

博士論文

鉄道騒音に対する遮音壁の低減効果に関する研究

Study on noise reduction effect of sound barriers
for railways

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻

石川 聡史

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	4
1.3	論文の構成	4
第 2 章	在来鉄道騒音の予測手法	7
2.1	概要	7
2.2	幾何音響解析	8
2.2.1	騒音予測計算法の概要	9
2.2.2	騒音レベルの計算手法	10
2.3	波動音響解析	12
2.4	時間領域差分法の定式化	14
2.4.1	インピーダンス境界条件	16
2.4.2	FDTD (2,4) 法	18
2.4.3	高次差分によるスキームの高精度化	19
2.4.4	高次スキームに対する安定・分散性解析	20
2.4.5	開領域における吸音境界条件	24
2.4.6	数値解析で用いる音源	25
2.5	まとめ	28
第 3 章	在来鉄道騒音に対する予測手法の適用に関する検討	29
3.1	概要	29
3.2	高所空間を含めた騒音伝搬特性（鉛直断面の指向特性）の把握	30
3.2.1	測定箇所	30
3.2.2	測定方法	30
3.2.3	測定結果の概要	34
3.3	既往の騒音予測式の適用に関する検討	37
3.3.1	検討概要	37
3.3.2	実測結果に基づく検討結果	41
3.3.3	鉛直断面の指向特性に関する補正式の検討	49

3.4	波動音響解析の適用に関する検討	52
3.4.1	検討概要	52
3.4.2	検討結果	54
3.5	まとめ	64
第4章	鉄道車体と遮音壁間の多重反射が遮音性能に与える影響	65
4.1	概要	65
4.2	数値解析による騒音低減効果の検討	66
4.2.1	数値解析の方法	66
4.2.2	解析結果	69
4.3	縮尺模型を用いた検証実験	76
4.3.1	模型実験	76
4.3.2	模型実験の数値解析モデル	78
4.3.3	模型実験結果と数値解析結果の対応	78
4.4	車体の有無による回折減衰量の比較	84
4.4.1	車体無しの条件における回折減衰量	84
4.4.2	車体ありの条件における回折減衰量	84
4.4.3	解析結果	85
4.5	多重反射による補正量の算出	87
4.5.1	補正量を考慮した騒音予測式の概要	87
4.5.2	補正量の算出結果	87
4.6	まとめ	95
第5章	在来鉄道騒音に対する有限長遮音壁の挿入損失の検討	97
5.1	概要	97
5.2	指向性音源に対する有限長遮音壁の挿入損失の検討	98
5.2.1	計算対象	98
5.2.2	騒音伝搬の計算方法	99
5.2.3	挿入損失の算出結果	100
5.3	有限長遮音壁の挿入損失の近似式に関する検討	102
5.3.1	無限長遮音壁の挿入損失	102
5.3.2	有限長遮音壁の挿入損失の近似式	105
5.3.3	近似式の精度検証	106
5.3.4	遮音壁の必要長さに関する検討	108

5.4	現車試験による検証実験	110
5.4.1	現車試験の方法	110
5.4.2	挿入損失の計算	113
5.4.3	実測結果と計算結果の対応	113
5.5	まとめ	115
第6章	在来鉄道沿線の高所空間を対象とした風荷重軽減型遮音壁の騒音低減効果	117
6.1	概要	117
6.2	風洞実験による風荷重軽減効果の確認実験	118
6.2.1	遮音壁模型	118
6.2.2	風荷重の測定方法	119
6.2.3	測定結果	120
6.3	2次元有限差分法を用いた数値解析による騒音低減効果の検討	122
6.3.1	数値解析の方法	122
6.3.2	解析結果	124
6.4	フルスケール実験（現車試験）による騒音低減効果の検討	133
6.4.1	現車試験の方法	133
6.4.2	試験結果	136
6.5	数値解析とフルスケール実験の比較	139
6.5.1	現車試験の数値解析モデル	139
6.5.2	測定結果と解析結果の対応	139
6.6	まとめ	142
第7章	総括	143
7.1	研究のまとめ	143
7.2	今後の課題	145
	発表論文一覧	146
	謝辞	149
	参考文献	150

図目次

図 1.1	論文の構成	6
図 2.1	有限差分法におけるスタガードグリッド	14
図 2.2	境界面近傍の音圧と粒子速度	16
図 2.3	平面波の伝搬方向	21
図 2.4	PML の設定	25
図 2.5	ガウシアンパルスのスペクトル	27
図 3.1	在来鉄道沿線における測定点配置図	32
図 3.2	測定状況	33
図 3.3	軌道近傍を基準とした騒音レベルの空間分布	35
図 3.4	走行音の周波数特性（コンクリート高架橋区間，近接車両）	36
図 3.5	各地表面上の伝搬経路高さ	39
図 3.6	盛土区間における実測値と予測値の差	46
図 3.7	平地区間における実測値と予測値の差	49
図 3.8	補正值と仰角の関係	51
図 3.9	N 自由度の機械振動系を用いたモデル	52
図 3.10	実測値と計算値の比較（厚さ 300 mm のバラスト：5 自由度）	53
図 3.11	数値解析における音源モデル図	54
図 3.12	参照点の違いによる計算値と実測値の差（高さ別平均と全体平均）	57
図 3.13	参照点の違いによる計算値と実測値の比較（平地区間）	58
図 3.14	参照点の違いによる計算値と実測値の比較（盛土区間）	59
図 3.15	参照点の違いによる計算値と実測値の比較（コンクリート高架橋区間）	60
図 3.16	音源の数の違いによる計算値と実測値の差（高さ別平均と全体平均）	62
図 4.1	2次元解析モデル	66
図 4.2	在来鉄道騒音の周波数特性（参照点 3 点の平均値）	68
図 4.3	遮音壁の形状（直壁高さの変化）	69
図 4.4	車体なしに対する車体ありの場合の騒音レベル増加量（片側・直壁高さの変化）	70
図 4.5	車体なしに対する車体ありの場合の騒音レベル増加量のコンター図	71
図 4.6	遮音壁形状（遮音壁先端角度の変化）	71

