

土 木 研 究 所 資 料

障壁による道路交通騒音低減効果の
予測・評価方法に関する研究

平成11年10月

建設省土木研究所
環境部交通環境研究室

Copyright © (1999) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

障壁による道路交通騒音低減効果の 予測・評価方法に関する研究

交通環境研究室 主任研究員 上坂克巳*

室長 大西博文

元 研究員 鉢嶺清範

要 旨

本研究は、沿道に立地する建物および騒音対策に用いる各種の遮音壁の双方を、音の伝搬に影響を与える音響的障害物である「障壁」として捉え、それらの障壁による道路交通騒音低減効果の予測・評価方法の検討を行ったものである。ここでは、障壁背後の特定地点の道路交通騒音を等価騒音レベル (L_{Aeq}) を評価指標として予測するだけでなく、新たに提案した区間平均等価騒音レベル (Section-averaged equivalent continuous A-weighted sound pressure level, $SA \cdot L_{Aeq}$) を評価指標として評価区間の平均的な L_{Aeq} を予測する方法を検討した。その結果、多重障壁、厚みのある障壁、有限長障壁、低層遮音壁、沿道の単独建物および沿道の建物群背後における L_{Aeq} および $SA \cdot L_{Aeq}$ の予測計算を簡便に行うことが可能となった。なお、各種の提案式の妥当性は、主に模型実験により検証された。

キーワード：障壁、低層遮音壁、沿道建物、騒音レベルの区間評価、道路交通騒音の予測

*博士 (工学)

目 次

序 論	1
第 1 章 研究の背景とねらい	4
1. 1 研究の背景と目的	4
1. 2 道路交通騒音予測の基本的な方法	6
1.2.1 L_{Aeq} 計算の基本原則	6
1.2.2 伝搬計算 B 法と障壁による減音効果の計算	7
1.2.3 自動車走行騒音のパワーレベルとパワースペクトル	8
1. 3 本論文における各種障壁および減音効果の定義	9
1.3.1 障壁	9
1.3.2 減音効果	11
1. 4 障壁による減音効果の予測方法に関する従来の研究とその課題	12
1.4.1 半無限障壁	12
1.4.2 厚みのある障壁	13
1.4.3 多重障壁	15
1.4.4 有限長障壁	17
1.4.5 低層遮音壁	17
1.4.6 道路に面した建物および建物群	18
1. 5 従来の道路交通騒音の評価方法とその課題	20
1. 6 本研究のねらい	20
1.6.1 予測方法	20
1.6.2 評価方法	21
第 2 章 厚みのある障壁、多重障壁による減音効果の予測方法	22
2. 1 はじめに	22
2. 2 模型実験による厚みのある障壁、二重障壁による減音量の差異の検討	22
2.2.1 模型実験の方法	23
2.2.2 実験結果の分析	25

2. 3	反射性厚み障壁による減音量の計算方法	28
2.3.1	高木の方法の拡張	28
2.3.2	模型実験値および波動理論計算値との比較	31
2. 4	障壁高さが等しい二重障壁による減音量の計算方法	35
2.4.1	受音点が二重障壁の上端と同じ高さにある場合の回折効果の検討	35
2.4.2	障壁間の多重反射の影響を考慮した計算方法の提案	37
2.4.3	模型実験による検証	39
2. 5	吸音性厚み障壁による減音量の計算方法	42
2.5.1	反射性厚み障壁及び二重障壁による減音量を用いた計算式の提案	42
2.5.2	計算式の適用範囲の検討と模型実験による検証	43
2. 6	障壁間隔が大きい三重障壁による減音量の計算方法	46
2.6.1	計算方法	46
2.6.2	模型実験値および BEM 計算値との比較	49
2. 7	まとめ	51
第 3 章	地面上に設置された複数の有限長障壁による減音効果の予測・評価方法	52
3. 1	はじめに	52
3. 2	一列に並んだ複数の有限長障壁による減音効果の計算方法	52
3.2.1	単独の有限長障壁による減音量計算のための山本、高木らの方法の応用	52
3.2.2	1パスの方法	54
3.2.3	模型実験による検証	55
3.2.4	線音源に対する見通し角法の妥当性の検討	57
3. 3	集合した有限長障壁による減音効果の区間評価	59
3. 4	まとめ	60
第 4 章	低層遮音壁による減音効果の予測・評価方法	61
4. 1	はじめに	61
4. 2	低層遮音壁の特徴と予測・評価における課題	61
4. 3	低層遮音壁による減音効果の評価方法	62
4. 4	透過損失の小さいパネルタイプ及び植栽柵タイプに対する見通し角法の拡張	63
4.4.1	無限長の透過損失の小さいパネルタイプによる挿入損失の計算方法	63
4.4.2	複数の植栽柵タイプによる挿入損失の計算方法	64
4.4.3	見通し角法の拡張	70

4. 5	十分長い直線道路における $SA \cdot IL$ の簡易計算方法	71
4.5.1	パネルタイプにおける開口率と $SA \cdot IL$ の関係	71
4.5.2	パネルタイプの場合の簡易計算方法	73
4.5.3	簡易計算方法の透過損失の小さいパネルタイプ, 植栽柵タイプへの拡張	76
4. 6	低層遮音壁の設計パラメータと減音効果の関係	77
4.6.1	評価区間長, 開口率と $SA \cdot IL$ の関係	77
4.6.2	パネルタイプに許容される透過損失	78
4.6.3	パネルタイプと植栽柵タイプの $IL^{(LS)}$, $SA \cdot IL$, $\overline{SA \cdot IL}$ の差異	78
4. 7	実車の場合の減音効果に関する考察	80
4. 8	まとめ	80
第5章	道路に面した単独建物後方の騒音レベルの予測方法	82
5. 1	はじめに	82
5. 2	地面上の反射性厚み障壁による挿入損失の計算方法	82
5.2.1	計算方法	82
5.2.2	模型実験による検証	83
5. 3	単独建物による挿入損失の計算方法	85
5.3.1	4パスの方法	85
5.3.2	模型実験による検証	87
5.3.3	考察	89
5. 4	計算方法の簡略化の検討	90
5.4.1	建物側壁面での反射音を考慮した1パスの方法	90
5.4.2	模型実験値との比較	91
5.4.3	計算方法の簡略化	92
5. 5	建物群背後の特定地点での L_{Aeq} 計算の可能性に関する考察	95
5. 6	まとめ	96
第6章	道路に面した市街地における騒音レベルの予測・評価方法	97
6. 1	はじめに	97
6. 2	市街地のモデル化と騒音レベルの計算方法	97
6.2.1	市街地における騒音レベルの区間評価	97
6.2.2	市街地における $SA \cdot L_{Aeq}$ 計算の基本的考え方	98
6.2.3	市街地のモデル化と建物パラメータ	98
6.2.4	市街地における $SA \cdot IL$ の計算方法	100

6.3	道路近接建物列直後における $SA \cdot IL$ 計算方法の検証と簡略化の検討	103
6.3.1	模型実験による検証	103
6.3.2	計算方法の簡略化の検討	107
6.4	背後建物群を通過する音の超過減衰式の検討	109
6.4.1	模型実験の方法	109
6.4.2	α, β, di および周波数 f と $SA \cdot IL$ の関係	111
6.4.3	背後建物群を通過する音の超過減衰式	113
6.5	背後建物群における $SA \cdot IL$ 計算方法の模型実験による検証	115
6.5.1	平面街路を対象とした模型実験による検証	115
6.5.2	加来らの実験式との比較	116
6.6	現地調査による $SA \cdot L_{Aeq}$ 計算方法の検証	118
6.6.1	対象とした道路および市街地の概要	118
6.6.2	計算値と実測値の比較	120
6.7	まとめ	121
第7章	総括	122
7.1	研究成果のまとめ	122
7.1.1	概要	122
7.1.2	本論文で提案した評価指標	123
7.1.3	本論文で提案した予測計算式	124
7.2	今後の課題	127
謝辞		129
参考文献		130
関連論文		135

序 論

昭和 46 年の閣議決定以来、四半世紀にわたり我が国における騒音の評価基準として用いられてきた「騒音に係る環境基準」が、平成 10 年 9 月 30 日に改定され、平成 11 年 4 月 1 日に施行された。新たな環境基準では、騒音の評価指標が騒音レベルの中央値 (L_{50}) から等価騒音レベル (L_{Aeq}) に改められた。また、道路に面する地域での環境基準の達成状況は、従来のように道路端の位置だけではなく、沿道市街地全体において面的に評価すべきことが示された。

一方、事業実施における環境影響の予測・評価の手続きを明らかにした環境影響評価法が、平成 9 年 6 月に制定され平成 11 年 6 月に施行された。同法では、事業により生じるおそれがある各種の環境影響を、実行可能な環境保全措置を講じることにより回避・低減すべきことが基本理念とされている。そのため、遮音壁をはじめとする騒音対策に関しても、より多様で高度な対策の実施とその効果の正確な予測が、従来にも増して強く求められている。

本論文では、沿道に立地する建物および騒音対策に用いる各種の遮音壁の双方を、音の伝搬に影響を与える音響的障害物である「障壁」として捉える。そして、それらの障壁による減音効果を、 L_{Aeq} を基本的な指標として予測・評価する方法を提案する。このことにより、沿道市街地での騒音レベルの予測・評価および各種遮音壁の合理的な設計に資することを研究の目的とする。

第 1 章では、まず、研究の背景を述べるとともに、本論文で扱う各種障壁を取りまとめて示す。次に、それらの障壁による減音効果の予測方法および道路交通騒音の評価方法に関する従来の研究とその課題を示し、本研究のねらいを明らかにする。

第 2 章では、無限長の障壁が厚みを有する場合や、障壁が平行して複数設置された多重障壁による減音効果の予測計算方法を提案する。なお、厚みのある障壁については、厚み部分が反射性の場合と吸音性の場合に分類し、多重障壁については、特に二重障壁と三重障壁を取り上げ検討を行う。

第 3 章では、地面上に複数の有限長障壁が一行に設置された場合における特定地点での減音効果の予測計算方法を示す。また、集合した有限長障壁背後における評価区間の平均的な騒音レベルおよび障壁による平均的な減音効果を表す指標を定義する。

第 4 章では、一般道路に設置される高さ 1m 程度の低層遮音壁による減音効果の地点及び区間評価の方法並びにそれに対応した予測計算方法を提案する。さらに、これらの方法を用いたケーススタディを行い、低層遮音壁の種々の設計パラメータと減音効果の関係を分析する。

第5章では、道路に面した単独建物後方の特定地点における騒音レベルの予測計算方法を提案する。さらに、受音点位置に応じた計算の簡略化の方法を明らかにする。

第6章では、沿道市街地を、道路に近接する建物列とその背後の建物群に大別してモデル化し、評価区間の平均的な騒音レベルの予測計算方法を提案する。

なお、第2章～第6章で提案する予測計算方法は、主に模型実験値との比較により検証される。

第7章では、研究成果および今後の課題をとりまとめて示す。

なお、第2章、第3章では、厚みのある障壁、多重障壁、複数の有限長障壁による減音効果の基本的な予測・評価方法を示した。一方、第4章～第6章で取り上げる低層遮音壁および沿道の建物・建物群は、有限長で厚みのある障壁の集合体とみなせる。したがって、これらによる減音効果の予測・評価方法は、第2章、第3章の検討結果を応用して発展させたものである。最後に論文の構成と各種障壁による減音効果の予測・評価方法の関連性について、図一序に整理して示す。

【キーワード】 多重障壁、厚みのある障壁、有限長障壁、低層遮音壁、沿道建物、騒音レベルの区間評価、道路交通騒音の予測、模型実験

第1章 研究の背景とねらい

- 背景と目的
- 従来の研究と課題
- 本研究のねらい

基本となる各種障壁による減音効果の予測・評価方法

第2章 厚みのある障壁，多重障壁による減音効果の予測方法

- ・反射性厚み障壁
- ・障壁高さが等しい二重障壁
- ・吸音性厚み障壁
- ・障壁間隔が大きい三重障壁

第3章 地面上に設置された複数の有限長障壁による減音効果の予測・評価方法

- ①地点予測方法
 - ・単独の有限長障壁
 - ・一列に並んだ有限長障壁
- ②区間評価方法
 - ・集合した有限長障壁

種々の低層遮音壁による減音効果の予測・評価方法

第4章 低層遮音壁による減音効果の予測・評価方法

- ①評価方法<地点評価・区間評価>
- ②予測方法<地点予測・区間予測>
 - ・一列に並んだ有限長障壁（パネルタイプ）
 - ・一列に並んだ有限長透過性障壁（パネルタイプ）
 - ・一列に並んだ有限長吸音性厚み障壁（植栽柵タイプ）

道路に面した建物及び建物群背後の騒音レベルの予測・評価方法

第5章 道路に面した単独建物後方の騒音レベルの予測方法

- ・有限長反射性厚み障壁

第6章 道路に面した市街地における騒音レベルの予測・評価方法

- ・集合した有限長反射性厚み障壁

第7章 総括

- 研究成果のまとめ
- 今後の課題

図一序 論文の構成と各種障壁による減音効果の予測・評価方法の関連性

第1章 研究の背景とねらい

1. 1 研究の背景と目的

平成7年7月7日に最高裁判所において、「一般国道43号・阪神高速道路騒音排気ガス等請求事件」に対する判決が下され、騒音等による睡眠・会話などの生活妨害が認容された。この判決は、その後の道路交通騒音の予測・評価および対策技術の進展に大きな影響を与えることになる。

第一に、騒音に係る環境基準の改定が挙げられる。我が国における道路交通騒音の評価は、昭和46年の「騒音に係る環境基準」の閣議決定¹⁾以来、騒音レベルの中央値（以下「 L_{50} 」という）を用いて行われてきた。しかし、上記判決において、損害賠償の対象を L_{50} ではなく等価騒音レベル（以下「 L_{Aeq} 」という）を用いて定めたことから、これを契機に、環境基準及びその評価指標改定の気運が高まった。その後、中央環境審議会での約2年に及ぶ審議を経て、平成10年9月30日に L_{Aeq} を評価指標とする新たな環境基準²⁾（以下「新環境基準」という）が環境庁より告示され、平成11年4月1日に施行された。この結果、今後の環境アセスメント等における道路交通騒音の予測指標も L_{50} から L_{Aeq} へ変更されることとなった。

環境基準改定のもう一つのポイントは、評価地点、評価方法の変更である。これまで、道路に面する地域での環境基準の達成状況の評価は、一般的に道路端の高さ1.2mの地点を代表地点に選定して行われてきた。しかし、新環境基準では、道路に面する地域を、おおむね道路端から15m～20mの「幹線交通を担う道路に近接する空間」と、それ以遠の「背後地」とに分類して異なる基準値を与えている。また、その達成状況の評価は、各々の地域内の住居等のうち基準値を超過する戸数及び超過する割合を把握することにより行うことが示された。その結果、沿道の建物周辺の特定地点の騒音レベルを予測するだけでなく、多数の建物が立地する地域（以下「市街地」という）における道路交通騒音の状況を広域的に予測・評価する方法の必要性が高まっている。なお、これらの方法は、環境アセスメントにおける将来の騒音レベルの予測だけでなく、現状における環境基準の達成状況の把握においても、広く利用されることが予想される。

第二に、上記判決は、騒音対策の重要性を道路交通行政に携わる関係者に再認識させた。建設省では、道路審議会に新たに環境部会を設置し、今後の騒音対策のあり方について重点的に議論を行った。その結果、技術開発の必要性が強く指摘され、これを受け建設省道路局と土木研究所では、道路環境技術開発三箇年計画（平成8年～平成10年）^{3), 4)}を策定した。同計画では、騒音をはじめ大気汚染、振動等の問題に関する31のテーマが選定

されている。この計画に基づき、産官学が連携して緊急に環境保全技術の開発が行われた。本研究に特に関連するテーマとしては、 L_{Aeq} の予測手法、低層遮音壁、広域環境影響評価手法が挙げられる。

一方、上記の最高裁判決と並ぶ大きな出来事としては、平成 9 年 6 月の「環境影響評価法」の制定がある。同法は、事業実施における環境影響の予測・評価の手続きを明らかにしたものである。また、環境影響評価のための調査、予測、評価方法の選定や環境保全措置の実施に関する技術的事項は、平成 10 年 6 月に、各事業種別毎に省令として定められた。さらに、同法は平成 11 年 6 月に施行された。

環境影響評価法では、事業により生じるおそれがある各種の環境影響を、実行可能な環境保全措置を講じることにより回避・低減すべきことが基本理念とされた。そのため、道路交通騒音対策に関しても、より多様で高度な対策の実施とその効果の正確な予測が強く求められている。当然、遮音壁による騒音対策も強化されることになり、その結果、遮音壁の設置形態も複雑化する。たとえば、高架・平面道路併設部やインターチェンジ部に複数の遮音壁を設置する場合や、一般道路に遮音壁を分断して設置する場合などがこれにあたる。これらの場合には、多重障壁および有限長障壁による減音効果の予測・評価が必要不可欠となる。

以上のような背景において、本研究では、第一に、沿道に立地する建物および建物群背後における騒音レベルの予測・評価方法を提案し、沿道市街地における環境基準の達成状況の把握などに役立てることを目的とする。第二に、低層遮音壁をはじめとする各種の形態の遮音壁が複数設置された場合の減音効果の予測・評価方法を明らかにし、それらの合理的な設計に資することを目的とする。なお、予測計算式の検討においては、沿道に立地する巨大な建物から高さ 1m 程度の低層遮音壁までを、音響的障害物である「障壁」として同一視して捉える。そして、各種の障壁をその形態、立地状況から体系化し、それらによる減音効果の計算式を順次関連づけて導く。

本章では、1. 2 において、道路交通騒音予測の基本的方法を紹介し、本論文で示す障壁による減音効果の計算方法との関連性を示す。1. 3 では、本論文で取り上げる障壁および減音効果の定義をとりまとめて示す。1. 4 では、各種の障壁による減音効果の予測計算方法に関する従来の研究とその課題を明らかにする。1. 5 では、従来 of 道路交通騒音の評価方法に関する課題について述べる。最後に、1. 6 では、これらを踏まえ本研究のねらいを明確化する。

1. 2 道路交通騒音予測の基本的な方法

1.2.1 L_{Aeq} 計算の基本原則

上述したように、我が国では、これまで L_{50} を道路交通騒音の予測指標として用いてきた。 L_{50} を予測指標とする計算方法としては、1975 年に日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会によって提案された方法（通称「音響学会式」）⁵⁾ が代表例として挙げられる。この方法は、道路事業の環境アセスメント⁶⁾においても一般的に用いられてきた。

しかし、新環境基準において評価指標が L_{Aeq} に変更されたことから、本研究において用いる予測・評価指標は L_{Aeq} を基本とする。 L_{Aeq} を予測指標とする基本的な計算方法としては、1993 年に日本音響学会の上記委員会がエネルギーベース騒音予測法（ASJ Model - 1993）⁷⁾ を提案している。また、この方法は、1999 年 4 月に ASJ Model 1998⁸⁾ として改訂された。

ASJ Model 1998 における L_{Aeq} 計算の基本式を示す。

$$\begin{aligned} L_{Aeq} &= 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_{AE}/10}{3600}} \cdot N \right) \\ &= L_{AE} + 10 \log_{10} N - 35.6 \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$L_{AE} = 10 \log_{10} \frac{1}{T_0} \sum_i 10^{\frac{L_{pA,i}/10}{10}} \cdot \Delta t_i \quad (1.2)$$

ここで、 L_{Aeq} ：等価騒音レベル[dB]

L_{AE} ：A 特性音圧のユニットパターンの時間積分値を
レベル表示した値（単発騒音暴露レベル）[dB]

N ：交通量[台/時]

$L_{pA,i}$ ：A 特性音圧レベルの時間的変化（ユニットパターン）

$T_0 = 1s$ （基準時間）

$\Delta t_i = \Delta l_i / v_i [s]$,

Δl_i ：離散音源点の間隔[m]， v_i ：走行速度[m/s]

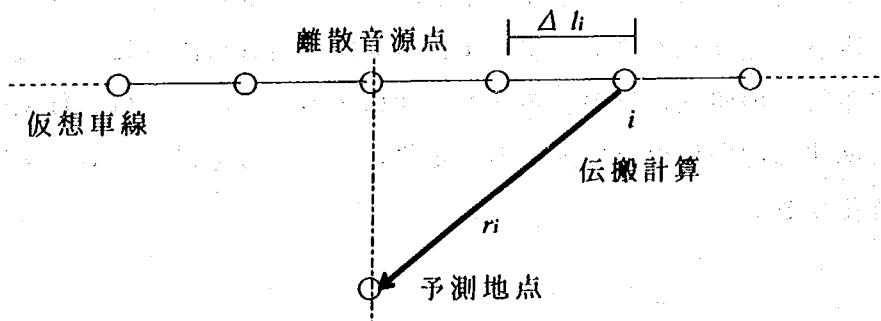


図 1 - 1 音源点の設定と伝搬計算⁸⁾

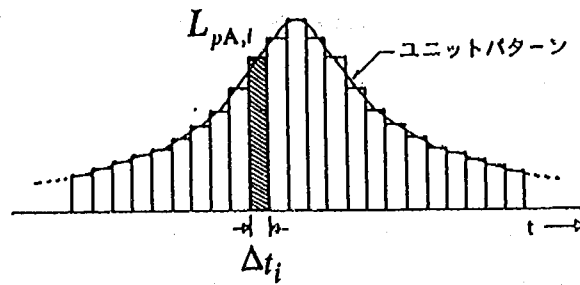


図 1-2 ユニットパターン⁸⁾

計算にあたっては、まず、図 1-1 に示すように、仮想車線上に、無指向性点音源（高さ 0m）を離散的に配置する。そして、1 台の自動車が道路上を単独で走行する時の予測地点における A 特性音圧レベルの時間的変化（ユニットパターン） $L_{pA,i}$ を求める（図 1-2 参照）。さらに、(1.2) 式によりユニットパターンの時間積分値（単発騒音暴露レベル）を求めるとともに、(1.1) 式より 1 時間あたりの交通量 N を考慮して、 L_{Aeq} を計算する。ただし、これらの計算は、車線別・車種別に行い、それらの計算値を合成することにより、予測地点における道路全体からの騒音の L_{Aeq} とする。

1.2.2 伝搬計算B法と障壁による減音効果の計算

ASJ Model 1998 では、点音源から予測地点に至る音の伝搬計算方法として、A 法（精密計算方法）と B 法（簡易計算方法）の 2 種類の方法が提案されている。このうち、A 法は波動音響理論に基づく計算方法であり、計算式は波動の周期性や位相を考慮するため複素数表示の音圧によって表現されている。一方、B 法は幾何音響的取り扱いに基づいた計算方法であり、実験的、経験的な手法が取り入れられている。

本論文では、これらのうち、B 法を基本的な伝搬計算方法として用いることとする。以下、B 法による伝搬計算式を示す。

$$L_{pA,i} = L_{WA} - 8 - 20 \log_{10} r_i + \Delta L_{d,i} + \Delta L_{g,i} \quad (1.3)$$

ここで、

$L_{pA,i}$: 離散音源点 i による A 特性音圧レベル [dB]

L_{WA} : 自動車走行騒音の A 特性パワーレベル [dB] (1.2.3 参照)

r_i : 離散音源点 i から予測地点までの距離 [m]

$\Delta L_{d,i}$: 離散音源点 i に対する回折効果による補正量 [dB]

$\Delta L_{g,i}$: 離散音源点 i に対する地表面効果による補正量 [dB]

(1.3) 式は、半自由空間での幾何減衰を基本とし、遮音壁などによる回折効果および地表面による減衰効果を考慮している。本論文で検討する各種障壁による減音効果の計算方法の大部分は、(1.3) 式の $\Delta L_{d,i}$ を計算するものである。ただし、 $\Delta L_{d,i}$ は「補正量」であ

るため、1.3.2で示す減音量、挿入損失とは符号が逆であることに注意を要する。

なお、本論文では、地面は完全反射の場合を扱うため、 $\Delta L_{gi} = 0$ とする。また、以下、(1.3)式における添字 i は省略するとともに、「予測地点」は、「受音点」または「評価(地)点」ともいう。

1.2.3 自動車走行騒音のパワーレベルとパワースペクトル

ASJ Model 1998 では、(1.3)式における L_{WA} の計算式（以下「パワーレベル式」という）を次の三種類の走行状態に区別して示している。

①定常走行

②信号交差点の存在する一般道路における非定常走行

③インターチェンジ部における加・減速走行および停止

さらに、パワーレベル式は、各々の走行状態において、4車種分類および2車種分類の場合に区別されている。

ここでは、特に、①定常走行区間および②一般道路における非定常走行区間における2車種分類のパワーレベル式を示す。

【定常走行区間】

$$\begin{cases} \text{大型車類: } L_{WA} = 53.2 + 30\log_{10}V \\ \text{小型車類: } L_{WA} = 46.7 + 30\log_{10}V \end{cases} \quad (1.4)$$

ここで、 V : 走行速度[km/時]

【一般道路の非定常走行区間】

$$\begin{cases} \text{大型車類: } L_{WA} = 88.8 + 10\log_{10}V \\ \text{小型車類: } L_{WA} = 82.3 + 10\log_{10}V \end{cases} \quad (1.5)$$

また、ASJ Model 1998 では、図1-3で示される自動車走行騒音の代表パワースペクトルを提案している。以下に、速度区分なしの場合の相対パワーレベルの数式表示を示す。

$$\Delta L(f) = -10\log_{10}\{1 + (f/2,000)^2\} \quad (1.6)$$

ここで、 $\Delta L(f)$ は中心周波数 f の各バンドの相対レベル[dB]である。また、 f はオクターブバンドの中心周波数で63Hz～4kHz、1/3オクターブバンド中心周波数で50Hz～5kHzの範囲とする。

本論文では、障壁による減音効果の計算に必要不可欠(1.4.1参照)な周波数特性として、基本的にこれを用いる。

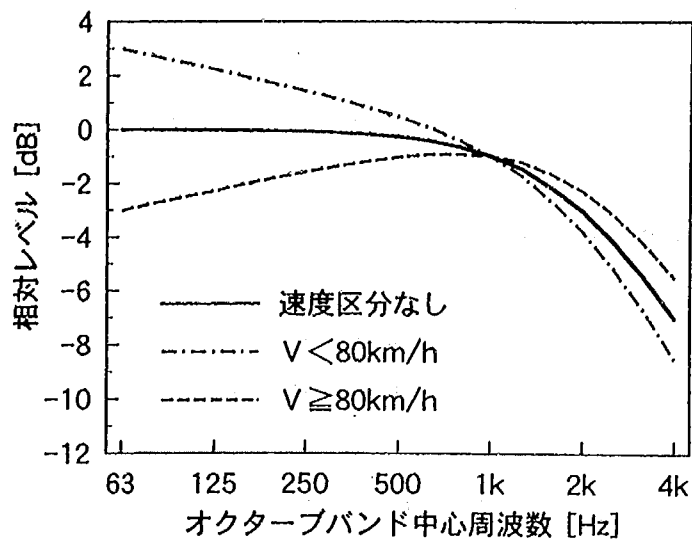


図1-3 予測計算用代表スペクトル⁸⁾

1.3 本論文における各種障壁および減音効果の定義

本論文における各種の障壁およびそれらによる減音効果の定義を以下にとりまとめて示す。

1.3.1 障壁

1) 障壁

音の遮蔽効果を有する壁のこと。道路交通騒音対策用の遮音壁、沿道建物の総称。

2) 半無限障壁

直線のナイフエッジを有する無限長の障壁。自由空間の半分を障壁が占めるため、このように呼ぶ。なお、障壁面は完全反射とする。

3) 厚みのある障壁

以下に示す反射性厚み障壁と吸音性厚み障壁の総称。

4) 反射性厚み障壁

半無限障壁のエッジ部分が厚みを有する障壁。両ウェッジは直角とする。

5) 吸音性厚み障壁

反射性厚み障壁の厚み部分のみが吸音性の障壁。

6) 多重障壁

複数の半無限障壁が平行に並んだもの。2つの半無限障壁が並んだものを二重障壁、3つの半無限障壁が並んだものを三重障壁という。

7) 有限長障壁

半無限障壁の延長が有限のもの。単に有限長障壁という場合は、原則として厚みのない

ものを指すが、厚みのあるものを含めた総称として使うこともある。また、集合した有限長障壁とは、一列あるいは縦横に並んだ有限長障壁をいう。

8)有限長反射性厚み障壁

反射性厚み障壁の延長が有限のもの。沿道建物が該当する。

9)有限長吸音性厚み障壁

吸音性厚み障壁の延長が有限のもの。低層遮音壁の植栽柵タイプが該当する。

10)有限長透過性障壁

減音効果の計算に透過音を考慮しなければならないほど透過損失が小さく、延長が有限のもの。低層遮音壁の透過損失の小さいパネルタイプが該当する。

11)低層遮音壁

都市内の一般道路に設置される高さが 1m 程度の遮音壁のこと。通常、多くの開口部を有するため、複数の有限長障壁が一列に並んだものとみなされる。パネルタイプ（透過損失の小さいものを含む）と植栽柵タイプに大別される。

12)パネルタイプ

パネル形状の低層遮音壁。パネルは反射性とする。

13)透過損失の小さいパネルタイプ

パネルタイプで透過損失が小さく、減音効果の計算に透過音を考慮する必要があるもの。開口部を有する場合は、有限長透過性障壁とみなす。

14)植栽柵タイプ

植栽柵を兼ねた低層遮音壁。吸音性厚み障壁の一種で、開口部を有する場合は、有限長吸音性厚み障壁とみなす。

15)沿道建物

沿道に立地する直方体形状をした表面が反射性の建物。有限長反射性厚み障壁とみなす。

図 1 - 4 に無限長の主な障壁の模式図を、図 1 - 5 に有限長の主な障壁の模式図を示す。

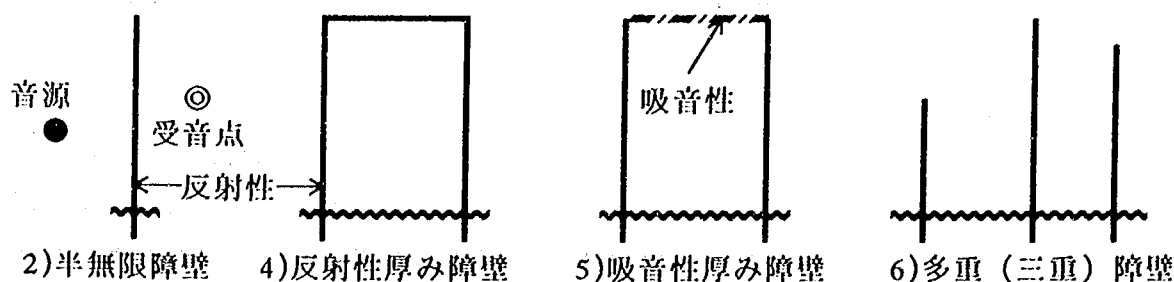


図 1 - 4 無限長の主な障壁の模式図 (断面図)

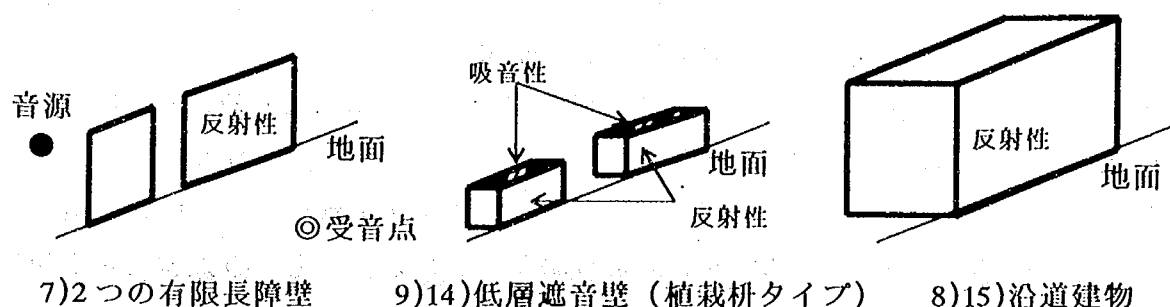


図 1 - 5 有限長の主な障壁の模式図

1.3.2 減音効果

1) 減音量 (Attenuation)

自由空間において障壁を設置する場合の障壁設置前後の音圧レベルの差のこと。減音する場合を正の符号で示す。本論文では、点音源に対する減音量のことをいう。

2) 挿入損失 (Insertion Loss)

地面上に障壁を設置する場合の障壁設置前後の音圧レベルの差のこと。減音する場合を正の符号で示す。本論文では、点音源 (Point Source) に対する挿入損失 $IL^{(PS)}$ 及び線音源 (Line Source) に対する挿入損失 $IL^{(LS)}$ を区別して扱う。

3) 区間平均等価騒音レベル (Section-averaged equivalent continuous A-weighted sound pressure level, $SA \cdot LA_{eq}$)

道路などの線音源に対し、ある評価区間が一定時間に受ける音のエネルギーを、時間的かつ空間的に平均化した場合の騒音レベルのこと。(3.3 参照)

4) 区間平均挿入損失 (Section-averaged Insertion Loss, $SA \cdot IL$)

障壁設置前後の区間平均等価騒音レベルの差のこと。(3.3 参照)

5) 減音効果 (Sound Reduction Effect)

減音量, 挿入損失, 区間平均挿入損失の総称。

1. 4 障壁による減音効果の予測方法に関する従来の研究とその課題

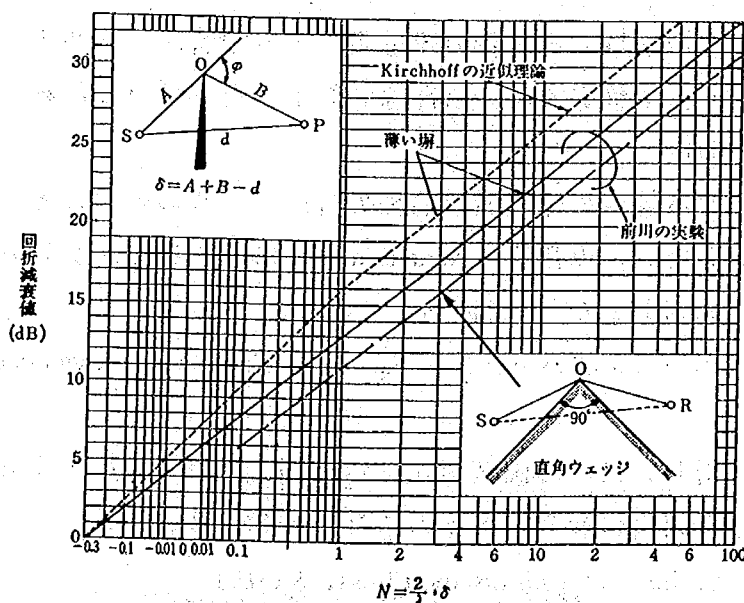
1.4.1 半無限障壁

音の回折効果を算定する基本的理論としては、Huygens-Fresnel の回折原理に基づいた Fresnel-Kirchhoff の近似回折理論⁹⁾が挙げられる。この理論は、本来、障壁面が完全な吸音性の場合に適用できるものであるが、半無限障壁による減音効果の計算にも利用されている。その他、半無限障壁による減音効果の計算方法として、波動音響理論（以下、「波動理論」という）を用いたものとしては、Macdonald の厳密解¹⁰⁾を高い精度で近似した川井の方法¹¹⁾が挙げられる。また、先端がウェッジ（くさび）形状の半無限障壁による減音効果の算定には、Kouyoumjian ら¹²⁾の漸近解などが用いられる。

しかし、点音源に対する半無限障壁による減音量の計算に最も広く使われているのは、図1-6の実線で示される前川の実験チャート^{13), 14)}（以下、「前川チャート」という）である。このチャートでは、音響実験によって得られた減音量（回折減衰値） ΔL を、フレネル数 N ($N = \delta / (\lambda/2)$, δ は回折行路差, λ は波長) という無次元量を用いて整理している。また、このチャートは、次式のように数式化^{15), 16)}されている。

$$\Delta L = \begin{cases} 10 \log_{10} N + 13 & N \geq 1 \\ 5 \pm [8 / \sinh^{-1}(1)] \sinh^{-1}(|N|^{0.485}) & -0.324 \leq N < 1 \\ 0 & N < -0.324 \end{cases} \quad (1.7)$$

（式中の±は、 $N > 0$ のとき正、 $N < 0$ のとき負）



半平面障壁による減衰値、Kirchhoff の近似理論と前川の実験値
 (ただし回折角 $\phi \leq 90^\circ$, λ : 波長, N の正負: S と P が見通せないとき正,
 屏が低く S と P が見通せる場合は、負の値をとる。 $N < -0.3$ のときは減衰
 値 0 とする。破線は直角ウェッジによる減衰値)

図1-6 前川の実験チャート¹⁴⁾

本論文で提案する各種の障壁による減音効果の計算方法では、すべて半無限障壁による減音量を基本量として用いる。また、その計算には(1.7)式を用いる。

なお、前川チャートは、数 dB 以下のばらつきをもつ実験値に対し、どの実験値も実験チャートより 1dB 程度以上小さくならないように決定されている¹³⁾。その結果、これにより計算された回折減音量は、実際の減音量に対して、やや小さい値を示す傾向にある。

その他、半無限障壁による回折効果の簡易計算式としては、Kurze ら¹⁷⁾の提案式がある。また、半無限障壁の表面が吸音性の場合における波動理論に基づく計算式としては、松井らの方法¹⁸⁾などがある。

1.4.2 厚みのある障壁

(1) 反射性厚み障壁による減音量の計算方法

波動理論に基づく厚みのある障壁による減音量の計算方法としては、Pierce の方法¹⁹⁾がある。この方法では、2つのウェッジからなる反射性の障壁による二重回折波を Keller²⁰⁾の幾何光学的回折理論に基づいて表している。また、川井²¹⁾は、同様に3つのウェッジからなる反射性の障壁による三重回折波を表現している。

一方、2つの直角ウェッジからなる反射性厚み障壁による減音量に関する幾何音響理論に基づく実用的な計算方法については、前川²²⁾、Kurze²³⁾、高木²⁴⁾による方法等が報告されている。また、藤原らは、平面波を対象とした検討結果より、反射性厚み障壁における厚み部分の効果を示す図表を提案している^{25)、26)}。

文献 24)では、高木の方法が、前川²²⁾、Kurze²³⁾の方法より、模型実験値との整合性の点ですぐれていることが示されている。以下、高木の方法²⁴⁾について若干の考察を加えるとともに、残された課題を明らかにする。

(2) 反射性厚み障壁による減音量計算のための高木の方法に関する考察

高木の方法²⁴⁾は、次式で表される。(図1-7参照)

$$\Delta L(RW)_{SXYP} = \Delta L_{SY} + \Delta L_{SX} - 5 \quad (1.8)$$

ここで、 $\Delta L(RW)_{SXYP}$: エッジを X,Y とする反射性厚み障壁 (Reflective Wide Barrier) による減音量 [dB]

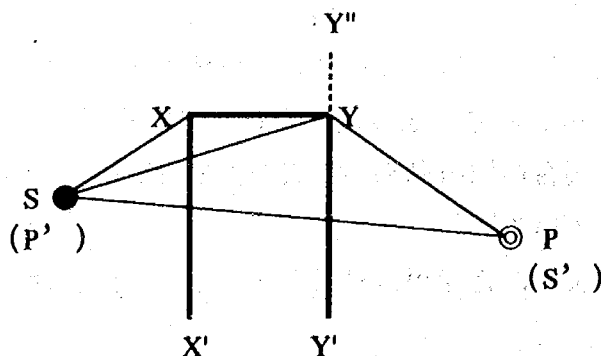


図1-7 反射性厚み障壁による減音量計算のための高木の方法²⁴⁾

ΔL_{SY} : 受音点側の半無限障壁 YY'による減音量[dB]

ΔL_{SX} : 音源 S, 受音点 Y の場合の音源側の半無限障壁 XX'による減音量[dB]

この方法では、まず、受音点 P 側の半無限障壁 YY'による減音量 ΔL_{SY} を求め、これに障壁の厚みによる効果を加える。この場合、音源 S 側の半無限障壁 XX'が存在した場合の空間 YY'全体の減音量を、Y での減音量 ΔL_{SX} で代表させている。なお、半無限障壁による減音量は前川チャート ((1.7)式)で求める。

ここで、(1.8)式の定数項 -5 の物理的意味について考察する。文献 24)では、定数項 -5 については、単に前川チャートにおける行路差が 0 の場合の値であるとししか述べられていない。しかし、この項は、より重要な意味を有している。そもそも、 $\Delta L_{SY} + \Delta L_{SX}$ は、後に(2.10)式で示すように、X, Y の間隔が大きい時は、X, Y をナイフエッジとする二重障壁による減音量を表していると考えられる。しかし、反射性厚み障壁は、ナイフエッジより 2dB 程度回折減音量が小さい直角ウェッジ (図 1-6 参照) 2 つから構成されるため、2 回の回折が生じる領域では、二重障壁より数 dB 程度減音量が小さくなると考えられる。(1.8)式は、この差を定数項 -5 により補正しているとみることができる。補正量にあたる反射性厚み障壁と二重障壁による減音量の差異は、言い換えれば、厚み部分の反射音の影響と考えられる。この点については、2.2 において、模型実験結果と比較して詳述する。一方、X と Y が一致した場合は $\Delta L_{SX} = 5$ であるため、(1.8)式の右辺は単一の半無限障壁による減音量 ΔL_{SY} と一致する。すなわち、反射性厚み障壁と半無限障壁による減音量の計算値の連続性が確保されていることが分かる。

このように模型実験値との整合性が高く、厚みの幅の変化に対しても計算値の連続性が確保された(1.8)式の残された課題は、以下の 2 点であると考ええる。

- 1) 相反の定理を満たしていないこと。つまり、図 1-7 において、音源と受音点位置を入れ替えて S', P'としても、音響理論では減音量は同一である。しかし、二つの場合において、(1.8)式は異なる計算値を与える。
 - 2) 音源または受音点が障壁の上端より高い位置にある場合の定式化が行われていないこと。
- (3) 吸音性厚み障壁

吸音性厚み障壁あるいはその類似例としては、植栽柵タイプの低層遮音壁 (4.4.2(1)参照) や先端に吸音体を設置した遮音壁が考えられる。

庄野らは、遮音壁先端に吸音体を設置した場合の回折効果を、模型実験、二次元境界要素法による数値計算、現道での実測結果より明らかにしている^{27), 28)}。また、その吸音体が反射性の場合と吸音性の場合の回折効果の差異を模型実験及び二次元境界要素法を用いた数値計算結果により示している²⁹⁾。

しかし、吸音性厚み障壁による減音量の計算式を示した文献は、波動理論、幾何音響理論ともに見当たらない。

1.4.3 多重障壁

(1) 二重障壁

二重障壁による減音量を幾何音響理論を用いて計算する方法としては、前川³⁰⁾、Foss³¹⁾、ISO/DIS9613-2³²⁾、堀田ら³³⁾、高木ら³⁴⁾、久野ら³⁵⁾が提案する方法などが挙げられる。以上のうち、ISO/DIS9613-2 以外の方法は類似している。その考え方は、一方の半無限障壁による回折減音量を基本とし、さらにその障壁のエッジ上に仮想音源または仮想受音点を想定し他方の障壁による回折減音量を加えるものである。ただし、基本となる半無限障壁の選択方法や補正項の有無などにより計算式が異なる。

以下では、本論文と同様、半無限障壁による減音量の計算に前川チャートを用い、模型実験値との整合性も確認されている³⁴⁾高木らの方法を中心に取り上げる。そして、他の手法との違いを比較検討することにより、これらの方法^{30)~35)}の課題を明らかにする。

二重障壁に対する高木らの方法を次に示す。(図1-8参照)

$$\Delta L(D)_{\text{SXYP}} = \begin{cases} \text{Zone I} \\ \Delta L_{\text{SXP}} \\ \text{Zone II} \\ \Delta L_{\text{SYR}} + \Delta L_{\text{SXY}} - 5 \end{cases} \quad (1.9)$$

$\Delta L(D)_{\text{SXYP}}$: エッジを X,Y とする二重障壁 (Double Barriers) による減音量 [dB]

(1.9)式の Zone II の時の式は、(1.8)式と同一である。受音点 P 側の半無限障壁 (エッジ Y) による減音量 ΔL_{SYR} を基本とし、他方の障壁による回折効果を加えている。この式では、(1.8)式において重要な役割を果たした定数項 -5 の扱いが課題と考える。

これに対し、堀田ら³³⁾は、音源 S 側の半無限障壁 (エッジ X) による減音量 ΔL_{SXP} を基本とした式を提案している。

また、前川³⁰⁾や久野³⁵⁾は、(1.9)式の Zone II において定数項 -5 を省略した式を提案している。前川は高木同様、受音点側の障壁を基本とすることを提案している。久野は、どちらの障壁を基本とするかについては特に言及していない。

一方、Foss の方法³¹⁾では、2つの半無限障壁のうち、大きい減音量を与える方を基本としている。さらに定数項 -5 の代わりに、主に障壁間隔 W および音源~受音点の水平

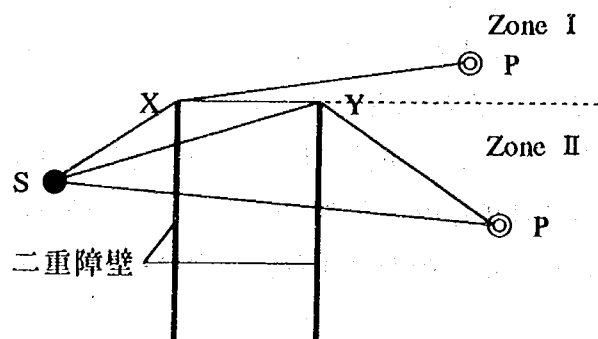


図1-8 二重回折に関する高木らの方法³⁴⁾

距離 T の比に基づいた補正量を与えている。この補正量は、Fresnel-Kirchhoff の近似回折理論³⁾で求めた半無限障壁による減音量の計算値とその実験値との差異を、回帰式で表現したものであり、0dB ($W/T \approx 1$ の時) から -6dB ($W/T \approx 0$ の時) の値をとる。ただし、半無限障壁による減音量を Fresnel-Kirchhoff の近似回折理論から求めた場合は、前川チャートから求めた場合に対して、最大で 3dB 程度大きくなることが知られている (図 1-6 参照)。したがって (1.9) 式の定数項 -5 と Foss の方法の補正項とは単純には比較できない。

以上の二重障壁による減音量の計算方法の課題を整理すると以下のとおりである。

- 1) (1.9) 式の高木らの方法は、Zone I と Zone II の境界において計算値が不連続となる。この点において、模型実験値との比較により、詳細な検討を行った結果 (2.4.3 参照)、(1.9) 式の方法は、Zone I と Zone II の境界近傍では、両 Zone において、計算値が実測値より最大で数 dB 程度小さくなることが明らかとなった。これらの原因としては、① Zone II で (1.9) 式が (1.8) 式と同一であること、② Zone I で受音点側の障壁の効果が考慮されていないこと、③ 相反の定理を満たしていないこと が挙げられる。
- 2) 前川、久野らの方法では、基本となる半無限障壁の選定の考え方が示されていない。また、障壁の間隔についての適用条件が示されていない。
- 3) Foss の示した補正項には周波数が関係しておらず、その物理的意味が不明確である。また、半無限障壁の計算に前川チャートを用いることができない。

なお、ISO/DIS9613-2 および堀田ら方法は、高木らの方法より模型実験値との整合性が劣ることが明らかとなっている³³⁾。

一方、二重障壁による回折効果を波動理論を用いて計算した例はほとんど見当たらない。

(2) 三重障壁

東らは、(1.9) 式を応用して三重障壁による回折効果を計算する方法を提案している³⁰⁾。この方法では、上の (1) で示した課題などのため、計算値は模型実験値より数 dB 程度小さくなっている³⁰⁾。

一方、前川³⁰⁾は、(1.9) 式の Zone II の式から定数項 -5 を省略した式を基本に、東らと同じ考えで三重障壁の計算方法を提案している。しかし、計算値と模型実験値の間には、場合により 10dB 以上の差異が見られる。

久野³⁵⁾も前川と同様の方法を提案しているが、実測値による検証は行われていない。

(3) 厚みのある障壁、二重障壁による減音効果の差異

以上のように、厚みのある障壁、二重障壁による回折効果に関する研究は幾つか見られる。しかし、反射性及び吸音性の厚みのある障壁並びに二重障壁による回折効果の差異を、厚みまたは障壁間隔並びに周波数との関係から、詳細に比較・分析した文献は見当たらない。

1.4.4 有限長障壁

(1) 3パスの方法

単独の有限長障壁による減音量の計算方法が、前川³⁷⁾、山本、高木ら^{38)・39)}およびISO 9613-2 Part2⁴⁰⁾により提案されている。これらは、障壁の上方および左右の側方の伝搬経路（パス）による音の寄与を合成することにより、有限長障壁による減音量を計算するもので、本論文では3パスの方法という。これらの方法の違いは、各寄与の合成の方法の差異にある。なお、山本、高木らの方法では、有限長障壁として半無限長障壁の上端に矩形上の障壁を付加したモデル（3.2.1(1)参照）を取り上げており、平面道路だけでなく高架道路や盛土道路に有限長障壁が設置された場合の計算も可能である。

(2) 1パスの方法

より単純な有限長障壁による減音効果の計算方法としては、1パスの方法^{41)・42)}がある。これは、音源と受音点を含む鉛直な平面が有限長障壁と交差する場合は半無限障壁を想定して回折効果を計算し、交差しない場合は全く障壁が存在しないと考える方法（3.2.2参照）である。道路交通騒音予測の場合は、音源である自動車が遮音壁に沿って平行に移動する。このため、ユニットパターンのエネルギー積分値（1.2.1参照）を求めるには、1パスの方法で概ねよいと考えられている⁴²⁾。

単独の有限長障壁による減音効果の計算方法は、おおむね確立していると考えられる。しかし、後述するように、複数の有限長障壁や有限長の厚みのある障壁による減音効果の計算方法については、未解明の点が残されている。

1.4.5 低層遮音壁

一般道路に設置される低層遮音壁は、交差道路や沿道建物へのアクセス確保のため、開口部を有することが多い。これらは複数の有限長障壁が一行に並んだものとみなすことができる。しかし、従来の研究^{43)~46)}では、開口部がなく連続して設置されている場合を主な対象としているものが多い。また、開口部の影響の測定例⁴⁴⁾や計算例⁴⁷⁾も見受けられるが、これらの例でも複数の有限長障壁による回折効果の計算式は示されていない。

複数の有限長障壁による減音効果は、単独の有限長障壁の場合の考え方を拡張すればよいと考えられる。しかし、これまで具体的な計算式は示されておらず、したがって、その計算結果も検証されていない。また、平面道路に遮音壁を設置する場合のように反射面を有する半自由空間では、有限長障壁が単独で設置された場合についても、その計算結果の検証は行われていない。

さらに、低層遮音壁は、第4章で述べるように、種々の形状、材質をとり得る。したがって、これらの特徴を踏まえた減音効果の計算方法を検討し、その設計に反映させることが必要である。

1.4.6 道路に面した建物および建物群

(1) 単独の建物後方の特定地点での騒音レベルの計算

道路に面した建物後方の騒音レベルを精度よく求めるためには、点音源に対する単独建物による減音効果を求めることが基本となる。これに関する研究としては、Kurra⁴⁸⁾、足立ら⁴⁹⁾の文献がある。これらの文献では、直方体の形状を有する建物背後の騒音レベルを、建物の上方及び側方を伝搬する音の寄与を合成して求める方法を提案している。Kurra⁴⁸⁾は、薄い半無限障壁による減音量の計算に Kurze の方法¹⁷⁾を、厚みのある障壁における厚み部分の効果の計算に藤原らの方法^{25)、26)}および前川の方法⁵⁰⁾を用いている。

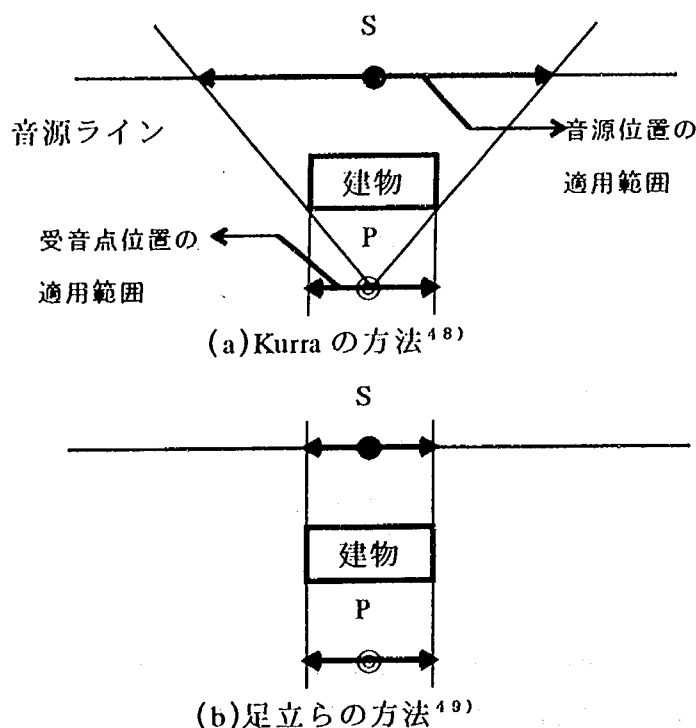


図 1-9 従来の単独建物背後の騒音予測計算方法の適用範囲

一方、足立ら⁴⁹⁾は、半無限障壁による減音量の計算には前川の実験チャートを、厚みのある障壁による減音量の計算には Kurze の方法²³⁾を利用している。

しかし、上記の 2 つの方法は、建物による遮蔽（回折）効果の計算を主な目的にしている。そのため、これらの方法では、図 1-9 で示すように、受音点 P が建物背後にある（建物の側壁面を延長した 2 つの平面に挟まれる）場合しか想定していない。また、音源 S の位置は、Kurra の方法でも P から見た建物の陰となる領域に限定されている。したがって、両方法では、建物背後の受音点でさえ、対象道路（図 1-9 で音源ラインにあたる）から発生する道路交通騒音を L_{Aeq} として評価する場合に必要なユニットパターンの計算（(1.2)式、(1.3)式参照）が完全にはできない。なお、これらの音源位置、受音点位

