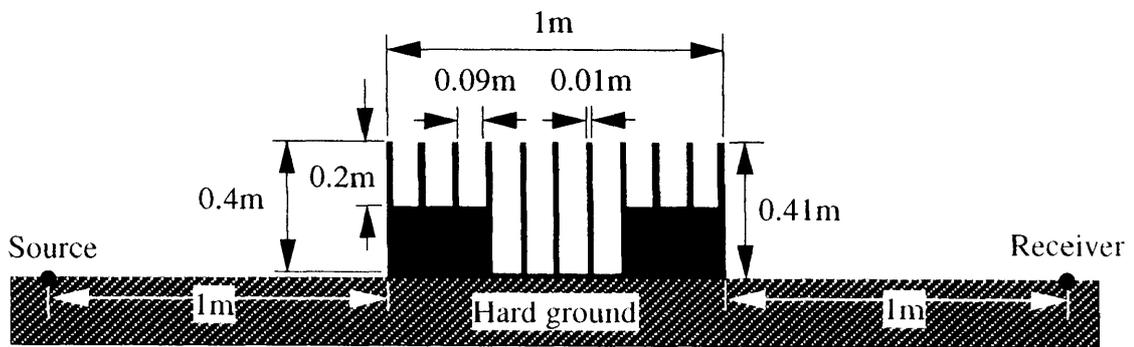
### 5.2.1 数値解析モデル

多数の設計周波数を持つ音響管配列の効果を調べるために想定した，計算モデルを Figure 5.1 に示す．音響管配列の影響だけを検討するため，(a)，(b)，(c)に示した音響管配列の外形はすべて同じ高さと同幅とする．(a)は深さ 0.2, 0.4m の 2 種類の音響管を配列した場合，(b)は深さ 0.2, 0.26, 0.4m の 3 種類の音響管を配列した場合，それから (c)は 0.1m から 0.4m まで連続的に深さが変わっていくように音響管の底を斜めにした音響管配列を表わす．それぞれの深さに対する設計周波数は，(a)が 212, 425Hz，(b)が 212, 327, 425Hz，(c)が 212~850Hz になる．(a)は前章にて検討を行った h3TDFw1 防音壁に設けた音響管配列と同じものである．前章の結果により，2 種類の設計周波数を持つ h3TDFw1 防音壁が 1 種類の設計周波数を持つ h3ODFw1 防音壁の遮音効果を補ったことから，h3TDFw1 防音壁に設けた(a)配列と新たな配列(b)，(c)の効果を比較し，配列の設計周波数が増えることによる効果の変化を検討する．純音を放射する線音源と受音点は音響管配列の両端から各々 1m 離れた剛な地面上に設定されている．

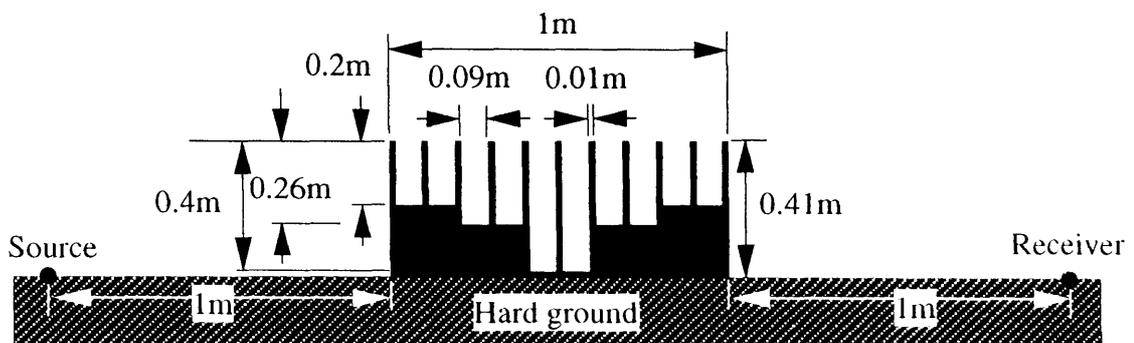
### 5.2.2 多数の設計周波数を持つ音響管配列の効果

Figure 5.2 には Figure 5.1 に示した音響管配列の挿入損失の周波数特性を表わす．(a)が 1/15 オクターブ毎の純音で表した計算結果，それから(b)が(a)の結果を第 4 章の Figure 4.4 で説明したように 1/3 オクターブ毎に帯域平均した結果を表す．音響管配列の効果が全体的に Figures 3.5~3.7 より多少大きくなっている．音源と受音点の位置は変わっていないものの，音響管配列の高さが Figures 3.5~3.7 では 0.21m であることに對して，ここでは 0.41m になっているためである．図中(1)の点線と(2)の破線は，挿入損失が周波数に大きく依存する傾向を示していることに對し，(3)の実線は 250Hz 以上の領域では比較的安定した周波数特性を示している．Figure 5.1 の(a)と(b)の音響管配列

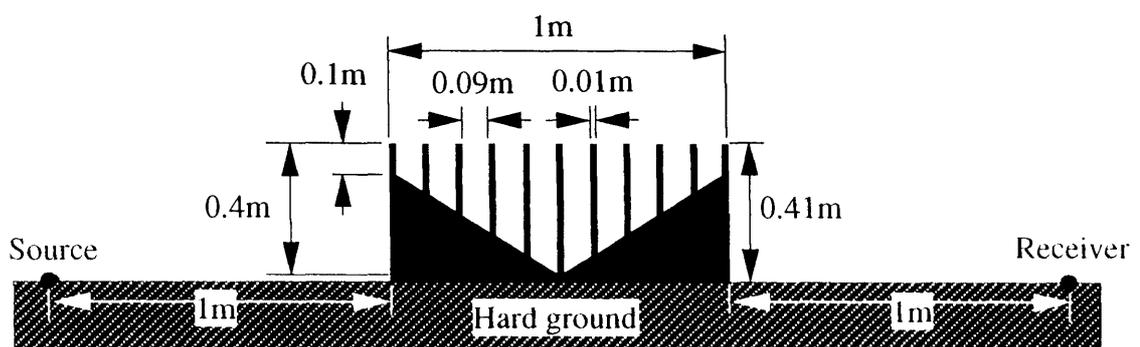
の共通の設計周波数である 200Hz と 400Hz 付近, それからその奇数倍の周波数付近では良い効果を示しているものの, 1kHz 付近では大きいディップを示しており, 全体的な効果からみて, 2 種類や 3 種類の深さを持たせただけでは音響管配列効果のピークとディップの著しい差をなくすことはできない. しかし, 図中(3)の実線で示された, Figure 5.1(c)のように深さが段々変わっていくような音響管配列の効果を見ると, 約 250Hz 以上の周波数領域ではある程度の効果を保ちながら比較的安定的で平坦な周波数特性を示している. このことから, 深さが段々変わっていくような音響管配列は, 効果の最大値は少し低下するものの, 広帯域騒音を対象にする防音壁への適用に適した音響管配列であることが考えられる.



(a) Two D.F. tube array.

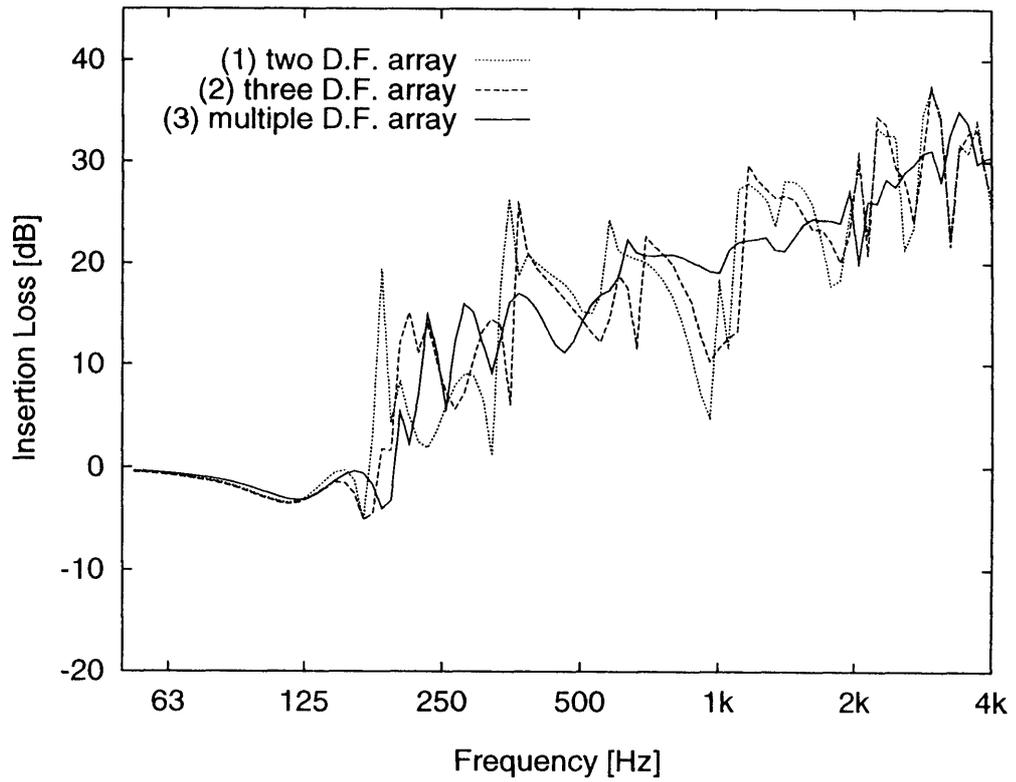


(b) Three D.F. tube array.

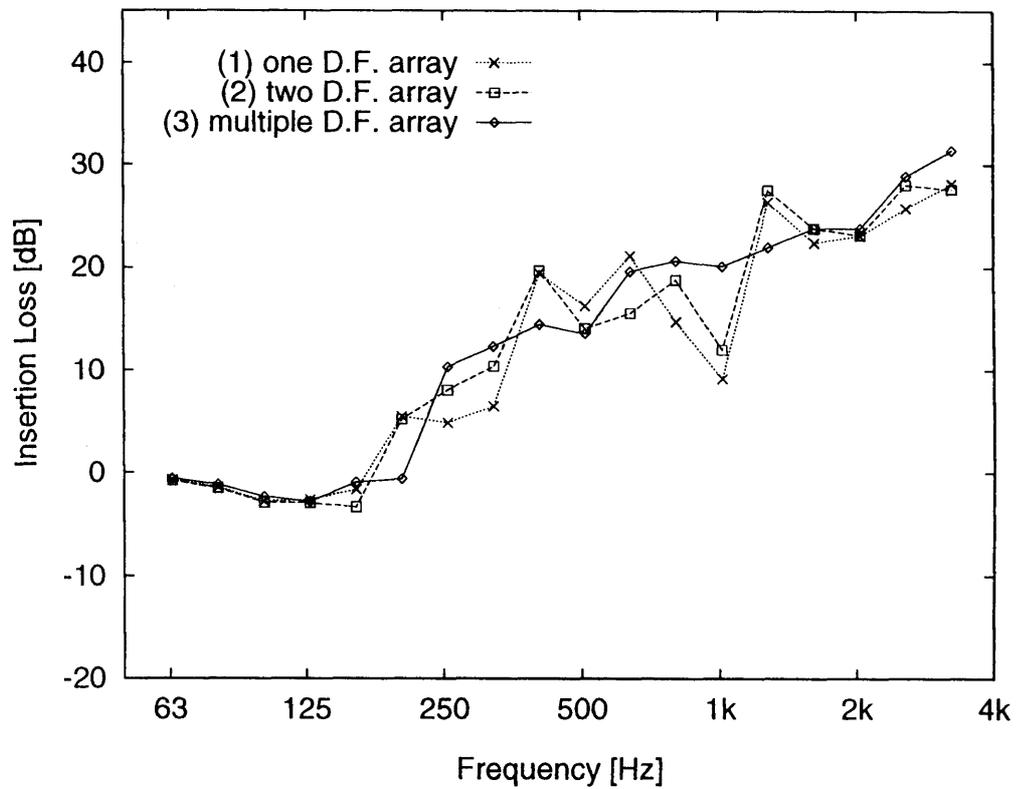


(c) Multiple D.F. tube array.

Figure 5.1 The tube array cross-sections with multiple design frequencies and geometries for calculations.



(a) 1/15 octave band spectra.



(b) 1/3 octave band spectra.

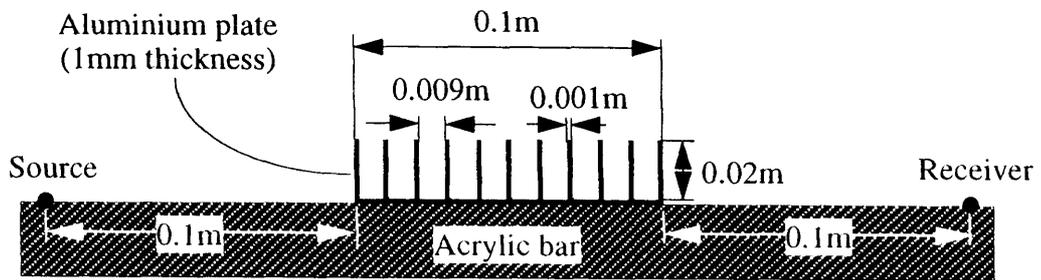
Figure 5.2 Calculated spectra of insertion loss for the tube arrays and geometries shown in Figure 5.1.

### 5.3 2次元模型実験

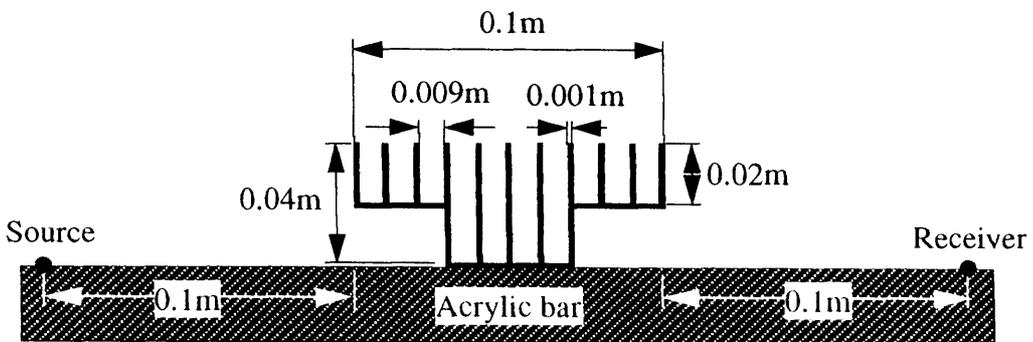
数値計算によって、深さが段々変わっていくような音響管配列が比較的安定的で平坦な効果を持つことが分かった。本節では、その効果を 1/10 縮尺の模型実験によって確かめることにする。

#### 5.3.1 実験モデル

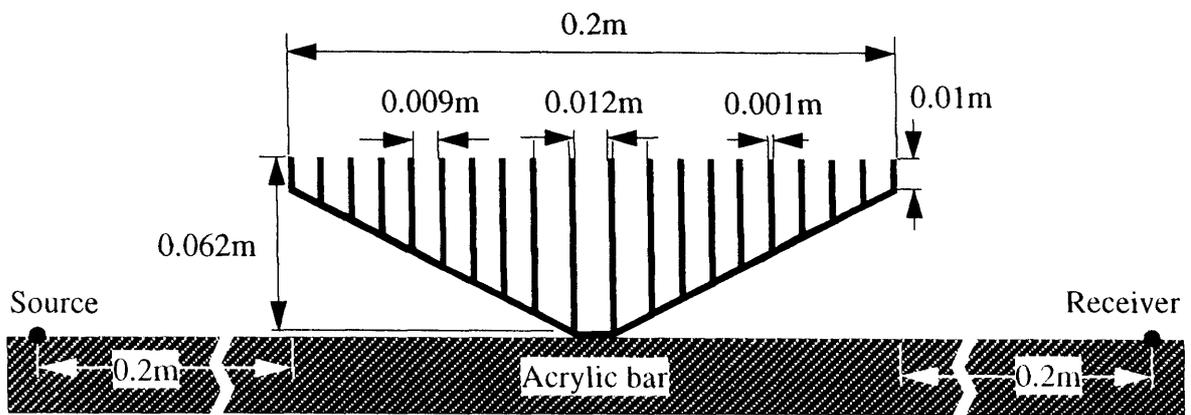
Figure 5.3 に厚さ 1mm のアルミ板で製作した 1/10 縮尺模型の音響管配列の断面図および音源、受音点の位置関係を示す。(a)と(b)の音響管配列は、第 4 章の Figure 4.11(a)の(i), (ii)に示した、h3ODFw1, h3TDFw1 防音壁の実験模型の音響管配列をそのまま用いている。(a)および(b)の模型と異なり、(c)の模型だけ配列の幅が 0.2m になっているが、これは後述する高さ 5m の防音壁に取り付ける幅 2m の音響管配列を考慮したためである。前節における計算モデルとはやや違うモデルが設定されているが、本実験では、(c)のような多数の設計周波数を持つ音響管配列の効果を少数の設計周波数を持つ音響管配列の効果と比較するのが目的であるため、音響管配列同士の形状の違いによる効果の変化よりも、音響管配列と同じ外形を持つ剛な障害物や上端面の境界条件がソフトな障害物の効果と対比した変化に注目してほしい。(c)の音響管配列の設計周波数を実寸に換算すると 137~850Hz であり、(a)と(b)の音響管配列の設計周波数は第 4 章の h3ODFw1 や h3TDFw1 防音壁の設計周波数と同じとなる。それぞれの配列で一番深い音響管の深さが異なっているため、音響管配列の高さは、実寸に換算して(a)が 0.21m, (b)が 0.41m, (c)が 0.63m である。実験を行った 2次元音場や測定装置などの全ての測定条件は第 4 章の Figure 4.12 に示したものと同様にする。音源と受音点の位置は Figure 5.3 に示したように、音響管配列の両端の音響管から音響管配列の幅の長さと同じ距離で地面上に設定した。



(a) One D.F. tube array.



(b) Two D.F. tube array.



(c) Multiple D.F. tube array (2m-width model).

Figure 5.3 The cross-sections of 1/10 scale model tube array and geometries for experiments.

### 5.3.2 実験結果

Figures 5.4～5.6 に実験結果と計算結果を比較して示す。横軸の周波数は実寸に換算したものである。測定周波数の範囲が 2000～6250Hz(実寸換算で 200～625Hz)となっているのは、第 4 章での実験と同様に実験装置の制約のためである。音響管配列によって実現されたソフトな表面の効果を検討するため、配列の模型と同じ外形に保ちながら、上端表面の境界条件を理想的にソフトな表面および剛な表面に設定した障害物の計算結果もあわせて示す。全体的な効果が Figure 5.4, Figure 5.5, Figure 5.6 の順に大きくなっているのは音響管配列の高さが異なるためである。一つの設計周波数を設けた Figure 5.4 の場合、実験結果では数値計算結果の第 1 共鳴周波数である 378Hz より低い周波数でピークが現れている。それから配列の共鳴周波数の付近である約 300～390Hz の帯域で実験値と計算値の差が大きくなっている。この原因はまだ明らかになっていないが、共鳴周波数付近の音圧の振る舞いであるだけに、模型製作および実験の誤差や実験と計算条件のわずかの不一致の影響は大きいと思われる。模型制作には可能な限りの注意を払ったが、それでも十分でなかったのであろう。しかし、それ以外の帯域では実験と計算結果がよく対応しており、音響管配列の効果が確認できる。Figure 5.5 の場合、設計周波数 212Hz の音響管を加えることによって、Figure 5.4 に比べて 200Hz 付近の効果が大きくなり、剛な表面に比べて負になる効果も多少消えている。Figure 5.4 の場合と同じく、共鳴周波数の付近である約 315～390Hz の帯域で実験と計算結果の不一致を示している。計算結果の 380Hz 付近のディップは境界要素法の解の非一意性による計算誤差[43]である。Figure 5.6 の場合は Figures 5.4, 5.5 に比べて計算と実験結果がよく対応している。音響管配列の効果は剛な表面と理想的にソフトな表面の効果との中間の値を示し、Figure 5.4 や Figure 5.5 に比べて平坦で安定した周波数特性を示している。Figures 5.4～5.6 の結果から、異なる深さの音響管を組み合わせることで配列の

効果が周波数によらず，比較的平坦でピークとディップの差が少ない周波数特性を持つことが実験で確認された。

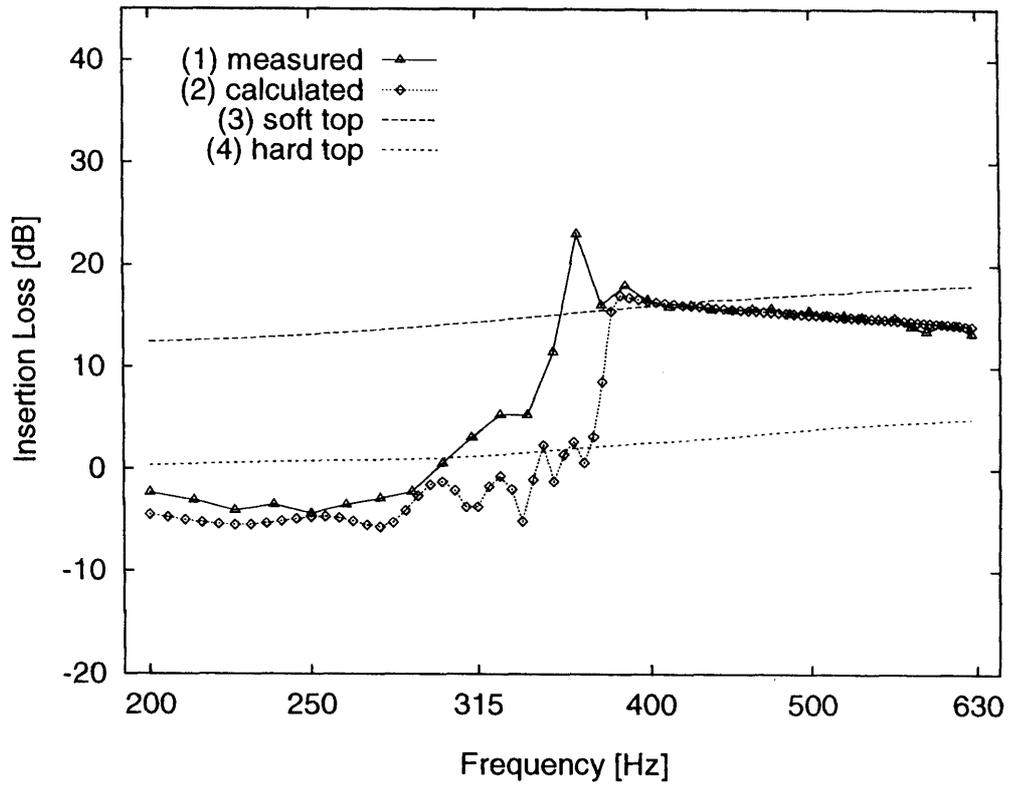
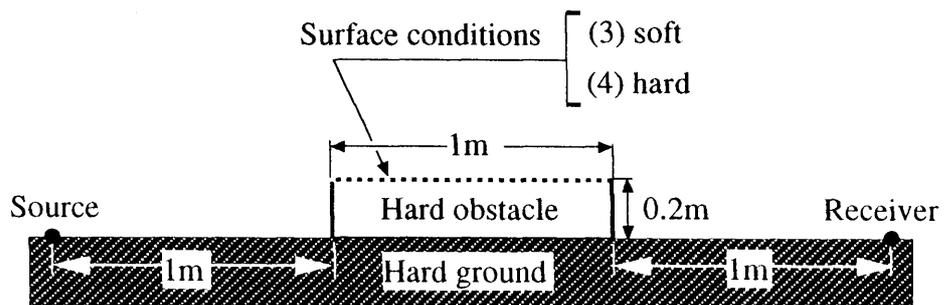


Figure 5.4 Measured and calculated spectra of insertion loss for the tube array shown in Figure 5.3(a); Profiles and geometry for the calculations are shown below.



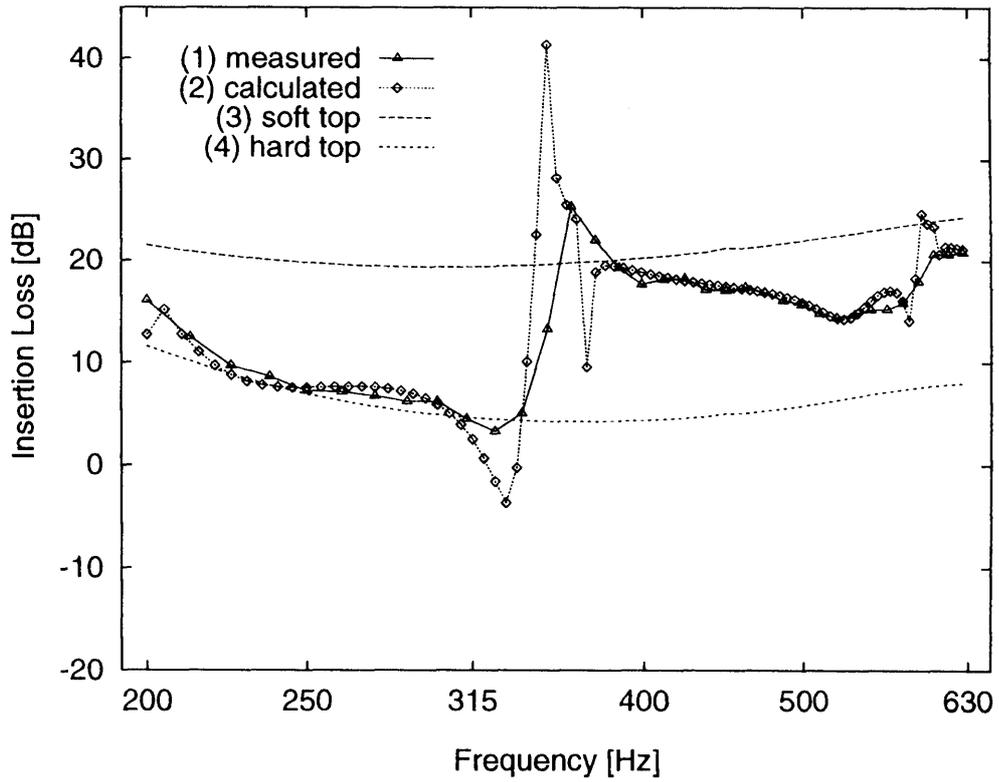
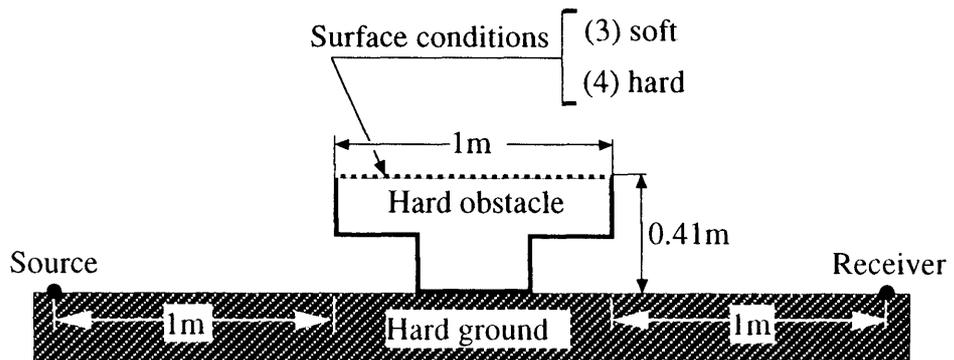


Figure 5.5 Measured and calculated spectra of insertion loss for the tube array shown in Figure 5.3(b); Profiles and geometry for the calculations are shown below.



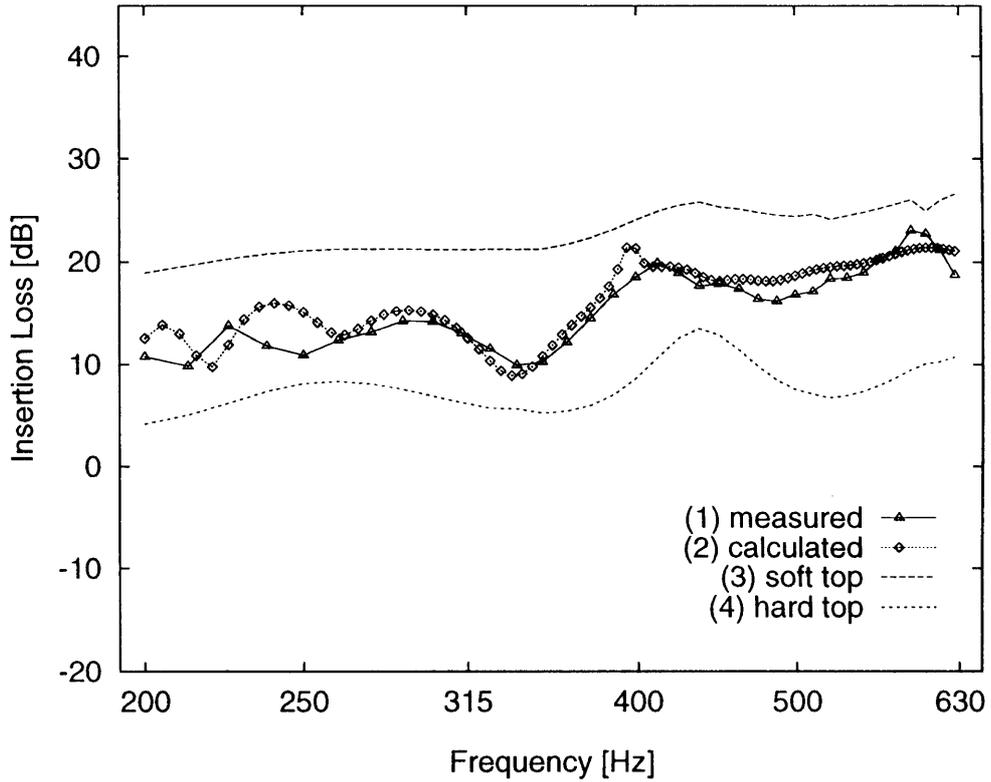
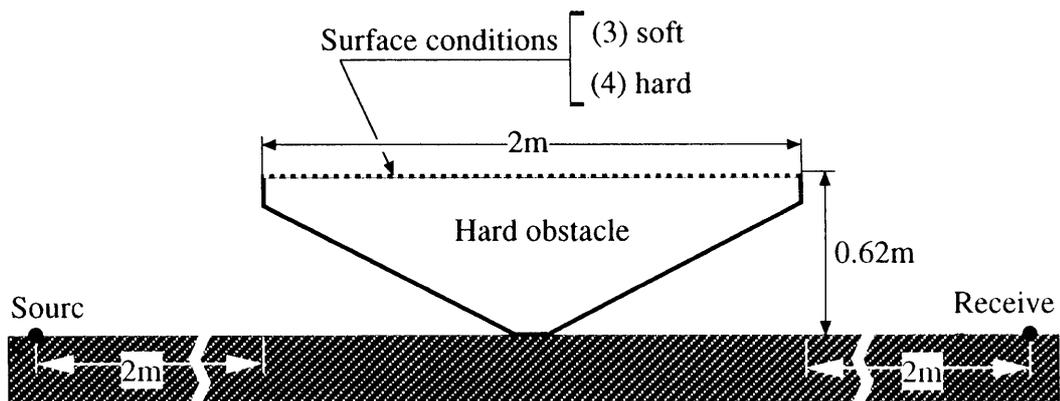


Figure 5.6 Measured and calculated spectra of insertion loss for the tube array shown in Figure 5.3(c); Profiles and geometry for the calculations are shown below.

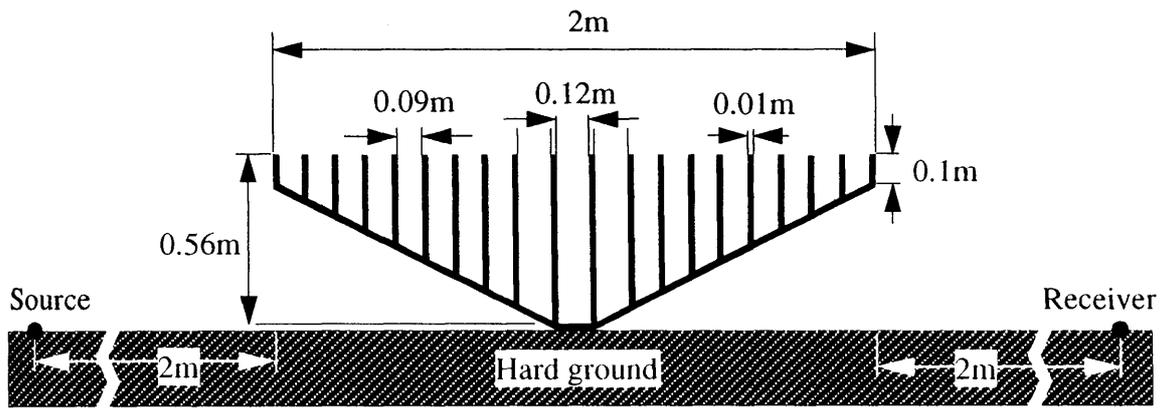


## 5.4 底面の形状が異なる音響管配列の効果

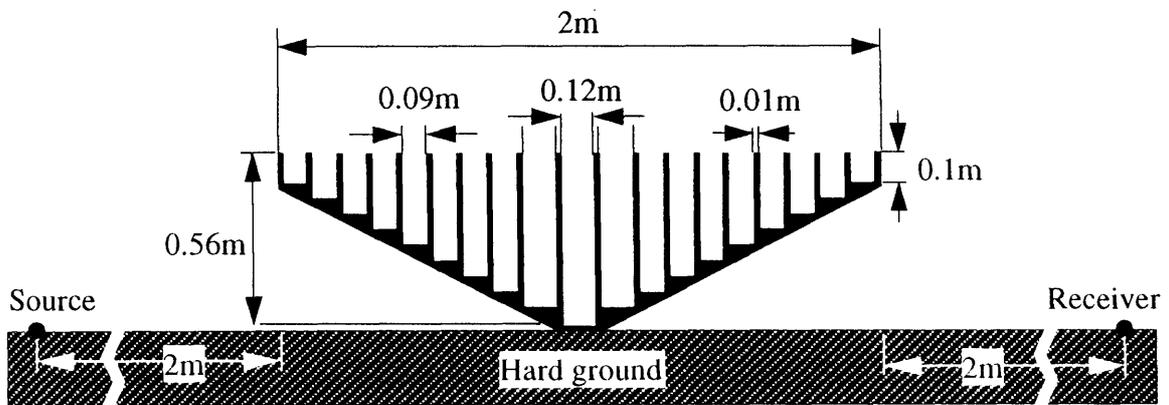
数値解析および実験によって、音響管配列の深さを段々変えていくことはある程度平坦な周波数特性を持たせることに有用な方法であることが確認された。本節では、音響管配列の底面を斜めにした場合、その底面の形状が効果に及ぼす影響について数値解析を用いて検討を行う。

### 5.4.1 数値解析モデル

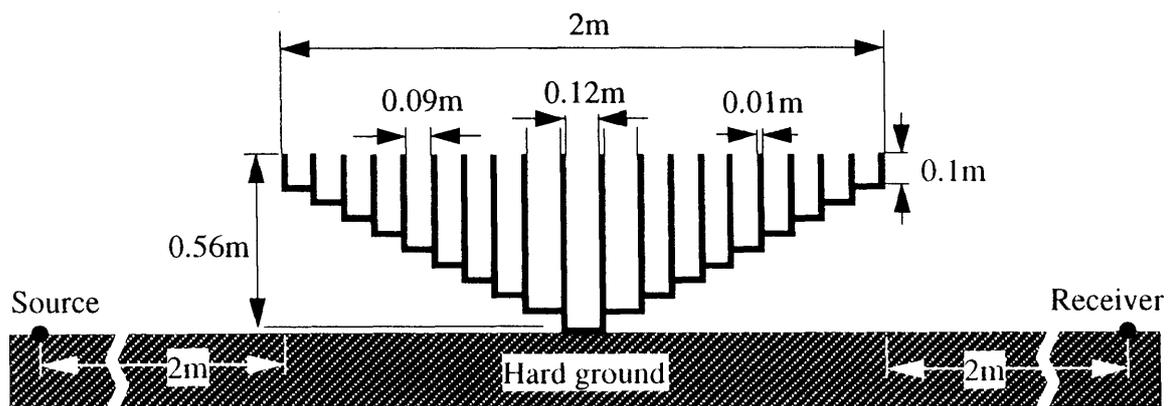
Figure 5.7 に解析を行うために想定した、深さが段々変わっていくような音響管配列の解析モデルを示す。配列(a)は内側と外側の底面が斜めな配列、配列(b)は内側の底面が水平で外側の底面が斜めな配列、配列(c)は内側と外側の底面が水平の音響管配列を示す。配列(b)と(c)は、配列外側の底面形状だけ違って、それ以外は同一なものである。これらに比べて配列(a)は、真中の音響管一本を除いた全ての音響管の内側の底面が斜めになった分、音響管の長さが少々長くなっている。これを考慮すると配列(a)の設計周波数は配列(b), (c)より少しずつ低くなることが予想されるが、本研究においては底面が斜めな音響管の共鳴周波数の検討については省くことにする。ただ、音響管の底面が斜めになることにより伸びた長さだけが共鳴周波数の変動に影響を与えるとしても、配列(b)や(c)に比べて配列(a)の音響管の長さ増加分は無視できると考えられる。そこで、(a), (b), (c)の音響管配列の設計周波数は、約 150～850Hz の範囲から大きく外れず、三つともほぼ等しくなっているとす。音源・受音点の位置関係は、純音を放射する線音源と受音点が各々音響管配列の両端から配列の幅と同じ距離(2m)だけ離れた地面上に設定されている。



(a) Slant bottom



(b) Step-slant bottom

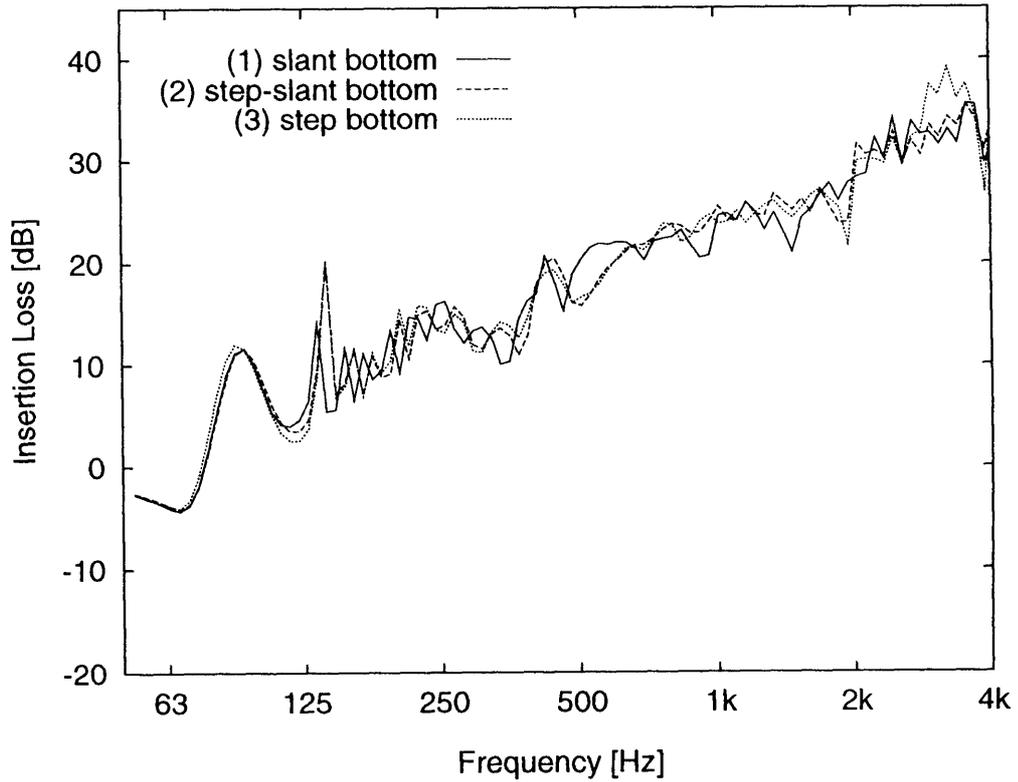


(c) Step bottom

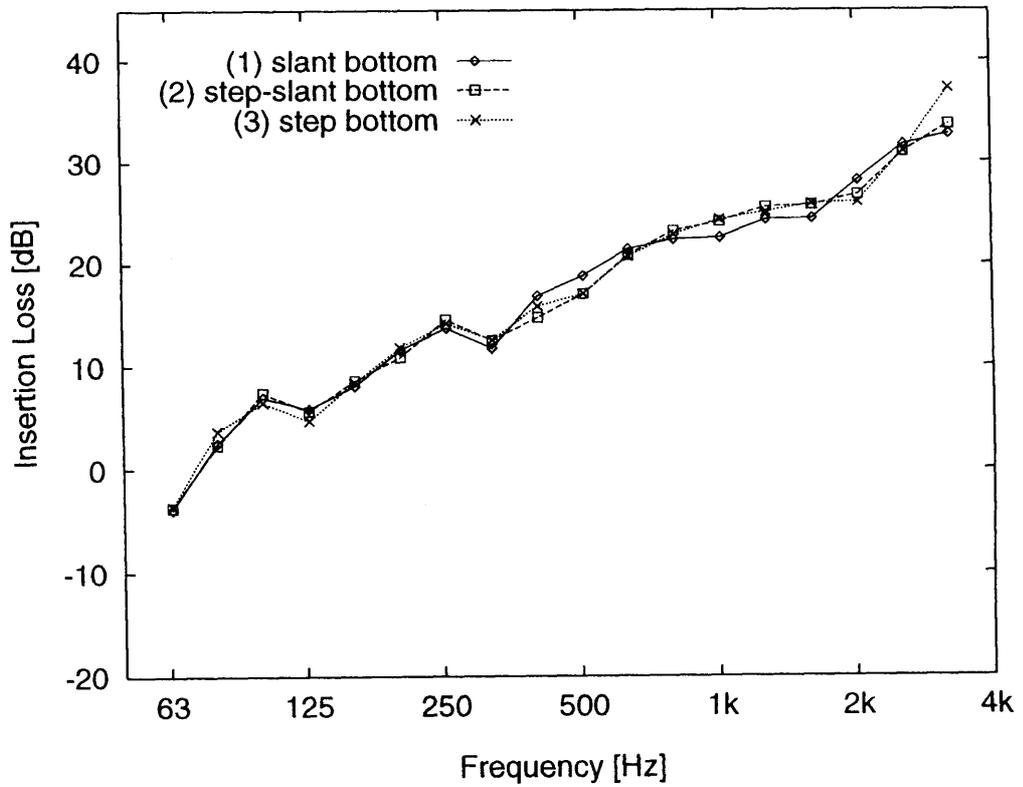
Figure 5.7 The tube array profiles with different bottom type and geometries for calculations.