図 4.7	車体なしに対する車体ありの場合の騒音レベル増加量	72
図 4.8	片側に対する両側遮音壁の場合の騒音レベル増加量（両側高さの変化）	74
図 4.9	片側に対する両側遮音壁の場合の騒音レベル増加量のコンター図（両側高さの変化）	75
図 4.10	高架橋の軌道，列車の設置状況	77
図 4.11	模型実験における測定点配置	78
図 4.12	騒音レベルのコンター図	80
図 4.13	実験値と計算値の周波数特性（直壁 3 m，近接軌道中心から 12.5 m 離れ）	82
図 4.14	回折減衰量に対する前川チャートと数値解析結果の比較	86
図 4.15	多重反射補正量の平均値に対する偏差	88
図 4.16	多重反射補正量の平均値と仰角の関係（片側・直壁高さの変化）	91
図 4.17	多重反射補正量の平均値に対する偏差（片側・直壁高さの変化）	92
図 4.18	多重反射補正量の平均値と仰角の関係（両側・直壁高さの変化）	93
図 4.19	多重反射補正量の平均値に対する偏差（両側・直壁高さの変化）	94
図 5.1	計算モデル	98
図 5.2	音源モデル	99
図 5.3	1パスの方法	100
図 5.4	遮音壁の見通し角と挿入損失の関係（近接車両，直壁 3 m）	101
図 5.5	挿入損失の計算結果	104
図 5.6	遮音壁の見通し角	105
図 5.7	1パスの方法と近似式による挿入損失計算値の差	107
図 5.8	指向性音源に対する挿入損失の低下量と全長比の関係	109
図 5.9	測定場所の略図	111
図 5.10	現車試験の状況	112
図 5.11	騒音レベルの低減量（実測値）と挿入損失の増加量（計算値）の比較	114
図 6.1	風荷重軽減型遮音壁の期待される効果	117
図 6.2	遮音壁の模型概略図	118
図 6.3	測定機器の設置状況	119
図 6.4	風洞実験の様子	120
図 6.5	遮音壁の対直壁風荷重比の測定結果	121
図 6.6	2次元解析モデル	123

図 6.7	吸音材の垂直入射吸音率の周波数特性	124
図 6.8	遮音壁形状（遮音板角度の変化）	125
図 6.9	騒音低減量の解析結果（遮音板角度の変化）	126
図 6.10	遮音壁形状（風荷重一定条件）	127
図 6.11	騒音低減量の解析結果（風荷重一定条件）	128
図 6.12	遮音壁形状（遮音板間隔の変化）	129
図 6.13	騒音低減量の解析結果（遮音板間隔の変化）	130
図 6.14	騒音低減量の解析結果（吸音材の有無, 遮音板幅 707 mm, 角度 45°）	131
図 6.15	騒音低減量のコンター図（遮音板幅 707 mm, 角度 45°）	132
図 6.16	現車試験の測定断面	133
図 6.17	現車試験の状況	134
図 6.18	騒音レベルの実測結果	137
図 6.19	騒音レベルの周波数特性（近接車両）	138
図 6.20	騒音低減量の測定結果と解析結果	140
図 6.21	騒音レベルの周波数特性の測定結果と解析結果（地上 5 m）	141

表目次

表 2.1	差分近似の次数 $M+1$ の差分近似の安定化条件	24
表 3.1	$g(Z_i)$ における係数	41
表 3.2	単発騒音暴露レベルの実測値と予測値の差（盛土区間）	43
表 3.3	単発騒音暴露レベルの実測値と予測値の差（平地区間）	48
表 3.4	音源の位置の違いによる計算値と実測値の差（高さ別平均と全体平均）	63
表 4.1	遮音壁の計算ケース	68
表 4.2	遮音壁の実験ケース	76
表 4.3	実験値と計算値の騒音レベルの差	79
表 4.4	多重反射補正量の平均値に対する偏差（角度区分の間隔の変化） ..	90
表 5.1	無指向性および指向性音源に対する遮音壁の見通し角と全長比（無限長に対する挿入損失の低下量 5dB の場合）	108
表 6.1	改良型遮音壁の条件（タイプ 1~3）	135

第1章 序論

1.1 研究の背景

(1) 鉄道騒音に関する現状

鉄道は他の交通機関に比べてエネルギー消費量、二酸化炭素排出量割合が少なく、環境負荷の小さい移動手段となっているため、地球環境問題が深刻化するこれからの社会において大きな役割を果たしていくことが期待されている。大量輸送等の鉄道の特性が発揮される輸送について、鉄道へのシフトが進めば交通分野全体の環境負荷の軽減に資することから、地球温暖化問題の解決への貢献のため、鉄道の利用促進に向けた利用者の利便性向上や貨物鉄道輸送へのモーダルシフトの推進に向けた取組みが進められている[1]。鉄道の利用促進に向けた取組として、列車速度向上による到達時間の短縮、運転本数の増加などがあげられるが、これらは、騒音・振動などによる沿線環境への影響を増大させるため、対策が求められる。

鉄道騒音に対して、昭和 50 年に「新幹線鉄道騒音に係る環境基準について（環境庁）」[2]が告示され、平成 7 年には「在来鉄道の新設又は大規模改良に際しての騒音対策の指針について」[3]の 2 つの騒音規制が定められている。

新幹線の騒音対策については、環境基準を達成すべく遮音壁の設置や嵩上げ、パンタカバーの設置、レール削正等によって音の発生そのものを抑える音源対策を行っている。なお、新設新幹線沿線において、これらの対策のみでは達成が困難な区域には、既存の家屋に対して防音工事への助成を行っている。

また、在来鉄道の騒音対策については、「在来鉄道の新設又は大規模改良に際しての騒音対策指針」に基づき、新線建設の場合には一定の値以下のレベルになるよう、既設路線の大規模改良の場合には改良前より改善されるよう対策を行っている。

鉄道騒音は、転動音、モータ音、空力音、構造物音などから構成される。転動音は、車輪とレールの衝突により、空力音は車体まわりの空気の乱れから発生し、構造物音は高架橋などの振動から放射される音である。一般に低速度では転動音が、高速度では空力音が卓越することが多い[4, 5]。

騒音対策の基本はレール削正、騒音低減を図った新型車両の導入などの発生源対策であるが、発生源の低騒音化には限度がある。そこで、受音点に伝搬するまでの過程で、発生した音を減衰させる対策と併用することが現実的であり、より大きな減音効

果が得られる。騒音が問題となる箇所の鉄道高架橋に遮音壁を設けることがあるが、その種類もさまざまである。回折減衰効果をねらったものとして、直立、逆L型[6]などのタイプや音の干渉現象を利用した騒音低減装置[7, 8]吸音効果をねらって吸音材を直壁内面に貼付したタイプ[9, 10]など、いろいろな種類の遮音壁が使われている[11]。また、様々な形状の遮音壁が提案されているが、その減音効果を確かめるために鉄道沿線に敷設し実験を行うことは容易でないことから、縮尺模型を用いた実験[12-16]や数値解析[17-19]から遮音壁の減音効果を求めることが広く行われている。計算モデルでは直壁のような単純な形状の遮音壁であれば減音量を計算することができるが、逆L型防音壁のような複雑な形状の遮音壁では難しくなる。したがって、複雑な形状の遮音壁による減音量を求めるためには模型実験や波動音響解析などの方法を使うことが必要となる。

(2) 鉄道沿線の騒音予測、騒音対策に関する課題

① 沿線の高所空間に対する騒音予測

近年、都市部においては、在来鉄道沿線に近接して建築物が建てられている場合が多く、これらの建築物の高層階に対する騒音予測・騒音対策が課題となっている[20-22]。これまでに公表されている鉄道騒音の予測手法として、新幹線鉄道については長倉らが提案した「新幹線沿線騒音予測手法」[23]、在来鉄道については「在来鉄道の新設又は大規模改良に際しての騒音対策の指針について」に対応して森藤らが提案した予測手法[24, 25]や安部らが提案した予測手法[26]が広く用いられているが、この手法は主に地上高さ付近で測定された騒音データをもとに構築されており、沿線建物の高層階等の高所空間における精度は十分に検証されているとはいえない。