置の制約は、両方法が厚みのある障壁による減音効果の計算に用いている藤原ら^{25)・26)}・前川の方法⁵⁰⁾あるいは Kurze の方法²³⁾が、P から S を見通せる場合などを計算対象としていないことによる。

(2)道路に面した市街地における騒音レベルの計算

沿道の市街地での騒音伝搬に関する従来の研究事例を示す。山田らは家屋がランダムに並ぶ市街地を散乱層とみなして理論的なアプローチを行っている⁵¹⁾。加来らは模型実験結果より家屋による超過減衰量を道路の高さ、家屋密度、道路端からの距離で表す経験式を導いている⁵²⁾。家田らは、建築物の形状を市街地の平均的建築面積と高さを有する円柱状物体で近似した仮想都市空間を想定し、騒音源側と観測点側の建築物の上方エッジによる回折減衰を市街地における騒音減音量とし、その期待値を理論的に求めている⁵³⁾。藤田らは、ランドサット TM データを用いて市街地の建物面積率を推定し、家田らの式⁵³⁾を近似して建物による超過減衰を求めている⁵⁴⁾。ISO9613-2 の Annex で示された方法では、建物面積率と道路に面する建物の壁面による閉塞率から建物による超過減衰を求めている⁴⁰⁾。藤本らは、模型実験結果から、戸建て住宅地での騒音レベルは、1)道路が見える場合と見えない場合は個別に扱う方がよく、2)道路が見える場合は見通し角度が有効なパラメータとなり、3)道路が見えない場合は建物密度、建物平均高さ、道路からの距離により騒音レベルが変化すること を示している⁵⁵⁾。

これらの研究の中で、市街地における具体的な騒音レベルの予測方法として、現在、我が国で最も実用的に用いられているのは、加来らの方法⁵²⁾である。しかし、この方法も以下のような課題を有する。

- 1) 郊外の住宅地を想定しているため、建物の立地密度（以下、「建物密度」という）の適用範囲は 0.34（200m × 200m の面積中に 200 戸）以下、建物高さは 2 階建て以下、受音点高さは 1.2m と限定されている。また、都市部の市街地では、用途規制の差異等から道路に近接した地域とその背後の地域では建物密度が異なることもあり、それが騒音レベルの計算結果に与える影響は大きい（6.4.2 参照）が、このことを計算上反映できない。
- 2) 平面道路だけでなく、高架道路を対象とした場合の計算式も示されているが、その適用条件は高欄高さが 1m の場合に限定され、それより高い遮音壁が設置された場合は適用ができない。

1. 5 従来の道路交通騒音の評価方法とその課題

従来、道路交通騒音の評価は、その評価区間の騒音の状況を代表する地点を設定して行われてきた。これは、ほとんどの場合、評価地点が官民境界上の高さ 1.2m の地点であったことによる。すなわち、この地点では、道路構造と交通条件が一定であれば、沿道の建物の立地状況にかかわらず騒音レベルはほぼ一定とみなせ、代表地点の選定が比較的容易であったからである。また、騒音対策に用いられる遮音壁も、一定の高さで、連続して設置されることがほとんどであり、遮音壁による効果の算定のための代表地点の選定も容易であった。

しかし、新環境基準では、1. 1で述べたように、道路に面する地域を、幹線道路に近接する空間とその背後地に分類して異なる基準値を与えている。さらに、環境基準の達成状況の評価は、各々の地域内の住居等のうち環境基準の基準値を超過する戸数及び超過する割合を把握して行うこととされた。したがって、沿道の建物群背後で複雑に変化する騒音レベルを評価する必要があるが生じている。また、一般道路に設置される低層遮音壁等の遮音壁は、沿道アクセスの確保のため多くの開口部を有する。その結果、その背後の騒音レベルは、沿道建物群の背後同様、複雑に変化する。

このように、評価区間内で騒音レベルが複雑に変化する場合は、評価区間における代表地点の選定は極めて困難である。したがって、代表地点を特定せずに、評価区間全体の騒音レベルを区間評価する方法が必要となる。

これまで、研究レベルにおいては、沿道市街地における道路交通騒音の計算に評価区間の平均的な騒音レベルを用いた例^{5,2)}が見受けられる。しかし、実際の騒音レベルの評価は、特定地点を選定して行われることがほとんどであった。

1. 6 本研究のねらい

1. 5で示した課題の解決を目指した本研究のねらいは、以下のとおりである。

1.6.1 予測方法

以下の障壁による減音効果を、前川チャート ((1.7)式) を用いて簡易に計算する実用的な予測計算方法を提案する。また、できるだけ広い音源、受音点位置において計算値の連続性を保ち、相反の定理を満足できる計算方法の構築を目指す。

(1)厚みのある障壁、多重障壁

まず、障壁高さが等しい二重障壁、反射性厚み障壁、吸音性厚み障壁等による回折効果の差異を模型実験を通じて明らかにし、その原因を分析する。次に、これらの障壁による

減音量の計算方法および障壁間隔が大きい三重障壁による減音量の計算方法を提案する。
(第2章)

(2)有限長障壁

地面上に複数の有限長障壁が一行に並んで設置された場合において、点音源および線音源に対する特定地点での挿入損失の計算方法を示す。(第3章)

(3)低層遮音壁

十分長い直線道路に、多くの開口部を持ち、種々の形状、材質を有する低層遮音壁が設置された場合の減音効果を簡易に計算する方法を提案する。この場合、減音効果は特定地点での挿入損失および評価区間の平均的な挿入損失を取り上げる。さらに、ケーススタディを通じて、低層遮音壁の設計パラメータと減音効果の関係を分析する。(第4章)

(4)道路に面する単独建物

道路に面した単独建物の後方空間に位置するあらゆる受音点位置(図1-10)での騒音レベルを、建物による遮蔽(回折)効果だけでなく、建物の側壁面における反射音の影響も考慮して求める計算方法を提案する。また、受音点位置に応じた計算の簡略化の方法を明らかにする。(第5章)

(5)沿道市街地

沿道市街地において、道路からの距離に応じた平均的な騒音レベルを、簡便に計算する方法を提案する。特に、都市部の市街地を想定し、建物密度が高く3階建て以上の建物が存在する場合にも適用が可能で、道路に直面した建物列とその背後の建物群の建物密度の差異を計算に反映できるようにする。また、遮音壁のない平面道路に加え、遮音壁が設置された道路も対象とする。(第6章)

1.6.2 評価方法

集合した有限長障壁の背後における騒音レベルおよび減音効果の区間評価指標を提案する。(第3章)

さらに、この評価指標の有効性を、開口部を有する低層遮音壁および沿道に立地する建物群を対象とした検討を通じて明らかにする。(第4章、第6章)

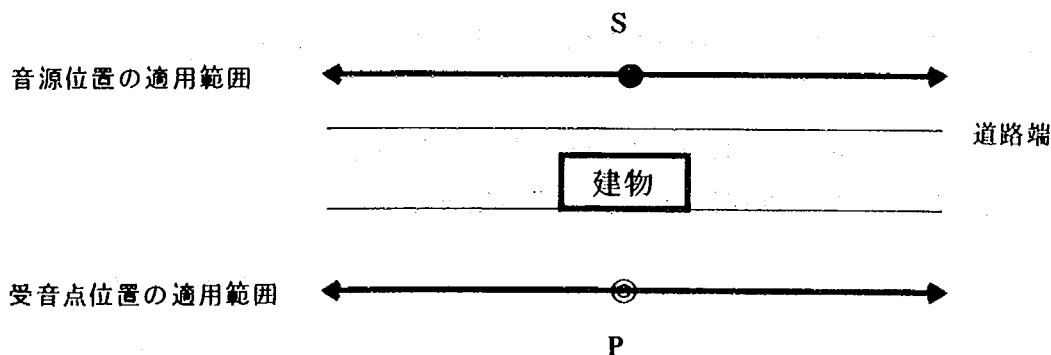


図1-10 本論文で目標とする建物後方の騒音レベル計算方法の適用範囲

第2章 厚みのある障壁，多重障壁による減音効果の予測方法

2. 1 はじめに

高架併設道路，インターチェンジ等に複数の遮音壁が設置される場合，二重回折以上の多重回折の計算が必要となる場合がある。特に，最近では，都市内の幹線道路において，中央分離帯にも遮音壁を設置する場合も見受けられ，その必要性は高まっている。また，厚みのある障壁としては，小さな障壁としての低層遮音壁の植栽柵タイプ（第4章参照）や大きな障壁としての建物（第5章，第6章参照）等が挙げられる。また，植栽柵タイプや遮音壁上端に吸音体を設置した新型の遮音壁は，厚み部分が吸音性の厚みのある障壁とみなすこともできる。このように，多重障壁，厚みのある障壁による回折効果の計算が必要となる場合は多く，これらの計算方法の充実は，道路交通騒音の予測および遮音壁の合理的な設計にとって非常に意義が大きい。

本章では，無限長の厚みのある障壁および多重障壁による減音量の計算方法の検討を行う。2. 2では，無響室における縮尺比 1/10 の模型実験により，障壁高さが等しい二重障壁，反射性厚み障壁および吸音性厚み障壁による減音量の差異を明らかにし，その原因を考察する。2. 3では，反射性厚み障壁による減音量計算のための高木の方法を，あらゆる音源，受音点配置において適用が可能なように拡張するとともに，厚みの幅が建物の間口や奥行きと同程度の場合における計算方法の妥当性を検証する。2. 4では，障壁高さが等しい二重障壁による減音量の新たな計算方法を提案する。2. 5では，2. 3および2. 4での提案式を組み合わせ，吸音性厚み障壁による減音量を計算する実験回帰式を提案する。2. 6では，障壁間隔が大きい三重障壁による減音量の計算方法を提案する。なお，これらの計算式の検討にあたっては，音源，受音点位置や障壁の幅が変化する場合において計算値の連続性を保ち，相反の定理を満足できるように配慮する。

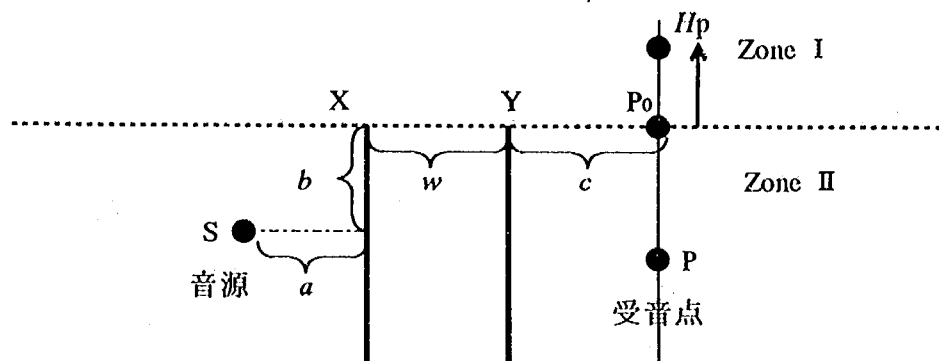
2. 2 模型実験による厚みのある障壁，二重障壁による減音量の差異の検討

障壁高さが等しい二重障壁，反射性厚み障壁，吸音性厚み障壁による減音量の差異を検討するため，無響室において，縮尺比 1/10 の模型実験を行った。

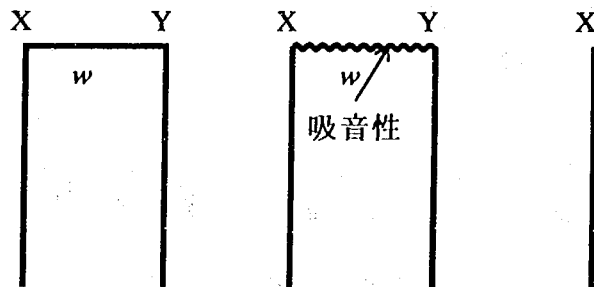
2.2.1 模型実験の方法

図2-1のように、無響室に、音源、障壁、受音点を配置した。障壁には厚さ 6mm のアクリル板を用い、障壁高さが等しい二重障壁、反射性厚み障壁、吸音性厚み障壁または音源側の半無限障壁（以下、「音源側障壁」という）を設置した。また、吸音性厚み障壁の上面には、吸音材として、ベルベットの2枚重ね（厚み 3.3mm）を貼付した。

二重障壁の間隔または厚み障壁の幅にあたる w は、1.5m, 3m, 5m（実物換算。以下、本章において、模型実験に関する数値は、すべて実物換算で示す）の3通りとした。音源には、点音源としてのジェットノイズ音源を用い、それを図2-1において紙面と垂直方向に向け、図2-1の断面において無指向性となるよう配慮した。また、対象周波数は予備実験の結果、無響室における反射音、計測機器のノイズ等を排除できる 315Hz ~ 1,600Hz とした。



(a)二重障壁（障壁高さが等しい）



(b)反射性厚み障壁 (c)吸音性厚み障壁 (d)音源側障壁

w	a	b	c	H_p
1.5	4	1	3.5	3, 1, 0.4, 0, -1, -2
3	4	1	2	3, 1, 0.4, 0, -1, -2
5	2.5	1	2.5	3, 2, 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0, -0.4, -0.6, -0.8, -1, -1.2, -1.4, -2

（単位 m，実物換算）

図2-1 模型実験の配置

また、吸音性厚み障壁に貼付した吸音材の実効的流れ抵抗 σ は $140\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ であった。これは、十分広い吸音面から 1 m の高さに 10 m 間隔で音源と受音点を配置した時の地表面反射による超過減衰の実測値と、波動理論により求めた計算値との誤差が最小になるように設定したものである（図2-2参照）。なお、波動理論による超過減衰の計算に当たっては、locally reacting な有限インピーダンス平面上の音伝搬を想定し、球面波に対する音圧反射率は川井の式⁵⁶⁾、地表面の音響インピーダンスのモデル式は幹の式⁵⁷⁾を用いた。

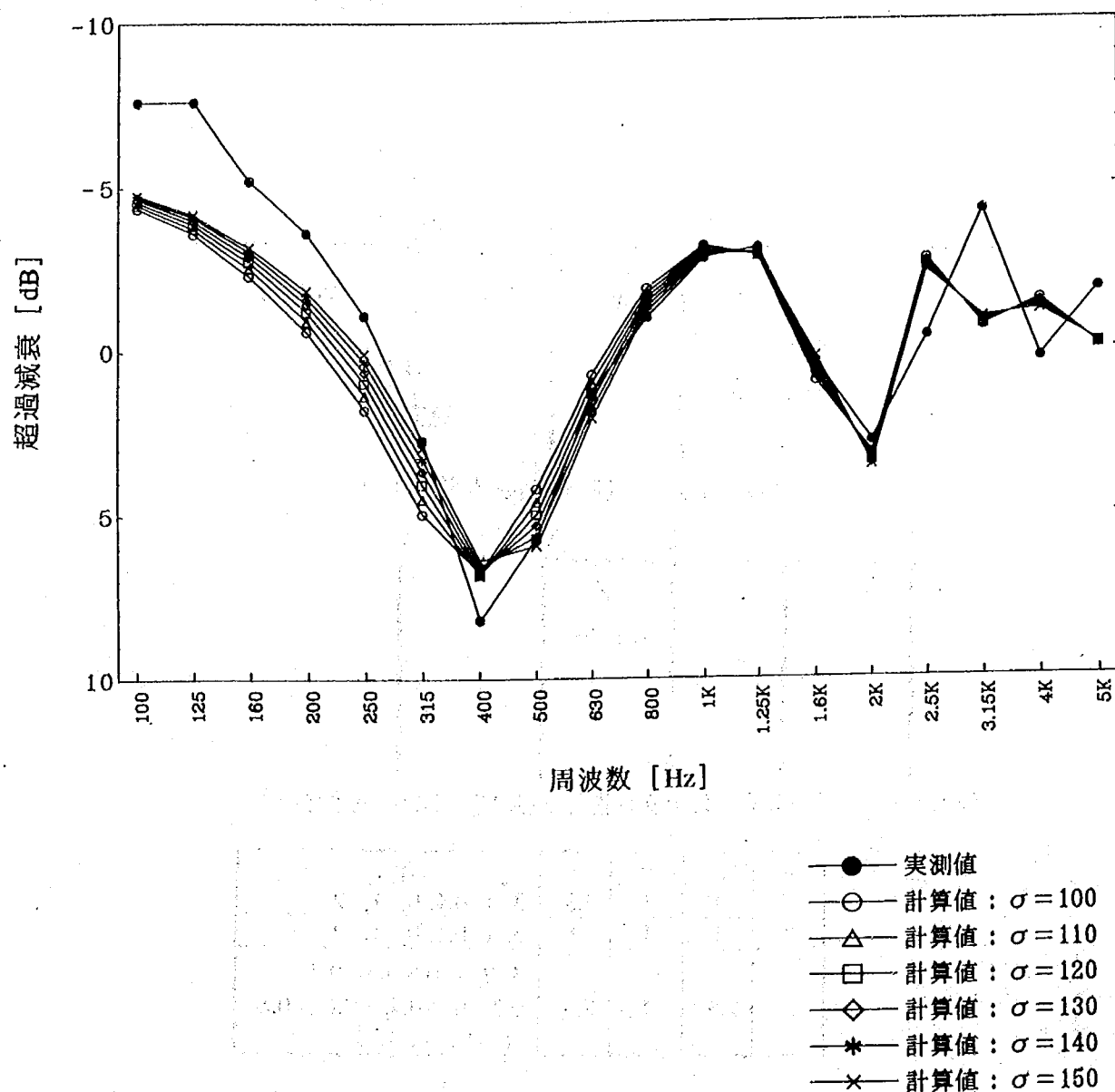


図2-2 超過減衰の計算値と実験値の比較

2.2.2 実験結果の分析

図2-3に周波数が500Hzの場合、図2-4に周波数が1kHzの場合の、受音点高さ H_p (障壁の上端より高い場合を正、低い場合を負で表す) と、二重障壁 (Double Barriers) による減音量 $\Delta L(D)_{sxyf}$, 反射性厚み障壁 (Reflective Wide Barrier) による減音量 $\Delta L(RW)_{sxyf}$, 吸音性厚み障壁 (Absorptive Wide Barrier) による減音量 $\Delta L(AW)_{sxyf}$ 及び音源側障壁による減音量 ΔL_{sxp} の関係を示した。これらの減音量の大小関係を、受音点が Zone I または Zone II (図2-1参照) にある場合に分けて説明し、その原因を考察する。

a. $\Delta L(D)_{sxyf}$ と $\Delta L(RW)_{sxyf}$ の大小関係

Zone I, Zone II の両方において、 $\Delta L(D)_{sxyf}$ は $\Delta L(RW)_{sxyf}$ より大きく、その差は $H_p = 3m$ の場合を除きおおむね 2 ~ 4dB である。これは、厚み部分における反射音の差に起因していると考えられる。

b. $\Delta L(RW)_{sxyf}$ と ΔL_{sxp} の大小関係

Zone I では $\Delta L(RW)_{sxyf}$ は ΔL_{sxp} より小さい。Zone I と Zone II の境界では両者の差はほとんどない。Zone II では、逆に、 $\Delta L(RW)_{sxyf}$ は ΔL_{sxp} より大きくなる。この理由は以下のように考えられる。反射性厚み障壁は、音源側障壁による回折効果に加え、厚み部分での反射による増音効果と厚み部分の回折による減音効果を有すると考えられる。Zone I では前者が、Zone II では後者が卓越し、Zone I と Zone II の境界では両者がほぼ相殺されていると推察できる。

c. $\Delta L(D)_{sxyf}$ と ΔL_{sxp} の大小関係

Zone I の上部では $\Delta L(D)_{sxyf}$ と ΔL_{sxp} の差はほとんどない。Zone II との境界に近づくにつれ、 $\Delta L(D)_{sxyf}$ が ΔL_{sxp} より大きくなる。Zone II では $\Delta L(D)_{sxyf}$ は ΔL_{sxp} より常に大きい。この差は、受音点側の半無限障壁の回折効果によるものと考えられる。

d. $\Delta L(AW)_{sxyf}$ と $\Delta L(D)_{sxyf}$, $\Delta L(RW)_{sxyf}$ の大小関係

$\Delta L(AW)_{sxyf}$ は、厚みの幅 w と周波数に依存して変化し、 $\Delta L(D)_{sxyf}$ より大きくなることがある一方、 $\Delta L(RW)_{sxyf}$ と同程度まで小さくなることもある。

以上のうち、今回の実験によって得られた新たな知見 (従来の研究^{2,21)~3,5)} と比較) を抽出して整理すると、以下のとおりである。

- 1) Zone I, Zone II の両方において、 $\Delta L(D)_{sxyf}$ は $\Delta L(RW)_{sxyf}$ より大きい。
- 2) Zone I では $\Delta L(RW)_{sxyf}$ は ΔL_{sxp} より小さいが、Zone I と Zone II の境界では両者の差はほとんどなくなる。
- 3) Zone I の上部では $\Delta L(D)_{sxyf}$ と ΔL_{sxp} の差はほとんど見られないが、Zone II との境界に近づくにつれ $\Delta L(D)_{sxyf}$ が ΔL_{sxp} より大きくなる。
- 4) $\Delta L(AW)_{sxyf}$ は、厚みの幅 w と周波数に依存して変化し、 $\Delta L(D)_{sxyf}$ より大きくなることもある一方、 $\Delta L(RW)_{sxyf}$ と同程度まで小さくなることもある。

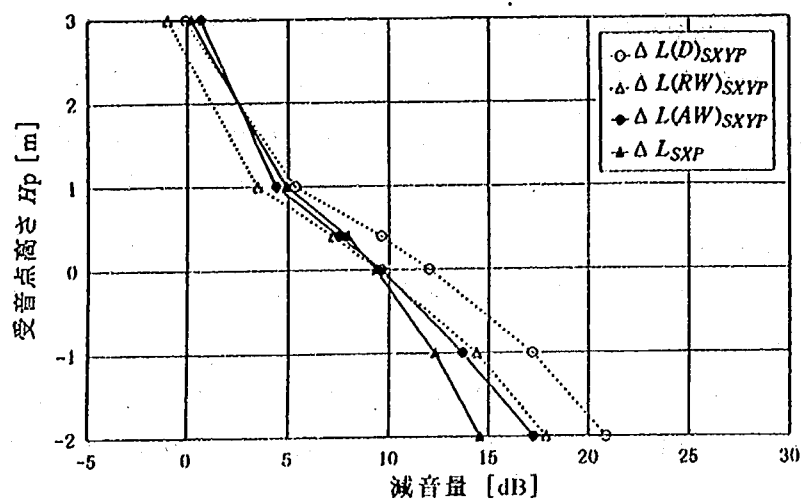


図 2 - 3 (a) 種々の障壁による減音量の比較 ($w=1.5\text{m}$, 500Hz)

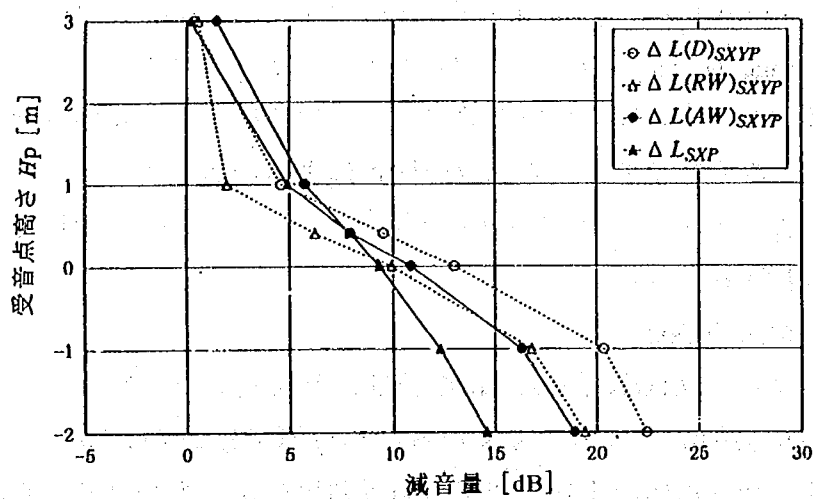


図 2 - 3 (b) 種々の障壁による減音量の比較 ($w=3\text{m}$, 500Hz)

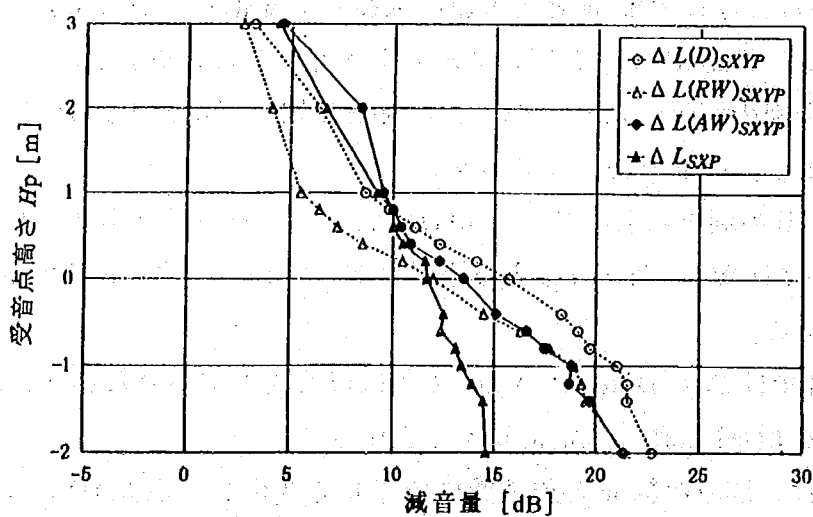


図 2 - 3 (c) 種々の障壁による減音量の比較 ($w=5\text{m}$, 500Hz)

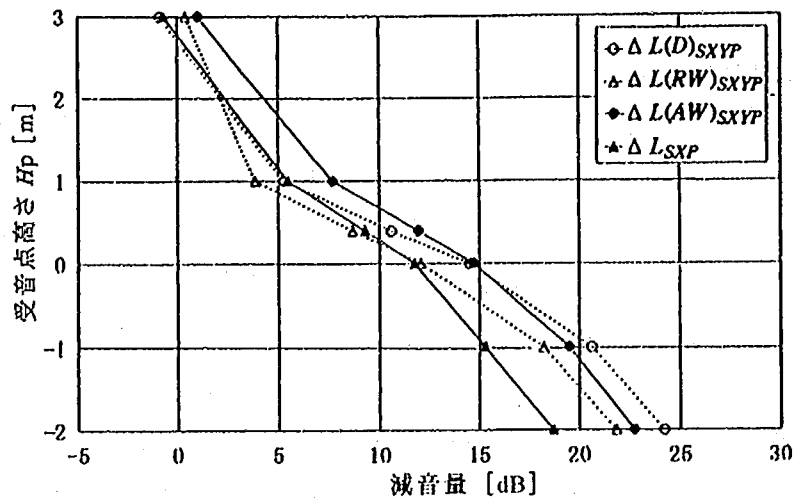


図 2 - 4 (a) 種々の障壁による減音量の比較 ($w=1.5\text{m}$, 1kHz)

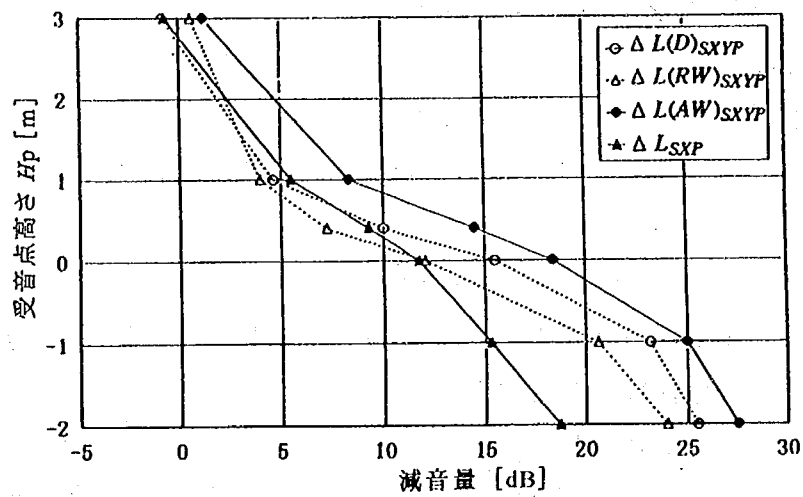


図 2 - 4 (b) 種々の障壁による減音量の比較 ($w=3\text{m}$, 1kHz)

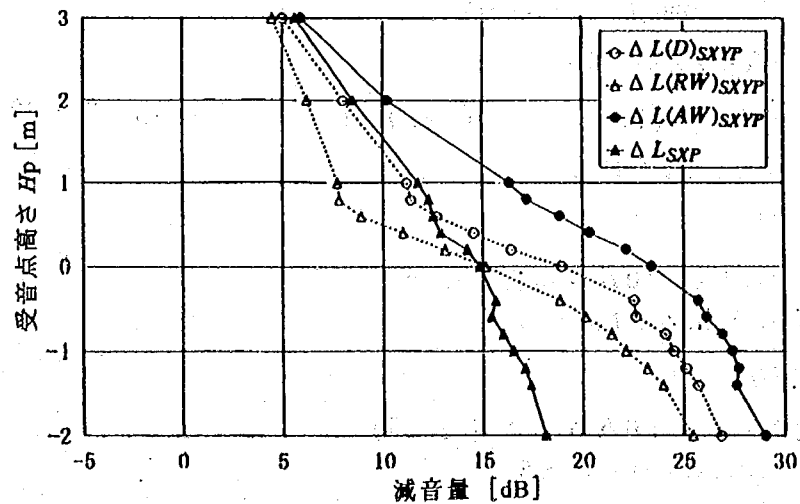


図 2 - 4 (c) 種々の障壁による減音量の比較 ($w=5\text{m}$, 1kHz)

2. 3 反射性厚み障壁による減音量の計算方法

2.3.1 高木の方法²⁴⁾の拡張

反射性厚み障壁による回折効果の計算方法として提案された(1.8)式の高木の方法は、後に、(1.9)式として二重障壁にも拡張して使うことが提案された。しかし、2.2.2での実験結果が示すように、反射性厚み障壁と二重障壁の回折効果は明らかに異なる。

ここでは、高木の方法²⁴⁾を反射性厚み障壁による回折効果の計算方法に基本的に用いる。ただし、音源、受音点が Zone II にある場合については、相反の定理を満たすように適用条件を改める。さらに、音源、受音点のいずれか、あるいは両方が Zone I にある場合の計算方法を新たに提案する。すなわち、(1.8)式を拡張し、あらゆる音源、受音点配置において、相反の定理を満足し、計算値の連続性が確保された計算方法の提案を行う。

(図2-5参照)

①音源 S, 受音点 P とも Zone I にある場合

$\Delta L_{SXP} \leq \Delta L_{SYP}$ の時

すなわち $\delta_{SXY} < 0 \wedge \delta_{XYP} < 0 \wedge \delta_{SXP} \leq \delta_{SYP}$ の時

$$\Delta L(RW)_{SXP} = -10 \log_{10} \{ 10^{-\Delta L_{SYP}/10} + (r/r')^2 (10^{-\Delta L_{S'YYP}/10} - 10^{-\Delta L_{S'XP}/10}) \}$$

$\Delta L_{SXP} > \Delta L_{SYP}$ の時

すなわち $\delta_{SXY} < 0 \wedge \delta_{XYP} < 0 \wedge \delta_{SXP} > \delta_{SYP}$ の時

$$\Delta L(RW)_{SXP} = -10 \log_{10} \{ 10^{-\Delta L_{SXP}/10} + (r/r')^2 (10^{-\Delta L_{SXP'}/10} - 10^{-\Delta L_{SYP'}/10}) \}$$

② S が Zone I, P が Zone II にある場合

すなわち $\delta_{SXY} < 0 \wedge \delta_{XYP} \geq 0$ の時

$$\Delta L(RW)_{SXP} = -10 \log_{10} \{ 10^{-\Delta L_{SYP}/10} + (r/r')^2 (10^{-\Delta L_{S'YYP}/10} - 10^{-\Delta L(RW)_{S'XYP}/10}) \}$$

(2.1)

③ S が Zone II, P が Zone I にある場合

すなわち $\delta_{SXY} \geq 0 \wedge \delta_{XYP} < 0$ の時

$$\Delta L(RW)_{SXP} = -10 \log_{10} \{ 10^{-\Delta L_{SXP}/10} + (r/r')^2 (10^{-\Delta L_{SXP'}/10} - 10^{-\Delta L(RW)_{SXP'}/10}) \}$$

④ S, P とも Zone II にある場合

$\Delta L_{SXP} \leq \Delta L_{SYP}$ の時

すなわち $\delta_{SXY} \geq 0 \wedge \delta_{XYP} \geq 0 \wedge \delta_{SXP} \leq \delta_{SYP}$ の時

$$\Delta L(RW)_{SXP} = \Delta L_{SYP} + \Delta L_{SXY} - 5$$

$\Delta L_{SXP} > \Delta L_{SYP}$ の時

すなわち $\delta_{SXY} \geq 0 \wedge \delta_{XYP} \geq 0 \wedge \delta_{SXP} > \delta_{SYP}$ の時

$$\Delta L(RW)_{SXP} = \Delta L_{SXP} + \Delta L_{XYP} - 5$$

ここで、一般に ΔL_{ABC} , δ_{ABC} と書く値は、各々、音源が A, 受音点が C の場合に、上端を B とする半無限障壁による減音量 ((1.7)式より求める) 及び回折行路差 (A から C

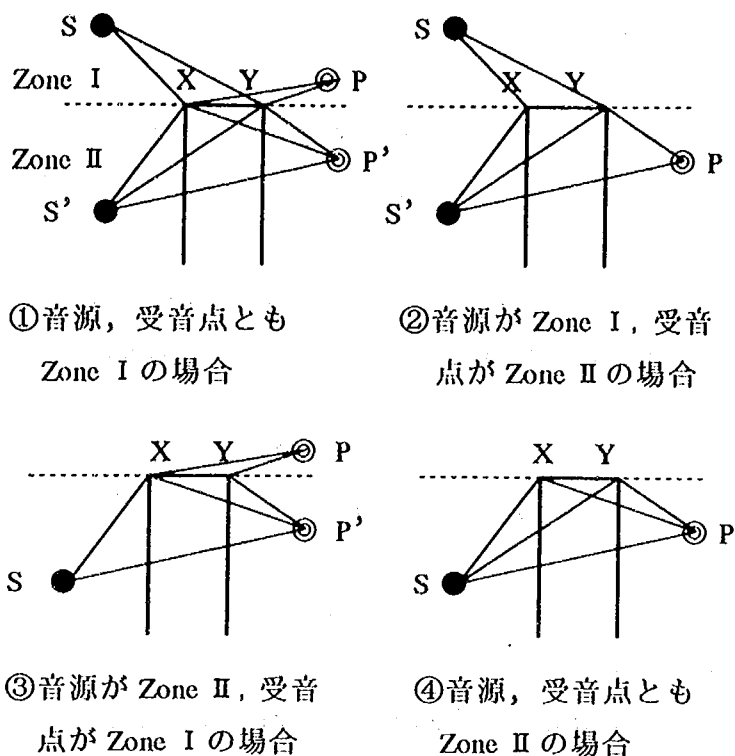


図 2 - 5 反射性厚み障壁による減音量計算のための模式図

を見通せる場合は負の値とする)を表す。 $\Psi \wedge \Omega$ (Ψ , Ω は条件式を表す)と書く表現は Ψ , Ω 両方の条件を満たすことを示す。また, r は音源 S と受音点 P の間の直線距離, r' は S, P' 間または S', P 間の直線距離を表す。 S', P' は, 各々, 直線 XY に対して, S, P と対称の位置にある点である。

なお, 減音量 $\Delta L(RW)_{SXP}$ が負の値を示す時は, 反射音の影響が回折による減音効果を上回り, 障壁がない場合に比べ音圧レベルが増加していることを示す。

以下, (2.1)式の導出過程を, 計算式の適用条件別に示す。

<条件④>

$\Delta L_{SXP} \leq \Delta L_{SYP}$ の時の式は(1.8)式を示し, $\Delta L_{SXP} > \Delta L_{SYP}$ の時の式は文献 33)で提案された高木の方法(R)を示している。高木の方法(R)とは, (1.8)式に対し, 相反性を考慮して音源と受音点を入れ替えた場合の計算方法である。Zone IIにおける適用条件は, (1.8)式および高木の方法(R)の選択条件として, ΔL_{SXP} と ΔL_{SYP} のうち, より大きな減音量を与える式を選択することを示している。これは, 基本とする半無限障壁による減音量をより正確に捉えるという視点に立ったものである。なお, $\Delta L_{SXP} = \Delta L_{SYP}$ の場合は, 明らかに $\Delta L_{XYP} = \Delta L_{SXY}$ となるため, (2.1)式では条件④における適用条件の境界での計算値の連続性が確保されている。また, 条件③と条件④との境界では, $\Delta L_{SXP} \geq \Delta L_{SYP}$ であり, かつ, 前川チャート ((1.7)式)を用いると $\Delta L_{XYP} = 5$ であるため, $\Delta L(RW)_{SXP} = \Delta L_{SXP}$ となる。

これは、2.2.2での実験結果とも整合している。

<条件③>

条件③での計算に当たっては、音源側のエッジ X を回折した後、受音点 P に直接到達する音の寄与 C_1 (エネルギー量) と、エッジ X で回折後、反射性厚み障壁の上面 XY で反射した後、P に到達する音の寄与 C_2 を加えることとした。ここで、 C_2 の算出に当たっては、受音点 P の障壁上面 XY での反射イメージ P' を想定した。そして、音源側障壁だけがある場合の P' での音の寄与を C_{21} 、反射性厚み障壁がある場合の P' での音の寄与を C_{22} として、 $C_2 = C_{21} - C_{22}$ により C_2 を求めた。

今、障壁が存在しない場合の P での音の寄与を C 、P' での音の寄与を C' とすると、

$$\Delta L(RW)_{sxyr} = -10 \log_{10} \{ (C_1 + C_2) / C \} = -10 \log_{10} \{ C_1 / C + (C' / C) (C_{21} - C_{22}) / C \}$$

となる。ここで、

$$C_1 / C = 10^{-\Delta L_{sxp} / 10}, \quad C_{21} / C' = 10^{-\Delta L_{sxp'} / 10}, \quad C_{22} / C' = 10^{-\Delta L(RW)_{syp'} / 10}, \quad C' / C = (r / r')^2$$

であるから、(2.1)式が得られる。

なお、 $\Delta L(RW)_{sxyr}$ は、条件④での計算式より導かれるが、上述のように、Zone I と Zone II との境界では、 $\Delta L(RW)_{sxyr} = \Delta L_{sxp}$ である。したがって、(2.1)式は、 $\Delta L(RW)_{sxyr} = \Delta L_{sxp}$ となり、条件④での計算式から導かれた結果と一致し、条件③と条件④の境界での計算値の連続性が確保されていることが分かる。

<条件②>

相反の定理に基づくと、条件③の場合と同様である。したがって、条件②と条件④の境界での計算値の連続性も確保されている。

<条件①>

条件①での計算にあたっては、負の行路差を有する回折効果による回折音の寄与 C_3 と障壁上面での反射音の寄与 C_4 を考慮している。ここで、 C_3 は、音源側または受音点側の半無限障壁を回折する音の寄与で近似することとし、回折減音量 ΔL_{sxp} と ΔL_{syp} のうち、大きい方を採用した。これは、条件①と条件②③との境界での計算値の連続性にも配慮している。また、 C_4 の計算にあたっては、スリット法⁸⁾を用いることとし、その適用条件も文献 8) に示されたものを用いた。

今、 $\Delta L_{sxp} > \Delta L_{syp}$ の時を考える。障壁が存在しない場合の P での音の寄与を C 、P' での音の寄与を C' とすると、

$$\begin{aligned} \Delta L(RW)_{sxyr} &= -10 \log_{10} \{ (C_3 + C_4) / C \} \\ &= -10 \log_{10} \{ C_3 / C + (C' / C) (C_4 / C') \} \end{aligned}$$

となる。ここで、

$$C_3 / C = 10^{-\Delta L_{sxp} / 10}, \quad C' / C = (r / r')^2$$

であり、スリット法によると、

$$C_4 / C' = 10^{-\Delta L_{sxp'} / 10} - 10^{-\Delta L_{syp'} / 10}$$

であるから、(2.1)式が得られる。

また、 $\Delta L_{SXP} = \Delta L_{SYP}$ の時は、明らかに $\Delta L_{S'YP} = \Delta L_{SXP'}$ 、 $\Delta L_{S'XP} = \Delta L_{SYP'}$ であるため、条件①における適用条件の境界での計算値の連続性は確保されている。

次に、SがZone IとZone IIの境界にあり、PがZone Iにある時は、条件①の $\Delta L_{SXP} > \Delta L_{SYP}$ の場合と条件③の境界にあたるが、この境界での計算値の連続性も確保されている。なぜなら、条件③において、式中の $\Delta L(RW)_{SXP'}$ の値は、条件④の時の式に基づくと、 $\Delta L_{SXP'} \leq \Delta L_{SYP'}$ かつ $\Delta L_{SXY} = 5$ の時、 $\Delta L(RW)_{SXP'} = \Delta L_{SYP'}$ であり、条件①の時の式と同形となるからである。

一方、 $\Delta L_{SXP} \leq \Delta L_{SYP}$ の時についても、 $\Delta L_{SXP} > \Delta L_{SYP}$ の時と同様に、条件①と条件②の境界での計算値の連続性が確保されている。

以上より、(2.1)式は、すべての音源、受音点位置の組み合わせにおいて計算値の連続性が確保されていることが確認された。

2.3.2 模型実験値および波動理論計算値との比較

(2.1)式の妥当性を、反射性厚み障壁の厚み w が建物の間口や奥行きと同程度に大きい場合まで含めて検討するため、2.2の模型実験値および波動理論計算値との比較を行った。

波動理論を用いた反射性厚み障壁による減音量計算の妥当性については、川井が二重回折波に関するPierceの方法¹⁹⁾とウェッジにおける一重回折波に関するPierceの第2近似式¹⁹⁾を組み合わせた計算結果と模型実験値との比較により検討している²¹⁾。その結果では、これらの方法は、音源、受音点が各エッジより半波長以上離れており、各エッジ間の距離が半波長以上の場合に適用可能であることが示されている。ここでは、二重回折波の計算にPierceの方法を、ウェッジにおける一重回折波の計算には、Pierceの第2近似式より計算対象となるウェッジ開き角の適用範囲が広いとされる⁵⁸⁾Kouyoumjian & Pathakの漸近解¹²⁾を用いた。

まず、(2.1)式による計算値を、2.2の模型実験値および二重回折に関するPierceの方法にKouyoumjian & Pathakの漸近解を組み合わせた場合の波動理論計算値と比較する。なお、波動理論による計算は、1/27オクターブバンドの中心周波数で行った。一方、(2.1)式における半無限障壁による減音量の計算は、1/3オクターブバンド中心周波数で行った。

図2-6(a)~(c)に、(2.1)式による計算値、波動理論計算値及び模型実験値を比較した結果を示す。音源は図2-1に示すとおりZone IIにある。なお、図中の減音量は、自動車走行騒音の代表パワースペクトル((1.6)式)で重み付けしたA特性オーバーオール値(315~1600Hz)として示している。

受音点がZone IIにある場合は、 w にかかわらず、(2.1)式による計算値と模型実験値はよく一致しているが、波動理論計算値は模型実験値より1~2dB程度大きい値を示してい

る。一方、受音点が Zone I にある場合は、波動理論計算値は模型実験値とよく一致しているが、(2.1)式による計算値は $H_p = 1\text{m}$ 付近で 1 ~ 2dB 程度実験値より大きい値を示している。

次に、 w が建物の間口、奥行きと同程度の場合について、(2.1)式と波動理論による計算結果の比較を行った。ここでは、対象周波数は、上記の検討より広帯域で、道路交通騒音の主要な周波数帯域を含む 50Hz ~ 5kHz とした。音源、受音点配置を図 2-7 に示す。反射性厚み障壁の厚み w は 8m または 16m とし、各々のケースにおいて、音源が Zone I にある場合と Zone II にある場合を想定した。

両計算結果の比較を、図 2-8 (a)~(d) に示す。 w が 8m, 16m の場合とも、音源が Zone I にある時 (図 2-8 (a), (c)) は、(2.1)式による計算値と波動理論による計算値は、非常によく一致している。一方、音源が Zone II の場合 (図 2-8 (b), (d)) は、特に、受音点も Zone II にある時に、両計算値の差異がやや大きくなり、(2.1)式による計算値が波動理論計算値より 2dB 程度小さい値を示している。しかし、音源が Zone II の場合の両計算値の大小関係は、図 2-6 における結果と同様の傾向を示しており、 w が大きくなるにつれ、両計算値の乖離が特に大きくなることはない。

したがって、(2.1)式は、建物の間口、奥行きと同程度の広い厚みを有する反射性厚み障壁に対しても、ほぼ適用できると考えられる。

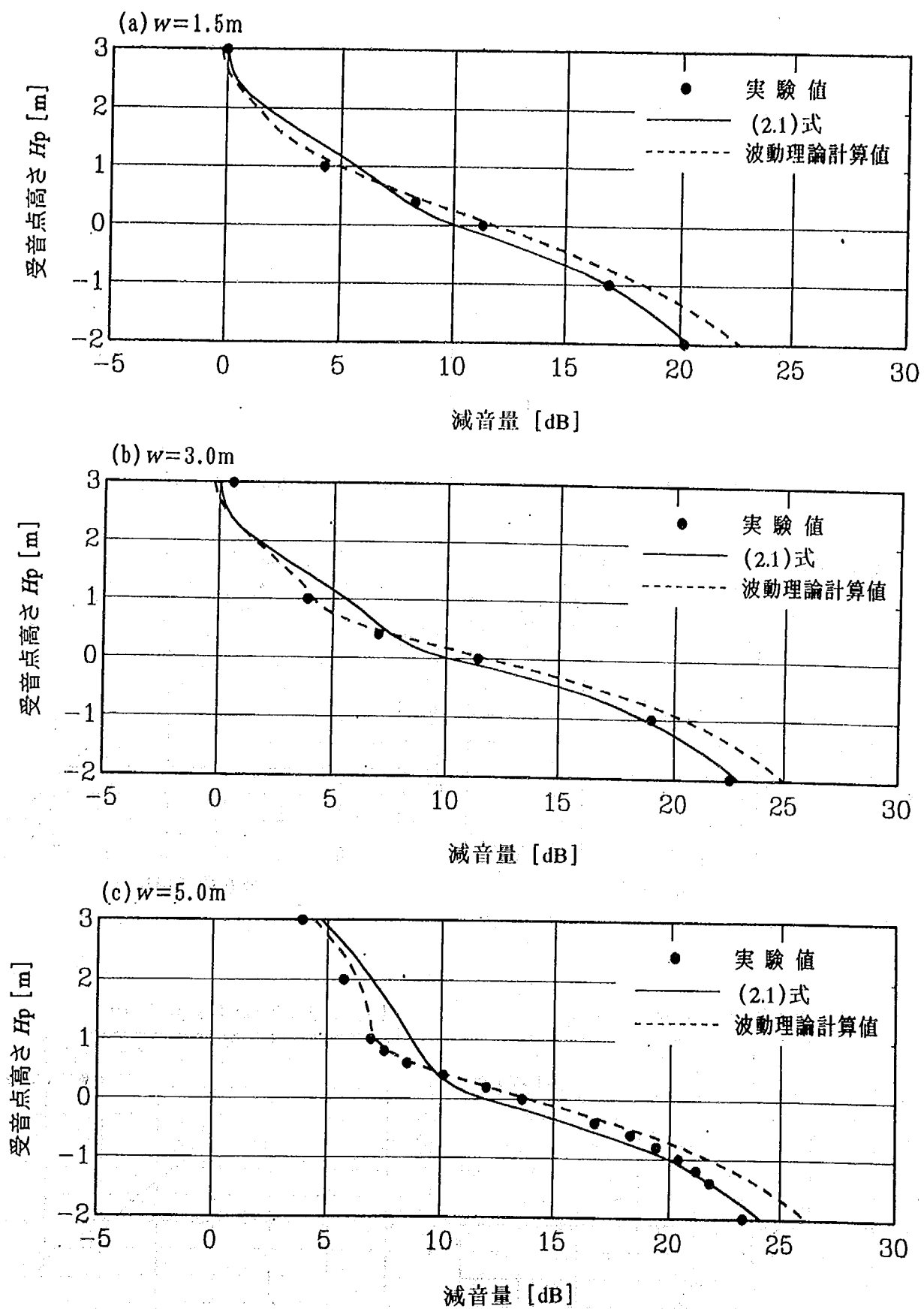


図 2 - 6 (2.1)式，波動理論計算値および模型実験値の比較

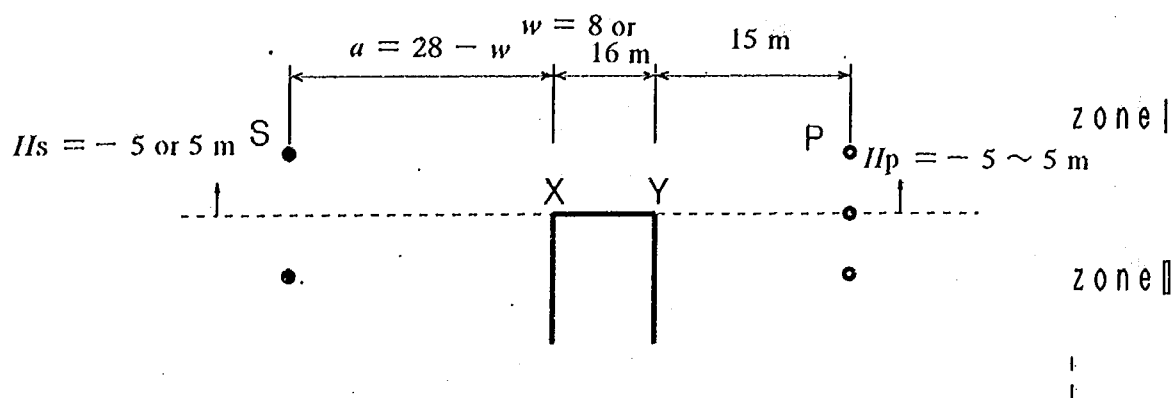


図 2-7 自由空間における反射性厚み障壁と音源・受音点の配置

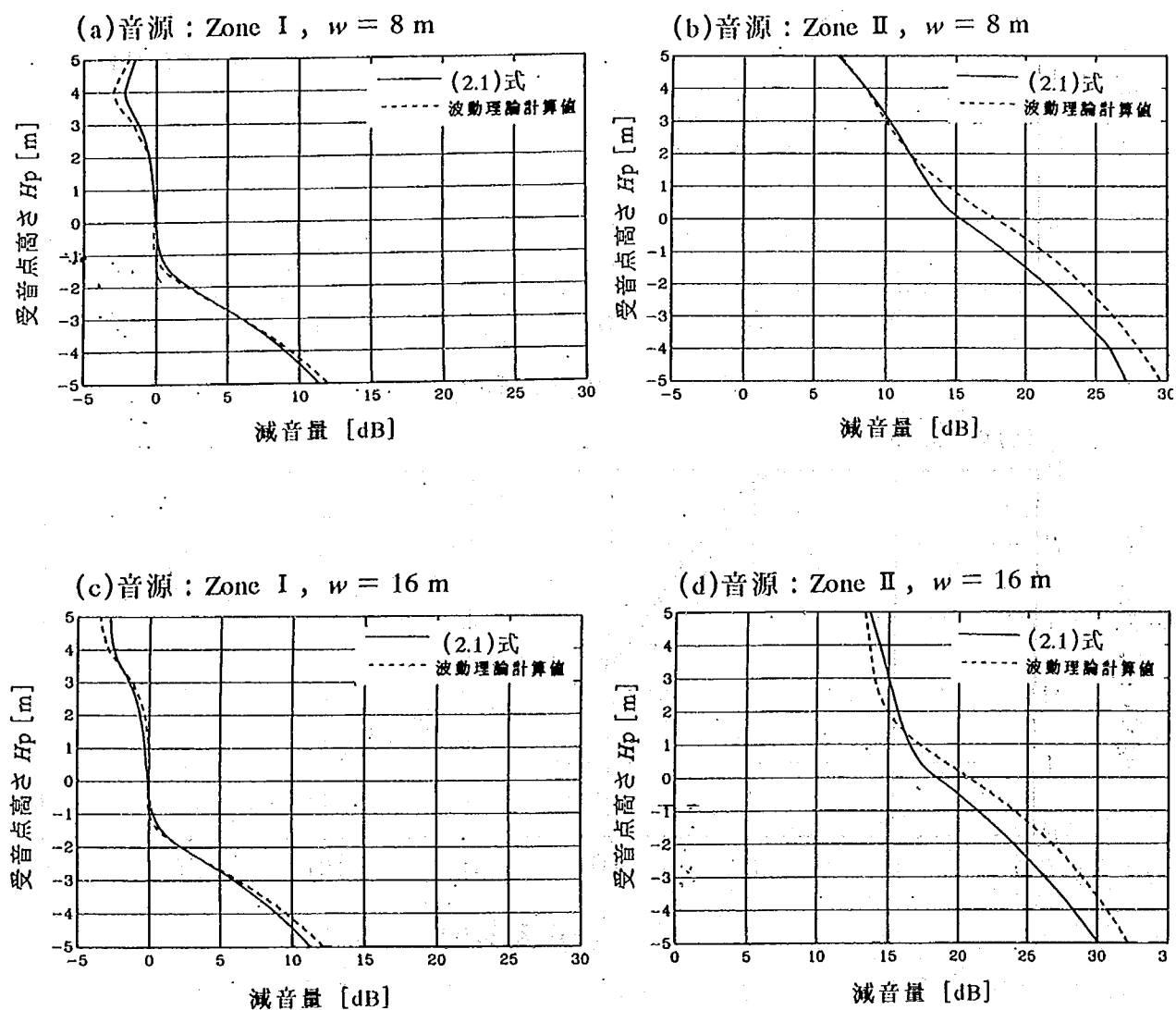


図 2-8 (2.1)式と波動理論による計算値の比較

2. 4 障壁高さが等しい二重障壁による減音量の計算方法

2.4.1 受音点が二重障壁の上端と同じ高さにある場合の回折効果の検討

1.4.3(1)で述べたように、二重障壁に関する(1.9)式の問題点の一つは、受音点が、障壁の上端を結ぶ線上の近傍にある時、計算値が不連続、あるいは、計算値と実験値の乖離が大きくなることにある。