#### 5.4.2 音響管配列の底面の形状の影響

Figure 5.8 に Figure 5.7 に示した音響管配列の挿入損失の周波数スペクトルを表す計算結果を示す。(a)は 1/15 オクターブバンド毎の純音で表わした結果, (b)は(a)の結果を, 1/3 オクターブバンド毎に帯域平均して表わしたものである。結果からみると, 音響管配列の底面を斜めにした影響はほぼ見られない。それから, 内側の底面は水平で外側の底面は斜めにした音響管配列(図中(2)の破線)と, 内側と外側の底面をともに水平にした音響管配列(図中(3)の点線)の効果を比較してみると, それらはほぼ一致していることが分かる。このことから, 音響管配列の製作上の実用性を考慮して設定した Figure 5.7 (a)のような配列を防音壁の上部に取り付けてもその効果は底面が水平の配列と比べて大きい差はないと考えられる。



(a) 1/15 octave band spectra.



(b) 1/3 octave band spectra.

Figure 5.8 Calculated spectra of insertion loss for the tube arrays and geometries shown in Figure 5.6.

## 5.5 まとめ

音響管配列により実現されたソフトな表面の最大の欠点である遮音効果の周波数依存性を改善するため、多数の設計周波数を持つよう深さが段々変わる音響管配列を提案し、その効果について数値解析および模型実験によって検討を行った。その結果、提案した音響管配列は、低周波領域を除いた非常に広い周波数範囲で効果のピークとディップの差が激しくない、比較的安定した効果を示しており、防音壁に取り付けた場合、良い遮音効果が得られることが期待できるようになった。それから、深さが段々変わる音響管配列の製作上の実用性を考慮して想定した底面が斜めな音響管配列の効果と底面を水平にした音響管配列の効果为数値解析で比較した結果、その効果にはさほど差が見られなかった。このことから、深さが段々変わる音響管配列やその模型を製作する場合、Figure 5.7 の(a), (b), (c)の中でどちらを選んで製作しても、その効果はさほど変わらないと言える。

## 第6章

# 長さの異なる音響管配列を持つ T型防音壁

### 6.1 はじめに

前章において、遮音効果の有効帯域を広げるために提案した、多数の設計周波数を持つ音響管配列の効果について検討を行った。その結果、深さが段々変わっていくような音響管配列はある程度広い周波数範囲で安定的で平坦な効果を持つことが確認された。それから、模型の製作上や実用化された場合の製作上の便利を図るため、提案した音響管配列の底面を斜めにし、それが効果に及ぼす影響についても検討を行った。本章では、底面が斜めで深さが段々変わっていくような音響管配列を防音壁に取り付け、その遮音効果について検討を行う。本章において検討を行う防音壁は、最近増えている交通量などを考えて高さ3mの防音壁に加えて高さ5m防音壁の2種類を想定する。さらに、高さ5mの防音壁の場合、垂直型防音壁を除いた全ての防音壁の上端部の幅を1mと2mの2種類とする。

## 6.2 高さ 3m の防音壁

現在、高速道路沿いに建てられている防音壁は、場所によって多少差異はあるが、大部分の高さが 3m 前後となっている。このような既存の防音壁に [キャップ] を取り付け、基本形状が「T型」である防音壁を想定することにおいて、本研究ではキャップが交通運行の妨げにならないようその幅を、防音壁を中心として道路側に 0.5m、もう片側に 0.5m、つまり全体の幅を 1m と固定して解析を行う。高さ 3m 防音壁に対する「道路側出っ張り 0.5m」という設定は、あくまでも本研究における決まりであって、「道路建築規制」によるものではない。こういうわけで、Figure 6.1 に、高さ 3m、上端部の幅 1m の T型防音壁に多数の設計周波数を持つよう音響管配列を配列した h3MDFw1 防音壁を表す。第 4 章にて説明した本研究における防音壁の [名前のつけがた] に従って、「h3MDFw1」防音壁とは、高さ 3m、多数の設計周波数(Multiple Design Frequency)を持つ、上端の幅 1m の防音壁を意味する。上端に取り付けた音響管配列は、一番長い 57cm の音響管から一番短い 10cm の音響管まで、底面を斜めにした音響管がその長さを段々変えながら配列されている。従って、配列が持つ設計周波数は約 150 ~ 850Hz になる。本節では、この防音壁と第 4 章の Figure 4.2 に示した防音壁と比較して、第 4 章の Figure 4.3 に示した音場に設置し、その遮音効果について数値解析を行う。解析における音源や受音点の位置は Figure 4.3(a)や(b)と同様にする。

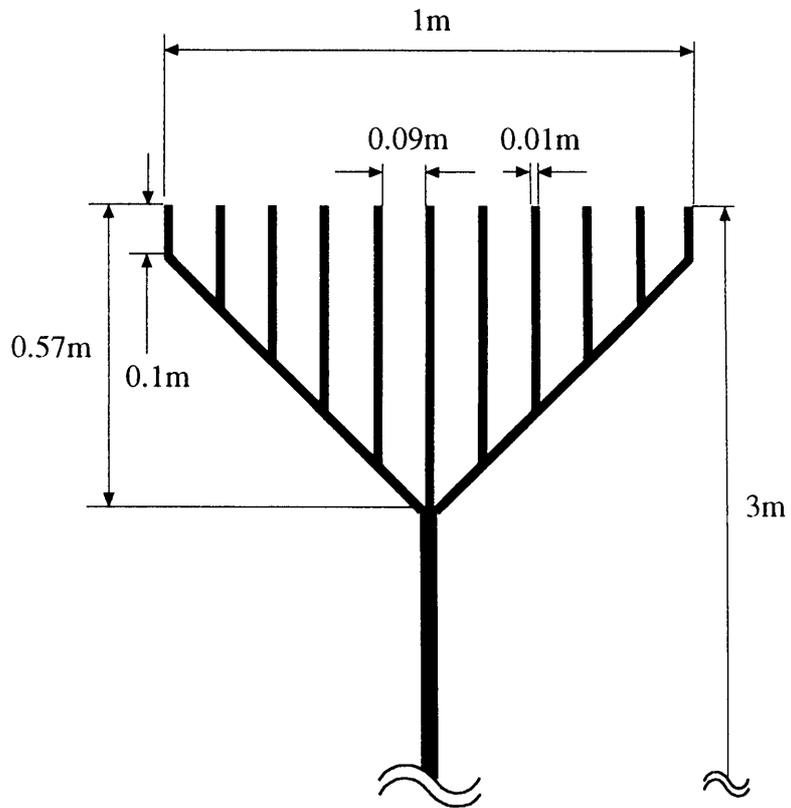
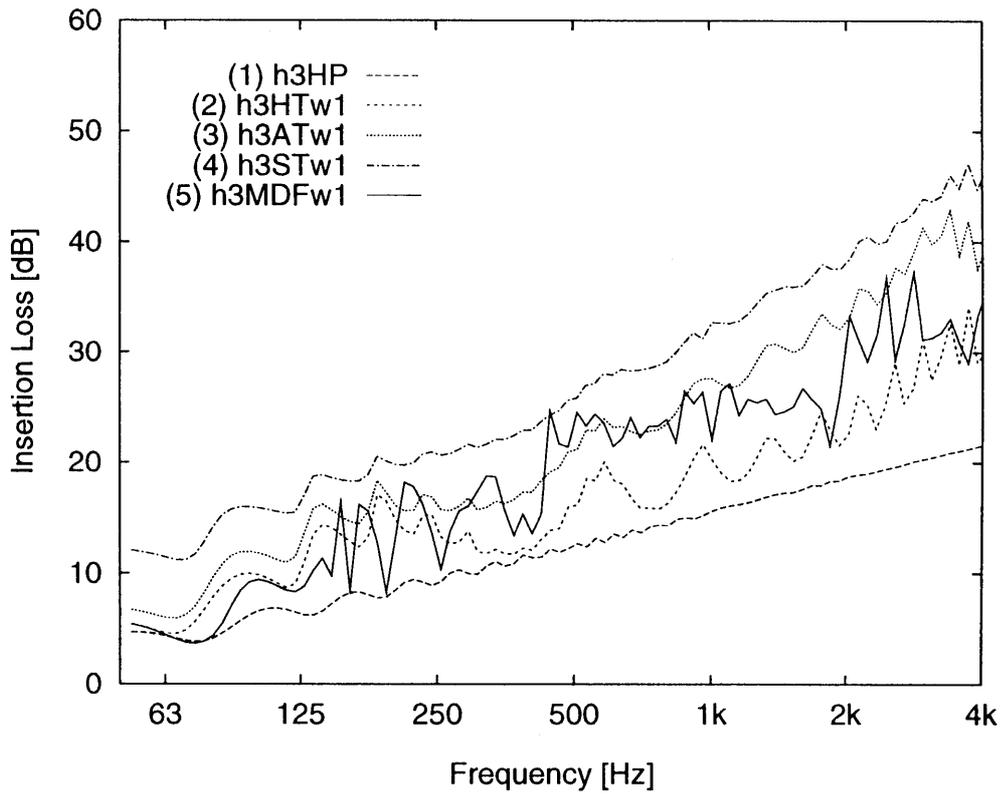


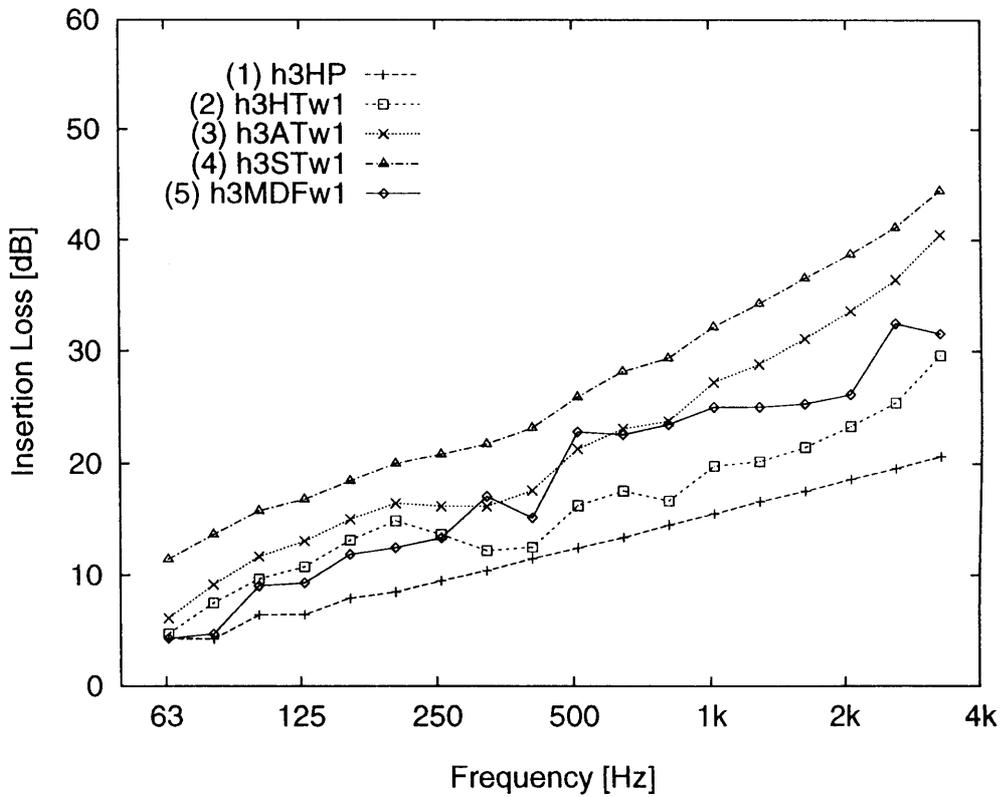
Figure 6.1 The profile of h3MDFw1-barrier.

### 6.2.1 挿入損失の周波数特性

Figure 6.2 に Figure 4.3(a) に示した音場の音源と受音点における h3MDFw1 防音壁の挿入損失の周波数特性を, Figure 4.2 に示した防音壁と比較して示す. (a) が 1/15 オクターブバンド毎の純音で表わした結果, (b) が (a) の結果を 1/3 オクターブバンド毎に帯域平均して表わしたものである. この結果から, 図中(5)の実線で示した h3MDFw1 防音壁は約 250Hz 以上の領域で h3HTw1 防音壁より高い効果を示しており, 約 500~1kHz の領域では h3ATw1 防音壁とほぼ等しい効果を示している. それから, 約 500~2kHz の非常に広い周波数領域において遮音効果がある程度平坦になっている. 一つや二つの設計周波数を持つ h3ODFw1 や h3TDFw1 防音壁の挿入損失の周波数特性を表す Figure 4.5 や Figure 4.6 でみられた h3HP 防音壁による効果より小さくなる周波数はここではなくなっている.



(a) 1/15 octave band spectra.

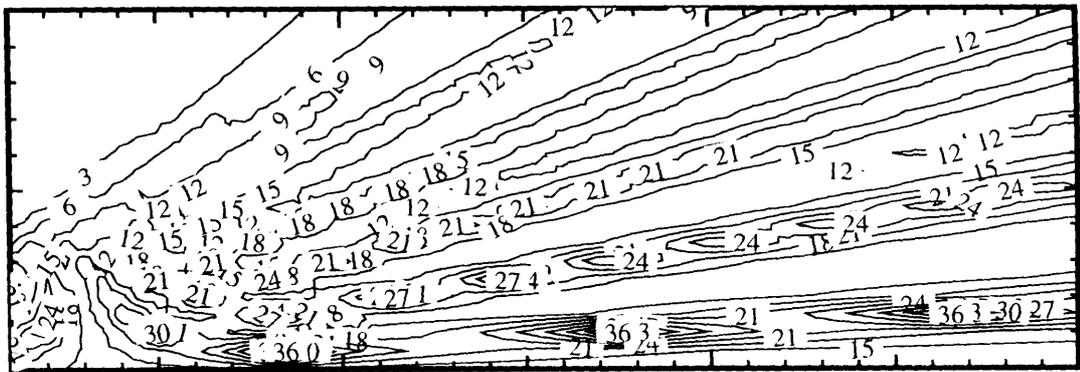
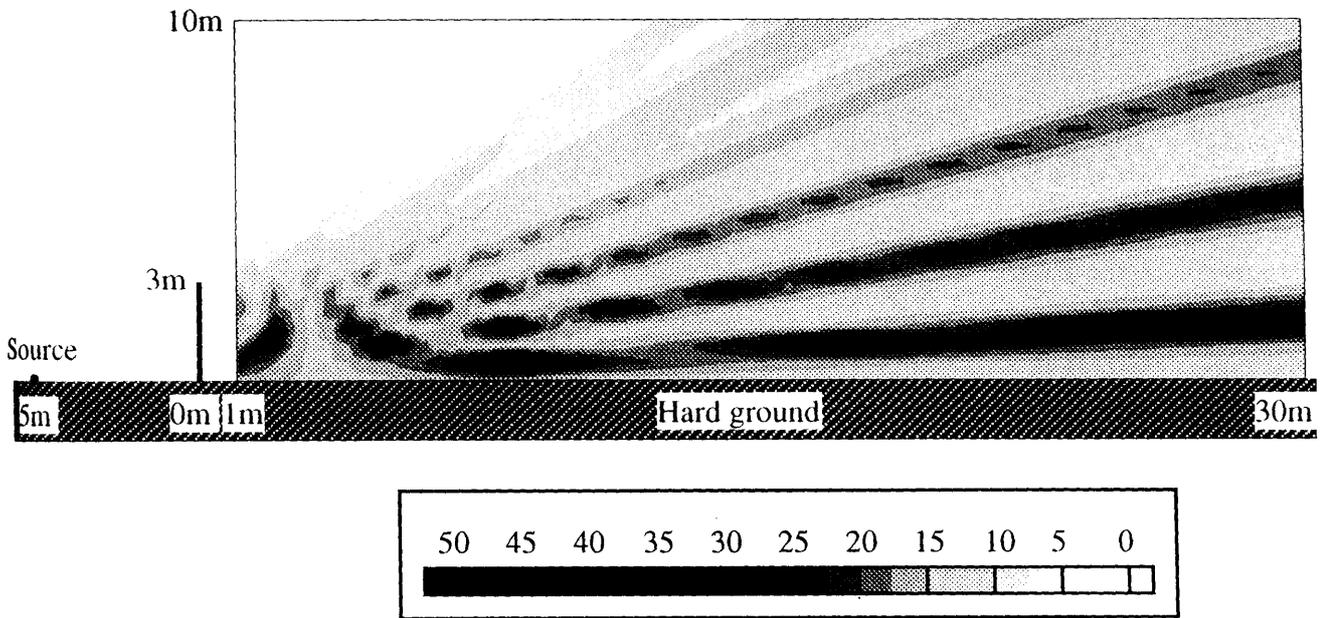


(b) 1/3 octave band spectra.

Figure 6.2 Calculated spectra of insertion loss for the barriers shown in Figure 6.1, Figure 4.2 and geometry shown in Figure 4.3(a).

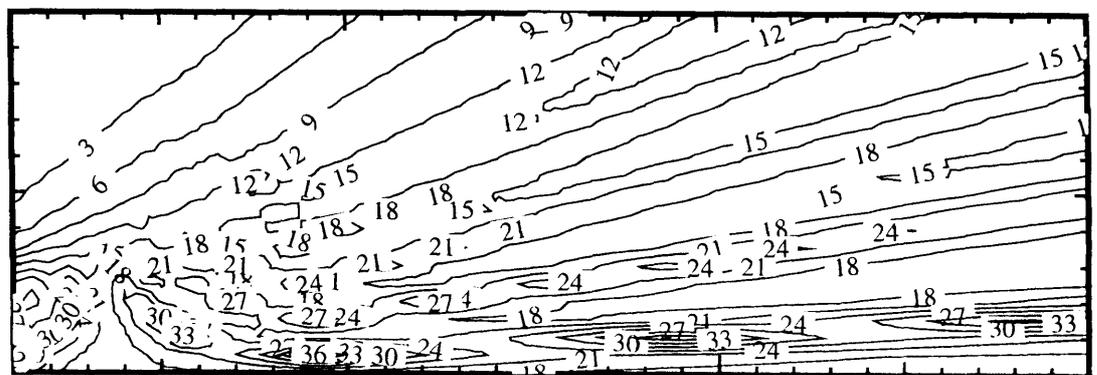
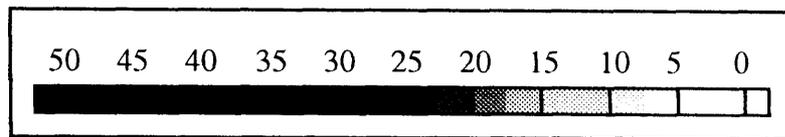
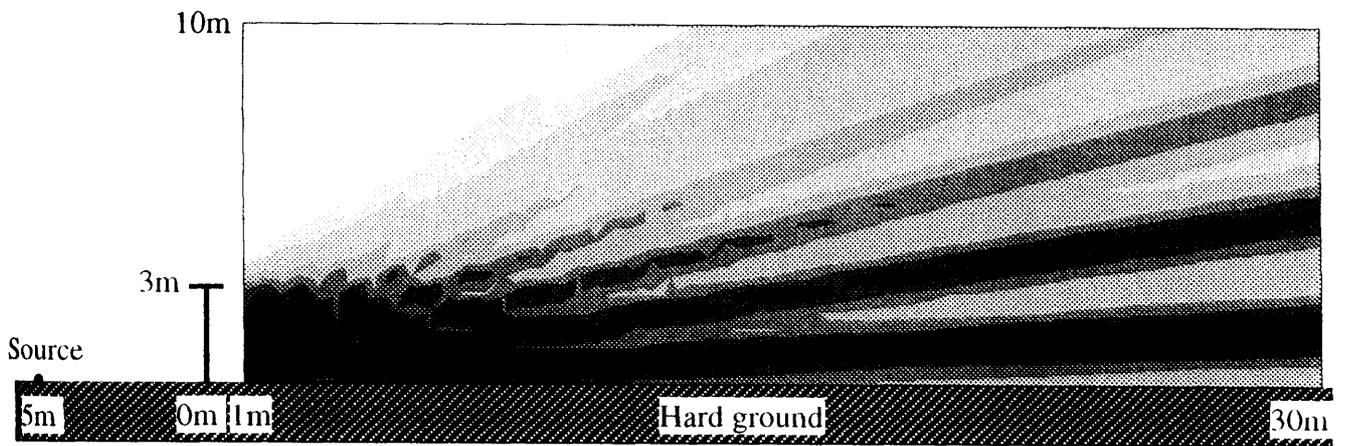
## 6.2.2 挿入損失の空間分布

Figures 6.3(1)~(3)に 500Hz 純音における h3MDFw1 防音壁の挿入損失の空間分布を h3HP 防音壁や h3HTw1 防音壁と比較して示す。ここで、500Hz を観測周波数とする特別な意味はない。ただ、第 4 章の Figure 4.1 の(a)と(b)に示した h3ODFw1 と h3TDFw1 防音壁とは違って、Figure 6.1 に示した h3MDFw1 防音壁の場合は設計周波数の幅が広いので、任意の周波数として 500Hz を選んだだけである。Figure 6.3(1)が h3HP 防音壁、Figure 6.3(2)が h3HTw1 防音壁、それから Figure 6.3(3)が音響管配列を持つ防音壁の遮音効果を表す。各図中、上部に示す分布図は色の濃さが濃いほど静かな領域になることを意味する。それからその下部に示した分布図は、上部の色で表した挿入損失値を数値で表したものである。Figure 6.3(1)と Figure 6.3(2)の結果を比較してみると、h3HTw1 防音壁は防音壁に近い領域では h3HP 防音壁より高い効果を示しているが、防音壁から遠くなると h3HP とあまり変わらない効果を示している。これに対して、Figure 6.3(3)の h3MDFw1 防音壁の場合は、示されたほぼ全受音領域で Figure 6.3(1)の h3HP 防音壁や Figure 6.3(2)の h3HTw1 防音壁より大きな効果を表している。示された受音領域での挿入損失の算術平均値を求めてみると、Figure 6.3(1)が 13.2 dB、Figure 6.3(2)が 15.2 dB、Figure 6.3(3)が 21.0 dB となる。



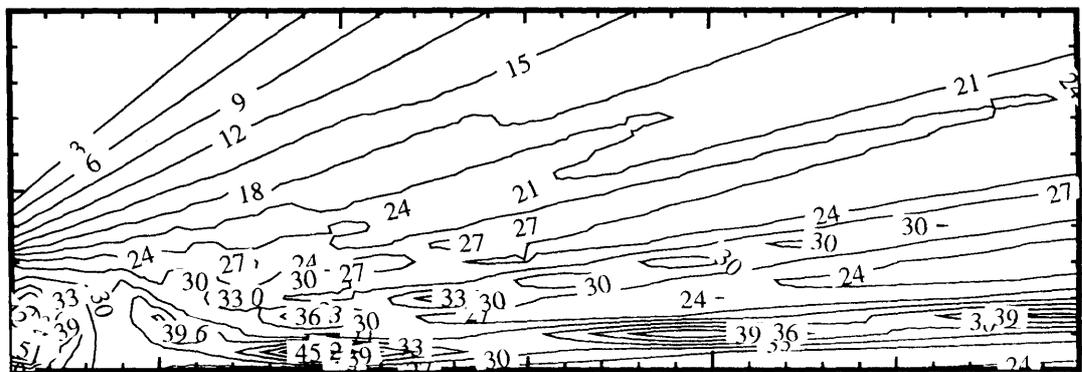
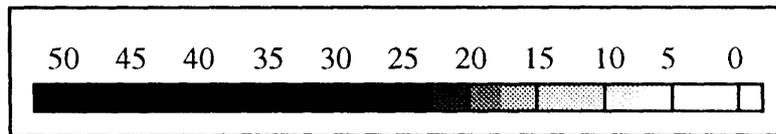
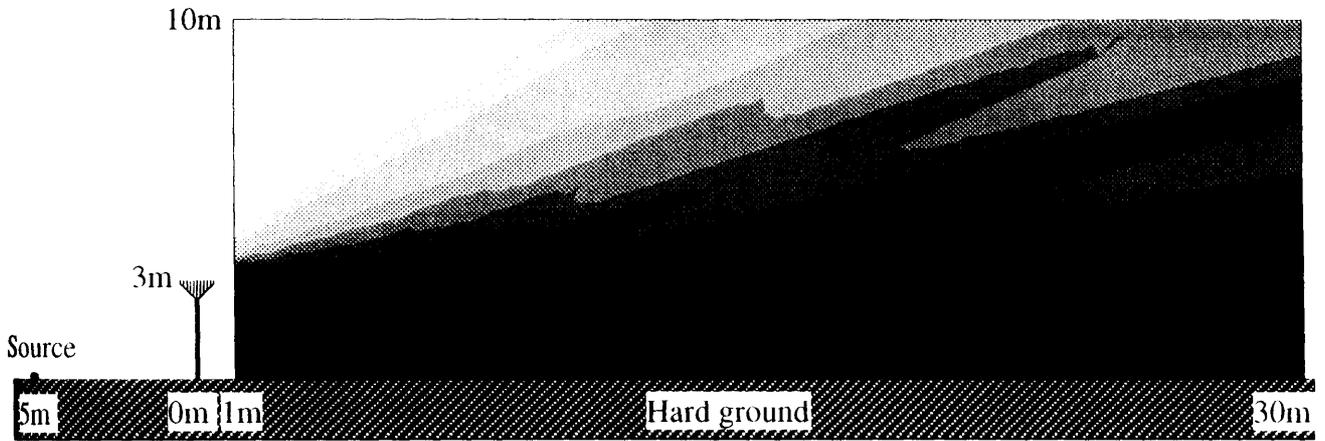
The arithmetical mean of insertion loss for the presented area behind barrier is 13.2[dB].

Figure 6.3(1) Calculated contour of insertion loss for the h3HP-barrier.;  
The frequency of the source is 500Hz.



The arithmetical mean of insertion loss for the presented area behind barrier is 15.2[dB].

Figure 6.3(2) Calculated contour of insertion loss for the h3HTw1-barrier.;  
The frequency of the source is 500Hz.



The arithmetical mean of insertion loss for the presented area behind barrier is 21.0[dB].

Figure 6.3(3) Calculated contour of insertion loss for the h3MDFw1-barrier.;  
The frequency of the source is 500Hz.

## 6.3 高さ 5m の防音壁

### 6.3.1 上部の幅 1m の防音壁

ここまでは、防音壁の高さを 3m に制限し、その効果を調べてきたが、最近交通量が急増していて、都心を通過する高速道路などではもはや既存の防音壁では十分な遮音が取れない場合が多くなり、より高い防音壁の建設が避けられない状況である。実際、8m や 10m にもなる防音壁が建てられている地域もある。そこでこれからは、防音壁の高さを 5m にし、音響管配列を取り付けた防音壁の遮音効果を検討することにする。Figure 6.4 に解析対象となる高さ 5m、上端部の幅 1m の防音壁の数値解析モデルを示す。形状や表面条件の設定は Figure 4.2 および Figure 6.1 に示した高さ 3m の防音壁と同じものとし、高さだけを 3m から 5m にした。第 4 章の防音壁の「名前の付け方」に従って、(a)が h5HP 防音壁、(b)が h5HTw1 防音壁、(c)が h5ATw1 防音壁、(d)が h5STw1 防音壁、(e)が h5MDFw1 防音壁とする。

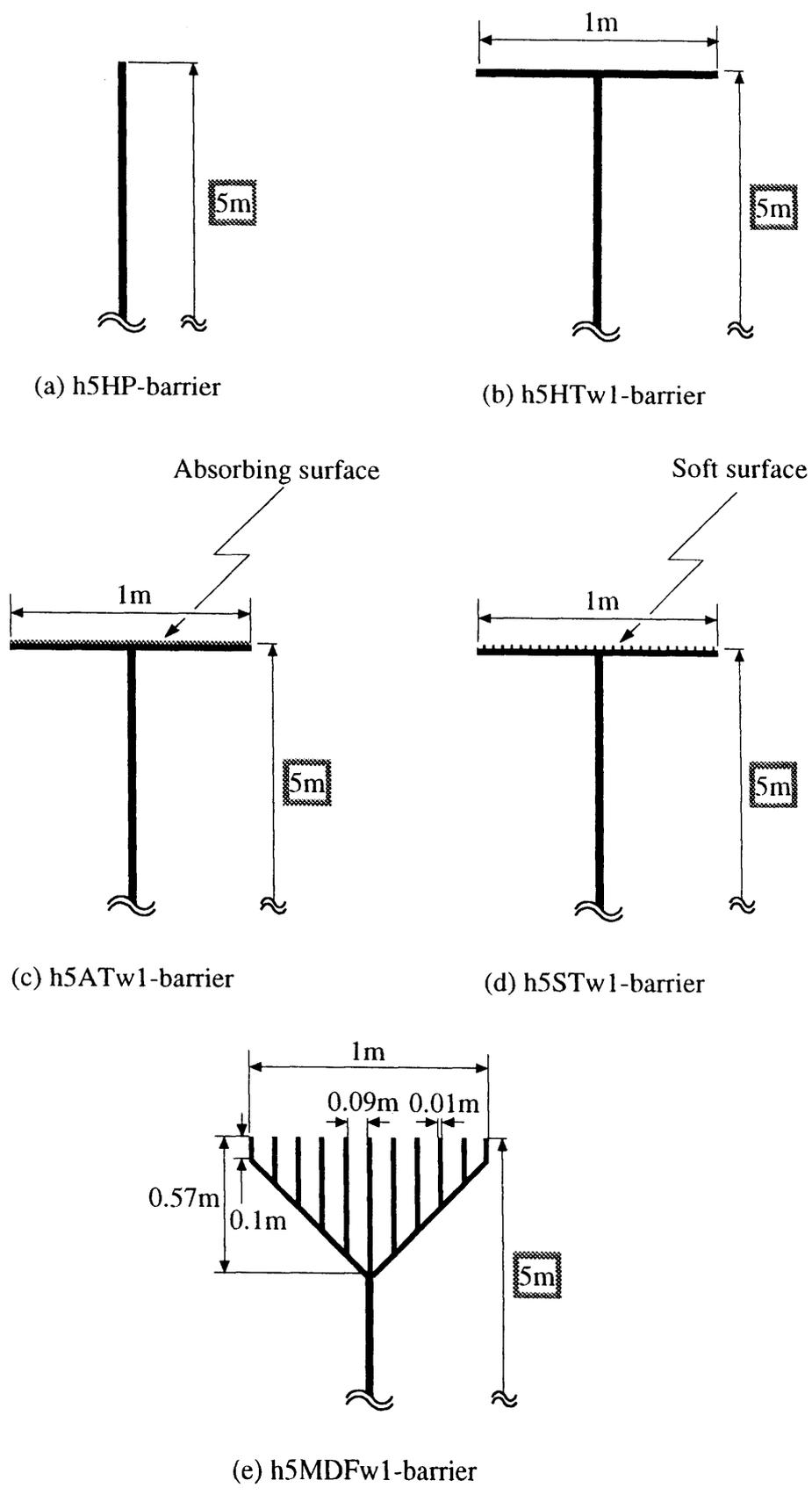
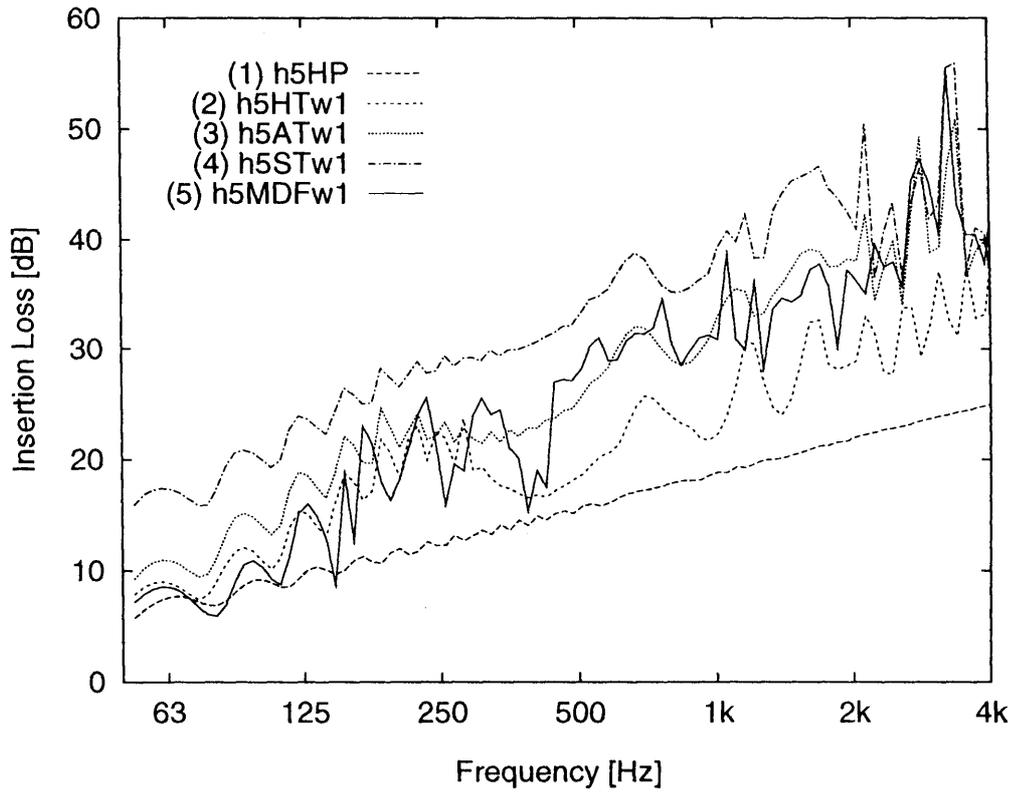


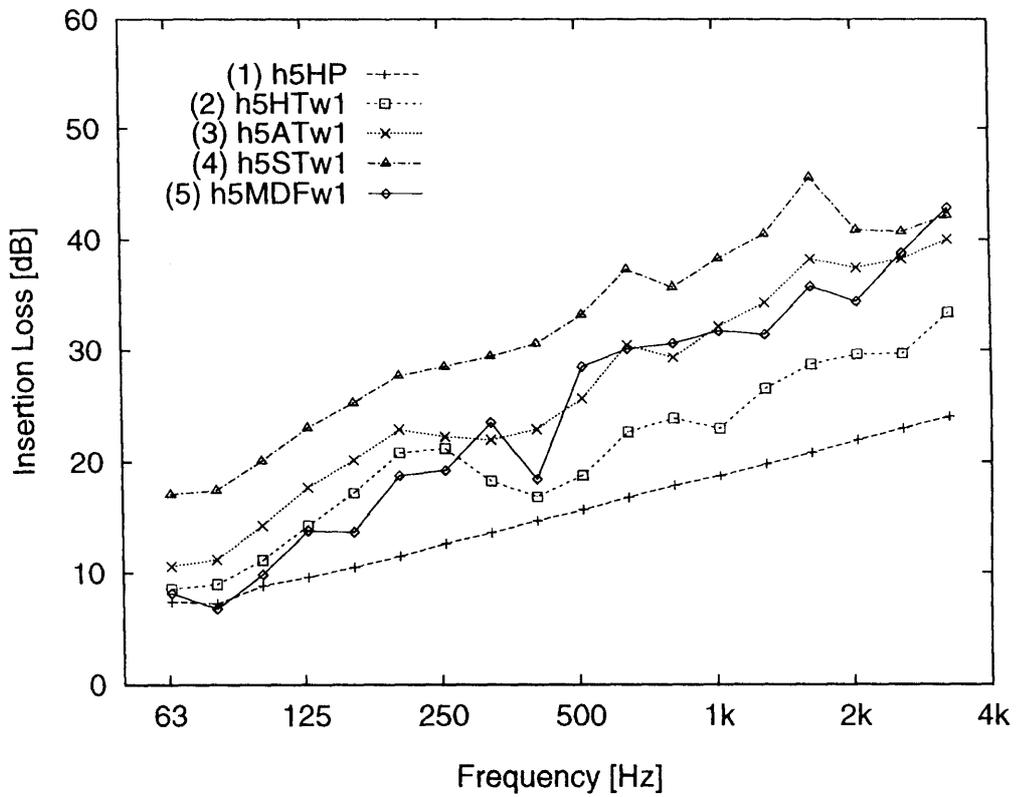
Figure 6.4 The profiles of 5m-height and 1m-width barrier considered in the calculations.