道路交通騒音については自動車走行騒音に対する鉛直面内の指向特性[27, 28]や建物高層階への騒音の伝搬に対する検討[29]が行われ、道路交通騒音の予測モデル[30]として広く利用されている。一方、鉄道騒音については実車の走行試験や模型実験を用いた転動音の仰角方向の指向特性の検討[31-34]が行われたが、営業線における予測精度は十分に検証されていない。

波動音響解析により鉄道沿線の騒音伝搬を予測する場合、計算メモリや計算時間の制約から2次元解析を適用することが多い[35, 36]。しかし、実際の鉄道騒音は非干渉性線音源であるのに対して、2次元解析では干渉性線音源を仮定するため、解析結果の妥当性について検討する必要がある。

② 車体と遮音壁間との多重反射の影響

遮音壁による減音効果は、音源から受音点に至る経路において遮音壁の有無による差（行路差）と、点音源、線音源の回折減衰量を示した「前川の実験チャート」[37-39]を用いて求める。鉄道の場合、車両下部音は遮音壁と車両側面の狭い空間において音の多重反射が発生するため騒音伝搬の現象が複雑になり、遮音壁の減音効果を実験チャートから簡単に求めることができない[40-42]。また、都市部では軌道の両側に遮音壁が設置されることが多いが、遮音壁の高さによっては、反対側の遮音壁と車体、および両側の遮音壁間でも多重反射が生じるため[43]、沿線騒音の予測においてその影響を無視できないことが予想されるため、想定される減音効果が得られないことがある。森藤らの手法では多重反射の影響による補正は一律に 2dB 加えるとしているが、遮音壁の高さは 1~2 m に限定されている。

③ 有限長遮音壁に対する騒音予測

大都市圏においては、高さ 4 m 以上の遮音壁[44]やセミシェルター型遮音壁[45]などの高大な遮音壁を設置するケースも増えてきた。この場合、高架橋の補強や遮音壁の支柱および基礎の構築が必要となることから、工事費や施工時間を最小限に抑えるため、遮音壁の設置区間をできるだけ短くすることが求められている。一方、遮音壁による騒音低減効果は無限長の場合に前川チャートを用いて算出することができるものの、有限長遮音壁の設置区間の算定方法は必ずしも明確ではない。既往研究において有限長遮音壁の挿入損失の計算方法[46-54]は提案されているが、非干渉性の無指向性点音源を直線状に連続的に一様分布させた場合が前提となっているため、水平方向に指向性を持つ在来鉄道騒音への適用については検証が必要である。

④ 沿線の高所空間を対象とした騒音対策

前述のとおり、直壁や複雑な形状の遮音壁の研究開発が行われてきたが、従来のように遮音壁を設置して対策する場合、音源から受音点までを遮蔽しなければ効果が得られないため、遮音壁が高大となる。高大な遮音壁は風荷重を強く受け、遮音壁本体や遮音壁が設置された構造物への負荷が増大する。また、反射音の影響により、遮音壁反対側の沿線においても騒音レベルが上昇するなど課題が多い。これに対し、風荷重の低減を考慮した遮音壁[55-62]、車両下部音が沿線の高所空間に伝搬することを防

ぐレール近傍遮音壁[63]に関する研究開発が行われているが、実用にまで至っていないのが現状である。

1.2 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究の目的を以下のとおり設定する。

1) 鉄道騒音に対する予測手法の適用範囲の拡大

転動音および車両機器音を主音源とする在来鉄道の走行音に対する鉛直方向の指向特性、車体・遮音壁間の多重反射による高所空間への影響を明らかにして、騒音予測手法の適用範囲を沿線の高所空間まで拡張する。また、有限長遮音壁の挿入損失について検討を行い、近似式を導出する。

2) 風荷重軽減型遮音壁に対する騒音低減量の評価

在来鉄道沿線の高所空間における騒音低減と風荷重軽減の両立を目指した新たな遮音壁について、風洞実験・数値解析・現場測定を通して騒音低減と風荷重軽減の効果を定量的に検証する。

1.3 論文の構成

第1章では、鉄道騒音に関する現状、騒音予測に関する課題など研究の背景を概説し、本研究の目的、本論文の構成を示す。

第2章では、既往の在来鉄道騒音予測式の概要について述べる。また、波動音響解析手法について概観し、本研究で使用する2次元の時間領域有限差分法（FDTD法）を概説するとともに基本方程式の定式化を行う。

第3章では、関東近郊の在来鉄道（平地・盛土・コンクリート高架橋区間の3箇所）において沿線の高所空間を含む騒音分布測定を行う。この実測結果をもとに、転動音および車両機器音を主音源とする在来鉄道の走行音の空間分布を求めると共に、既往の騒音予測式の高所空間への適用について検討を行う。また、鉄道騒音の伝搬予測に対して2次元波動数値解析手法を適用する際の音源のモデル化について検討を行い、騒音予測への適用に関する検討を行う。

第4章では、在来鉄道における車体と遮音壁の間および対向する遮音壁間で生じる多重反射が遮音壁の騒音低減効果に及ぼす影響を評価するため、2次元時間領域有限差分法を用いた数値解析により、遮音壁の高さ、走行車線、先折れ遮音壁の角度を要

因としたケーススタディを行う。次に、1/25 縮尺の模型実験を実施し、数値解析結果との比較を行う。さらに、数値解析により算出した回折減衰量と前川チャートをもとに算出した多重反射を考慮しない回折減衰量との差異について考察し、多重反射による補正量を定量的に検討する。

第 5 章では、在来鉄道騒音に対する有限長遮音壁の挿入損失に関して、点音源列を想定して遮音壁上方の回折経路のみを考慮する 1 パスの方法を用いて、遮音壁の長さ と高さ、走行車線と受音点の位置を変化させたケーススタディを行い、音源の指向性と遮音壁の見通し角が挿入損失に及ぼす影響を検討する。続いて、線音源を想定した騒音伝搬の簡易計算における有限長遮音壁の取扱いとして、音源の指向性と遮音壁の見通し角を考慮した挿入損失の近似式の精度を検証した上で、近似式を用いて遮音壁の必要長さの検討を行う。さらに、鉄道沿線に設置された遮音壁の側方端部付近において騒音測定を実施し、挿入損失の実測値と計算値との比較を行う。

第 6 章では、在来鉄道沿線の高所空間における騒音低減とともに風荷重の軽減を目指し、複数の遮音板で構成される新たな遮音壁に対して、まず、1/5 縮尺風洞実験により様々な遮音板配置で遮音壁の風荷重軽減効果を確認する。次に、2 次元時間領域有限差分法を用いて遮音板の幅、角度および枚数（遮音板の間隔）を変化させた場合の騒音低減量を比較する。さらに、沿線において改良型遮音壁を仮設し、現車試験により騒音低減量を把握する。また、現車試験を模擬した数値解析を行い、実測値との対応を検証する。