この問題を解決するため、2. 2の模型実験結果を用いて、特に受音点が二重障壁の上端と同じ高さにある場合の回折効果について下記の分析を行った。まず、図2-1において受音点 P が二重障壁の上端を結ぶ線上 $P_0(H_p=0)$ にある時を対象とし、二重障壁による減音量 $\Delta L(D)_{SXP}$ と音源側障壁による減音量 ΔL_{SXP} の差 $\alpha (= \Delta L(D)_{SXP} - \Delta L_{SXP})$ を 1/3 オクターブバンド毎に算出した。そして周波数 f 及び二重障壁の間隔 w と、 α の関係を分析した。ここで、 $\Delta L(D)_{SXP}$ には模型実験値を用い、 ΔL_{SXP} の算出には前川チャート((1.7)式)を用いた。

図2-9に検討結果を示す。横軸は対数目盛である。 $f \cdot w/170$ は、 w を半波長で割った数(ここでは、音速を 340m/s とした)である。この図から、 $f \cdot w/170$ の増加とともに、 α が直線的に増加する傾向が見られるため、 $f \cdot w/170$ と α の関係は、基本的には、次の回帰式で表現できると考えた。

$$\alpha = A \log_{10}(f \cdot w/170 + 1) \quad (2.2)$$

(2.2)式は、 $f \cdot w/170=0$ の時、すなわち、二重障壁の間隔 $w=0$ の時 $\alpha=0$ となるように配慮した。なお、今回の実験データでは、 $A=4.03$ であり回帰式の相関係数は 0.791 である。

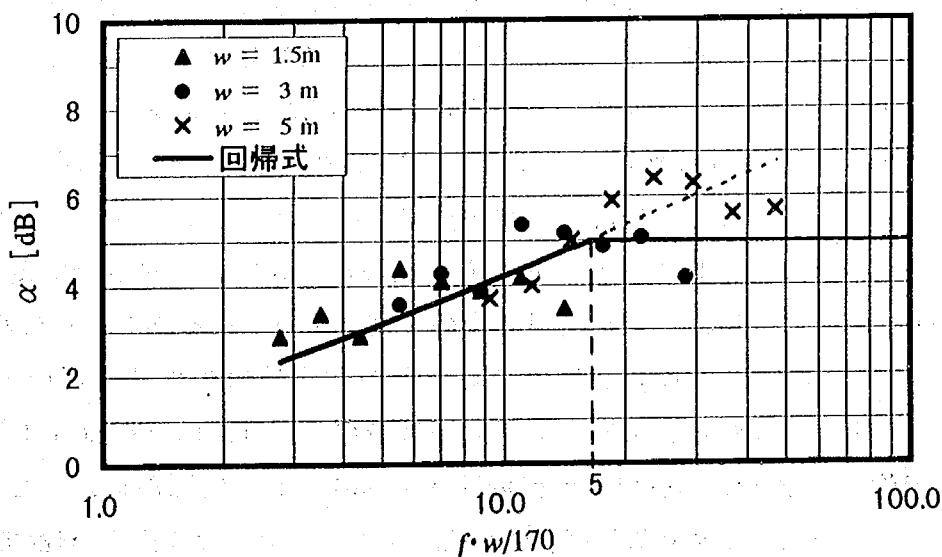


図2-9 $f \cdot w/170$ と α の関係

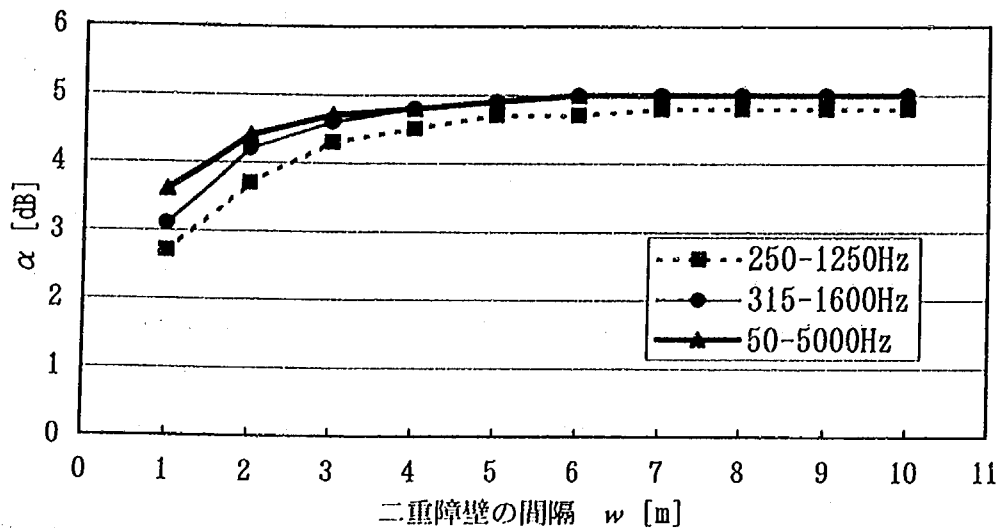


図 2-10 自動車走行騒音における w と α の関係

図 2-9 では、 $f \cdot w / 170$ の値が約 10 ～ 20、つまり、二重障壁の間隔が波長の 5 ～ 10 倍程度以上であれば、 α は 6dB 程度に安定する傾向が見られる。また、 α は、 w が小さいほど、あるいは波長が大きいほど小さくなる。これは二重障壁間の多重反射及びそれに伴う干渉の影響と推察できる。ただし、2.4.2 以降の検討では、前川チャートとの整合性を考慮し、 α の最大値を 5dB とし、 $\alpha = 5$ となる時の $f \cdot w / 170$ の値を S (今回の実験データでは $S=16.4$) とする。しかし、今回の検討では、測定データも限定されているため、 A 、 S に関する詳細な分析には、より多くの実験データの蓄積が必要と考える。

また、以上の検討の結果得られた α の計算式 (2.4.2 の (2.5) 式) と自動車走行騒音の代表パワースペクトル ((1.6) 式) を用い、二重障壁の間隔 w と A 特性オーバーオール値としての α との関係求めて、図 2-10 に示した。周波数範囲は、今回の模型実験で用いた 315Hz ～ 1,600Hz の他に、通常の道路交通騒音の予測で用いられる 50Hz ～ 5,000Hz、及び 2.6 において三重障壁による減音量の計算値と模型実験値の検証で用いる 250Hz ～ 1,250Hz とした。図 2-10 から、通常の道路交通騒音の予測 (50Hz ～ 5,000Hz) においては、二重障壁の間隔 w がほぼ 5m 以上の場合 $\alpha = 5$ dB として問題がないことが分かる。言い換えれば、 w がほぼ 5m 以上あれば、障壁間の多重反射の影響はほぼ無視できる。

2.4.2 障壁間の多重反射の影響を考慮した計算方法の提案

2.4.1での検討結果を用い、障壁高さが等しい二重障壁による減音量の新たな計算方法を提案する。この方法は、障壁間の多重反射の影響を考慮できるため、障壁間隔が小さい場合にも適用が可能である。また、音源が Zone II にある場合に、受音点が Zone I と Zone II にある場合の計算値の連続性が確保される。さらに、受音点が Zone I と Zone II の境界線の近傍にある時にも、計算値と実験値の整合性が保たれる。また、特に Zone II での減音量の計算方法の検討に当たっては、相反の定理を満足できるように配慮した。以下、提案式を示す。(図2-11参照)

(1) 二重障壁の間隔 w が十分広い時 ($\alpha=5$),

$$\Delta L(D)_{SXP} = \begin{cases} \text{Zone I} \\ \Delta L_{SXP} + \Delta L_{XYP} \\ \text{Zone II} \\ \Delta L_{SXP} + \Delta L_{SYP} - \Delta L_{STP} + 5 \end{cases} \quad (2.3)$$

(2) 二重障壁の間隔 w が狭い時 ($\alpha < 5$),

$$\Delta L(D)_{SXP} = \begin{cases} \text{Zone I} \\ \Delta L_{XYP} + \alpha - 5 < 0 \text{ の時} \\ \quad \Delta L_{SXP} \\ \Delta L_{XYP} + \alpha - 5 \geq 0 \text{ の時} \\ \quad \Delta L_{SXP} + \Delta L_{XYP} + \alpha - 5 \\ \text{Zone II} \\ \Delta L_{SXP} + \Delta L_{SYP} - \Delta L_{STP} + \alpha \end{cases} \quad (2.4)$$

ただし,

$$\alpha = \begin{cases} 0 \leq f \cdot w / 170 < S \text{ の時} \\ \quad A \log_{10}(f \cdot w / 170 + 1) \\ f \cdot w / 170 \geq S \text{ の時} \\ \quad 5 \end{cases} \quad (2.5)$$

f : 周波数 [Hz]

ΔL_{STP} : 直線 SY と直線 XP の交点 T を上端とする仮想の半無限障壁による減音量 [dB]

なお、半無限障壁による減音量は、前川チャート ((1.7)式) により求める。

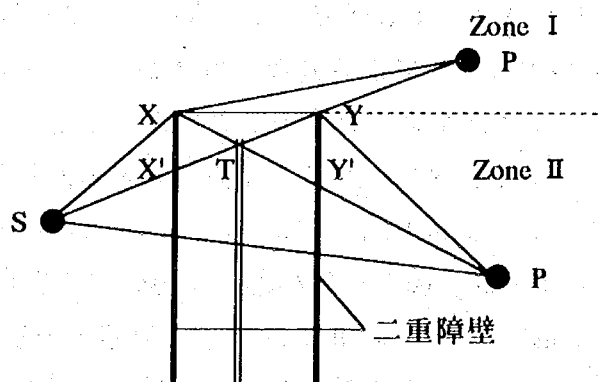


図2-11 障壁高さが等しい二重障壁による減音量の計算方法の模式図

(2.5)式の α は、障壁間隔が小さい場合における障壁間の多重反射の影響を補正するものである。1.4.3(1)で述べたように、Foss³¹⁾の方法では、主に障壁間隔 w と音源、受音点間の水平距離 T の比に基づいた補正項を用いている。一方、ここで提案する補正值 α は、障壁間隔 w と周波数 f の関数となっている点が異なる。なお、今回の実験データでは、(2.5)式において、 $A=4.03$ 、 $S=16.4$ である。(2.4.1参照)

それでは、(2.3)式の基本となる(2.4)式の導出過程について示す。

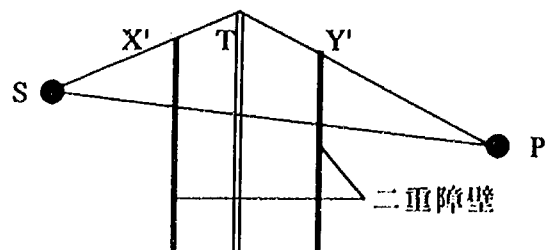
まず、受音点 P が、Zone IとZone IIの境界線上にある時について説明する。この時、 Y と T が一致し、 $\Delta L_{SY} = \Delta L_{ST}$ であり、かつ前川チャートでは、 $\Delta L_{XP} = 5$ なので、(2.4)式は、Zone I、Zone IIとも

$$\Delta L(D)_{SXP} = \Delta L_{SX} + \alpha \quad (2.6)$$

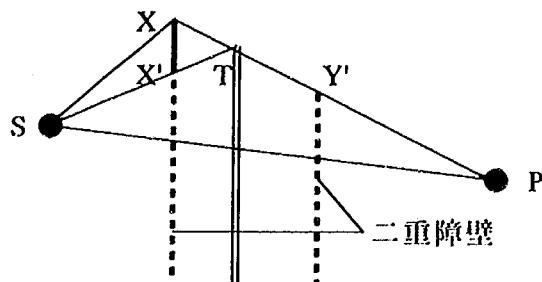
となり、Zone IとZone IIの境界での計算値の連続性は確保される。また、(2.6)式より、(2.4)式は2.4.1で検討した α を用いて定式化していることが確認できる。

次に、 P がZone Iにある場合について説明する。まず、 ΔL_{SX} が支配的である高い受音点では、減音量を ΔL_{SX} だけで表しても実験値との差は小さい。しかし、受音点がZone IとZone IIの境界に近づくと、受音点側の半無限障壁による回折効果を考慮する必要がある。ここでは、 w が十分大きい場合、受音点側の障壁での回折効果(負の行路差を有する)は ΔL_{XP} で表せると仮定した。 ΔL_{XP} は、受音点 P がZone IとZone IIの境界線上にある時(行路差が0の時)に最大値5dBをとる。しかし、 w が小さくなると受音点側の障壁の影響は小さくなると考えられ、 $w=0$ の時に0dBとなる。このことから、受音点側の障壁による影響は、上述の α を用いて、基本的には $(\Delta L_{XP} + \alpha - 5)$ で表せると仮定した。ただし、二重障壁による減音量は音源側の半無限障壁による減音量 ΔL_{SX} より小さくならないと考え、 $(\Delta L_{XP} + \alpha - 5)$ が0より小さくなる場合は、二重障壁による減音量を ΔL_{SX} で表した。

さらに、受音点がZone IIにある場合は、以下のように考えた。図2-11において、直線 SY と音源側の半無限障壁の交点を X' 、直線 XP と受音点側の半無限障壁の交点を Y' とする。ここで、前川の方法²²⁾によると図2-12の①で示すように、上端を各々 X', Y' とする二重障壁による回折効果は ΔL_{ST} で近似できる。次に、図2-12の②のように、音源側の障壁の上端 X' を X に延長することによる減音量の増加分を $\Delta L_{SX} - \Delta L_{ST}$ で表した。同様に、受音点側の障壁の上端 Y' を Y に延長することによる減音量の増加分は、 $\Delta L_{SY} - \Delta L_{ST}$ で表せる。したがって、上端を X, Y とする二重障壁による回折効果は、近似的に、 $\Delta L(D)_{SXP} = \Delta L_{ST} + (\Delta L_{SX} - \Delta L_{ST}) + (\Delta L_{SY} - \Delta L_{ST}) = \Delta L_{SX} + \Delta L_{SY} - \Delta L_{ST}$ (2.7)と表せる。しかし、このままでは、図2-12の①、②の仮定で生じた誤差がそのまま残ることになる。ここでは、Zone IとZone IIにおける計算値の連続性を満足させるため、(2.7)式の右辺に α の補正值を加えて定式化した。この場合、受音点 P がZone IとZone IIの境界線上にあり、 Y と P が一致する時に(2.6)式を満足する。



①二重障壁 X', Y' の回折効果を半無限障壁 T による減音量 ΔL_{stp} で表す。



②音源側の障壁の上端 X' を X に延長することによる減音量の増加分を，
 $\Delta L_{sxp} - \Delta L_{stp}$ で表す。

図 2-12 Zone II における二重回折計算方法の導出

2.4.3 模型実験による検証

(2.4)式を2.2.2の模型実験値により検証する。なお，半無限障壁による減音量の計算には，1/3 オクターブバンド中心周波数を用いた。

図 2-13は， f が 500Hz， w が 1.5m，3m，5m の場合である。(2.5)式により求めた α は，順に，3.0dB，4.0dB，4.8dB であった。模型実験値は，Zone I と Zone II に分類してプロットし，計算値は，(2.4)式の方法を実線，(1.9)式の方法を破線で示している。

図 2-13(a)，(b)，(c)とも，(2.4)式の方法が，模型実験値との適合性においてすぐれている。ただし， α が小さくなるにつれ，両方法による差は小さくなる。また，(1.9)式では， $H_p = 0$ で計算値が不連続となっている。

図 2-14は，自動車走行騒音の代表パワースペクトル ((1.6)式) で重み付けをした 315Hz ～ 1,600Hz の A 特性オーバーオール値として減音量を比較したものである。

(1.9)式による計算値と模型実験値を比較した図 2-14(a)では，1.4.3(1)で指摘したとおり，Zone I と Zone II の境界付近で計算値と実験値の乖離が大きくなり，最大で計算値が実験値より 4dB 程度小さくなっている。

(2.4)式の方法による計算値と模型実験値を比較した図 2-14(b)では，計算値と実験値の差は最大でも 2dB 程度であり，両者はよく一致している。ただし，図 2-13と併せて判断すると，Zone II において，受音点高さが低くなると計算値は実験値よりやや小さい値を示す傾向にある。なお，減音量が 25dB 付近では，計算値が実験値より大きくなる場

合もあるが，これは実験値自体が実際よりやや小さい値となっていると推察できる。このことは，実験値の減音量が 25dB 付近で頭打ちしている傾向が見られることから分かる。

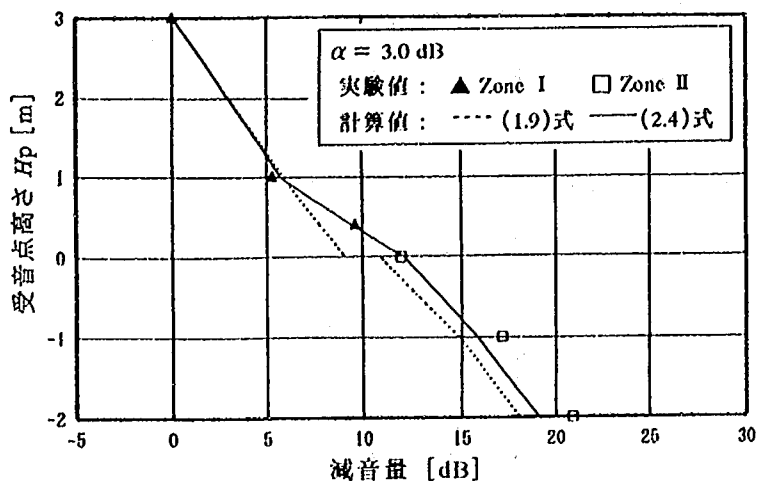


図 2-13(a) 二重障壁による減音量の計算値と実験値の比較 ($w = 1.5\text{m}$, 500Hz)

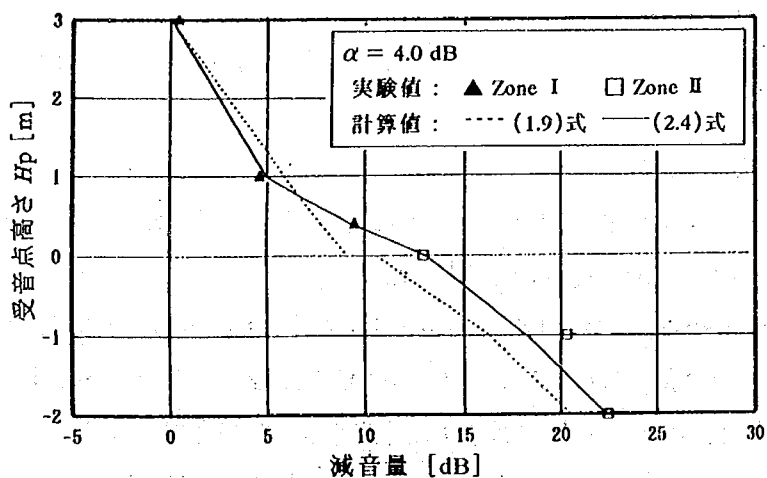


図 2-13(b) 二重障壁による減音量の計算値と実験値の比較 ($w = 3\text{m}$, 500Hz)

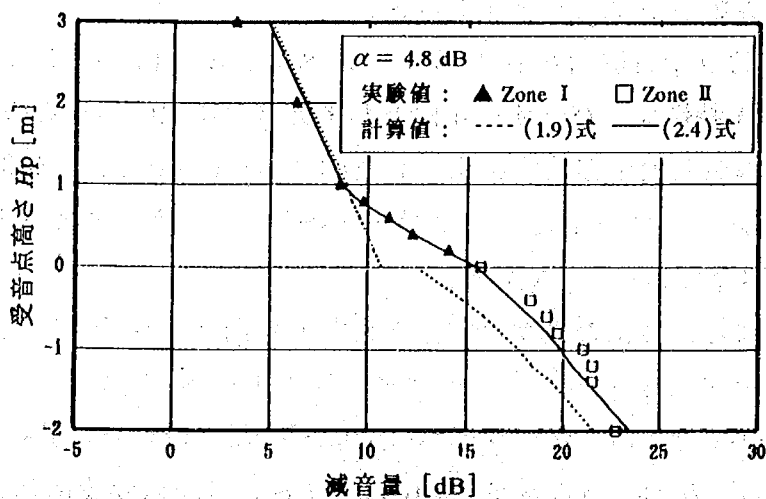


図 2-13(c) 二重障壁による減音量の計算値と実験値の比較 ($w = 5\text{m}$, 500Hz)

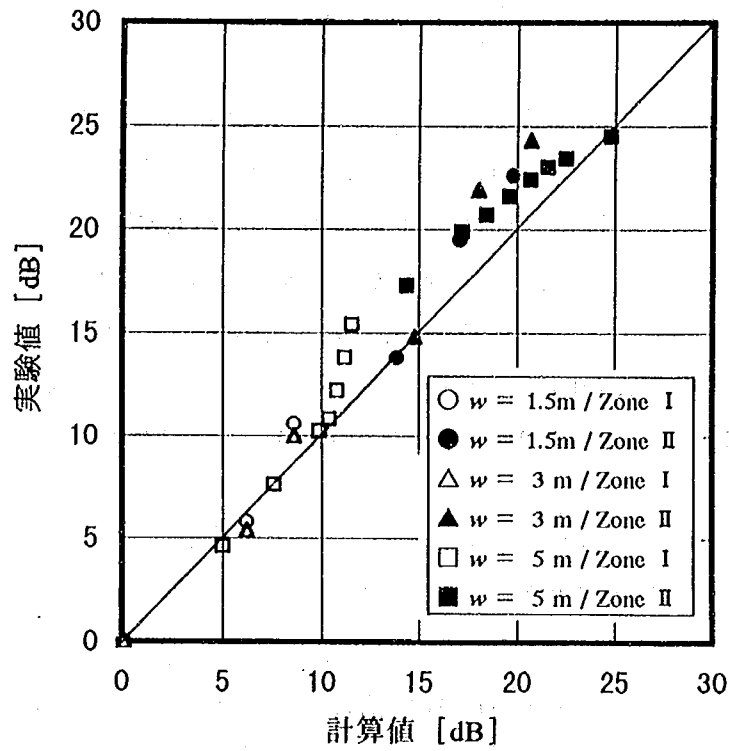


図 2-14(a) 二重障壁による減音量の計算値 ((1.9)式の方法) と
実験値の比較

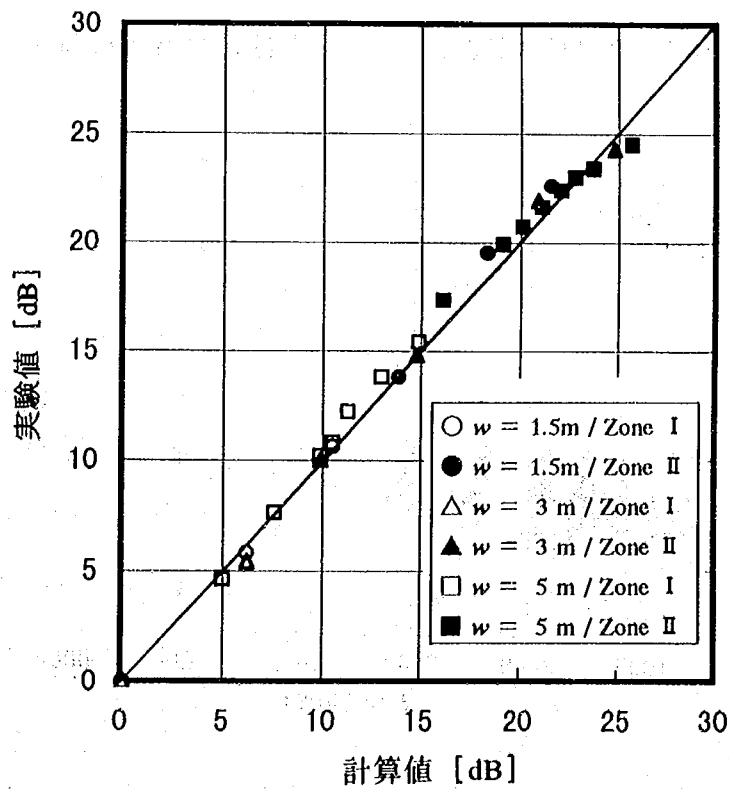


図 2-14(b) 二重障壁による減音量の計算値 ((2.4)式の方法) と
実験値の比較

2. 5 吸音性厚み障壁による減音量の計算方法

2.5.1 反射性厚み障壁及び二重障壁による減音量を用いた計算式の提案

2.2.2において、吸音性厚み障壁（厚み部分の実効的流れ抵抗 $\sigma = 140\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ）による減音量 $\Delta L(\text{AW})_{\text{SXYP}}$ を、反射性厚み障壁による減音量 $\Delta L(\text{RW})_{\text{SXYP}}$ および障壁高さが等しい二重障壁による減音量 $\Delta L(\text{D})_{\text{SXYP}}$ と比較した。その結果、 $\Delta L(\text{AW})_{\text{SXYP}}$ は、厚みの幅 w と周波数 f に依存して変化し、 $\Delta L(\text{D})_{\text{SXYP}}$ より大きくなることがある一方、 $\Delta L(\text{RW})_{\text{SXYP}}$ と同程度まで小さくなることが明らかとなった。ここでは、この結果を、さらに詳細に検討するため、 $\Delta L(\text{D})_{\text{SXYP}}$ 、 $\Delta L(\text{RW})_{\text{SXYP}}$ 及び $\Delta L(\text{AW})_{\text{SXYP}}$ と、厚みの幅 w 及び周波数 f の関係を分析した。

ただし、以下の分析に当たっては、1/3 オクターブバンド毎に整理したデータのうち、 $\Delta L(\text{D})_{\text{SXYP}} - \Delta L(\text{RW})_{\text{SXYP}} \geq 1$ (dB) となるものを選定した。これは、第1に、 $\Delta L(\text{D})_{\text{SXYP}} - \Delta L(\text{RW})_{\text{SXYP}} < 1$ (dB) となっているデータの幾つかが、(2.1)式及び(2.4)式による計算値と比較した結果、無響室の壁面での反射音の影響等により $\Delta L(\text{D})_{\text{SXYP}}$ と $\Delta L(\text{RW})_{\text{SXYP}}$ の差が見かけ上、小さくなっていると思われること、第2に、これらの測定データの誤差は図2-15の縦軸にあたる $(\Delta L(\text{AW})_{\text{SXYP}} - \Delta L(\text{RW})_{\text{SXYP}}) / (\Delta L(\text{D})_{\text{SXYP}} - \Delta L(\text{RW})_{\text{SXYP}})$ の値に与える影響が非常に大きいことから、回帰式の精度向上のため、削除すべきと考えたからである。

分析結果を、図2-15の散布図に整理した。データは、受音点位置を Zone I と Zone II

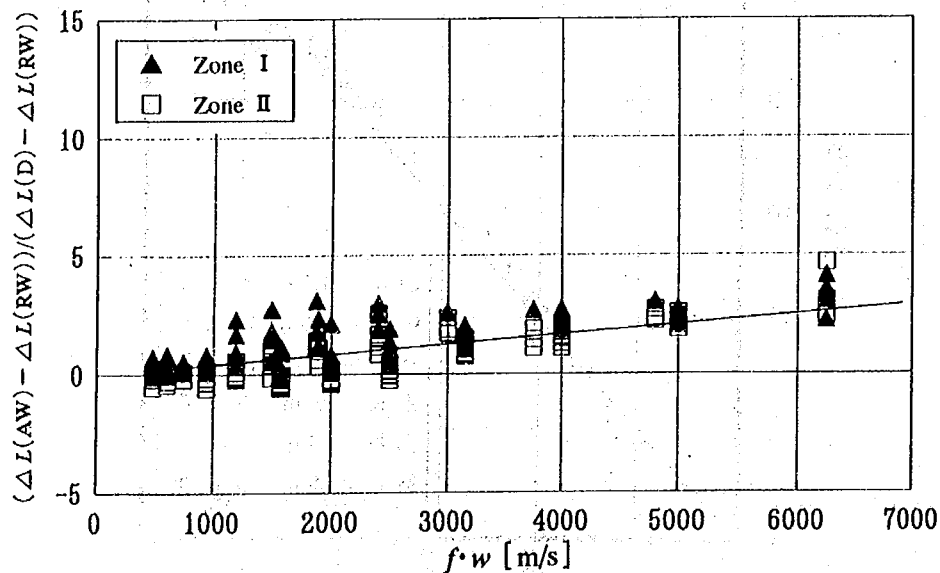


図2-15 $(\Delta L(\text{AW})_{\text{SXYP}} - \Delta L(\text{RW})_{\text{SXYP}}) / (\Delta L(\text{D})_{\text{SXYP}} - \Delta L(\text{RW})_{\text{SXYP}})$ と $f \cdot w$ との関係

とに分類してプロットしている。この図から、 $f \cdot w$ の増加とともに、 $(\Delta L(AW)_{\text{SXYP}} - \Delta L(RW)_{\text{SXYP}}) / (\Delta L(D)_{\text{SXYP}} - \Delta L(RW)_{\text{SXYP}})$ が直線的に増加する傾向が見られるため、これらの関係は、基本的に次の回帰式で表されると考えた。

$$\begin{aligned}\Delta L(AW)_{\text{SXYP}} &= \Delta L(RW)_{\text{SXYP}} + A \cdot f \cdot w \times \{\Delta L(D)_{\text{SXYP}} - \Delta L(RW)_{\text{SXYP}}\} \\ &= \Delta L(RW)_{\text{SXYP}} + B \cdot (w/\lambda) \times \{\Delta L(D)_{\text{SXYP}} - \Delta L(RW)_{\text{SXYP}}\} \quad (2.8)\end{aligned}$$

ここで、 λ は音の波長を表し、 $B (= cA, c$ は音速) および w/λ は無次元量である。

今回の実験データ (181 データ) では、 $c = 340\text{m/s}$ とすると、 $B=0.142$ であり、回帰式の相関係数は 0.754 であった。なお、Zone I と Zone II のデータに分けて回帰分析を行うと、各々 $B=0.159, B=0.122$ となり、Zone I に対する B がやや大きい値をとったが、ここでは、Zone I と Zone II における計算値の連続性を重視して、1つの回帰式とした。

(2.8)式の意味は、以下のとおりである。一般的に、 $\Delta L(AW)_{\text{SXYP}}$ が $\Delta L(RW)_{\text{SXYP}}$ より大きくなるのは、吸音性厚み障壁の音源側のエッジを回折して直接受音点に到達する音と、エッジ回折後、厚み部分で反射して伝搬する音の干渉作用によると考えられる。したがって、厚み部分の吸音効果を表す $(\Delta L(AW)_{\text{SXYP}} - \Delta L(RW)_{\text{SXYP}})$ は、上述したように、 f 及び w に依存するとともに、厚み部分の反射音の寄与が大きい受音点位置で、より大きくなると考えた。また、厚み部分における反射音の寄与は $(\Delta L(D)_{\text{SXYP}} - \Delta L(RW)_{\text{SXYP}})$ で表せると仮定した。

また、(2.8)式において、 $\Delta L(D)_{\text{SXYP}}$ 及び $\Delta L(RW)_{\text{SXYP}}$ の計算に、(2.1)式および(2.4)式を用いると、常に $\Delta L(D)_{\text{SXYP}} \geq \Delta L(RW)_{\text{SXYP}}$ であり、かつ、 $A \cdot f \cdot w \geq 0$ であるから、常に $\Delta L(AW)_{\text{SXYP}} \geq \Delta L(RW)_{\text{SXYP}}$ である。また、 $w = 0$ の時、 $\Delta L(AW)_{\text{SXYP}} = \Delta L(RW)_{\text{SXYP}}$ となる。

2.5.2 計算式の適用範囲の検討と模型実験による検証

(2.8)式は、 $\Delta L(D)_{\text{SXYP}} - \Delta L(RW)_{\text{SXYP}} \geq 1$ (dB) となるデータから作成した回帰式である。ここでは、(2.8)式の適用範囲を検討するとともに、(2.8)式における $\Delta L(D)_{\text{SXYP}}$ 、 $\Delta L(RW)_{\text{SXYP}}$ の計算に、各々(2.1)式、(2.4)式を用いた場合の計算値の妥当性を検討するため、2.2.2の模型実験値との比較を行った。なお、半無限障壁による減音量の計算には 1/3 オクターブバンド中心周波数を用いた。

厚み w が 1.5m, 3m, 5m の時に、受音点高さ H_p (図 2-1 参照) 別に計算値と実験値を比較した結果を図 2-16 に示す。減音量は、自動車走行騒音の代表パワースペクトル ((1.6)式) で重み付けした 315 ~ 1600Hz の A 特性オーバーオール値として示している。

Zone I では計算値がやや小さく、Zone II では計算値がやや大きい傾向を示している。これは、(2.8)式の検討時に、Zone I と Zone II を同一の回帰式で表したことが一因と考える。しかし、計算値と実験値の差は、低層遮音壁の植栽柵タイプ (第 4 章参照) による減音効果の予測で重要な w が 1.5m, 3m の時に 1dB 以下、 w が 5m の時にも概ね 2dB 以下で

ある。したがって、計算値と模型実験値は、よく一致していると言える。また、 $(\Delta L(D)_{SKYP} - \Delta L(RW)_{SKYP})$ が小さくなる $H_p = 3m, -2m$ の受音点位置でも、計算値と実験値の乖離が特に大きくなる傾向は見られない。

したがって、(2.8)式は、図 2-1 における実験配置全てにおいて、適用可能であることが確認された。

ただし、今回の検討は、限られた実験データを用いて行っており、(2.8)式の精度の向上には、データの蓄積により、Zone I と Zone II での回帰式の分類の必要性も含めた、より詳細な分析が必要と考える。

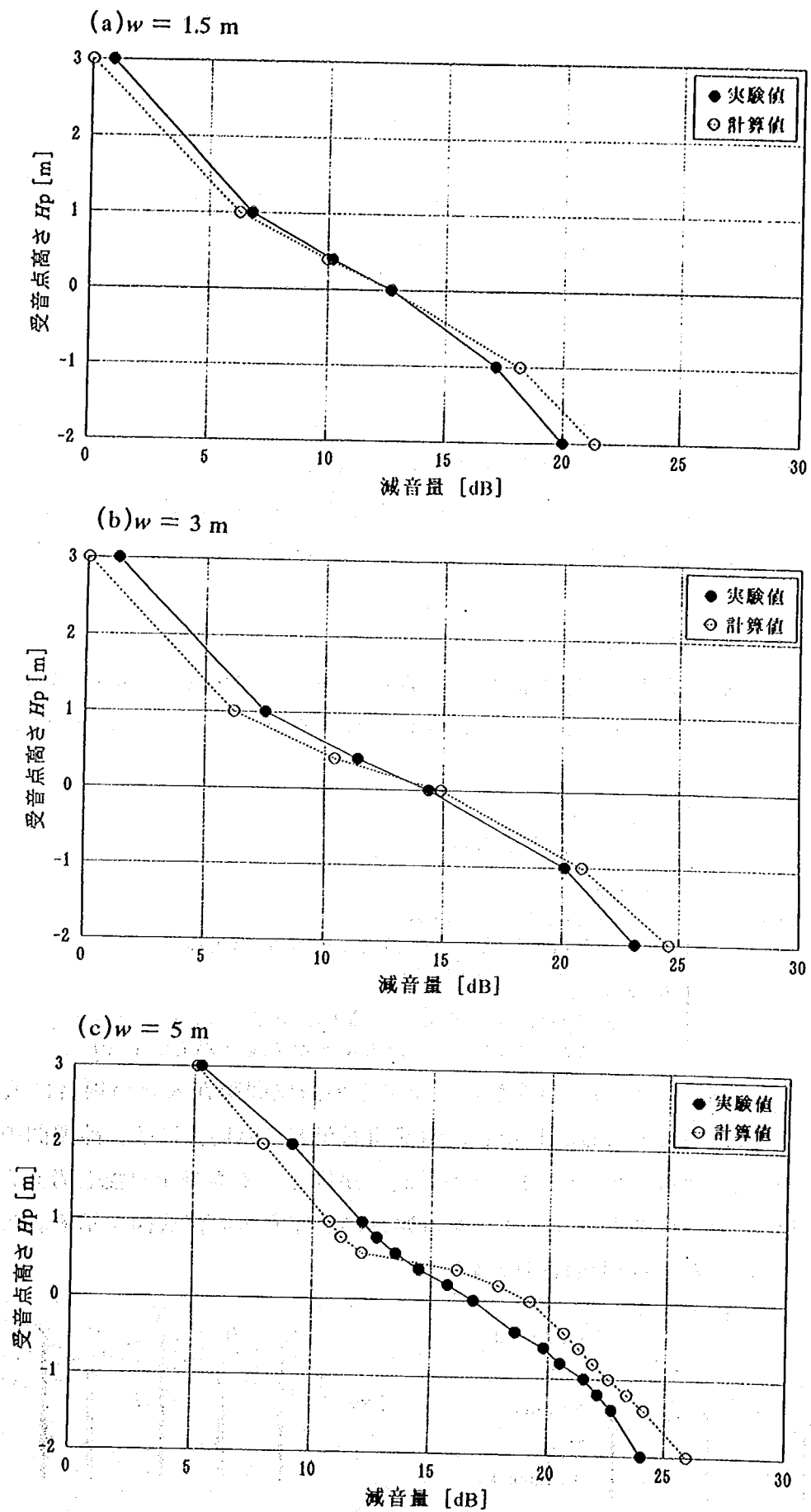


図 2 - 16 (2.8)式と模型実験値の比較

2. 6 障壁間隔が大きい三重障壁による減音量の計算方法

障壁間隔が大きい三重障壁による減音量の計算方法を2種類提案し、計算結果を東らの文献³⁶⁾における模型実験値および2次元境界要素法による計算値と比較する。なお、ここでは、三重障壁の高さが等しくない場合も含めて検討対象とする。

2.6.1 計算方法

2.4.1での検討の結果、道路交通騒音の予測において障壁高さが等しい二重障壁による減音効果を計算する場合、障壁間隔が5m以上であれば、障壁間の多重反射およびそれに伴う干渉の影響はほぼ無視できることが明らかとなっている。ここでは、障壁間隔が5m以上（以下、「障壁間隔が大きい」という）の三重障壁を対象に、その減音量の計算方法を2種類提案する。

(1)(2.3)式を応用した方法

まず、(2.3)式を応用した障壁間隔が大きい三重障壁（Triple Barriers）による減音量 $\Delta L(T)_{SXYZP}$ の計算方法を示す。ただし、音源と障壁の配置は、東らの文献による図2-17の場合に限定している。

$$\Delta L(T)_{SXYZP} = \begin{cases} \text{① Zone 1\&2} \\ \quad \Delta L_{SXP} + \Delta L_{XYP} \\ \text{② Zone 3} \\ \quad \Delta L(D)_{SXYZP} + \Delta L_{YZP} \\ \quad = \Delta L_{SXP} + \Delta L_{SYP} - \Delta L_{STP} + 5 + \Delta L_{YZP} \\ \text{③ Zone 4} \\ \quad \Delta L(D)_{SXYZP} + \Delta L_{SZP} - \Delta L_{SUP} + 5 \\ \quad = \Delta L_{SXP} + \Delta L_{SYP} + \Delta L_{SZP} - \Delta L_{STP} - \Delta L_{SUP} + 10 \end{cases} \quad (2.9)$$

(2.3)式は、元来、障壁高さが等しい二重障壁の障壁間隔が大きい場合に適用できる式として提案されたものである。しかし、障壁間隔が大きい場合には、障壁間の多重反射の影響がほぼ無視できるため、(2.3)式は障壁高さが異なっても適用可能と考えた。

図2-18に、受音点PがZone 4にある場合の計算方法の模式図を示す。この方法の考え方については、2.4.2を参照されたい。

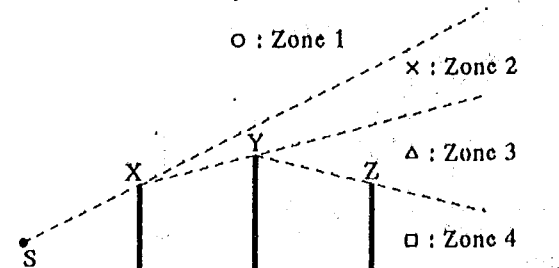


図2-17 受音点位置の区分模式図³⁶⁾

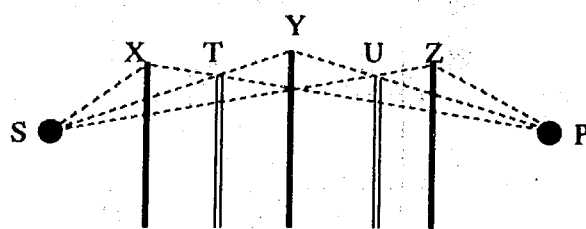


図2-18 障壁間隔が大きい三重障壁による減音量計算のための模式図 (Zone 4)

(2)前川, Fossの方法を応用した方法

次に, 二重障壁による減音量の計算に関する前川³⁰⁾, Foss³¹⁾の方法を応用した方法を示す。

まず, 障壁間隔が大きい二重障壁(Double Barriers)による減音量 $\Delta L(D)_{SXYP}$ の計算方法を, 次式に定式化する。(図2-19参照)

$$\Delta L(D)_{SXYP} = \begin{cases} \text{① } \delta_{SXP} \geq \delta_{SYP} \text{ の時} \\ \Delta L_{SXP} + \Delta L_{XYP} \\ \text{② } \delta_{SXP} < \delta_{SYP} \text{ の時} \\ \Delta L_{SYP} + \Delta L_{SXY} \end{cases} \quad (2.10)$$

ここで, δ_{ABC} , ΔL_{ABC} 書く表現は, 各々, 回折経路ABCと直達経路ACの行路差(AからCを見通せる場合, 負の値), それに対応する半無限障壁による減音量を示す。なお, 半無限障壁による減音量は, 前川チャート((1.7)式)で求める。

(2.10)式は, (2.1)式や文献31)の考え方同様, 行路差 δ の大きい半無限障壁の回折減音量を基本とし, さらに, その障壁の上端に仮想音源または仮想受音点を想定し, 他方の障壁による回折減音量を加えたものである。なお, 文献30)の方法同様, 補正項は設けていない。この方法により, 相反の定理が満足でき, 回折経路が一重回折となる領域と二重回折となる領域での計算値の連続性も確保される。ただし, (2.10)式は, 文献24), 31)によると, 実際より, やや過大な減音量を与えるおそれがある。

なお, (2.10)式は, (2.1)式の厚みのある障壁による減音量の計算式において, 厚み部分の反射音の影響を除いたものに相当する。

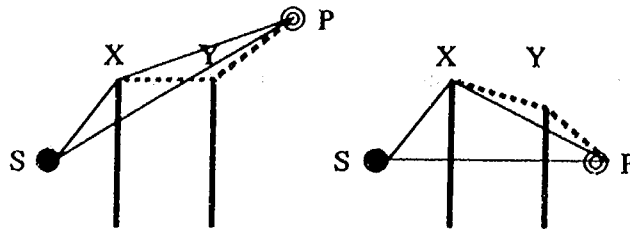
次に, (2.10)式を拡張した三重障壁による減音量の計算方法は次のとおりである。(図2-20参照)

$$\Delta L(T)_{SXYZP} = \begin{cases} \text{(a) } \delta_{SYP} = \delta_{\max} \text{ の場合} \\ \Delta L_{SYP} + (\Delta L_{SXY} + \Delta L_{YZP}) \\ \text{(b) } \delta_{SXP} = \delta_{\max} \text{ の場合} \\ \text{① } \delta_{XYP} \geq \delta_{XZP} \text{ の時} \\ \Delta L_{SXP} + (\Delta L_{XYP} + \Delta L_{YZP}) \\ \text{② } \delta_{XYP} < \delta_{XZP} \text{ の時} \\ \Delta L_{SXP} + (\Delta L_{XZP} + \Delta L_{XYZ}) \\ \text{(c) } \delta_{SZP} = \delta_{\max} \text{ の場合} \\ \text{① } \delta_{SXZ} \geq \delta_{SYZ} \text{ の時} \\ \Delta L_{SZP} + (\Delta L_{SXZ} + \Delta L_{XYZ}) \\ \text{② } \delta_{SXZ} < \delta_{SYZ} \text{ の時} \\ \Delta L_{SZP} + (\Delta L_{SYZ} + \Delta L_{SXY}) \end{cases} \quad (2.11)$$

ここで, $\delta_{\max}$ は, δ_{SXP} , δ_{SYP} , δ_{SZP} のうち, 最大のものをいう。

(2.11)式は, 3つの半無限障壁のうち, 最大の行路差 δ を与える障壁の回折減音量を基本とし, (2.10)式と同様の考えで, 残りの障壁の回折減音量を加えたものである。条件(b), (c)の場合は, 残りの障壁の回折減音量の計算に(2.10)式を用いている。

① $\delta_{SXP} \geq \delta_{SYP}$ の時



② $\delta_{SXP} < \delta_{SYP}$ の時

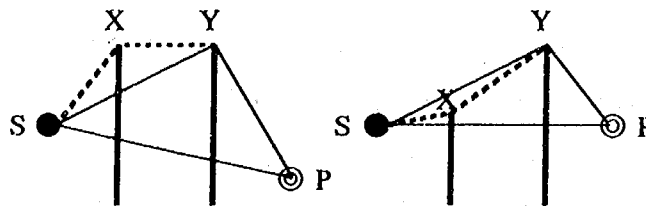
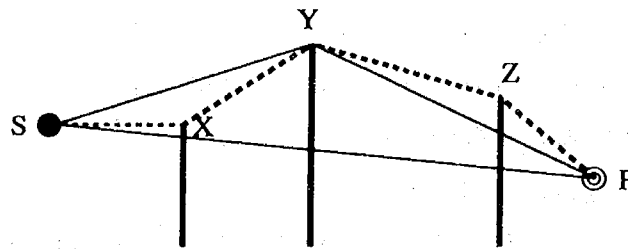
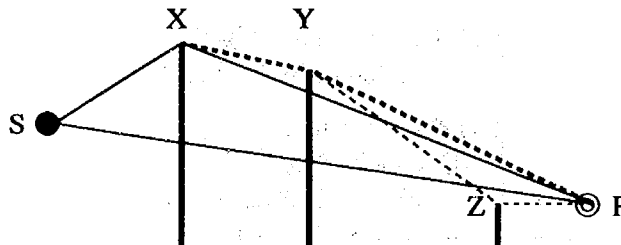


図 2-19 障壁間隔が大きい二重障壁による減音量計算のための模式図

(a) $\delta_{SYP} = \delta_{max}$ の場合



(b) $\delta_{SXP} = \delta_{max}$ の場合 ① $\delta_{XYP} \geq \delta_{XZP}$ の時



(b) $\delta_{SXP} = \delta_{max}$ の場合 ② $\delta_{XYP} < \delta_{XZP}$ の時

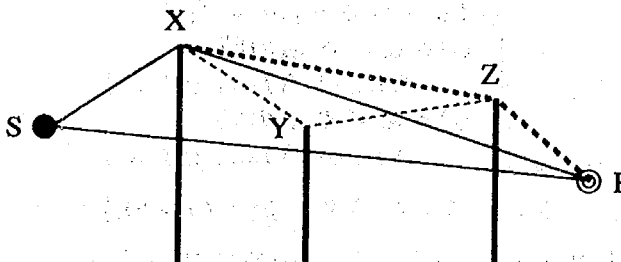


図 2-20 障壁間隔が大きい三重障壁による減音量計算のための模式図

2.6.2 模型実験値およびBEM計算値との比較

(2.9)式、(2.11)式による計算値を、東らが提案する方法³⁶⁾による計算値とともに、文献 36)における模型実験値および 2 次元境界要素法（以下、単に「BEM」という）による計算値と比較した。なお、模型実験値および BEM 計算値は挿入損失であるが、(2.9)式、(2.11)式による減音量の計算値と直接比較した。これは、模型実験における三重障壁の高さは十分に高く（図 2-21 参照）、床面での反射音の影響はほとんど無視できると考えたからである。

模型実験（縮尺比 1/40）の配置を図 2-21 に示す。障壁間隔は 5m（実物換算。2.6.2 では、模型実験に関する数値は、すべて実物換算で示す）で、対象周波数は 250Hz ～ 1250Hz であった。以下、挿入損失は自動車走行騒音の代表スペクトル（(1.6)式）で重み付けした A 特性オーバーオール値（250Hz ～ 1250Hz）として示す。この場合、図 2-10 における検討結果によると、障壁間隔は大きいと考えてよい。

図 2-22 に各種計算値と模型実験値の比較結果を示す。なお、模型実験値の記号は、図 2-17 の受音点領域を表す記号と対応している。

BEM 計算値と模型実験値は、挿入損失が 30 ～ 35dB 程度までは非常に整合がよい。しかし、模型実験値は挿入損失 35dB 程度で頭打ちしているため、それより大きい挿入損失を与える受音点位置では、BEM 計算値が模型実験値を上回る。これは、実験を行った無響室壁面における反射音の影響と推定される。よって、BEM 計算値の妥当性が検証されたと考え、以下においては、他の計算値と BEM 計算値の比較を行う。

(2.9)式による計算値を BEM 計算値と比較すると、Zone1 ～ Zone2 ではほぼ一致するが、Zone3 では 2dB 程度下回り、Zone4 では 3 ～ 5dB 程度下回る。しかし、東らの方法が、Zone2 ～ Zone4 の多くの受音点位置で、BEM 計算値を数 dB 程度下回っていることと比較すると、(2.9)式の方が、全体的に BEM 計算値との整合性においてすぐれている。

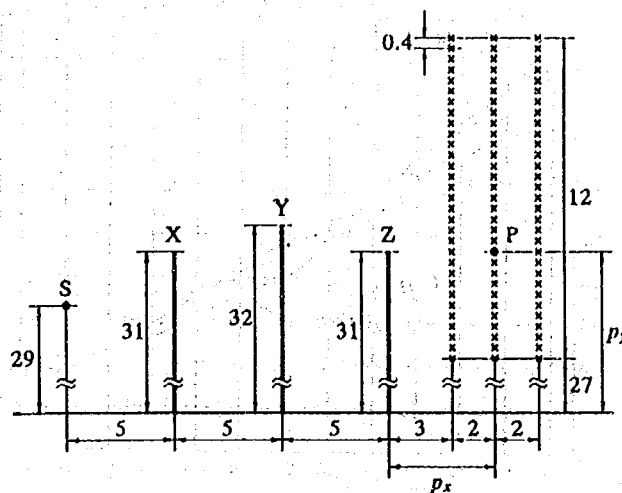


図 2-21 三重障壁の模型実験配置³⁶⁾

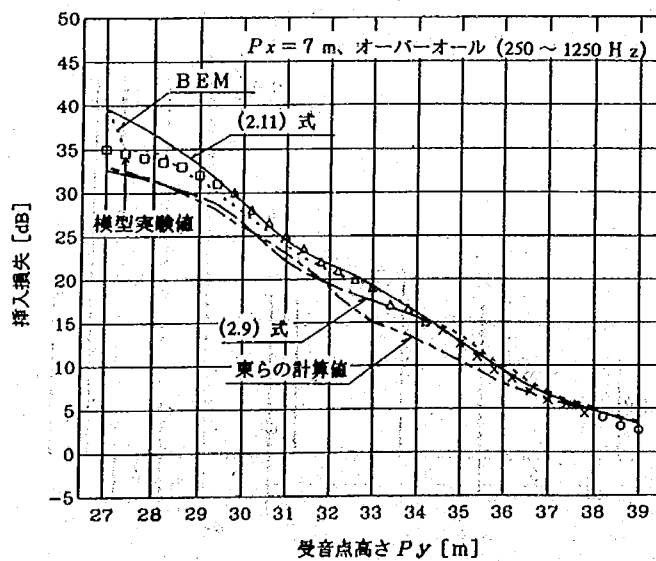
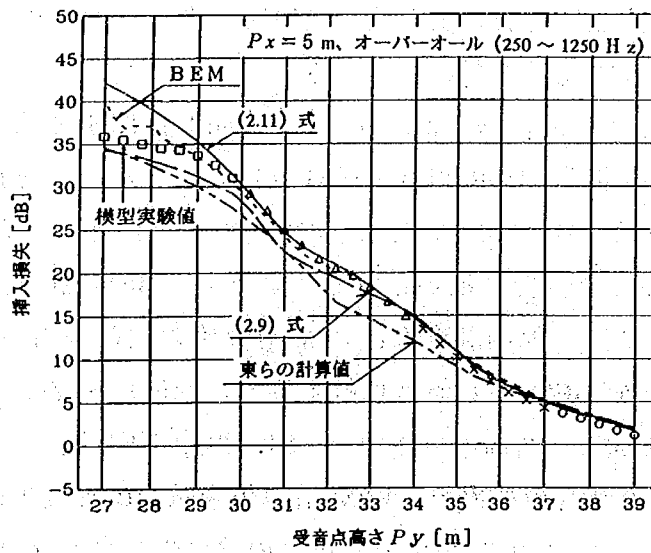
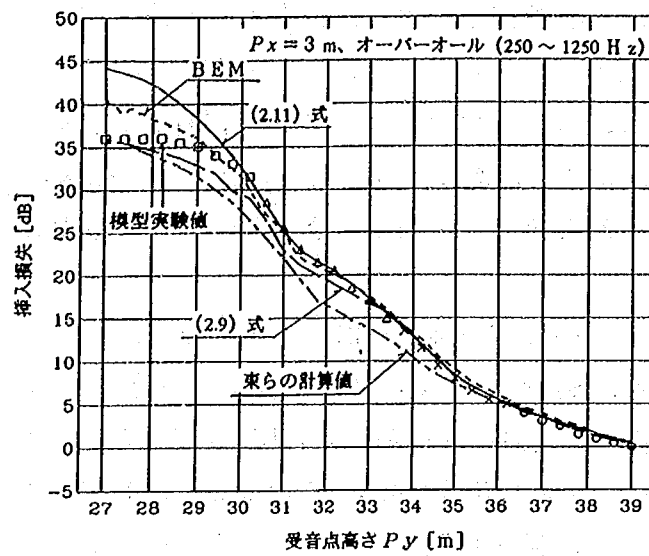