### 6.3.1.1 挿入損失の周波数特性

Figure 6.5 に Figure 4.3(a)に示した音場の音源と受音点における Figure 6.4 に示した防音壁の挿入損失の周波数特性を示す。(a)が 1/15 オクターブバンド毎の純音で表わした結果、(b)が(a)の結果を 1/3 オクターブバンド毎に帯域平均して表わしたものである。Figure 6.2 に示した高さ 3m の防音壁の挿入損失と比較してみると、防音壁の高さが高くなっただけに、全体的な挿入損失値が大きくなっている。(a)、(b)両方の図中(5)の実線で示された h5MDFw1 防音壁の効果に注目すると、1kHz 以上の周波数領域において、Figure 6.2 の図中(5)の実線で示された h3MDFw1 防音壁挿入損失に比べて、h5MDFw1 防音壁の効果は改善され、完全吸音性防音壁との差が少なくなっている。Figure 6.5 で h5MDFw1 防音壁の場合、500Hz 以上の周波数領域では図中(3)の点線で示された同じ高さを持つ h5ATw1 防音壁の挿入損失とほぼ等しい値を示している。2kHz の以上の周波数領域において、図中(3)、(4)、(5)の特性が Figure 6.2 の結果に比べて乱れを見せているのは、防音壁の寸法が大きくなることに伴い、数値解析の手法である境界要素法を用いる際の要素の数も増えるので、計算機のメモリの容量の制限があって、高周波領域では波長に比べて境界要素の長さが長くなり、これによって数値解析の精度が悪くなったことが考えられる。もし、十分な精度で計算ができれば、Figure 6.2 の周波数特性からみて、2kHz 以上の高周波領域での乱れは改善されると思われる。



(a) 1/15 octave band spectra.

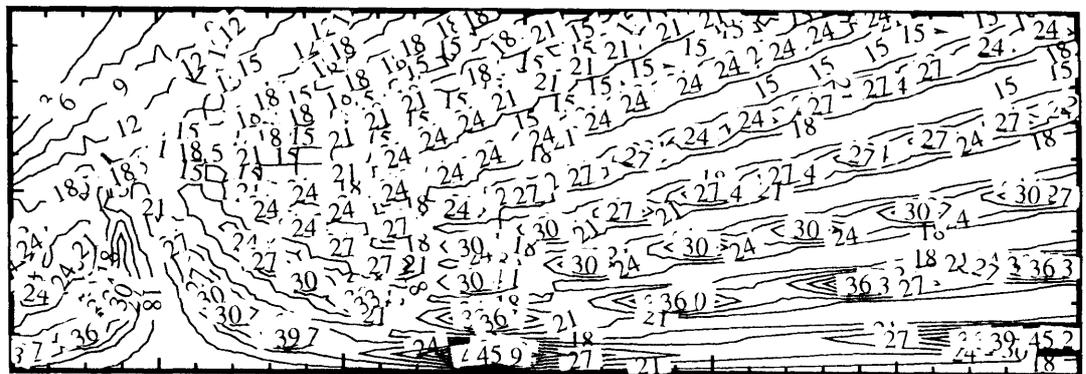
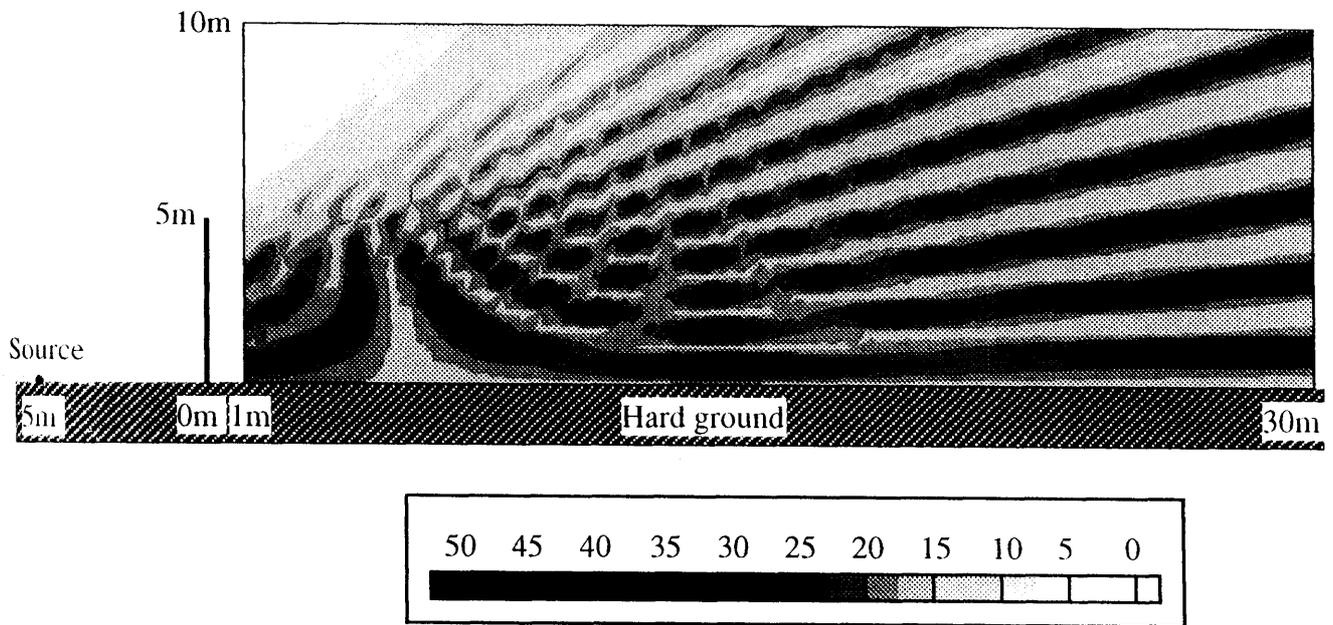


(b) 1/3 octave band spectra.

Figure 6.5 Calculated spectra of insertion loss for the barriers shown in Figure 6.4 and geometry shown in Figure 4.3(a).

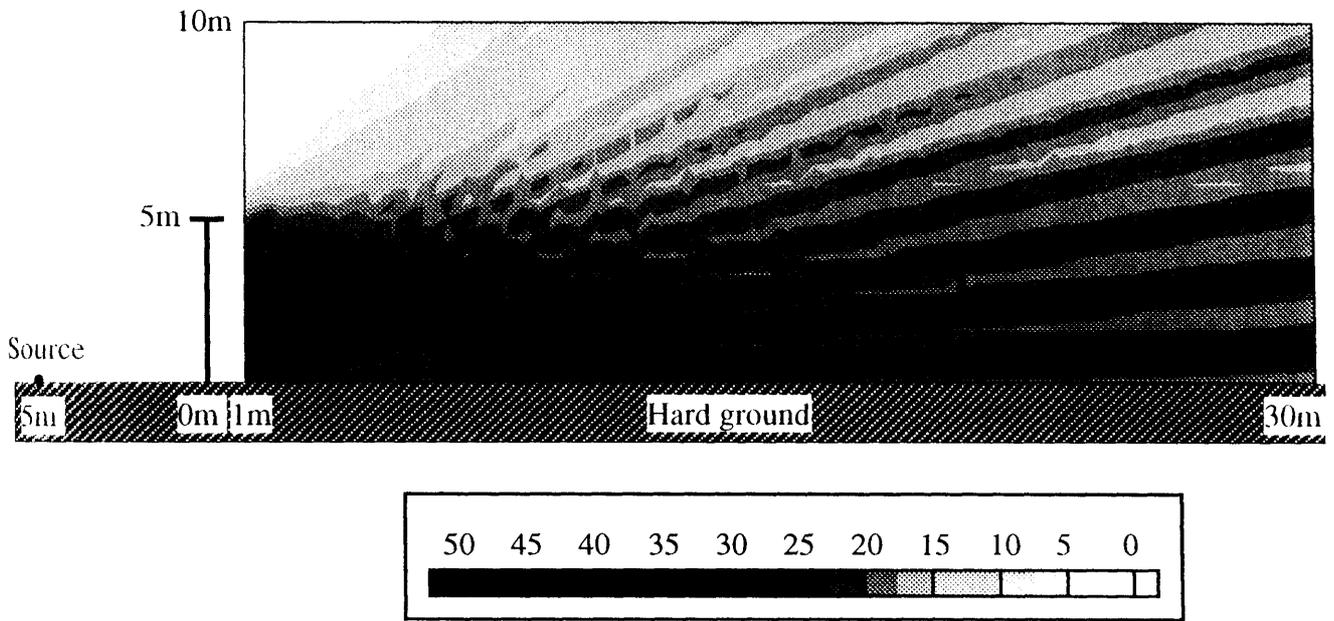
### 6.3.1.2 挿入損失の空間分布

Figures 6.6(1)～(3)に 500Hz 純音における h5MDFw1 防音壁の挿入損失の空間分布を h5HP 防音壁や h5HTw1 防音壁と比較して示す。Figures 6.6(1)が h5HP 防音壁, Figures 6.6(2)が h5HPw1 防音壁, それから Figures 6.6(3)が h5MDFw1 防音壁の遮音効果を表す。Figures 6.6(3)の h5MDFw1 防音壁の場合, 示されたほぼ全受音領域で Figures 6.6(1)の h5HP 防音壁は勿論, Figures 6.6(2)の h5HTw1 防音壁より広い静かな領域を表している。示された受音領域での挿入損失の算術平均値を求めてみると, Figures 6.6(1)が 18.4 dB, Figures 6.6(2)が 19.5 dB, Figures 6.6(3)が 27.9 dB となる。Figure 6.3(1)～(3)に示した高さ 3m の防音壁に対する分布の平均値と比較してみると, 高さを 3m から 5m に変えることで, Figures 6.6(1)の h5HP 防音壁の場合は約 5.2 dB, Figures 6.6(2)の h5HTw1 防音壁の場合は約 4.3 dB, Figures 6.6(3)の h5MDFw1 防音壁の場合は約 6.8 dB 効果が大きくなっている。この値で一言に防音壁の効果を断言することは危険であるが, 音響管配列を持つ T 型防音壁の場合は回折角が大きくなるほど他の防音壁に比べて遮音効果の上昇幅が大きいことは予測できる。



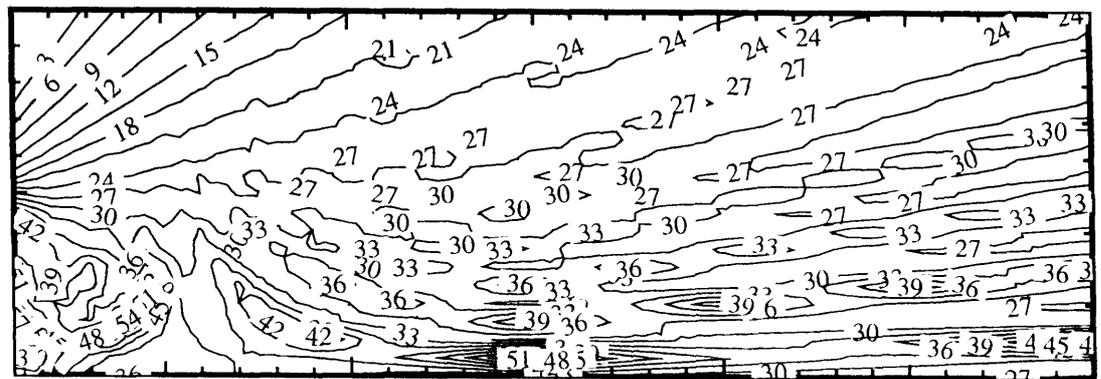
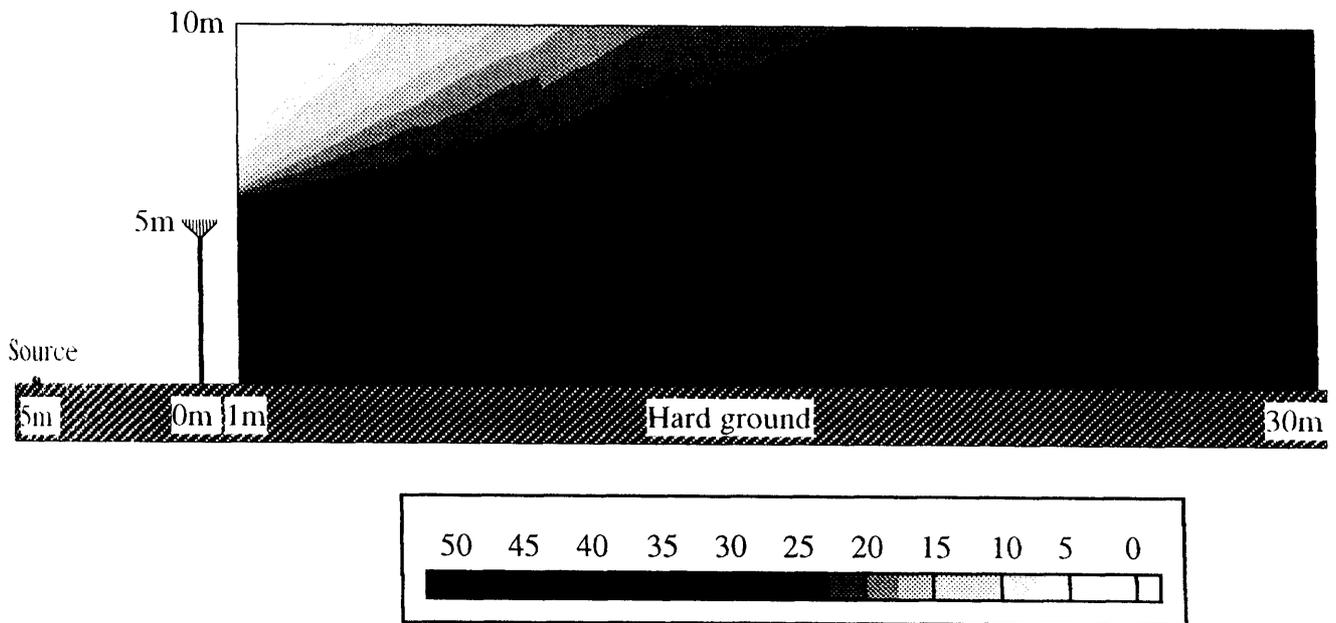
The arithmetical mean of insertion loss for the presented area behind barrier is 18.4[dB].

Figure 6.6(1) Calculated contour of insertion loss for the h5HP-barrier.;  
The frequency of the source is 500Hz.



The arithmetical mean of insertion loss for the presented area behind barrier is 19.5[dB].

Figure 6.6(2) Calculated contour of insertion loss for the h5HTw1-barrier.;  
The frequency of the source is 500Hz.

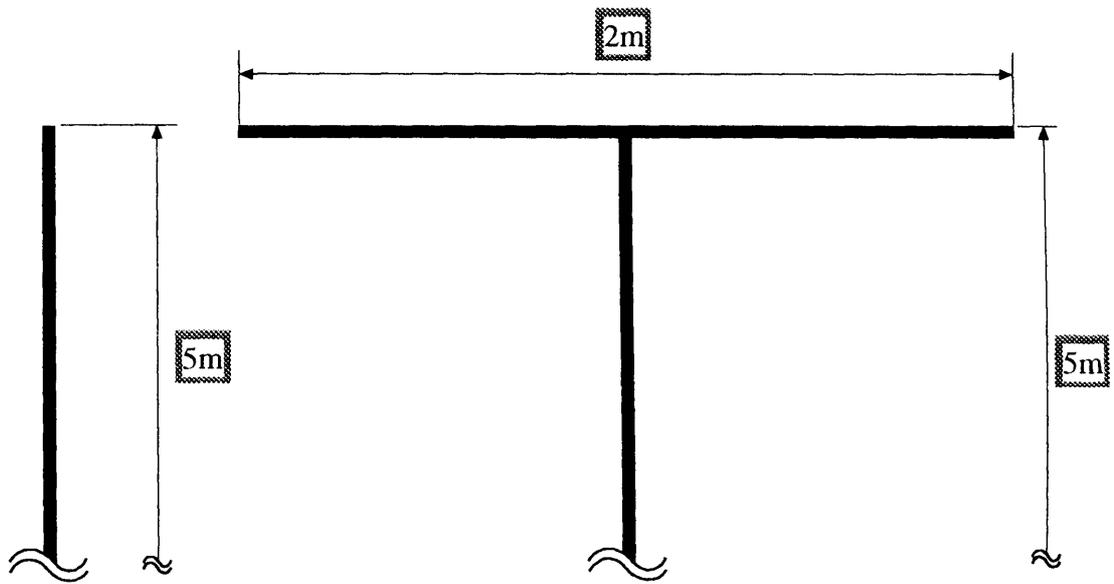


The arithmetical mean of insertion loss for the presented area behind barrier is 21.9[dB].

Figure 6.6(3) Calculated contour of insertion loss for the h5MDFw1-barrier.;  
The frequency of the source is 500Hz.

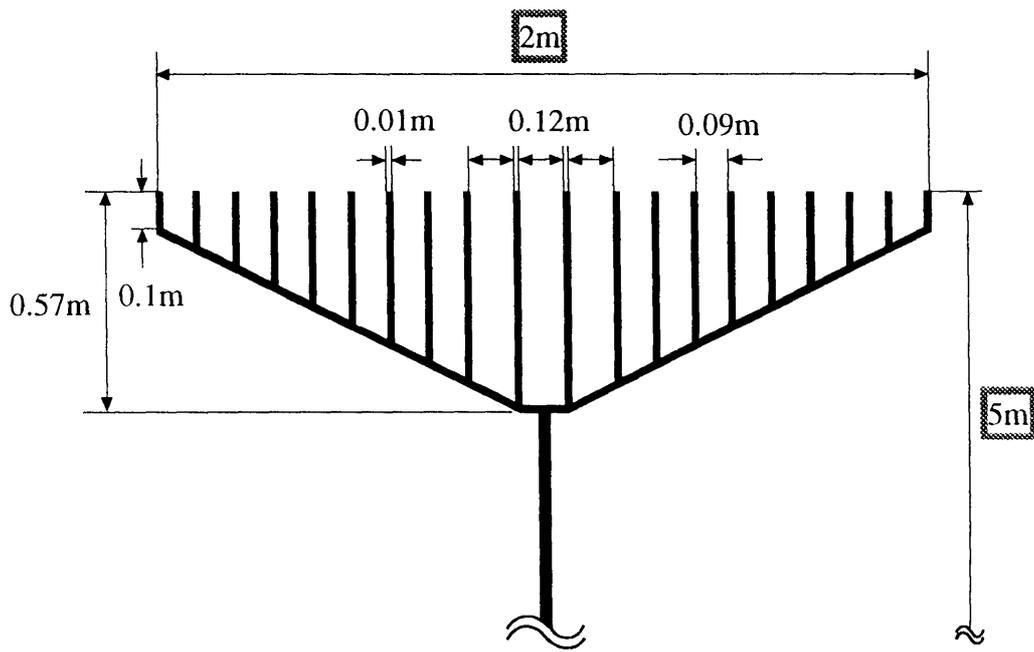
### 6.3.2 上部の幅 2m の防音壁

防音壁の高さが高くなれば上端部の幅を多少広げても交通運行の妨げになりにくいので、更に大きな遮音性能を得るため、T型防音壁の上部の幅を 1m から 2m に広げて検討を進める。最近段々増えていく交通量やスピード制限が高くなる高速道路の建設などを考えると、高さ 5m に幅 2m の防音壁は近い将来に最も一般に建設の可能性が高いと思われる。このように上端部の幅を変えることで、防音壁の高さを変えずに遮音量の調整が割と手軽にできるのも T型防音壁の長所の一つである。Figure 6.7 に高さ 5m、幅 2m の防音壁の解析モデルを示す。(a)が h5HP、(b)が h5HTw2 防音壁、(c)が h5MDFw2 防音壁である。Figure 6.7(c)の h5MDFw2 防音壁の場合、配列されている音響管の一番長い音響管と一番短い音響管の長さは Figure 6.5(e)に示した、h5MDFw1 防音壁に取り付けた音響管配列の場合とほぼ同じである。従って設計周波数も約 150～850Hz になる。しかし、音響管の数が多いだけに Figure 6.5(e)防音壁よりもっと滑らかな周波数特性が期待される。それから、管内伝搬中の低周波音の伝搬をしやすいするため、つまり伝搬中の音波の減衰を避けるため、中央の 3 本の音響管の幅を少々広めている。



(a) h5HP-barrier

(b) h5HTw2-barrier

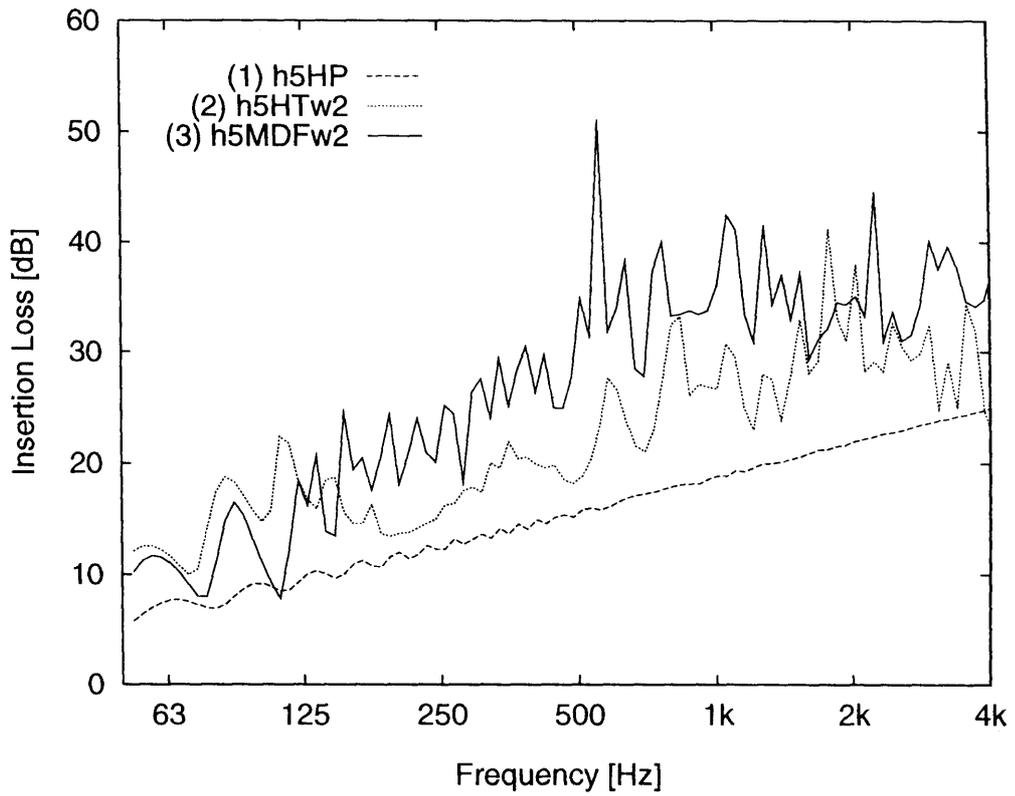


(c) h5MDFw2-barrier

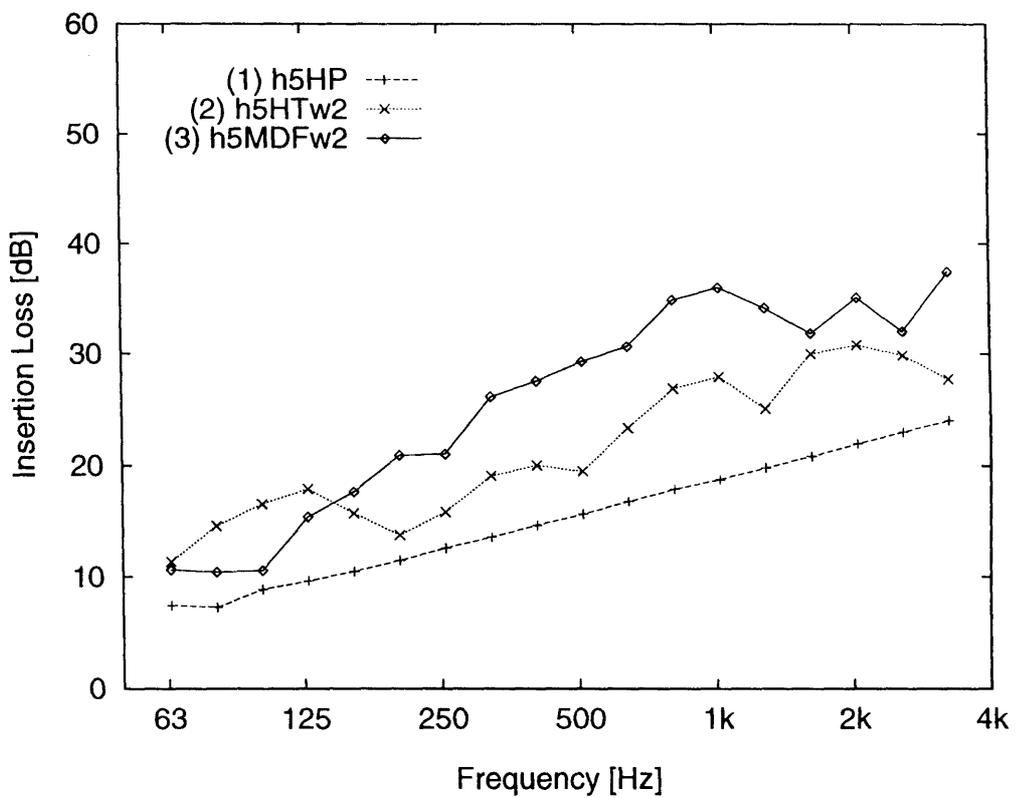
Figure 6.7 The profiles of 5m-height and 2m-width barrier considered in the calculations.

### 6.3.2.1 挿入損失の周波数特性

Figure 6.8 に Figure 4.3(a)に示した音場の音源と受音点における Figure 6.7 に表わした防音壁の挿入損失の周波数特性を示す。(a)が 1/15 オクターブバンド中心周波数の純音で表わした挿入損失、(b)が 1/3 オクターブの帯域平均で表わした挿入損失である。上部の幅が広くなるにも係わらず、h5HTw2 防音壁と h5MDFw2 防音壁共に Figure 6.5 に示した幅 h5HTw1 防音壁と h5MDFw1 防音壁の挿入損失に比べて 2kHz 以上の周波数領域で効果が小さくなっている。この原因についてはまだはっきりしていない。しかし、Figure 6.5(a)の結果にも、2kHz 以上の周波数領域の値が乱れていて、計算機のハードウェア的な制限があって、高周波領域における波長に比べての計算精度を満たせる十分な要素長が得られなかったため、数値解析に用いた境界要素法での計算誤差ではないかと考えられる。この点を除けば幅 2m の音響管配列を持つ防音壁は音響管の数が多いだけ、同じ設計周波数の h5MDFw1 防音壁より効果が滑らかになっていると言えよう。



(a) 1/15 octave band spectra.

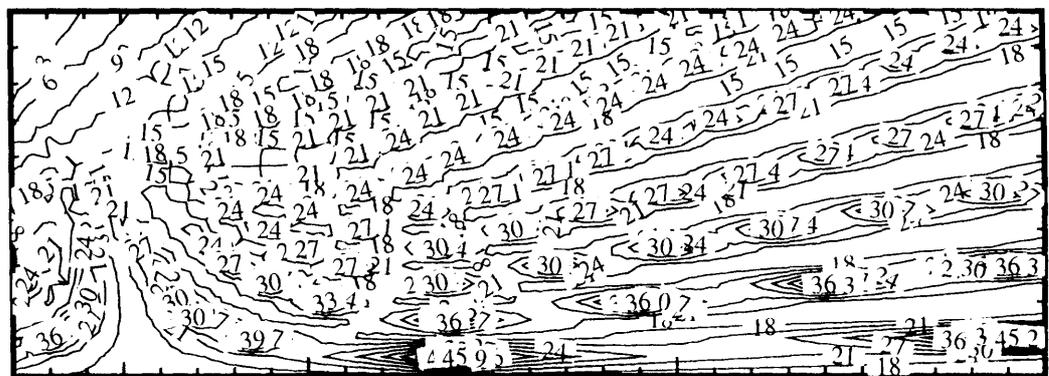
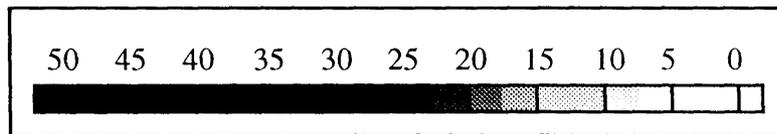
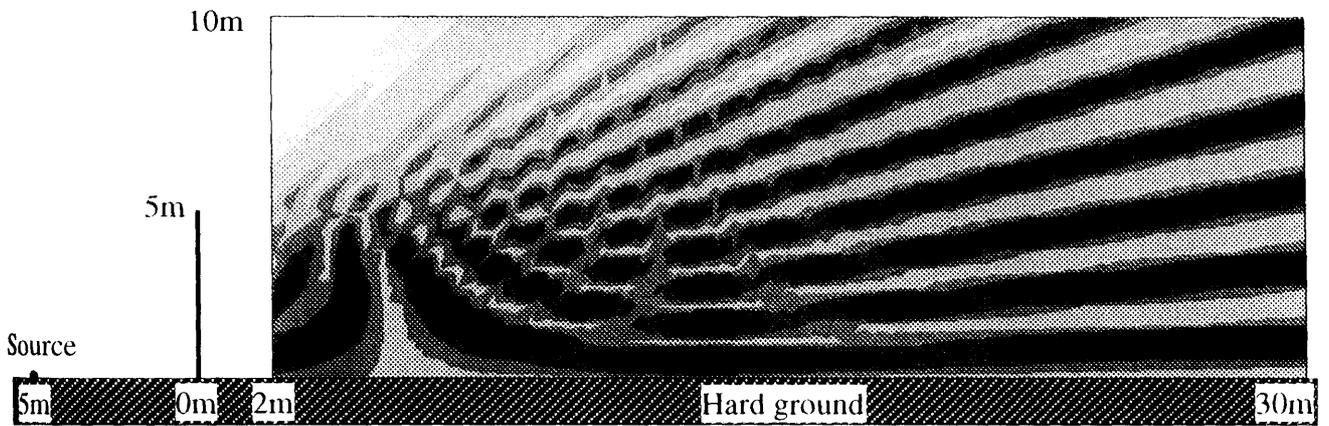


(b) 1/3 octave band spectra.

Figure 6.8 Calculated spectra of insertion loss for the barriers shown in Figure 6.6 and geometry shown in Figure 4.3(a).

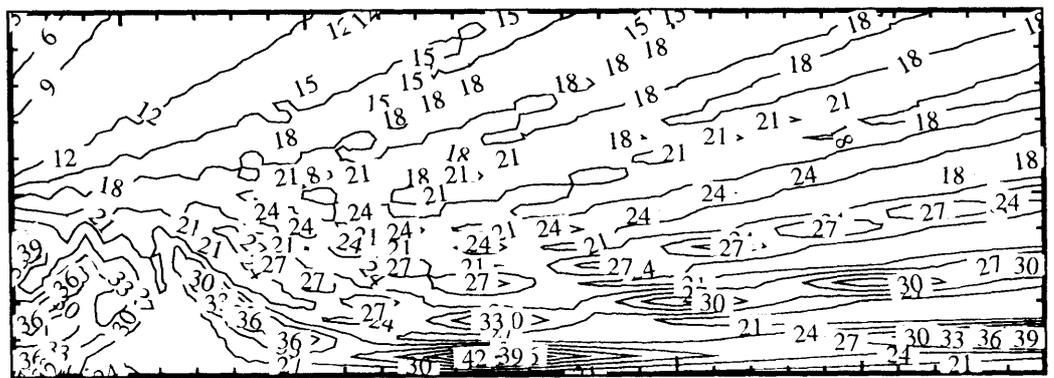
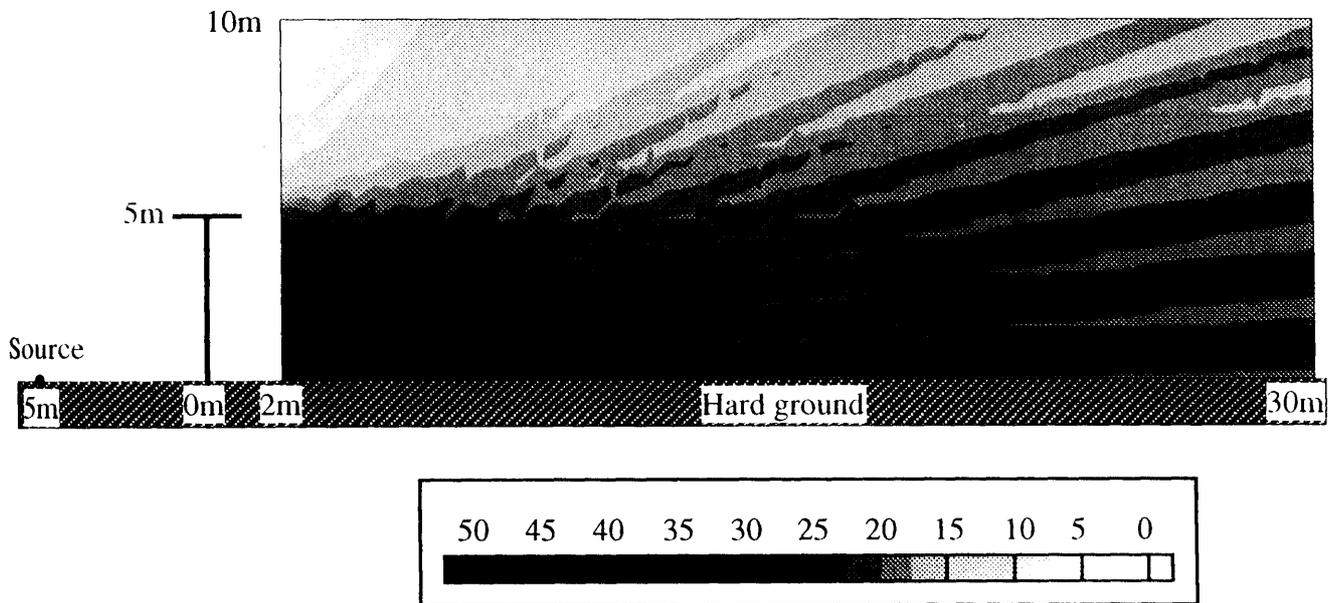
### 6.3.2.2 挿入損失の空間分布

Figure 6.9(1)～(3)に防音壁背後における挿入損失の分布を表わす。音源は 500Hz の純音を想定している。色の濃さが濃いほど静かな領域になる。Figure 6.9(2)の h5HTw2 防音壁の場合、防音壁と地面に近い領域では Figure 6.9(1)の h5HP 防音壁より大きい効果を示しているが、防音壁から遠い領域ではさほどの差は見られない。しかし、Figure 6.9(3)の h5MDFw2 防音壁の場合、かなり広い領域で静かな領域を保っていることが分かる。示された受音領域での挿入損失値の算術平均値を求めてみると、Figure 6.9(1)の h5HP 防音壁は 18.7dB, Figure 6.9(2)の h5HTw2 防音壁は 20.4dB, Figure 6.9(3)の h5MDFw2 防音壁は 28.9dB になる。Figure 6.8 の周波数特性から見ると、多少の周波数依存性は予測されるが、Figure 6.9 のような分布は 500Hz の場合だけでなく、かなり広い周波数範囲で現れることが予測できる。Figures 6.6(2),(3)と Figures 6.9(2),(3)の、高さ 5m の防音壁の上端部の幅を 1m か 2m に変えることによる、500Hz における挿入損失の空間分布の平均値を比較してみると、h5HTw1 から h5HTw2 に変えることで約 0.9dB, h5MDFw1 から h5MDFw2 に変えることで約 7.0dB の効果が大きくなると言える。



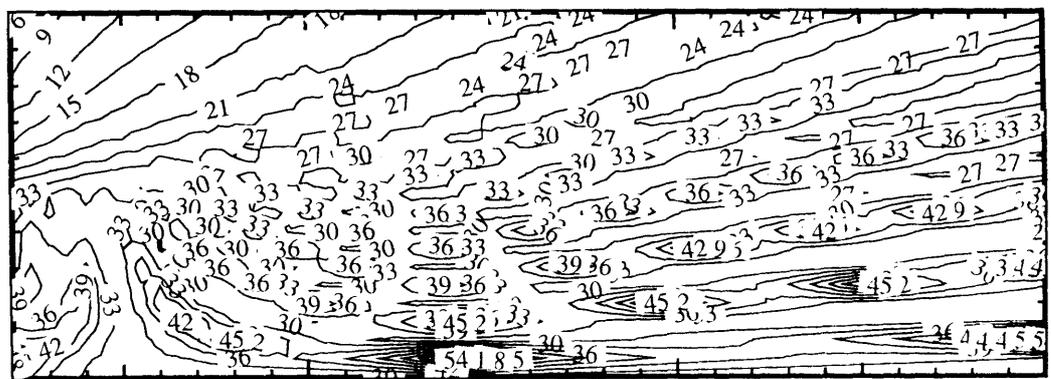
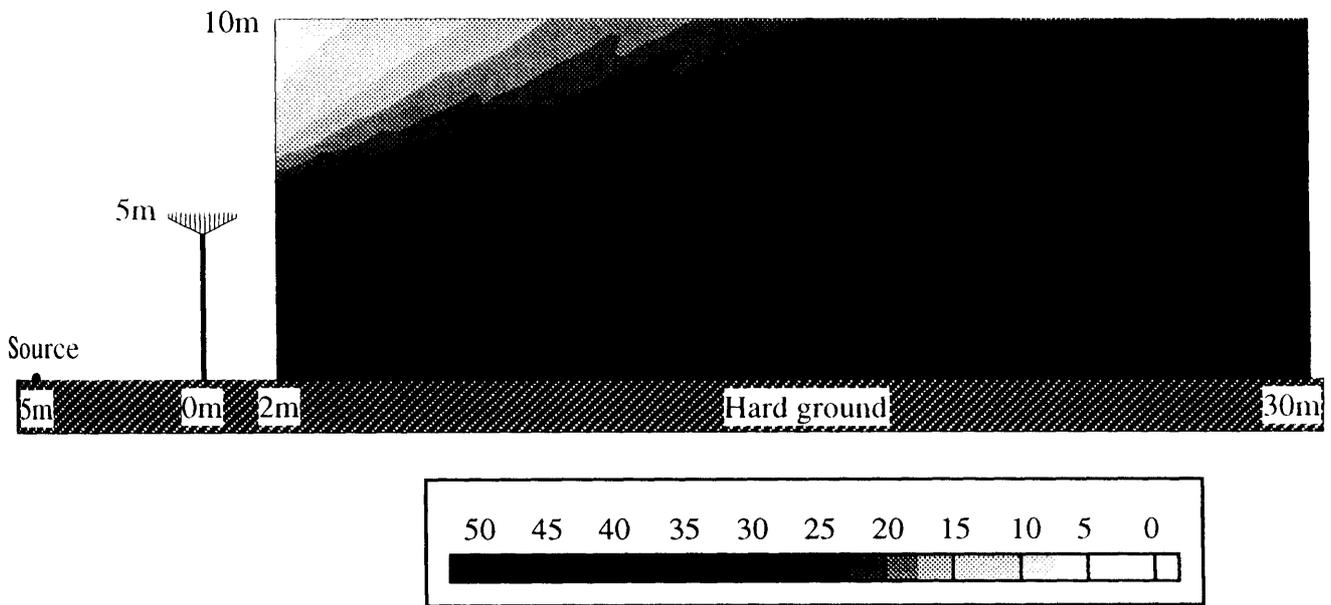
The arithmetical mean of insertion loss for the presented area behind barrier is 18.7[dB].

Figure 6.9(1) Calculated contour of insertion loss for the h5HP-barrier.;  
The frequency of the source is 500Hz.



The arithmetical mean of insertion loss for the presented area behind barrier is 20.4[dB].

Figure 6.9(2) Calculated contour of insertion loss for the h5HTw2-barrier.;  
The frequency of the source is 500Hz.



The arithmetical mean of insertion loss for the presented area behind barrier is 28.9[dB].

Figure 6.9(3) Calculated contour of insertion loss for the h5MDFw2-barrier.;  
The frequency of the source is 500Hz.