第 7 章では、本研究の総括と今後の課題について述べる。

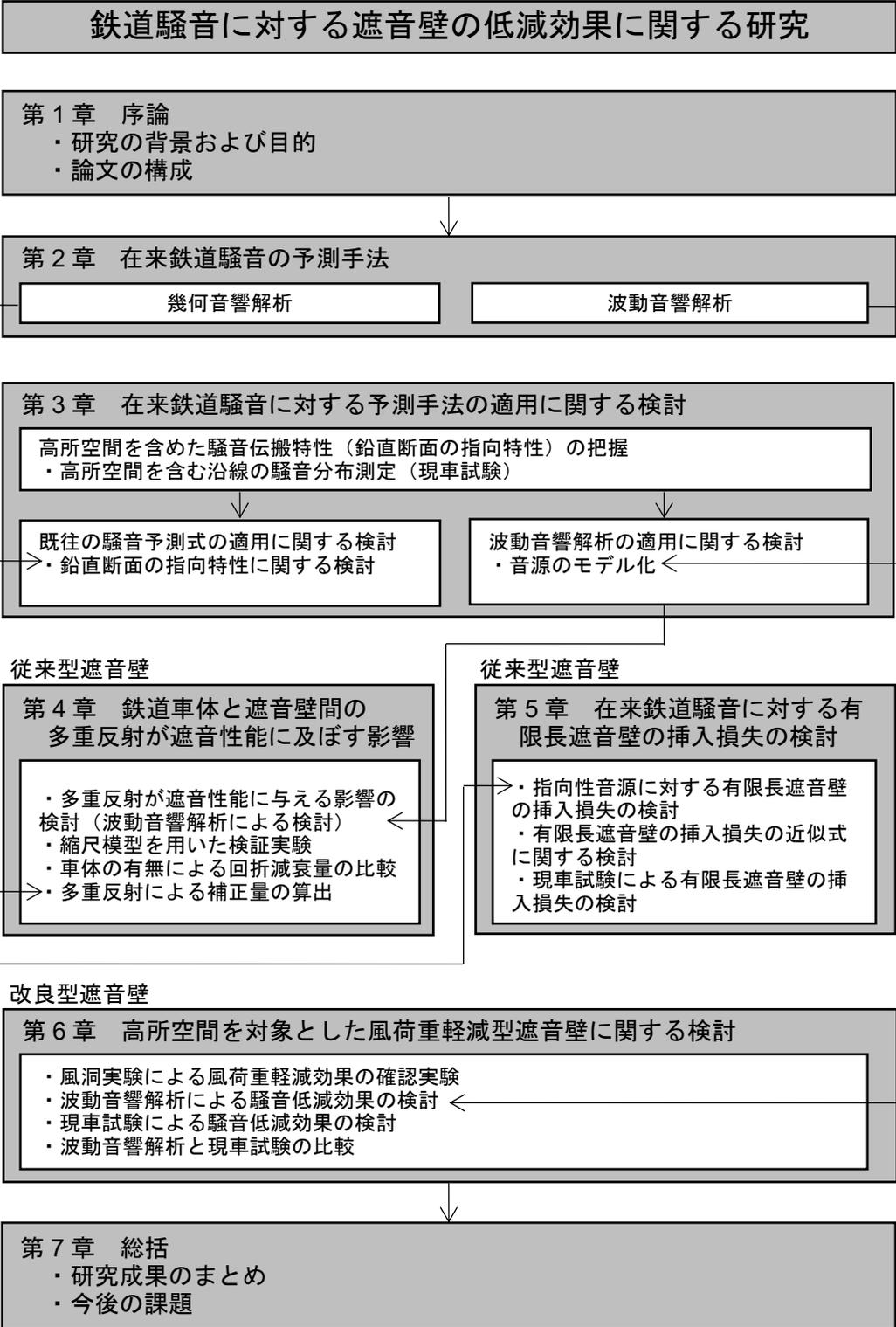


図 1.1 論文の構成

第2章 在来鉄道騒音の予測手法

2.1 概要

音響数値解析は幾何音響解析と波動音響解析に大別される。

幾何音響解析は、音の波動性を無視し、音響エネルギーの伝搬を幾何学的にモデル化する方法で、音波の回折や干渉といった現象を正確に模擬できないことから、厳密な解を得ることは難しい。しかし、少ない計算機資源によって、大規模空間における音響伝搬をシミュレートすることが可能である。

波動音響解析は、音場の基礎方程式である波動方程式に基づき、時間領域または周波数領域で連続系を離散系に置換して解析するものである。理論的に波動性を考慮したものであることから、空間領域・時間（周波数）領域における高精度の予測が原理的に保証される。

屋外の騒音伝搬予測等に数値計算を用いる場合は、計算に必要な領域が波長に比較して大きい。そのような問題に数値シミュレーションを適用する場合、計算量やメモリ容量の関係で、幾何音響理論をベースにした数値解析手法を用いることが多い[64]。一方、鉄道騒音の予測に対して、音源となる軌道を一直線と仮定することにより、その断面のみをモデル化することができ、条件を限定することにより波動音響解析を適用することが可能となる。

本章では、本研究で用いる幾何音響解析と波動音響解析手法の基礎理論について概説する。

2.2 幾何音響解析

これまでに一般に環境アセスメント等の分野で広く使用されてきている在来鉄道騒音の予測手法としては、1980年に石井・子安らにより提案された「在来線高架鉄道からの騒音予測手法案」[25]があり、東京都の鉄道騒音予測検討委員会により検討されたため東京都の方法とも呼ばれている。しかし、この手法はバラスト軌道の高架橋において発生する騒音レベルを予測するもので、適用条件が限定されるものであった。さらに、1995年に環境庁が公表した「在来鉄道の新設又は大規模改良に際しての騒音対策の指針について」に対応して、森藤らが「在来鉄道騒音の予測評価手法」[24]を提案した。この手法は、基本的には東京都の方法に従いながら、在来鉄道騒音に関する研究成果を参照し、より広い条件で適用可能となっている。

しかし、これらの手法は、音源モデルには指向性を持つ有限長一様線音源モデルを適用し、観測点の正面で静止している線音源モデルに対して1列車通過時の時間重み特性Sでの最大騒音レベルが計算され、単発騒音暴露レベルは最大騒音レベルから近似的に算出するものであった。また、構造物条件が一様でない場合には使用できないこと、モータファン騒音のように列車編成中に局在する音源を物理的に明確に表現できない問題点があった。

そこで、安部らは音源モデルとして新幹線騒音予測手法[23]で採用されている離散点音源列モデルを採用した。また、騒音レベルの計算方法としては、「在来鉄道の新設又は大規模改良に際しての騒音対策の指針について」[3]での騒音評価値が等価騒音レベルであることを鑑み、ASJ RTN-Modelや新幹線騒音予測手法で採用されている単発騒音暴露レベルを算出する方法が提案されている。本章では、安部らの手法[26]（以降、鉄道総研式）の概要を述べる。

2.2.1 騒音予測計算法の概要

在来鉄道騒音の音源を点音源列で近似し、それぞれの点音源が対象とする軌道を通過したときの予測地点における騒音の時間変化（ユニットパターン）およびその時間積分値を求めることを基本とする。