図 2-22 各種計算値と模型実験値の比較

(2.11)式による計算値を BEM 計算値と比較すると、Zone1 ～ Zone3 ではほぼ一致しているが、Zone4 では最大で 3dB 程度上回ることがある。このことは、(2.10)式の説明で述べたようにある程度予想されたことであるが、その誤差は小さく、東らの方法や(2.9)式と比較すると、(2.11)式が BEM 計算値との整合性の点で最もすぐれていると考えられる。

2. 7 まとめ

反射性厚み障壁による減音量 $\Delta L(RW)_{sxyr}$ 、障壁高さが等しい二重障壁による減音量 $\Delta L(D)_{sxyr}$ 、吸音性厚み障壁による減音量 $\Delta L(AW)_{sxyr}$ 及び障壁間隔が大きい三重障壁による減音量 $\Delta L(T)_{sxyr}$ の計算方法に関して検討を行い、以下の成果を得た。

- 1) 模型実験により、 $\Delta L(D)_{sxyr}$ 、 $\Delta L(RW)_{sxyr}$ 、 $\Delta L(AW)_{sxyr}$ 及び音源側の障壁による減音量 ΔL_{sxp} の大小関係を、受音点位置別に明らかにし、その原因について考察した。
- 2) $\Delta L(RW)_{sxyr}$ の計算のための高木の方法に、相反の定理を満たすように適用条件を追加するとともに、音源または受音点が障壁より高い場合の定式化を新たに行った。また、厚みの幅が建物の間口や奥行きと同程度に大きい場合も含めた計算方法の妥当性を、模型実験および波動理論計算値との比較により明らかにした。
- 3) 障壁高さが等しい場合を対象に、 $\Delta L(D)_{sxyr}$ の新たな計算方法を提案し、模型実験により検証した。この方法は、障壁間隔が小さい場合も適用が可能で、相反の定理を満たし、障壁間隔および受音点を変化させた場合に計算値の連続性を確保できる。
- 4) $\Delta L(AW)_{sxyr}$ を、 $\Delta L(D)_{sxyr}$ 及び $\Delta L(RW)_{sxyr}$ を用いて算出する回帰式を作成し、その適用範囲及び妥当性を模型実験により検証した。
- 5) $\Delta L(T)_{sxyr}$ の計算方法を 2 種類提案し、両方法とも、従来の計算式より模型実験値および 2 次元境界要素法による計算値との整合性が高いことを示した。なお、これらの $\Delta L(T)_{sxyr}$ の計算方法は、原理的には、四重障壁以上の多重障壁による回折効果の計算にも応用できると考える。

最後に、今後の主な課題として以下のものが挙げられる。

- 1) データの蓄積による実験回帰式の精度の向上およびその物理的意味の明確化
- 2) 吸音性厚み障壁の厚み部分の形状・実効的流れ抵抗が変化した場合への計算方法の拡張
- 3) 障壁高さが異なり、かつ障壁間隔が小さい多重障壁への計算方法の拡張
- 4) 先折れ型や先端を分岐させた遮音壁による減音効果の計算方法の検討

第3章 地面上に設置された複数の有限長障壁による 減音効果の予測・評価方法

3.1 はじめに

遮音壁の設置延長を決める場合、あるいは沿道へのアクセス確保のために遮音壁を分断して設置するような場合には、遮音壁を有限長障壁として取り扱う必要がある。特に、一般道路に設置される低層遮音壁（第4章参照）は多くの開口部を有することが多く、複数の有限長障壁が一行に並んだものとみなすことができる。一方、沿道に立地する建物（第5章参照）や建物群（第6章参照）は、地面上に設置された有限長反射性厚み障壁あるいはその集合体とみなすことができる。

本章では、第4章～第6章における検討の基本となる、地面上に設置された単独および複数の有限長障壁による減音効果の予測・評価方法の検討を行う。

3.2では、まず、地面上に複数の有限長障壁が一行に並んで設置された場合の減音効果の計算方法について検討を行う。計算方法として、山本、高木らの方法^{38)・39)}による3パスの方法を応用した方法、及び1パスの方法^{41)・42)}を提示し、それらによる計算結果を模型実験値と比較検証する。次に、音源が線音源の場合に、1パスの方法を応用した見通し角補正による方法を示し、山本、高木らの方法を応用した方法との比較により、その妥当性を明らかにする。3.3では、低層遮音壁や建物群の背後における騒音レベル及びそれらの減音効果の評価に有効な区間評価指標として、区間平均等価騒音レベル ($SA \cdot L_{Aeq}$) および区間平均挿入損失 ($SA \cdot IL$) を提案する。

3.2 一行に並んだ複数の有限長障壁による減音効果の計算方法

3.2.1 単独の有限長障壁による減音量計算のための山本、高木らの方法の応用

(1) 山本、高木らの方法^{38)・39)}

山本、高木らは、有限長障壁として半無限長障壁の上端に矩形上の障壁を付加したモデル（図3-1参照）を取り上げ、自由空間における減音量を求める計算方法を示している。この方法によると、単独の有限長障壁 ABCD による減音量 $\Delta L_{1 \sim 5}$ は次式で求められる。

$$\Delta L_{1 \sim 5} = -10 \log_{10} \left\{ 10^{-\Delta L_{123}/10} + \left(10^{-\Delta L_{0 \sim 5}/10} - 10^{-\Delta L_{123}/10} \right) \left(10^{-\Delta L_{146}/10} + 10^{-\Delta L_{358}/10} \right) \right\} \quad (3.1)$$

ここで、 ΔL_i は、領域 i が開放されている場合の減音量を表す。

この方法では、図3-1で示されるように、点音源 S と受信点 P の間の無限平面を四本の直線 AB, CD, AC, BD で分割し、その九の領域からの音の寄与を考えている。なお、これらの寄与は、半無限障壁による減音量を用いて求められる。

また、地面上に単独の有限長障壁が設置された場合の挿入損失 $IL_{1\sim5}$ は、底辺部の半無限障壁の上端の位置（図3-1では CD の位置にあたる）に地面があると考え、以下の式で求められる^{38), 39)}。

$$IL_{1\sim5} = -10 \log_{10} \left\{ 0^{-\Delta L_{123}/10} + (10^{-\Delta L_{0\sim5}/10} - 10^{-\Delta L_{123}/10}) (10^{-\Delta L_{146}/10} + 10^{-\Delta L_{358}/10}) \right\} - \Delta L_{0\sim5} \quad (3.2)$$

(2) 一列に並んだ複数の有限長障壁による減音量

(3.1)式を応用し、複数の有限長障壁が一列に並んだ場合の減音量の計算方法を検討する。まず、二つの同一高さの有限長障壁を例に挙げる。図3-2①の網掛部のうち C_0 及び C_{14} が記入された空間が二つの並んだ有限長障壁を示している。①における音の寄与 $C_1 \sim 5, 11 \sim 13$ (エネルギー量) を求めるには、②及び③における音の寄与を加え、④における音の寄与を除けばよいので、①における減音量は、

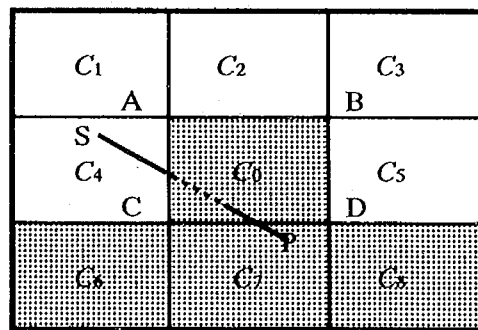


図3-1 有限長障壁の回折効果計算のための空間分割模式図
(山本, 高木ら^{38), 39)}の図を改良)

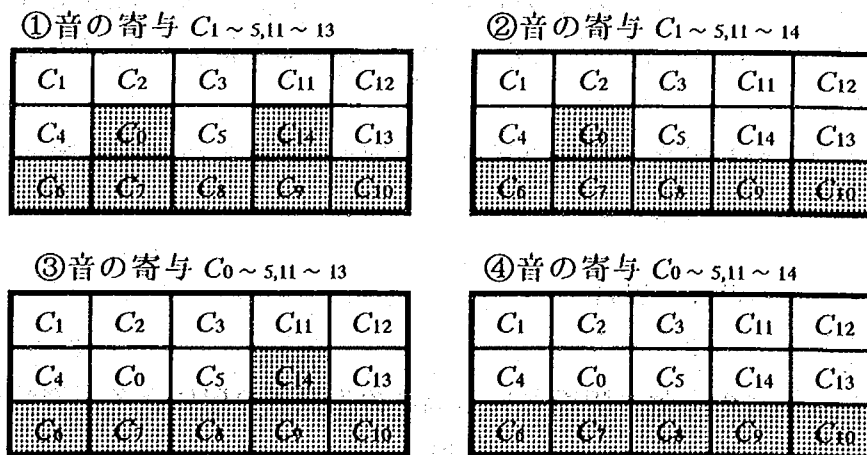


図3-2 二つの同一高さの有限長障壁の減音量算定のための模式図

$$\begin{aligned}\Delta L_{1 \sim 3, 11 \sim 13} &= -10 \log_{10} \left(\frac{C_{1 \sim 3, 11 \sim 14} + C_{0 \sim 3, 11 \sim 13} - C_{0 \sim 3, 11 \sim 14}}{C_{0 \sim 14}} \right) \\ &= -10 \log_{10} \left(10^{-\Delta L_{1 \sim 3, 11 \sim 14}/10} + 10^{-\Delta L_{0 \sim 3, 11 \sim 13}/10} - 10^{-\Delta L_{0 \sim 3, 11 \sim 14}/10} \right)\end{aligned}\quad (3.3)$$

となる。この式が示すように、二つの有限長障壁による減音量についても、単独の有限長障壁による減音量、ひいては半無限障壁による減音量の組み合わせで求めることができる。

同様にして、 n 個の有限長障壁 (Finite Length Barriers) による減音量 ΔL (FLs) は、以下の式で求められる。

$$\Delta L(\text{FLs}) = -10 \log_{10} \left\{ \sum_{i=1}^n 10^{-\Delta L(\text{FL})_i/10} - (n-1) \times 10^{-\Delta L_0/10} \right\} \quad (3.4)$$

$\Delta L(\text{FL})_i$: i ($i=1 \sim n$) 番目の有限長障壁による減音量 [dB]

ΔL_0 : 底辺部の半無限障壁による減音量 [dB]

なお、底辺部の半無限障壁が共通であれば、複数の有限長障壁の高さが異なっても (3.4) 式が適用できることは明らかである。

複数の有限長障壁を地面上に設置した場合の挿入損失 $IL^{(PS)}(\text{FLs})$ (上付きサフィックスの (PS) は点音源 point source の略) は、(3.2) 式と同様の考えをとれば、底辺部の半無限障壁の減音量 ΔL_0 を (3.4) 式から差し引き、次式で与えられる。

$$IL^{(PS)}(\text{FLs}) = -10 \log_{10} \left\{ \sum_{i=1}^n 10^{-\Delta L(\text{FL})_i/10} - (n-1) \times 10^{-\Delta L_0/10} \right\} - \Delta L_0 \quad (3.5)$$

なお、(3.2) 式および (3.5) 式では、いずれも地面反射音の影響は無視している。

3.2.2 1パスの方法

有限長障壁による減音効果の単純な計算方法としては、1パスの方法^{41), 42)}がある。これは、音源と受音点を含む鉛直な平面が有限長障壁と交差する場合は半無限障壁を想定して回折効果を計算し、交差しない場合は全く障壁が存在しないと考える方法である。ここでは、地面上に設置された複数の有限長障壁による挿入損失 $IL^{(PS)}(\text{FLs})$ の計算方法を、以下のように定式化した。

$$IL^{(PS)}(\text{FLs}) = \begin{cases} \Delta L_i & \text{① 音源と受音点を結ぶ鉛直な平面が、} i \text{ 番目の有限長障壁と交差する場合} \\ \text{② ①以外の場合} & \\ 0 & \end{cases} \quad (3.6)$$

ΔL_i : i 番目の有限長障壁と同じ高さの半無限障壁による減音量 [dB]

なお、ここでは、地面反射音の影響は無視している。

3.2.3 模型実験による検証

(3.5)式および(3.6)式の妥当性を、模型実験により検証する。ここでは、二つの低層遮音壁（高さ 1m）が歩道上に設置されている場合を想定し、縮尺比 1/10 の模型実験を無響室で行った。なお、模型実験に関する数値は、「原寸」と表示しない限り実物換算で示す。

(1) 実験方法

図 3-3 に実験配置を示す。遮音壁は、車道面からの高さ 1m、延長は 5m と 10m の二つを 3m 間隔で設置した。音源（高さ 0.4m）は、4 車線の幹線道路の近車線側の中心（遮音壁から 4m）を 0.25m 間隔で 40m の区間にわたって移動させた。受音点は、延長 10m の遮音壁背後中央 A 点および開口部背後中央 B 点とした。これらは、遮音壁の後方 5m（幅員 5m の歩道を想定）で、高さ 1.4m（歩道面からの高さを 1.2m とし、歩道の車道面からのマウンドアップを 0.2m と見込んでいる）の地点である。

遮音壁は、厚さ 5mm（原寸）の亚克力板（反射性）で製作し、車道面、歩道面にも厚さ 3mm（原寸）の亚克力板（反射性）を敷設した。音源にはジェットノイズの点音源を上向きで用いた。測定は、1/4 インチタイプのマイクロホンで行い、対象周波数は 100Hz ～ 2.5kHz とした。

(2) 実験値と計算値のユニットパターンの比較

実験値と計算値との比較検討を行う。音圧レベル L_p の計算値は、(1.3)式を基本にし、音源（高さ 0m）のパワーレベル L_w と半自由空間における距離減衰（距離 r ）及び複数の有限長障壁による挿入損失 $IL^{(PS)}$ (FLs)を用いて、

$$L_p = L_w - 8 - 20 \log_{10} r - IL^{(PS)} \text{ (FLs)} \quad (3.7)$$

により求めた。

また、 $IL^{(PS)}$ (FLs)の算出には、(3.5)式および(3.6)式を用いた。音源には 1 台の自動車を想定し、 L_w は A 特性で 100dB とした。また、パワースペクトルとして、自動車走行騒音の代表スペクトル ((1.6)式、対象周波数は 100Hz ～ 2.5kHz) を与えた。半無限障壁による減音量は、1/3 オクターブバンド中心周波数を用いて前川チャート ((1.7)式) から求めた。

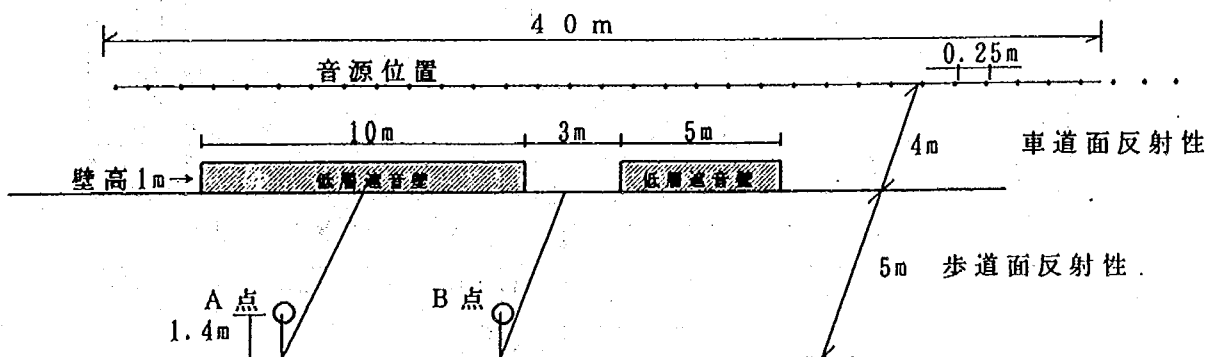
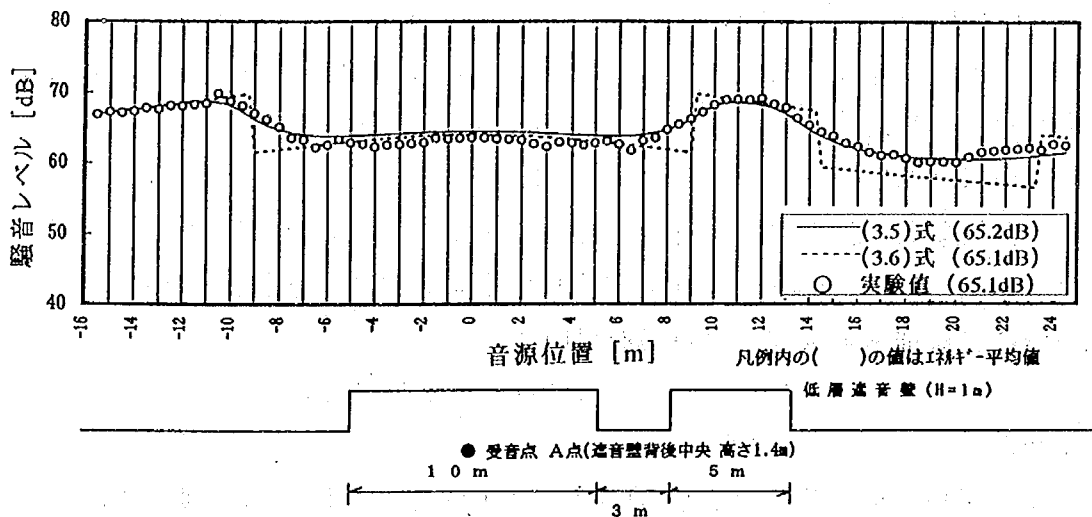


図 3-3 模型実験の配置

一方、実験値の算出に当たっては、別途、音源の L_w を測定し、 L_w およびパワースペクトルが計算値における設定と一致するように、1/3 オクターブバンド毎の一定の補正を各測定値に対して行った。

図3-4に計算値と模型実験値のユニットパターン(1.2.1参照)の比較結果を示す。ただし、実験値は図の都合上、音源の移動間隔を0.5mとして表示している。これらによると、受音点A、Bの両方において、(3.5)式を用いた計算結果は、実験値と非常によく対応を示している。したがって、この式は、二つの遮音壁による減音量の計算に十分利用できることが明らかとなった。また、(3.6)式による計算結果は、予想されたとおり階段状の騒音レベル(A特性音圧レベル)の変化を示したが、遮音壁の背後及び開口部の中央付近では実験値とよい整合を示している。さらに、音源を40mの区間について移動させ

(a) 遮音壁背後A点



(b) 開口部背後B点

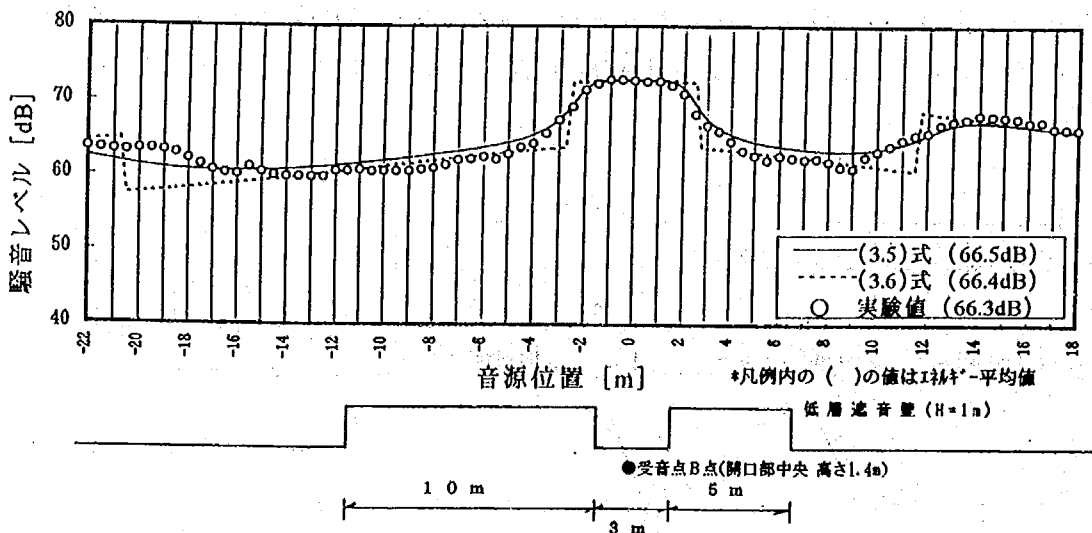


図3-4 計算値と模型実験値のユニットパターンの比較

た時のユニットパターンのエネルギー平均値（測定または計算した騒音レベルのエネルギー合成値をデータ数で除してレベル表示したもの）を比較すると、A点、B点の両方において、(3.5)式、(3.6)式の方法による計算値は模型実験値とよい整合を示しており、その差は0.2dB以下である。

3.2.4 線音源に対する見通し角法の妥当性の検討

3.2.3では、音源が複数の有限長障壁に沿って平行に移動する場合、遮音壁後方の受音点でのユニットパターンのエネルギー平均値を計算するには、1パスの方法(3.6)式が実用上十分利用できることが確認できた。

音源が線音源の場合に、1パスの方法を応用した方法に、見通し角補正による方法⁶⁰⁾（以下、「見通し角法」という）がある。ここでは、この方法を、(3.5)式による計算結果と比較して、その妥当性を明らかにする。

(1)線音源に対する見通し角法

有限長の線音源から受けるエネルギー密度は、受音点から線音源の両端を見通す角度に比例する⁶⁰⁾。見通し角法は、この原理を遮音壁設置時にも拡張したものである。つまり、無限長の線音源がある場合に、ある受音点において、障壁が存在しない場合の騒音レベルを L_0 、無限長の半無限障壁を設置した場合の騒音レベルを L_1 、複数の有限長障壁を設置した場合の騒音レベルを L_2 とすると、

$$L_2 = 10 \log_{10} \left(\frac{\theta}{\pi} 10^{L_1/10} + \frac{\pi - \theta}{\pi} 10^{L_0/10} \right) \quad (3.8)$$

と表せる。ここで、 $\theta = \sum \theta_i$ (θ_i は受音点から i 番目の有限長障壁の両端を見通した時の角度[rad]) である。

さらに、無限長の半無限障壁による挿入損失を $IL_0^{(LS)} (= L_0 - L_1)$ として、(3.8)式に、 $L_1 = L_0 - IL_0^{(LS)}$ を代入すれば、線音源 (Line Source) に対する複数の有限長障壁による挿入損失 $IL^{(LS)} (FLs) = L_0 - L_2$ は、次式で表される。

$$IL^{(LS)} (FLs) = -10 \log_{10} \left\{ 1 - \frac{\theta}{\pi} (1 - 10^{-IL_0^{(LS)}/10}) \right\} \quad (3.9)$$

ここで、 $IL_0^{(LS)}$ の算出に当たっては、点音源を障壁に沿って平行に移動させ、遮音壁設置前後のユニットパターンのエネルギー積分値または平均値の差分を求めればよい。また、線音源が有限長（受音点から音源を見通した角度を θ_0 とする。）の場合には、(3.9)式の π を θ_0 に置き換えればよい。

(2)(3.5)式との比較による見通し角法の妥当性の検証

低層遮音壁が設置された場合を想定し、見通し角法(3.9)式の妥当性を(3.5)式による計算結果と比較して明らかにする。

図3-5に示すように、図3-3と同様の横断面を有する無限長道路において、4つの低層遮音壁（高さ1m）を設置する場合を想定した。評価区間は2.5m間隔で40等分し、各区間の中央で官民境界上、車道面からの高さ1.4mに40の受音点を設定し、遮音壁設置前後における各受音点の $IL^{(15)}$ (FLs)を求めた。半無限障壁による減音量の計算は、前川チャート（(1.7)式）によりオクターブバンド中心周波数を用いて行った。そして、 $IL^{(15)}$ (FLs)は自動車交通騒音の代表スペクトル（(1.6)式）で重み付けしたA特性オーバーオール値（63Hz～4kHz）として示した。なお、(3.5)式による計算では、音源は2000m区間に0.25m間隔で配置した。

図3-6に、(3.5)式および(3.9)式の方法による計算値を比較した結果を示す。両方法による計算値の差異は、図において区別できないほど一致した。したがって、図3-5で示したような直線道路において、同一高さの複数の有限長遮音壁を設置した場合の $IL^{(15)}$ (FLs)の算出は、(3.9)式の方法を用いれば実用上十分であることが判明した。

すなわち、直線道路において、同一高さの複数の有限長障壁の設置による各受音点の挿入損失を計算する場合は、(3.9)式を用いればよい。

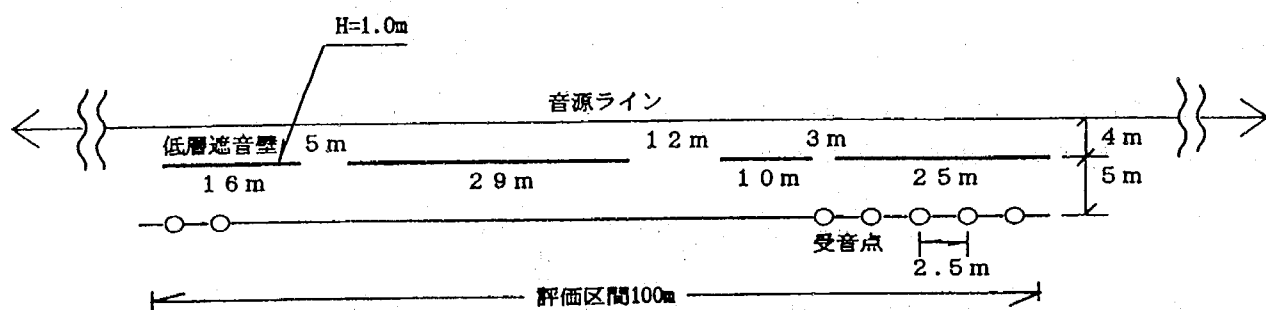


図3-5 無限長直線道路に設置した低層遮音壁

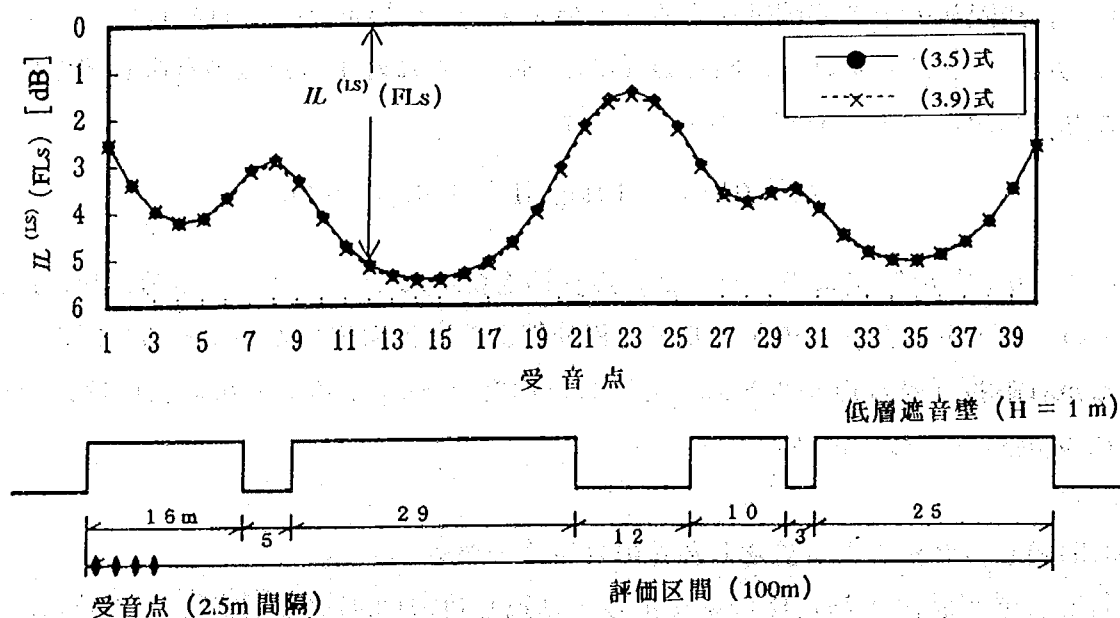


図3-6 (3.5)式と(3.9)式の計算結果の比較

3.3 集合した有限長障壁による減音効果の区間評価

沿道に立地する建物群や多くの開口部を有する低層遮音壁は、有限長障壁（厚みのある場合も含む）の集合体とみなすことができる。1.5で述べたように、これらの背後における騒音レベルは、評価地点と開口部の位置関係により複雑に変化するため、評価区間の騒音の状況を代表する地点の設定は極めて困難である。したがって、評価地点を特定せずに評価区間全体の騒音の状況を代表できる指標が有効である。

ここでは、その指標として、道路から一定距離隔たった一定高さの評価区間の L_{Aeq} のエネルギー平均値を用いることとし、それを区間平均等価騒音レベル（Section-averaged equivalent continuous A-weighted sound pressure level, $SA \cdot L_{Aeq}$ ）と呼ぶ。

区間平均等価騒音レベル[dB]は、以下で定義される。

$$\begin{aligned} SA \cdot L_{Aeq} &= 10 \log_{10} \left(\frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} 10^{L_{Aeq}(x)/10} dx \right) \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{1}{x_2 - x_1} \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{x_1}^{x_2} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t, x)}{p_0^2} dt \cdot dx \right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

t_1, t_2 : 対象とする時間範囲の始まりの時刻, 終わりの時刻

x_1, x_2 : 評価区間の始まり点, 終わりの点

$p_A(t, x)$: 時刻 t , 評価点位置 x における A 特性音圧 [dB]

p_0 : 基準音圧 (20 μ Pa)

この指標の物理的意味は、評価区間が一定時間に受ける音のエネルギーを、時間的かつ空間的に平均化した場合の騒音レベルである。

なお、 $SA \cdot L_{Aeq}$ を測定で求める場合は、等間隔に配置した n 箇所の測定点での $L_{Aeq}(i)$ から、次式により計算する。

$$SA \cdot L_{Aeq} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_{Aeq}(i)/10} \right) \quad (3.11)$$

さらに、複数の有限長障壁による評価区間の平均的な減音効果を表す指標を、区間平均挿入損失（Section-averaged Insertion Loss, 以下、 $SA \cdot IL$ と表す）と呼び、以下のように定義する。

$$SA \cdot IL = SA \cdot L_{Aeq}(before) - SA \cdot L_{Aeq}(after) \quad (3.12)$$

ここで、 $SA \cdot L_{Aeq}(before)$, $SA \cdot L_{Aeq}(after)$ は、各々、障壁設置前後の区間平均等価騒音レベルを表す。

また、等間隔に配置した n 箇所の測定点での挿入損失 $IL_i^{(LS)}$ から、 $SA \cdot IL$ を算出するとき、次式による。

$$SA \cdot IL = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{-IL_i^{(LS)}} \right) \quad (3.13)$$

これらの $SA \cdot L_{Aeq}$ 及び $SA \cdot IL$ という区間評価指標を用いることにより，複数の有限長障壁（厚みのある場合も含む）による減音効果は簡易に求めることが可能となるが，このことに関しては第4章及び第6章で詳述する。

3. 4 まとめ

複数の有限長障壁による減音効果の予測・評価方法の検討を行い，以下の成果を得た。

- 1) 単独の有限長障壁による減音量計算のための山本，高木らの方法を応用し，地面上に
一列に並んだ複数の有限長障壁による挿入損失の計算方法を示した。
- 2) 地面上に2つの有限長障壁が設置された場合を対象に，1)の方法及び1パスの方法に
よるユニットパターンの計算結果を模型実験値と比較した。その結果，1)の方法が実験
値との整合性の点ですぐれていることが明らかとなった。ただし，ユニットパターンの
エネルギー平均値は両計算方法とも差がなく，ともに実験値と非常によく一致した。
- 3) 十分長い直線道路において，同一高さの複数の有限長障壁を一列に設置した場合の特
定地点での挿入損失の計算方法を検討した。その結果，1パスの方法を応用した見通し
角補正による方法が実用上有効であることが，1)の方法による計算値との比較により明
らかになった。
- 4) 集合した有限長障壁の背後では，評価地点により騒音レベルが複雑に変化する。この
場合に有効な評価指標として，区間平均等価騒音レベル ($SA \cdot L_{Aeq}$) を定義した。これ
は，道路から一定距離隔たった一定高さの評価区間の騒音レベルのエネルギー平均値で
ある。また，集合した有限長障壁による減音効果を表す指標として，障壁設置前後の
 $SA \cdot L_{Aeq}$ の差として定義される区間平均挿入損失 ($SA \cdot IL$) を提案した。

第4章 低層遮音壁による減音効果の予測・評価方法

4.1 はじめに

都市内の一般道路における道路交通騒音対策の一手法として、高さが1 m程度の低層遮音壁に関する研究が行われている^{43)~47)}。しかし、低層遮音壁は実際の騒音対策手法として、いまだ広く普及していない。この主な原因として、多くの開口部を有し、かつ、種々の形状、材質をとり得る低層遮音壁の減音効果の予測・評価方法が確立しておらず、その設計のための考え方も明らかになっていないことが挙げられる。

以下、4.2において、低層遮音壁の特徴を明らかにし、低層遮音壁による減音効果の予測・評価方法における課題を示す。

4.2 低層遮音壁の特徴と予測・評価における課題

本章で取り扱う低層遮音壁（図4-1参照）は、都市内の一般道路（多くの場合、歩車道の境界）に設置されるもので、パネルタイプ（以下、単に「パネルタイプ」という場合は、反射性パネルを用いた低層遮音壁を指す。計算上は厚みがないとみなす）及び植栽柵を兼ねるタイプ（以下、「植栽柵タイプ」という）に大別される。また、低層遮音壁の高さは、車道面から1mを想定している。これは、対象道路を走行する運転者の見通しの確

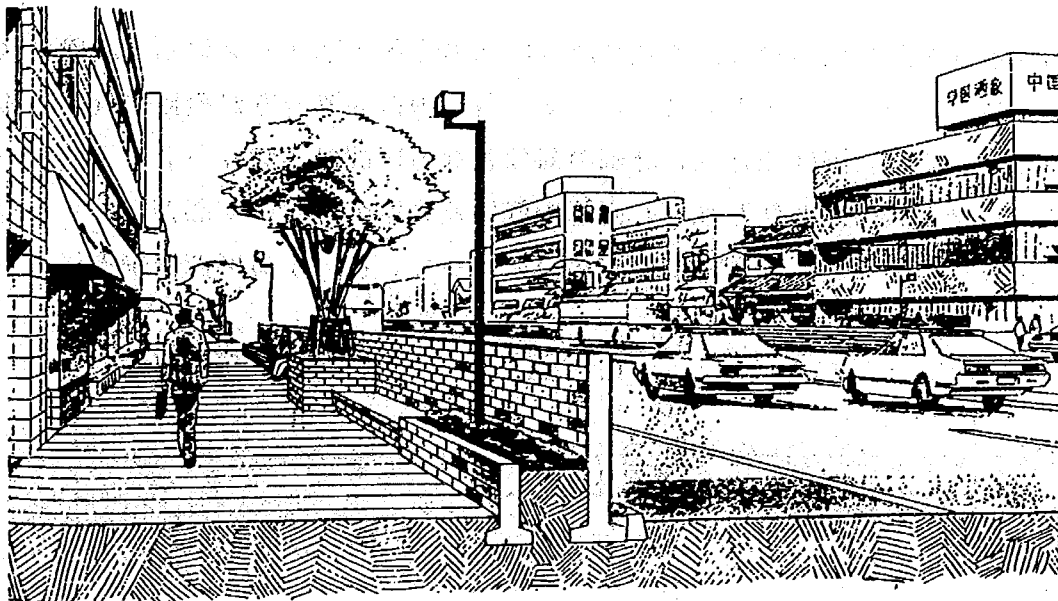


図4-1 低層遮音壁のイメージ図

保及び都市景観への配慮の観点から、1m 程度が限界となることが多いためである。

低層遮音壁は、通常の遮音壁と比較し、高さが低いことに加え、次のような特徴とそれに付随する予測・評価あるいは設計上の課題を有する。

- 1) 都市内に設置される低層遮音壁は、車両の沿道建物や交差道路へのアクセス確保のため、開口部を有することが多い。この結果、遮音壁後方の騒音レベルは複雑に変化し、減音効果の予測・評価が困難となる。
- 2) 植栽柵タイプの場合、その上面及び側壁面の厚み部分の減音効果を考慮する必要がある。また、目標とする挿入損失が小さい低層遮音壁では、景観面ですぐれた透過損失の小さい材料をパネルタイプに使用することも可能であり、その際は、透過音を考慮した減音効果の計算方法が必要となる。
- 3) 通常の遮音壁の設計では、目標とする挿入損失を満たすよう、その高さを決めることが課題である。しかし、低層遮音壁の場合は、高さは 1m 程度が標準であり、むしろ、評価（対策）区間の延長、開口率、遮音壁の形状・材質等（以下、「設計パラメータ」という）の設定が重要な役割を持つ。

以下、これらの課題の解決を目指し、4. 3では、開口部を有する低層遮音壁による減音効果の評価方法を明らかにする。4. 4、4. 5では、種々の形状、材質の低層遮音壁による減音効果の予測方法を検討する。4. 6では、これらの方法を用いて、予測・評価のケーススタディを行い、設計パラメータと減音効果の関係を分析する。

4. 3 低層遮音壁による減音効果の評価方法

本章における低層遮音壁の設置区間及び評価区間の定義を図 4-2 に示す。設置区間とは、複数の低層遮音壁を設置する場合において、各々の低層遮音壁が設置されている区間を指し開口部は除く。評価区間とは、評価の対象となる区間で、図 4-2 のように一街区を想定している場合は街区全体となり、両端の低層遮音壁の外側に空間が存在する場合はその空間も含める。よって、評価区間の定め方によって、後述する区間評価指標の値は変

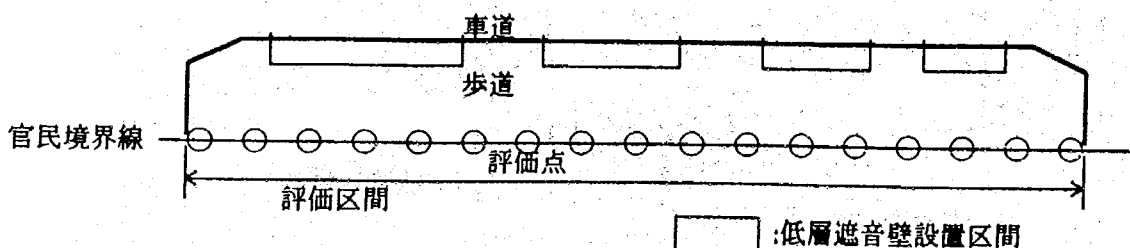


図 4-2 低層遮音壁の評価区間と設置区間

化するため、評価区間設定の際には注意を要する。

3. 3で述べたように、開口部を有する低層遮音壁では、評価区間における騒音レベルは複雑に変化するため、区間平均等価騒音レベル ($SA \cdot L_{Aeq}$) を評価指標とすることが有効である。さらに、低層遮音壁による減音効果を表すためには、遮音壁設置前後の $SA \cdot L_{Aeq}$ の差である区間平均挿入損失 ($SA \cdot IL$) を用いることができる。

これらの指標は、開口部も含めた区間全体の平均的騒音レベルや減音効果を表しているため、評価区間全体を移動する歩行者を評価対象とする場合には適している。しかし、住居という居住空間を評価対象とする場合は、交差する区画道路や駐車場の入り口などにあたることが多い開口部背後まで含めて評価することは、必ずしも望ましくない。このような場合は、開口部を除いた区間の背後（以下「遮音壁背後空間」（図4-8参照）という）における平均的な騒音レベルを指標とすべき場合もあると考える。そこで、ここでは、遮音壁背後空間の区間平均等価騒音レベルを $\overline{SA \cdot L_{Aeq}}$ 、遮音壁設置前後の $\overline{SA \cdot L_{Aeq}}$ の差を $SA \cdot IL$ と新たに定義する。

一方、ある特定の地点の騒音レベルを評価する必要がある時は、地点評価を行うべきと考える。たとえば、低層遮音壁の設置と併せて、歩道上にベンチ等の休憩施設を設置し、その周辺の静穏性に特に配慮する場合がこれにあたる。この場合、特定地点の騒音レベルは等価騒音レベル L_{Aeq} で評価する。また、各地点における減音効果は、遮音壁設置前後の L_{Aeq} の差としての挿入損失で評価する。この時の挿入損失を、線音源 (Line Source) に対する挿入損失という意味で $IL^{(LS)}$ と表記する。なお、以下、 $IL^{(PS)}$ と表示した場合は点音源 (Point Source) に対する挿入損失を示す。

また、低層遮音壁では、街区単位で対策及び評価を行うことが多いため、以下、評価区間と対策区間は同義とする。評価点と受音点も同義とする。

4. 4 透過損失の小さいパネルタイプ及び植栽柵タイプに対する 見通し角法の拡張

3.2.4で述べた見通し角法 (3.9)式は、パネルタイプには、そのまま利用できる。ここでは、(3.9)式を、透過損失の小さいパネルタイプ及び植栽柵タイプにも拡張する。

4.4.1 無限長の透過損失の小さいパネルタイプによる挿入損失の計算方法

透過損失の小さい材料を用いた無限長のパネルタイプが設置された場合に、透過音を考慮した挿入損失 $IL^{(PS)}$ の計算方法を検討する。

地面上に、透過損失 TL の遮音壁を設置する場合の挿入損失 $IL^{(PS)}$ の計算方法を、文献24)、61)を参考に、一般的に、以下のように定式化した。

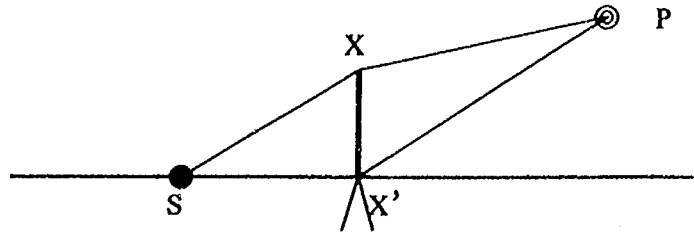


図4-3 地面上のパネルタイプ（透過損失の小さい材料を用いる場合）
による挿入損失

$$IL^{(PS)} = -10 \log_{10} \{ (10^{-\Delta L_{SX}/10} + (10^{-\Delta L_{SX'P}/10} - 10^{-\Delta L_{SX}/10}) \cdot 10^{-TL/10}) - \Delta L_{SX'P} \} \quad (4.1)$$

ここで、Sは音源、Pは評価点、Xは遮音壁の上端、X'は遮音壁の下端（地面上）であり、 ΔL_{SX} 、 $\Delta L_{SX'P}$ は、各々、X、X'を上部回折点とする半無限障壁による減音量を表す（図4-3参照）。ただし、低層遮音壁では、評価点が遮音壁の上端より高いため、地面反射音の影響は無視している。

(4.1)式において、 $TL=0$ の時は $IL^{(PS)} = 0$ となり、 TL が十分大きい時は、

$$IL^{(PS)} = \Delta L_{SX} - \Delta L_{SX'P} \quad (4.2)$$

となる。

しかし、評価点が遮音壁の上端よりも高く、評価点と遮音壁の距離が小さい低層遮音壁においては、 $\Delta L_{SX'P} \approx 0$ であるため、(4.1)式は、以下のように簡略化できる。

$$IL^{(PS)} = -10 \log_{10} \{ 10^{-\Delta L_{SX}/10} \cdot (1 - 10^{-TL/10}) \} \quad (4.3)$$

4.4.2 複数の植栽柵タイプによる挿入損失の計算方法

(1) 対象とする植栽柵タイプの特徴

植樹帯あるいは植樹帯に遮音壁を組み合わせた場合における減音効果については、渡辺⁶²⁾、鹿島^{63)~65)}、石井⁶⁶⁾の報告等がある。これらの研究では、植樹帯単独による減音効果は、葉面積や植樹帯の通過長さ等によって、ある程度定量的に予測できることが明らかになっている^{62)、64)}。しかし、植樹帯と遮音壁を組み合わせた場合については、植樹帯、地表面、遮音壁による減音効果が複雑に作用し^{63)~66)}、その減音効果を定量的に予測することは、現在のところ困難であると考えられる。また、植樹帯による減音効果は、葉面積等に因るため、樹種や維持管理の水準に大きく依存することになる。

したがって、本章では、対象とする植栽柵タイプとして、その上面が草花で覆われているものを取り上げる。この場合、減音効果の物理的意味が明確で、ある程度予測に信頼がかけ、効果の継続のための維持管理も比較的容易であると考えたからである。

この植栽柵タイプは、2.5で検討した吸音性厚み障壁とみなすことができる。その場合、草花で覆われた厚み部分の実効的流れ抵抗 σ は、 $75 \sim 300 \text{ kPa} \cdot \text{s/m}^2$ 程度である（文献8）

によると、 σ は、芝地、草地等で $300\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 、耕田等で $75\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ である）と考えられる。ただし、本章においては、植栽柵タイプの実効的流れ抵抗 σ は、2.5 における吸音性厚み障壁による減音量の計算式 (2.8) 式の活用を考え、 $140\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ とする。

また、植栽柵タイプを道路構造令でいう植樹帯（標準幅員 1.5m）を利用して設置することを想定すると、その奥行き（以下に示す w に相当）は 1～1.5m 程度となる。

(2) 植栽柵タイプに対する 1 パスの方法の拡張

(3.9) 式の見通し角法は、(3.6) 式の 1 パスの方法を応用して導かれたものである (3.2.4 参照)。したがって、(3.9) 式を植栽柵タイプに拡張するには、1 パスの方法が植栽柵タイプに適用できればよい。その場合、奥行きを有する植栽柵タイプの側壁面での反射音の影響を考慮する必要がある。

まず、開口部を有するパネルタイプ（厚みのない有限長障壁）に対する 1 パスの方法を、あらためて次式に定式化する。

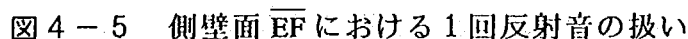
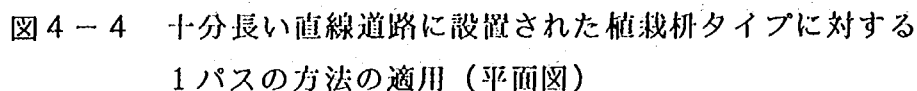
$$IL^{(PS)} = \begin{cases} \text{① 鉛直平面 SP が障壁と交差する場合} \\ \quad \Delta L_{SXP} \\ \text{② ①以外の場合} \\ \quad 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

ここで、鉛直平面 SP とは音源 S と評価点（受音点）P を含む鉛直な平面をいい、X は平面 SP と障壁の上部エッジとの交点である。

(4.4) 式は、条件①では有限長障壁を半無限障壁とみなして、その減音量 ΔL_{SXP} を計算し、条件②では障壁が存在しないと仮定するものである。この式は有限長障壁の側方回折音を正確に計算しておらず、図 3-4 で示されたように、条件①、②の境界付近に音源がある時は計算値の誤差が大きくなる。しかし、音源が障壁と平行に移動する場合、ユニットパターン (1.2.1 参照) のエネルギー積分値（以下、本章では、単に「エネルギー積分値」という）を求める時は、(4.4) 式でよいことが明らかにされている（図 3-4 参照）。

図 4-4 は、十分長い直線道路に平行に 2 つの直方体形状をした植栽柵タイプ（有限長の吸音性厚み障壁）ABCD 及び EFGH が設置された場合の平面図である。以下、線分 $\overline{AB}$, $\overline{DC}$, $\overline{EF}$, $\overline{HG}$ で表される壁面を側壁面、 $\overline{BC}$, $\overline{FG}$ を評価点側・壁面、 $\overline{AD}$, $\overline{EH}$ を音源側・壁面、これらを総称して外周壁面という。植栽柵タイプの上面は吸音性、外周壁面は完全反射とする。また、評価点との位置関係により、音源ラインを I～Ⅷの区間に分割しているが、区間Ⅲは側壁面 $\overline{EF}$ に対して区間Ⅵと対称の位置を表す。

植栽柵タイプが設置された場合のエネルギー積分値を求めるための 1 パスの方法を以下に提案する。



ここで、 $\Delta L(AW)_{SXYP}$ は無限長の吸音性厚み障壁による減音量を表し、(2.8)式により計算する。ただし、回折点 X は、無限長の植栽柵タイプの音源側・壁面の上部エッジが平面 SP と交差する点、回折点 Y は、評価点側・壁面の上部エッジが平面 SP と交差する点とする。

音源が区間Ⅵにある時に、区間Ⅰ，Ⅴ，Ⅷにある（評価点から音源が見通せる）時と同様の扱いをしているのは、植栽柵タイプの側壁面での1回反射音の主な影響を、エネルギー積分値の算出にあたって間接的に取り入れるためである。

- 66 -

1 回反射音の影響を考慮する音源位置として区Ⅲを抽出した。今、区Ⅲにある音源を S_{III} 、側壁面 $\overline{EF}$ に対して S_{III} と対称の位置にある音源 S_{VI} (区Ⅵにある) を図 4-5 に示す。ここで、 S_{VI} から P に至る音の主な寄与 C_{VI} は、側壁面 $\overline{EF}$ の上方及び左側方を伝搬する音の寄与 (図 4-5 上では省略している) の和で表される。計算上は、これに S_{III} から側壁面 $\overline{EF}$ で反射して P に至る 1 回反射音の寄与 C_R を加えて、 S_{VI} からの寄与 C'_{VI} とした。 $C'_{VI} = C_{VI} + C_R$ であり、スリット法⁸⁾の考え方によると、 C_R は、側壁面 $\overline{EF}$ を開口面とみなし、 S_{VI} からそれを通して P に到達する音の寄与として考えられる。よって、 C'_{VI} は、評価点側・壁面 $\overline{FG}$ の位置に (厚みがない) パネルタイプが設置された場合と同程度になると考えた。これとは逆に、音源 S_{III} の時の寄与としては、計算上、 C_R は除いている。このように、計算上、 S_{III} の時の寄与 C_R を S_{VI} の時の寄与に置換しているが、エネルギー積分値の算出には、支障がないと考えた。

一方、平面 SP が側壁面 $\overline{AB}$, $\overline{DC}$ または $\overline{HG}$ と交差する時の上方回折による挿入損失を (4.5) 式①を用いて計算すると、上方回折点 X, Y 間の距離を実際より大きく見積もることになる。これらの音源位置では、そもそも 1 パスの方法が側方回折音を無視していることに加え、(2.8) 式から判断すると (4.5) 式①による計算値は上方回折音も過小評価し、過大な挿入損失を与えるおそれがある。しかし、計算値の誤差が大きくなるのは音源が受音点から斜め方向に離れた (図 4-4 では、平面 SP が $\overline{HG}$ と交差する場合が最も離れている) 場合、すなわち、騒音レベルが小さくなる場合である。したがって、その誤差がエネルギー積分値に与える影響は小さいと考えた。

なお、側壁面での 1 回反射音に対する側方回折の影響及び側壁面間での 2 回以上の多重反射音の影響は、計算の簡略化のため省略した。これは、植栽柵タイプでは、開口部の幅 (D, E 間の距離にあたる。最低でも 3m 程度) が奥行き (D, C 間の距離にあたる。最大でも 1.5m 程度) の 2 倍以上となるのが一般的なためである。また、地面反射音の影響は、(4.1) 式同様無視した。

(3) 模型実験による検証

無響室において縮尺比 1/10 の模型実験を行い、(4.5) 式による計算結果を検証した。なお、本章では、模型実験に関する数値は、「原寸」と表示しない限り実物換算で示す。

実験配置を図 4-6 に示す。床面は厚さ 3mm (原寸) のアクリル板を用いて反射性とし、音源には、点音源としてのジェットノイズ音源 (高さ 0.4m) を用いた。低層遮音壁は、厚さ 5mm (原寸) のアクリル板を用いて製作 (高さ 1m, 奥行き 1.5m) し、その上面には、2.2 同様、流れ抵抗 $\sigma = 140 \text{ kPa} \cdot \text{s/m}^2$ の吸音材 (ベルベット 2 枚重ね, 厚み 3.3mm 原寸) を貼付した。ただし、対象周波数は、2.2 より広帯域の 200Hz ~ 5kHz とし、自動車交通騒音の主要な周波数帯域を含むようにした。