#### 6.4 広帯域騒音に対する効果

自動車騒音などの道路交通騒音の特徴は、騒音源のパワーレベルがフラットではなく、周波数特性を持つ。本節では、こういう周波数特性を持つ音源に対する音響管配列を持つ防音壁の遮音効果について検討を進める。想定する音源の 1/3 オクターブバンドのスペクトルとその値をそれぞれ Figure 6.10 と Table 6.1 に示す。ここに示された音源のスペクトルは、日本音響学会道路騒音委員会によって提案されているものの中の一つであり、A 特性を考慮しない、フラット特性の周波数特性  $L(f)$  は、

$$L(f) = -10 \log_{10} \left\{ 1 + \left( \frac{f}{2000} \right)^2 \right\} \quad (6.1)$$

で与えられている[44]。Figure 6.10 は A 特性を補正したスペクトルを示しており、(a)の実線は通常舗装の道路の場合、(b)の点線は排水性舗装の道路の場合に、それぞれ対象とする音源から 1m 離れた自由音場での音圧レベルである。このようなスペクトルを持つ騒音源に対して、Figure 6.1 に示した防音壁を建てた場合に受音点で予測される音圧レベル(SPL)のスペクトルを Figure 6.11 に示す。(a)が通常舗装の道路、(b)が排水性舗装の道路を想定した場合に受音点で予測される SPL スペクトルである。音源と受音点の位置関係は Figure 4.3(a)に示したものとする。通常舗装の場合、Figure 6.1 の h3MDFw1 防音壁は、オーバーオールレベルで、同じ高さの h3HP 防音壁に比べて約 6.5 dB、それから同じ高さを持つ h3HTw1 防音壁に比べて約 3.1 dB の大きい効果がある。Figure 6.12 に Figure 6.4 に示した防音壁を建てた場合のスペクトル特性を持つ騒音源に対する受音点での SPL スペクトルを示す。音源と受音点の位置関係は Figure 6.11 の計算の場合と同様にする。(a)が通常舗装の道路、(b)が排水性舗装の道路を想定した場合、受音点で予測される音圧レベル周波数特性を表す計算結果である。通常舗装の場合、Figure 6.4(e)に示した h5MDFw1 防音壁は、オーバーオールレベルで、(a)に示し

た h5HP 防音壁に比べて約 8.1 dB, それから(b)に示した h5HTw1 防音壁に比べて約 3.1 dB の大きい効果がある. Figure 6.13 に h5HP, h5HTw2, h5MDFw2 防音壁の Figure 6.10 と Table 6.2 に示したスペクトルを持つ騒音源に対する受音点での SPL スペクトルを示す. Figure 6.11 や Figure 6.12 の場合と同じく, 音源と受音点の位置関係は Figure 4.3(a) に示したものとする. (a)が通常舗装の道路, (b)が排水性舗装の道路を想定した場合に予測される計算結果である. Table 6.2 に Figure 6.11, 6.12, 6.13 に示した SPL スペクトルのオーバーオールレベルをまとめて示す. Figure 4.3(a)に示した音場と Figure 6.10 や Table 6.1 に示した通常舗装の場合の音源スペクトルに対して, Figure 6.1 に示した h3MDFw1 防音壁の場合, 同じ高さの h3HP 防音壁に比べて約 6.5 dB, 同じ高さと同幅を持つ h3HTw1 防音壁に比べて約 3.1 dB 高い効果がある. それから, Figure 6.4(e)に示した h5MDFw1 防音壁の場合は, h5HP 防音壁に比べて約 8.6 dB, h5HTw1 防音壁に比べて約 3.1 dB 高い効果がある. Figure 6.7(c)に示した h5MDFw2 防音壁の場合は, h5HP 防音壁に比べて約 11 dB, h5HTw2 防音壁に比べて約 5.3 dB 高い効果がある. それから, Figure 4.2 と Figure 6.1 に示した 3m 高さの防音壁と, これらと同じ幅を持ちながら高さだけを 5m にした Figure 6.4 に示した防音壁のオーバーオールレベルを比較してみると, 高さを 3m から 5m にするだけで, 剛な垂直型防音壁は(h3HP から h5HP にすると)約 3.2 dB, 剛な T 型防音壁は(h3HTw1 から h5HTw1 にすると)約 4.8 dB, 完全吸音性の T 型防音壁は(h3ATw1 から h5ATw1 に)約 5.3 dB, 理想的にソフトな T 型防音壁は(h3STw1 から h5STw1 にすると)約 6.8 dB, それから音響管配列を持つ T 型防音壁(h3MDFw1 から h5MDFw1 にすると)は約 4.8 dB の遮音効果が大きくなることになる. 次に, Figure 6.4 に示した高さ 5m, 幅 1m の防音壁と Figure 6.7 に示した高さ 5m, 幅 2m の防音壁のオーバーオールレベルを比較してみると, h5HTw1 防音壁から h5HTw2 防音壁にすると 0.7 dB, h5MDFw1 防音壁から h5MDFw2 防音壁にすると 2.9 dB 遮音効果が大きくなる.

Figures 6.3(1),(2),(3)と Figures 6.6(1),(2),(3)の 500Hz 純音におけるそれぞれ防音壁の挿入損失の空間分布の平均値の比較からみた、剛な垂直型防音壁(h3HP と h5HP)の約 5.2 dB, 剛な T 型防音壁(h3HTw1 と h5HTw1)の約 4.3 dB, 音響管配列を持つ T 型防音壁 (h3MDFw1 と h5MDFw1)の約 6.8 dB のことを考慮すると, 音響管配列を持つ T 型防音壁は剛な垂直型や剛な T 型防音壁に比べて高さが高くなることにつれてその効果の増大の幅も大きいと言える。

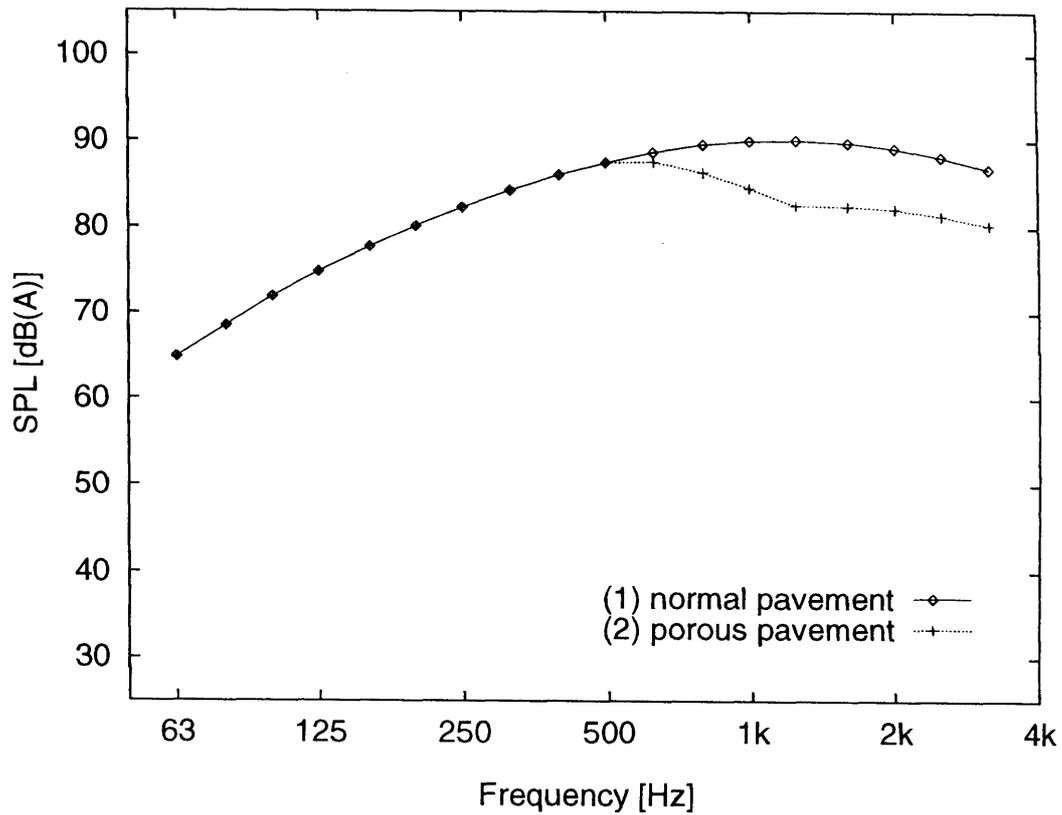
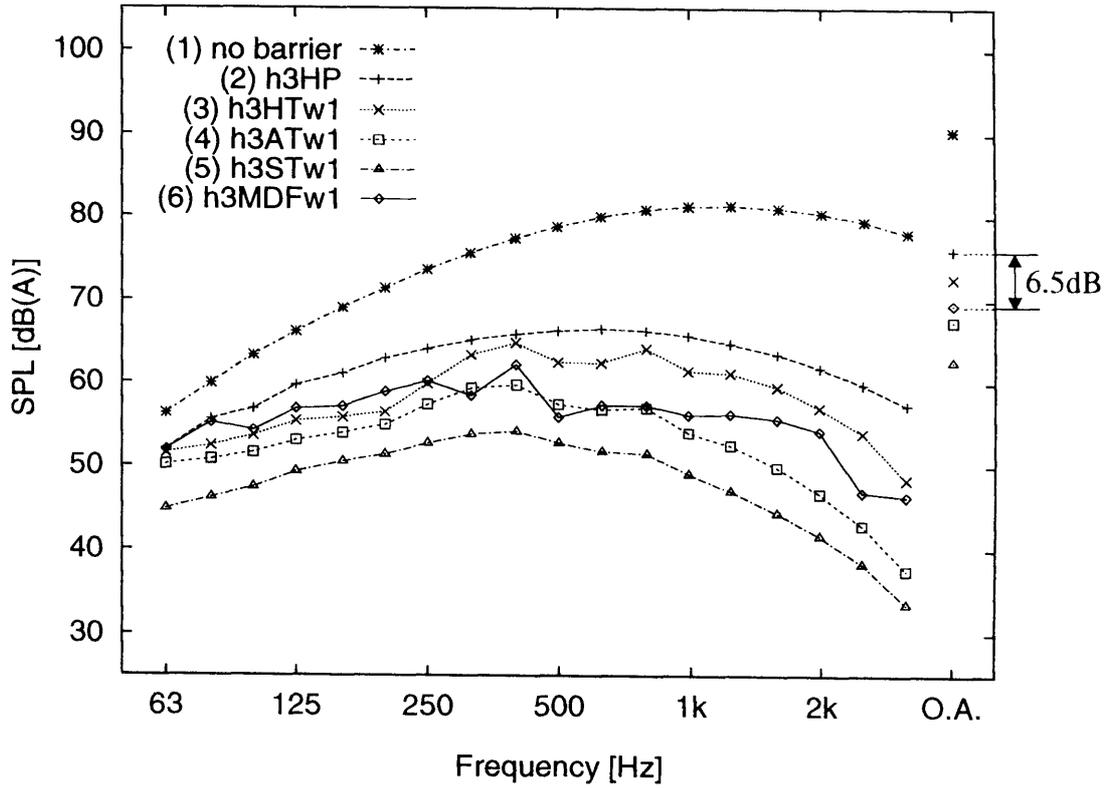


Figure 6.10 SPL spectra of noise source considered in the study. (ASJ model/1993)

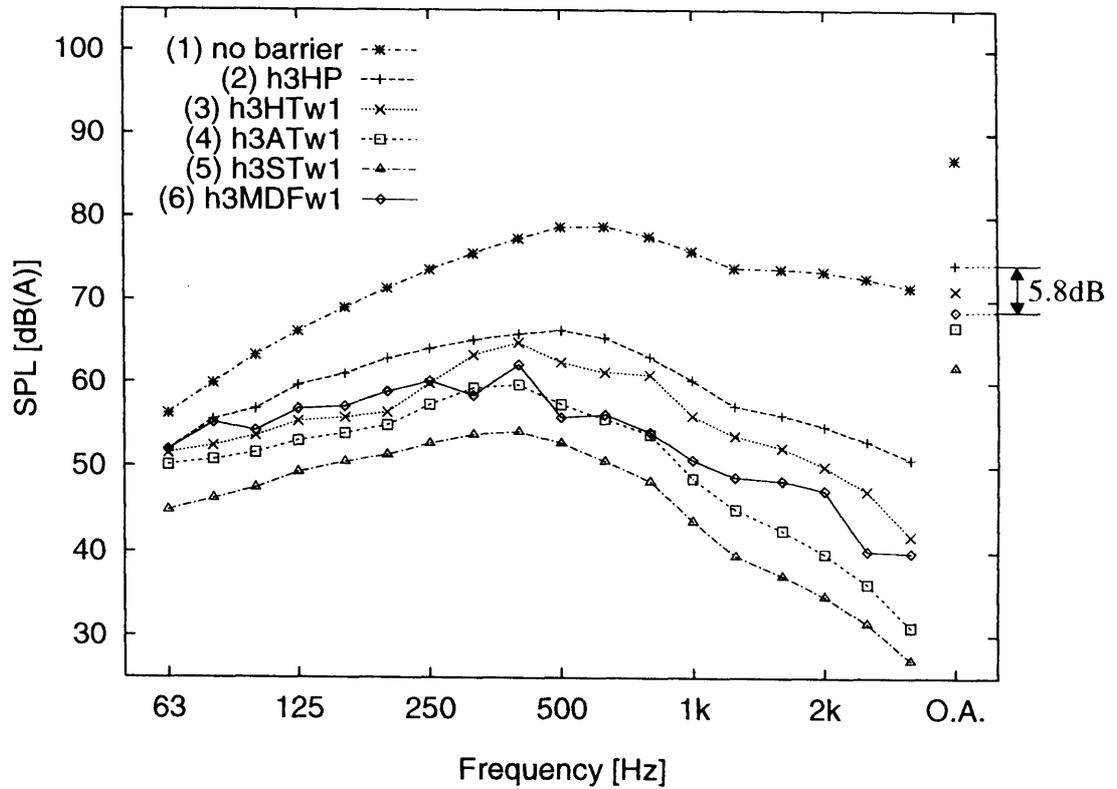
Table 6.1 1/3 octave band level of noise source shown in Figure 6.10.

unit : [dB]

Frequency [Hz]	Normal pavement		Porous pavement	
	A-weighting	Band level	A-weighting	Band level
63	-26.2	64.8	-26.2	64.8
80	-22.5	68.5	-22.5	68.5
100	-19.1	71.9	-19.1	71.9
125	-16.2	74.8	-16.2	74.8
160	-13.3	77.7	-13.3	77.7
200	-10.9	80.1	-10.9	80.1
250	-8.7	82.3	-8.7	82.3
315	-6.7	84.3	-6.7	84.3
400	-4.9	86.1	-4.9	86.1
500	-3.5	87.5	-3.5	87.5
630	-2.3	88.7	-3.4	87.6
800	-1.4	89.6	-4.6	86.4
1000	-1.0	90.0	-6.4	84.6
1250	-0.9	90.1	-8.4	82.6
1600	-1.2	89.8	-8.5	82.5
2000	-1.8	89.2	-2.5	82.2
2500	-2.8	88.2	-9.6	81.4
3150	-4.2	86.8	-10.6	80.3

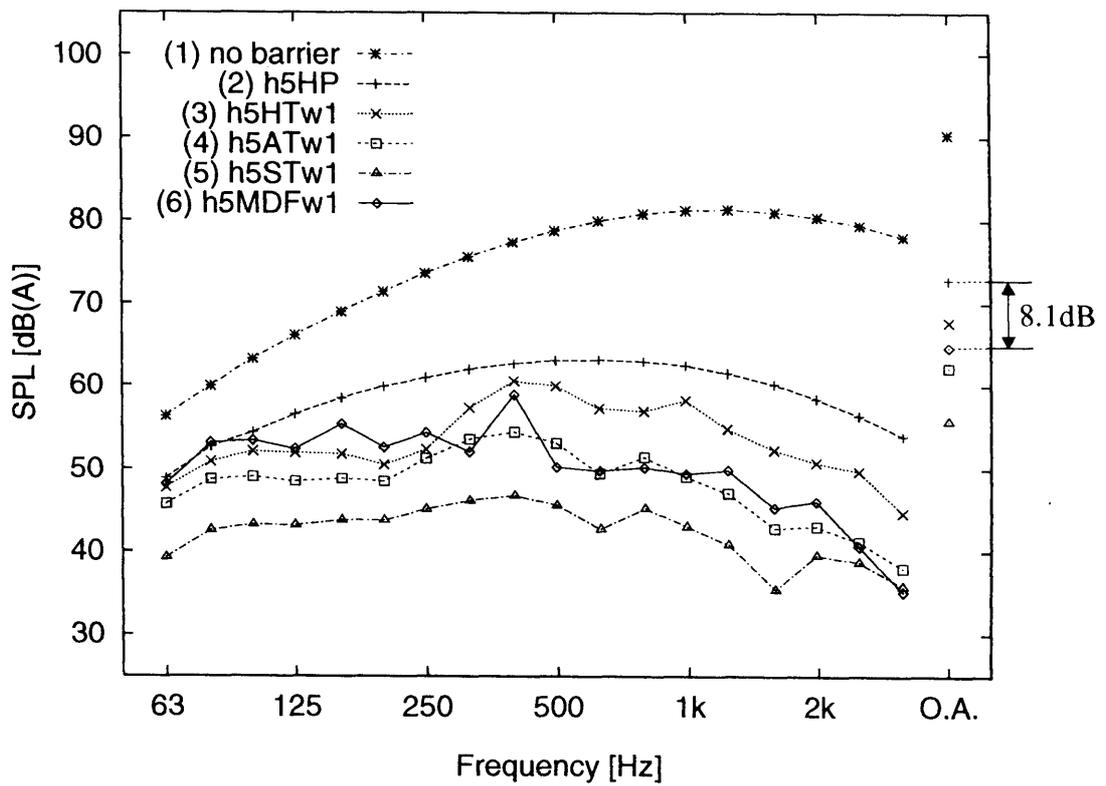


(a) For the normal pavement noise source spectrum shown in Figure 6.10(1).

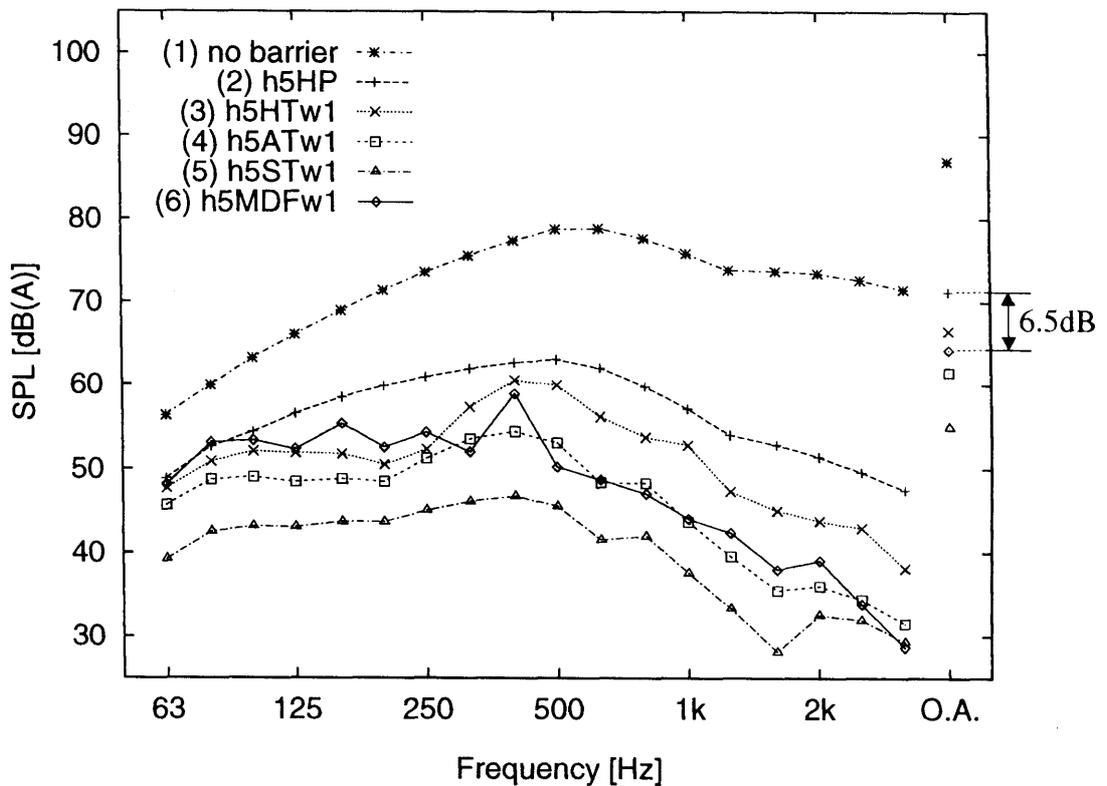


(b) For the porous pavement noise source spectrum shown in Figure 6.10(2).

Figure 6.11 Calculated SPL spectra for the barriers shown in Figures 4.2 and 6.1.

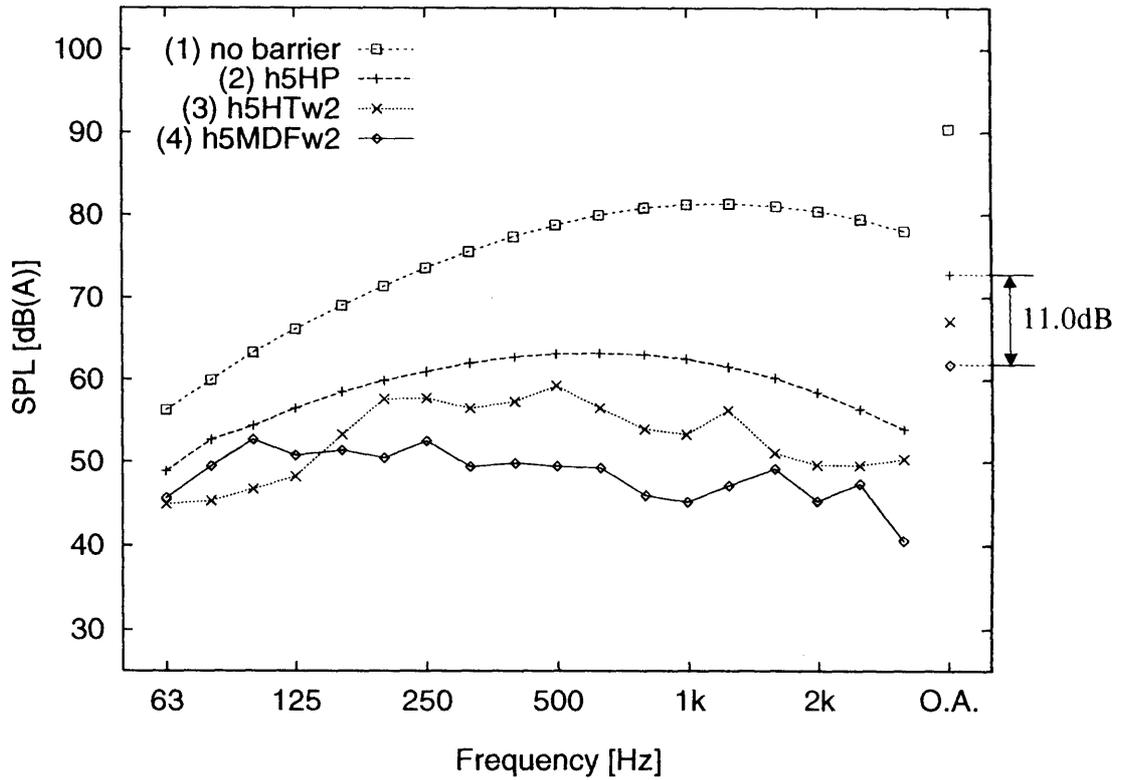


(a) For the normal pavement noise source spectrum shown in Figure 6.10(1).

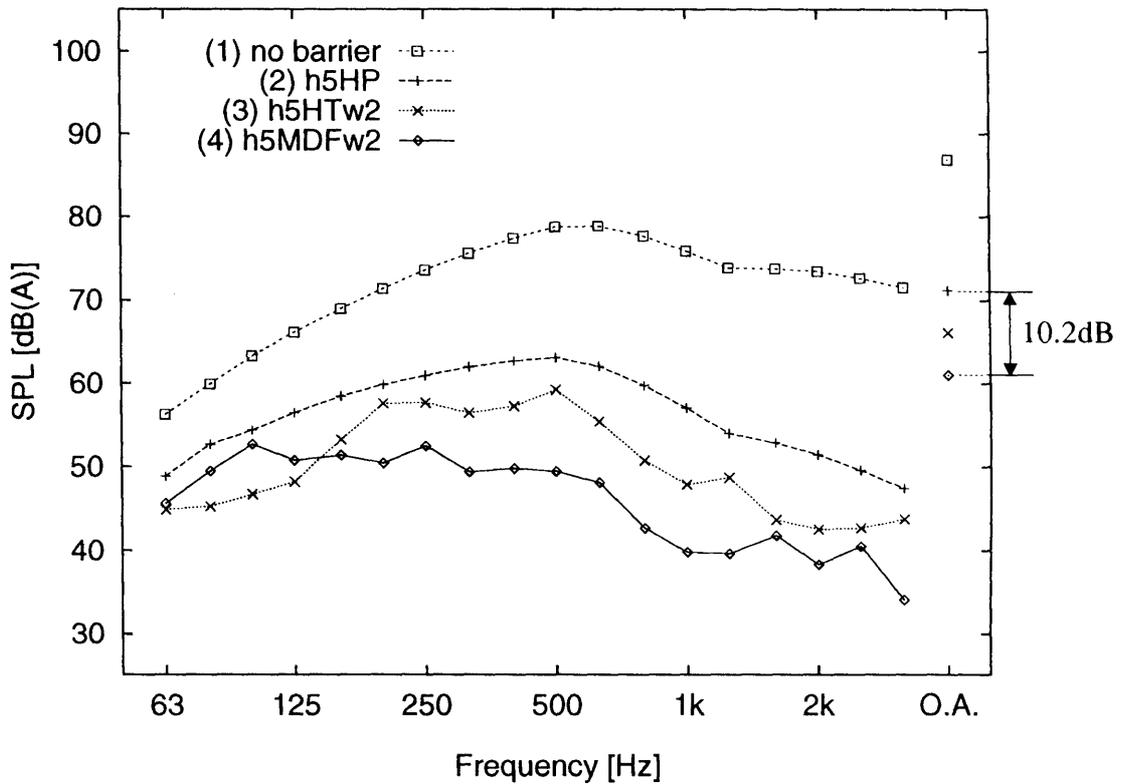


(b) For the porous pavement noise source spectrum shown in Figure 6.10(2).

Figure 6.12 Calculated SPL spectra for the barriers shown in Figure 6.4.



(a) For the normal pavement noise source spectrum shown in Figure 6.10(1).



(b) For the porous pavement noise source spectrum shown in Figure 6.10(2).

Figure 6.13 Calculated SPL spectra for the barriers shown in Figure 6.7.

Table 6.2 Overall levels for the barrier profile shown in Figures 4.2, 6.1, 6.4 and 6.7 using source spectra shown in Figure 6.10 and Table 6.2, and geometry shown in Figure 4.3(a).

[dB(A)]

Figure No.	Barriers	(1) Normal pavement	(2) Porous pavement
	No barrier	90.4	86.9
Figure 4.2	(a) h3HP-barrier	76.0	74.4
	(b) h3HTw1-barrier	72.6	71.2
	(c) h3ATw1-barrier	67.5	66.8
	(d) h3STw1-barrier	62.6	61.9
Figure 6.1	h3MDFw1-barrier	69.5	68.6
Figure 6.4	(a) h5HP-barrier	72.8	71.2
	(b) h5HTw1-barrier	67.8	66.6
	(c) h5ATw1-barrier	62.2	61.6
	(d) h5STw1-barrier	55.8	55.0
	(e) h5MDFw1-barrier	64.7	64.3
Figure 6.7	(a) h5HP-barrier	72.8	71.2
	(b) h5HTw2-barrier	67.1	66.1
	(c) h5MDFw2-barrier	61.8	61.0

## 6.5 3次元模型実験

ここまでの調べで、異なる深さの音響管を組み合わせた、多数の設計周波数を持つ音響管配列を取り付けたT型防音壁は広い周波数範囲においてある程度の安定性がある遮音効果を持つのが分かった。本節では、1/10縮尺の3次元模型実験を用い、数値解析で調べた多数の設計周波数を持つ防音壁の遮音効果を確認する。

### 6.5.1 実験モデル

実験に用いた1/10縮尺の防音壁模型をFigure 6.14に示す。実験のモデルとなる防音壁はFigure 6.7(c)に示した高さ5m、上部の幅2mの音響管配列を持つ防音壁とする。実験は半無響室で行った。厚さ1mmのアルミ板で製作した音響管配列を厚さ3mmの鉄板に取り付け、高さ50cm、長さ約4mとした模型防音壁を半無響室の床に設置した。防音壁の両端から回り込む回折音を防ぐため、厚さ10mmの合板を挟んでガラスウール(32kg/m<sup>3</sup>)を防音壁と半無響室の壁の間に挟み立てた。Photo 6.1に1mm厚さのアルミ板で制作した音響管配列の模型写真を、それからPhoto 6.2に音響管配列を取り付けた模型防音壁の写真を示す。下からみた感じとしては、普通どこでも見かけるような外観になっている。Figure 6.15に測定における音源と受音点の位置を表わす。音源と受音点は地面からの反射による干渉の影響を避けるため、地面上に設定する。音源の位置は障壁から0.5m(音源S1)、1m(音源S2)、1.5m(音源S3)離れた地面上に、受音点の位置は障壁から2m(受音点R1)、2.5m(受音点R2)離れた地面上とする。それから、音源と受音点の位置が防音壁と垂直方向ではない場合の防音壁の遮音効果を調べるため、防音壁と平行に0.5m間隔でP1、P2、P3、P4、P5の受音点を設定する。音源は、約500~9kHz(実寸: 50~900Hz)に対してはHorn driver (Fostex, Model: D100A)を、約9k~40kHz(実寸: 900~4kHz)にはHorn tweeter (Fostex, Model: L3T00925A2)を用いた。それから、1/3オクターブのバンドノイズとトーンバーストの純音の2種類を音源として用い、両方の音源

に対する防音壁の遮音効果を調べた。受信側は、1/4 インチ・マイクロホン(B&K, Type 4181)を地面に向かって垂直に立て、できるだけ地面近くの音圧が取れるようにした。Photo 6.3 に地面上に設置した Horn driver と Microphone の写真を示す。測定に用いた測定装置のブロックダイヤグラムと写真をそれぞれ Figure 6.16 と Photo 6.4 に示す。

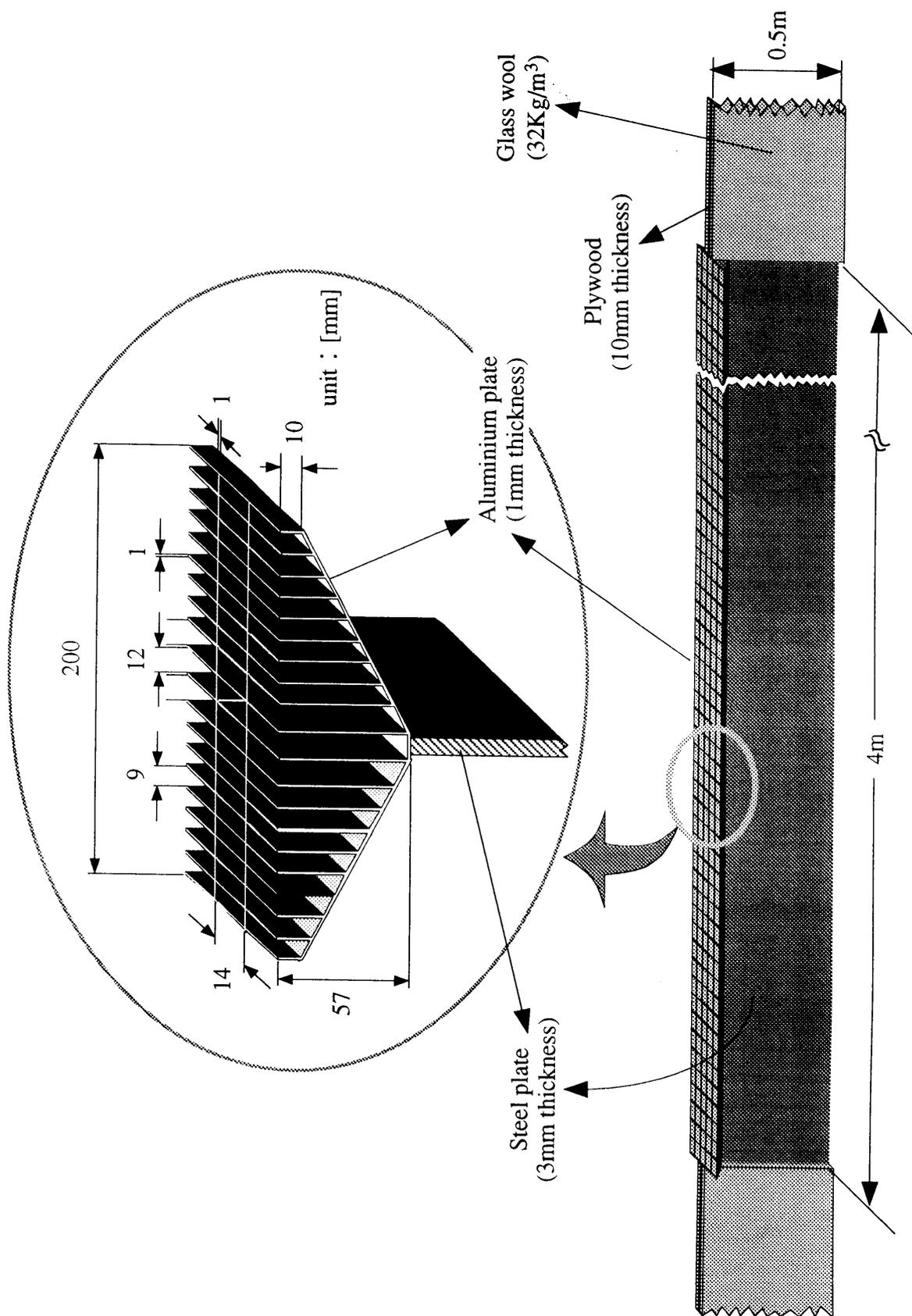


Figure 6.14 1/10 scale model barrier.

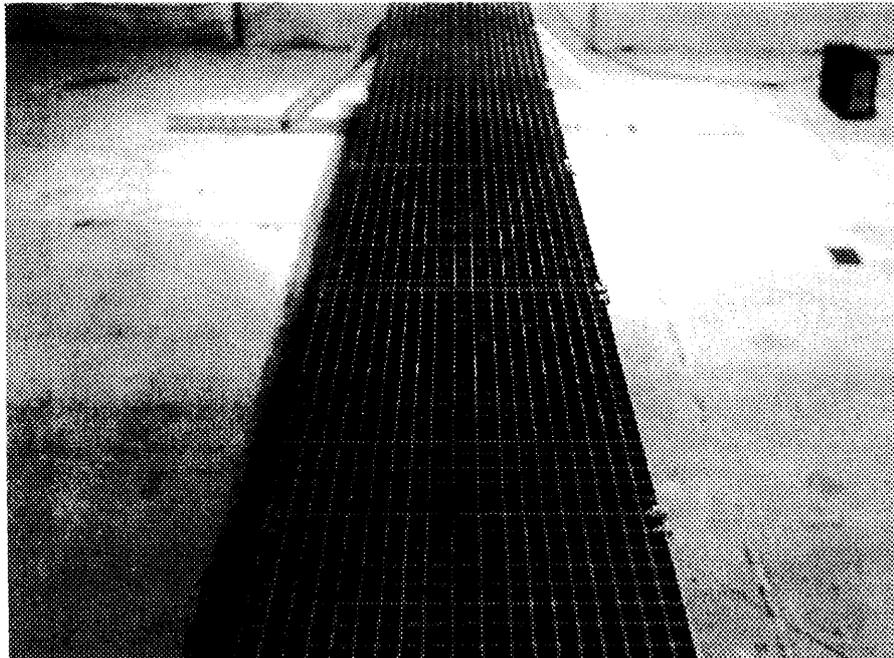
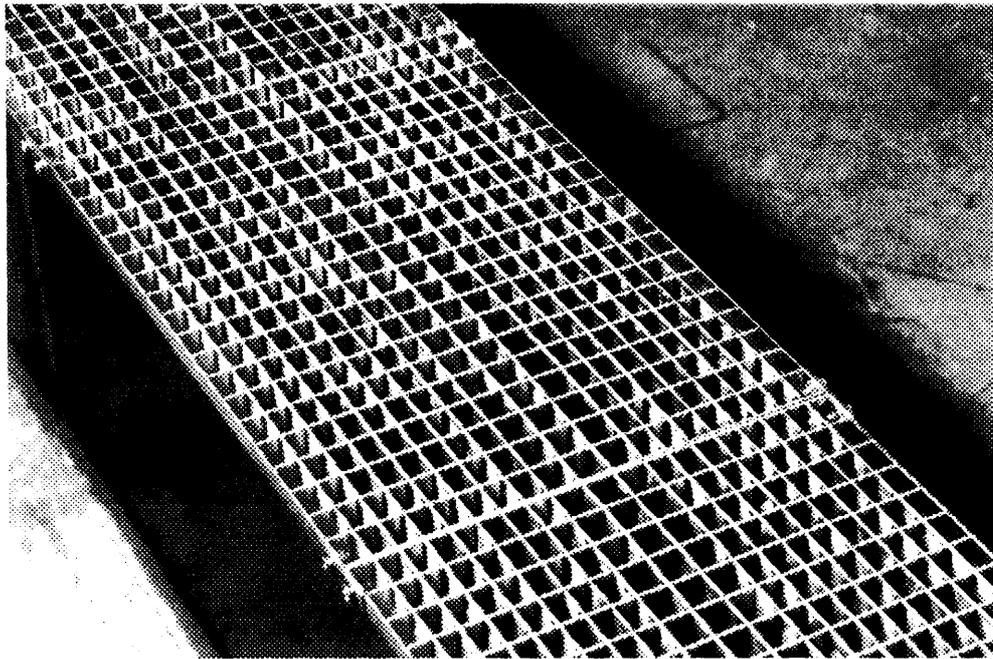


Photo 6.1 An aluminium tube array built on the steel plain barrier.

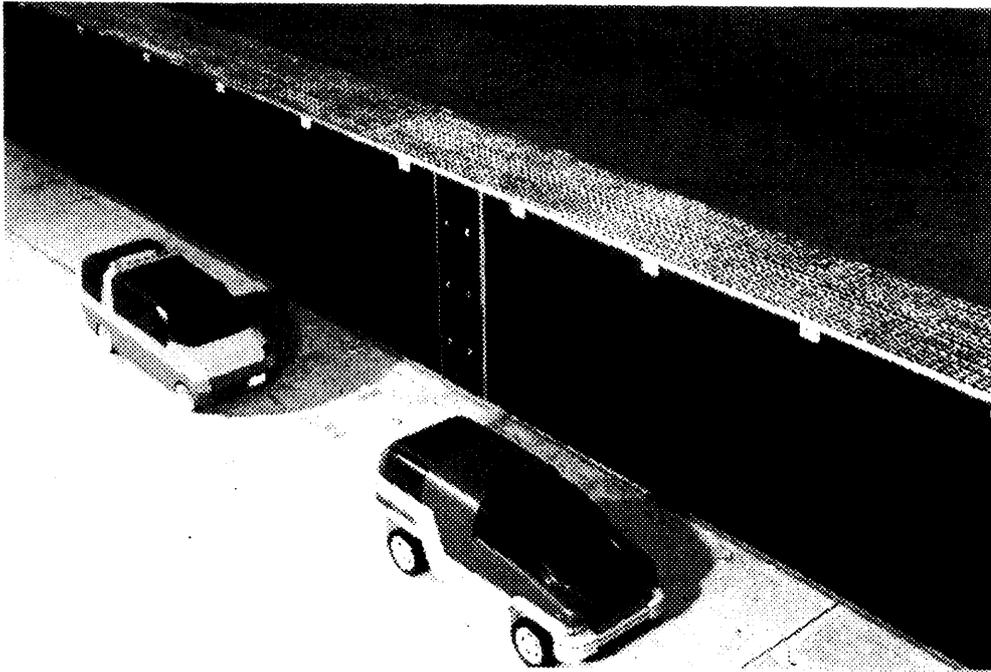


Photo 6.2 1/10 scale noise barrier built in a hemi-anechoic room.