(1) 騒音予測手法の適用範囲

鉄道総研式が適用できる条件は以下のとおりである。

車 両：電車，車輪の踏面状態が良好であること

列車速度：50～150 km/h の範囲の定速走行

軌 道：バラスト軌道，スラブ軌道（消音バラスト散布を含む），各種防振軌道
線路は平坦かつ直線，ロングレール区間

レール頭頂面の状態は良好であること

構造物：コンクリート高架橋，盛土，平地

遮音壁：直壁型遮音壁，高さは制限なし

受音点：高さ方向は遮音壁天端より低いこと

線路離れ方向は軌道から 10～100 m の範囲にあること

(2) 音源モデル

①音源モデルの概要

在来鉄道騒音の主要音源としては、3つの音源要素（転動音，構造物音，モータファン音）を考慮し、各音源要素を線路方向に分布する有限個の離散点音源列で近似する。これらの点音源に対し、それぞれの音響パワーレベルを車両種別，構造物条件，軌道条件ごとに設定し、速度依存性を示すことによって、様々な車両種別，列車速度，構造物条件，軌道条件に対応することができる。パワーレベルの値は、一般的な高架橋（高さ7m程度）での沿線12.5m点での騒音レベルを予測した結果が既存手法 [26, 65]での予測結果（パワーレベルのばらつきの中央値を用いた場合）と一致するように定めたものである。

②音源位置

構造物断面における音源の位置としては、転動音、モータファン音は当該線軌道中心でレールレベル高さ、構造物音は高架橋中心で高架裏面高さとする。線路方向については、各音源とも台車部に対応した位置に分布していると考え、モータファン音は動力車（M車）の台車部分のみに設定する。したがって、音源要素の数は、列車編成両数が N 、そのうち動力車（M車）の車両が N_M であれば、転動音、構造物音ではそれぞれ $2N$ 、モータファン騒音では $2N_M$ となる。

③音源の指向性

音源の指向性は、列車接近のレベル上昇および列車通過後のレベル下降の傾きに影響し、レベルの時間変動の積分値である単発騒音暴露レベルが指向性により異なる結果となる。新幹線騒音については音源の指向性は無指向性に近いと報告されている[23]。一方、在来鉄道騒音の予測では、 $\cos^2 \phi$ の指向性を考慮すれば実測でのレベル変動とあうことが確認されている[66-68]。したがって、各点音源が水平方向に $\cos^2 \phi$ の指向性を持つものとする。

2.2.2 騒音レベルの計算手法

音響パワーレベル L_w をもつ1つの点音源が空間を移動するとき、この音源から放射される音（半自由空間）による受音点における騒音レベルの時間変動（ユニットパターン） $L_{pA,p}(t)$ は、音源の指向性を考慮し、式(2.1)で得られる。

$$L_{pA,p}(t) = L_w - 8 + 10 \log_{10} \left(\frac{\cos^2 \phi(t)}{R^2(t)} \right) - \Delta(t) - \Delta L_g(t) \quad (2.1)$$

ここで、 $R(t)$ は時刻 t における点音源から受音点までの距離であり、 $\phi(t)$ は点音源が移動する直線と直交する面と、時刻 t における音源と受音点を結ぶ直線とのなす角である。また、 $\Delta L_d(t)$ と $\Delta L_g(t)$ はそれぞれ時刻 t における点音源から受音点までの間に存在する遮音壁による回折減衰量 (>0) および地表面による超過減衰量（地表面効果： >0 ）である。なお、回折減衰量は遮音壁による行路差と回折減衰量との関係を示した計算チャートから読みとって求める。厚みのない遮音壁による点音源に対する回折減衰量を求める際に用いられる前川チャートをもとに、在来鉄道騒音の周波数特性を考慮して計算図表を算出する。地表面効果については、鉄道総研式が参考とした ASJ

RTN-Model においてこの補正項の計算方法が示されている。一般的な在来鉄道騒音の周波数スペクトルは道路交通騒音のスペクトルと類似していることから[26, 68]，本検討についても地表面効果による超過減衰量の計算に ASJ RTN-Model 2013 の計算方法 [77]を適用することとした。

構造物，地形の断面が線路方向に一樣な場合には，点音源が $\cos^2 \phi$ の指向性をもつ場合，点音源列を含む直線から受音点までの距離 r の点における音の強さ I は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 I &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{w \cos^2 \phi dx}{2\pi(r^2 + x^2)} \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{wr^2}{2\pi} \frac{dx}{(r^2 + x^2)^2} \\
 &= \frac{wr^2}{2\pi} \left[\frac{1}{2r^3} \left\{ \frac{\left(\frac{x}{r}\right)}{1 + \left(\frac{x}{r}\right)^2} + \tan^{-1} \left(\frac{x}{r}\right) \right\} \right]_{-\infty}^{\infty}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

ここで， w は単位長さあたりのパワーである。点音源が直線上を速度 v で移動する場合，単発騒音暴露レベルは次式となる。

$$\begin{aligned}
 L_{AE,p} &= L_w - 10 \log_{10} 4\pi - 10 \log_{10} r + 10 \log_{10} \pi - 10 \log_{10} v \\
 &= L_w - 10 \log_{10} 4vr
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

ここで， L_w は音響パワーレベル[dB]， v は列車速度[m/s]， r は点音源列を含む直線から受音点までの距離[m]である。

1 列車が通過するときの単発騒音暴露レベル L_{AE} は，各点音源の単発騒音暴露レベルのエネルギー和をとればよい。すなわち，式(2.4)で表される。

$$L_{AE} = 10 \log_{10} \sum_n 10^{L_{AE,p,n}/10} \tag{2.4}$$

ここで， $L_{AE,p,n}$ は， n 番目の点音源の単発騒音暴露レベルであり， Σ は 1 列車編成に含まれる全ての点音源についての総和を示す。

2.3 波動音響解析

波動音響解析は、音場の基礎方程式である波動方程式に基づき、時間領域または周波数領域で連続系を離散系に置換して解析するものである。計算力学における代表的な手法としては、有限差分法 (Finite Difference Method : FDM)、有限要素法 (Finite Element Method : FEM)、境界要素法 (Boundary Element Method : BEM) の3つが挙げられる[69, 70]。これらは、ある周波数における定常解を求める「周波数領域解法」と過度的な音響伝搬現象の進行を時々刻々と時間を進めながら追う「時間領域解法」に分けられる。前者の代表例としては有限要素法および境界要素法、後者の代表例としては時間領域有限差分法が挙げられる。

一般に、開空間を対象としたケースでは境界要素法が広く用いられてきた[71-76]。しかし、純音に対する定常応答を求める境界要素法では解の精度を確保するためには、ある程度狭い周波数間隔で多数の2次元解を計算しておく必要があるため、計算量が膨大になる[77]。鉄道のように車体を含めた条件で解析を行う場合、車体形状に起因した固有周波数付近での解の発散を回避し、密な周波数間隔で周波数応答を計算できる利点が有限差分法にはある。