実験値の算出にあたっては、音源のパワーレベル L_w を別途測定し、以下で述べる計算

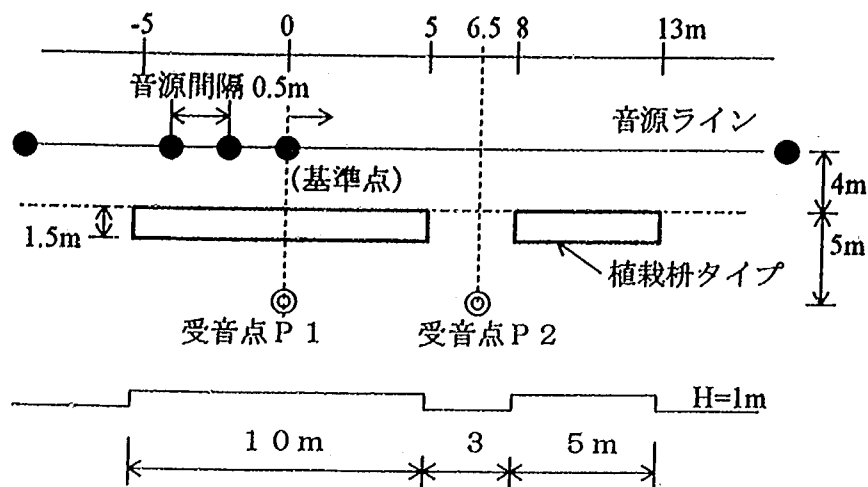


図4-6 植栽柵タイプに対する1パスの方法の検証のための模型実験の配置

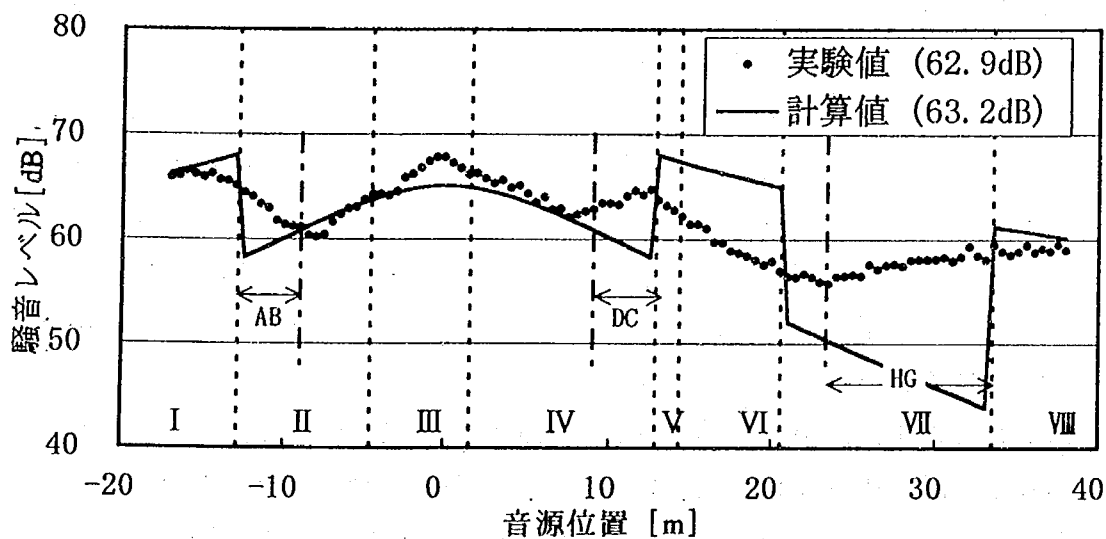


図4-7(a) 騒音レベルの計算値と模型実験値の比較 (受音点 P1)

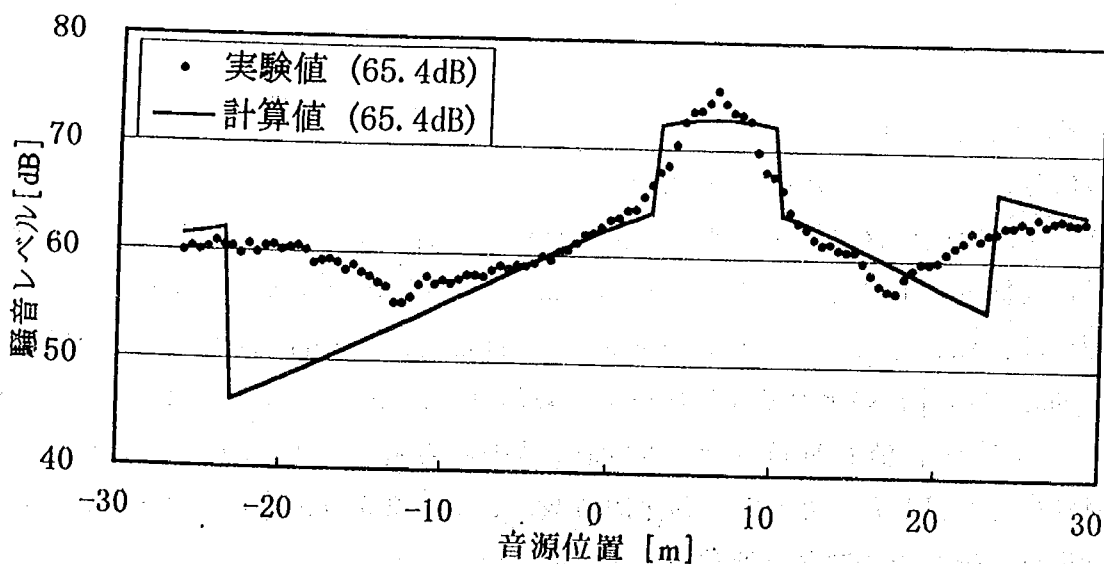


図4-7(b) 騒音レベルの計算値と模型実験値の比較 (受音点 P2)

上のパワースペクトル、 L_w の設定と一致するように、1/3 オクターブバンド毎の一定の補正を、各測定値に対して行った。

一方、音圧レベル (L_p) の計算は、(1.3)式を基本にし、音源 (計算上は、高さ 0m) のパワーレベル L_w と半自由空間における距離減衰 (距離 r) 及び(4.5)式より求めた $IL^{(PS)}$ を用いて、

$$L_p = L_w - 8 - 20 \log_{10} r - IL^{(PS)} \quad (4.6)$$

により行った。

音源には、1 台の自動車を想定し、パワースペクトルとして自動車走行騒音の代表スペクトル ((1.6)式、200Hz ~ 5kHz) を与え、 L_w は 100dB (A 特性) とした。

一方、(4.5)式の計算には 1/3 オクターブバンド中心周波数を用いた。この時、条件①における $\Delta L(AW)_{SXYP}$ の計算は(2.8)式より行うが、(2.8)式中の $\Delta L(RW)_{SXYP}$ 、 $\Delta L(D)_{SXYP}$ の算出には、各々、(2.1)式、(2.4)式を用いた。(4.6.3も同様)

図 4-7 (a), (b)には、受音点 P1 及び P2 (いずれも、高さ 1.4m (4.6 参照)) における騒音レベルの模型実験値および計算値を示した。凡例の括弧内の数値は、ユニットパターンのエネルギー平均値 (測定または計算した騒音レベルのエネルギー合成値をデータ数で除してレベル表示したもの) を示している。また、P1 の位置は、図 4-4 の P の位置に相当するため、図 4-4 の区間 I ~ VIII に相当する音源位置、並びに鉛直平面 SP が側壁面 $\overline{AB}$ 、 $\overline{DC}$ または $\overline{HG}$ と交差する音源位置を図 4-7 (a) に示した。

図 4-7 (a)では、鉛直平面 SP が、側壁面 $\overline{AB}$ 、 $\overline{DC}$ または $\overline{HG}$ と交差する音源位置では、4.4.2(2)で予想したとおり、騒音レベルの計算値が実験値より小さくなり、その傾向は騒音レベルが最も小さい $\overline{HG}$ の場合に顕著となっている。また、区間 III で実験値が計算値を上回り、区間 VI でその逆となっているのは、4.4.2(2)で述べたとおり、音源が区間 III にある時の側壁面 $\overline{EF}$ での 1 回反射音の寄与 C_R を、音源が区間 VI にある時の寄与に置換して計算していることが、一因であると考えられる。このように、ユニットパターンの形状では、計算値と実験値の間に差異が認められる。しかし、両者のエネルギー平均値の差は、わずか 0.3dB であり、両者は非常によく一致している。

また、受音点 P2 が開口部の背後にある図 4-7 (b)においても、ユニットパターンの形状では、計算値と実験値の間に上記と同様の理由による差異が認められる。しかし、両者のエネルギー平均値は 65.4dB で一致している。

したがって、植栽柵タイプに対する 1 パスの方法である(4.5)式は、ユニットパターンのエネルギー平均値 (エネルギー積分値も同様) の計算に、実用上、十分適用できることが明らかとなった。

4.4.3 見通し角法の拡張

4.4.2(3)において、植栽柵タイプに対して(4.5)式の1パスの方法が適用できることが明らかとなった。また、透過損失の小さいパネルタイプは、厚みのない有限長障壁の1種であり、1パスの方法が適用できる。したがって、1パスの方法から導かれた線音源に対する見通し角法(3.9)式を、(4.3)式及び(4.5)式をもとに拡張し一般化して示す(図4-8参照)。

$$IL^{(LS)} = -10 \log_{10} \left\{ 1 - \frac{\theta}{\pi} \left(-10^{-IL_0^{(LS)}/10} \right) \left(1 - 10^{-TL/10} \right) \right\} \quad (4.7)$$

$IL^{(LS)}$: 無限線音源に対する開口部を有する低層遮音壁による挿入損失[dB]

$IL_0^{(LS)}$: 無限線音源に対する無限長で連続した低層遮音壁による挿入損失[dB]

θ : 評価点から植栽柵タイプの評価点側・壁面またはパネルタイプを見通した時の角度の和[rad]

d : 植栽柵タイプの評価点側・壁面と評価点(線)の距離[m]。パネルタイプの場合は、遮音壁設置位置と評価点(線)までの距離[m]。

TL : パネル材料の透過損失[dB]。従来の一般的な遮音壁に用いられているパネルの透過損失と同等以上の場合や植栽柵タイプの場合は、 $(1 - 10^{-TL/10}) \cong 1$ とする。

なお、 $IL_0^{(LS)}$ の算出にあたっては、パネルタイプの場合は m, d, h (図4-8)をもとに前川チャート((1.7)式)を用い、植栽柵タイプの場合は m, d, h, w をもとに(2.8)式を用いて、 $IL^{(PS)}$ を算出し、遮音壁設置前後のユニットパターンのエネルギー積分値または平均値の差分を求めればよい。

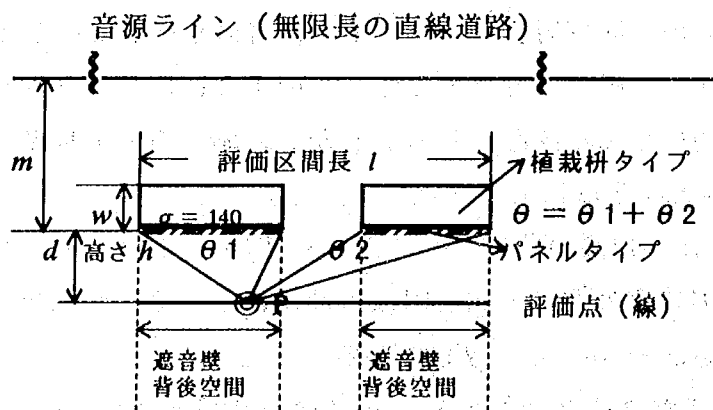


図4-8 十分長い直線道路に設置された低層遮音壁による減音効果計算のための模式図

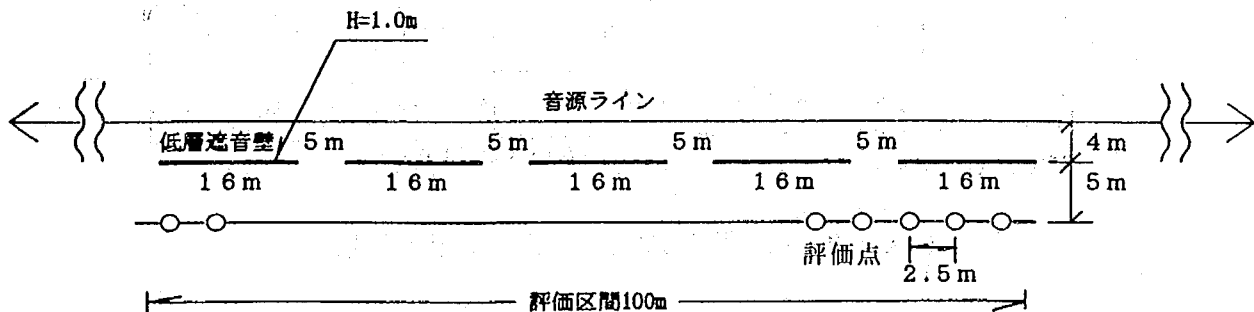
4. 5 十分長い直線道路における $SA \cdot IL$ の簡易計算方法

4.5.1 パネルタイプにおける開口率と $SA \cdot IL$ の関係

図4-9に、低層遮音壁の評価区間長 100m と開口率（評価区間延長に対する低層遮音壁が設置されていない区間の総延長の割合をいう。）20 %は同じだが、遮音壁の数、設置位置が異なる場合を示す。これらの低層遮音壁の設置前後における各評価点の挿入損失 $IL^{(L.S)}$ を、(3.9)式（(4.7)式も同じ）を用いて、3.2.4(2)と同様の計算条件で算出した。また、遮音壁設置前後における評価区間の $SA \cdot IL$ を、40 の評価点における $IL^{(L.S)}$ から(3.13)式を用いて求めた。

図4-10に計算結果を示す。この図の縦軸は遮音壁設置前後の $IL^{(L.S)}$ または $SA \cdot IL$ を示している。図4-10において、(a)、(b)二通りの場合の $IL^{(L.S)}$ を比較してみると、(a)においては 2dB、(b)においては 4dB 程度の変動が見られ、両者の $IL^{(L.S)}$ の状況には大きな差が認めれるが、 $SA \cdot IL$ に関しては両者の差はほとんど見られない。すなわち、この結果は、低層遮音壁の開口率が同じ場合は、開口部の位置にかかわらず、 $SA \cdot IL$ を近似的に求められる可能性があることを示唆している。

(a)五つの低層遮音壁を均等に設置した場合



(b)四つの低層遮音壁を不規則に設置した場合

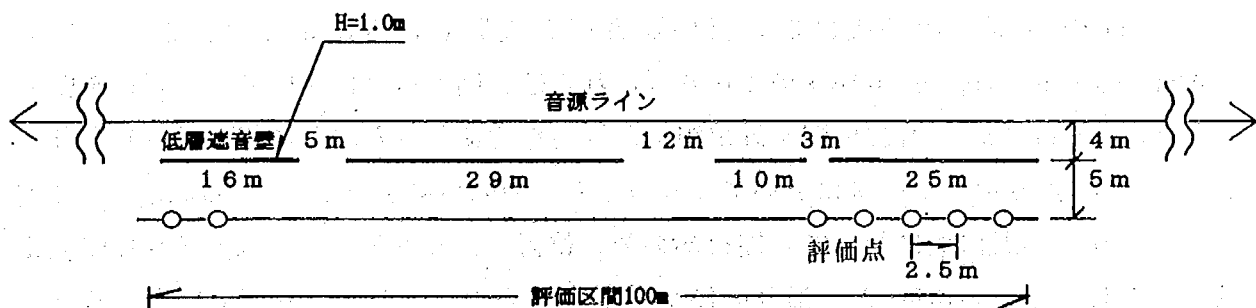
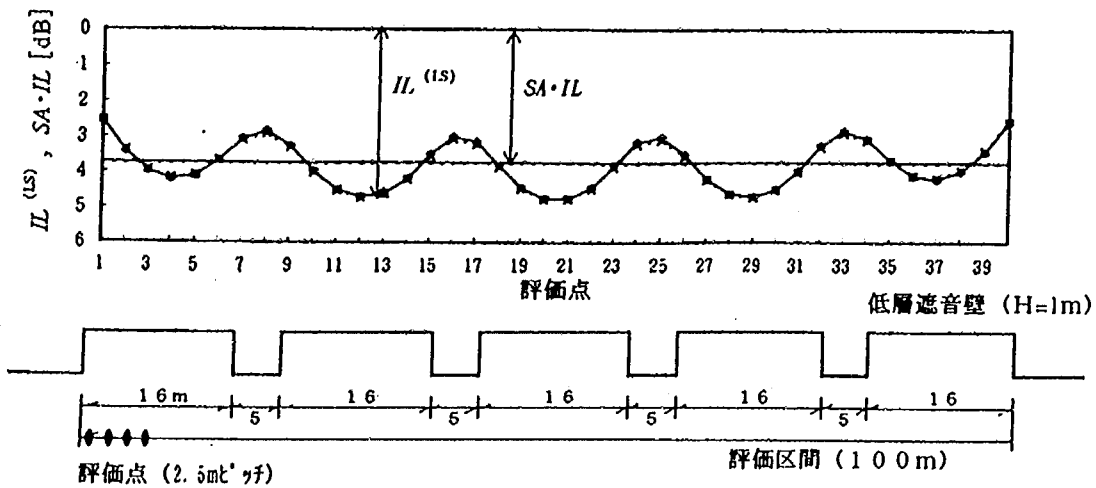


図4-9 無限長直線道路に設置した低層遮音壁

(a)五つの低層遮音壁を均等に設置した場合



(b)四つの低層遮音壁を不規則に設置した場合

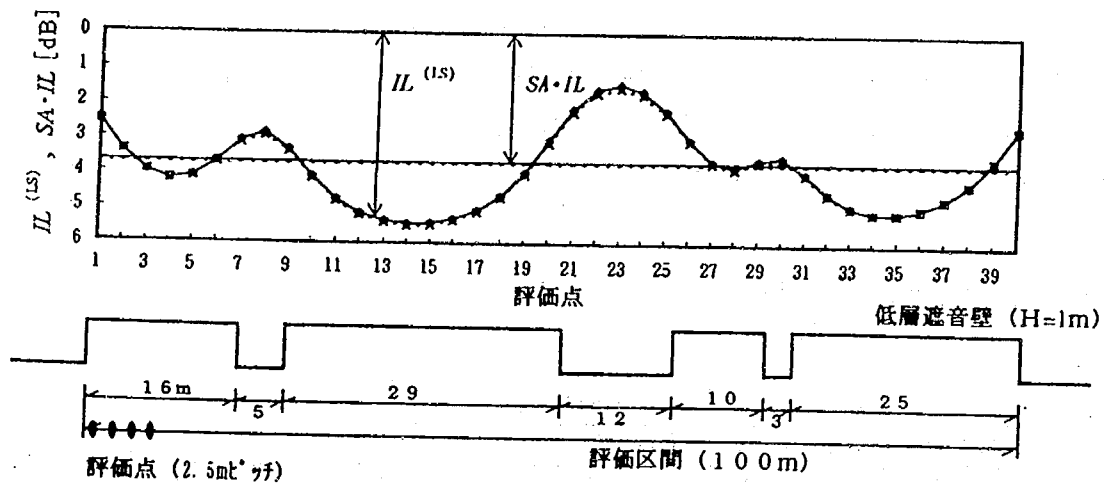


図4-10 $IL^{(LS)}$ と $SA \cdot IL$ の計算結果の比較

そこで、このことを確かめるため、次のようなシミュレーション計算を行った。50m, 100m, 200m の 3 通りの評価区間に低層遮音壁を設置し、音源正面の行路差として 0.00002m, 0.031m, 0.033m, 0.16m の 4 通り（これらは、図4-9において、低層遮音壁の高さを 1m または 1.5m, 音源位置を近車線または遠車線側とした場合に相当する）を与えた。これら 12 通りの各ケースにおいて、低層遮音壁の開口率を 0% から 60% まで 1% 刻みで変化させ、各開口率において、開口部の数、位置、延長を無作為に 40 通り程度変化させることにより、合計約 3 万通りの(3.9)式を用いたシミュレーション計算を行った。図4-11に音源正面の行路差が 0.031m（低層遮音壁の高さ 1m, 音源位置は近車線）の場合の結果を示す。他の計算ケースにおいても同様の結果が得られた。したがって、音源正面の行路差及び評価区間長が同じであれば、開口部の位置によらず、開口率から $SA \cdot IL$ をかなり高い精度で求められることが明らかとなった。また、音源正面の行路差 0.031m,

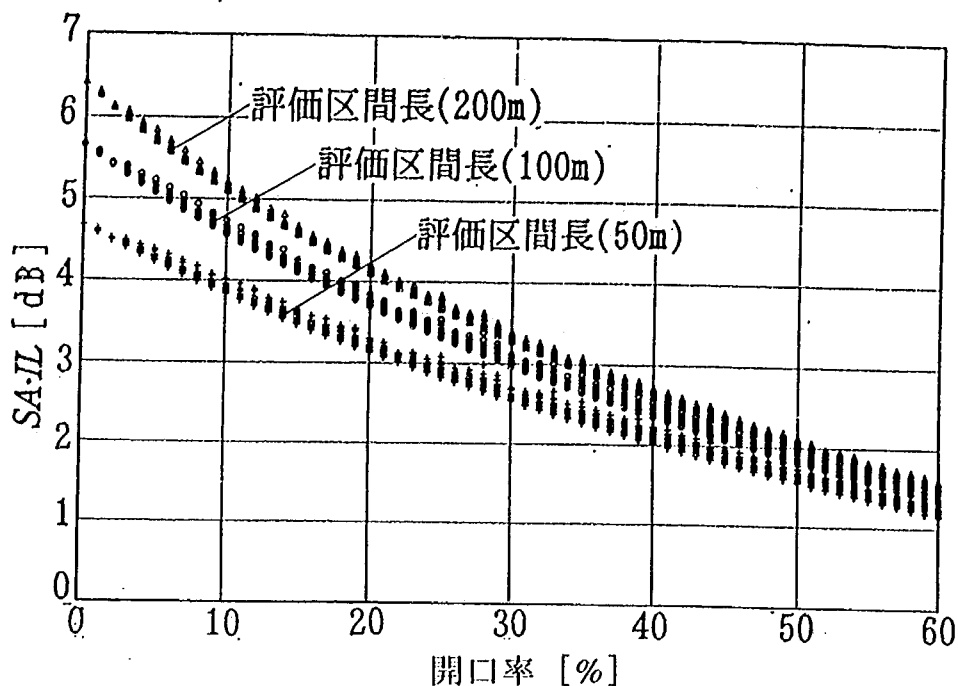


図 4-11 $SA \cdot IL$ と開口率の関係（音源正面での行路差が 0.031m の場合）

評価区間長 100m で開口率が 60% と非常に大きい場合に、一つの延長 60m の低層遮音壁を評価区間の中央に設置（両側に 20m ずつの外側空間が存在）した場合及び評価区間の両側に二つの延長 30m の低層遮音壁を設置（中央に 40m の開口部が存在）した場合の極端な 2 ケースで $SA \cdot IL$ を比較したが、それでも両者の差は 0.3dB 以下と小さかった。したがって、評価区間の両側に低層遮音壁が設置されていない空間が存在する場合においても、 $SA \cdot IL$ は開口率により求められることが確認できた。

4.5.2 パネルタイプの場合の簡易計算方法

(1) $SA \cdot IL$ の簡易計算方法の提案

十分長い直線道路に同一高さの複数の有限長障壁が一行に設置された場合の $SA \cdot IL$ の一つの計算方法は、評価区間上に同一間隔で設定した多数の評価点の $IL^{(Ls)}$ を (3.9) 式より求め、さらに (3.13) 式を用いて $SA \cdot IL$ を求めることである。しかし、これらの計算は煩雑であり、実用性に優れているとは必ずしも言えない。したがって、ここでは、 $SA \cdot IL$ を簡易に求める方法を提案する。

簡易計算法の検討に際し、開口率が一定の場合は、4.5.1 の結果に基づき、開口部の位置による挿入損失の差は無視できるほど小さいという仮定をおいた。また、算出に当たって、①評価区間全体に連続して低層遮音壁が設置された場合の $SA \cdot IL_0$ を求め、②開口率による補正を行い $SA \cdot IL$ を求めるという手順を設定した。

①の連続した低層遮音壁の $SA \cdot IL_0$ については、(3.9) 式から解析的に導くことができる。

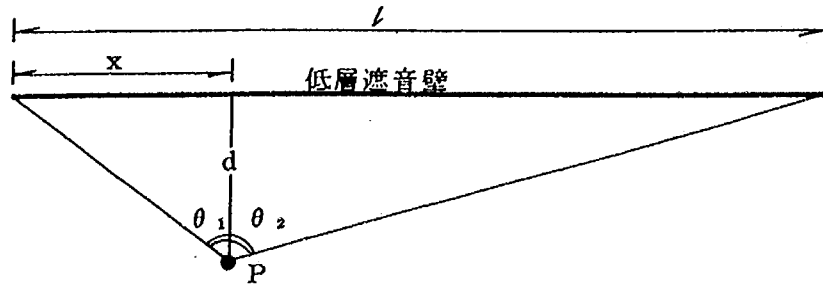


図 4-12 連続した低層遮音壁の見通し角

今、評価区間の延長を l 、評価点から低層遮音壁までの距離を d とする。ある評価点 P の評価区間の一方の端からの距離を x とすると、図 4-12 で示されるように、 P から評価区間全体に連続して立てられた低層遮音壁の両端を見通す角度 θ は、

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 = \tan^{-1} \frac{x}{d} + \tan^{-1} \frac{l-x}{d} \quad (4.8)$$

となる。今、 P 点における挿入損失を $IL(x)$ とおくと、評価区間の区間平均挿入損失 $SA \cdot IL_0$ は、

$$SA \cdot IL_0 = -10 \log_{10} \frac{1}{l} \int_0^l 10^{-IL(x)/10} dx \quad (4.9)$$

と表せる。ここで、(3.9)式、(4.8)式を(4.9)式に代入すると、

$$SA \cdot IL_0 = -10 \log_{10} \left[1 - \frac{1}{\pi} \left\{ 2 \tan^{-1} \left(\frac{l}{d} \right) - \frac{d}{l} \ln \left(1 + \frac{l^2}{d^2} \right) \right\} \left(1 - 10^{-IL_0^{(LS)}/10} \right) \right] \quad (4.10)$$

が得られ、 $IL_0^{(LS)}$ を用いて $SA \cdot IL_0$ を算出できる。なお、(4.10)式は、 l が無限大および 0 の時は、次式となる。

$$\lim_{l \rightarrow \infty} SA \cdot IL_0 = IL_0^{(LS)} \quad (4.11)$$

$$\lim_{l \rightarrow 0} SA \cdot IL_0 = 0 \quad (4.12)$$

②に関しては、以下の手順で求める。今、開口率が α の低層遮音壁による区間平均挿入損失 $SA \cdot IL$ を求めるための模式図を図 4-13 に示す。

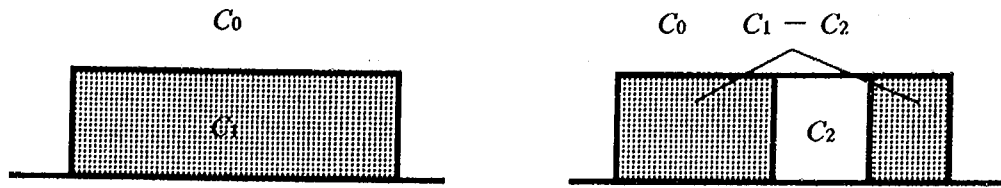
まず、評価区間に開口部のない連続した低層遮音壁が設置されている場合を考え、遮音壁を回折し評価区間に到達する音の寄与（エネルギー量）を C_0 、遮音壁に遮られ評価区間に到達しない音の寄与を C_1 とする。ここで、 $SA \cdot IL_0$ は、以下の式で近似できると仮定した。

$$SA \cdot IL_0 = -10 \log_{10} \frac{C_0}{C_0 + C_1} \quad (4.13)$$

次に、開口部を有する場合の $SA \cdot IL$ の算出に当たっては、図 4-11 で示された結果より、 $SA \cdot IL$ は開口部の位置等にかかわらず開口率のみに支配されることに着目した。これは、言い換えれば、 $SA \cdot IL$ の算出に当たっては開口部の見通し角を考慮しなくてよいというこ

(1)開口部がなく連続設置される場合

(2)開口部を有する場合



C_0 : 連続した遮音壁を回折し評価区間に到達する音の寄与

C_1 : 連続した遮音壁に遮蔽され評価区間に到達しない音の寄与

C_2 : 遮音壁が開口部を有する場合に開口部から評価区間に到達する音の寄与 $C_2 = \alpha C_1$

図 4-13 開口部を有する低層遮音壁の模式図

とである。そこで、開口部を通過して評価区間に至る音の寄与 C_2 の流れは遮音壁に垂直であり、 C_2 は開口率 α に比例すると仮定した。そこで、 $C_2 = \alpha C_1$ とし、 $SA \cdot IL$ は次式で近似できると仮定した。

$$\begin{aligned} SA \cdot IL &= -10 \log_{10} \frac{C_0 + \alpha C_1}{C_0 + C_1} \\ &= -10 \log_{10} \frac{C_0}{C_0 + C_1} \left(1 + \frac{C_1}{C_0} \alpha \right) \end{aligned} \quad (4.14)$$

さらに、(4.13)、(4.14)式より、

$$SA \cdot IL = -10 \log_{10} \left\{ 10^{-[SA \cdot IL_0]/10} + (1 - 10^{-[SA \cdot IL_0]/10}) \alpha \right\} \quad (4.15)$$

が得られる。なお、(4.15)式は、 $\alpha = 0$ の場合 $SA \cdot IL = SA \cdot IL_0$ 、 $\alpha = 1$ の場合 $SA \cdot IL = 0$ となる。

したがって、(4.10)、(4.15)式を用いて、開口部を有する低層遮音壁の区間平均挿入損失 $SA \cdot IL$ を簡易に算出する（以下、簡易計算方法という）ことができる。

図 4-14 に $SA \cdot IL$ の簡易計算方法での計算結果と 4.5.1 で行ったシミュレーションでの計算結果（732 データを任意に抽出）との比較を示す。簡易計算方法の計算結果は、(3.9) 式を用いたシミュレーション計算結果と非常によい一致を示している。すなわち、評価区

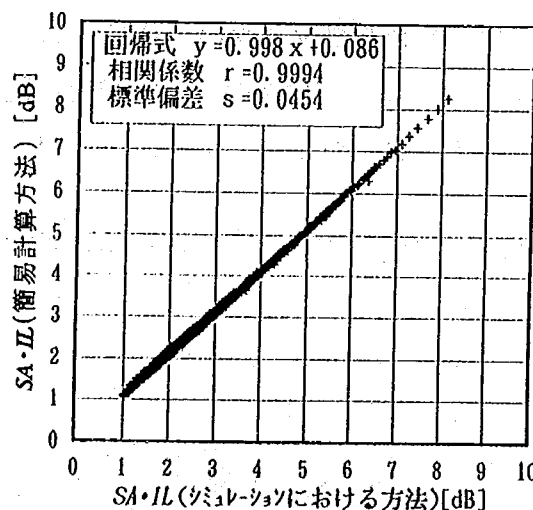


図 4-14 簡易計算方法とシミュレーションにおける $SA \cdot IL$ の計算結果の比較

間の $SA \cdot IL$ を算出するにあたり、多数の評価点を設定して(3.9)式から $IL^{(LS)}$ を計算し、さらに(3.13)式を用いて評価区間の $SA \cdot IL$ を計算するという煩雑な手順を踏まずとも、簡易計算方法により、実用上、十分な精度で、直接 $SA \cdot IL$ を計算できることが明らかとなった。

なお、 $\overline{SA \cdot IL}$ は開口部の位置や数にしたがって変化するため、その算出には同様の簡易計算方法が適用できないことが、試算により明らかとなった。

4.5.3 簡易計算方法の透過損失の小さいパネルタイプ、植栽柵タイプへの拡張

ここでは、4.5.2で検討した $SA \cdot IL$ 求める簡易計算方法を植栽柵タイプ及び透過損失の小さいパネルタイプにも適用可能なように、一般化して定式化する。

$$\left\{ \begin{array}{l} SA \cdot IL = -10 \log_{10} \left\{ 10^{-[SA \cdot IL_0]/10} + (1 - 10^{-[SA \cdot IL_0]/10}) \alpha \right\} \\ \text{ここで,} \\ SA \cdot IL_0 = -10 \log_{10} \left\{ 1 - \frac{1}{\pi} \left\{ 2 \tan^{-1} \left(\frac{l}{d} \right) - \frac{d}{l} \ln \left(1 + \frac{l^2}{d^2} \right) \right\} \right\} \left(1 - 10^{-IL_0^{(LS)}/10} \right) \left(1 - 10^{-TL/10} \right) \end{array} \right. \quad (4.16)$$

$SA \cdot IL$: 評価区間の区間平均挿入損失[dB]

$SA \cdot IL_0$: 評価区間に有限長で連続した仮想の低層遮音壁を設置した場合の評価区間の区間平均挿入損失[dB]

$IL_0^{(LS)}$: 無限線音源に対する無限長で連続した低層遮音壁による挿入損失[dB]

α : 開口率 (評価区間長に対する低層遮音壁の未設置区間の総延長の割合)

l : 評価区間長[m]

d : 評価点側・壁面と評価点(線)の距離[m]。パネルタイプの場合は、 d は遮音壁設置位置と評価点(線)までの距離となる。

TL : パネル材料の透過損失[dB]。従来の一般的な遮音壁に用いられているパネルの透過損失と同等以上の場合や植栽柵タイプの場合は、 $(1 - 10^{-TL/10}) \doteq 1$ とする。

なお、 $IL_0^{(LS)}$ の算出方法については、(4.7)式の説明を参照されたい。

また、評価区間が十分長く $l = \infty$ とみなせ、かつ、 $(1 - 10^{-TL/10}) \doteq 1$ の時は、(4.11)式を(4.16)式に代入して、

$$SA \cdot IL = -10 \log_{10} \left\{ 10^{-IL_0^{(LS)}/10} + (1 - 10^{-IL_0^{(LS)}/10}) \alpha \right\} \quad (4.17)$$

が得られる。

4.6 低層遮音壁の設計パラメータと減音効果の関係

本章で扱う低層遮音壁の設計パラメータとしては、高さ以外に、評価（対策）区間長、開口率、パネル材料の透過損失、植栽柵タイプの奥行き・上面の実効的流れ抵抗が挙げられる。

ここでは、植樹帯（幅員 1.5m）を含む幅員 5m の歩道上に高さ 1m の低層遮音壁を設置する場合を想定して、予測・評価のケーススタディを行い、これらの設計パラメータと減音効果の関係を分析する。なお、音源位置は、幹線道路（4 車線）近車線側の第 1, 2 車線中央（歩車道境界から 4m）、評価点は、官民境界（歩車道境界から 5m）で高さ 1.4m（歩道面からの高さ 1.2m、歩道面が車道面から 0.2m マウンドアップされていることを想定）とした。

4.6.1 評価区間長、開口率と $SA \cdot IL$ の関係

透過損失が十分大きいパネルタイプを設置する場合、開口率 α が 0%, 10%, 20 % の時に、評価区間長 l と $SA \cdot IL$ の関係を(4.16)式を用いて検討した結果を図 4-15 に示す。なお、 $IL_0^{(LS)}$ は、0.5m ピッチで延長 2km の音源を想定し 1/3 オクターブバンド中心周波数を用いて計算し、自動車走行騒音の代表スペクトル ((1.6)式) で重み付けをした 50Hz ~ 5kHz の A 特性オーバーオール値として求めた(4.6.2 および 4.6.3 も同様)。

図 4-15 より、無限長に対して、 $SA \cdot IL$ の減少を 0.5dB 程度に押さえることのできる l は、 α が 0% の時 100m、 α が 20% の時 50m 程度である。また、 l が 50m 以下では、 $SA \cdot IL$ は急激に減少する。したがって、低層遮音壁の評価（対策）区間長は、少なくとも 50m 程度以上必要だと言える。また、 α が 10% 大きくなると $SA \cdot IL$ は 1dB 程度減少する。

なお、以下の検討では、標準的な評価区間長として $l = 100m$ を用いる。

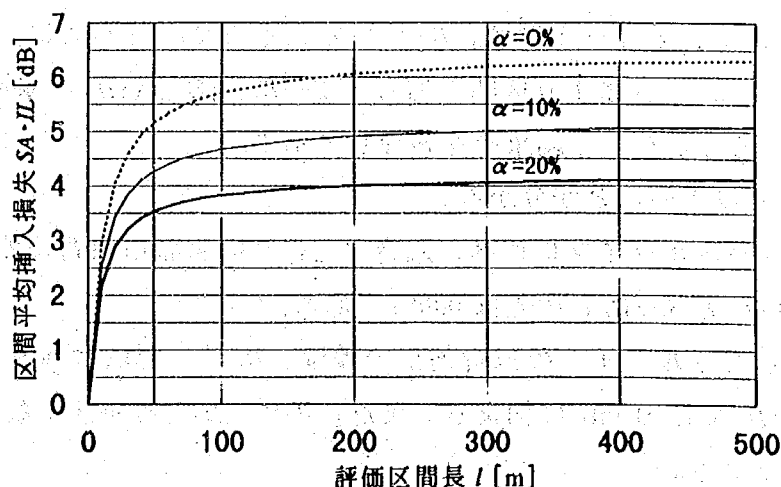


図 4-15 評価区間長 l 、開口率 α と $SA \cdot IL$ の関係

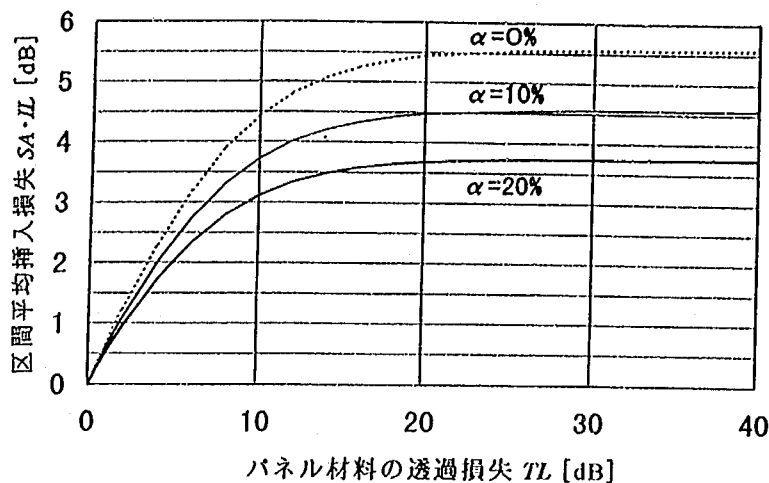


図 4-16 パネル材料の透過損失 TL と $SA \cdot IL$ の関係

4.6.2 パネルタイプに許容される透過損失

(4.16)式を用いて、 α が0%，10%，20%の場合に、パネル材料の透過損失 TL と $SA \cdot IL$ の関係を求め、図 4-16に示した。

この図から、 $SA \cdot IL$ の減少を 0.5dB 程度に押さえることができる TL は、 α が0%の場合は 14dB、 α が20%の場合は 11dB であり、この程度の透過損失があれば、パネルタイプの材料として、十分用いることができると考える。

4.6.3 パネルタイプと植栽柵タイプの $IL^{(LS)}$ 、 $SA \cdot IL$ 、 $\overline{SA \cdot IL}$ の差異

(4.7)式、(4.16)式を用いて、 $\alpha = 20\%$ の場合に、透過損失が十分大きいパネルタイプと植栽柵タイプ（上面の流れ抵抗 $\sigma = 140 \text{ kPa} \cdot \text{s/m}^2$ ）の挿入損失の差異を検討した。それらの配置は図 4-17のとおりである。

図 4-18に、(4.7)式を用いて、パネルタイプと植栽柵タイプの地点別の $IL^{(LS)}$ を比較した結果を示す。また、表 4-1 には、 $IL_0^{(LS)}$ の計算結果、(4.7)式による $IL^{(LS)}$ （2.5m 間隔）の計算結果を(3.13)式により区間平均して $SA \cdot IL$ 及び $\overline{SA \cdot IL}$ を求めた結果、並びに(4.16)式で $SA \cdot IL$ を直接計算した結果等を整理して示す。

これらの結果から以下のことが分かる。

- (1) 植栽柵タイプはパネルタイプに比べ、遮音壁背後空間と開口部背後空間の $IL^{(LS)}$ の差異が大きく、 $\overline{SA \cdot IL}$ と $SA \cdot IL$ との差は 0.8dB である。
- (2) 植栽柵タイプとパネルタイプの減音効果の差は、 $IL_0^{(LS)}$ では 2.0dB であるが、 $\overline{SA \cdot IL}$ では 1.0dB、 $SA \cdot IL$ では 0.7dB に縮まる。また、 $IL^{(LS)}$ が最も大きくなる評価点 14 では、その差は 1.5dB である。

なお、表 4-1 において、 $SA \cdot IL$ の(4.7)式・(3.13)式による計算結果は(4.16)式による計算結果とほぼ一致していることが確認できる。

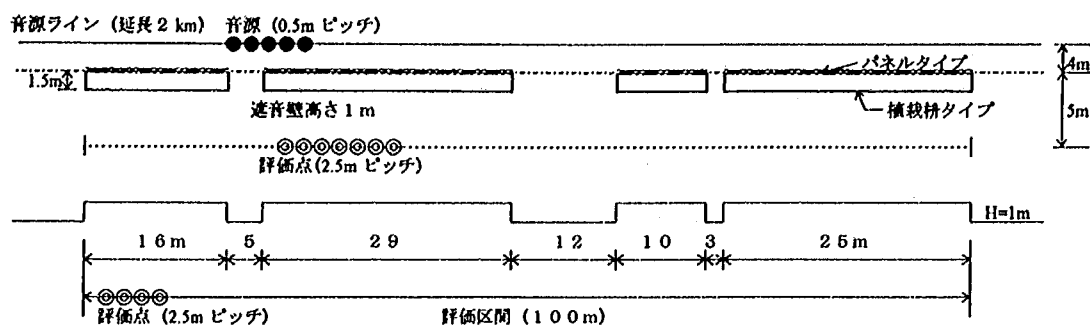


図 4-17 パネルタイプと植栽柵タイプの配置

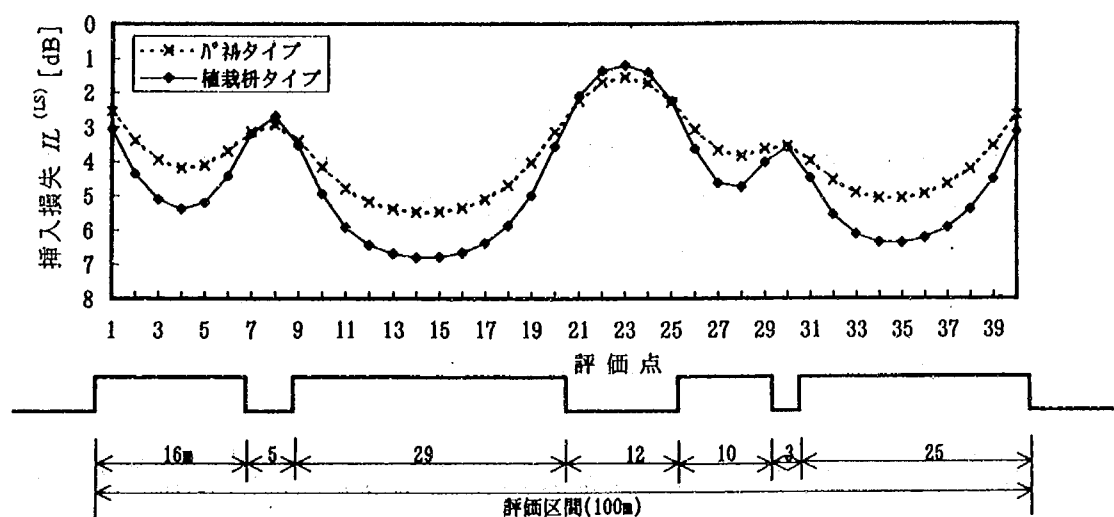


図 4-18 パネルタイプと植栽柵タイプによる $IL^{(LS)}$ の比較

表 4-1 パネルタイプと植栽柵タイプによる減音効果の比較

(単位: dB)

	$IL_0^{(LS)}$	$IL^{(LS)}(14)$	$SA \cdot IL$ (c)	$\overline{SA \cdot IL}$ (d)	(d) - (c)
パネルタイプ(a)	7.8	5.5	3.7 (3.8)	4.2	0.5
植栽柵タイプ(b)	9.8	7.0	4.4 (4.6)	5.2	0.8
(b) - (a)	2.0	1.5	0.7	1.0	

(注) 1. $IL^{(LS)}(14)$ は図 4-18 の評価点 14 における $IL^{(LS)}$ を表す。

2. $IL^{(LS)}(14)$, $SA \cdot IL$, $\overline{SA \cdot IL}$ は (4.7) 式で計算。ただし, $SA \cdot IL$ の () 内の数値は (4.16) 式で計算。

4. 7 実車の場合の減音効果に関する考察

本章では、音源を無指向性点音源とみなして予測式の構築を行っている。しかし、高さが低い低層遮音壁の場合、走行する自動車（以下、「実車」という）を音源とする時は、低層遮音壁近傍の実車（特に大型車）の側面と低層遮音壁の間での多重反射⁶⁷⁾及び実車から発生する騒音の指向性（車両上方より側方の騒音レベルが高い）^{68)~70)}が減音効果に及ぼす影響を考慮する必要がある。

矢野らによるテストコースでの実験結果⁴³⁾によると、走行車線の中心から 3.3m 隔てて設置された高さ 0.9m の連続した塀（長さ 20m）の背後 5m、高さ 1.2m の地点で、挿入損失の実測値と前川チャートによる計算値を比較すると、乗用車では実測値がやや大きく、大型車では実測値と計算値がほぼ一致している。

一般に、低層遮音壁は開口部を有し吸音性パネルを用いることも多いこと、多車線道路では車両と低層遮音壁との距離は大きくなることから、実際には、多重反射の影響は、より小さくなると考えられる。一方、実車の指向性の影響は、常に存在するため、実際の道路に設置した低層遮音壁による減音効果は、本論文で提案する予測式で求めた結果より大きくなる可能性がある。今後、検討すべき課題である。

4. 8 まとめ

低層遮音壁による減音効果の予測・評価方法に関する検討を行い、以下の成果を得た。

- 1) 有限長で開口部を有する低層遮音壁による減音効果の区間評価の指標として、評価区間全体を対象とした $SA \cdot IL$ 及び遮音壁背後空間を対象とした $\overline{SA \cdot IL}$ を示した。これらの指標は、騒音の評価対象（住居、歩行者）により適宜選択する必要がある。また、歩道上にベンチを設置する場合のように、特定の地点の騒音レベルを評価する場合は、地点別の $IL^{(LS)}$ を評価指標として用いればよい。
- 2) 線音源（直線道路）において、複数の有限長障壁が設置された場合の挿入損失の計算方法である見通し角法を、透過損失の小さいパネルタイプ及び植栽柵タイプに拡張した。
- 3) 低層遮音壁の設置による $SA \cdot IL$ は、近似的には開口部の位置にかかわらず開口率により求められることを、数値シミュレーションの結果により明らかにした。その結果をもとに、無限線音源に対する $SA \cdot IL$ の簡易計算式を提案した。さらに、この方法を透過損失の小さいパネルタイプ及び植栽柵タイプにも一般的に適用できる形で定式化した。
- 4) 音源が 4 車線道路の近車線側にある場合を想定して、高さ 1m の低層遮音壁による減音効果を求めるケーススタディを行った。その結果、開口率が 20% の場合は、評価（対

以上の結果，種々のタイプの低層遮音壁による減音効果の予測・評価が可能となり，設計の際の留意点も，ある程度明らかになったと考える。

最後に，今後の主な課題として以下のものが挙げられる。

- 1) 中央分離帯にも低層遮音壁を併設した場合の減音効果の計算方法
- 2) 自動車走行騒音の指向性の考慮した減音効果の計算方法
- 3) 低層遮音壁の合理的な設計方法

第5章 道路に面した単独建物後方の騒音レベルの予測方法

5.1 はじめに

1.1で述べたように、「騒音に係る環境基準」の改定により、沿道建物後方での道路交通騒音予測の必要性が高まっている。環境アセスメント等において、実際に道路交通騒音を予測する場合は、建物の高さ、間口、奥行き等のパラメータ（以下、「建物パラメータ」という）を調査する必要がある。その際、建物パラメータの数が多いと、予測計算が煩雑になるだけでなく、その調査に費やす労力も多大となる。したがって、実用上は、計算に用いる建物パラメータの数ができるだけ少ない予測計算方法が有効である。

本章では、道路に直面した単独建物後方の特定地点における L_{Aeq} の計算方法を提案する。さらに、それらの方法を、受音点の位置に応じて簡略化することを検討する。

基本的には、建物を直方体形状を有する有限長反射性厚み障壁とみなす。そして、2.3および3.2の検討結果を用い、単独建物後方の騒音レベルを、その背後空間だけでなく建物側壁面での反射音の影響が大きい側方空間も含めて、簡便に計算する方法の構築を目指す。

以下、5.2では、地面上に設置された反射性厚み障壁による挿入損失の計算方法を検討する。5.3では、3パスの方法に地面反射音の寄与を加えた4パスの方法による単独建物後方の騒音レベルの計算方法を検討する。5.4では、3パスの方法と1パスの方法による計算結果を比較することなどにより、計算方法の簡略化の検討を行う。5.5では、建物群背後の特定地点での L_{Aeq} 計算に対する上記方法の適用可能性について考察する。

なお、対象道路は平面道路とし、建物と道路との間には、遮音壁等の音響的障害物が無い場合を想定する。また、建物壁面及び地面は完全反射とみなす。

5.2 地面上の反射性厚み障壁による挿入損失の計算方法

2.3において、建物の間口や奥行きと同様の厚みを有する反射性厚み障壁 ($w = 8m$ 及び $16m$) に、(2.1)式がほぼ適用できることが示された。ここでは、(2.1)式において、地面反射音の影響も考慮した場合の計算結果の妥当性を、模型実験により検証する。

5.2.1 計算方法

地面上に反射性厚み障壁が設置された場合のユニットパターン（1.2参照）の計算式

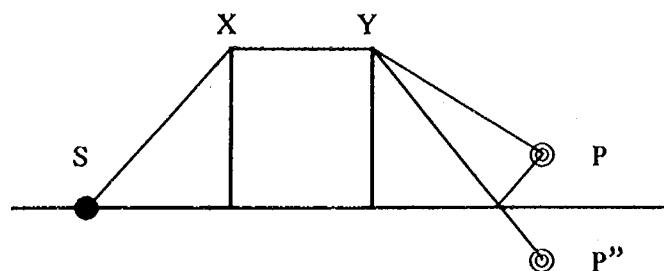


図 5 - 1 地面上の反射性厚み障壁による挿入損失計算のための模式図

は，(1.3)式を基本として，次式で示される。

$$L_p = L_w - 8 - 20\log_{10} r - IL^{(PS)} \quad (5.1)$$

L_p ：音圧レベル[dB]

L_w ：自動車走行騒音のパワーレベル[dB]

r ：音源と受音点間の距離[m]

$IL^{(PS)}$ ：点音源（Point Source）に対する反射性厚み障壁による挿入損失[dB]

ここで， $IL^{(PS)}$ は，次式で求める。（図 5 - 1 参照）

$$IL^{(PS)} = -10\log_{10}(10^{-\Delta L(RW)_{SXYP}/10} + 10^{-\Delta L(RW)_{SXYP}/10}) \quad (5.2)$$

P'' ：受音点 P の地面に対する反射イメージ

$\Delta L(RW)_{SXYP}$ ：反射性厚み障壁による減音量[dB]，(2.1)式より求める。

(5.1)式は地面上にある音源からの半球面波伝搬による距離減衰を表しており，言い換えれば，地面に沿って伝搬する音に関しては地面反射音の影響はすでに考慮されている。しかし，図 5 - 1 のように障壁の上方を伝搬する音の寄与を計算する場合には，さらに受音点側の地面反射音の影響を考慮する必要があると考えた。そこで，(5.2)式では，障壁回折後の地面反射音の寄与を前川の提案する方法^{13), 22)}により与えた。

5.2.2 模型実験による検証

(5.2)式を検証するため，無響室において，縮尺比 1/20 の模型実験を行った。なお，本章では，模型実験に関する数値は，「原寸」と表示しない限り実物換算で示す。

実験配置を図 5 - 2 に示す。地面および障壁は反射性とし，それぞれ，厚さ 3mm および 5mm（原寸）の亚克力板で製作した。反射性厚み障壁は，高さ 5m，厚み 8m（高さ，厚みの設定の考え方は，5.3.2 参照）であり，その延長は障壁側方からの回折音を無視できるように 200m とした。音源には，点音源としてのジェットノイズ音源を横向き（高さ 0.4m）にして用いた。それを図 5 - 2 において紙面と垂直方向に向け，図 5 - 2 の断面において無指向性となるように配慮した。受音点は P1（高さ 1.2m）及び P2（高さ 3.5m）の 2 点とし，マイクロホンは 1/4 インチタイプを使用した。対象周波数は，予備実験の結果，無響室における反射音の影響を排除できる 50Hz ～ 3.15kHz とした。