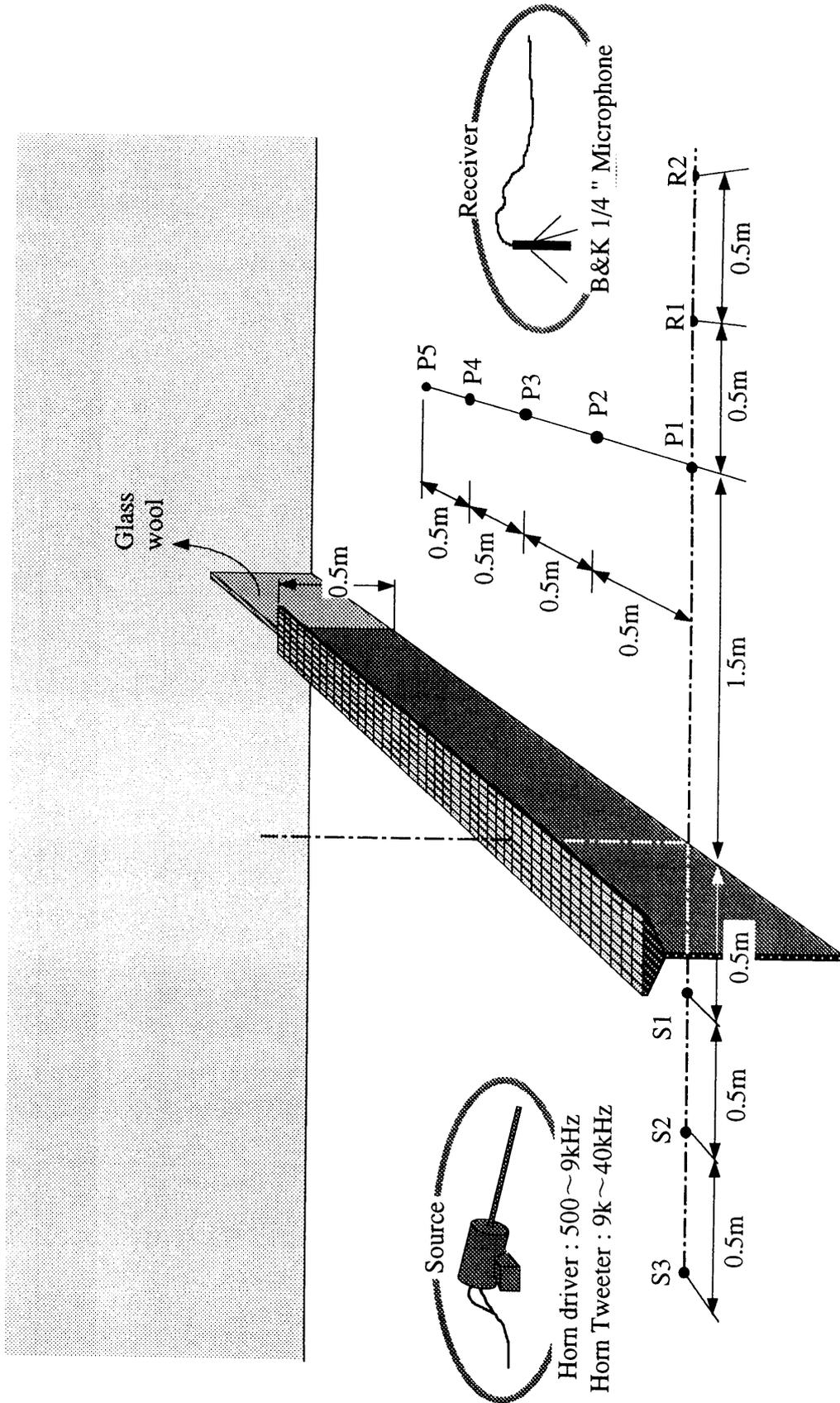
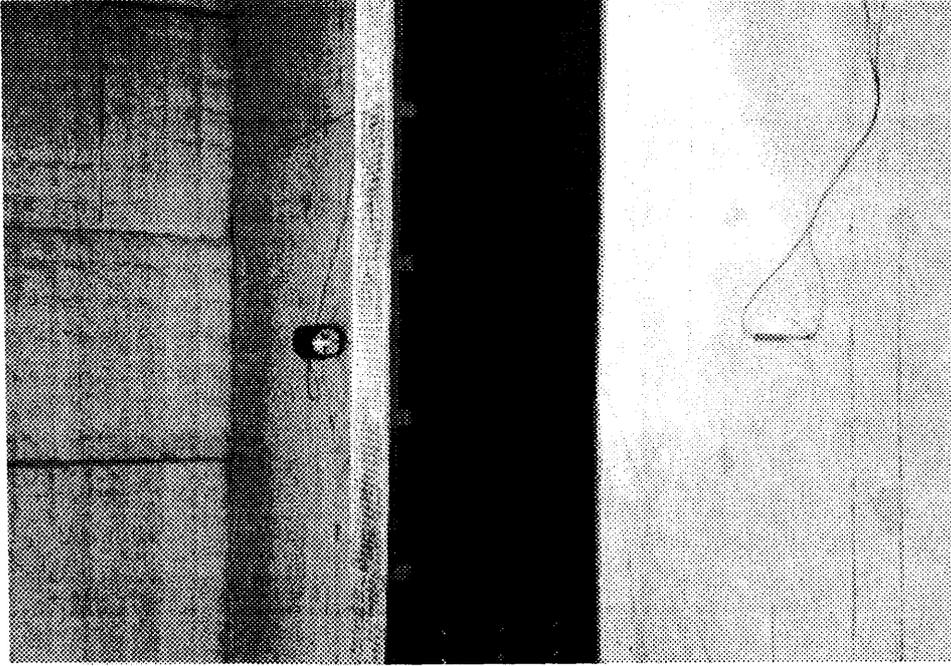
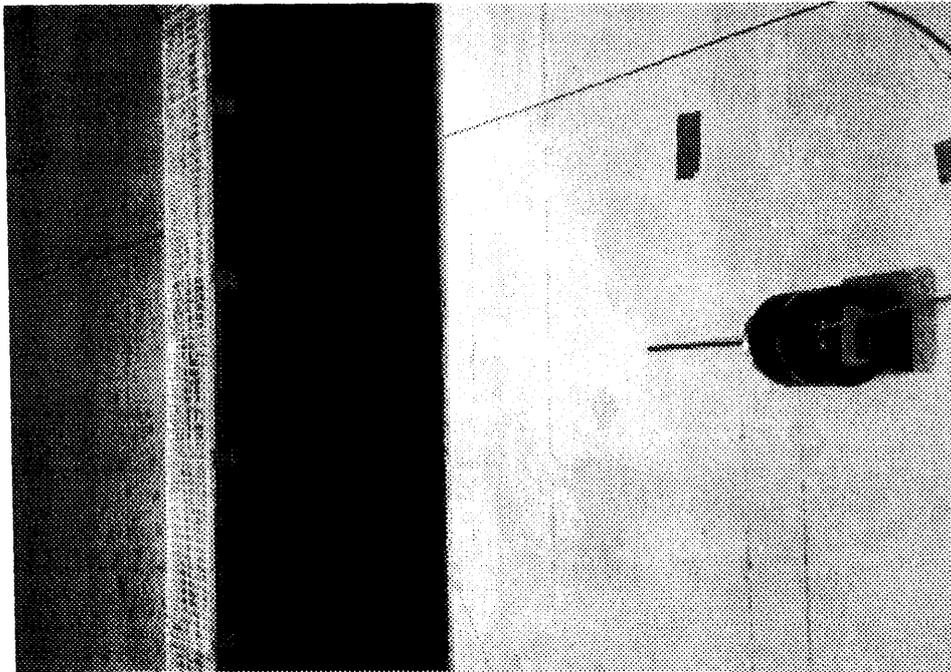


Figure 6.15 The 1/10 scale model noise barrier and geometry for experiments.



(a) Receiver. (1/4-inch microphone.)



(a) Source. (Horn driver.)

Photo 6.3 Source and receiver set on the ground.

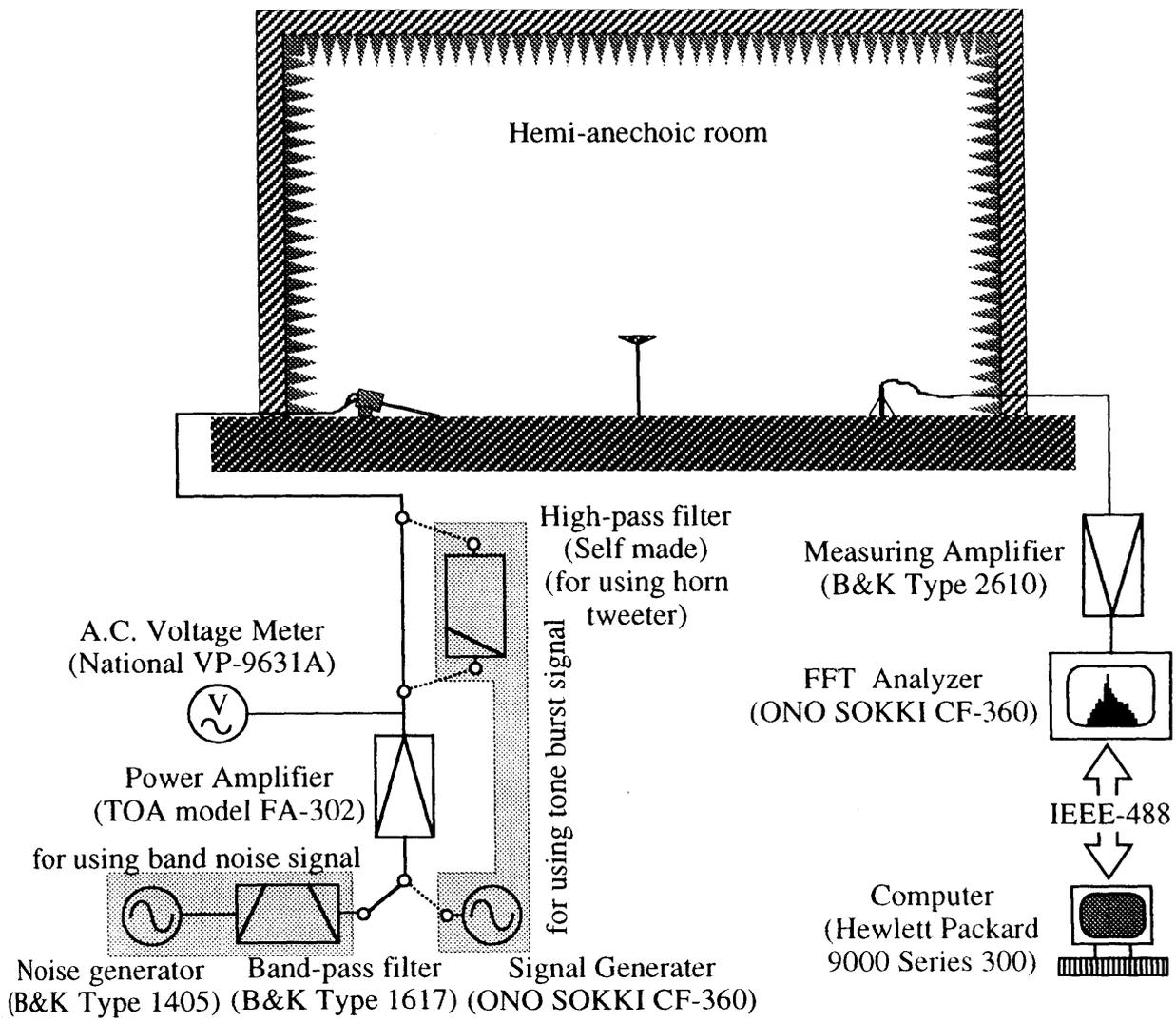


Figure 6.16 A block diagram of the measuring system.

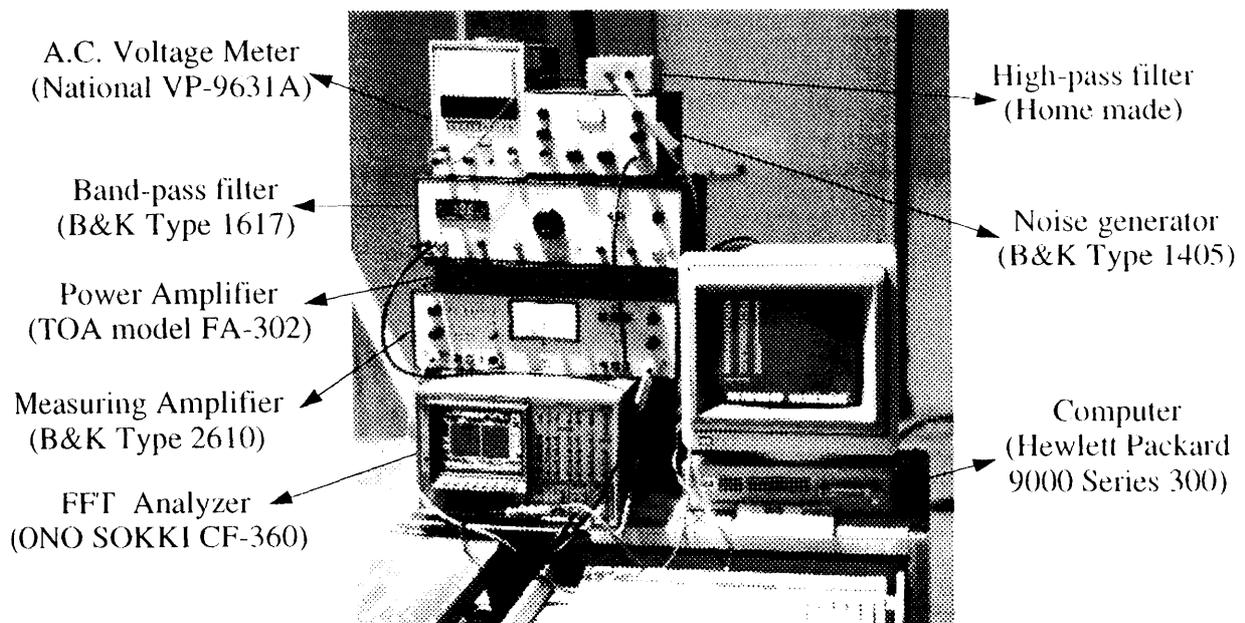


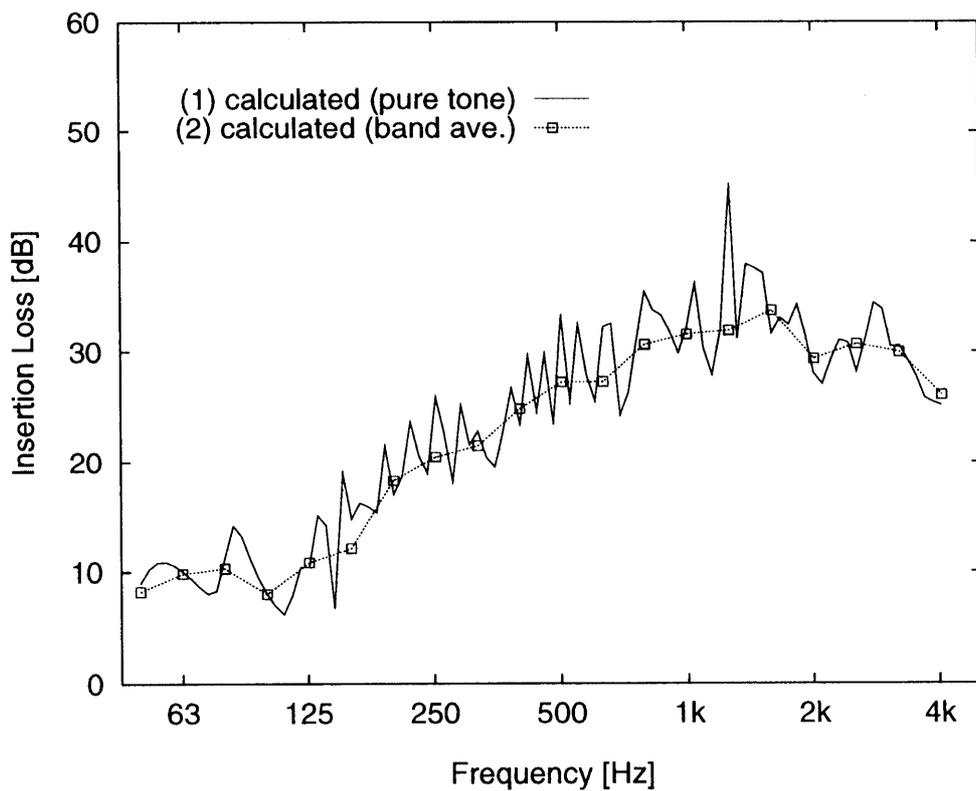
Photo 6.4 The measuring system.

## 6.5.2 実験結果

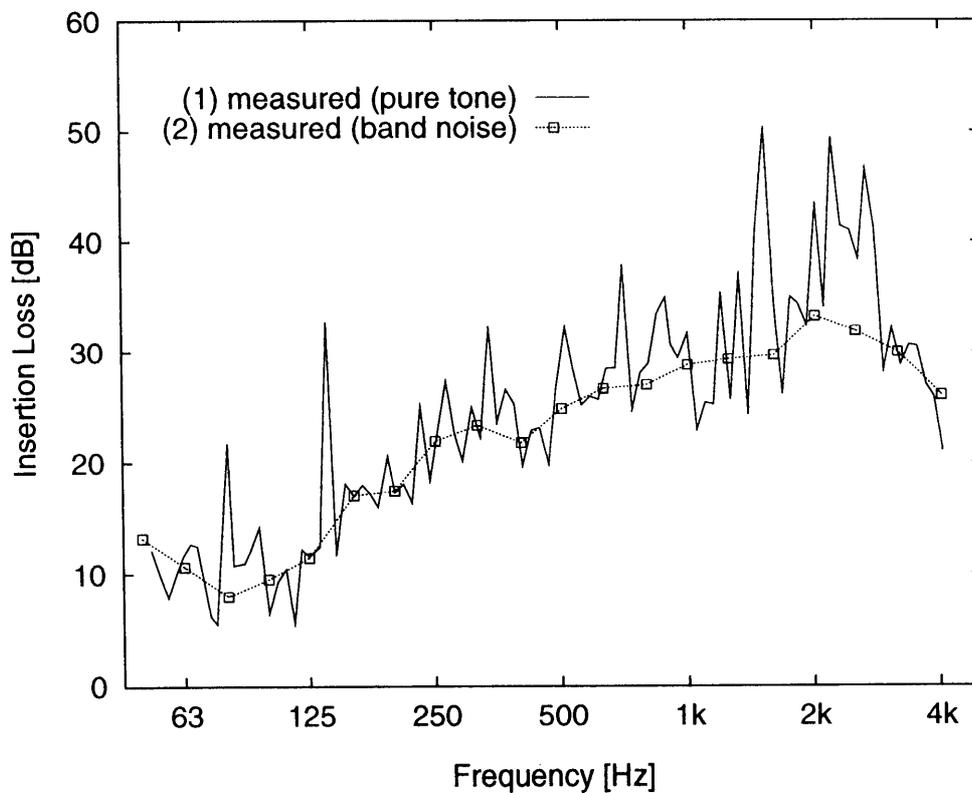
測定結果について検討を行う前に、第4章の Figure 4.4 で説明した帯域平均の妥当性について付加説明する。Figure 6.17 に純音と 1/3 オクターブバンドのバンドノイズで行った測定結果と計算結果を比較して示す。(a)が測定結果を、(b)が計算結果を表わす。これらは、音源が Figure 6.15 の S2 に設定された場合、受音点 R1 での挿入損失を表わす測定結果と計算結果を例に示したものである。(a)と(b)の測定結果と計算結果を比較してみると、その傾向かがかなり似ていることが分かる。このことから、第4章の Figure 4.4 で説明した帯域平均という計算方法は妥当であることが分かる。

Figures 6.18, 6.19, 6.20, 6.21 に Figure 6.15 での音源と受音点の位置が各々 S1-R1, S1-R2, S2-R1, S2-R2 となる場合における測定結果と計算結果を比較して表わす。純音とバンドノイズ両方の音源に対して、おおむねみて、実測値と計算値は良い対応を示していると思われる。これらの結果から、Figure 6.7(c)に示した、多数の設計周波数を持ち、段々変わる深さの音響管配列を持つ防音壁の遮音効果は、ここまで数値解析で調べた効果とおむね合致していることが確認できる。Figure 6.22 と 6.23 に、音源が複数になる場合を仮定して、音源、受音点の位置がそれぞれ Figure 6.15 の S1-R1, S2-R1, S3-R1 になる場合と、S1-R2, S2-R2, S3-R2 になる場合の SPL の測定値のパワー平均を求め、剛な垂直型防音壁や剛な T 型防音壁が建てられた場合の計算値の平均と比較して示す。示された挿入損失の平均値は、防音壁がある場合とない場合に受音点で計測された SPL をパワー平均した後その差を取って求めたものである。Figures 6.22, 6.23 両方の結果共に平均を行っているため、Figures 6.18~6.21 の結果に比べて測定値と計算値がよく対応している。この結果からも音響管配列を持つ防音壁は約 150Hz 以下の低周波帯域を除いたほぼ全周波数領域で同じ高さと同幅の剛な T 型防音壁より良い遮音効果を示している。最後に、Figure 6.24 に音源と受音点が防音壁に対し

て垂直にならない場合の遮音効果についての測定結果を示す。音源を Figure 6.15 の S3 に固定しておいて受音点を P1, P2, P3, P4, P5 に移動させた場合の挿入損失の測定結果である。(a)は純音を用いた場合、(b)は 1/3 オクターブバンドのバンドノイズを用いた場合の結果を表わす。この結果から、音源と受音点が防音壁に対して垂直ではない場合にも音響管配列を持つ防音壁の遮音効果は大きく変動しないことが分かる。

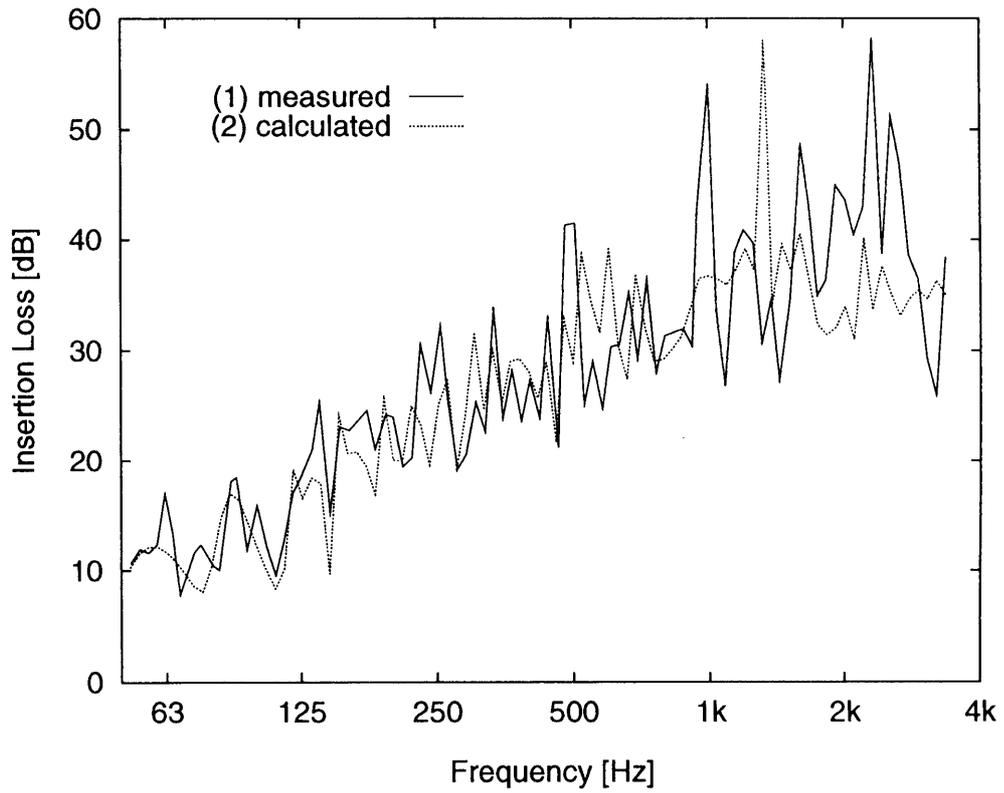


(a) Calculated spectra of insertion loss for the pure tone source and its band averaged result.

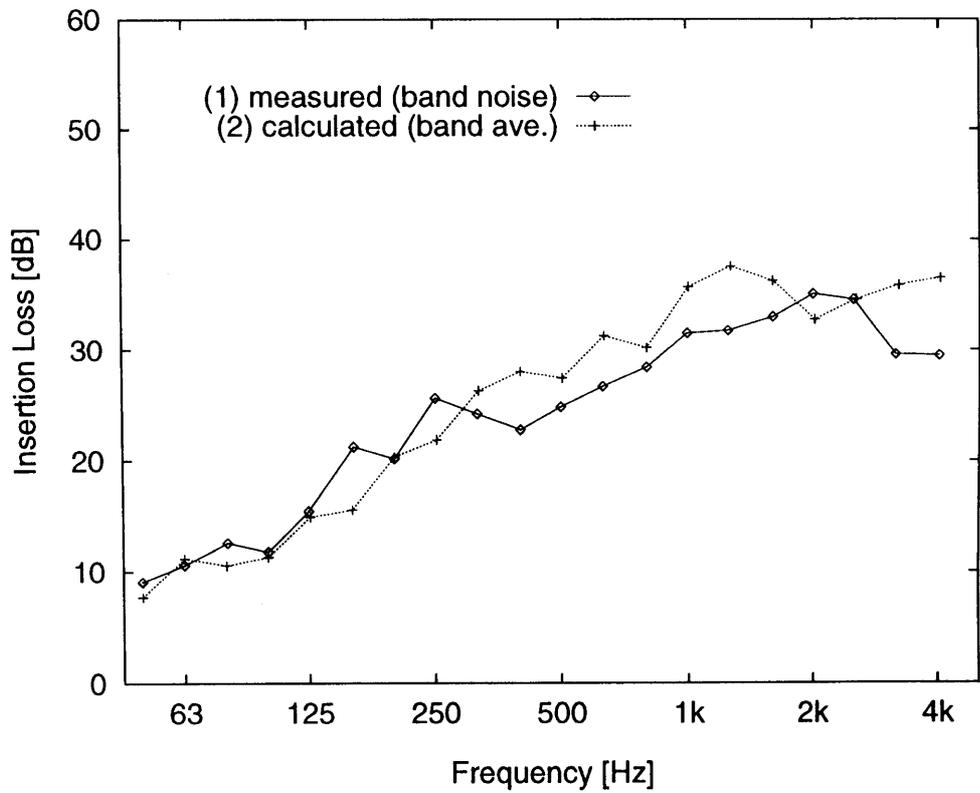


(b) Measured spectra of insertion loss for the pure tone and band noise source.

Figure 6.17 An example spectra of insertion loss for comparing the results of calculated and measured 1/3 octave band spectrum.

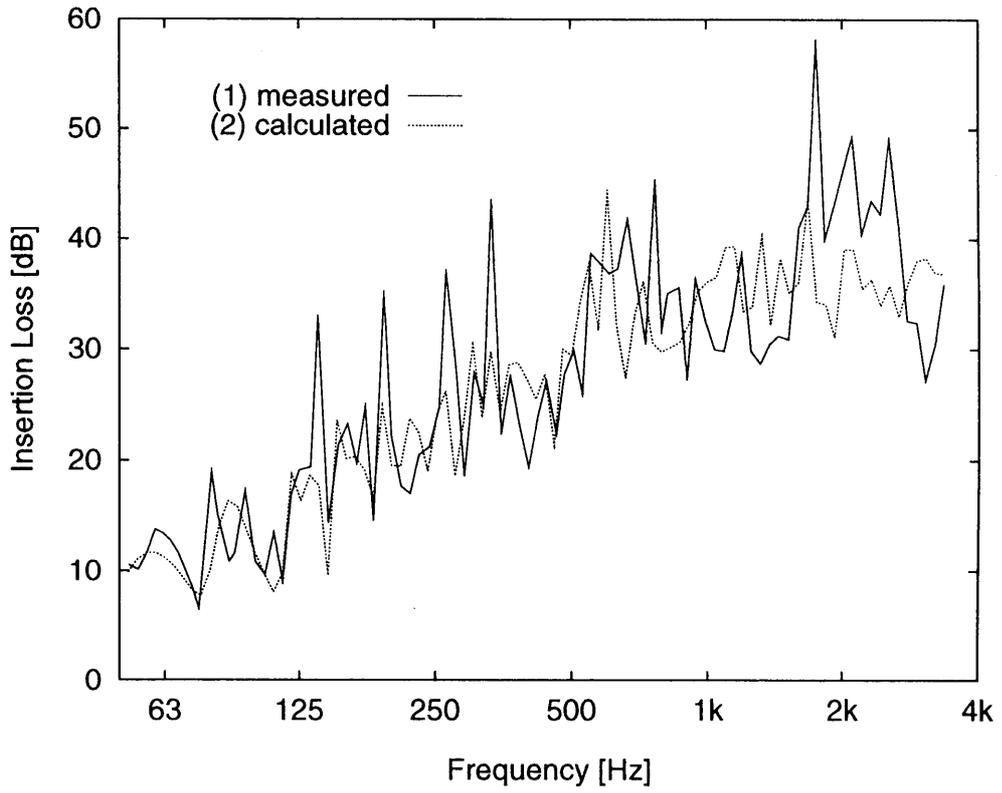


(a) Spectra from the pure tone source(experiment and calculation).

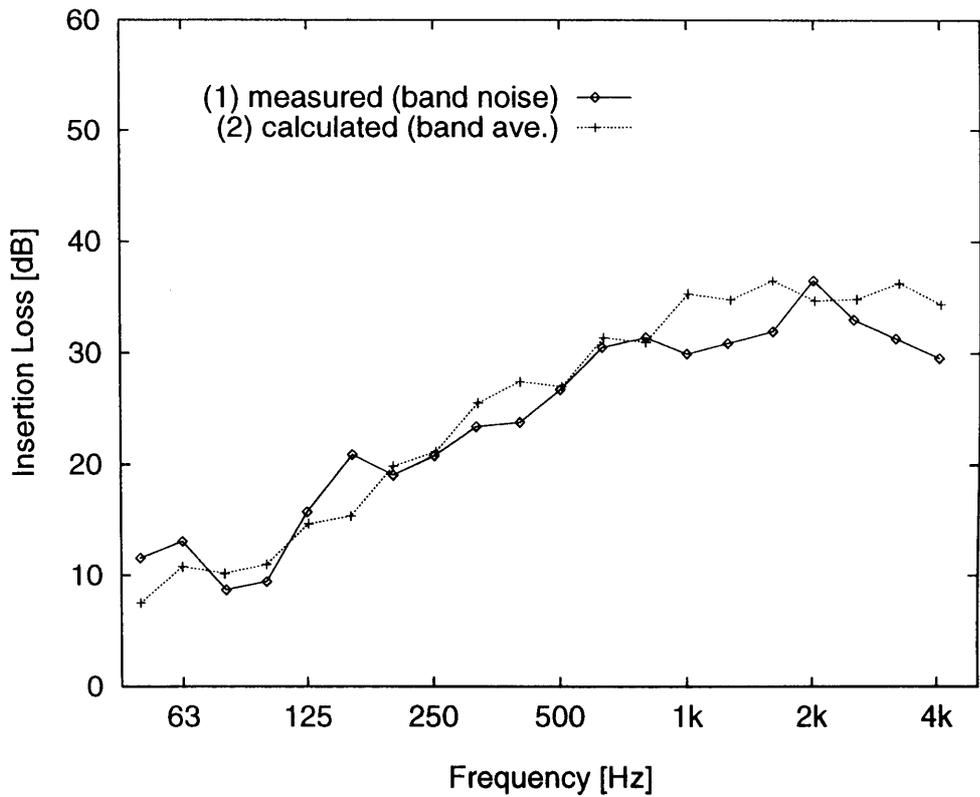


(b) Spectra from the band noise(experiment) and band average(calculation).

Figure 6.18 Measured and calculated spectra of insertion loss for the S1-source and R1-receiver shown in Figure 6.15.

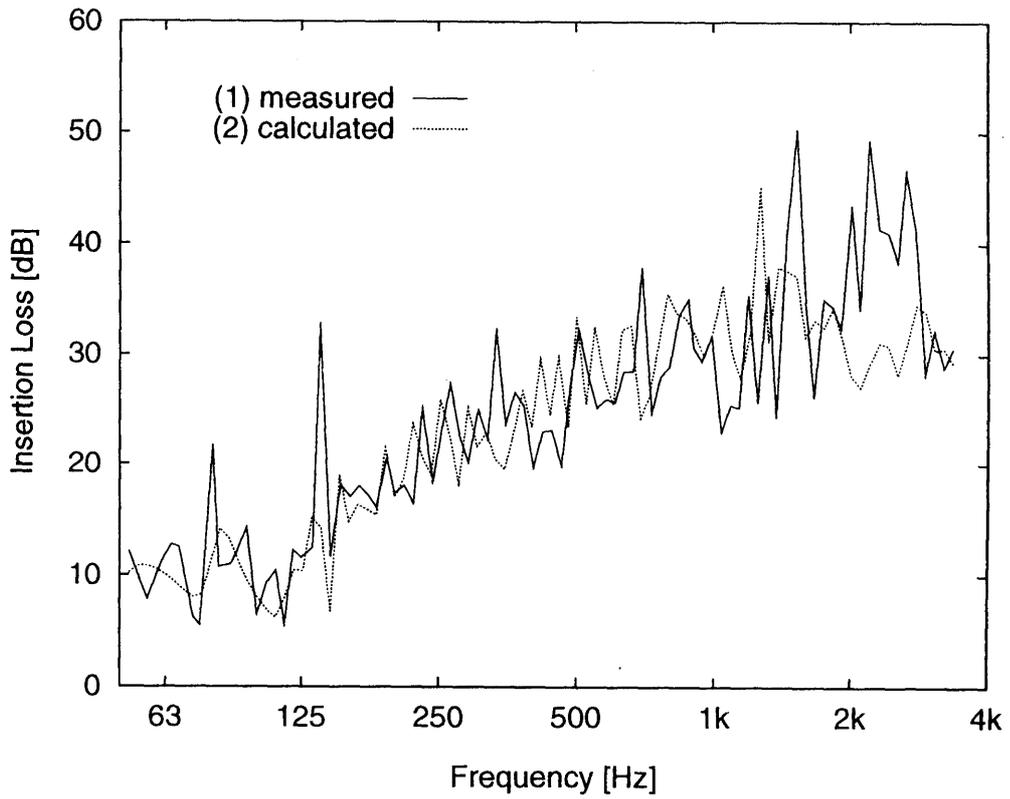


(a) IL spectra for the pure tone source.

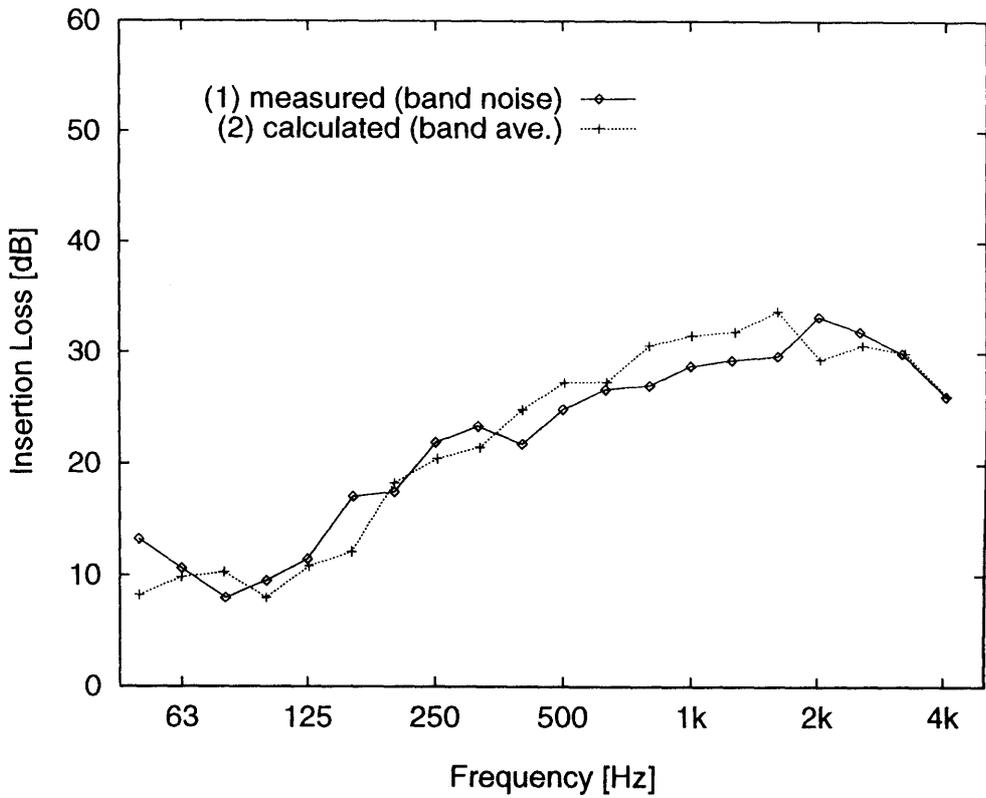


(b) IL spectra for the band noise source.

Figure 6.19 Measured and calculated spectra of insertion loss for the S1-source and R2-receiver shown in Figure 6.15.

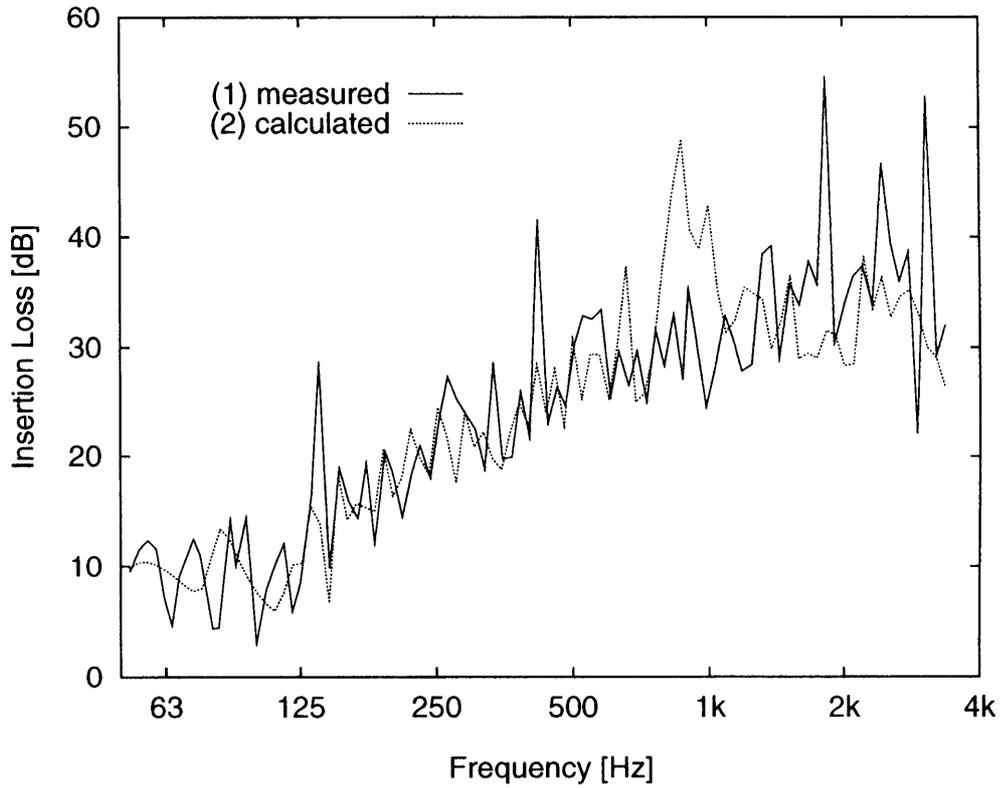


(a) IL spectra for the pure tone source.