コンピュータの能力を考慮すると、現段階では対象とする音場を広い周波数範囲にわたって3次元的に取り扱うことは困難であり、実用的には2次元解析によらざるを得ないことが多い[78, 79]。この場合、現実の音場における音源が点音源、あるいは無相関な点音源が直線上に並んだ非干渉性線音源であるのに対して、数値解析では干渉性線音源として取り扱うこととなる[80]。このような音源性状の相違を解決する方法として、D.Duhamel は干渉性線音源に対する2次元の波動解から点音源や非干渉性線音源などの3次元波動解を計算する積分変換手法を提案している[81]。道路交通騒音や鉄道騒音を対象とすることを前提として音場を同一断面が無限に連続するものとモデル化し、2次元音場における応答を3次元音場における応答に変換する方法[82-84]は2.5次元解析と呼ばれることもある。しかし、2.5D-FDTD 解析は反射性の境界条件だけに適用可能で、吸音性の遮音壁やバラスト軌道など周波数特性をもつ吸音境界の扱いが難しく、実質的には反射性境界に限定される。

在来鉄道における主たる騒音源は車両下部に位置する転動音と言える。先に述べた3つの波動数値解析手法のうち、構造体の振動解析が主であるFEMの適用は利点が少ないと考える。つぎに、BEMとFDMを比較した場合、一般には開空間における騒音の伝搬問題に対してはBEMの方が有利であると考えられる。ここで、本研究で取り

扱う問題について整理すると、①解析空間は 40 m×30 m 程度に限定できる、②過渡応答の計算が可能な FDM は時間を要するかもしれないが、一度の計算でインパルス応答が得られる、③車両と軌道間、車両と遮音壁等の多重反射を含むため、BEM では狭い周波数間隔で数多く計算を繰り返さなければならず、かなりの計算時間を要する、④BEM の場合は車両・軌道・遮音壁等の形状に起因した固有周波数付近での解の発散を回避しながら計算する必要がある。

鉄道の騒音問題では直線的な構造を取扱うケースが多いことを考慮すると、鉄道断面形状をモデル化した 2 次元音場に対する解析を行うことで、騒音伝搬の特徴の把握や対策効果、軌道上の音源を線音源にモデル化した場合の沿線における騒音レベルを実用的な精度で計算することができる。ただし、個々の音源となる車両下部音は互いに無相関に音を発しているのでランダム位相の線音源（非干渉性線音源）であり、2 次元音場で想定される奥行き方向に同位相の音源（干渉性線音源）とは物理的に異なる。しかし、道路交通騒音を対象とした場合、非干渉性線音源からの応答と干渉性音源からの応答の差は小さいという検討結果がある[35, 36]。さらに、鉄道騒音についても、遮音壁等の形状等を変更した場合の対策効果に関しては、2 次元での数値解析の結果と 3 次元の縮尺模型実験の結果が概ね一致することが確認されている[19]。

これらの状況を踏まえ、本検討課題に対して有限差分法、とくに過渡応答の計算が可能な 2 次元の時間領域有限差分法（Finite-Difference Time-Domain method: FDTD 法）[85-87]を適用することとした。この章では FDTD 法について詳述する。

2.4 時間領域差分法の定式化

波動方程式を導出する2つの基本式, 「運動の式」, 「連続の式」は2次元音場では式のように表される。

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (2.5)$$

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \kappa \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.7)$$

ただし, p は音圧[Pa], $u, v,$ は x, y 各方向の粒子速度[m/s]ベクトル, κ は空気の体積弾性率[N/m²], ρ_0 は平衡状態における空気密度[kg/m³]を表す。

FDTD 法では対象とする音場をスタガードグリッド (図 2.1) に分割し, 式(2.5)~(2.7)の空間および時間に関する1階微分項を有限差分で近似する。

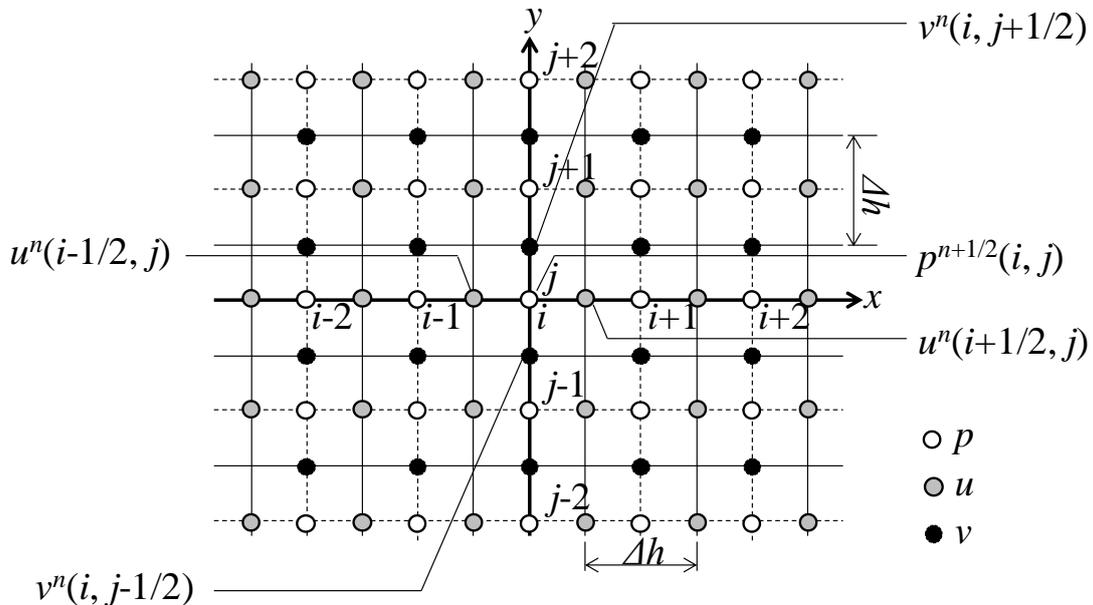


図 2.1 有限差分法におけるスタガードグリッド

図 2.1 により，音圧の定義点と粒子速度の定義点は $\Delta h/2$ だけずれている。図には示されていないが，空間と同様に時間についても音圧と粒子速度の定義時間は $\Delta t/2$ だけずれることになる。関数 $f(x)$ を h まわりにテイラー展開すると以下ようになる。

$$f\left(h + \frac{\Delta h}{2}\right) = f(h) + \frac{\Delta h}{2} \frac{\partial f(h)}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2 \frac{\partial^2 f(h)}{\partial x^2} + \frac{1}{6} \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^3 \frac{\partial^3 f(h)}{\partial x^3} + \dots$$

$$+ \frac{1}{n!} \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^n \frac{\partial^n f(h)}{\partial x^n}$$
(2.8)

$$f\left(h - \frac{\Delta h}{2}\right) = f(h) - \frac{\Delta h}{2} \frac{\partial f(h)}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2 \frac{\partial^2 f(h)}{\partial x^2} - \frac{1}{6} \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^3 \frac{\partial^3 f(h)}{\partial x^3} + \dots$$

$$+ \frac{1}{n!} \left(-\frac{\Delta h}{2}\right)^n \frac{\partial^n f(h)}{\partial x^n}$$
(2.9)