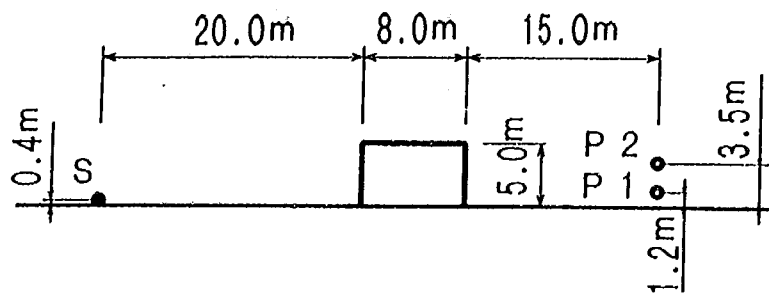


図 5 - 2 模型実験における地面上の反射性厚み障壁と音源・受音点の配置

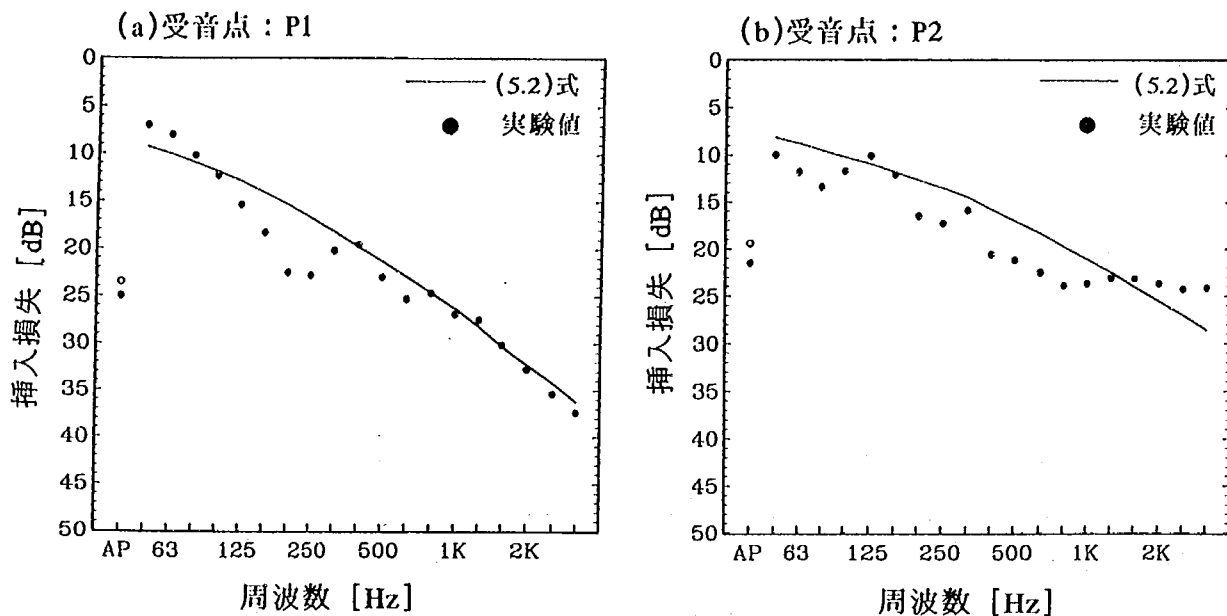


図 5 - 3 (5.2)式による計算値と模型実験値との比較

図 5 - 3 (a), (b)に、(5.2)式による計算結果と模型実験値を周波数毎に比較して示す。なお、計算には(5.2)式を用いるため、計算上の音源高さは 0m とした。

受音点 P1 では、計算値と実験値は、全体的によい整合を示している。しかし、200Hz ~ 250Hz 付近と 630Hz 付近で、実験値には干渉ディップが生じている。これは、主に障壁の受音点側エッジを回折後、受音点に直接到達する音と地面で反射して到達する音の干渉（計算上では、225Hz, 675Hz で干渉ディップが生じる）の影響と考えられる。また、音源から直接障壁の音源側エッジに到達する音と地面で反射して到達する音の干渉ディップは、計算上は 876Hz で生じると考えられるが、その影響は実験値には顕著に現れていない。

また、受音点 P2 では、受音点 P1 と比べて、計算値と実験値の整合性がよくない。これは、受音点側の地面反射音の影響による干渉ディップ（計算上は 78Hz, 235Hz, 392Hz, 549Hz, 706Hz 等で生じる）によるものと考えられる。

しかし、50Hz ~ 3.15kHz において、自動車走行騒音の代表パワースペクトル（(1.6)式）で重み付けした A 特性オーバーオール値としての挿入損失は、P1, P2 とも、計算値

が実験値と比べ 1 ～ 2dB 小さい値を示す程度である。したがって、(5.2)式による方法は、道路交通騒音のような広帯域の周波数成分を含む騒音の予測には、実用上、十分利用できると思われる。

なお、音源高さを 0.4m とし、障壁設置前の地面反射音及び障壁設置後の音源側の地面反射音の影響も併せて考慮した計算も行った。しかし、音源高さが 0m の場合と比較して、ほとんど計算結果の差異は認められなかった。

5. 3 単独建物による挿入損失の計算方法

5.3.1 4パスの方法

単独の建物による挿入損失 $IL^{(PS)}$ を求めるにあたり、5. 2 の結果から建物上方を回折した音の受音点側地面での反射の影響も考慮することとした。すなわち、図 5-4 に示す 4 本の伝搬パスによる音の寄与を考慮した（以下、「4 パスの方法」という）。この図において、音源 S は地面上（高さ 0m）にあり、受音点 P は地面より高い位置にある。ここで、(A)～(D)の意味は次のとおりである。

(A)：建物上方を回折して受音点 P に到達するパス

(B)：建物の左方を回折して受音点 P に到達するパス

(C)：建物の右方を回折して受音点 P に到達するパス

(D)：建物上方を回折した後、受音点側の地面で反射して受音点 P に到達するパス

なお、(D)は、(5.2)式同様、建物上方を回折して受音点 P の地面反射イメージ P'' に到達するパスで代用できると考えた。

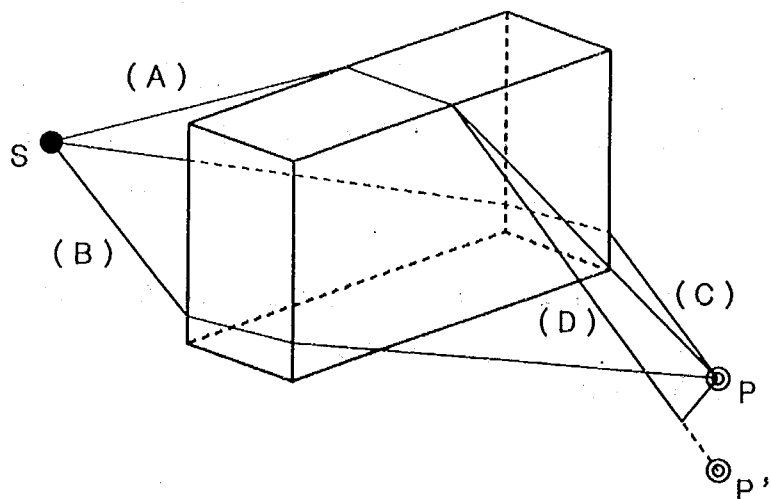


図 5-4 単独建物（厚みのある有限長障壁）と音の伝搬経路

なお、受音点 P での音圧レベル L_p は、(5.1)式同様、S からの半球面波伝搬による距離減衰を基本として求めることができる。したがって、5.2.1で述べた理由により、パス(B)、(C)には、すでに地面反射音の影響が含まれていると考えられる。

これらの音の寄与を合成するにあたり、以下に示す2通りの方法をとることとした。なお、パス(A)、(B)、(C)、(D)に対応する減音量を、順に、 ΔL_{upper} 、 ΔL_{left} 、 ΔL_{right} 、 $\Delta L''_{upper}$ と表す。

まず、3.2.1(1)に示した山本、高木らが提案する(厚みのない)有限長障壁による減音量の計算方法を、厚みのある有限長障壁(建物)に拡張する。この際、新たに地面反射音の寄与も加味した。

$$IL^{(PS)} = -10 \log_{10} \left\{ 10^{-\Delta L_{upper}/10} + 10^{-\Delta L''_{upper}/10} + (1 - 10^{-\Delta L_{upper}/10} - 10^{-\Delta L''_{upper}/10}) \times (10^{-\Delta L_{left}/10} + 10^{-\Delta L_{right}/10}) \right\} \quad (5.3)$$

山本、高木らの方法では、半無限障壁の上端に矩形状の有限長障壁を付加したモデルを取り上げている。一方、(5.3)式は、上記モデルにおける半無限障壁の上端の位置に地面があると想定し、地面より上の半自由空間での建物による挿入損失を与えている。自由空間に置き換えて考えれば、この式は、地面に対して対称な建物鏡像を加えた高さが2倍の仮想建物が空中にある時の減音量を計算するものである。この場合、仮想建物の下方を回折するパスは、図5-4のパス(D)に相当する。

建物が直方体とみなせる場合は、 ΔL_{upper} 、 ΔL_{left} 、 ΔL_{right} 、 $\Delta L''_{upper}$ は、基本的に、反射性厚み障壁(Reflective Wide Barrier)による減音量の計算式((2.1)式)から求める。したがって、これらの減音量には、建物壁面での反射音も考慮されていることになる。また、 $IL^{(PS)}$ の計算結果が負の値となる場合は、建物壁面での反射音の影響により、建物がない場合に比べ音圧レベルが増加していることを示す。

次に、ISO9613-2⁴⁰⁾や足立らの文献⁴⁹⁾で示された考え方に、地面反射音の寄与を加味した方法を示す。

$$IL^{(PS)} = -10 \log_{10} (10^{-\Delta L_{upper}/10} + 10^{-\Delta L''_{upper}/10} + 10^{-\Delta L_{left}/10} + 10^{-\Delta L_{right}/10}) \quad (5.4)$$

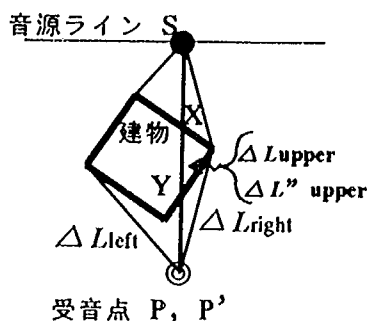
(5.4)式は、図5-4で示された4本の伝搬パスにおける音の寄与を、単純にエネルギー合成したものである。この式は、(5.3)式において ΔL_{upper} および $\Delta L''_{upper}$ が共に十分大きい場合にあたる。

(5.3)式、(5.4)式における ΔL_{upper} は次式で計算する。(図5-5参照)

$$\Delta L_{upper} = \begin{cases} \text{①鉛直平面 SP が建物と交差する場合} \\ \quad \Delta L(RW)_{SXP} \\ \text{② ①以外の場合} \\ \quad \Delta L_{SY'P} \end{cases} \quad (5.5)$$

X, Y: 鉛直平面 SP (音源 S, 受音点 P を通り鉛直な平面) と建物の上部エッジとの交点

①鉛直平面 SP が
建物と交差する場合



② ①以外の場合

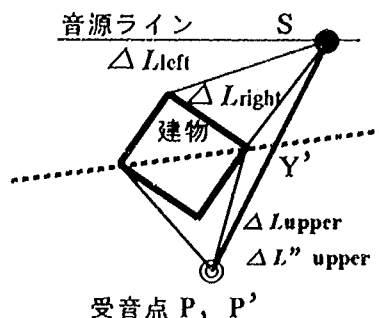


図 5-5 4パスの方法の模式図(平面図)

Y' : 鉛直平面 SP と、受音点から見た建物投影面を水平方向に延長した面の上部エッジとの交点

$\Delta L_{SY'P}$: Y' を回折点とする半無限障壁の回折減音量 ((1.7)式より求める)

また、 $\Delta L''_{upper}$ も全く同様に求めることができる。

一方、 ΔL_{left} 、 ΔL_{right} は、反射性厚み障壁による減音量の計算式 ((2.1)式) より求めるが、その回折点は最短伝搬経路を与える点とする。なお、側方の回折経路が三重回折となる場合は、その寄与を無視 (回折減音量が ∞)する。

5.3.2 模型実験による検証

(5.3)式、(5.4)式の妥当性を検討するため、無響室において、縮尺比 1/20 の模型実験を行った。なお、本章では、模型実験に関する数値は、「原寸」と表示しない限り実物換算で示す。

実験配置を図 5-6 に示す。建物の上方及び側方の回折効果を測定するためには、音源は、無指向性であることが望ましい。したがって、点音源としてのジェットノイズ音源を上向き (音源高さ 0.8m) にして用いた。地面及び直方体の建物 (高さ 5m, 間口 10m, 奥行き 8m) は反射性とし、それぞれ、厚さ 3mm および 5mm (原寸) のアクリル板を用いて製作した。受音点は、建物の背後 (P1) および斜め後方 (P2) に設け、1/4 インチマイクロホンで音圧レベルを測定した。なお、受音点高さは 1.2m とした。

建物の形状は、建築面積 80 m² の 2 階建てを想定したものである。ただし、無響室壁面での反射音の影響による回折減音量の測定限界から、建物の高さは通常の 2 階建てよりやや低く設定している。音源および受音点を建物壁面から 15m 以上離しているのも同じ理由による。対象周波数についても、5.2.2 同様、無響室壁面での反射音の影響がほぼ排除できると判断された 50Hz ~ 3.15kHz とした。

図 5-7 に、各受音点における挿入損失の模型実験値及び計算値を示す。この図におい

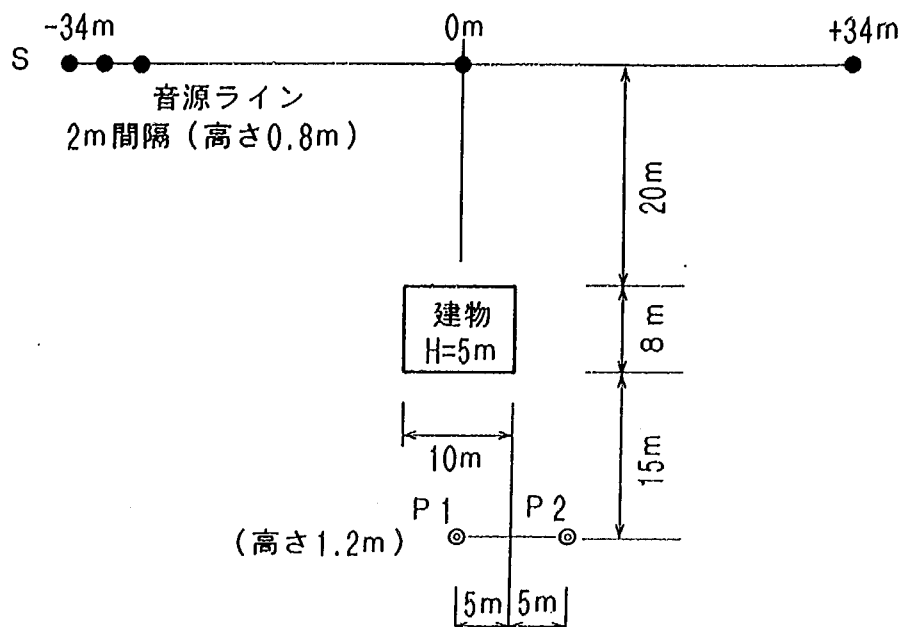


図 5 - 6 単独の建物と音源・受信点の配置

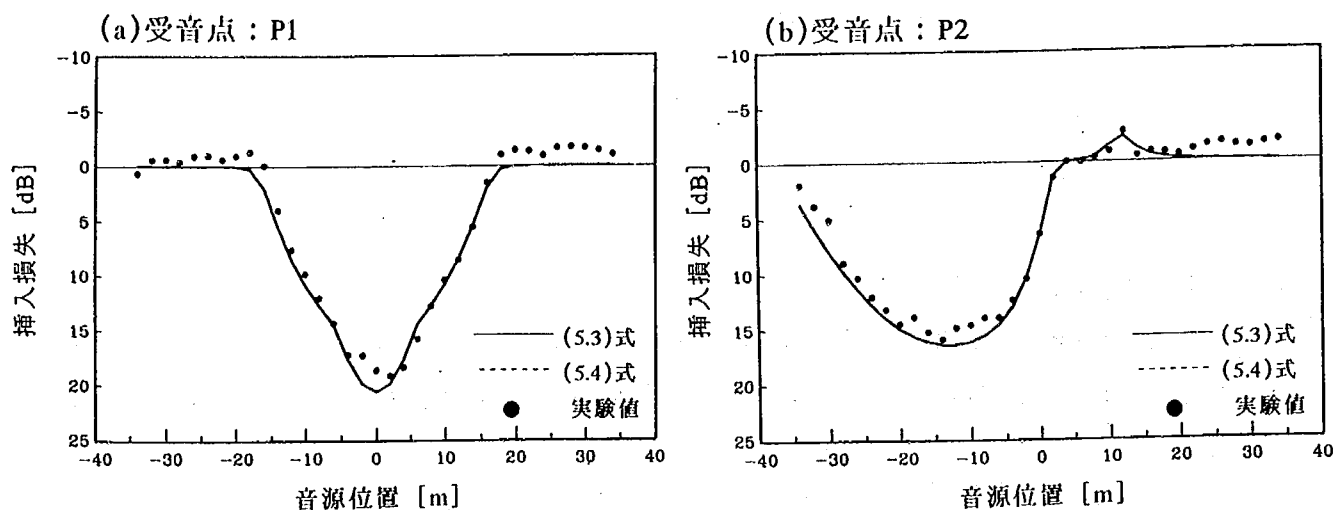


図 5 - 7 (5.3)式, (5.4)式による計算値と模型実験値の挿入損失の比較

て挿入損失は、自動車走行騒音の代表パワースペクトル ((1.6)式) で重み付けした A 特性オーバーオール値として示している。

(5.3)式と(5.4)式による計算結果は、図において区別できないほど一致し、模型実験値との整合性も高い。ただし、挿入損失のピーク付近において、計算値が実験値をやや上回る傾向が見られる。また、受信点 P2 での計算値は、音源位置 12m 付近において、建物側壁面での反射音による音圧レベルの増加もよく表現できている。

なお、以上の検討では、計算上の音源高さは 0m としている。5.2.2同様、音源高さ(0.8m)を考慮した計算も行ったが、(5.3)式, (5.4)式とも、計算結果にほとんど差異は認められなかった。

5.3.3 考察

まず、(5.3)式と(5.4)式による計算値の差異を詳細に検討する。図5-6の受音点位置P1の場合に、P1の高さを変化させて、図5-7と同様の計算を行った。P1が建物より高くなった場合（高さ10m）の計算値を図5-8に示す。(5.4)式による $IL^{(PS)}$ の計算値は、音源位置が-17mより左または17mより右の場合に負の値となり、不合理な結果を示している。このような建物の側方から音源を見通せる受音点位置では、 $10^{-\Delta L_{ref}/10}$ または $10^{-\Delta L_{high}/10}$ の値が1に近づく。さらに、受音点が高く $10^{-\Delta L_{upper}/10}$ も大きくなると、(5.4)式における対数の真数部分が1を超えるためである。その他の音源、受音点位置では、(5.3)式と(5.4)式による計算結果の差異はほとんど認められなかったものの、適用範囲や式の合理性の点では、(5.3)式が(5.4)式よりすぐれている。

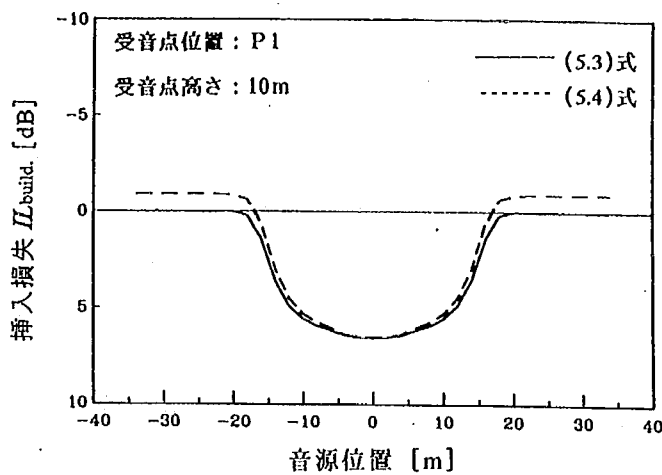


図5-8 (5.3)式と(5.4)式による計算結果の差異

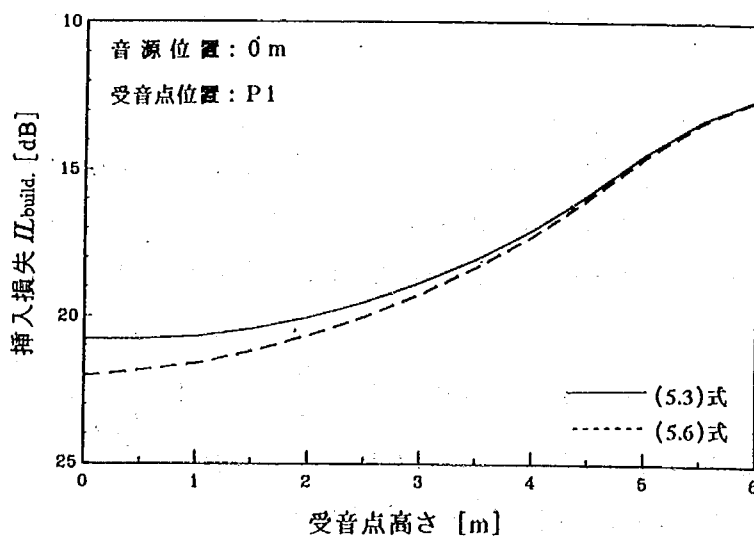


図5-9 受音点側の地面反射音の影響

次に、受音点側の地面反射音が計算結果に及ぼす影響を詳細に検討する。図5-6において地面反射音の影響が最も大きくなると考えられる音源位置0m（音源高さは0m），受音点位置P1の場合に、P1の高さを0mから6mまで変化させた。その時の(5.3)式による計算結果、および(5.3)式で地面反射音の影響を無視した次式による計算結果を図5-9に示した。

$$L^{(PS)} = -10 \log_{10} \{ 10^{-\Delta L_{upper}/10} + (1 - 10^{-\Delta L_{upper}/10}) \times (10^{-\Delta L_{kd}/10} + 10^{-\Delta L_{right}/10}) \} \quad (5.6)$$

(5.3)式と(5.6)式による計算値の差異は、受音点高さが低いほど大きくなる。しかし、その差異は最大でも1dB程度（高さ0m）であり、道路交通騒音の予測における一般的な受音点高さ（1.2m以上）では1dB未満である。図5-7(a)，図5-9の結果から判断すると、地面反射音を考慮した方が計算値と実験値との整合性は高いものの、地面反射音が計算値に及ぼす影響は小さいと考える。

また、図5-7(a)，(b)の計算ケースにおいて、(5.3)式と(5.6)式によるユニットパターンのエネルギー積分値（1.2.1参照）の計算値の差異を比較したところ、両ケースとも0.1dB未満であった。さらに、図5-7(a)のP1（高さ1.2m）を、音源ラインに直角方向に水平に移動し、建物の受音点側壁面から1mの距離にまで近づけて同様の計算を行っても、計算値の差異は0.3dB未満であった。したがって、単独建物後方の騒音レベルを L_{Acq} で評価する時は、地面反射音の影響はほとんど無視できると考えられる。これは、受音点から音源が見通せる場合をはじめ、建物側方からの伝搬音の寄与が支配的になるためである。なお、受音点位置がより高くなると、図5-9から分かるように、地面反射音の寄与自体が無視できるほど小さくなると考えられる。

5.4 計算方法の簡略化の検討

5.4.1 建物側壁面での反射音を考慮した1パスの方法

次に、厚みのない有限長障壁による減音効果の計算に用いられる1パスの方法（(3.6)式）を基本とし、建物の遮蔽効果と建物側壁面での反射音の影響を個別に計算する方法を示す。なお、5.3.3での検討結果にしたがい、地面反射音の影響は無視する。

この方法によるユニットパターンの計算式は、次式で示される。

$$L_p = 10 \log_{10} \left(10^{L_{p,0}/10} + \sum_{i=1}^N 10^{L_{p,i}/10} \right) \quad (5.7)$$

$L_{p,0}$ ：建物上方及び側方の直接伝搬音による音圧レベル[dB]

$L_{p,i}$ ：建物側壁面*i*における反射音による音圧レベル[dB]

N ：建物側壁面の数、直方体の単独建物の場合 $N = 4$ （建物群を対象とする場合（5.5参照）は、全ての建物の側壁面数の合計）

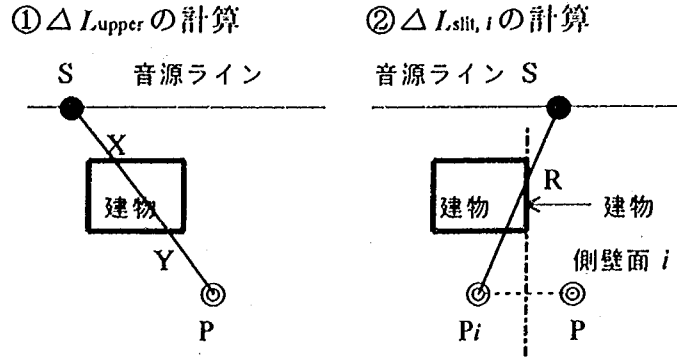


図 5-10 1パスの方法の模式図（平面図）

$L_{p,0}$ の計算は、次式により行う。

$$L_{p,0} = L_w - 8 - 20 \log_{10} r - \Delta L_{upper} \quad (5.8)$$

ΔL_{upper} は、次式で与えられる。（図 5-10①参照）

$$\Delta L_{upper} = \begin{cases} \text{① 鉛直平面 SP が建物と交差する場合} \\ \quad \Delta L(RW)_{sxyr} \\ \text{② ①以外の場合} \\ \quad 0 \end{cases} \quad (5.9)$$

また、 $L_{p,i}$ の計算は、次式により行う。（図 5-10②参照）

$$L_{p,i} = \begin{cases} \text{① S, P とも、建物側壁面 } i \text{ と対面する側にあり、鉛直平面 SP}_i \text{ が、} \\ \quad \text{建物側壁面 } i \text{ と交差する場合} \\ \quad L_w - 8 - 20 \log_{10} r_i - \Delta L_{slit,i} \\ \text{② ①以外の場合} \\ \quad -\infty \end{cases} \quad (5.10)$$

P_i : P の建物側壁面 i に対する鏡像受音点

r_i : S と P_i の間の距離[m]

$\Delta L_{slit,i}$: 建物側壁面 i での反射時の減音量[dB]

$\Delta L_{slit,i}$ は、建物側壁面 i と同じ高さで、水平方向に無限長のスリット面を仮定し、次式で求める。

$$\Delta L_{slit,i} = -10 \log_{10} (1 - 10^{-\Delta L_{SRP}/10}) \quad (5.11)$$

R : 鉛直平面 SP_i が建物側壁面 i の上部エッジと交差する点

なお、直方体の単独建物の場合、(5.10)式の①の条件に該当する側壁面の数は、最大でも 2 である。

5.4.2 模型実験値との比較

上述の 5.4.1 の 1 パスの方法による計算値と 5.3.2 の模型実験値との比較を行った。実験配置は、図 5-6 のとおりである。

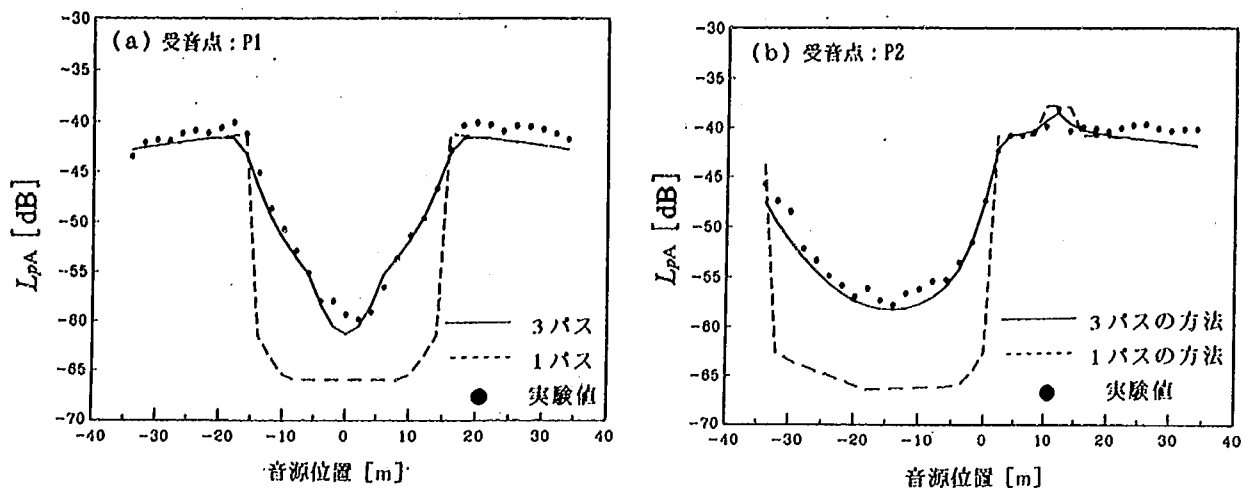


図 5-11 計算値と模型実験値の比較

図 5-11(a), (b)に計算値と模型実験値の比較を示す。また、地面反射音の影響を除いた 3 パスの方法 ((5.6)式) による計算結果も併せて示した。ここで、 L_{pA} は自動車走行騒音の代表パワースペクトル ((1.6)式) で重み付けした A 特性オーバーオール値を表し、 $L_{WA} = 0$ とした場合の相対レベルとして示している。ここでは計算上の音源高さは 0m とし、1/3 オクターブバンド毎にその中心周波数を用いて計算した。また、実験値は半自由空間での理論減衰値から測定した挿入損失を差し引いて求めた。

3 パスの方法による計算値は実験値とよく一致している。一方、1 パスの方法による計算値は、受音点 P1, P2 において、音源が受音点から見て建物の陰となる領域にある場合に、実験値に比べて過小な値となる。これは、1 パスの方法が、建物側方の伝搬音の寄与を考慮していないためと考えられる。また、両方法とも、受音点 P2 の場合の音源位置 12m 付近において、建物側壁面での反射音による音圧レベルの増加をよく表現できている。

5.4.3 計算方法の簡略化

上記の検討により、1 パスの方法では、音源位置により L_p の計算値と模型実験値との乖離が大きくなる場合があることが分かった。しかし、 L_{Acq} の計算において特に問題となるのは、個別の位置の音源に対する L_p ではなく、ユニットパターンの積分値 (1.2.1参照) である。

ここでは、図 5-12のように、十分長い直線道路に面して、10 階建て相当の建物（間口 30m, 奥行き 15m, 高さ 30m）が立地した場合を想定する。そして、1 パスの方法によるユニットパターンの積分値の計算値を、図 5-11で妥当性が確認された3パスの方法による計算値と比較する。

まず、受音点 P1 ~ P24（高さ 1.2m）において、建物の有無によるユニットパターンの積分値の差（以下、線音源（Line Source）に対する挿入損失という意味で「 $IL^{(LS)}$ 」とい

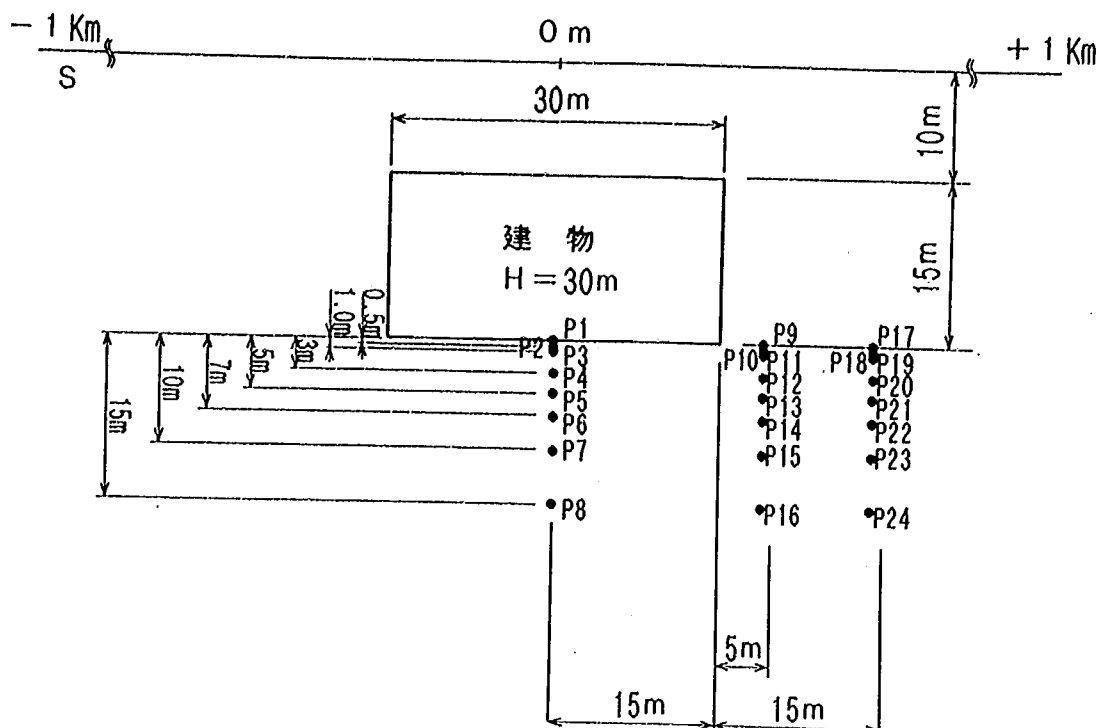


図 5-12 計算値の比較のための建物と受信点の配置

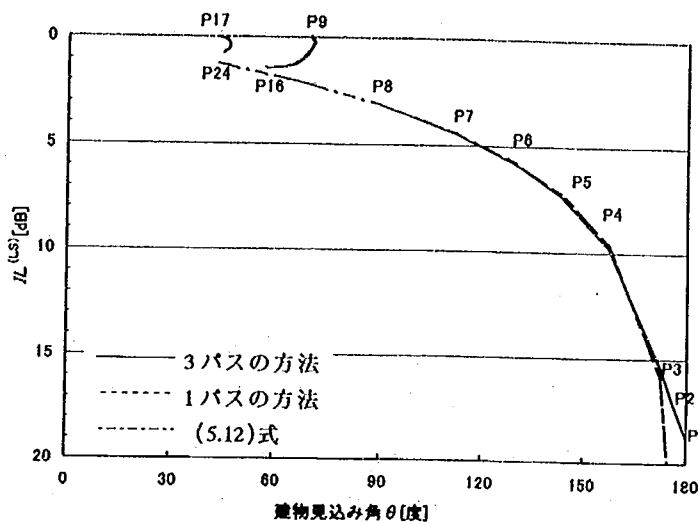


図 5-13 建物の見込み角 θ と $IL^{(LS)}$ の関係

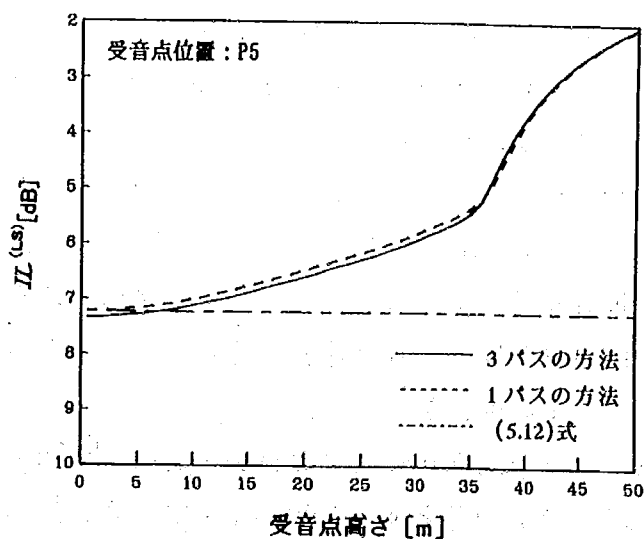


図 5-14 受信点高さ と $IL^{(LS)}$ の関係

う)を両方法により求めた。なお、音源は2m間隔で2kmの区間に配置し、 $IL^{(L.S)}$ は、自動車走行騒音の代表パワースペクトル((1.6)式)で重み付けしたA特性オーバーオール値(50~5kHz)として算出した。

図5-13に、受音点 $P_j(j=1\sim 24)$ からの水平方向の建物の見込み角 θ [度]と3パス、1パスの方法による $IL^{(L.S)}$ の計算値の関係、および次式を併せて示した。

$$IL^{(L.S)} = -10\log_{10}\{(\theta_0 - \theta)/\theta_0\} \quad (5.12)$$

ここで、 θ_0 は、対象とする建物が存在しない場合に、受音点から見た道路全体の見通し角であり、十分長い直線道路では、 $\theta_0 \doteq 180$ [度]とする。

(5.12)式は、直線道路を対象とした場合に、1パスの方法で建物側壁面における反射音の寄与を無視する((5.7)式で $L_{p,i} = -\infty$ とする)とともに、建物の高さを無限大と考え建物上方を伝搬する音の寄与を無視する((5.9)式①で $\Delta L(RW)_{sxyr} = \infty$ とする)場合に相当する。なお、(5.12)式の導出過程については、3.2.4(1)を参照されたい。

さらに、図5-14に、建物の背後5mの受音点P5の高さを1.2mから50mまで変化させた場合に、受音点高さ、3パス、1パスの方法および(5.12)式による $IL^{(L.S)}$ の計算値との関係を示した。

これらの図から、以下のことが分かる。

- 1) 3パス、1パスの方法による計算値は、 θ が180度に近い場合を除きほとんど差異がない。
- 2) 建物背後の受音点(P1~P8)の高さが1.2mの場合(図5-13)は、1パスの方法と(5.12)式による計算値は、図において区別ができないほど一致する。P5の高さを変化させた場合(図5-14)は、建物と同じ高さ(30m)では両方法による計算値の差は1dB程度であるが、それより高くなると計算値の差異が大きくなる。
- 3) 建物の斜め後方の受音点(P9~P16, P17~P24)においては、3パス、1パスの方法と(5.12)式の結果の差異は、最大で2dB程度である。これは、(5.12)式が建物側壁面における反射音の寄与を無視していることに起因する。

以上の結果から、3パス、1パスの方法の適用条件、および(5.12)式の適用等による計算の簡略化の方法は、次のように整理できる。

- 1) θ が180度に近い場合は、3パスの方法を用いる必要があるが、それ以外の場合は、3パス、1パスどちらの方法を用いてもよい。なお、騒音がほぼ一方向から到来する場合は、建物側方の回折音を考慮する必要がある、3パスの方法を用いる必要がある。これには、トンネル坑口の蓋かけ部上方に建物が立地し、その背後の受音点で、明かり部の道路からの影響を計算する場合などがあたる。
- 2) 建物背後の受音点で、その高さが建物より低いときは、計算方法を以下のように簡略化できる。まず、直線道路を対象とする場合は、(5.12)式を用いればよい。すなわち、建物高さの調査は必要なく、平面形状についても θ の設定に必要な範囲で調査すればよ

い。このことは、直方体形状以外の建物を対象とした場合でも、 θ さえ設定できれば、 L_{Aeq} が計算できることを意味する。また、曲線道路においては、建物高さを無限大と考え、1パスの方法を用いればよい。なお、建物側壁面での反射音の寄与 $10^{L_{pd}/10}$ は、ほぼ無視できる。

3) 建物の斜め後方の受音点では、建物側壁面における反射音の寄与を考慮した方が計算の精度は高い。しかし、反射音が L_{Aeq} の計算結果に及ぼす影響は、鏡面反射を仮定した場合で、最大1～2dB程度と考えられる。実際の建物壁面がある程度の凹凸と吸音性を持つことを考慮すると、1パスの方法において、建物側壁面での反射音の寄与を省略した近似計算が可能である。この場合、受音点高さが建物より低い時は、上述した建物背後の受音点と同様、計算方法がより簡略化できる。

5. 5 建物群背後の特定地点での L_{Aeq} 計算の可能性に関する考察

5. 3, 5. 4で提案した方法を建物群背後の特定地点での L_{Aeq} 計算へ適用することの可能性について考察する。ただし、3パスの方法を建物群背後の受音点での計算に適用することは、煩雑で適用範囲が限定されることも予想されるため、以下では1パスの方法を検討対象とする。

まず、図5-15①のように、複数の建物が十分な間隔をおいて立地し、建物間の多重回折、多重反射の影響がほぼ無視できる場合は、原理的には1パスの方法が適用可能である。この際、5.4.3の検討結果から判断すると、計算の簡略化のため、建物側壁面での反射音の寄与を省略した近似計算も可能と考える。

しかし、建物の立地密度が大きくなるにつれ、計算精度の向上のためには、建物上方および側方の多重回折ならびに建物側壁面間の反射音の影響を丹念に計算する必要性が生じてくると考える。

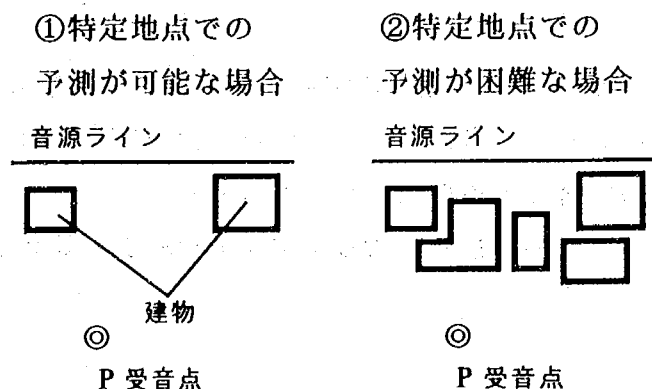


図5-15 建物群背後の騒音予測

さらに建物が密集し、図5-15②のようにPから音源が見通せない場合には、建物間の多重反射の影響や建物間隙から放射する音の指向性を正確に計算する必要がある。この場合には、特定地点での L_{Aeq} の予測を幾何音響理論に基づき行うことは現在のところほとんど不可能であると考ええる。したがって、第6章で後述するように、区間平均等価騒音レベル $SA \cdot L_{Aeq}$ を指標として予測計算を行うことが実用的であると考ええる。

5.6 まとめ

平面道路に面した単独建物後方での騒音レベルの計算方法の検討を行った。本章の成果は以下のとおりである。

- 1) 反射性厚み障壁が地面上に設置された場合における挿入損失の計算方法を示し、模型実験により検証した。
- 2) 直方体形状の単独建物が道路に面して立地する場合に、その後方の騒音レベルを計算する方法を検討した。まず、反射性厚み障壁による減音量の計算方法を用いて、建物の上方及び側方を伝搬する音の寄与を求め、それらを合成する方法を提案した。模型実験値との比較の結果、この方法により騒音レベルのユニットパターンをある程度正確に求められることが明らかとなった。また、 L_{Aeq} の計算においては、地面反射音の影響はほとんど無視できることを簡単な試算により示した。
- 3) 2)の方法より簡易な、建物側壁面での反射音を考慮した1パスの方法を提案した。そして、ユニットパターンの積分値を計算する場合はこの方法で十分なことを、2)の方法との比較により明らかにした。また、これらの計算に必要な建物高さ、建物の見込み角という建物パラメータと計算値の関係を分析した。その結果、受音点の高さが、建物より低い場合は、建物の見込み角を用いて予測計算すれば概ねよいことが明らかとなった。
- 4) 3)の1パスの方法を、建物群背後の特定地点での L_{Aeq} の予測に用いる場合の適用性について考察した。

なお、本章で示した計算方法は、道路交通騒音だけでなく、広帯域の周波数成分を含む騒音に対しても広く利用できると考えられる。また、3)の1パスの方法は、原理的には、遮音壁の設置された道路に対しても応用が可能と考える。

今後は、これらの計算方法の精度を、現地での実測データと比較して確認していく必要があると考える。

第6章 道路に面した市街地における騒音レベルの 予測・評価方法

6.1 はじめに

1.1で述べたように、新たな騒音に係る環境基準では、道路に面する地域の環境基準の達成状況の評価は、地域内の住居等のうち基準値を超過する戸数及び超過する割合を把握することにより行うことが示された。その結果、多数の建物が立地する地域（以下、「市街地」という）における道路交通騒音の状況を広域的に把握する必要性が高まっている。広域的な騒音の把握を測定により行うことは多大な労力を要するため、道路交通条件および建物の立地状況から騒音を推計する手法が有効である。

本章では、道路に面した市街地における評価区間の平均的な騒音レベルを、道路からの距離に応じて簡便に計算する方法の検討を行う。

以下、6.2では、市街地のモデル化および市街地における騒音レベルの計算方法について示す。6.3では、道路に近接する建物列直後における $SA \cdot IL$ の計算方法の模型実験による検証およびケーススタディを通じた計算方法の簡略化の検討を行う。6.4では、模型実験により建物群の間隙を伝搬する音の超過減衰を表す回帰式を作成する。さらに、6.5、6.6では、提案した建物群背後における騒音レベルの計算方法を模型実験値、従来の実験式および現地実測値と比較し、その妥当性を検証する。

なお、ここでは、遮音壁のない平面道路（以下、「平面街路」という）に加え、遮音壁が設置された道路も対象とする。

6.2 市街地のモデル化と騒音レベルの計算方法

6.2.1 市街地における騒音レベルの区間評価

5.5で、建物群背後の特定地点における騒音予測の可能性について考察した。隣接する建物の間隔が十分広いときは比較的簡易に特定地点での L_{Aeq} の計算が可能であるが、建物が密集するにつれ計算が煩雑になり、最終的には幾何音響理論に基づく計算がほとんど不可能となる。また、1.5で述べたように、受音点と建物群の間隙との位置関係により予測地点での L_{Aeq} は複雑に変化する。したがって、たとえ、特定地点での L_{Aeq} の計算が可能であったとしても、環境アセスメント等において地域の代表的な騒音レベルを評価する場合は、予測地点を選定することが困難である。

したがって、本章では、市街地における騒音レベルの評価指標として、区間平均等価騒音レベル $SA \cdot L_{Aeq}$ を用いる。また、建物群および遮音壁による減音効果を表す指標として、それらの有無による $SA \cdot L_{Aeq}$ の差である区間平均挿入損失 $SA \cdot IL$ を用いる。(3.3 参照)

6.2.2 市街地における $SA \cdot L_{Aeq}$ 計算の基本的考え方

建物が密集した市街地では騒音の距離減衰が大きいとため、広域的な騒音レベルの計算においては暗騒音補正を行うことが望ましい。よって、ここでは道路から一定距離隔たった一定高さの評価区間の $SA \cdot L_{Aeq}$ を、道路交通騒音 (Road Traffic Noise) の寄与 $SA \cdot L_{Aeq}(RN)$ と暗騒音 (Background Noise) の寄与 $SA \cdot L_{Aeq}(BN)$ とを合成した次式で求めることとする。

$$SA \cdot L_{Aeq} = 10 \log_{10} (10^{SA \cdot L_{Aeq}(RN)/10} + 10^{SA \cdot L_{Aeq}(BN)/10}) \quad (6.1)$$

$SA \cdot L_{Aeq}(RN)$ は、半自由空間での幾何減衰を考慮して計算される等価騒音レベル $L_{Aeq}(RN)$ から、建物群、遮音壁による $SA \cdot IL$ を差し引いて求める。なお、ここでは地表面効果は無視する。

$$SA \cdot L_{Aeq}(RN) = L_{Aeq}(RN) - SA \cdot IL \quad (6.2)$$

$L_{Aeq}(RN)$ の計算は、一般的に文献 8) の方法によるが、十分長い直線道路では文献 8) の方法を無限線音源に適用した次式を用いることができる。

$$L_{Aeq}(RN) = L_{WA} - 3 - 10 \log_{10} d - 10 \log_{10} (1000V/N) \quad (6.3)$$

L_{WA} : 走行車両の A 特性パワーレベル [dB]

d : 線音源 (音源を設定する車線) から評価区間までの距離 [m]

V : 車両の平均走行速度 [km/時]

N : 交通量 [台/時]

一方、 $SA \cdot L_{Aeq}(BN)$ は、別途、測定して設定することも可能であるが、一般的には騒音に係る環境基準²⁾ という昼間、夜間に対して、各々 50dB, 40dB とすればよいと考える。これは、1) 環境騒音が、同基準の AA 類型の基準値に相当するこれらの値を下回ることは少ないと考えられること、2) 計算値を道路に面する地域の A 類型の基準値 (昼間 60dB, 夜間 55dB) と比較して環境基準の達成状況を評価する時 (B, C 類型の場合も同様) も、暗騒音補正の影響はほとんど無視できる、ことによる。

なお、 $SA \cdot IL$ の計算方法については 6.2.4 で後述する。

6.2.3 市街地のモデル化と建物パラメータ

本章でいう市街地 (図 6-1 参照) は評価の基本単位でもあり、原則として対象道路およびそれと交差する道路で囲まれた地域とする。ただし、後述する市街地の建物パラメータがおおむね一定とみなせる地域は、統合して評価することができる。

音源は対象道路上にのみ線音源 S を想定し、交差道路からの発生音は考慮しない。

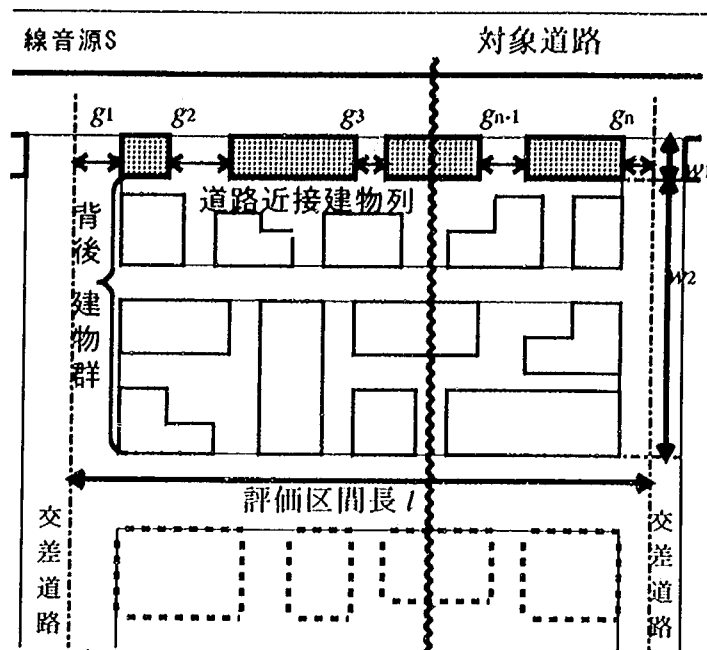


図 6 - 1 市街地のモデル化（平面図）

また、1.6.1(5)でも述べたように、市街地を形成する建物を道路に直面して立地する建物の列（以下、「道路近接建物列」という）とその背後の建物群（以下、「背後建物群」という）とに分類する。そして、それらに対し、以下に示す 5 つの建物パラメータを与える（図 6 - 1，図 6 - 2，(6.6)式，(6.7)式参照）。

- ①道路近接建物列および背後建物群の平均高さ h [m]
- ②道路近接建物列の間隙率 α
- ③道路近接建物列の平均奥行き w_1 [m]
- ④背後建物群の建物密度 β
- ⑤背後建物群の平均奥行き w_2 [m]

ここで、 w_2 は道路近接建物列の後方壁面から、背後建物群の最後方壁面までの平均距離を表す。

建物パラメータとして、道路近接建物列に α ，背後建物群に β を与えた理由は次のとおりである。

- 1) 道路近接建物列は道路から市街地内へ伝搬する騒音を遮蔽する役割を有している。これらは一列に並んだ複数の有限長障壁とみなすことができ、低層遮音壁の植栽柵タイプとも形状が類似している。したがって、4.5.3で示したように、それらの障壁による $SA \cdot IL$ は、建物の間隙率 α と深い関係があると考えられる。（(6.8)式参照）
- 2) 一方、背後建物群後方の評価区間（受音点を P で表す）の $SA \cdot IL$ 計算では、建物群中を多重反射，散乱しながら伝搬する音の減衰を考慮する必要がある。このためには、

建物密度がパラメータとして有効なことが、従来の研究で明らかになっている⁴⁰⁾、⁵¹⁾、⁵²⁾、⁵⁵⁾。

また、 h 、 w_1 および w_2 というパラメータは、受音点位置が高い場合や道路から離れている場合などに、特に重要となる。なお、基本的には、道路近接建物列と背後建物群の平均高さがほぼ同一の場合を想定して議論を進め、両者が異なる場合の取り扱いについては、6.2.4(3)で述べる。

6.2.4 市街地における $SA \cdot IL$ の計算方法

(1) 平面街路を対象とする場合

まず、平面街路を対象に、建物群による $SA \cdot IL$ の計算方法を示す。(図6-2参照)