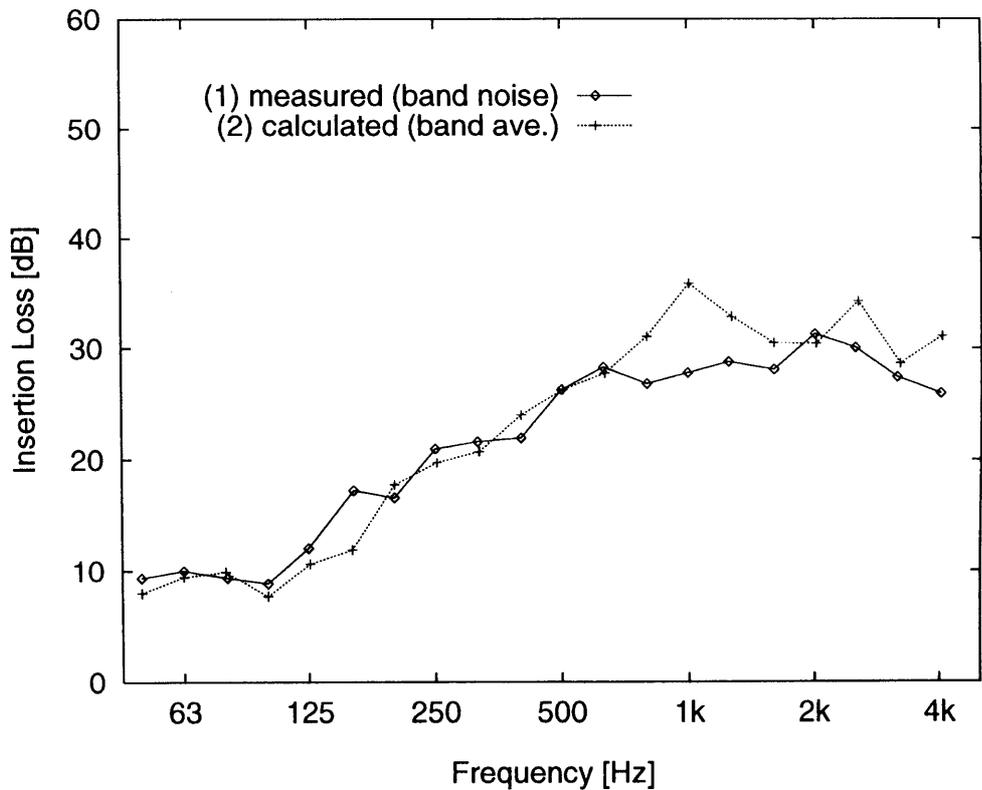


(b) IL spectra for the band noise source.

Figure 6.20 Measured and calculated spectra of insertion loss for the S2-source and R1-receiver shown in Figure 6.15.

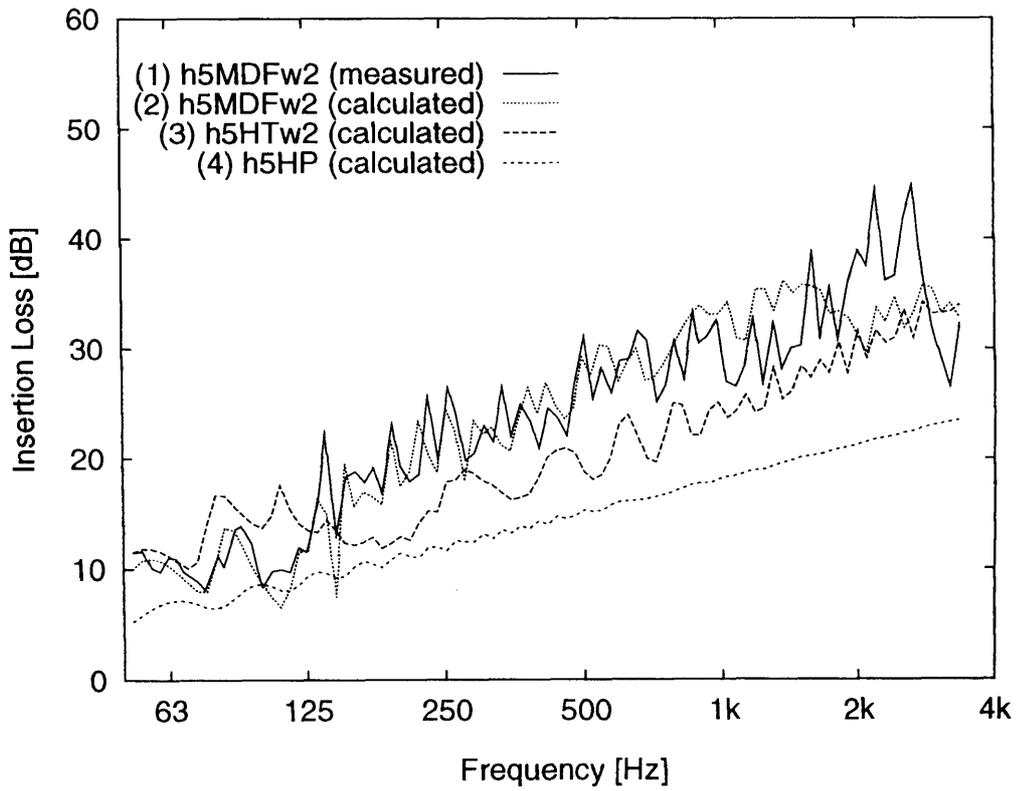


(a) IL spectra for the pure tone source.

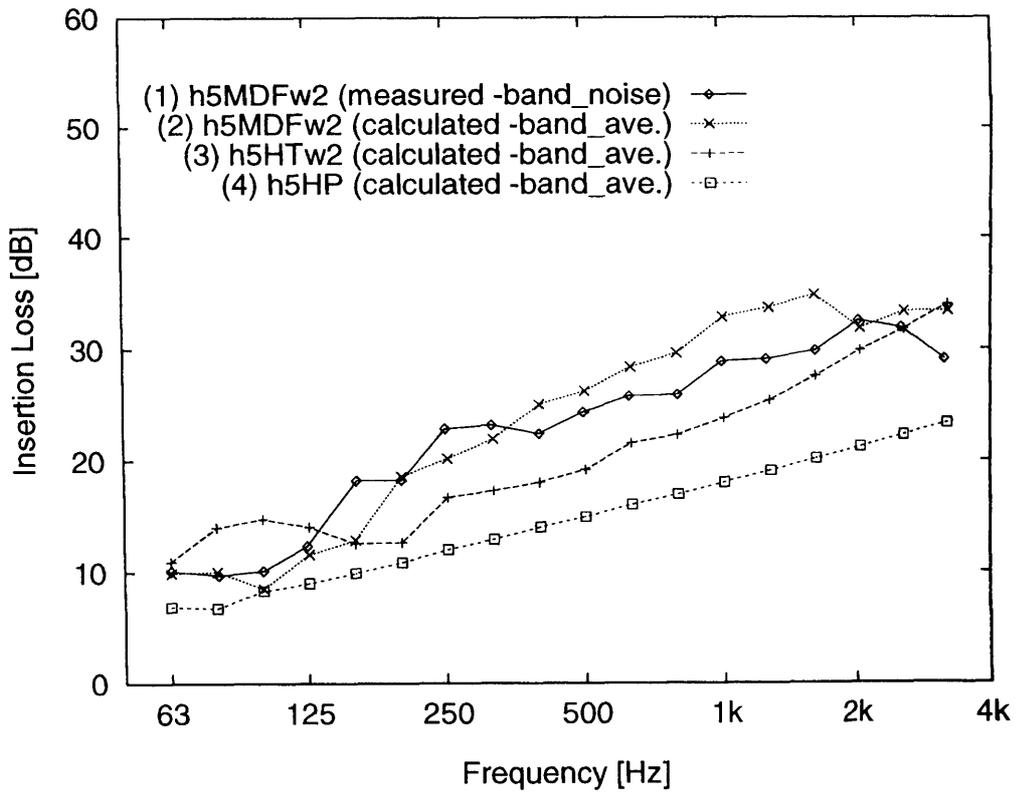


(b) IL spectra for the band noise source.

Figure 6.21 Measured and calculated spectra of insertion loss for the S2-source and R2-receiver shown in Figure 6.15.

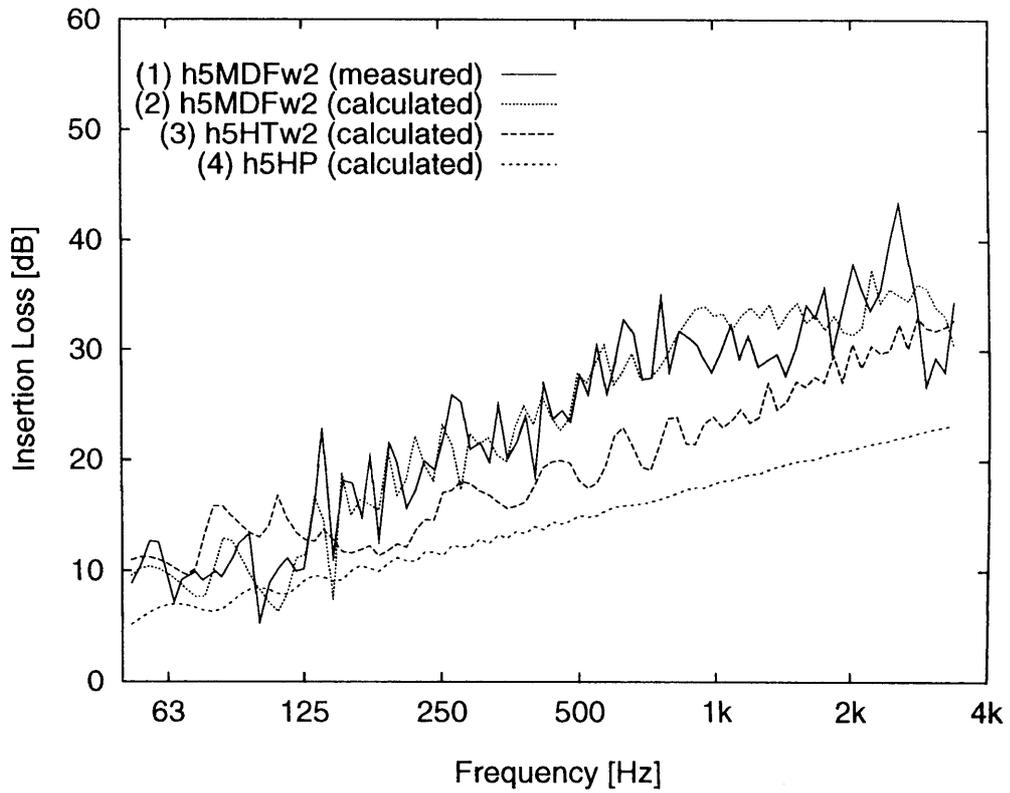


(a) IL spectra for the pure tone source.

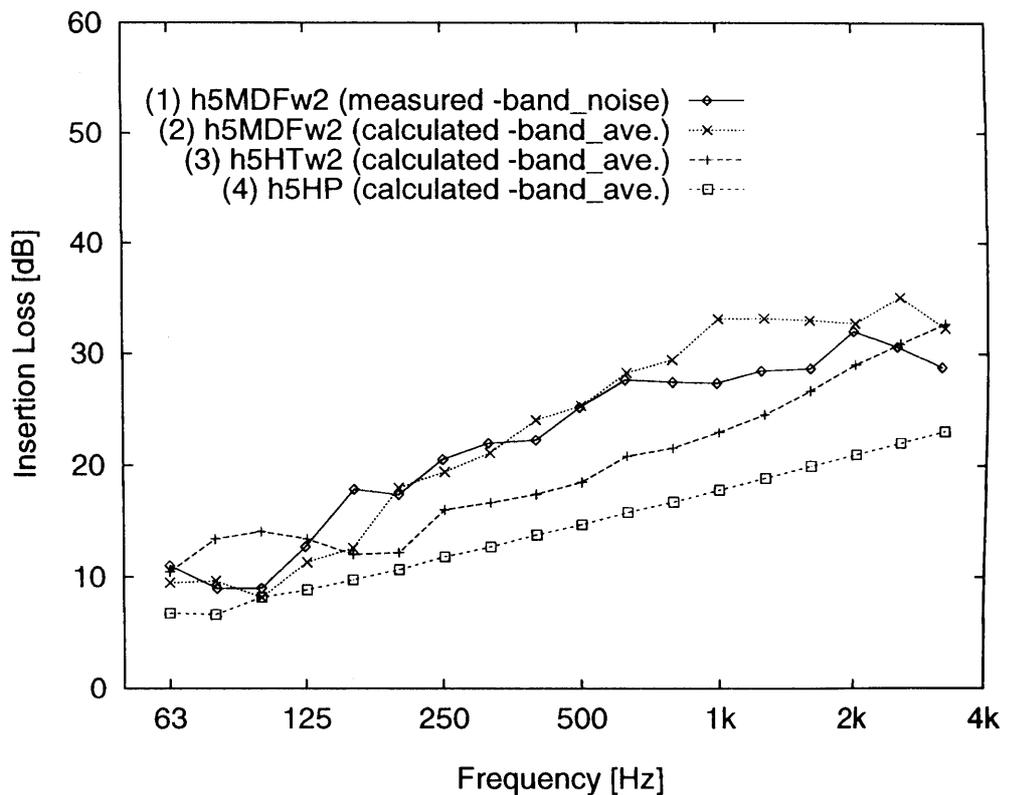


(b) IL spectra for the band noise source.

Figure 6.22 Averaged spectra of insertion loss from the data of measured and calculated spectra of SPL at R1-receiver when the source is at S1, S2 and S3 respectively for the geometry shown in Figure 6.15.

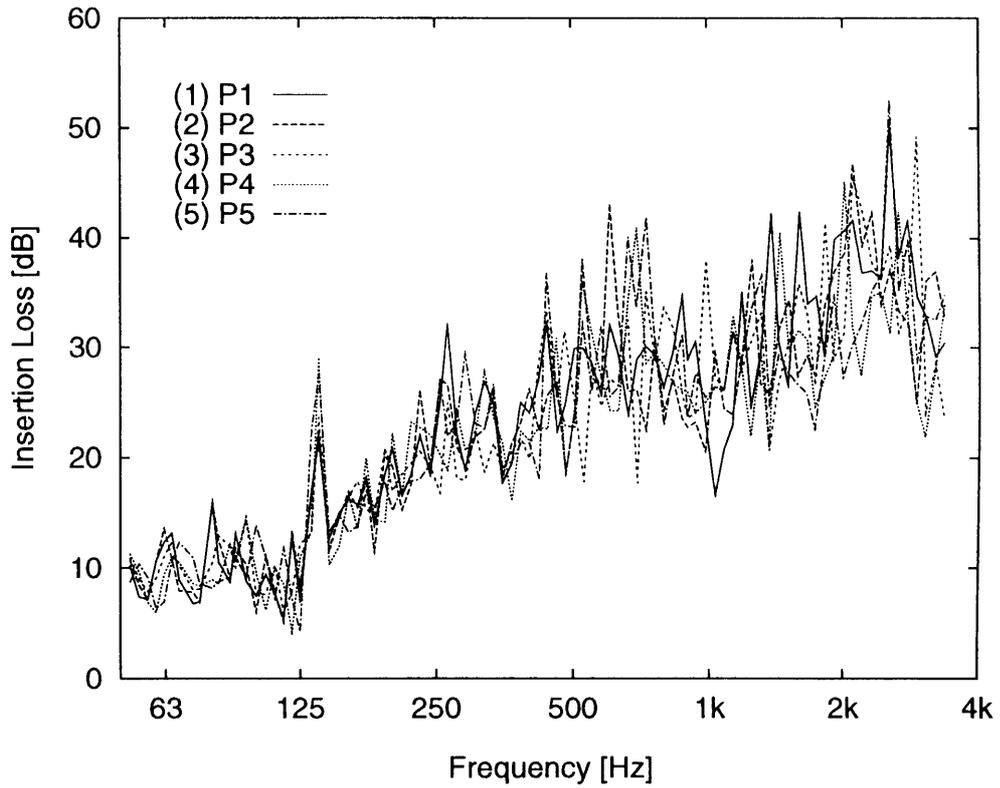


(a) IL spectra for the pure tone source.

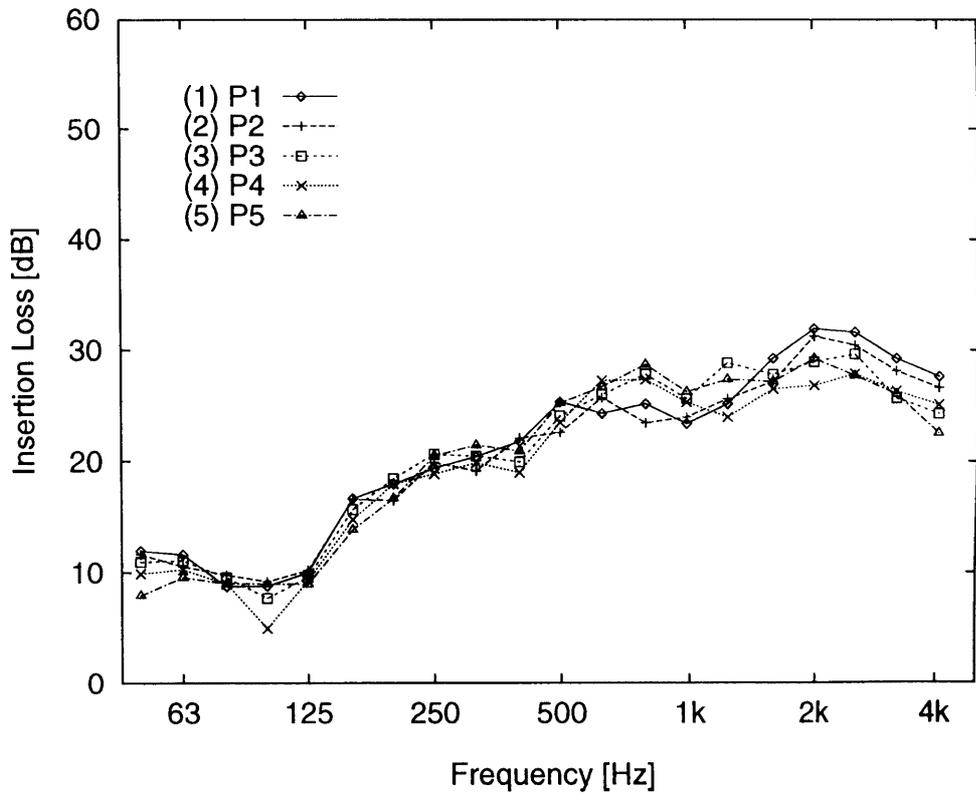


(b) IL spectra for the band noise source.

Figure 6.23 Averaged spectra of insertion loss from the data of measured and calculated spectra of SPL at R2-receiver when the source is at S1, S2 and S3 respectively for the geometry shown in Figure 6.15.



(a) IL spectra for the pure tone source.



(b) IL spectra for the band noise source.

Figure 6.24 Measured spectra of insertion loss for the S3-source and P1, P2, P3, P4, P5 -receiver shown in Figure 6.15.

## 6.6 実用化に対する検討

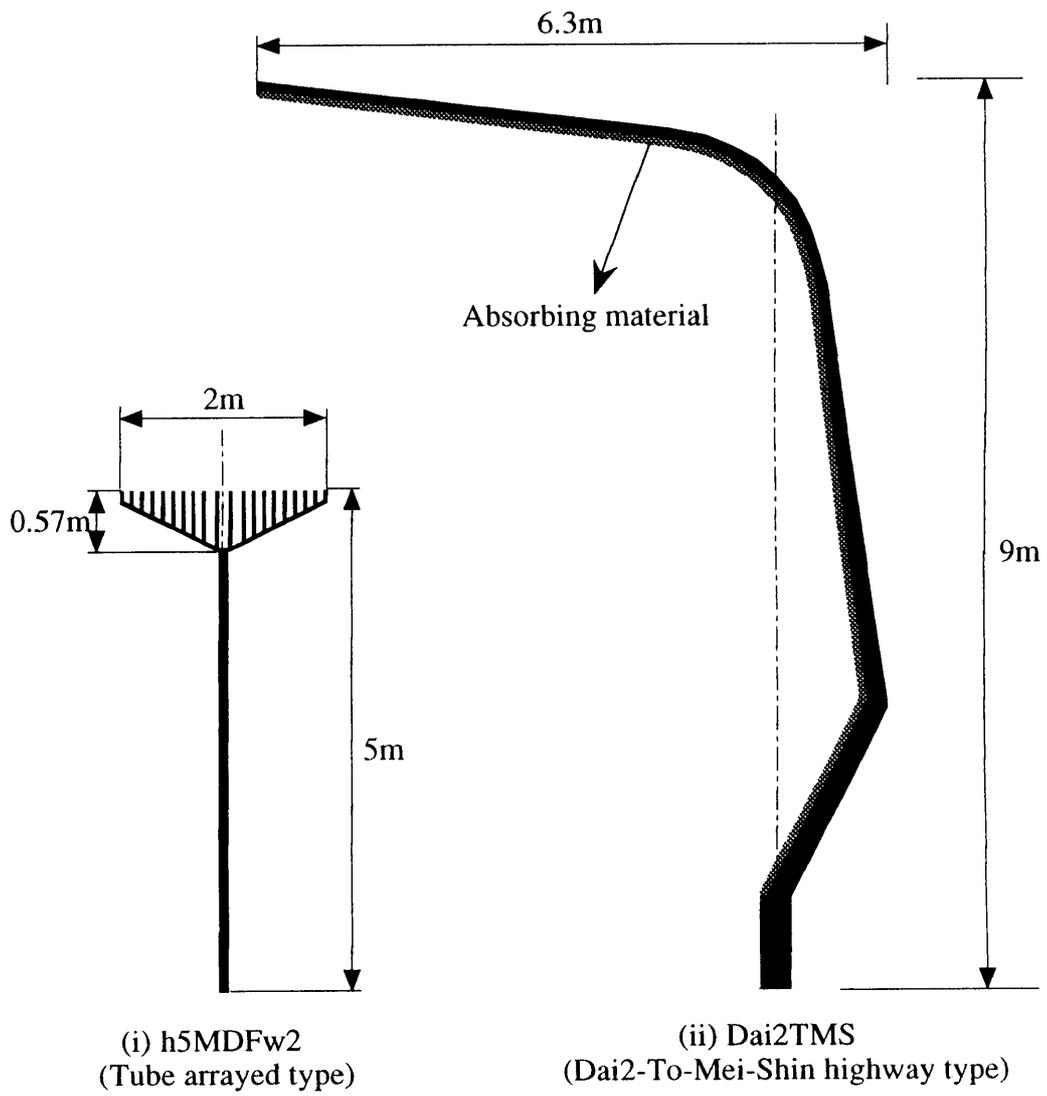
序論において、現在建設中の第2東名神高速道路の名古屋区間に設置される予定にある高さ9~10mの巨大な防音壁を、5mの高さに収めることが本研究の背景にあることを明示した。本節では、3次元模型実験によって効果が確認された「h5MDFw2」防音壁を高さ9m、幅6.3mの巨大な防音壁の代わりに置き替えすることを想定し、影響管配列によって実現されたソフトなT型防音壁の実用化に対する基礎的な評価の一つとして検討を行う。

### 6.6.1 数値解析モデルおよび解析音場

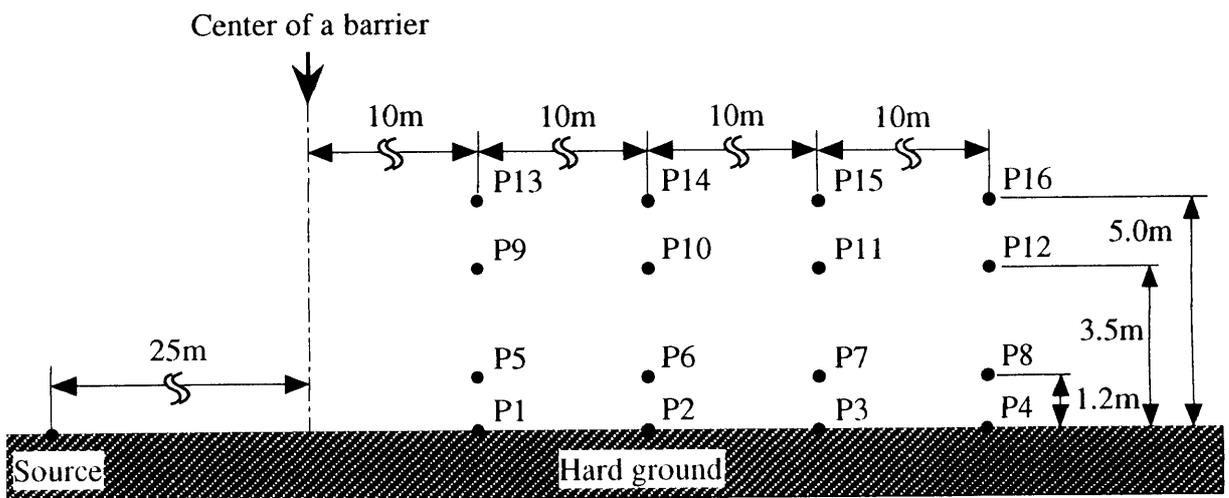
Figure 6.25 に数値解析を行う防音壁の計算モデルと2次元音場を表す。h5MDFw2防音壁と比較して検討を行う巨大な防音壁の表面条件は、支持部を除いた音源側の全ての壁面を吸音性表面と設定し、その吸音率をTable 6.3に示す。音源は防音壁の支持部の中心から25m離れた地面上、受音点は支持部の中心から10m, 20m, 30m, 40m離れた、地面上0m, 1.2m, 3.5m, 5.0mの位置に計16個を設置した。

Table 6.3 Absorption coefficient of source side material for the barrier shown in Figure 6.25(a)-(ii).

Frequency [Hz]	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500~2k
Absorption Coeff.	0.1	0.1	0.15	0.15	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9



(a) Barrier models.



(b) Geometry for calculations.

Figure 6.25 Noise barrier models and geometry for calculations.

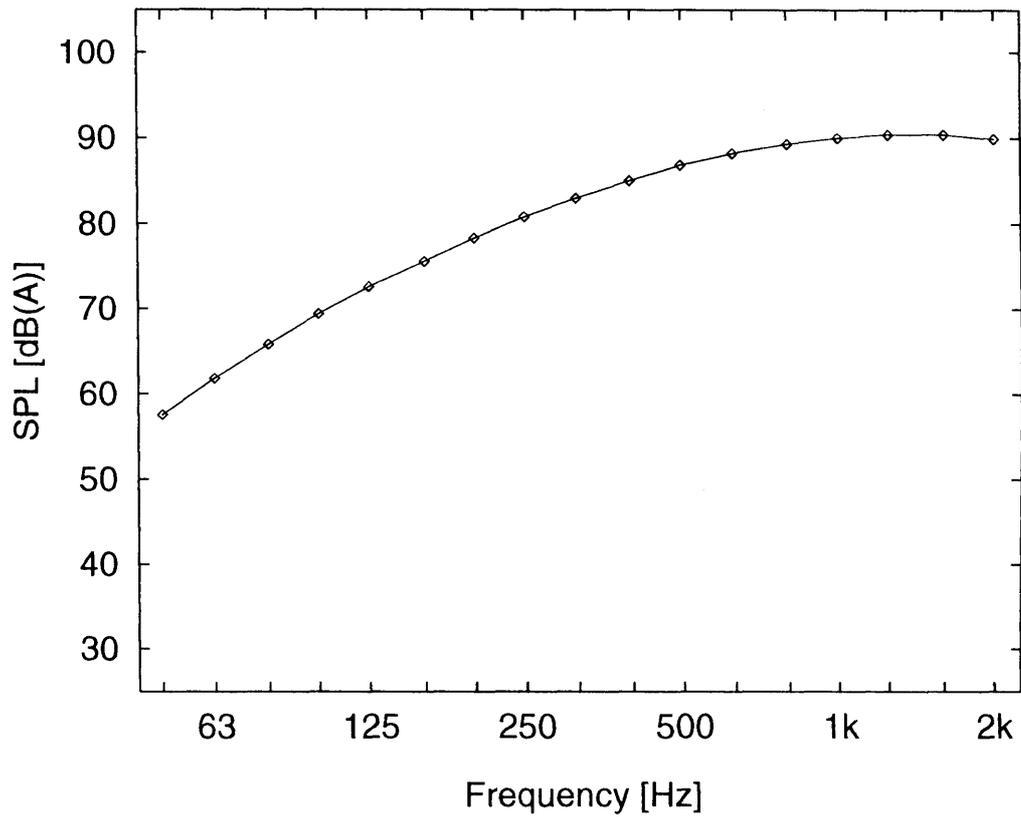


Figure 6.26 SPL spectrum of noise source ( $V > 80\text{km/h}$ ), (ASJ model/1993).

Table 6.4 1/3 octave band level of noise source shown in Figure 6.26.

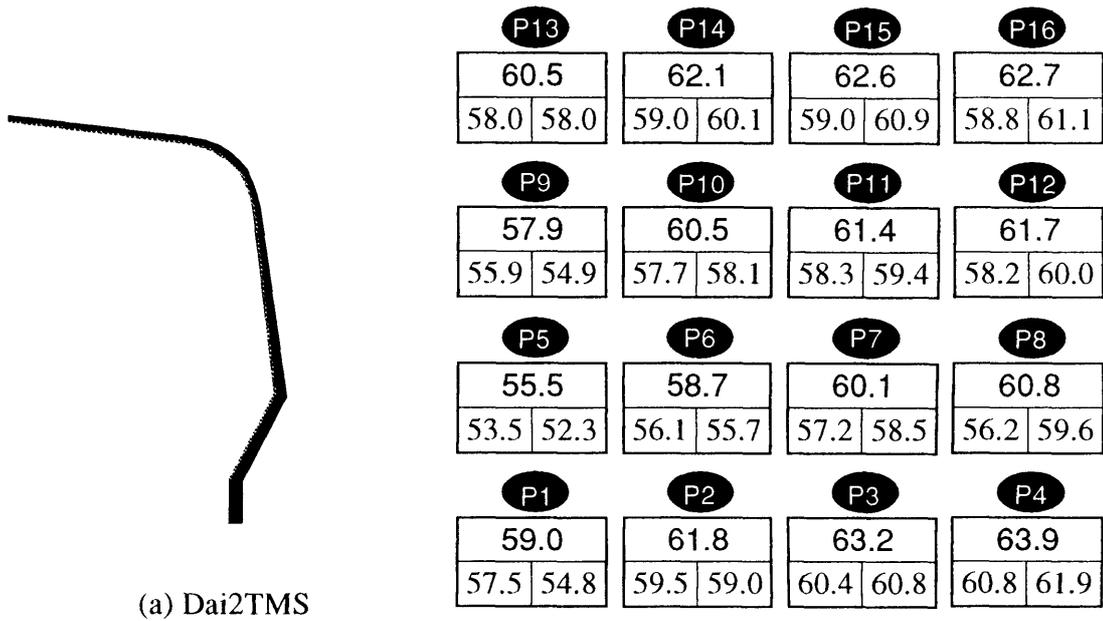
unit : [dB]

Frequency [Hz]	A-weighting	Band level
50	-33.5	57.5
63	-29.2	61.8
80	-25.2	65.8
100	-21.6	69.4
125	-18.4	72.6
160	-15.4	75.6
200	-12.7	78.3
250	-10.2	80.8
315	-8.0	83.0
400	-6.0	85.0
500	-4.2	86.8
630	-2.8	88.2
800	-1.7	89.3
1000	-1.0	90.0
1250	-0.6	90.4
1600	-0.6	90.4
2000	-1.1	89.9

## 6.6.2 数値解析結果

Figure 6.25(a)に示した両防音壁の遮音効果を比較することにおいて、周波数特性を考慮したオーバーオール値で評価するために想定した音源のスペクトルおよびそのバンドレベルを Figure 6.26, Table 6.3 に示す。この音源モデルは、Figure 6.10 および Table 6.1 に示した音源モデルと共に日本音響学会が提案したもので、自動車が 80km/h 以上のスピードで通常舗装の道路を走る場合に発生する騒音をモデリングしたものであり、140km/h を上限スピードとする第 2 東名神高速道路からの騒音を考慮するため、このような性質を持つ音源を用いることにする。Figure 6.27 に、Figure 6.26 のスペクトルを持つ音源に対する各受音点における音圧のバンドレベルやオーバーオールレベルを示す。一つの受音点において三つの値が示されている。下左の値は 50~500Hz の低域におけるバンドレベル、下右の値は 500~2kHz の広域におけるバンドレベル、上部の値は 50~2kHz の全域におけるオーバーオールレベルを表す。Table 6.4 に各受音点における両防音壁のバンド SPL やオーバーオール SPL の差を取って示す。つまり、示された値は Figure 6.27(a)の Dai2TMS 防音壁が設置された場合の各受音点におけるバンドレベルやオーバーオールレベルから Figure 6.27(b)の h5MDFw2 防音壁が設置された場合のバンドレベルやオーバーオールレベルを引いたものである。結果からみると、500Hz ~2kHz の広域周波数の騒音に対する受音点 P1~P8 での値は両防音壁のレベル差はほぼないことが分かる。受音点 P9 や P13 においては両防音壁のレベル差が大きくなるが、防音壁の高さと幅にあまりにも大きな差があることと受音点が高い位置にあることを考え合わせるとこれは避けられないと思う。しかし、今回は計算機の容量などの都合で計算ができなかったが、序論の Figure 1.1 のように防音壁が高架道路設置されることになると受音領域は大概路面より低くなるので、「h5MDFw2」防音壁を巨大な防音壁に置き替えても遮音効果に大した差はないと思われる。以上のように、低周波

域では多少問題は残るが、h5MDFw2 防音壁は Dai2TMS 防音壁の遮音性能に近い性能を持っていることが明らかになった。Figure 6.28(1)～Figure 6.28(4)に各受音点における両防音壁の挿入損失の周波数特性を比較して表す。



Meaning of the value (Example) ;

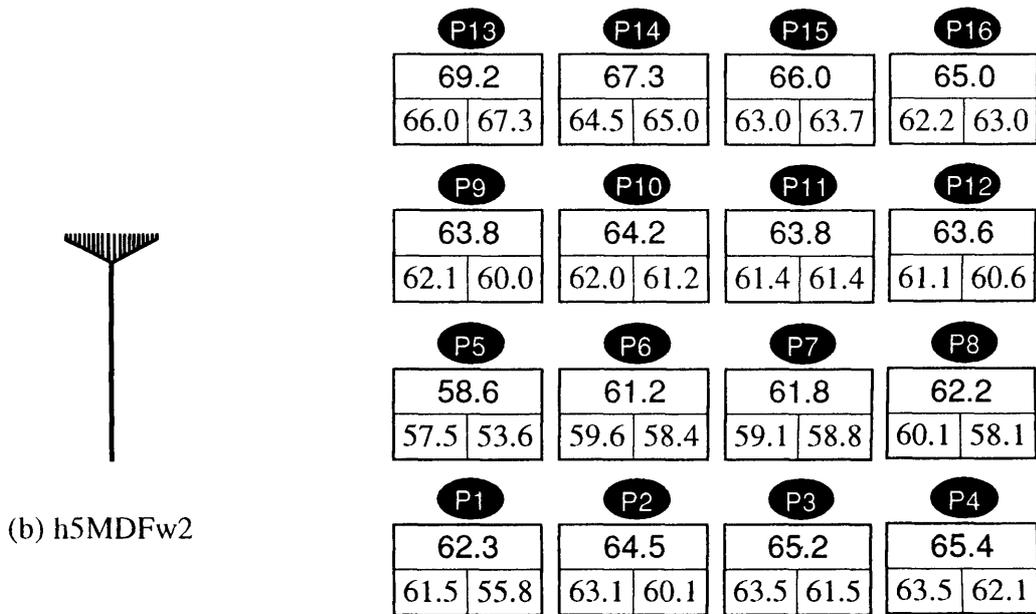
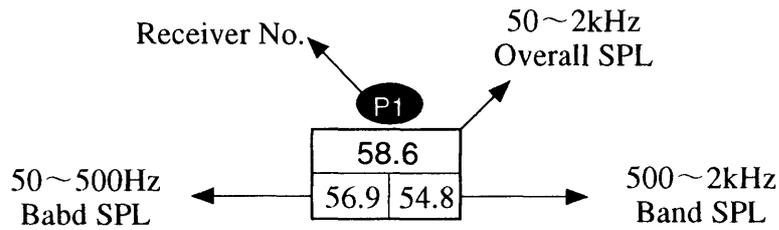


Figure 6.27 Calculated overall SPL behind the barriers for the geometry shown in Figure 6.25.

Table 6.5 Difference of overall SPL, (SPL(h5MDFw2) – SPL(Dai2TMS)).