式(2.8)と式(2.9)の差をとり，式を変形すると，式(2.10)のようになり，一階微分に対する差分近似式（中心差分）となる。

$$\frac{\partial f(h)}{\partial x} = \frac{f\left(h + \frac{\Delta h}{2}\right) - f\left(h - \frac{\Delta h}{2}\right)}{\Delta h} - \frac{1}{6} \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2 \frac{\partial^3 f(h)}{\partial x^3} + \dots$$
(2.10)

式(2.10)による近似を時間，空間の双方に適用して変形すると以下の差分スキームが得られる。

$$u^{n+1}\left(i + \frac{1}{2}, j\right) = u^n\left(i + \frac{1}{2}, j\right) - \frac{\Delta t}{\rho \Delta x} \left\{ p^{n+\frac{1}{2}}(i+1, j) - p^{n+\frac{1}{2}}(i, j) \right\}$$
(2.11)

$$v^{n+1}\left(i, j + \frac{1}{2}\right) = v^n\left(i, j + \frac{1}{2}\right) - \frac{\Delta t}{\rho \Delta y} \left\{ p^{n+\frac{1}{2}}(i, j+1) - p^{n+\frac{1}{2}}(i, j) \right\}$$
(2.12)

$$p^{n+\frac{1}{2}}(i, j) = p^{n-\frac{1}{2}}(i, j) - \frac{\kappa \Delta t}{\Delta x} \left\{ u^n\left(i + \frac{1}{2}, j\right) - u^n\left(i - \frac{1}{2}, j\right) \right\}$$

$$- \frac{\kappa \Delta t}{\Delta y} \left\{ v^n\left(i, j + \frac{1}{2}\right) - v^n\left(i, j - \frac{1}{2}\right) \right\}$$
(2.13)

2.4.1 インピーダンス境界条件

吸音特性を持った境界を再現させるための最も簡単な方法として、その吸音特性を音響系と等価な機械系であるバネマス系に置き換える方法[88, 89]が提案されている。

境界面の吸音特性は、次式の表面インピーダンスによって規定されることが多い。

$$z_n = \frac{p}{u_n} \quad (2.14)$$

ただし、 z_n は法線方向外向きの音響インピーダンス、 u_n は法線方向粒子速度である。

境界面が完全反射のときは、インピーダンスは無有限大であり、この条件は境界面の粒子速度をゼロとすることによって実現される。

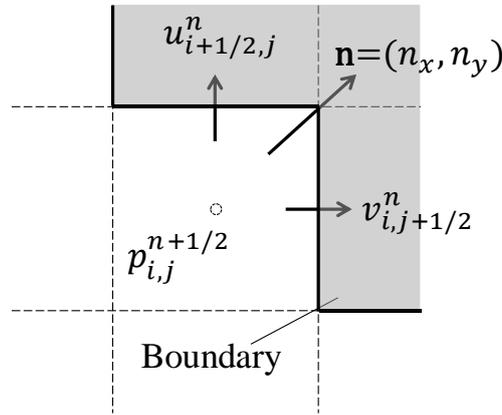


図 2.2 境界面近傍の音圧と粒子速度

一方、完全に吸収されて反射しない条件は、平面波入射に対して $z_n = \rho_0 c_0$ (c_0 は音速) であるが、通常現れる球面波 (2次元では円筒波) 入射の場合には完全な吸収条件とならず、ある程度の反射波が残る。Yee アルゴリズムでは、音圧 p と各方向の粒子速度 u, v が変数なので、壁面の音響インピーダンスが規定された場合、式(2.14)によって表される境界条件は次のように近似することができる[90]。

$$u_{i+1/2,j}^{n+1} = \frac{p_{i,j}^{n+1/2}}{z_n} n_x \quad (2.15)$$

$$v_{i,j+1/2}^{n+1} = \frac{p_{i,j}^{n+1/2}}{z_n} n_y \quad (2.16)$$

ここで、 $\mathbf{n} = (n_x, n_y)$ は境界面の外向き方向法線ベクトルである。

壁面の吸音特性を表すエネルギー的な指標として吸音率 α があり，建築音響・環境音響の分野で一般的に用いられている。このうち，垂直入射吸音率 α_0 と法線方向音響インピーダンスは以下のように関係づけられる[91]。なお，垂直入射吸音率は吸音されるエネルギーの入射波エネルギーに対する比率であり，0 から 1 の間の数値をとる。

$$\alpha_0 = 1 - \left| \frac{z_n - \rho_0 c_0}{z_n + \rho_0 c_0} \right| \quad (2.17)$$

したがって，材料の仕様から垂直入射吸音率が推定された場合，その壁面の法線方向インピーダンスは，

$$z_n = \rho_0 c_0 \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha_0}}{1 - \sqrt{1 - \alpha_0}} \quad (2.18)$$

として設定することができる。

2.4.2 FDTD (2,4) 法

Yee アルゴリズムは、微分方程式に現れる 1 階微分係数を 2 点差分で近似するが、差分参照点を増やすことにより空間差分の近似次数を上げて、計算精度を高める方法も考えられる[92, 93]。

Taylor 展開法を用いて、差分参照点を 4 点とした差分近似を導く。 $x \pm h/2$, $x \pm 3h/2$ における関数値 $f(x \pm h/2)$ および $f(x \pm 3h/2)$ の、 x まわりの Taylor 展開を考えると、以下のようになる。

$$f\left(x + \frac{h}{2}\right) = f(x) + \frac{1}{2}f^{(1)}(x)h + \frac{1}{8}f^{(2)}(x)h^2 + \frac{1}{48}f^{(3)}(x)h^3 + \frac{1}{384}f^{(4)}(x)h^4 + \dots \quad (2.19)$$

$$f\left(x - \frac{h}{2}\right) = f(x) - \frac{1}{2}f^{(1)}(x)h + \frac{1}{8}f^{(2)}(x)h^2 - \frac{1}{48}f^{(3)}(x)h^3 + \frac{1}{384}f^{(4)}(x)h^4 + \dots \quad (2.20)$$

$$f\left(x + \frac{3h}{2}\right) = f(x) + \frac{3}{2}f^{(1)}(x)h + \frac{9}{8}f^{(2)}(x)h^2 + \frac{9}{16}f^{(3)}(x)h^3 + \frac{27}{128}f^{(4)}(x)h^4 + \dots \quad (2.21)$$

$$f\left(x - \frac{3h}{2}\right) = f(x) - \frac{3}{2}f^{(1)}(x)h + \frac{9}{8}f^{(2)}(x)h^2 - \frac{9}{16}f^{(3)}(x)h^3 + \frac{27}{128}f^{(4)}(x)h^4 + \dots \quad (2.22)$$

上記 4 つの式より、 $\frac{\partial f}{\partial x}$ を計算するために、{式(2.19)−式(2.20)} $\times 27$ − {式(2.21)−式(2.22)} を計算して整理すると、

$$f^{(1)}(x) = \frac{-f\left(x + \frac{3h}{2}\right) + 27f\left(x + \frac{h}{2}\right) - 27f\left(x - \frac{h}{2}\right) + f\left(x - \frac{3h}{2}\right)}{24h} + \varepsilon \quad (2.23)$$