今、線音源 S から発生し市街地を伝搬する音の経路(パス)として、以下の3つを考える。

①パス 1: 道路近接建物列の前面及び上面の間隙から入射し、背後建物群中を伝搬する音を表すパス

②パス 2: 背後建物群上面の間隙から入射して、背後建物群中を伝搬する音を表すパス

③パス 3: 道路近接建物列および背後建物群の上方を伝搬する音を表すパス

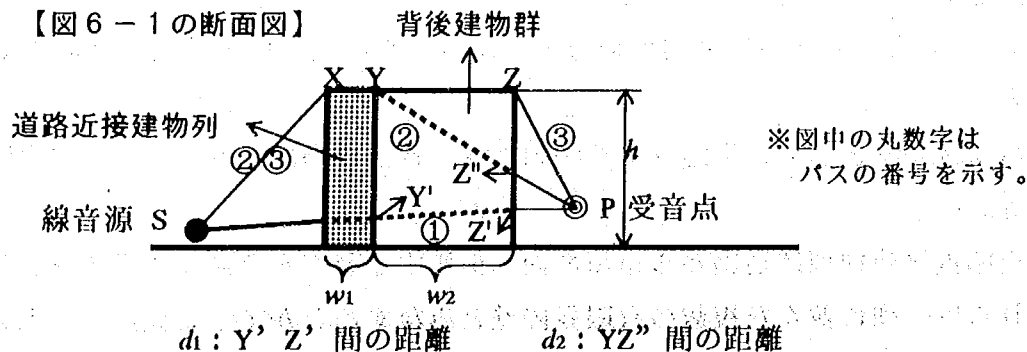
ここで、パス 1、パス 2、パス 3 による音の寄与 (Contribution, エネルギー量) を C_1 、 C_2 、 C_3 とし、建物群が存在しない場合の音の寄与を C とすると、 $SA \cdot IL$ は以下の式で与えられる。

$$SA \cdot IL = -10 \log_{10} (C_1/C + C_2/C + C_3/C) \quad (6.4)$$

$C_1/C \sim C_3/C$ は次式で計算する。

$$\begin{cases} C_1/C = \alpha (1 - 10^{-IL^{(LS)}_{SXYP}/10}) 10^{-\Delta L(\beta, d_1)/10} \\ C_2/C = (1 - \beta) (10^{-IL^{(LS)}_{SXYP}/10} - 10^{-IL^{(LS)}_{SXZP}/10}) \times 10^{-\Delta L(\beta, d_2)/10} \\ C_3/C = 10^{-IL^{(LS)}_{SXZP}/10} \end{cases} \quad (6.5)$$

【図6-1の断面図】



(注) 受音点 P が Z より高くなり、 SP が $\overline{YZ}$ と交わるときは、交点を Z' とし $d_2 = 0$ とする。

さらに P が高くなり、 SP が Y の上を通過するときは、 $d_1 = d_2 = 0$ とする。

図6-2 平面街路を対象とする場合の音の伝搬パスと d_1 、 d_2 設定の考え方

ここで、 $IL^{(LS)}_{SXYP}$ および $IL^{(LS)}_{SXZP}$ は、線音源(Line Source)に対する無限長の連続した反射性厚み障壁による挿入損失を表す。これらは、(2.1)式の点音源に対する減音量 $\Delta L(RW)$ の計算式を用いて、障壁の有無によるユニットパターン (1.2.1参照) の積分値の差として求める。また、 $\Delta L(\beta, d_i)$ は、パス i ($i = 1, 2$) が背後建物群を通過する際の超過減衰量[dB]を示し、 β および d_i の関数 ((6.11)式参照) である。さらに、 d_i はパス i の背後建物群中の通過距離を示し、図6-2で定義される。

(6.5)式導出の考え方を示す。まず、図6-3のように、エッジを X,Y または X,Z とする反射性厚み障壁の上方回折音の寄与を、各々 C_0, C_3 とすると、

$$C_0/C = 10^{-IL^{(LS)}_{SXYP}/10}, \quad C_3/C = 10^{-IL^{(LS)}_{SXZP}/10}$$

が得られる。

C_1 の算出では、道路近接建物列の間隙を通過する音の寄与を $\alpha(C - C_0)$ とし、それに背後建物群を通過する音の寄与の減少割合を乗じた。 C_2 の算出では、同様の考え方において、背後建物群上面の間隙から入射する音の寄与を $(1 - \beta)(C_0 - C_3)$ で表した。これらを C で除すことにより、(6.5)式の C_1/C および C_2/C に関する式が得られる。

一方、道路近接建物列の間隙率 α は、次式で定義される。(図6-1参照)

$$\alpha = \left(\sum_{i=1}^n g_i \right) / l \quad (6.6)$$

ここで、 l は評価区間長[m]を、 g_i ($i = 1 \sim n$) は道路近接建物列の i 番目の建物間隔(gap)を表す。なお、 g_1, g_n は、評価区間の両端(一般的には、市街地外周の交差道路の中心線)から最も近い建物側壁面までの距離を示す。

さらに、背後建物群の建物密度 β は次式で定義される。(図6-1参照)

$$\beta = \frac{A}{w_2 l} \quad (6.7)$$

ここで、 A (m^2) は、背後建物群中に存在する建物の建築面積の和を表す。

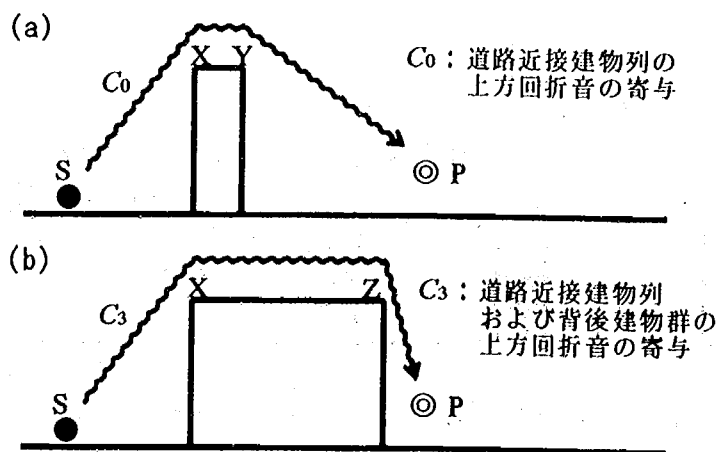


図6-3 建物群を連続した反射性厚み障壁とみなすことによる上方回折音の計算

なお、道路近接建物列直後の評価区間の $SA \cdot IL$ を計算する時は、(6.5)式に $\beta = 0$ を代入した場合の(6.4)式である次式で求める。

$$SA \cdot IL = -10 \log_{10} \{ \alpha (1 - 10^{-IL^{(IS)}_{SXYP}/10}) + 10^{-IL^{(IS)}_{SXYP}/10} \} \quad (6.8)$$

この式は、低層遮音壁による $SA \cdot IL$ の計算式(4.17)式と同一である。

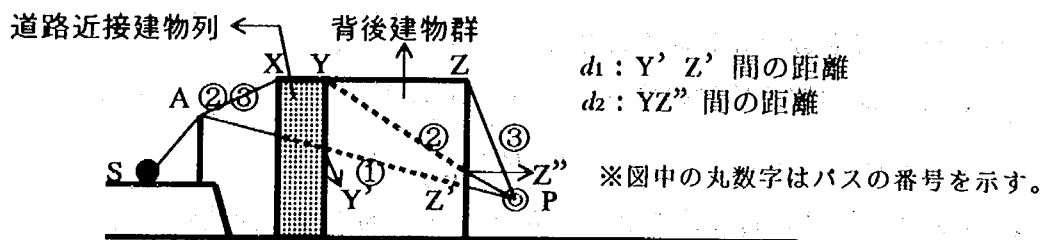
(2) 遮音壁のある道路を対象とする場合

高さが一定の連続した遮音壁が設置された道路を対象とする場合、(6.4)式の $C_1/C \sim C_3/C$ は、(6.5)式の考え方を応用した次式で計算する。(図6-4参照)

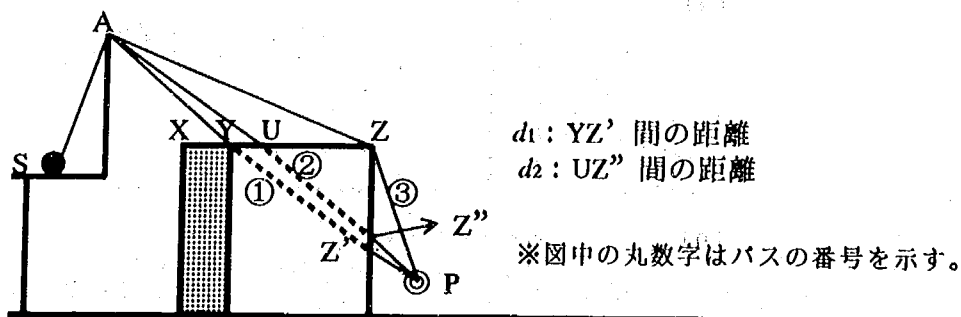
$$\begin{cases} C_1/C = \alpha (10^{-IL^{(IS)}_{SAP}/10} - 10^{-IL^{(IS)}_{SAXYP}/10}) \times 10^{-\Delta L(\beta, d_1)/10} \\ C_2/C = (1 - \beta) (10^{-IL^{(IS)}_{SAXYP}/10} - 10^{-IL^{(IS)}_{SAXZP}/10}) \times 10^{-\Delta L(\beta, d_2)/10} \\ C_3/C = 10^{-IL^{(IS)}_{SAXZP}/10} \end{cases} \quad (6.9)$$

ここで、 $IL^{(IS)}_{SAP}$ は線音源に対する遮音壁による挿入損失を表し、点音源に対する半無限障壁による減音量の計算式((1.7)式)を用いて求める。また、 $IL^{(IS)}_{SAXYP}$ は無限線音源に対する半無限障壁(エッジA)と反射性厚み障壁(Reflective Wide Barrier, エッジX,Y)による二重回折による挿入損失を示す。その算出には、点音源に対する半無限障壁(Single Barrier)および反射性厚み障壁による二重回折の減音量 $\Delta L(D, S-RW)_{SAXYP}$ の計算が基本となるが、これを次式で求めた。

(a) APがYの下を通過する場合



(b) APがYの上を通過する場合



(注)さらにAが高くなり、APがZより上を通る場合は $d_2 = 0$ とする。

一方、PがZより高い場合の扱いは、図6-2(注)を参照されたい。

図6-4 遮音壁のある道路を対象とする場合の音の伝搬パスと d_1, d_2 設定の考え方

$$\Delta L(D,S-RW)_{SAXYP} = \Delta L_{SAP} + \Delta L(RW)_{AXYP} \quad (6.10)$$

この式では、(2.10)式の障壁間隔が大きい二重障壁による減音量の計算方法を応用した。すなわち、半無限障壁による減音量を基本とし、さらにエッジ A 上に仮想音源を想定して反射性厚み障壁による減音量を加えた。

(3)道路近接建物列が背後建物群より高い場合のSA・ILの近似計算方法

(1)、(2)において、道路近接建物列の平均高さが背後建物群より高い場合は、近似的には(6.4)式の C_2/C 、 C_3/C を、各々、 $\alpha C_2/C$ 、 $\alpha C_3/C$ に改めればよい。この場合は、道路近接建物列の上方を伝搬する音の寄与は無視できるほど小さいと仮定している。

6.3 道路近接建物列直後におけるSA・IL計算方法の検証と簡略化の検討

道路近接建物列直後の評価区間は、騒音に係る環境基準でいう「幹線交通を担う道路に近接する空間」と「背後地」の境界付近にあたる(1.1参照)ため、環境基準の達成状況を評価する際に、特に重要な予測地点となる。ここでは、道路近接建物列直後におけるSA・ILの計算式である(6.8)式の妥当性を模型実験により詳細に検証する。さらに、ケーススタディを通じて(6.8)式の簡略化の方法を検討する。

6.3.1 模型実験による検証

(6.8)式を検証するため、無響室において縮尺比 1/20 の模型実験を行った。なお、本章では、模型実験に関する数値は「原寸」と表示しない限り実物換算で示す。

(1)実験の方法

図6-5に道路近接建物列を想定した模型実験の配置を示す。5.3.2と同じ直方体の建物模型(間口 10m、奥行き 8m、高さ 5m)4棟を等間隔で整列させ、その両側に、高さ、奥行きが同じで延長が 40m ~ 80m の建物を設置した。隣接する建物の間隔 g は 0.5m, 2m, 5m, 10m (間隙率 α は、順に、0.048, 0.167, 0.333, 0.5 となる)と変化させた。また、受音点高さは $g = 0.5m$ の時、1.2m, 4m, 8m, 12m の 4通りとし、その他の g では 1.2m とした。音源にはジェットノイズの線音源⁵²⁾(延長 160m、半径=音源高さ 0.2m)を用い、それを床面(地面)上に置いた。地面および建物は反射性とし、各々、厚さ 3mm および 5mm (原寸)の亚克力板で製作した。また、対象周波数は、予備実験の結果、無響室壁面での反射音の影響と計測器のノイズをほぼ排除できる 200Hz ~ 3.15kHz とした。

図6-5のとおり、基本的には、建物Ⅱの後方の評価区間を 1m 間隔に区分して、各々の区間中央に受音点を配置した。ただし、 $g = 2m$ 、受音点高さ 1.2m の時には、後述する図6-6での検討のため、建物Ⅰの後方も含め 24 点の受音点を配置した。

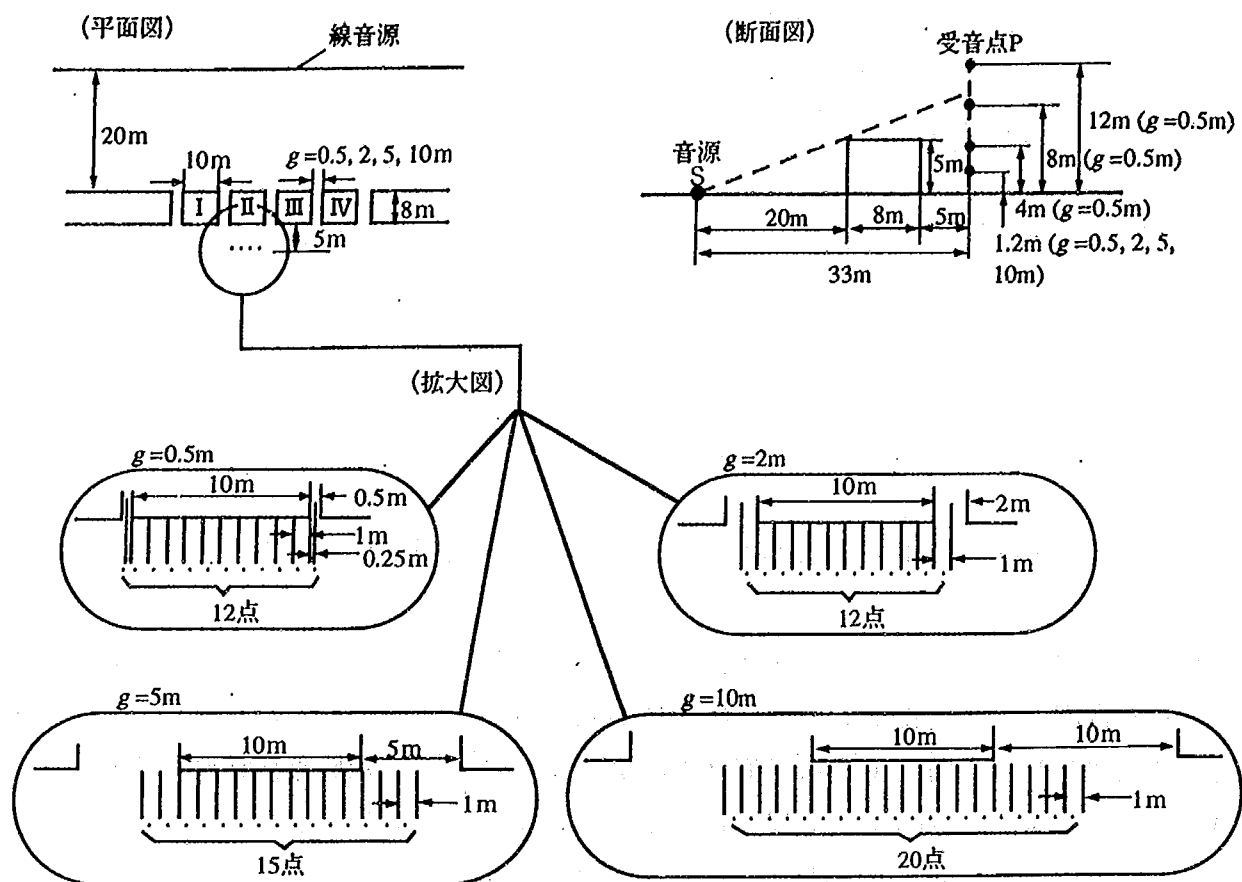


図 6 - 5 4 棟の建物を用いた模型実験の配置

$SA \cdot IL$ の実験値は(3.13)式より算出した。この場合、建物が全くない時と 4 棟およびその両側の建物を設置した時の音圧レベルの差異から、受音点 i での挿入損失 $ILi^{(LS)}$ を 1/3 オクターブバンド毎に求めた。ただし、 $g = 0.5m$ の時は、間隙背後の区間を 0.25m 区間に分割したため、他の 1m 区間の $ILi^{(LS)}$ の測定値は(3.13)式において 4 点分と数えた。

(2) $ILi^{(LS)}$ の実験値および 4 棟の建物を用いた実験の妥当性

本実験では道路近接建物列を構成する建物を等間隔に配置している。これは、(6.8)式と同一の(4.17)式の検討過程において、 $SA \cdot IL$ が建物間隙の位置や数に関わらず間隙率 α に依存して定まることが明らかとなっている (4.5.2 参照) からである。

図 6 - 6 に、受音点高さ 1.2m、 g が 0.5m、2m、5m、10m 時の各受音点での $ILi^{(LS)}$ の実験値を示す。なお、 $ILi^{(LS)}$ は、自動車走行騒音の代表パワースペクトル ((1.6) 式) で重み付けした A 特性オーバーオール値として示している (図 6 - 7、図 6 - 9 の $SA \cdot IL$ も同様)。

g が 2m の場合、建物 I、II の後方で、周期的な $ILi^{(LS)}$ の変化が観測され、各周期の $SA \cdot IL$ もほぼ一致した。したがって、図 6 - 5 で示したように建物 II の後方区間における $SA \cdot IL$ を測定すれば、建物が等間隔で無限に立地した場合とほぼ同等の結果が得られると判断した。

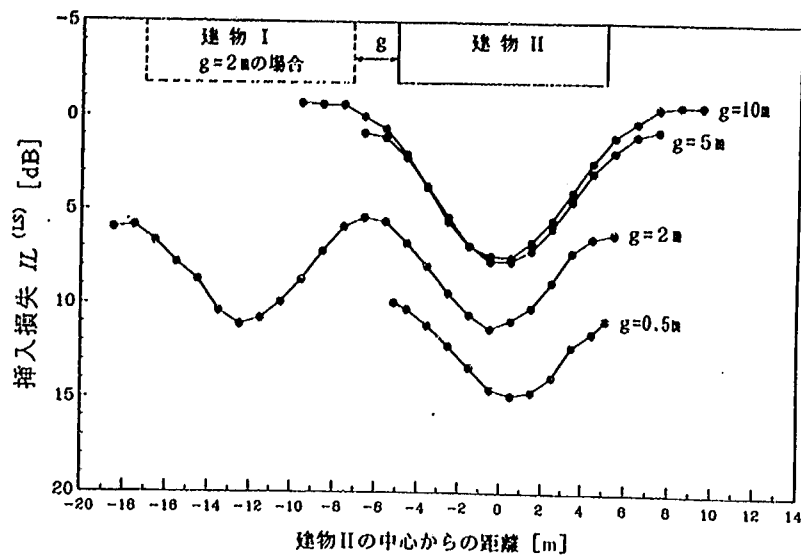


図 6-6 $IL_i^{(1,5)}$ の模型実験値

(3) $SA \cdot IL$ の計算値と模型実験値の比較

図 6-7 に受音点高さが 1.2m の場合に、建物間隔 g を変化させた場合の $SA \cdot IL$ の計算値と実験値を示す。なお、計算は 1/3 オクターブバンド毎にその中心周波数を用いて行った (6.3 の計算は全て同様)。 g が 0.5m, 2m の時は、計算値と実験値は非常によく一致している。しかし、 g が 5m, 10m の時は、計算値が実験値より 1 ~ 2dB 程度大きい値を示している。

さらに、図 6-8 に建物間隔 g と $SA \cdot IL$ の関係を周波数別に示す。 $g = 2, 5, 10$ m では、 $SA \cdot IL$ の計算値、実験値とも、周波数にかかわらず、ほぼ一定である。これは周波数に依存する建物列上方の回折音が無視できるほど小さいためと考えられる。一方、 $g = 0.5$ m の時の $SA \cdot IL$ の実験値は、周波数が低くなるにつれ減少する傾向が見られる。この時、 $SA \cdot IL$ の計算値が周波数の低下とともにやや減少するのは上方回折音の影響だが、実験値では計算値を上回る $SA \cdot IL$ の減少が観測された。

次に、図 6-9 に、 $g = 0.5$ m の場合に、受音点高さを 1.2m, 4m, 8m, 12m とした時の $SA \cdot IL$ の計算値と実験値を示す。すべての受音点高さで、計算値と実験値は非常によく一致している。

g が小さい時には、(6.8)式による計算値は低周波数帯域で実験値とやや乖離する傾向が見られた。しかし、 $SA \cdot IL$ を自動車走行騒音の代表パワースペクトル ((1.6)式) で重み付けした A 特性オーバーオール値として算出する場合は、計算値と実験値の差異は 2dB 以下である。したがって、(6.8)式は、道路交通騒音を対象とした場合は、実用上、十分に利用できると思われる。なお、受音点側の地面反射音を考慮した計算も行ったが、計算結果にほとんど差異は認められなかった。

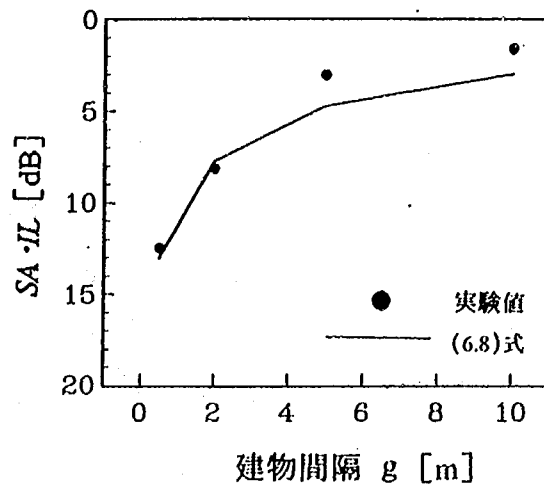


図 6-7 建物間隔 g を変化させた場合の $SA \cdot IL$ の計算値と実験値の比較

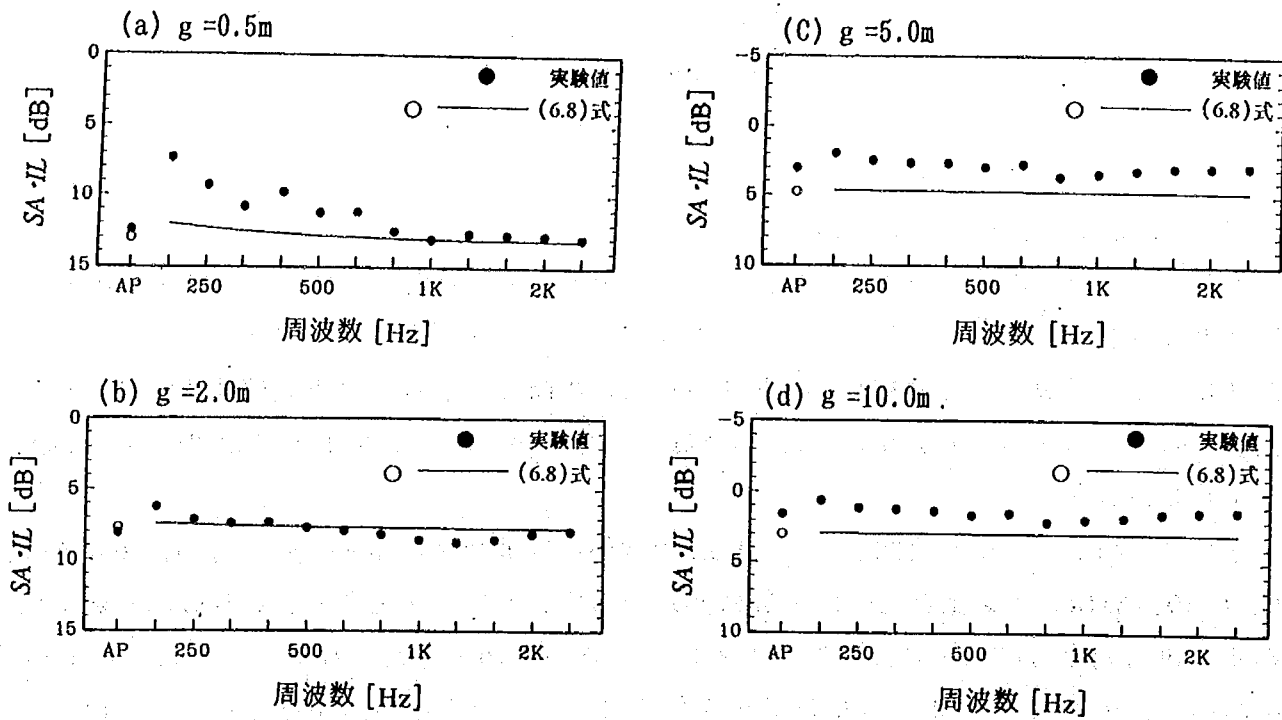


図 6-8 $SA \cdot IL$ の計算値と実験値の比較(周波数別)

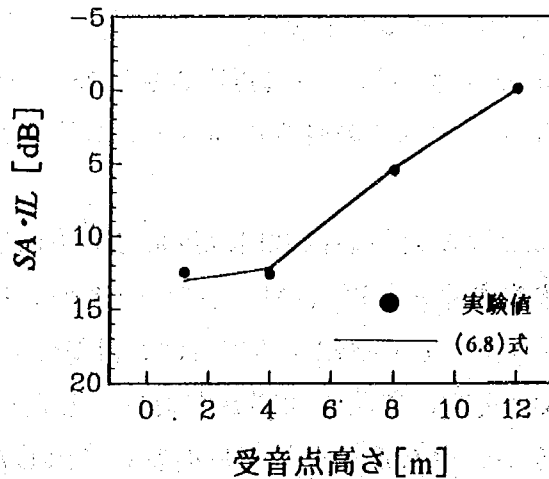


図 6-9 受音点高さを変化させた場合の $SA \cdot IL$ の計算値と実験値の比較

6.3.2 計算方法の簡略化の検討

(6.8)式による $SA \cdot IL$ の計算には、道路近接建物列の平均高さ h (本節では「建物高さ」という)、平均奥行き w_1 (本節では「建物奥行き」という)、間隙率 α という建物パラメータが必要である。ここでは、これらの建物パラメータと $SA \cdot IL$ の関係をケーススタディにより分析し、計算の簡略化の方法および適用範囲を明らかにする。

(1)建物パラメータと $SA \cdot IL$ の関係の分析

対象道路として、都市内における幅員 30m の 4 車線の平面道路を想定した。道路近接建物列の道路側の壁面は道路端に位置するとし、建物奥行き (0m ~ 19m)、建物高さ (5m ~ 20m)、間隙率 α (0.05 ~ 0.5) を変化させた。音源は道路中央で高さ 0m とし、受音点は建物後方 (道路端からの距離は 20m) で高さは 1.2m, 5m, 8m とした。なお、対象周波数は道路交通騒音の主要帯域を含む 50Hz ~ 5kHz とし、 $SA \cdot IL$ の計算値は自動車走行騒音の代表パワースペクトル ((1.6)式) で重み付けした A 特性オーバーオール値として示した。

図 6-10 に、建物高さが 7m (2F 建て相当) または 10m (3F 建て相当) の場合に、受音点高さ別に、間隙率 α と $SA \cdot IL$ の関係を示す。これらの図から、 $SA \cdot IL$ は α にしたがって 3dB ~ 13dB の範囲で大きく変化していることが分かる。また、受音点高さが建物高さより低い時は、 $SA \cdot IL$ は受音点高さにはほとんど関係していない。

図 6-11 に、受音点高さ 8m、間隙率 α が 0.05, 0.2 または 0.5 の場合に、建物高さを 5m から 20m まで変化させた時の $SA \cdot IL$ の変化を示す。 α により変化の状況は異なるが、建物高さが受音点より高い場合は、建物高さは $SA \cdot IL$ の算出にほとんど関係していない。

図 6-12 に、建物高さ 7m、受音点高さ 5m または 8m、間隙率 α が 0.05, 0.2 または 0.5 の場合に、建物奥行きを 0m (道路側の壁面位置にある薄い障壁に相当) から 19m まで変化させた場合の $SA \cdot IL$ の変化を示す。受音点が建物より低い場合だけでなく高い場合にも、建物奥行きは $SA \cdot IL$ にほとんど影響を与えないことが分かる。

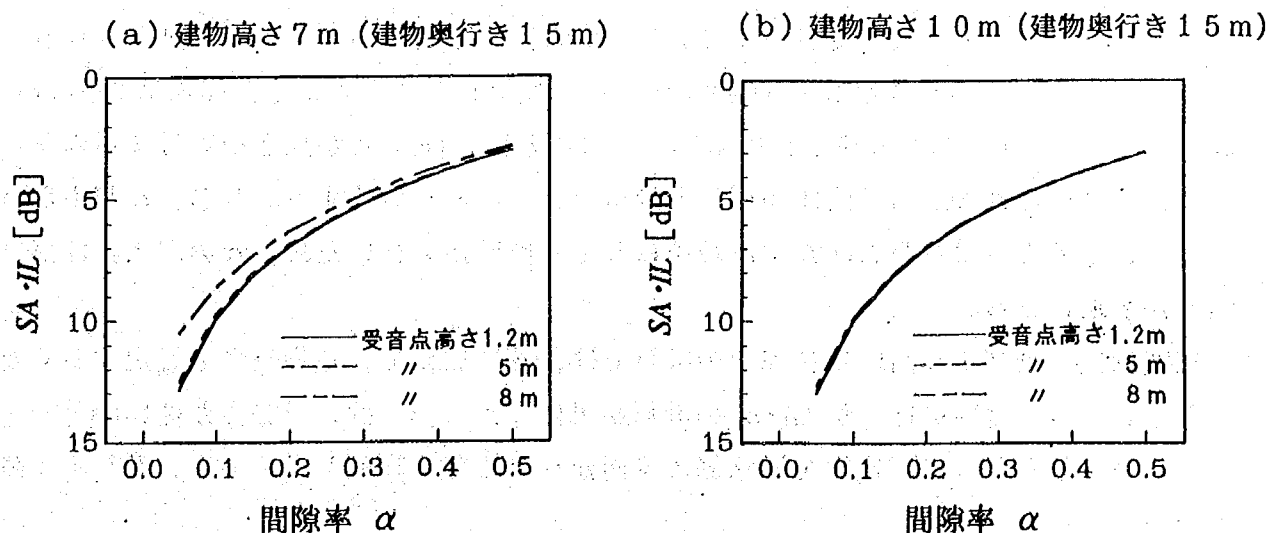


図 6-10 間隙率 α と $SA \cdot IL$ の関係

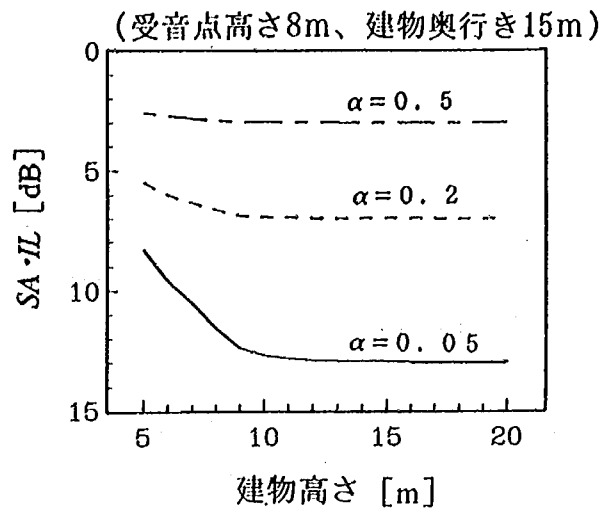


図6-11 建物高さと $SA \cdot IL$ の関係

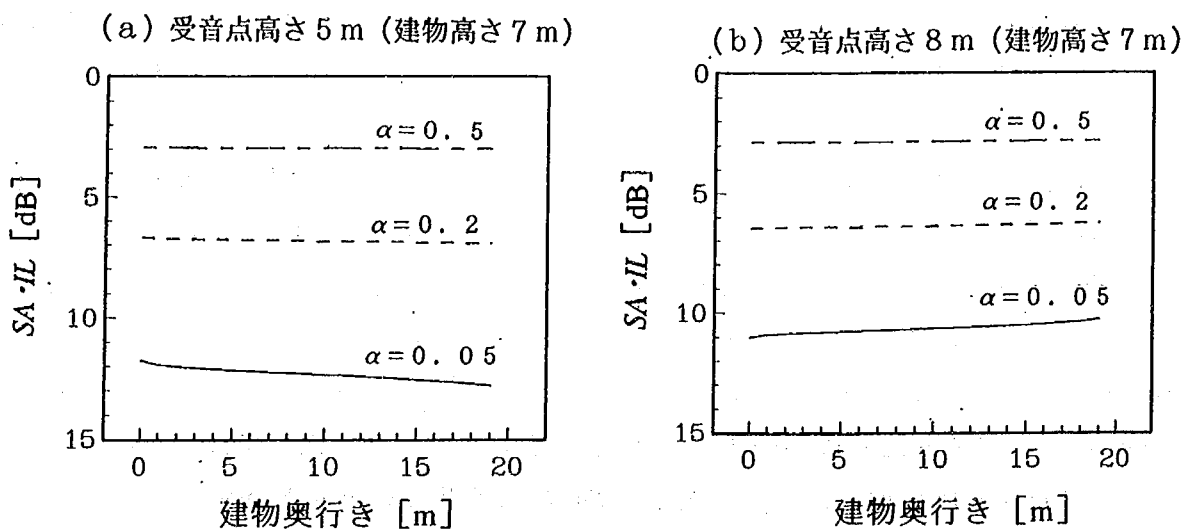


図6-12 建物奥行きと $SA \cdot IL$ の関係

(2) 計算の簡略化の方法と適用範囲

以上の分析結果から、(6.8)式の簡略化の方法と適用範囲は、次のように整理できる。

1) 道路近接建物列より低い受音点では、 $SA \cdot IL$ は、ほぼ間隙率 α によって決定される。

したがって、建物の正確な高さや建物奥行きを調査する必要はなく、(6.8)式において、 $10^{-IL_0^{(LS)}/10} \doteq 0$ として計算すればよい。このことは、(6.8)式が高さや奥行きが異なる建物から構成される道路近接建物列にも適用できることを意味する。なお、 α が小さい場合は、その設定誤差が $SA \cdot IL$ の計算値に与える影響が大きいため、 α の調査には高い精度が要求される。

2) 道路近接建物列より高い受音点での計算では、 α に加えて、建物高さも設定する必要がある。一方、建物奥行きが $SA \cdot IL$ の計算結果に与える影響は、受音点が低い時と同様に小さい。したがって、建物を道路側の壁面からなる薄い障壁と考えても、計算上支障はない。

6. 4 背後建物群を通過する音の超過減衰式の検討

背後建物群における $SA \cdot L_{Aeq}$ を計算するためには、(6.5)式および(6.9)式において、 $\Delta L(\beta, d_i)$ を求める必要がある。

ここでは、背後建物群を通過する音の超過減衰量 $\Delta L(\beta, d_i)$ を表す実験回帰式を作成するため、無響室において縮尺比 1/40 の音響模型実験を行った。なお、本章では、模型実験に関する数値は、「原寸」とことわらない限り実物換算で示す。

6.4.1 模型実験の方法

(1)実験方法

模型実験の配置および実験ケースを図6-13に示す。この図において、「建物列数」とは実際に配置した列数を表し、「受音点位置 i ($i = 1 \sim 4$) 列目背後」とは、 i 列の建物を配置したと仮定した時に、その最後列の建物の受音点側の壁面から 5m 離れた位置を指す。また、各々の受音点位置において、建物が存在しない場合の音圧レベルも測定した。

直方体の建物模型の大きさは、建築面積 80 m^2 (間口 8m, 奥行き 10m) で、高さは建物上方の回折音を無視できると考えられる 18m とした。この模型を、6.3.1と同じ線音源 (延長 320m, 半径=音源高さ 0.4m) に沿って 320m 以上の延長で整列させた。

建物列数、音源から 1 列目の建物 (道路近接建物列) の間隔 g と 2 列目以降の建物群 (背後建物群) の前後左右の間隔 l を実験ケースのように変化させて、等間隔に配置した受音点 P1 ~ P11 (高さ 1.2m) で音圧レベルを測定した。測定は、1/4 インチタイプのマイクロホンを移動させて行った。そして、各マイクでの音圧レベル (L_{Aeq} 相当) から、(3.11)式により建物群設置前後の $SA \cdot L_{Aeq}$ を算出し、その差分を $SA \cdot IL$ とした。なお、対象周波数は、200 ~ 1250Hz とし、1/3 オクターブバンド毎に分析を行った。

本実験では、 l を等間隔として建物を配置した。これは、建物密度が同じであれば建物配置が異なっても $SA \cdot IL$ の差異は小さいことが、加来らの実験結果^{5,2)}において明らかとなっているためである。

建物模型の材料には発泡スチロールを用いたが、音源からの音が直接入射する 1 列目および 2 列目建物の音源側の面には、厚さ 3mm (原寸) のアクリル板を貼付し透過損失を高めた。また、地面 (床面) は、同じアクリル板を用いて反射性とし、全ての建物模型底面と地面との隙間はシールして塞いだ。

(2)発泡スチロールの吸音率

模型材料に用いた発泡スチロールを十分広く敷き詰め、その表面から 1m の高さに 10m の間隔で音源と受音点を配置した。その時の周波数別の超過減衰の実測値と波動理論 (2.2.1参照) による計算値の比較を図6-14に示す。計算上の流れ抵抗 σ が $5,000 \text{ kPa} \cdot \text{s/m}^2$ の時に、計算値と実験値の残差二乗和が最小となり、ピークディップを生ずる周波数も一致

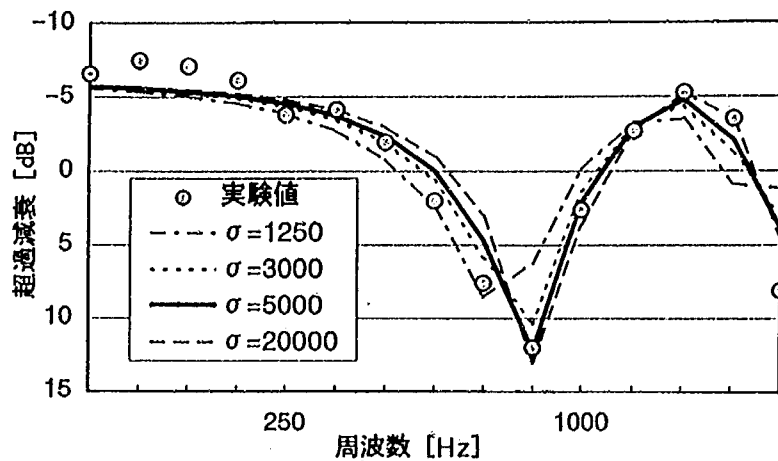


図 6-14 周波数別超過減衰の実験値と計算値の比較

した。そこで、発泡スチロールの実効的流れ抵抗 σ を $5,000 \text{ kPa} \cdot \text{s/m}^2$ とし、その統計入射吸音率を周波数別に推定⁷⁾¹⁾した。そして、自動車交通騒音の A 特性代表パワースペクトル ((1.6)式) で重み付けして求めた 200 ~ 1,250 Hz のオールパスの吸音率は 0.12 であった。

我が国では、建物間隙の伝搬音に対する建物壁面の吸音効果に関する研究はほとんど見当たらない。しかし、ドイツ連邦交通省が定めた沿道騒音防音指針 RLS-90 では、平らな建築物正面での反射による吸音効果を 1dB (吸音率 0.2 程度に相当) に設定している。したがって、本実験に用いた発泡スチロールは、模型材料としてほぼ妥当であると判断した。

6.4.2 α , β , d_i および周波数 f と $SA \cdot IL$ の関係

図 6-15 に、建物列数 3 列、受音点位置 3 列目背後、 $t = 5\text{m}$ ($\beta = 0.41$) の場合に、 g を変化させたときの α と $SA \cdot IL$ の関係を示す。ここで、 $SA \cdot IL$ は自動車走行騒音の代表パワースペクトル ((1.6)式) で重み付けした A 特性オーバーオール値として示している (図 6-16 も同様)。 g を 2m から 1m に狭くすると、建物群全体での建物密度 β は、0.51 から 0.53 に変化する程度であるが、 $SA \cdot IL$ の増加は 3dB をやや上回っている。これは、 α が 1/2 になった影響が大きいと考えられる。したがって、 α は建物パラメータとして重要な役割を果たしていることが分かる。

次に、建物列数を順次増加させ、最後列の建物後方 5m の位置が受音点の時に、パス 1 (図 6-2 参照) の建物群全体 (道路近接建物列および背後建物群) の通過距離 $\overline{d_i}$ と $SA \cdot IL$ の関係を図 6-16 に示す。建物密度による $SA \cdot IL$ の差異は、 $\overline{d_i}$ の増加とともに大きくなる。 $\overline{d_i} = 40\text{m}$ の場合には、 $g = t = 3\text{m}$ ($\alpha = 0.27$, $\beta = 0.56$) の時が、 $g = t = 7\text{m}$ ($\alpha = 0.47$, $\beta = 0.31$) の時より、13dB 程度 $SA \cdot IL$ が大きい。

さらに図 6-17 には、建物列数 3 列、受音点位置 3 列目背後の場合に、周波数 f と $SA \cdot IL$ の関係を示す。建物密度が大きくなるにつれ、 f の増加とともに $SA \cdot IL$ が増加する傾向

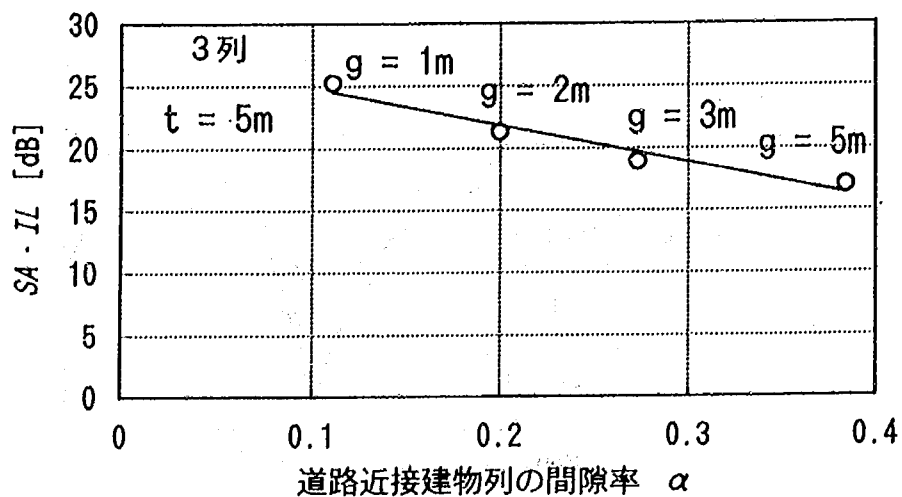


図 6-15 α と $SA \cdot IL$ の関係

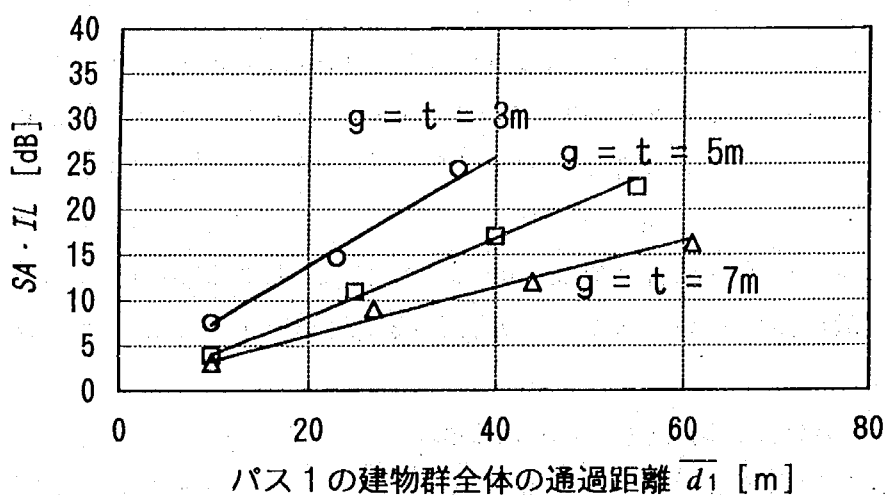


図 6-16 パス1の建物群全体の通過距離 $\overline{d_1}$ と $SA \cdot IL$ の関係

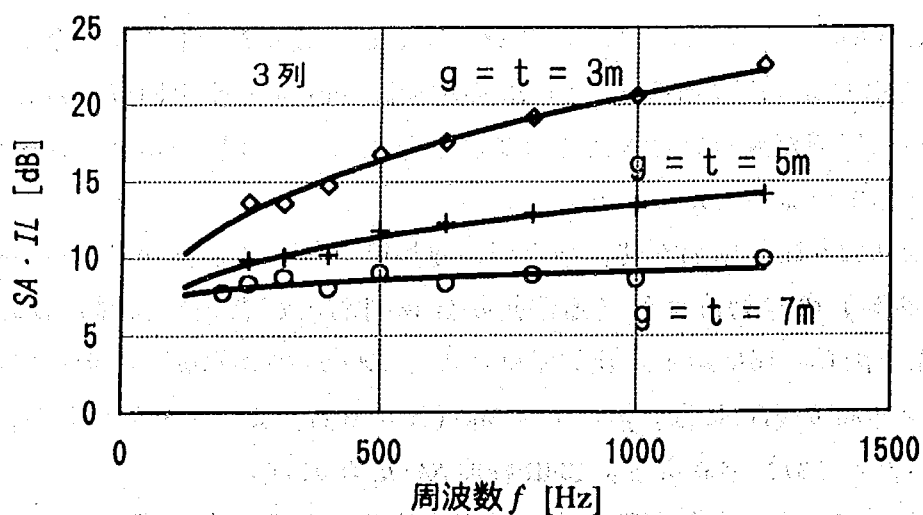


図 6-17 周波数 f と $SA \cdot IL$ の関係

が顕著となる。

6.4.3 背後建物群を通過する音の超過減衰式

6.4.2の検討結果を踏まえて重回帰分析を行い、伝搬音が背後建物群を通過する際の超過減衰量を表す実験回帰式を作成した。なお、分析にあたっては、図6-13の下注に記した模型実験ケースの組み合わせにより、1列目の建物がある状態で、さらに2列目以降の建物を追加した場合の $SA \cdot IL$ を測定した。

まず、 β 、 d_i を説明変数とした場合の式を示す。

$$\Delta L(\beta, d_i) = 0.775 \{ \beta / (1 - \beta) \}^{0.630} \times d_i^{0.859} \quad (6.11)$$

次に、説明変数として、周波数 f も加えた回帰式を示す。

$$\Delta L(\beta, d_i, f) = 0.235 \{ \beta / (1 - \beta) \}^{0.646} \times d_i^{0.833} \times f^{0.201} \quad (6.12)$$

これらの式では、超過減衰量が、 $\beta = 0$ の時に0となり、 $\beta = 1$ の時に無限大となるように配慮した。

なお、(6.11)式は、自動車走行騒音の代表パワースペクトル((1.6)式)で重み付けしたA特性オーバーオール値(200Hz～1250Hz)としての実験値から求めた回帰式である。一方、(6.12)式は、1/3オクターブバンド毎の実験値から求めた回帰式である。ただし、回帰式検討にあたっては、S/N比10dB以上のデータを選定した。

図6-18(a)、(b)に、(6.11)式、(6.12)式による計算値と実験値の関係を示す。両式の決定係数 R^2 は、各々0.935、0.939であり、両式の場合とも重回帰分析の精度は非常に高い。また、(6.12)式において、 β 、 d_i 、 f の偏相関係数は、順に、0.86、0.82、0.58であり、 β 、 d_i と $\Delta L(\beta, d_i, f)$ の相関が特に高い。

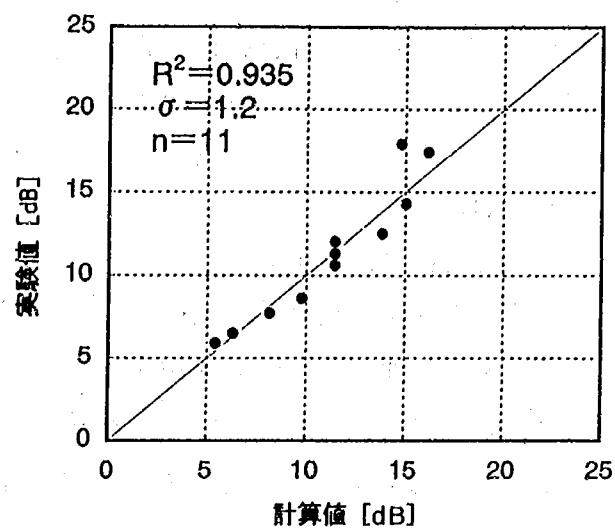


図 6 - 18(a) 背後建物群における超過減衰量の
(6.11)式による計算値と模型実験値の比較

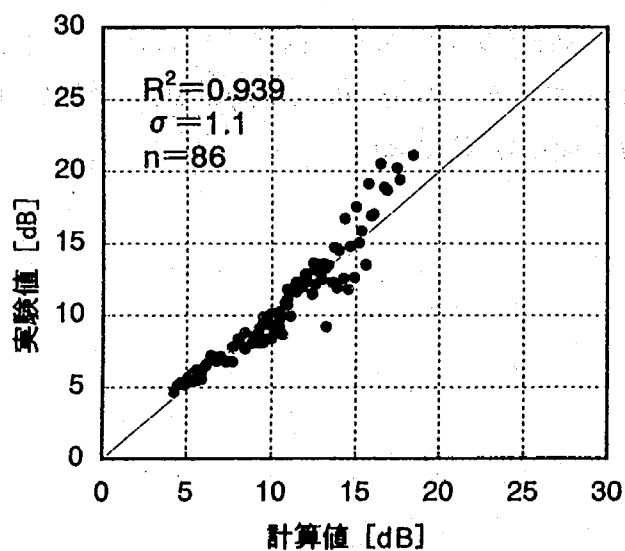


図 6 - 18(b) 背後建物群における超過減衰量の
(6.12)式による計算値と模型実験値の比較

6. 5 背後建物群におけるSA・IL計算方法の模型実験による検証

6.5.1 平面街路を対象とした模型実験値による検証

受音点高さが変化した場合の(6.4)・(6.5)式の妥当性を検証するため、図6-19に示す縮尺比 1/40 の模型実験を無響室で行った。建物高さ(6m, 2階建て相当), 受音点高さ(5通り)以外の実験条件は6.4.1と同様である。

SA・ILの計算は、200Hz～1250Hzの1/3オクターブバンド毎に行った。背後建物群を通過する音の減衰式には(6.12)式を用い、(6.5)式の中の $\Delta L(\beta, d_i)$ を $\Delta L(\beta, d_i, f)$ に読み替えて(6.12)式を代入した。

平面図

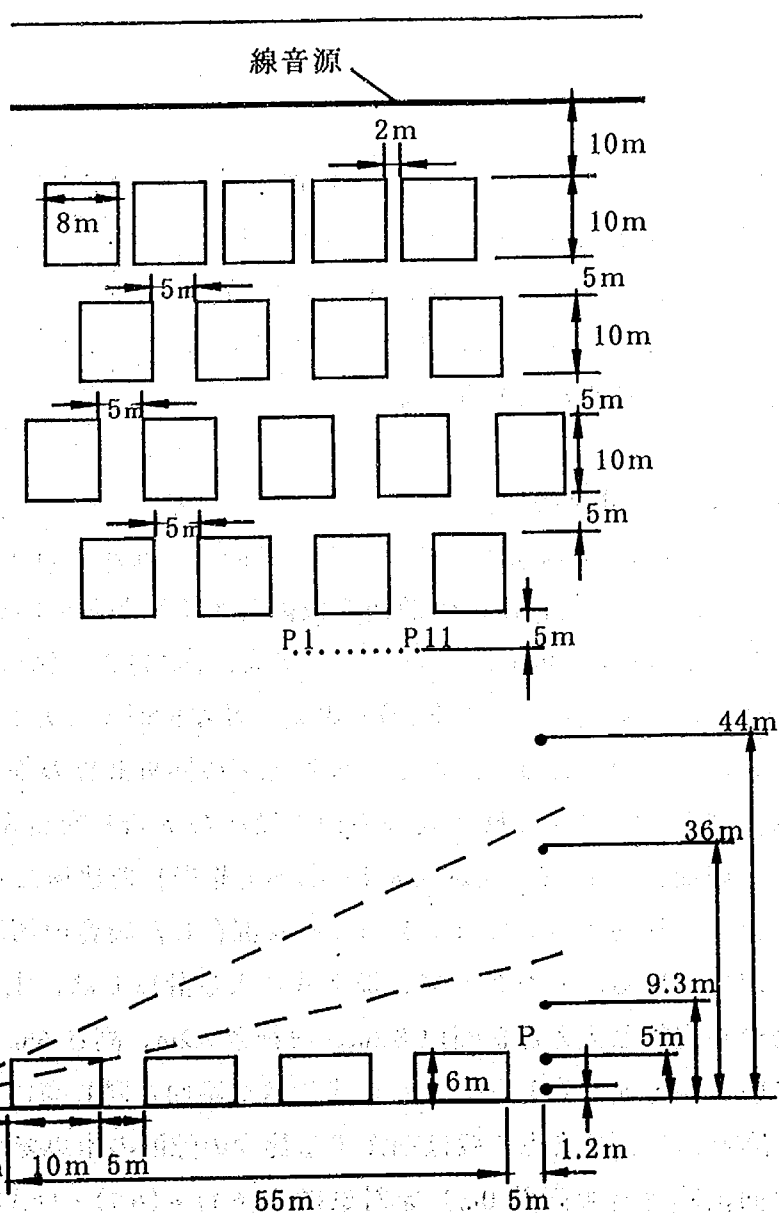


図6-19 模型実験の配置

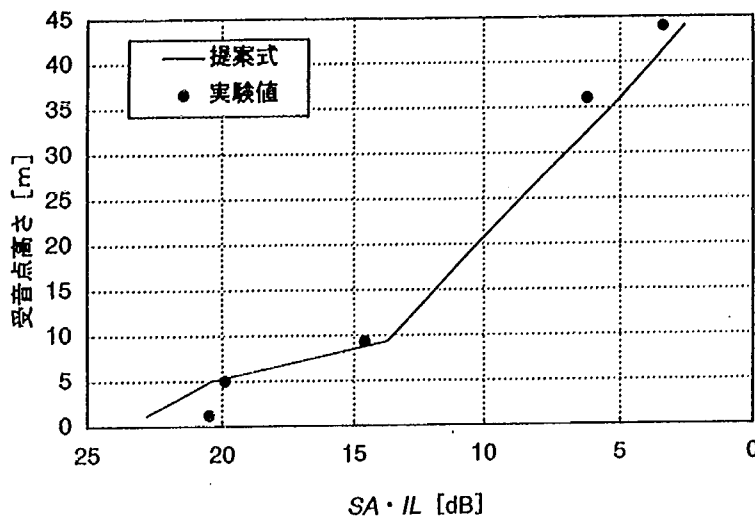


図 6-20 受音点高さと $SA \cdot IL$ の関係

図 6-20 に受音点高さと $SA \cdot IL$ の関係を示す。 $SA \cdot IL$ は、自動車走行騒音の代表パワースペクトル ((1.6) 式) で重み付けした A 特性オーバーオール値として表している。この図によると、 $SA \cdot IL$ の計算値と実験値は、受音点高さ 1.2m の時に最大で約 2dB の差異が認められる程度であり、全体的によく一致している。したがって、(6.4)・(6.5)・(6.12) 式の妥当性がほぼ検証されたと考える。