(a) 50 ~ 500Hz band SPL [dB]

Receiver	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Diff.	4.1	3.6	3.1	2.8	4.0	3.5	1.9	3.9
Arithmetical	3.4				3.3			
Mean	3.4							
Receiver	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
Diff.	6.2	4.2	3.0	2.9	8.0	5.5	4.0	3.4
Arithmetical	4.1				5.2			
Mean	4.7							

(b) 500 ~ 2kHz band SPL [dB]

Receiver	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Diff.	1.0	1.1	0.7	0.3	1.4	2.7	0.3	-1.4
Arithmetical	0.8				0.8			
Mean	0.8							
Receiver	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
Diff.	5.1	3.1	2.0	0.6	9.3	4.8	2.7	1.9
Arithmetical	2.7				4.7			
Mean	3.7							

(c) 50 ~ 2kHz overall SPL [dB]

Receiver	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Diff.	3.3	2.6	2.0	1.5	3.1	2.5	1.7	1.4
Arithmetical	2.4				2.2			
Mean	2.3							
Receiver	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
Diff.	5.9	3.7	2.4	1.9	8.7	5.2	3.4	2.3
Arithmetical	3.5				4.9			
Mean	4.2							

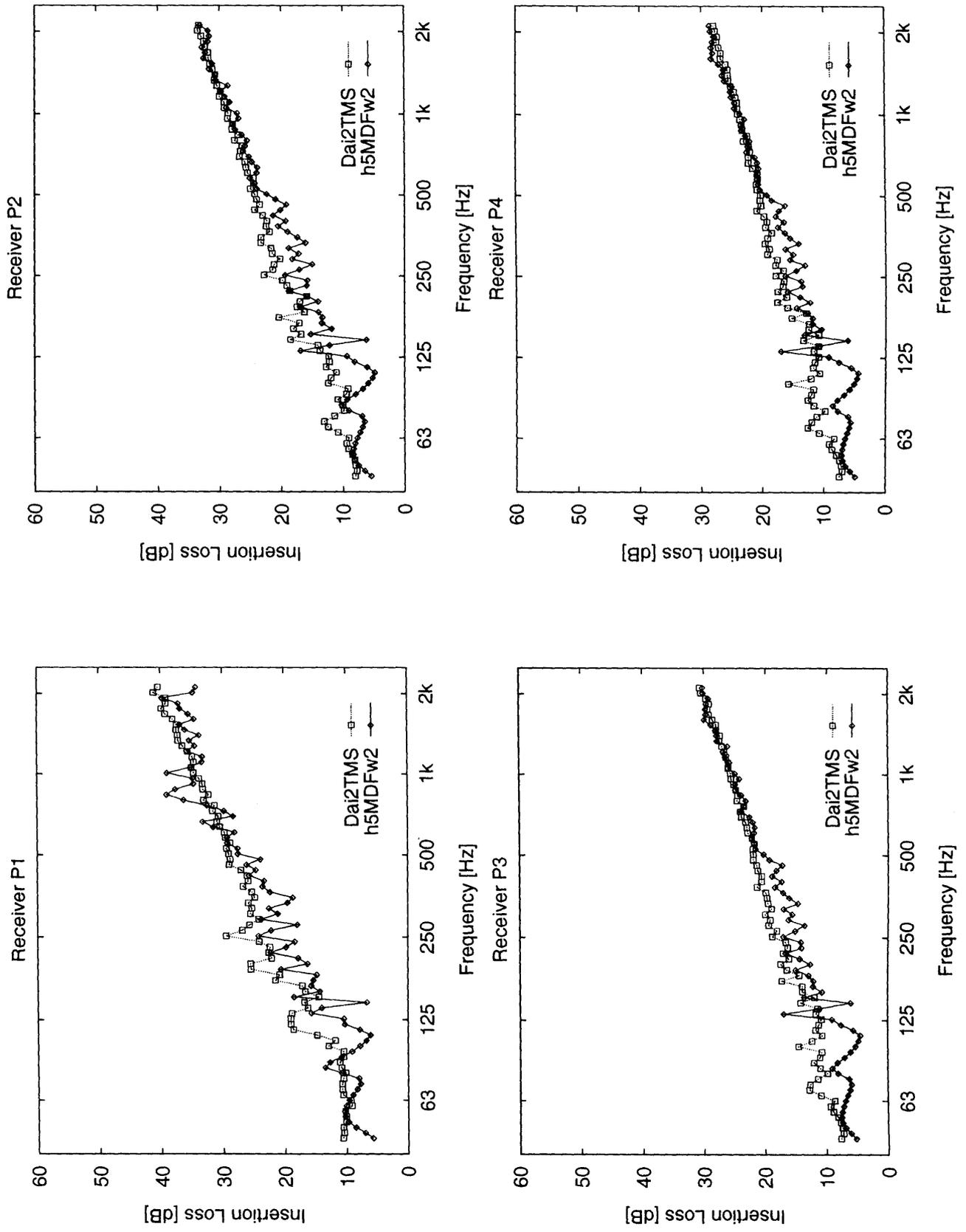


Figure 6.28(1) Calculated spectra of insertion loss for the barriers and geometry shown in Figure 6.25 (P1 ~ P4).

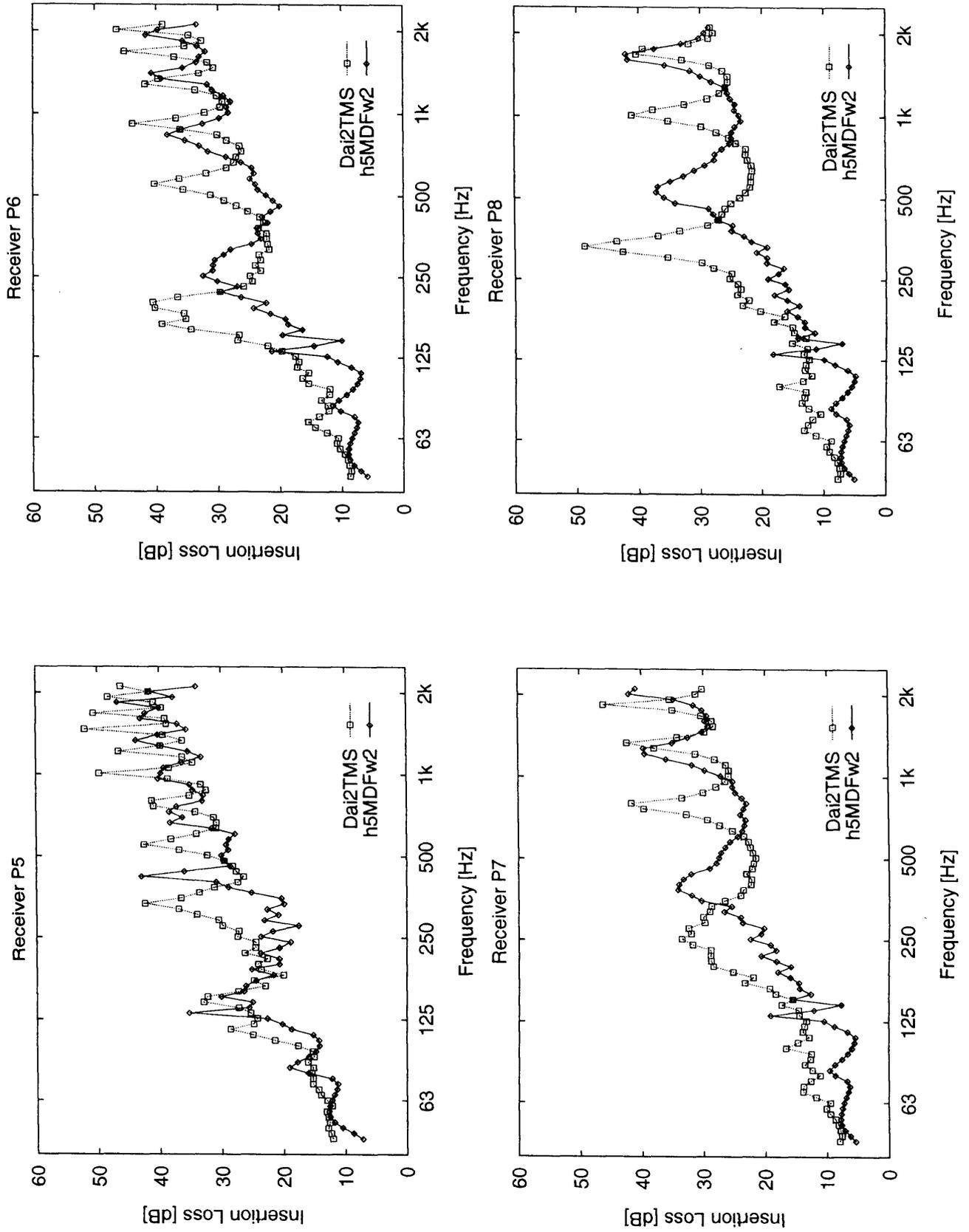


Figure 6.28(2) Calculated spectra of insertion loss for the barriers and geometry shown in Figure 6.25 (P5 ~ P8).

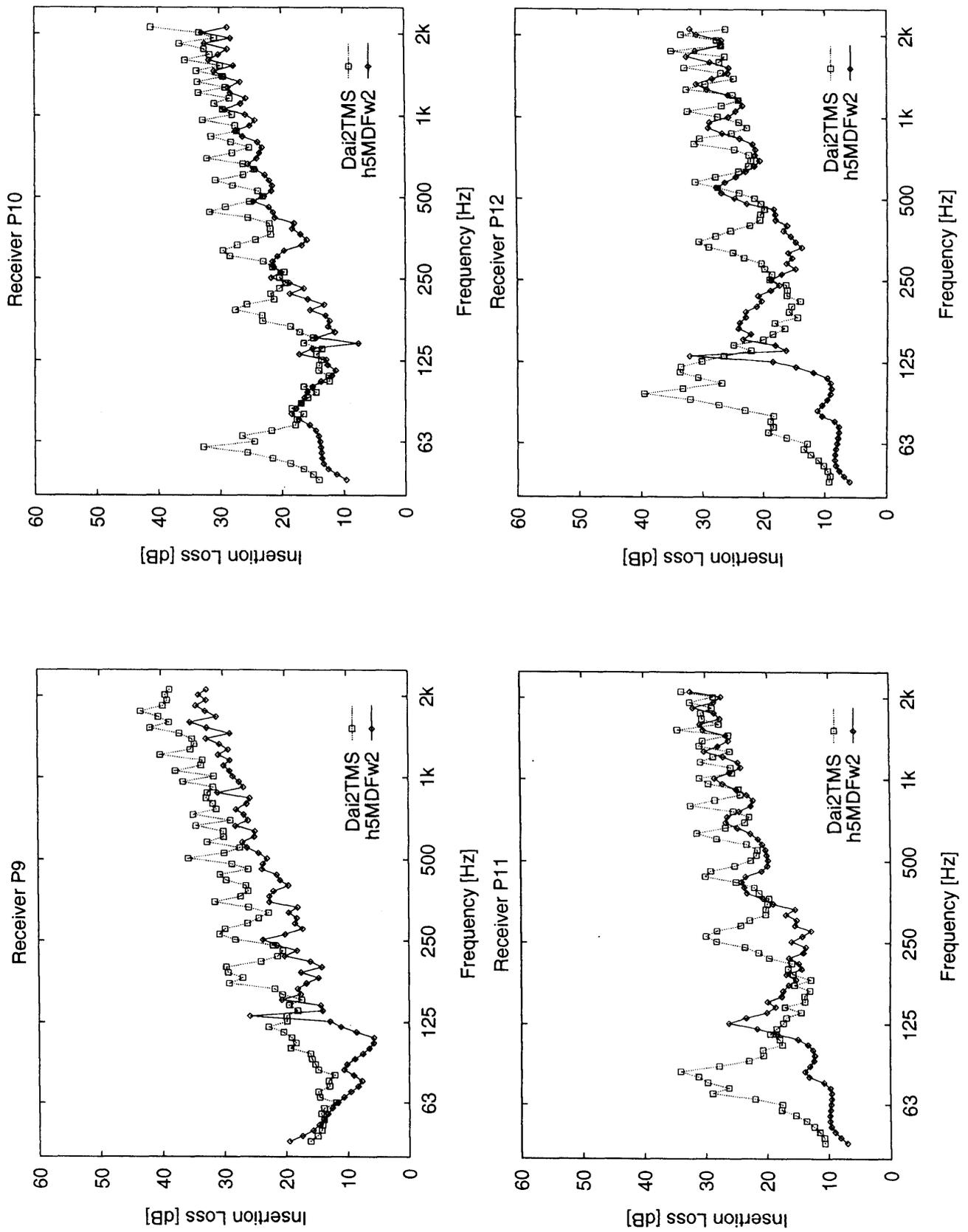


Figure 6.28(3) Calculated spectra of insertion loss for the barriers and geometry shown in Figure 6.25 (P9 ~ P12).

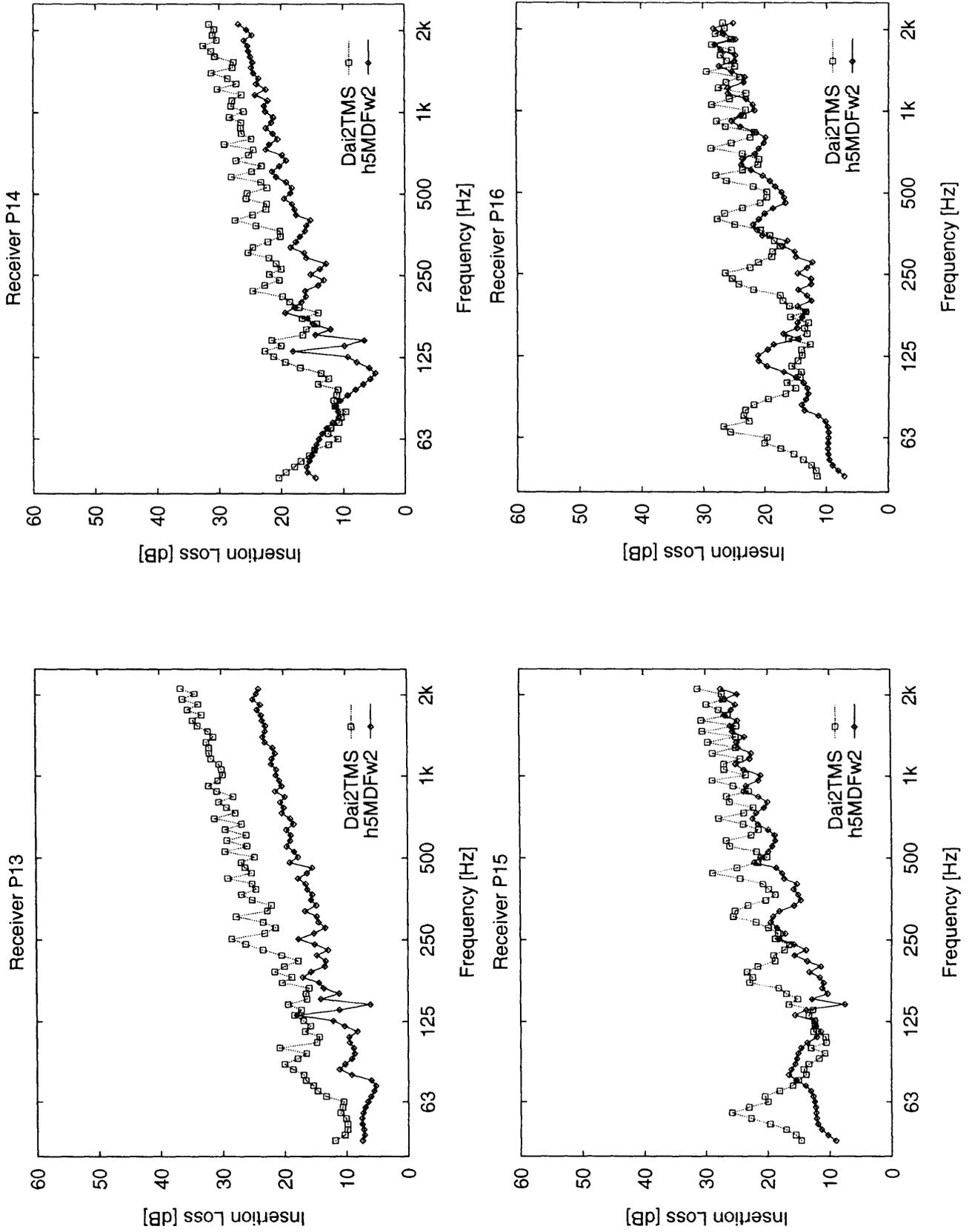


Figure 6.28(4) Calculated spectra of insertion loss for the barriers and geometry shown in Figure 6.25 (P13 ~ P16).

## 6.6 まとめ

有効な周波数領域を広げるため、前章で提案した音響管配列深さが段々変わるような、多数の設計周波数を持つ音響管配列を取り付けた防音壁の遮音効果について数値解析および模型実験を用いて検討を行った。その結果、音響管配列を持つ防音壁は非常に広い周波数領域で同じ高さや幅を持つ剛な T 型防音壁より良い遮音性能を持つことが確認された。2 次元モデルを用いた数値解析結果と 3 次元模型を用いた実験結果を比較した結果、良い対応が得られ、2 次元モデルによる数値解析の妥当性が立証された。最後に、音源と受音点が防音壁に対して垂直方向ではない場合について模型実験によって検討した結果、音源と受音点が防音壁に対して垂直方向ではない場合にも音響管配列を持つ防音壁の遮音効果は大きく変動しないことが分かった。最後に、序論の Figure 1.1 に示した第 2 東名神高速道路の名古屋区間に設置される予定にある高さ 9m、幅 6.3m の巨大な防音壁を高さ 5m の防音壁に押さえる、「h5MDFw2」防音壁の実用化における検討の一環として、両防音壁の遮音効果の比較を行った結果、地面上 3.5m までの八つの受音点において、500Hz～2kHz の高周波数領域における両方の防音壁の遮音効果に大きな差はなかった。

## 第7章

# 総括

防音壁の高さを変えずに遮音量を増やすことを研究の目的とした。その方法として、既存の研究から単純な構造の割に良い効果を示すT型防音壁の上端に音響管を配列し、藤原らによって提案された1/4波長響管配列により実現されたソフトな表面をT型防音壁上端で実現し、その遮音効果について検討を行った。遮音効果の検討においては、近年開領域を含むの散乱音場の解析によく用いられている境界要素法を用い、その結果を模型実験によって確認した。以下では、本研究の内容および研究の成果を簡略してまとめる。

第1章では、本研究を始めるきっかけとなったその背景および研究の必要性について、現在の騒音環境やその対策としての問題点などを例にして、近年報告された幾つかの関連研究の紹介と共に説明した。近年行われている防音壁の遮音性能向上に関する研究は、主に防音壁のエッジポテンシャルの低減にその努力の焦点が絞られている。これは、防音壁のエッジポテンシャルの遮音効果に及ぼす影響がどれだけ大きいかをよく認識した証拠である。本研究もこれを基本的な考え方としていることを示した。第2章では、本研究全般において、防音壁の遮音効果を数値解析で調べる際に用いた境界要素法の紹介およびその原点となるHelmholtz-Huygens積分を定式化した。その後、境界要素法に適用するための計算モデリングにおいては、本研究の目的が地

面上に設置された防音壁の遮音効果を解析することであるため、完全反射性地面を想定した鏡像法を用いた。第3章では、藤原らによって提案された、1/4波長音響管配列により実現されたソフトな表面の効果を境界要素法による数値解析で検証した。一定の幅の中で、一定深さの音響管を配列し、それと同じ外形を持つ、理想的にソフトな境界条件の障害物や剛な障害物との挿入損失を比較し、配列された音響管の長さにより決まる設計周波数とその奇数倍周波数付近で、理想的にソフトな表面とほぼ等しい効果が表れるのを確認した。その後、音響管配列の幅や配列された音響管の幅を変えることによって、音響管配列の遮音効果がどう変化するかを検討した。その結果、配列の効果は音響管の数に比例するが、ある程度を超えると効果は大きく変化しないことが確認された。第4章では、第3章において、周波数に依存はするものの、ソフトな表面の効果が確認された音響管配列をT型防音壁の上端に設け、ソフトなT型防音壁の実現を試みた。音響管配列によるソフトな効果の現れる直前の周波数付近に生じる大きい効果のディップを補うため、その周波数に合わせたもう一つの設計周波数の音響管配列を設定し、それによって元の効果のピークレベルは少々下がるものの、ディップとなった効果がある程度改善されるのが確認された。最後に、1/10縮尺の2次元模型実験を行い、数値解析で調べたこれらの効果を確認した。第4章から得られた結果から、制御対象となる騒音源の周波数スペクトルの主な周波数成分(ドミナントな成分)が狭い帯域に集中された騒音を対策する場合、設計周波数をドミナントな成分の周波数に合わせた音響管配列を持つT型防音壁を用いると、もっとも優れた遮音効果を持つ防音壁が設計できることが予測された。第5章では、道路交通騒音を想定した、広帯域騒音を制御対象とする防音壁の場合、ある周波数帯域に限定された遮音効果は適していないことから、広帯域騒音を対象とする防音壁に用いる、多数の設計周波数を持つ音響管配列を提案した。その一例として、長さが段々変わって行くように音

響管を配列することを想定し、その効果を数値計算および 1/10 縮尺の 2 次元模型実験により確認した。その結果、かなり広い周波数領域で効果の起伏が少ない、ある程度平坦で安定した効果の周波数特性が得られた。

第 6 章では、第 5 章にてその効果が確認された、多数の設計周波数を持つ、長さが段々変わって行くように配列した音響管配列を高さ 3m と 5m の防音壁に取り付け、その遮音効果について検討を行った。本研究における基本型として用いた「T 型」防音壁の長所を生かして、未来型として想定した高さ 5m の防音壁は、幅 1m と 2m の 2 種類の音響管配列を想定した。同じ音響管配列を持ちながら、その高さだけを 3m から 5m にした場合、剛な垂直型防音壁は剛な T 型防音壁に比べて遮音量が大幅に増えた。最後に、高さ 5m に幅 2m の音響管配列を持つ防音壁に対しては、1/10 縮尺の 3 次元模型実験で計算結果の妥当性が確認された。最後に、音響管配列を持つ T 型防音壁の実用化における検討の一環として、第 2 東名神高速道路の名古屋区間に設置される予定にある高さ 9m、幅 6.3m の巨大な防音壁と「h5MDFw2」防音壁の遮音性能を比較した結果、路面から 3.5m 付近までにおいて 500~2kHz の高周波数領域における両方の防音壁の遮音効果は平均値で 1dB 以内であることが確認された。しかし、低周波数領域(50~500Hz)ではその差は 3.5dB 程度あり、多少の問題が残された。

以上、上端に音響管が配列された T 型防音壁の遮音効果について、2 次元境界要素法を用いた数値解析および模型実験により検討を行い、その効果を確認した。今後の研究としては、500Hz 以下の低周波数領域における遮音性能の向上が取り上げられる。

## 参考文献

- [1] 尾本章, 藤原恭司, “防音塀エッジポテンシャルの能動消去”  
日本音響学会誌, 47, pp.801-808, 1991.
- [2] A. Omoto and K. Fujiwara, “A study of an actively controlled noise barrier,”  
J. Acoust. Soc. Am. 94, pp.2173-2180, 1993.
- [3] 尾本章, “障壁による回折音の能動制御に関する研究,” 東京大学博士論文, 1995.
- [4] A. Omoto, K. Fujiwara, M. Aoki and Y. Shimizu,  
“Active suppression of sound diffracted by a barrier: An outdoor experiment,”  
J. Acoust. Soc. Am. 102, pp.1671-1679, 1997.
- [5] D.N. May, M.M. Osman,  
“The performance of sound absorptive, reflective, and T-profile noise barriers in  
Toronto,”  
J. Sound Vib. vol. 71(1) pp.65-71, 1980.
- [6] D.N. May, M.M. Osman, “Highway noise barriers: new shapes,”  
J. Sound Vib. vol. 71(1) pp.73-101, 1980.
- [7] D.C. Hothersall, D.H. Crombie, and S.N. Chandler-Wilde,  
“The performance of T-profile and associated noise barriers,”  
Applied acoustics, vol. 32, pp.269-287, 1991.
- [8] 藤原恭司, “吸音性円筒エッジを持つ防音塀の遮音性能について”,  
騒音制御工学会技術発表講論集, pp.257 - 260, 1987.
- [9] K. Fujiwara, N. Furuta,  
“Sound shielding efficiency of a barrier with a cylinder at the edge,”  
Noise control engineering journal, vol. 37, No.1, pp.5-11, 1991.

- [10] D.H. Crombie, D.C. Hothersall and S.N. Chandler-Wilde, "Multiple-edge noise barriers,"  
Applied acoustics, vol. 44, pp.353-369, 1995.
- [11] G.R. Watts, D.H. Crombie, D.C. Hothersall,  
"Acoustic performance of new designs of traffic noise barriers: full scale tests,"  
J. Sound Vib. vol. 177, pp.289-305, 1994.
- [12] G.R. Watts, P.A. Morgan,  
"Acoustic performance of an Interference-type noise-barrier profile,"  
Applied acoustics, vol. 49, pp.1-16, 1996.
- [13] Iida, k., Kondoh, Y. and Okado, Y., "Research on a device for reducing noise,"  
Transport Res. Record, 983, pp.51-54, 1984.
- [14] 大久保朝直, 藤原恭司, "ソフトな円筒エッジを持つ防音壁の遮音性能,"  
日本音響学会誌, vol. 52, pp. 957-966, 1996.
- [15] 藤原恭司, 四元英治, "ソフトな表面を持つ防音壁の遮音性能,"  
日本騒音制御工学会 技術発表会 講演論文集, pp.265-268, 1991.
- [16] 藤原恭司, 四元英治, "ソフトな表面を持つ防音壁の遮音性能 その2,"  
日本騒音制御工学会 技術発表会 講演論文集, pp.73-76, 1992.
- [17] 藤原恭司, 四元英治, "ソフトな表面を持つ防音壁について,"  
日本音響学会 騒音・振動研究会資料 N-92-07, 1992.
- [18] 大久保朝直 "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,"  
九州芸術工科大学 修士論文, 1996.
- [19] C.A. Brebbia 著, 神谷紀生, 田中正隆, 田中喜久昭 共訳,  
境界要素法入門, 培風館, 1980.
- [20] C.A. Brebbia, S. Walker 共著, 神谷紀生, 田中正隆, 田中喜久昭 共訳,  
境界要素法の基礎と応用, 培風館, 1981.

- [21] C.A. Brebbia, J.C.F. Telles, L.C. Wrobel 共著, 田中正隆 訳,  
境界要素解析—理論と応用, (株)丸善, 1984.
- [22] C.A. Brebbia 編, 田中正隆 監訳,  
境界要素法の応用 1・2, (株)企画センター, 1983.
- [23] 戸川隼人, 下関正義 共訳,  
パソコンによる境界要素法入門, (株)サイエンス社, 1984.
- [24] 加川幸雄 著, 開領域問題のための有限/境界要素法, (株)サイエンス社, 1983.
- [25] 加川幸雄, 池内雅紀 共著,  
電気・電子のための有限/境界要素法—波動問題への応用, (株)オーム社, 1984.
- [26] K. Fujiwara, D.C. Hothersall and C. Kim, “Noise Barriers with Reactive Surfaces,”  
Applied acoustics, vol. 53, pp.255-272, 1998.
- [27] 広江正明, 加来治郎, “鉄道騒音にたいする防音壁の減音効果について,”  
日本音響学会 騒音・振動研究会資料 N-95-12, 1995.
- [28] R. Seznec, “Diffraction of sound around barriers; use of the boundary elements technique,”  
J. Sound Vib. vol.73, pp. 195-209, 1980.
- [29] D.C. Hothersall, S.N. Chandler-Wilde, and M.N. Hajmirzae,  
“Efficiency of single noise barriers,” J. Sound Vib. vol.146, pp. 303-322, 1980.
- [30] 前出, [15].
- [31] 前出, [16].
- [32] 前出, [17].
- [33] 前川純一, 建築・環境音響学, (共立出版, 1990.), p77.
- [34] 前出, [27].
- [35] 前出, [28].

- [36] L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens, J.V. Sanders,  
Fundamentals of acoustics, (John Wiley & Sons, 1982.), pp. 200 ~ 201.
- [37] 前出, [5].
- [38] 前出, [6].
- [39] 前出, [7].
- [40] 前出, [6].
- [41] 前出, [7].
- [42] 藤本卓也, “スリット型共鳴器の低周波域吸音特性に関する研究,”  
九州芸術工科大学 博士論文, pp. 34 ~ 35. 1995.
- [43] P. Juhl, “A numerical study of the coefficient matrix of the boundary element method near  
characteristic frequencies,” J. Sound and Vib. vol. 175, pp. 39 ~ 50, 1994.
- [44] 山本貢平, “新型遮音壁の現状とコンペの方法について,”  
日本音響学会 騒音・振動研究会 資料 N-97-31, 1997.
- [45] 田中俊光, 藤川猛, 阿部亨, 宇津野秀夫, “境界要素法による二次元音場の解析,”  
日本機声学会論文集(C編), vol.50, pp.848 ~ 857. 1984.
- [46] 田中俊光, 藤川猛, 阿部亨, 宇津野秀夫,  
“境界要素法による二次元音場の解析 (第2報),”  
日本機声学会論文集(C編), vol.50, pp.2356 ~ 2363. 1984.
- [47] 藤塚桂男, 西田公至, “境界要素法による回折音場の解析,”  
日本機声学会論文集(C編), vol.52, pp.1937 ~ 1944. 1986.
- [48] 西田公至, 藤塚桂男, “有限長障壁による音波回折の境界要素解析,”  
日本音響学会誌, vol.44, pp.815 ~ 823. 1988.

- [49] 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.
- [50] 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 (その 2),”  
日本音響学会講演論文集, pp. 697~698. 1997. 3.
- [51] 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 (その 3),”  
日本音響学会講演論文集, pp. 731~732. 1997. 9.
- [52] 金哲煥, 藤原恭司, “上端に音響管配列を持つ T 型防音壁の遮音性能に関する研究,”  
日本音響学会 騒音・振動研究会資料, N-97-34. 1997.
- [53] 金哲煥, 藤原恭司, “音響管配列による T 型防音壁の遮音性能に関する研究,”  
日本音響学会誌 (受理済み).

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、常に的確なご指導とご助言を賜りました藤原恭司教授に心より御礼申し上げます。博士後期課程に入った当初から本論文が書き終わるまで、ご多忙の中でも始終丁寧なご指導を頂きましたこと、改めてご感謝申し上げます。

本論文をまとめるにあたり、多くの貴重なご助言を頂きました津村尚志教授、鈴木俊行教授に厚く御礼申し上げます。それから、身も心も疲れたとき、いつも温かい言葉で激励して頂きました尾本章助教授に深甚なるご謝意を表します。日頃の公私的相談や実験の便宜、それから何よりも、日常生活において常に前向きな姿勢を見習わせて頂きました鳥原秀男文部技官に心よりご感謝申し上げます。博士後期糧大学院生大久保朝直氏には、境界要素法やそのプログラミング、研究における多くのご助言やご協力を頂きましたこと、厚く感謝致します。日本に来た当初に身元保証人となって頂き、温かい対話で慣れない日本生活の寂しさを慰めて頂きました中島祥好助教授とそのご家族に厚く御礼申し上げます。学事業務において常にご親切に便宜を与えて頂きました九州芸術工科大学の職員皆様に感謝致します。

最後に、国費奨学生に選抜して頂き、研究だけに専念できますよう博士後期課程の3年間に渡って奨学金を支給して頂きました日本国文部省に厚く感謝致します。

## 付録

# 様々な防音壁の遮音性能の比較

本研究において、T型防音壁の上端に音響管配列を設けることにより防音壁の遮音効果が大幅に改善されることが確認された。ここでは、高さや上端の幅が異なるT型防音壁の上端に音響管配列を設けた防音壁と、これらと高さが等しい幾つかの防音壁を想定し、それぞれの遮音効果について比較を行う。比較は、防音壁の高さや上端の幅によって次のように三つの「CASE」に分けて行うことにする。

### 1. 「CASE-1」の防音壁

- (i) h3HP.....高さ 3m の剛な垂直型防音壁.
- (ii) h3HDPw05.....高さ 3m, 幅 0.5m の剛な 2 重の垂直型防音壁.
- (iii) h3HTw1.....高さ 3m, 上端の幅 1m の剛な T 型防音壁.
- (iv) h3MDFw05-A.....高さ 3m, 上端の幅 0.5m の左右対称の音響管配列を持つ防音壁.
- (v) h3MDFw05-A.....高さ 3m, 上端の幅 0.5m の左右非対称の音響管配列を持つ防音壁.

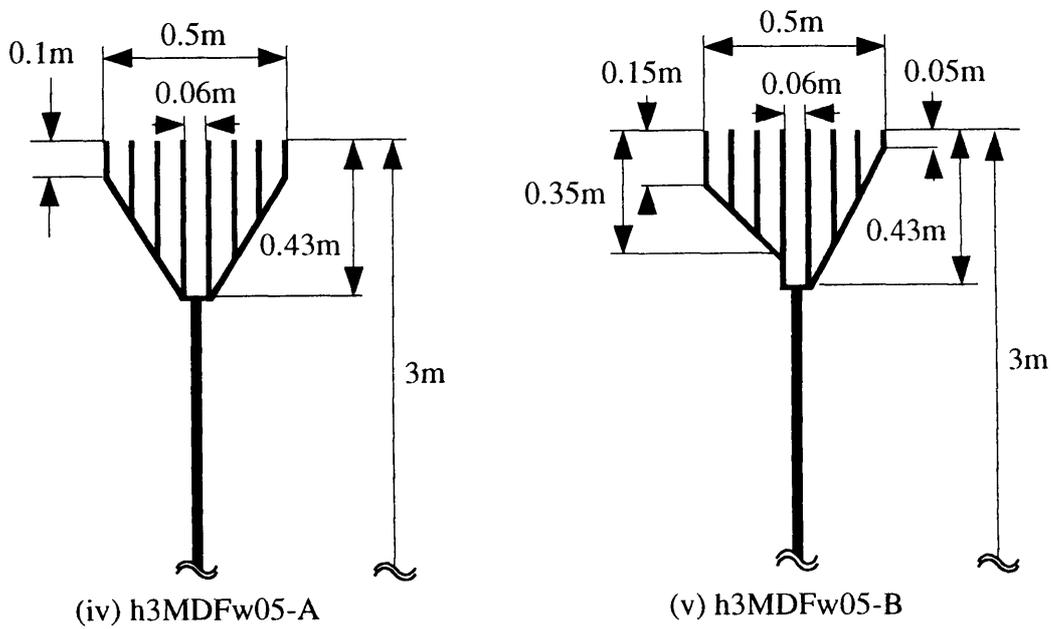
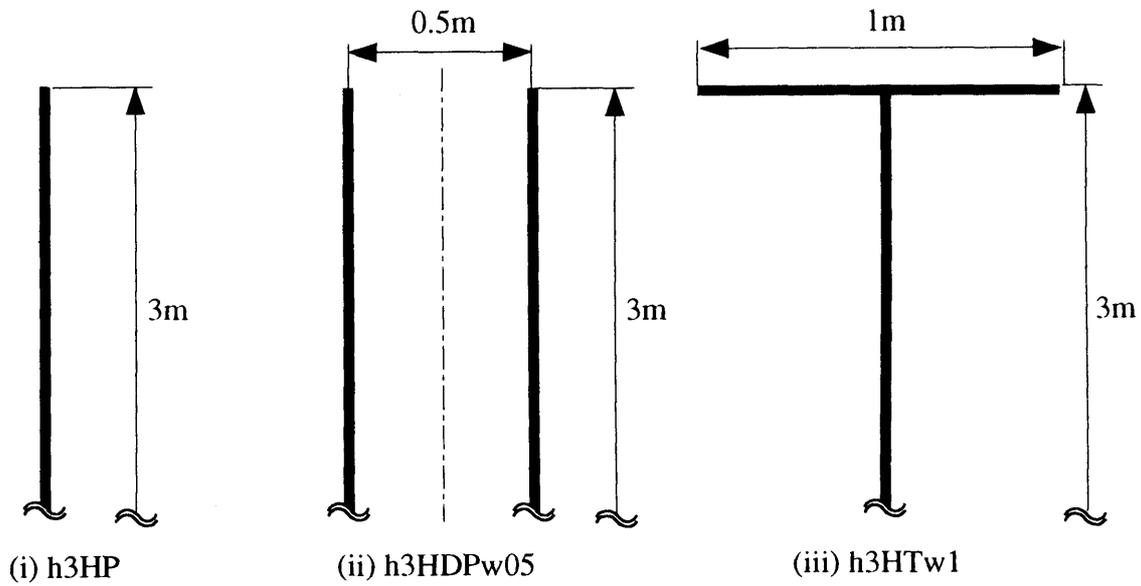
## 2. 「CASE-2」の防音壁

- (I) h5HP.....高さ 5m の剛な垂直形防音壁.
- (ii) h5HDPw1.....高さ 5m, 幅 1m の剛な 2 重の垂直形防音壁.
- (iii) h5HTw1.....高さ 5m, 上端の幅 1m の剛な T 形防音壁.
- (iv) h5MDFw1.....高さ 5m, 上端の幅 1m の音響管配列を持つ防音壁.

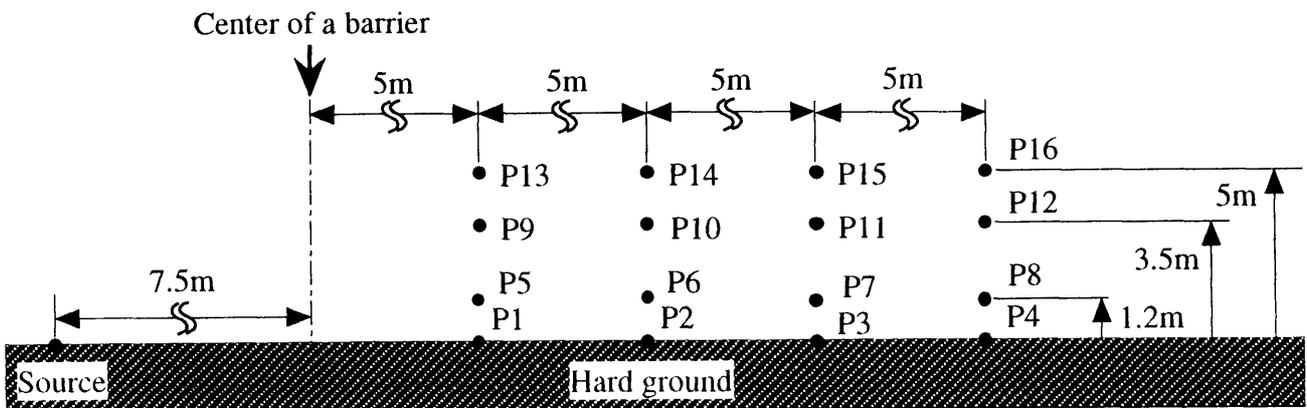
## 3. 「CASE-3」の防音壁

- (I) h5HP.....高さ 5m の剛な垂直形防音壁.
- (ii) h5HDPw2.....高さ 5m, 幅 2m の剛な 2 重の垂直形防音壁.
- (iii) h5HTw2.....高さ 5m, 上端の幅 2m の剛な T 形防音壁.
- (iv) h5MDFw2.....高さ 5m, 上端の幅 2m の音響管配列を持つ防音壁.

以上の防音壁において、本文の第 6 章の Figure 6.10 と Table 6.1 に示したスペクトルを持つ音源を想定した場合、指定された受音点で予測される各々の防音壁のオーバーオール値を求めて比較を行う。



(a) Noise barriers considered in the CASE-1.



(b) Geometry for calculations.

Figure A-1. Noise barriers and geometry for calculations considered in the CASE-1.

Table A. Noise shielding efficiency of barriers in the CASE-1.