6.5.2 加来らの実験式との比較

(6.11) 式、(6.12) 式の検討に用いたデータの範囲は、 α が 0.11 ~ 0.47、 β が 0.31 ~ 0.81、道路端 (6.5.2 では、一列目建物の前面の位置とする) からの距離 (水平距離。本章において以下同じ) は 66m 以内であった。ここでは、(6.11) 式、(6.12) 式の適用範囲の検討に加え、遮音壁のある道路に関する (6.9) 式の妥当性を検討するため、加来らの実験式^{5.2)} による計算結果との比較を行う。ただし、提案式での回折計算の基本となる半無限障壁による減音量は、文献 8) における回折効果の補正量 ΔL_d を符号を替えて用いた。

加来らは、底面積 100 m²、高さ 4m (1 階建て相当) の建物と底面積 50 m²、高さ 6.5m (2 階建て相当) 建物が 1:1, 1:2, 1:4 と混在した場合の超過減衰量の平均値を実験式の検討に用いている。したがって、提案式による計算では、上記の混在比率を 1:2 と考え、建物の平均的な大きさを間口 8.2m、奥行き 8.2m、高さ 6m と設定し、それらが均等に分布している状態を想定した。また、音源は道路面と同じ高さで一列目建物の前面から 10m 離れた位置とし、受音点位置は前後する建物の隙間の中央で高さは 1.2m とした。

まず、平面街路 (音源高さ 0m) を対象に、(6.4)・(6.5)・(6.11) 式の提案式による計算値と加来らの実験式を比較して図 6-21 に示す。

道路端からの距離が 50m 程度までは、 N (200m × 200m 中の建物の戸数) = 50 (建物群

全体での建物密度 $\bar{\beta} = 0.084$), $N = 100$ ($\bar{\beta} = 0.168$), $N = 200$ ($\bar{\beta} = 0.336$) の時のいずれも, 両式の差異は 1dB 程度以下と小さい。したがって, 提案式は, この範囲内であれば, $\bar{\beta} = 0.1$ 程度の小さい建物密度でも十分適用できると考えられる。

一方, 道路端からの距離が 100m になると, 提案式は加来らの式より 3 ~ 5dB 大きい $SA \cdot IL$ を与えている。この一因として, 上方回折音の寄与 C_3 を求める際の回折点 X, Z の設定方法 (図 6-3 (b) 参照) の問題があると考ええる。すなわち, 建物密度が小さい場合には, この方法では上方回折音の寄与 C_3 を過小評価する可能性がある。そこで, 提案式での計算上, Z の位置を, 受音点から 2 列目の建物後壁の上部エッジに変更したところ, 道路端からの距離 100m の場合でも, すべての N において加来らの式との差異は 2dB 以下となった。建物密度が小さく道路端と受音点の距離が大きい場合は, 上方回折点の位置が計算結果に与える影響は大きいと考えられる。したがって, 提案式の精度向上のためには, 建物密度を考慮した上方回折点の合理的な設定方法を検討する必要がある。

さらに, 提案式と加来らの式による計算値の差異の原因として, 両式に用いた建物模型材料の表面の吸音率の差異が考えられる。

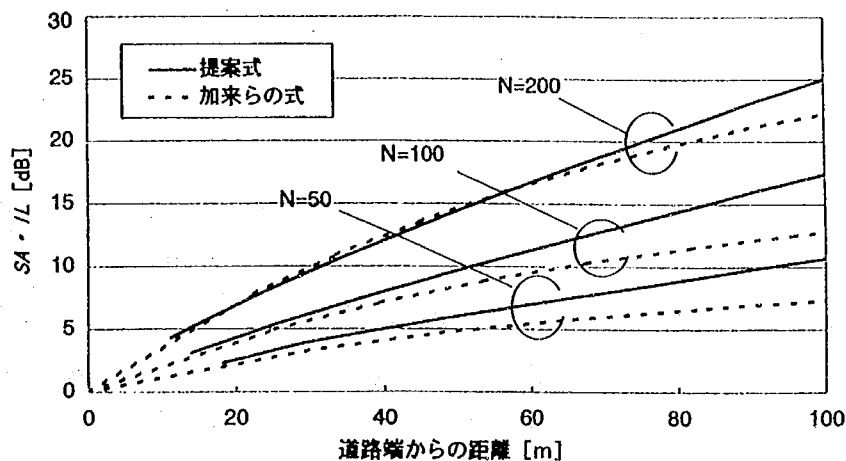


図 6-21 提案式 ((6.4)・(6.5)・(6.11)式) と加来らの式との比較

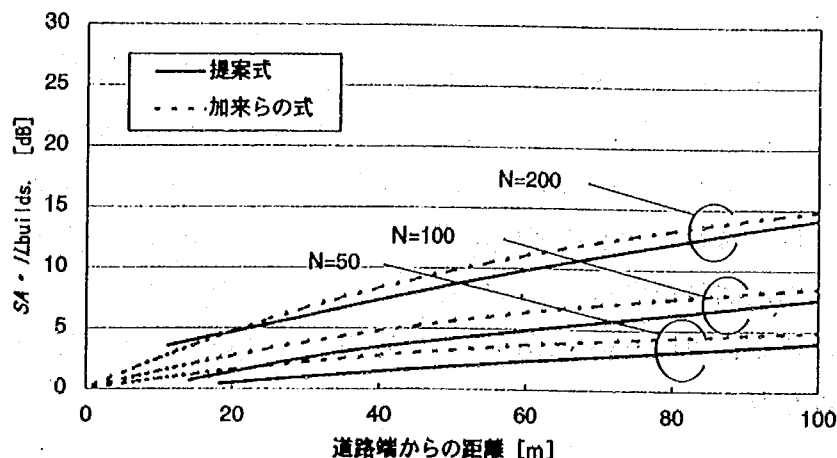


図 6-22 提案式 ((6.4)・(6.9)・(6.11)式) と加来らの式との比較

次に、道路面の高さ 10m, 高欄高さ 1m の高架道路を対象に, (6.4)・(6.9)・(6.11)式の提案式と加来らの式の計算結果の比較を行った結果を図 6-22 に示した。ここで, $SA \cdot IL_{builds}$ とは, 高架道路が既に存在する場合に, 建物群の有無による区間平均挿入損失を表す。この場合は, すべての N において, 道路端からの距離 100m まで, 提案式は加来らの式とよく一致している。これは, 今回の計算例では, 道路端からの距離 100m でも C_2 の寄与が C_3 より卓越するため, 上述した上方回折点の設定上の誤差が $SA \cdot IL_{builds}$ の計算結果に及ぼす影響が小さいためである。したがって, このような場合には, 提案式は, 建物密度が小さく道路端から受音点までの距離が大きい時まで適用できると考える。

6. 6 現地調査による $SA \cdot LA_{eq}$ 計算方法の検証

本章での提案式の検証を行うため, 東京の都市部および郊外部の平面街路に面した市街地を対象に現地調査を行い, (6.1)式~(6.5)式・(6.11)式による計算値との比較を行った。

6.6.1 対象とした道路および市街地の概要

現地調査を行った 3 地区の概要を表 6-1 に示す。また, A 地区を例として, 建物の立地状況および LA_{eq} の測定点配置を図 6-23 に示す。

測定点は, 対象道路とほぼ平行な区画道路 (背後建物群中) および対象道路端に設け, 高さは 1.2m とした。測定は全て深夜に行い, 積分型騒音計を用いて 10 分間の LA_{eq} を同時測定するとともに, 対象道路の交通条件も同時に観測した。なお, $SA \cdot LA_{eq}$ は, 同じ区画道路上に 10m 程度の等間隔で配置した測定点での LA_{eq} を用いて, (3.11)式より算出した。

また, 試算の結果, 今回対象とする受音点位置では (6.4)式における C_1 が C_2, C_3 より卓越することが明らかとなったため, C_1/C のみを計算上考慮した。 C_1/C の計算においても, 6.3.2での結果から, 図 6-3 (a)の C_0 は無視できるほど小さいと考えた。この場合, (6.4)式・(6.5)式・(6.11)式は次式のように簡略化して示される。

$$SA \cdot IL = -10 \log_{10} \alpha + 0.775 \{ \beta / (1 - \beta) \}^{0.630} \times d_1^{0.859} \quad (6.13)$$

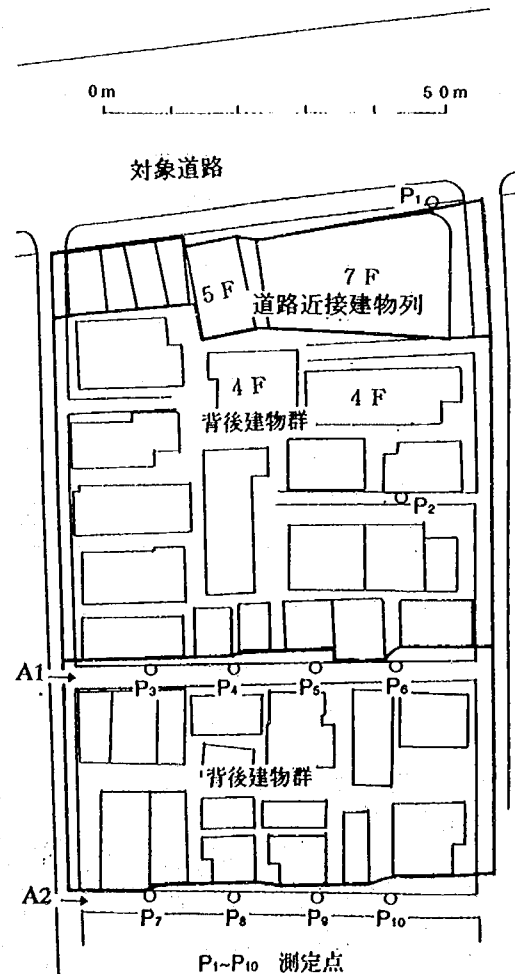
(6.13)式の計算において, 特に高い精度が要求される α (6.3.2参照) は現地調査により把握したが, β, d_1 ($\equiv w_2$) は図 6-23 に示す住宅地図より読みとった。

なお, B 地区では, 背後建物群中で区画道路が入り組み, 道路端からの距離により測定点を配置できる評価区間長が異なったため, α, β とも 2 種類を与えた。さらに, C 地区においては, 背後建物群中において道路からの距離により建物密度が明らかに変化したため, β のみ 2 種類を与えた。

表 6 - 1 対象とした道路および市街地の概要

交通・沿道条件		A 地区		B 地区		C 地区	
交通量[台/時]		1674		738		492	
大型車混入率[%]		1		1		5	
平均速度[km/時]		31.5		41.5		53.7	
道路幅員[m]		23		16		23	
SA・L _{Aeq} 実測区間		A1	A2	B1	B2	C1	C2
市街地の 建物パラ メータ	α	0.20	0.20	0.24	0.36	0.15	0.15
	β	0.52	0.52	0.52	0.46	0.38	0.27
	w_2 [m]	48.7	82.7	11.4	46.7	15.7	45.4
参 考	車線数	4		2		4	
	用途地域	商業地域		近隣商業 地域		住居地域	
	背後 建物群	2 種住居 専用地域		2 種低層住 居専用地域		住居地域	

※「SA・L_{Aeq} 実測区間」は図 6 - 23、図 6 - 24 中の記号に対応する。
計算上、線音源は道路中央に設定した。



※階数が記されていない建物は 3 階建て以下である。

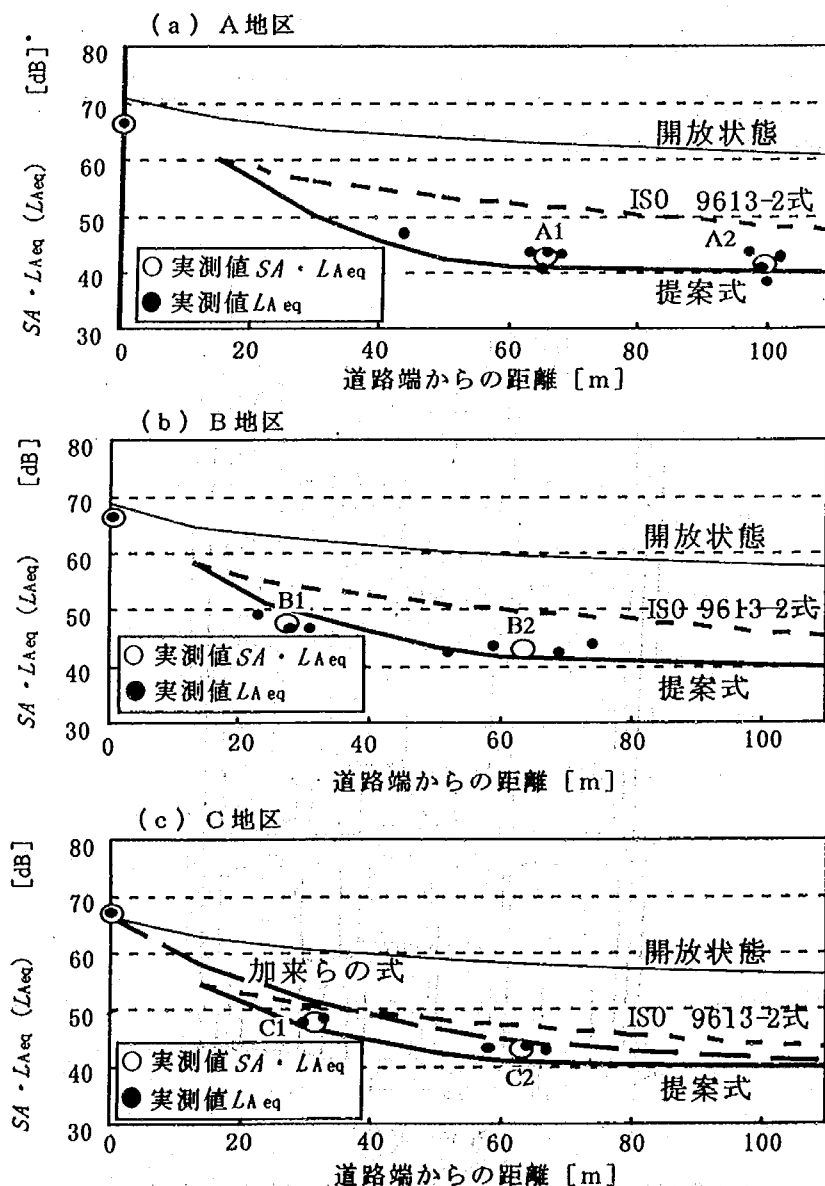
図 6 - 23 市街地のモデル化と測定点 (A 地区)

6.6.2 計算値と実測値の比較

図6-24に、提案式、ISO 9613-2⁴⁾の方法による $SA \cdot LA_{eq}$ の計算値、開放状態における LA_{eq} の計算値、および LA_{eq} 、 $SA \cdot LA_{eq}$ の実測値を示す。また、建物密度が加来らの方法⁵⁾の適用範囲と考えられるC地区においては、その計算結果も併せて示した。

なお、(6.3)式において、走行車両のA特性パワーレベル L_{WA} は、(1.5)式の一般道路の非定常走行区間におけるパワーレベル式を用いて算出した。

図6-24によると、全ての地区において道路端からの距離が60～100mまでの範囲で、提案式による $SA \cdot LA_{eq}$ の計算値は実測値とおおむね整合しており、その差は最大でも3dB未満である。なお、環境基準の達成状況の評価では、基準値が異なる「幹線交通を担う道路に近接する空間」と「背後地」²⁾の境界（道路端から15m～20m）付近での計算精度が特に要求される。B地区、C地区の結果からみると、これらの位置での計算値と実測値



※図中の記号は表6-1の「 $SA \cdot LA_{eq}$ 実測区間」に対応する。

図6-24 各種計算式と現地実測値との比較

の差異は 2dB 未満と非常に小さい。

一方、ISO 9613-2 の方法で計算された建物群による減衰量は、実測値より過小であることが分かる。また、C 地区において、加来らの方法はおおむね実測値と整合している。

なお、今回は夜間の測定のため、(6.1)式において $SA \cdot L_{Aeq}(BN) = 40\text{dB}$ とした。今後、より詳細に提案式を検証するためには、 $SA \cdot L_{Aeq}(BN)$ および β を現地調査に基づき設定することが必要と考える。

6. 7 まとめ

平面街路及び遮音壁が設置された道路に面した市街地における区間平均等価騒音レベル ($SA \cdot L_{Aeq}$) の計算方法の検討を行い、以下の成果を得た。

- 1) 市街地を道路近接建物列 (間隙率 α) と背後建物群 (建物密度 β) に大別してモデル化した。また、市街地における $SA \cdot L_{Aeq}$ の算出にあたり、建物群に入射し、その間隙を伝搬して受音点に至る音の寄与と建物群の上方を伝搬する音の寄与を合成する方法を提案した。上方回折音の計算には、2. 3 で提案した反射性厚み障壁による減音量の計算方法を用い、背後建物群の間隙を伝搬する音の超過減衰量を表す回帰式は模型実験を通じて作成した。
- 2) 平面街路に面した道路近接建物列の直後での $SA \cdot L_{Aeq}$ の計算結果の妥当性を模型実験を通じて詳細に検証した。また、建物高さ、建物奥行き、建物列の間隙率という建物パラメータと計算値の関係を分析することにより、受音点位置に応じた計算の簡略化の方法を検討した。その結果、受音点の高さが、建物より低い場合は、建物列の間隙率のみを用いて予測計算すれば概ねよいことが明らかとなった。
- 3) 平面街路および遮音壁が設置された道路を対象に、背後建物群における $SA \cdot L_{Aeq}$ の計算方法の妥当性および適用範囲を、模型実験値、従来の実験式および現地実測値との比較により検証した。その結果、道路端からの距離がおおむね 50m 以内の範囲であれば、建物の立地密度、道路の高さ、遮音壁の有無にかかわらず、提案式が適用できることが明らかとなった。一方、平面街路において、道路端から受音点までの距離が 50m を超え β が 0.3 より小さい場合は、 $SA \cdot L_{Aeq}$ の計算値がやや過小となるおそれがある。

最後に、今後の主な課題として以下のものが挙げられる。

- 1) 道路近接建物列直後の特定地点における L_{Aeq} の計算方法
- 2) 背後建物群を伝搬する音の超過減衰式の現地データによる検証と精度の向上
- 3) 建物密度を考慮した上方回折点の合理的な設定方法
- 4) α , β 等の市街地の建物パラメータの実用的な調査・設定方法

第7章 総 括

7. 1 研究成果のまとめ

7.1.1 概要

本論文では、沿道に立地する建物および騒音対策に用いる各種の遮音壁の双方を、音の伝搬に影響を与える音響的障害物である「障壁」として捉え、それらの障壁による減音効果の予測・評価方法の検討を行った。

第1章では、研究の背景を述べるとともに、論文で取り上げる障壁および減音効果の定義を示した。さらに、各種障壁による減音効果の予測・評価方法に関する従来の研究とその課題を示し、本研究のねらいを明らかにした。

第2章では、まず縮尺模型実験により、二重障壁、厚み部分が反射性及び吸音性の厚みのある障壁による減音量の差異を明らかにし、その原因を考察した。次に、その結果を活用し、反射性の厚みのある障壁による減音量計算方法および障壁の高さが等しい二重障壁による減音量の計算方法を提案した。さらに、これらの提案式を組み合わせることにより、吸音性の厚みのある障壁による減音量を計算する実験回帰式を提案した。最後に、障壁間隔が大きい三重障壁による減音量の計算方法を提案した。なお、以上の計算式の検討にあたっては、音源、受音点位置や障壁の幅が変化する場合において計算値の連続性を保ち、相反の定理を満足できるように配慮した。また、計算方法の妥当性は、主に模型実験により検証した。

第3章では、地面上に複数の有限長障壁が一行に設置された場合における特定地点での挿入損失の予測計算方法を検討した。計算方法として、3パスの方法、1パスの方法および線音源に対する見通し角補正による方法を提案し、これらの計算値を模型実験値と比較することにより、計算方法の妥当性を明らかにした。また、集合した有限長障壁背後における騒音レベルの評価指標として区間平均等価騒音レベル $SA \cdot L_{Aeq}$ を、障壁による減音効果の指標として区間平均挿入損失 $SA \cdot IL$ を定義した。

第4章では、一般道路に設置される低層遮音壁による減音効果の予測・評価方法を検討した。低層遮音壁は高さが1m程度で、沿道へのアクセス確保のため多くの開口部を有し、都市景観への配慮から種々の形状、材質をとりうる。ここでは、これらを考慮した減音効果の予測・評価方法を提案し、計算結果を模型実験により検証した。さらに、提案した予測・評価方法を用いたケーススタディを行い、低層遮音壁の種々の設計パラメータと減音効果の関係を分析した。

第5章では、道路に面した単独建物後方の特定地点における騒音レベルを、建物による

遮蔽効果だけではなく、建物側壁面における反射音の影響も考慮して求める計算方法を提案した。また種々の計算方法を比較することにより、受音点位置に応じた計算の簡略化の方法を明らかにした。さらに建物群背後の特定地点での L_{Aeq} 計算に対するこれらの方法の適用可能性について考察した。

第6章では、平面街路及び遮音壁が設置された道路に面した市街地における区間平均等価騒音レベル $SA \cdot L_{Aeq}$ の計算方法を提案した。この方法では、市街地を道路に近接する建物列（間隙率 α ）と背後建物群（建物密度 β ）に大別してモデル化し、計算においては、建物群に入射し、その間隙を伝搬して受音点に至る音の寄与と建物群の上方を伝搬する音の寄与を合成している。なお、背後建物群の間隙を伝搬する音の超過減衰量を表す回帰式は模型実験を通じて作成した。また、提案式の妥当性および適用範囲は、模型実験値、従来の実験式および現地実測値との比較により明らかにした。

以上の成果は、各種の形態を有する遮音壁が複数設置された場合における道路交通騒音の予測・評価を可能とし、ひいては、これらの遮音壁の合理的な設計に資すると考える。さらに、本論文において、沿道建物および建物群背後における道路交通騒音の予測・評価のための実用的な方法も提案できたと考える。今後、これらの成果は、環境アセスメントにおける道路交通騒音の予測・評価方法、あるいは、沿道地域における環境基準の達成状況の面的評価等に必要な広域的な騒音予測方法として、広く利用されることが期待される。

以下、本論文で示した評価指標と予測計算式をとりまとめて示す。なお、記号の意味に関しては、第2章～第6章を参照されたい。

7.1.2 本論文で提案した評価指標

(A)区間平均等価騒音レベル (Section-averaged equivalent continuous A-weighted sound pressure level, $SA \cdot L_{Aeq}$)

$$\begin{aligned} SA \cdot L_{Aeq} &= 10 \log_{10} \left(\frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} 10^{L_{Aeq}(x)/10} dx \right) \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{1}{x_2 - x_1} \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{x_1}^{x_2} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t, x)}{p_0^2} dt \cdot dx \right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$SA \cdot L_{Aeq} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_{Aeq(i)}/10} \right) \quad (3.11)$$

(B)区間平均挿入損失 (Section-averaged Insertion Loss, $SA \cdot IL$)

$$SA \cdot IL = SA \cdot L_{Aeq}(before) - SA \cdot L_{Aeq}(after) \quad (3.12)$$

$$SA \cdot IL = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{-IL_i^{(LS)}} \right) \quad (3.13)$$

7.1.3 本論文で提案した予測計算式

(C)反射性厚み障壁による減音量

①音源 S, 受音点 P とも Zone I にある場合

$\Delta L_{SXP} \leq \Delta L_{SYP}$ の時

すなわち $\delta_{SXY} < 0 \wedge \delta_{XYP} < 0 \wedge \delta_{SXP} \leq \delta_{SYP}$ の時

$$\Delta L(RW)_{SXYP} = -10 \log_{10} \{ 10^{-\Delta L_{SYP}/10} + (r/r')^2 (10^{-\Delta L_{S'YP}/10} - 10^{-\Delta L_{S'XP}/10}) \}$$

$\Delta L_{SXP} > \Delta L_{SYP}$ の時

すなわち $\delta_{SXY} < 0 \wedge \delta_{XYP} < 0 \wedge \delta_{SXP} > \delta_{SYP}$ の時

$$\Delta L(RW)_{SXYP} = -10 \log_{10} \{ 10^{-\Delta L_{SXP}/10} + (r/r')^2 (10^{-\Delta L_{S'XP}/10} - 10^{-\Delta L_{S'YP}/10}) \}$$

② S が Zone I, P が Zone II にある場合

すなわち $\delta_{SXY} < 0 \wedge \delta_{XYP} \geq 0$ の時

$$\Delta L(RW)_{SXYP} = -10 \log_{10} \{ 10^{-\Delta L_{SYP}/10} + (r/r')^2 (10^{-\Delta L_{S'YP}/10} - 10^{-\Delta L(RW)_{S'XYP}/10}) \}$$

(2.1)

③ S が Zone II, P が Zone I にある場合

すなわち $\delta_{SXY} \geq 0 \wedge \delta_{XYP} < 0$ の時

$$\Delta L(RW)_{SXYP} = -10 \log_{10} \{ 10^{-\Delta L_{SXP}/10} + (r/r')^2 (10^{-\Delta L_{S'XP}/10} - 10^{-\Delta L(RW)_{S'XYP}/10}) \}$$

④ S, P とも Zone II にある場合

$\Delta L_{SXP} \leq \Delta L_{SYP}$ の時

すなわち $\delta_{SXY} \geq 0 \wedge \delta_{XYP} \geq 0 \wedge \delta_{SXP} \leq \delta_{SYP}$ の時

$$\Delta L(RW)_{SXYP} = \Delta L_{SYP} + \Delta L_{SXY} - 5$$

$\Delta L_{SXP} > \Delta L_{SYP}$ の時

すなわち $\delta_{SXY} \geq 0 \wedge \delta_{XYP} \geq 0 \wedge \delta_{SXP} > \delta_{SYP}$ の時

$$\Delta L(RW)_{SXYP} = \Delta L_{SXP} + \Delta L_{XYP} - 5$$

(D)障壁高さが等しい二重障壁による減音量

①二重障壁の間隔 w が十分広い時 ($\alpha = 5$),

$$\Delta L(D)_{SXYP} = \begin{cases} \text{Zone I} \\ \Delta L_{SXP} + \Delta L_{XYP} \\ \text{Zone II} \\ \Delta L_{SXP} + \Delta L_{SYP} - \Delta L_{STP} + 5 \end{cases} \quad (2.3)$$

②二重障壁の間隔 w が狭い時 ($\alpha < 5$),

$$\Delta L(D)_{SXYP} = \begin{cases} \text{Zone I} \\ \Delta L_{XYP} + \alpha - 5 < 0 \text{ の時} \\ \Delta L_{SXP} \\ \Delta L_{XYP} + \alpha - 5 \geq 0 \text{ の時} \\ \Delta L_{SXP} + \Delta L_{XYP} + \alpha - 5 \\ \text{Zone II} \\ \Delta L_{SXP} + \Delta L_{SYP} - \Delta L_{STP} + \alpha \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\text{ただし, } \alpha = \begin{cases} 0 \leq f \cdot w / 170 < S \text{ の時} \\ A \log_{10}(f \cdot w / 170 + 1) \\ f \cdot w / 170 \geq S \text{ の時} \\ 5 \end{cases} \quad (2.5)$$

今回の実験データでは, (2.5)式において $A=4.03$, $S=16.4$ 。

(E)吸音性厚み障壁による減音量

$$\Delta L(AW)_{SXY} = \Delta L(RW)_{SXY} + B \cdot (w/\lambda) \times \{ \Delta L(D)_{SXY} - \Delta L(RW)_{SXY} \} \quad (2.8)$$

今回の実験データでは, (2.8)式において $B=0.142$ 。

(F)障壁間隔が大きい二重障壁による減音量

$$\Delta L(D)_{SXY} = \begin{cases} \text{① } \delta_{SXP} \geq \delta_{SYP} \text{ の時} \\ \Delta L_{SXP} + \Delta L_{XYP} \\ \text{② } \delta_{SXP} < \delta_{SYP} \text{ の時} \\ \Delta L_{SYP} + \Delta L_{SXY} \end{cases} \quad (2.10)$$

(G)障壁間隔が大きい三重障壁による減音量 (その1)

$$\Delta L(T)_{SXYZP} = \begin{cases} \text{① Zone 1\&2} \\ \Delta L_{SXP} + \Delta L_{XYP} \\ \text{② Zone 3} \\ \Delta L(D)_{SXY} + \Delta L_{YZP} \\ = \Delta L_{SXP} + \Delta L_{SYP} - \Delta L_{STP} + 5 + \Delta L_{YZP} \\ \text{③ Zone 4} \\ \Delta L(D)_{SXP} + \Delta L_{SZP} - \Delta L_{SUP} + 5 \\ = \Delta L_{SXP} + \Delta L_{SYP} + \Delta L_{SZP} - \Delta L_{STP} - \Delta L_{SUP} + 10 \end{cases} \quad (2.9)$$

(H)障壁間隔が大きい三重障壁による減音量 (その2)

$$\Delta L(T)_{SXYZP} = \begin{cases} \text{(a) } \delta_{SYP} = \delta_{\max} \text{ の場合} \\ \Delta L_{SYP} + (\Delta L_{SXP} + \Delta L_{YZP}) \\ \text{(b) } \delta_{SXP} = \delta_{\max} \text{ の場合} \\ \text{① } \delta_{XYP} \geq \delta_{XZP} \text{ の時} \\ \Delta L_{SXP} + (\Delta L_{XYP} + \Delta L_{YZP}) \\ \text{② } \delta_{XYP} < \delta_{XZP} \text{ の時} \\ \Delta L_{SXP} + (\Delta L_{XZP} + \Delta L_{XYZ}) \\ \text{(c) } \delta_{SZP} = \delta_{\max} \text{ の場合} \\ \text{① } \delta_{SXZ} \geq \delta_{SYZ} \text{ の時} \\ \Delta L_{SZP} + (\Delta L_{SXZ} + \Delta L_{XYZ}) \\ \text{② } \delta_{SXZ} < \delta_{SYZ} \text{ の時} \\ \Delta L_{SZP} + (\Delta L_{SYZ} + \Delta L_{SXY}) \end{cases} \quad (2.11)$$

(I)地面上の複数の有限長障壁による挿入損失 (3パスの方法)

$$IL^{(PS)}(FLs) = -10 \log_{10} \left\{ \sum_{i=1}^n 10^{-\Delta L_i / 10} - (n-1) \times 10^{-\Delta L_0 / 10} \right\} - \Delta L_0 \quad (3.5)$$

(J)無限線音源に対する種々の低層遮音壁による挿入損失

$$IL^{(LS)} = -10 \log_{10} \left\{ 1 - \frac{\theta}{\pi} \left(1 - 10^{-IL_0 / 10} \right) \left(1 - 10^{-IL / 10} \right) \right\} \quad (4.7)$$

(K)無限線音源に対する種々の低層遮音壁による区間平均挿入損失

$$\begin{cases} SA \cdot IL = -10 \log_{10} \left\{ 10^{-[SA \cdot IL_0] / 10} + (1 - 10^{-[SA \cdot IL_0] / 10}) \alpha \right\} \\ \text{ここで,} \\ SA \cdot IL_0 = -10 \log_{10} \left\{ 1 - \frac{1}{\pi} \left[2 \tan^{-1} \left(\frac{l}{d} \right) - \frac{d}{l} \ln \left(1 + \frac{l^2}{d^2} \right) \right] \right\} \left(1 - 10^{-IL_0 / 10} \right) \left(1 - 10^{-IL / 10} \right) \end{cases} \quad (4.16)$$

(L)単独の建物による挿入損失 (地面反射音を考慮, 4パスの方法)

$$IL^{(PS)} = -10 \log_{10} \left\{ 10^{-\Delta L_{upper} / 10} + 10^{-\Delta L''_{upper} / 10} + (1 - 10^{-\Delta L_{upper} / 10} - 10^{-\Delta L''_{upper} / 10}) \times (10^{-\Delta L_{left} / 10} + 10^{-\Delta L_{right} / 10}) \right\} \quad (5.3)$$

(M)単独の建物による挿入損失 (地面反射音を無視, 3パスの方法)

$$IL^{(PS)} = -10 \log_{10} \left\{ 10^{-\Delta L_{upper} / 10} + (1 - 10^{-\Delta L_{upper} / 10}) \times (10^{-\Delta L_{left} / 10} + 10^{-\Delta L_{right} / 10}) \right\} \quad (5.6)$$

(N)単独の建物後方の騒音レベル (1パスの方法)

$$L_p = 10 \log_{10} \left(10^{L_{p,0} / 10} + \sum_{i=1}^N 10^{L_{p,i} / 10} \right) \quad (5.7)$$

$$L_{p,0} = L_w - 8 - 20 \log_{10} r - \Delta L_{upper} \quad (5.8)$$

$$\Delta L_{upper} = \begin{cases} \text{① 鉛直平面 SP が建物と交差する場合} \\ \Delta L(RW)_{SXYP} \\ \text{② ①以外の場合} \\ 0 \end{cases} \quad (5.9)$$

$$L_{p,i} = \begin{cases} \text{① S, P とともに建物側壁面 } i \text{ と対面する側にあり, 鉛直平面 SP}_i \text{ が} \\ \text{建物側壁面 } i \text{ と交差する場合} \\ L_w - 8 - 20 \log_{10} r_i - \Delta L_{slit,i} \\ \text{② ①以外の場合} \\ -\infty \end{cases} \quad (5.10)$$

$$\Delta L_{slit,i} = -10 \log_{10} (1 - 10^{-\Delta L_{SRP,i} / 10}) \quad (5.11)$$

(O)直線道路に面した十分高い単独建物による挿入損失 (1パスの方法)

$$IL^{(LS)} = -10\log_{10}\{(\theta_0 - \theta)/\theta_0\} \quad (5.12)$$

(P)道路に面した市街地における騒音レベルの計算方法

$$SA \cdot L_{Aeq} = 10\log_{10}(10^{SA \cdot L_{Aeq}(RN)/10} + 10^{SA \cdot L_{Aeq}(BN)/10}) \quad (6.1)$$

$$SA \cdot L_{Aeq}(RN) = L_{Aeq}(RN) - SA \cdot IL \quad (6.2)$$

$$SA \cdot IL = -10\log_{10}(C_1/C + C_2/C + C_3/C) \quad (6.4)$$

<平面街路の場合>

$$\begin{cases} C_1/C = \alpha (1 - 10^{-IL^{(LS)}_{SXYR}/10}) 10^{-\Delta L(\beta, d_1)/10} \\ C_2/C = (1 - \beta)(10^{-IL^{(LS)}_{SXYR}/10} - 10^{-IL^{(LS)}_{SXZP}/10}) \times 10^{-\Delta L(\beta, d_2)/10} \\ C_3/C = 10^{-IL^{(LS)}_{SXZP}/10} \end{cases} \quad (6.5)$$

(道路近接建物列の直後の評価区間)

$$SA \cdot IL = -10\log_{10}\{\alpha (1 - 10^{-IL^{(LS)}_{SXYR}/10}) + 10^{-IL^{(LS)}_{SXYR}/10}\} \quad (6.8)$$

(建物上方の回折音が無視できる場合)

$$SA \cdot IL = -10\log_{10} \alpha + 0.775\{\beta/(1 - \beta)\}^{0.630} \times d_1^{0.859} \quad (6.13)$$

<遮音壁の設置された道路の場合>

$$\begin{cases} C_1/C = \alpha (10^{-IL^{(LS)}_{SAP}/10} - 10^{-IL^{(LS)}_{SAXYP}/10}) \times 10^{-\Delta L(\beta, d_1)/10} \\ C_2/C = (1 - \beta)(10^{-IL^{(LS)}_{SAXYP}/10} - 10^{-IL^{(LS)}_{SAXZP}/10}) \times 10^{-\Delta L(\beta, d_2)/10} \\ C_3/C = 10^{-IL^{(LS)}_{SAXZP}/10} \end{cases} \quad (6.9)$$

$$\text{ここで, } \Delta L(\beta, d_i) = 0.775\{\beta/(1 - \beta)\}^{0.630} \times d_i^{0.859} \quad (6.11)$$

7. 2 今後の課題

本論文で提案した予測計算式は、主に、模型実験により検証されている。今後は、さらに現地での実測データに基づく検証も必要と考える。また、提案した種々の実験回帰式は、限られた模型実験データに基づいて作成されている。今後は、これらの物理的意味をより明確化するとともに、模型実験データや現地実測データの蓄積により回帰式の精度向上を図ることが必要と考える。

その他、個別の計算対象において残された課題は、以下のとおりである。

(1)吸音性厚み障壁

1)厚み部分の形状・実効的流れ抵抗が変化した場合への計算方法の拡張

(2)多重障壁

- 1)障壁高さが異なり、かつ障壁間隔が小さい多重障壁への計算方法の拡張
- 2)先折れ型や先端を分岐させた遮音壁への計算方法の拡張

(3)低層遮音壁

- 1)中央分離帯にも低層遮音壁を併設した場合の減音効果の計算方法
- 2)自動車走行騒音の指向性の考慮した減音効果の計算方法
- 3)低層遮音壁の合理的な設計方法

(4)沿道市街地

- 1)道路近接建物列直後の特定地点における L_{Aeq} の計算方法
- 2)建物密度を考慮した上方回折点の合理的な設定方法
- 3) α , β 等の市街地の建物パラメータの実用的な調査・設定方法

謝 辞

本研究は、筆者が建設省土木研究所交通環境研究室在職中における、主に平成九年度以降の研究成果を取り纏めたものである。また、研究の一部については、日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会における ASJ Model 1998 の開発研究の中で、筆者が上記委員会に関わって実施した。

本論文をまとめるにあたり、終始多大の労を厭わずご指導ご鞭撻を賜りました 京都大学 高木興一 教授に対し、ここに深甚なる謝意を表します。また、模型実験の方法等について、いつも貴重なご助言を頂いた (財) 小林理学研究所 山本貢平 所長に心から感謝の意を表します。

本研究での模型実験、現地調査、データ整理等において協力いただいた (株) オリエンタルコンサルタントの石川賢一氏、(株) 公共計画研究所の千葉隆氏、(株) 総合技術コンサルタントの三宅龍雄氏の各位に謝意を表します。

最後に、予測計算式の提案に際して有益なご議論をいただいた日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会の委員各位に感謝の意を表します。

参考文献

第1章

- 1)騒音に係る環境基準について，閣議決定（1971.5.25）
- 2)騒音に係る環境基準について，平成10年環境庁告示第64号（1998.9.30）
- 3)建設省道路局，土木研究所：道路環境技術開発三箇年計画（1996.12）
- 4)道路環境技術研究会編著：道路環境技術開発の新たな展開，pp.91～112（1997.3）
- 5)石井聖光：道路交通騒音予測方法に関する研究（その1）－実用的な計算式について－，日本音響学会誌31巻，pp.507～517（1975）
- 6)（社）日本道路協会：道路環境整備マニュアル，pp.110～136（1989）
- 7)日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会報告：道路一般部を対象としたエネルギーベース騒音予測法，日本音響学会誌，50巻3号，pp.227～252（1994）
- 8)日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会：道路交通騒音の予測モデル“ASJ Model 1998”，日本音響学会誌，55巻4号，pp.281～324（1999）
- 9)マックス・ボルン，エミル・ウオルフ：光学の原理Ⅱ（第Ⅷ章），東海大学出版会（1975）
- 10)H.M.Macdonald：A class of diffraction problems, Proc. London, Math.Soc., 14, pp.410～427（1915）
- 11)川井孝雄，伊藤毅：半無限障壁による回折音場，日本音響学会誌，32巻5号，pp.319～327（1976）
- 12)R.G. Kouyoumjian and P.H. Pathak：A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface, Proc. IEEE, 62, pp.1448～1461（1974）
- 13)前川純一：障壁（塀）の遮音設計に関する実験的研究，日本音響学会誌18巻4号，pp.187～196（1962）
- 14)（社）日本音響材料協会編：騒音・振動対策ハンドブック，技法堂出版，pp.216（1982）
- 15)山本貢平，高木興一：前川チャートの数式表示について，騒音制御，Vol.15 No.4，pp.40～43（1991）
- 16)K. Yamamoto, K. Takagi：Expression of Maekawa's chart for computation, Applied Acoustics 37, pp.75～82（1992）
- 17)U.Kurze and G.S.Anderson：Sound attenuation by barriers, Applied Acoustics, 4(1), pp.35～53（1971）
- 18)松井利仁，高木興一，平松幸三，山本剛夫：吸音性ウエッジ上での音波の伝搬，日本音響学会誌，44巻8号，pp.581～587（1988）

- 19) A.D. Pierce : Diffraction of sound around corners and over wide barriers, *J Acoust. Soc. Am.* ,55, pp.941 ~ 955 (1974)
- 20) J.B. Keller : Diffraction by an aperture, *J. Appl. Phys.* 28, pp.426 ~ 444 (1957)
- 21) 川井孝雄 : 厚みのある障壁及び角柱による回折音場, *日本音響学会誌*, 34 巻 7 号, pp.369 ~ 375 (1978)
- 22) Z. Mackawa : Noise reduction by screens, *Applied Acoustics* 1, pp.157 ~ 173 (1968)
- 23) U. Kurze : Noise reduction by barriers, *J. Acoust. Soc. Am.* 55, pp.504 ~ 518 (1974)
- 24) K. Takagi : Some remarks on practical methods for calculating acoustical diffraction, *Applied Acoustics* 31, pp.119 ~ 132 (1990)
- 25) 藤原恭司, 安藤四一, 前川純一 : 厚さのある障壁による騒音減衰 (障壁による騒音制御に関する研究 その 1), *日本音響学会誌*, 31 巻 12 号, pp.725 ~ 729 (1975)
- 26) K. Fujiwara, Y. Ando, Z. Mackawa : Noise control by barriers - Part 1 : Noise reduction by a thick barrier, *Applied Acoustics*, 10(2), pp.147 ~ 159 (1977)
- 27) 庄野豊, 吉田幸信, 山本貢平 : 道路遮音壁先端に設置する騒音低減装置の開発, *土木学会論文集*, No.504/VI-25, pp.81 ~ 89 (1994)
- 28) 庄野豊, 吉村義朗, 山本貢平 : 道路騒音低減装置 (ノイズリデューサー) の騒音低減効果に関する境界要素法による解析, *土木学会論文集*, No.574/VI-36, pp.15 ~ 20 (1997)
- 29) 庄野豊, 落合博明, 高木興一 : 遮音壁の形状と厚さについての境界要素法による減音効果の考察, *騒音制御*, Vol.22, No.5, pp.288 ~ 298 (1998)
- 30) 前川純一 : 2つの障壁及び2つの縁を持つ半無限障壁の音響解析に関する実験的研究, *日本建築学会論文報告集*第 69 号, pp.69 ~ 72 (1961)
- 31) R.N. Foss : Double barrier noise attenuation and a predictive algorithm, *Noise control engineering*, 13(2), pp.83 ~ 91 (1979)
- 32) ISO/DIS 9613-2 : Attenuation of sound during propagation outdoors, Part2 : A general method of calculation (1992)
- 33) 堀田竜太, 山本貢平, 高木興一 : 二重回折効果の各種計算方法に関する検討, *日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集*, pp.21 ~ 24 (1994)
- 34) K. Takagi, Y. Park, R. Hotta, K. Yamamoto : Comparison of simple prediction method for noise reduction by double barriers, *Proceedings of Internoise 96*, pp.779 ~ 782 (1996)
- 35) 久野和宏, 奥村陽三 : 道路交通騒音予測のこと [XVIII] - 障壁及びスリット等による回折減衰 -, *日本音響学会騒音・振動研究会資料*, N-97-51 (1997)
- 36) 東一樹, 朴永眠, 高木興一, 堀田竜太, 山本貢平 : 三重障壁による回折効果について, *日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集*, pp.297 ~ 300 (1995)
- 37) 前川純一 : 有限障壁 (衝立) による騒音の回折 障壁 (塀) の遮音設計に関する実験的研究第 2 報, *日本音響学会誌*, 21 巻 1 号, pp.1 ~ 7 (1965)

- 38)山本貢平, 堀田竜太, 高木興一: 有限長障壁に対する音の回折効果の計算方法について, 日本音響学会誌, 50 巻 4 号, pp.271 ~ 278 (1994)
- 39)Koichi Takagi, Ryota Hotta, Kohei Yamamoto: A Simple Method for the Calculation of Noise Attenuation by a Finite Length Barrier, *Applied Acoustics*, 43, pp.353 ~ 365 (1994)
- 40)ISO9613-2: Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part2: General method of calculation (1996-12-15)
- 41)Department of Transportation, Federal Highway Administration, USA: FHWA Highway traffic noise prediction model, Report FHWA-RD-77-108 (1977)
- 42)日本音響学会編: L_{Aeq} における道路交通騒音予測, 日本音響学会 第4回音響技術セミナー資料, pp.42 (1995)
- 43)矢野博夫, 日高新人, 朱鎮洙, 橘秀樹, 押野康夫, 筑井啓介: テストコースにおける自動車の走行騒音放射特性の検討 (その2. 音圧測定による近傍音場の解析), 日本音響学会講演論文集, pp.627 ~ 628 (1992.3)
- 44)筑井啓介, 押野康夫: 背の低い遮音塀による自動車騒音低減効果の検討, 自動車研究, 17 巻 9 号, pp.441 ~ 444 (1995)
- 45)筑井啓介, 押野康夫, 橘秀樹: 実車を用いた遮音塀の回折減音量に関する検討, 日本音響学会講演論文集, pp.687-688 (1996.3)
- 46)大西博文, 上坂克巳, 鉢嶺清範: 低層遮音壁の種々の道路条件における効果, 日本音響学会研究発表会講演論文集, (社)日本音響学会講演論文集, pp.825 ~ 826 (1997.3)
- 47)高村貴洋, 渡辺義則, 中島勝哉: 道路端に低い壁を設置することによる減音量の推定, 土木学会第51回年次学術講演会, pp.300-301 (1996.9)
- 48)Selma Kurra: A computer model for predicting sound attenuation by barrier-buildings, *Applied Acoustics*, 13, pp.331 ~ 355 (1980)
- 49)足立義雄, 平野興彦: 緩衝性建築物による道路交通騒音の減音効果の予測 (模型実験と予測計算), 日本音響学会講演論文集, pp.45 ~ 46 (1981.5)
- 50)Z.Mackawa: Environmental sound propagation, *Proc. Eighth International Congress on Acoustics, London 1974*, pp.29 ~ 46 (1974)
- 51)山田一郎, 石井泰: 市街地における騒音伝搬の過剰減衰の予測の試み, 日本音響学会講演論文集, pp.507 ~ 508 (1978.10)
- 52)加来治郎, 山下充康: 騒音の市街地浸透に関する研究, 日本音響学会誌, 35 巻 5 号, pp.257 ~ 261 (1979)
- 53)家田信吾, 馬恒堅, 久野和宏, 池谷和夫: 仮想都市空間における騒音伝搬予測の一手法, 日本音響学会誌, 39 巻 4 号, pp.239 ~ 246 (1983)

54) 藤田真一, 青井一郎, 厚井弘志, 笈西隆滋: ランドサット TM データによる建物面積率を用いた道路周辺の環境騒音予測モデル, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.6 No.4, pp.5 ~ 10 (1986)

55) 藤本一寿, 金華日, 白川秀樹, 安永和憲: 戸建て住宅地への道路交通騒音の伝搬, 日本音響学会騒音・振動研究会資料 N-98-43 (1998)

第 2 章

56) 川井孝雄, 日高孝之, 中島立美: locally reacting な境界面上の音の伝搬, 日本音響学会誌, 38 巻 2 号, pp.82 ~ 90 (1982)

57) Yasushi Miki: Acoustical properties of porous materials - Modification of Delany-Bazley models -, J.Acoust.Soc.Jpn, 11,1, pp.19 ~ 24 (1990)

58) 川井孝雄: ウェッジによる回折音場の漸近解に関する検討, 日本音響学会誌, 35 巻 10 号, pp.544 ~ 553 (1979)

第 3 章

59) 木倉正美, 岡崎梯次: 有限長壁の音響設計, 第 11 回日本道路会議論文集, pp.333 ~ 335 (1973)

60) 前川純一: 建築・環境音響学, 共立出版株式会社, pp.96 (1990)

第 4 章

61) 三宅龍雄, 上坂克巳, 大西博文: 透過音を考慮した遮音壁の騒音低減効果について, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N - 97 - 50 (1997)

62) 渡辺敏夫, 山田伸志: 植物模型による音の散乱, 日本音響学会誌, 43 巻 11 号, pp.845 ~ 850 (1987)

63) 鹿島教昭, 田村明弘: 植樹帯による減音効果 - 実在する植樹帯の挿入損失 -, 日本音響学会誌, 47 巻 10 号, pp.729 ~ 737 (1991)

64) 鹿島教昭, 田村明弘: 植樹帯による減音効果 (第 2 報) - 幼木を用いた縮尺模型実験 -, 日本音響学会誌, 49 巻 10 号, pp.711 ~ 720 (1993)

65) 鹿島教昭, 田村明弘: 植樹帯による騒音低減効果, 騒音制御, Vol.21 No.3, pp.175 ~ 178 (1997)

66) 石井貢: 低い塀を取り付けた植栽柵の防音効果, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-94-10 (1992)

67) D C Hothersall and S A Tomlinson: High Sided Vehicles and Road Traffic Noise Barriers, Internoise 95, pp.397 ~ 400 (1995)

- 68) 筑井啓介, 押野康夫, 橋秀樹: 自動車走行騒音の指向性を考慮した道路交通騒音の予測手法に関する研究, 騒音制御, Vol.22 No.2, pp.108 ~ 116 (1998)
- 69) 森喜仁, 大西慶三, 大西博文, 上坂克巳: 実走行車両から発生する騒音の指向性について, 日本音響学会講演論文集, 秋季, II, pp.729 ~ pp.730 (1998.9)
- 70) 森喜仁, 福島昭則, 上坂克巳, 大西博文: 実走行車両から発生する騒音の指向性について (第2報), 日本音響学会講演論文集, 春季, II, pp.691 ~ 692 (1999.3)

第6章

- 71) 山本貢平, 平尾善裕: 模型実験用吸音材の吸音率推定方法に関する一考察, 日本音響学会講演論文集, pp.705 ~ 706 (1991.10)

関連論文

1) 上坂克巳, 大西博文, 鉢嶺清範, 千葉隆, 高木興一: 低層遮音壁による減音効果の予測・評価に関する研究, 土木学会環境工学研究論文集, 第 34 巻, pp.307 ~ 317 (1997)

<第 1 章, 第 3 章, 第 4 章関連>

2) 上坂克巳, 大西博文, 鉢嶺清範, 石川賢一, 高木興一: 厚みのある障壁, 二重障壁による回折効果に関する実験的研究, 騒音制御, Vol.22, No.3, pp.153 ~ 161 (1998)

<第 1 章, 第 2 章関連>

3) 上坂克巳, 大西博文, 鉢嶺清範, 石川賢一, 高木興一: 種々の低層遮音壁による減音効果の予測・評価に関する研究, 騒音制御, Vol.23, No.2, pp.99 ~ 109 (1999)

<第 1 章, 第 2 章, 第 4 章関連>

4) 上坂克巳, 大西博文, 三宅龍雄, 高木興一: 幹線道路に面した単独建物後方の騒音レベルの計算方法, 騒音制御, Vol.23, No.3, pp.189 ~ 199 (1999)

<第 1 章, 第 5 章関連>

5) 上坂克巳, 大西博文, 三宅龍雄, 高木興一: 道路に直面した単独建物および建物列後方における等価騒音レベルの簡易計算方法, 騒音制御, Vol.23, No.6 (1999) 掲載予定

<第 1 章, 第 5 章, 第 6 章関連>

6) 上坂克巳, 大西博文, 千葉隆, 高木興一: 道路に面した市街地における区間平均等価騒音レベルの計算方法, 騒音制御, Vol.23, No.6 (1999) 掲載予定

<第 1 章, 第 6 章関連>