(a) Overall SPL(A) [dB(A)]

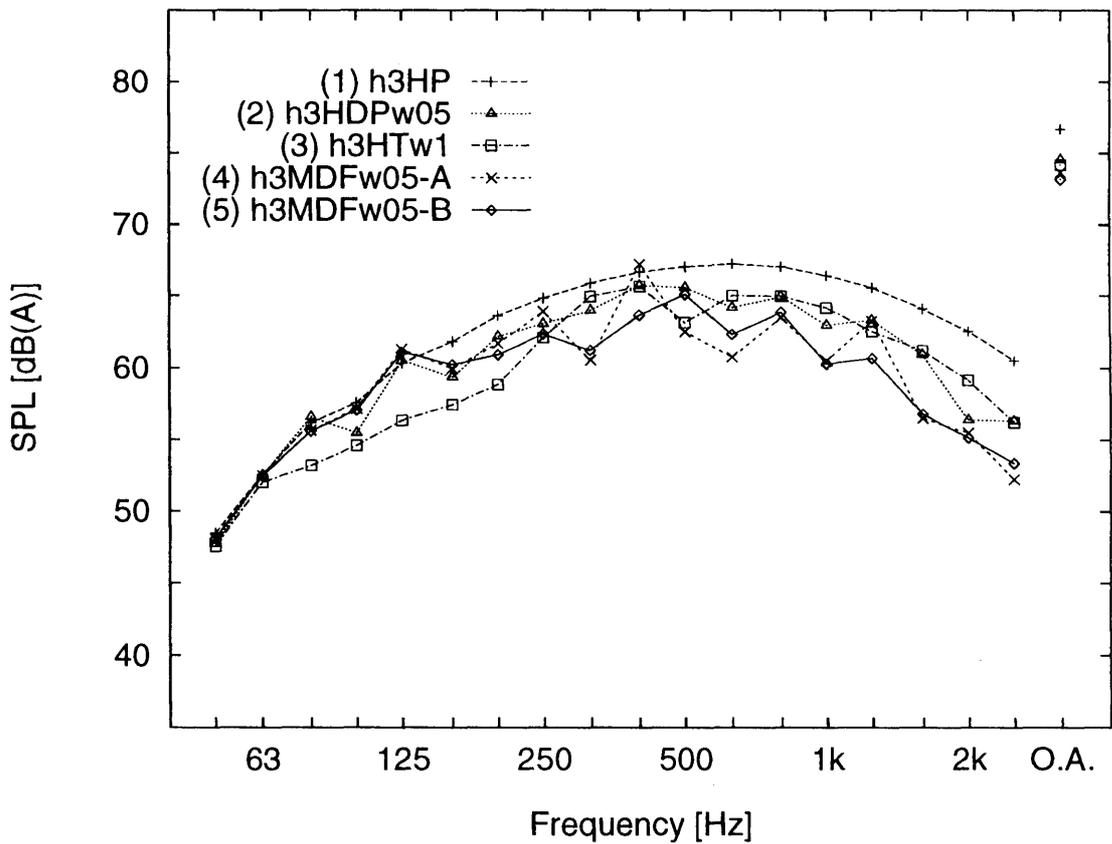
通常舗装	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
半自由空間	93.9	92.5	91.4	90.5	93.9	92.5	91.4	90.5	93.8	92.4	91.3	90.5	93.6	92.3	91.3	90.5
h3HP	78.5	77.9	77.3	76.7	75.9	74.8	73.9	73.1	80.7	77.4	75.7	74.5	88.0	80.3	77.3	75.7
h3HDPw05	75.4	75.4	75.0	74.6	72.7	72.4	71.5	71.0	79.0	75.6	74.0	72.3	86.9	79.0	75.8	74.3
h3HTw1	73.8	74.6	74.5	74.2	71.4	71.7	71.1	70.6	79.4	75.8	74.0	72.8	87.3	79.8	76.4	74.4
h3MDFw05-A	74.3	74.4	74.1	73.7	71.2	71.5	70.2	69.9	78.0	74.4	73.0	71.6	86.4	78.3	74.9	73.3
h3MDFw05-B	73.4	73.8	73.5	73.2	70.9	71.0	70.2	69.8	77.8	74.5	72.6	71.2	86.4	78.3	74.9	73.1
排水性舗装	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
半自由空間	90.6	89.2	88.1	87.2	90.6	89.1	88.1	87.2	90.5	89.1	88.0	87.2	90.3	89.0	88.0	87.1
h3HP	77.0	76.4	75.7	75.1	74.3	73.2	71.9	70.9	78.7	75.7	74.0	72.8	84.7	78.2	75.5	73.9
h3HDPw05	74.5	74.3	73.8	73.3	71.7	71.4	70.0	69.1	77.3	74.0	72.6	70.8	83.7	76.9	74.1	72.7
h3HTw1	72.7	73.2	73.0	72.7	70.0	70.3	69.1	68.3	77.3	73.9	72.1	71.2	84.2	77.4	74.3	72.5
h3MDFw05-A	73.6	73.6	73.2	72.7	70.3	70.7	68.8	68.4	76.4	73.0	71.7	70.2	83.2	76.4	73.2	72.0
h3MDFw05-B	72.8	73.0	72.6	72.2	70.2	70.2	69.0	68.3	76.2	73.2	71.3	69.8	83.2	76.4	73.4	71.6

(b) Overall IL [dB]

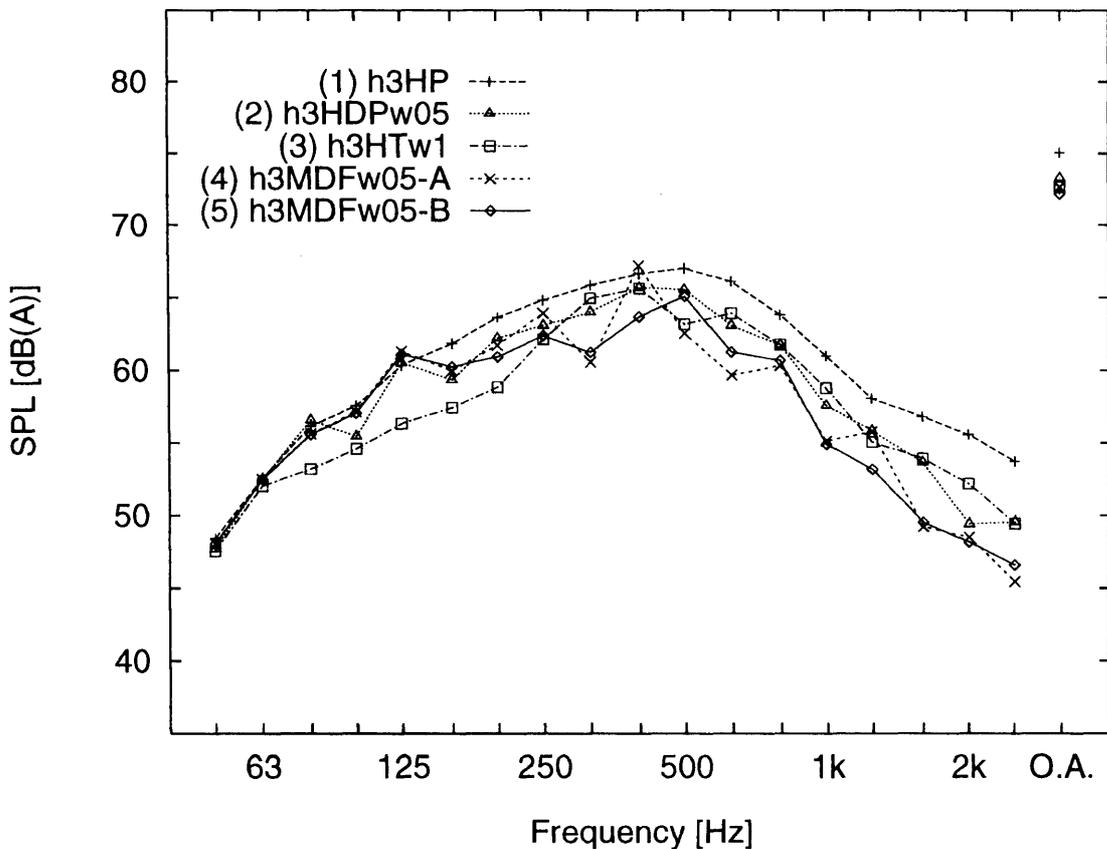
通常舗装	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
h3HP	15.4	14.6	14.1	13.8	18.0	17.7	17.5	17.4	13.1	15.0	15.6	16.0	5.6	12.0	14.0	14.8
h3HDPw05	18.5	17.1	16.4	15.9	21.2	20.1	19.9	19.5	14.8	16.8	17.3	18.2	6.7	13.3	15.5	16.2
h3HTw1	20.1	17.9	16.9	16.3	22.5	20.8	20.3	19.9	14.4	16.6	17.3	17.7	6.3	12.5	14.9	16.1
h3MDFw05-A	19.6	18.1	17.3	16.8	22.7	21.0	21.2	20.6	15.8	18.0	18.3	18.9	7.2	14.0	16.4	17.2
h3MDFw05-B	20.5	18.7	17.9	17.3	23.0	21.5	21.2	20.7	16.0	17.9	18.7	19.3	7.2	14.0	16.4	17.4
排水性舗装	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
h3HP	13.6	12.8	12.4	12.1	16.3	15.9	16.2	16.3	11.8	13.4	14.0	14.4	5.6	10.8	12.5	13.2
h3HDPw05	16.1	14.9	14.3	13.9	18.9	17.7	18.1	18.1	13.2	15.1	15.4	16.4	6.6	12.1	13.9	14.4
h3HTw1	17.9	16.0	15.1	14.5	20.6	18.8	19.0	18.9	13.2	15.2	15.9	16.0	6.1	11.6	13.7	14.6
h3MDFw05-A	17.0	15.6	14.9	14.5	20.3	18.4	19.3	18.8	14.1	16.1	16.3	17.0	7.1	12.6	14.8	15.1
h3MDFw05-B	17.8	16.2	15.5	15.0	20.4	18.9	19.1	18.9	14.3	15.9	16.7	17.4	7.1	12.6	14.6	15.5

(c) The arithmetical means of Overall IL [dB]

		h3HP	h3HDPw05	h3HTw1	h3MDFw05-A	h3MDFw05-B
P1 ~ P16 平均值	通常舗装	14.7	16.7	16.9	17.7	18.0
	排水性舗装	13.2	14.9	15.4	15.7	16.0
P1 ~ P8 平均值	通常舗装	16.1	18.6	19.3	19.7	20.1
	排水性舗装	14.5	16.5	17.6	17.4	17.7
P9 ~ P16 平均值	通常舗装	13.3	14.9	14.5	15.7	15.9
	排水性舗装	12.0	13.4	13.3	14.1	14.3

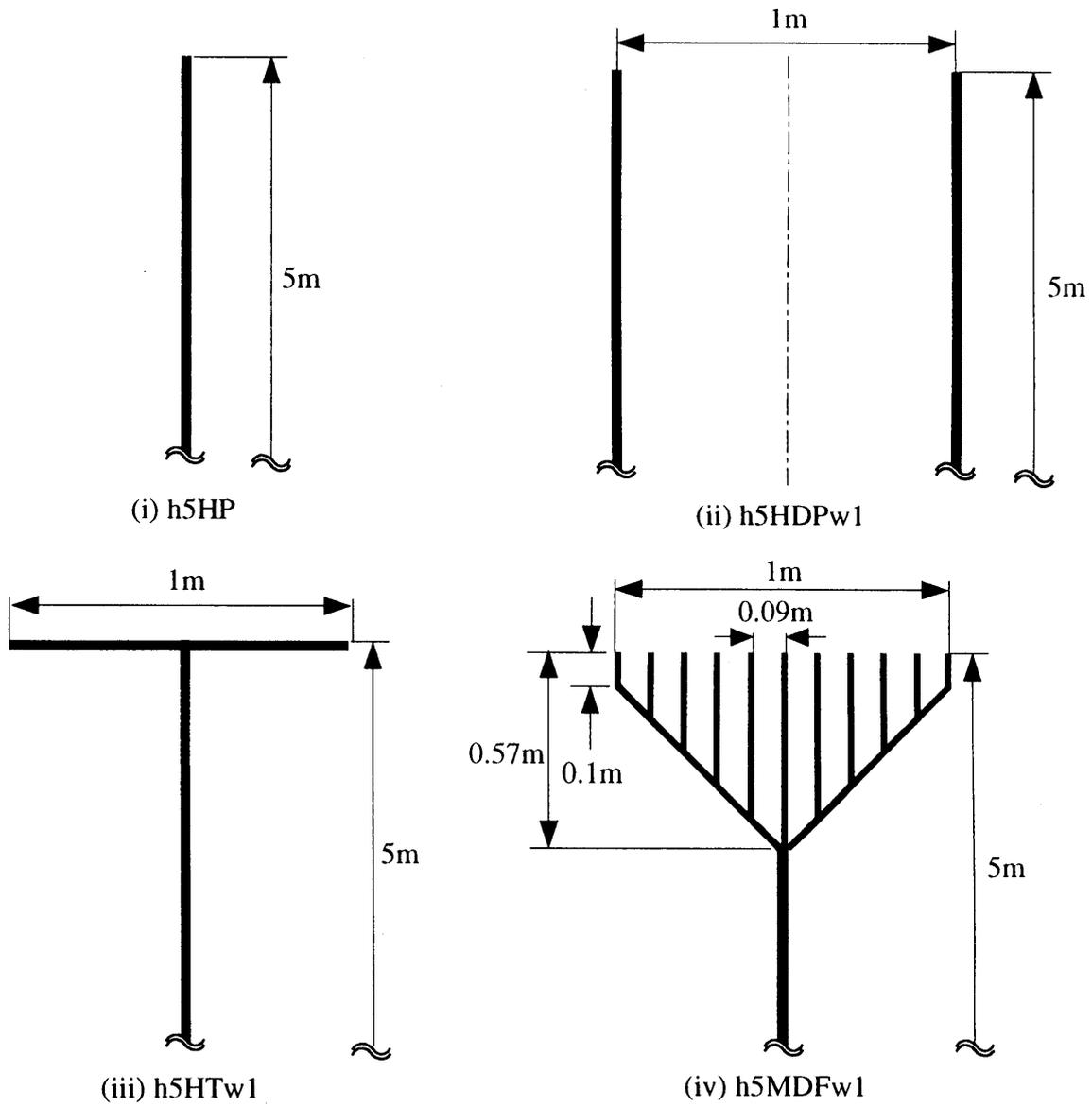


(a) In the case of using the normal pavement source spectrum.

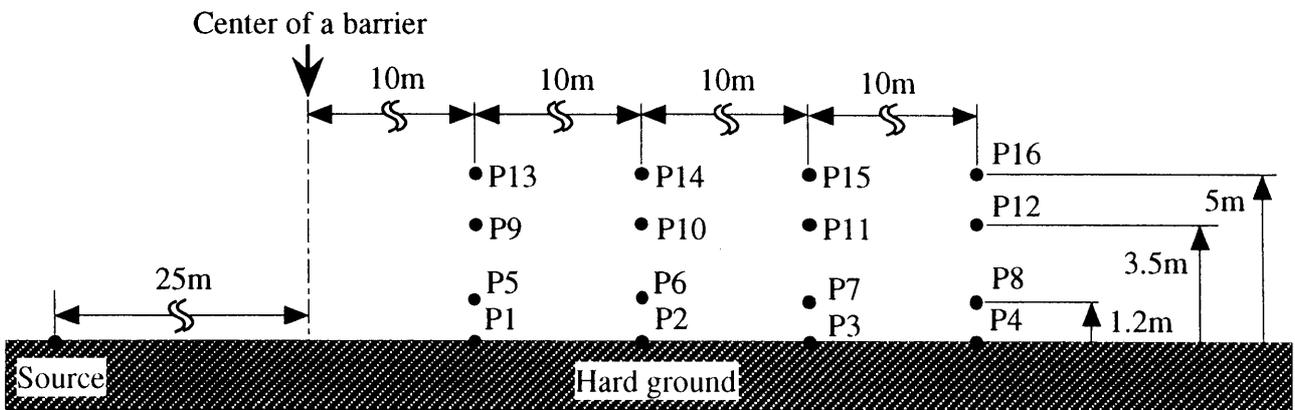


(b) In the case of using the porous pavement source spectrum.

Figure A-2. Calculated SPL spectra at receiver P4 in the CASE-1.



(a) Noise barriers considered in the CASE-2.



(b) Geometry for calculations.

Figure A-3. Noise barriers and geometry for calculations considered in the CASE-2.

Table B. Noise shielding efficiency of barriers in the CASE-2.

(a) Overall SPL(A) [dB(A)]

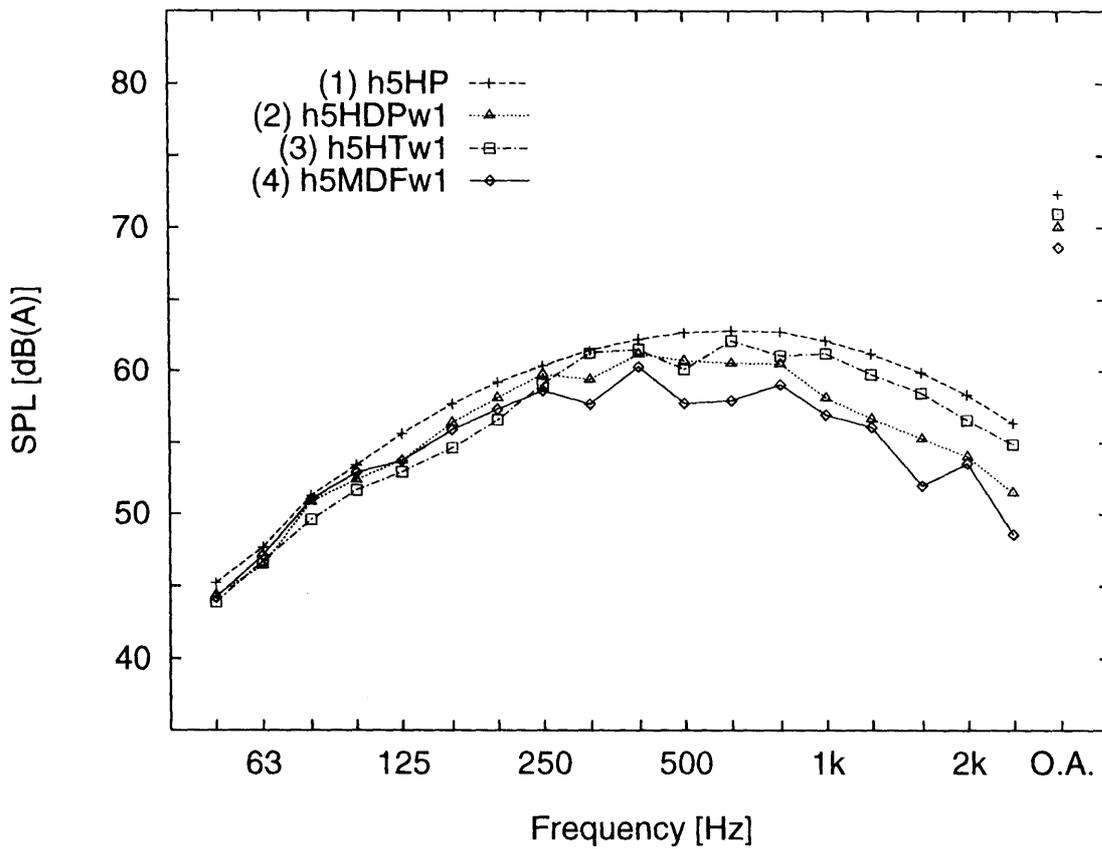
通常舗装	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
半自由空間	89.5	88.4	87.5	86.8	89.5	88.4	87.5	86.8	89.5	88.4	87.5	86.8	89.4	88.4	87.5	86.8
h5HP	72.8	72.9	72.7	72.3	69.9	69.6	69.2	68.8	72.2	71.4	70.6	69.9	75.4	73.1	71.7	70.7
h5HDPw1	69.3	70.0	70.2	70.0	66.3	66.7	66.5	66.3	69.3	69.2	68.3	67.7	73.4	71.1	69.8	69.0
h5HTw1	69.9	71.0	71.1	71.0	67.2	67.6	67.6	67.3	70.3	70.0	69.4	68.8	74.4	72.1	70.7	69.8
h5MDFw1	66.6	68.3	68.6	68.6	63.6	64.6	65.1	65.4	67.5	67.6	66.8	66.6	72.1	70.1	68.8	67.6
排水性舗装	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
半自由空間	86.1	85.1	84.2	83.5	86.1	85.1	84.2	83.5	86.1	85.0	84.2	83.4	86.1	85.0	84.2	83.4
h5HP	71.3	71.3	71.1	70.7	68.3	67.9	67.0	66.6	70.6	69.7	68.8	68.1	73.5	71.3	70.0	69.0
h5HDPw1	68.5	69.1	69.1	68.9	65.5	65.7	64.9	64.9	68.3	68.0	67.2	66.4	71.9	69.7	68.5	67.6
h5HTw1	68.5	69.4	69.5	69.3	65.9	65.8	65.3	65.1	68.7	68.2	67.7	67.2	72.5	70.3	68.9	67.9
h5MDFw1	65.9	67.3	67.6	67.5	62.8	63.5	63.7	64.0	66.5	66.5	65.5	65.3	70.5	68.6	67.4	66.2

(b) Overall IL [dB]

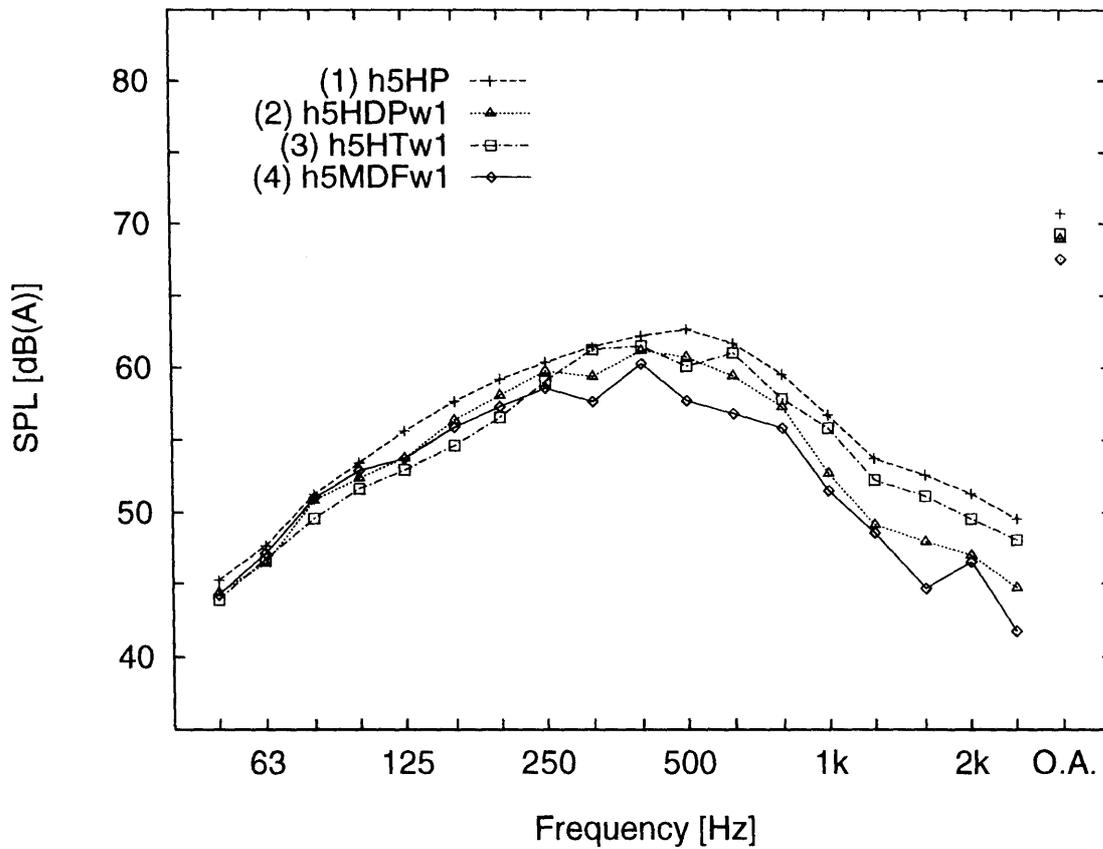
通常舗装	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
h5HP	16.7	15.5	14.8	14.5	19.6	18.8	18.3	18.0	17.3	17.0	16.9	16.9	14.0	15.3	15.8	16.1
h5HDPw1	20.2	18.4	17.3	16.8	23.2	21.7	21.0	20.5	20.2	19.2	19.2	19.1	16.0	17.3	17.7	17.8
h5HTw1	19.6	17.4	16.4	15.8	22.3	20.8	19.9	19.5	19.2	18.4	18.1	18.0	15.0	16.3	16.8	17.0
h5MDFw1	22.9	20.1	18.9	18.2	25.9	23.8	22.4	21.4	22.0	20.8	20.7	20.2	17.3	18.3	18.7	19.2
排水性舗装	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
h5HP	14.8	13.8	13.1	12.8	17.8	17.2	17.2	16.9	15.5	15.3	15.4	15.3	12.6	13.7	14.2	14.4
h5HDPw1	17.6	16.0	15.1	14.6	20.6	19.4	19.3	18.6	17.8	17.0	17.0	17.0	14.2	15.3	15.7	15.8
h5HTw1	17.6	15.7	14.7	14.2	20.2	19.3	18.9	18.4	17.4	16.8	16.5	16.2	13.6	14.7	15.3	15.5
h5MDFw1	20.2	17.8	16.6	16.0	23.3	21.6	20.5	19.5	19.6	18.5	18.7	18.1	15.6	16.4	16.8	17.2

(c) The arithmetical means of Overall IL [dB]

		h5HP	h5HDPw1	h5HTw1	h5MDFw1
P1 ~ P16	通常舗装	16.6	19.1	18.2	20.7
平均値	排水性舗装	15.0	16.9	16.6	18.5
P1 ~ P8	通常舗装	17.0	19.9	19.0	21.7
平均値	排水性舗装	15.5	17.7	17.4	19.4
P9 ~ P16	通常舗装	16.2	18.3	17.4	19.7
平均値	排水性舗装	14.6	16.2	15.8	17.6

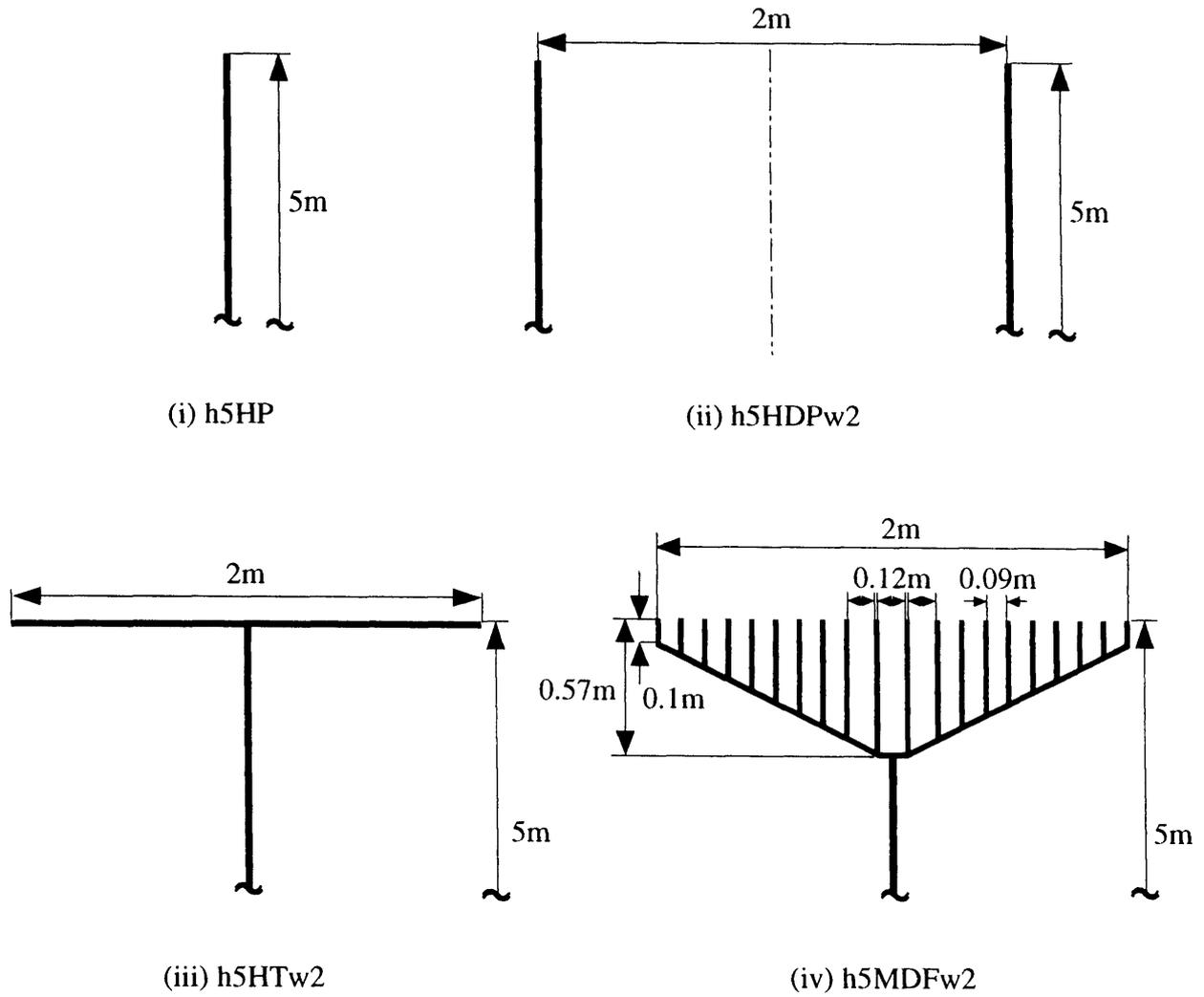


(a) In the case of using the normal pavement source spectrum.

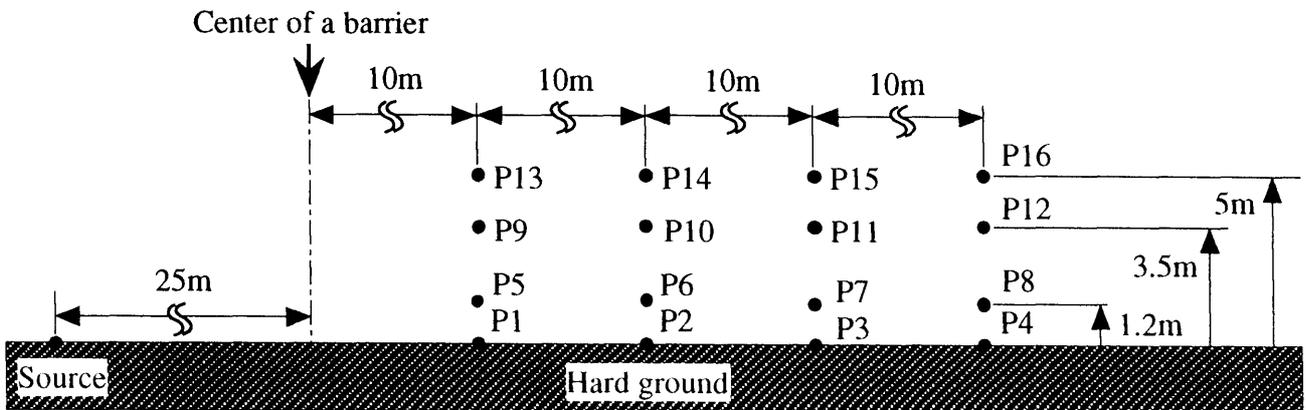


(b) In the case of using the porous pavement source spectrum.

Figure A-4. Calculated SPL spectra at receiver P4 in the CASE-2.



(a) Noise barriers considered in the CASE-3.



(b) Geometry for calculations.

Figure A-5. Noise barriers and geometry for calculations considered in the CASE-3.

Table C. Noise shielding efficiency of barriers in the CASE-3.

(a) Overall SPL(A)

[dB(A)]

通常舗装	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
半自由空間	89.5	88.4	87.5	86.8	89.5	88.4	87.5	86.8	89.5	88.4	87.5	86.8	89.4	88.4	87.5	86.8
h5HP	72.8	72.9	72.7	72.3	69.9	69.6	69.2	68.8	72.2	71.4	70.6	69.9	75.4	73.1	71.7	70.7
h5HDPw2	67.4	68.6	68.9	68.9	64.7	65.3	65.7	66.5	67.9	68.0	67.6	66.8	72.5	70.3	69.1	68.1
h5HTw2	69.0	70.5	70.8	70.7	66.2	67.3	67.3	67.2	69.9	69.7	69.1	68.5	74.4	72.0	70.7	69.7
h5MDFw2	63.9	65.8	66.4	66.6	59.9	62.5	63.2	63.6	65.1	65.3	64.7	64.5	70.1	68.2	66.9	66.8
排水性舗装	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
半自由空間	86.1	85.1	84.2	83.5	86.1	85.1	84.2	83.5	86.1	85.0	84.2	83.4	86.1	85.0	84.2	83.4
h5HP	71.3	71.3	71.1	70.7	68.3	67.9	67.0	66.6	70.6	69.7	68.8	68.1	73.5	71.3	70.0	69.0
h5HDPw2	66.4	67.5	67.7	67.7	63.4	64.1	63.9	63.8	66.6	66.6	66.1	65.2	70.8	68.6	67.5	66.6
h5HTw2	67.8	69.1	69.3	69.2	65.0	65.8	65.3	65.0	68.4	68.1	67.4	66.8	72.4	70.2	68.8	67.9
h5MDFw2	63.7	65.3	65.8	65.8	59.5	62.0	62.3	62.6	64.4	64.3	63.7	63.5	68.7	67.0	65.6	64.6

(b) Overall IL

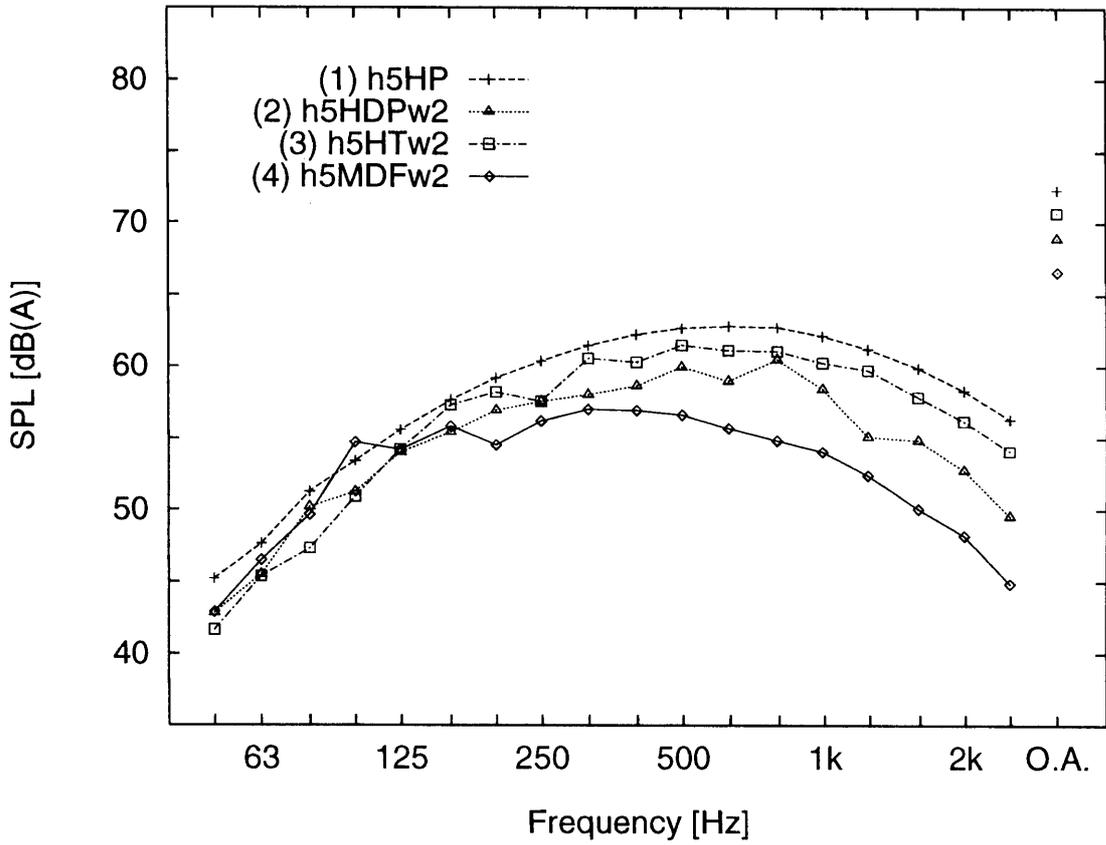
[dB(A)]

通常舗装	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
h5HP	16.7	15.5	14.8	14.5	19.6	18.8	18.3	18.0	17.3	17.0	16.9	16.9	14.0	15.3	15.8	16.1
h5HDPw2	22.1	19.8	18.6	17.9	24.8	23.1	21.8	20.3	21.6	20.4	19.9	20.0	16.9	18.1	18.4	18.7
h5HTw2	20.5	17.9	16.7	16.1	23.3	21.1	20.2	19.6	19.6	18.7	18.4	18.3	15.0	16.4	16.8	17.1
h5MDFw2	25.6	22.6	21.1	20.2	29.6	25.9	24.3	23.2	24.4	23.1	22.8	22.3	19.3	20.2	20.6	20.0
排水性舗装	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
h5HP	14.8	13.8	13.1	12.8	17.8	17.2	17.2	16.9	15.5	15.3	15.4	15.3	12.6	13.7	14.2	14.4
h5HDPw2	19.7	17.6	16.5	15.8	22.7	21.0	20.3	19.7	19.5	18.4	18.1	18.2	15.3	16.4	16.7	16.8
h5HTw2	18.3	16.0	14.9	14.3	21.1	19.3	18.9	18.5	17.7	16.9	16.8	16.6	13.7	14.8	15.4	15.5
h5MDFw2	22.4	19.8	18.4	17.7	26.6	23.1	21.9	20.9	21.7	20.7	20.5	19.9	17.4	18.0	18.6	18.8

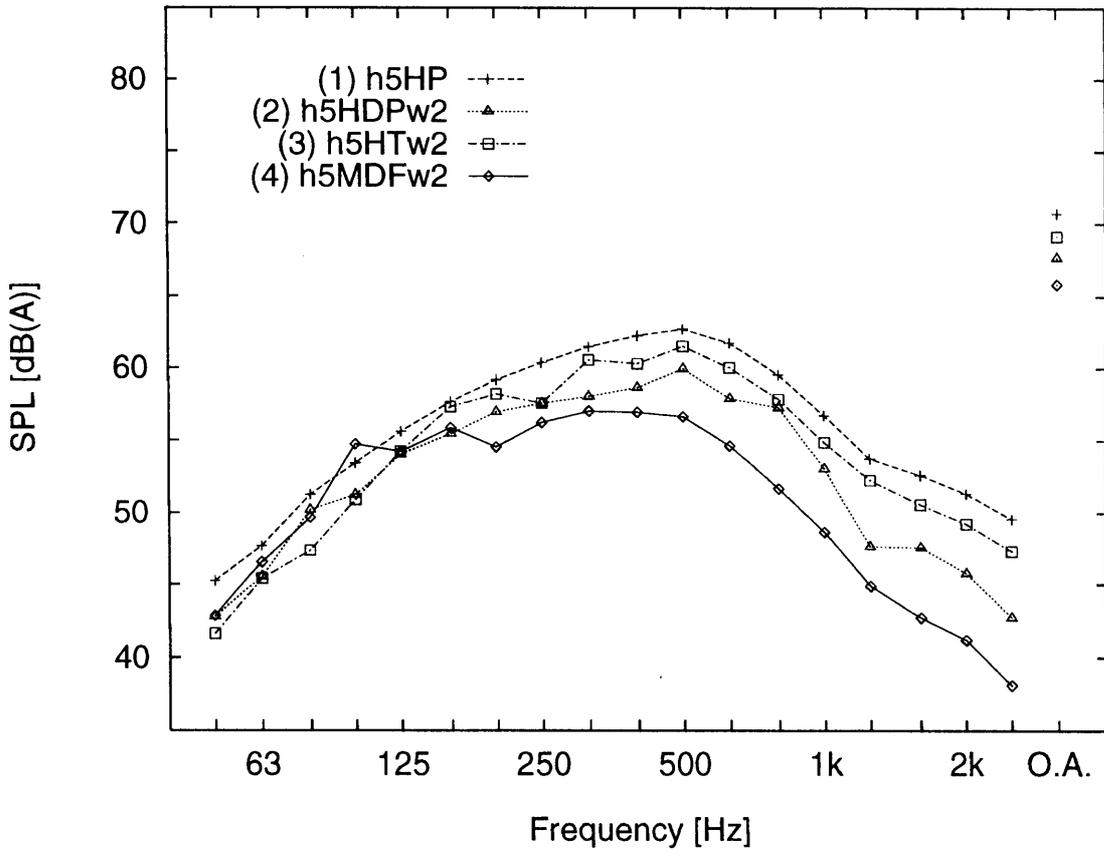
(c) The arithmetical means of Overall IL

[dB]

		h5HP	h5HDPw2	h5HTw2	h5MDFw2
P1~P16 平均値	通常舗装	16.6	20.2	18.5	22.8
	排水性舗装	15.0	18.3	16.8	20.4
P1~P8 平均値	通常舗装	17.0	21.9	19.4	24.1
	排水性舗装	15.5	19.2	17.7	21.4
P9~P16 平均値	通常舗装	16.2	19.3	17.5	21.6
	排水性舗装	14.6	17.4	15.9	19.5



(a) In the case of using the normal pavement source spectrum.



(b) In the case of using the porous pavement source spectrum.

Figure A-6. Calculated SPL spectra at receiver P4 in the CASE-3.