ここで、 ε は誤差項で、

$$\varepsilon = \frac{3}{640}f^{(5)}(x)h^4 \quad (2.24)$$

となり、4 次精度となる。なお、 $f^{(n)}$ は n 次導関数を示す。

時間に関して 2 点差分、空間に対して 4 点差分を用いた差分スキームは、FDTD (2,4) 法と呼ばれ、以下のように表すことができる。

$$u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} = u_{i+\frac{1}{2},j}^n - \frac{\Delta t}{\rho_0 h} \sum_{m=0}^1 C_m (p_{i+m,j}^{n+1/2} - p_{i-m,j}^{n+1/2}) \quad (2.25)$$

ここで、 $C_0 = \frac{9}{8}$, $C_1 = \frac{1}{24}$ である。

2.4.3 高次差分によるスキームの高精度化

一般的な FDTD スキームは式(2.25)に示されるように離散化幅 Δh に対して 2 次の精度となるが、テイラー展開法によれば参照点を増やすことによって精度をさらに上げることが可能である[94]。例えば計算点を中心とした $2(M+1)$ 点で差分近似する (M は整数) とき、音圧 $p(x)$ の x 方向偏微分係数をテイラー展開法により導出すると次式となる。

$$\frac{\partial p(x)}{\partial x} = \sum_{m=0}^M \left\{ \frac{C_m}{\sum_{l=0}^L (2l+1)C_l} \right\} \left\{ \frac{p(x + (m + \frac{1}{2})\Delta x) - p(x - (m + \frac{1}{2})\Delta x)}{\Delta x} \right\} \quad (2.26)$$

$$+ \frac{2}{(2M+3)!} \sum_{m=0}^M C_m \left(\frac{2m+1}{2} \right)^{2M+3} \Delta x^{2(M+1)} \frac{\partial^{2M+3} p(x)}{\partial x^{2M+3}} + \dots$$

$$C_m = (-1)^{m+1} \frac{(2M-1)^2 (2M+1)^2}{\{2(M-m)+1\}^2} \frac{(2M+1)!}{m(2M-m+1)!} \quad (2.27)$$

このとき、近似のオーダーは $O(\Delta x^{2(M+1)})$ となり、参照点の数が増加するほど微分係数の近似精度が高くなる。式(2.26)中、 $\frac{C_m}{\sum_{l=0}^L (2l+1)C_l} = D_m$ とすれば式(2.11)~(2.13)に対応する差分スキームは以下のようなになる。

$$u^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) = u^n \left(i + \frac{1}{2}, j \right) - \frac{\Delta t}{\rho_0 h} \sum_{m=0}^M D_m \{ p^{n+1/2}(i+m+1, j) - p^{n+1/2}(i-m, j) \} \quad (2.28)$$

$$v^{n+1} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) = v^n \left(i, j + \frac{1}{2} \right) - \frac{\Delta t}{\rho_0 h} \sum_{m=0}^M D_m \{ p^{n+1/2}(i, j+m+1) - p^{n+1/2}(i, j-m) \} \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned}
p^{n+1/2}(i,j) &= p^{n-1/2}(i,j) \\
&\quad - \frac{\kappa \Delta t}{\Delta h} \\
&\quad \times \left[\sum_{m=0}^M D_m \left\{ u^n \left(i + m + \frac{1}{2}, j \right) - u^n \left(i - m - \frac{1}{2}, j \right) \right\} \right. \\
&\quad \left. + \sum_{m=0}^M D_m \left\{ v^n \left(i, j + m + \frac{1}{2} \right) - v^n \left(i, j - m - \frac{1}{2} \right) \right\} \right]
\end{aligned} \tag{2.30}$$

なお、時間項についても同様に高次差分が考えられるが、時間項に対して参照点を増すことは計算機の必要メモリの増大に直接つながるため、これを行わないこととした。

2.4.4 高次スキームに対する安定・分散性解析

von-Neumann の安定性解析によれば、差分スキームが安定に動作するための条件を導くことができる。von-Neumann の安定性解析とは、ある時刻に次式で表される正弦平面波を差分スキームに与えた場合に次の時間ステップに現れる離散化誤差を評価するものである。

図 2.3 のように、2 次元音場において x 軸に対して角度 θ の方向に進行する波数 k ($=\omega/c$)、振幅 1 の平面波は、座標点 (x, y) において以下のように表される。

$$p_0(x, y, t) = e^{jk_x x} e^{jk_y y} e^{-j\omega t} \tag{2.31}$$

ただし、 k_x , k_y は波数 k の方向成分で、 $k_x = k \cos\theta$, $k_y = k \sin\theta$ 。

離散化時間幅 Δt あたりの振幅の複素変化量を Z とすると、時刻 $n\Delta t$ 後の $l_x \Delta x$, $l_y \Delta y$ 離れた位置の粒子速度、音圧 $[u^n, v^n, p^n]^T$ は次式で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} u^n \\ v^n \\ p^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^0 \\ v^0 \\ p^0 \end{bmatrix} Z^n e^{-jk_x(l_x \Delta h)} e^{-jk_y(l_y \Delta h)} \tag{2.32}$$

ここで、 $[u^0, v^0, p^0]^T$ は粒子速度および音圧の初期値、 (l_x, l_y) は格子点座標を表す。

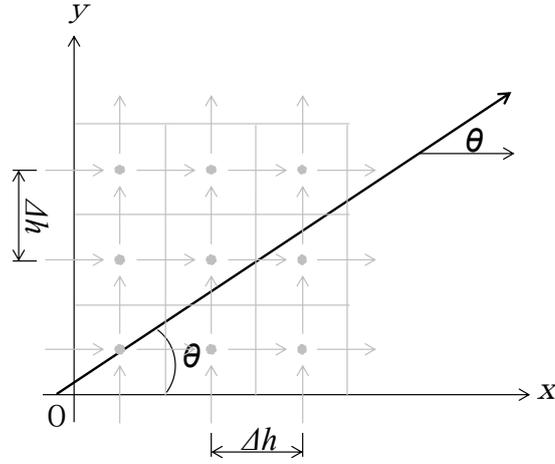


図 2.3 平面波の伝搬方向

$$u^{n+1}\left(l_x + \frac{1}{2}, l_y\right) - u^n\left(l_x + \frac{1}{2}, l_y\right) \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned}
&= (Z^{1/2} - Z^{-1/2})u^0 Z^{n+1/2} e^{-jk_x((l_x+1/2)\Delta h)} e^{-jk_y(l_y\Delta h)} \\
&p^{n+1/2}(l_x + m + 1, l_y) - p^{n+1/2}(l_x - m, l_y) \\
&= p^0 Z^{n+\frac{1}{2}}(e^{-jk_x((l_x+m+1)\Delta h)} - e^{-jk_x((l_x-m)\Delta h)}) e^{-jk_y(l_y\Delta h)} \\
&= p^0 Z^{n+\frac{1}{2}} e^{-jk_x((l_x+\frac{1}{2})\Delta h)} e^{-jk_y(l_y\Delta h)} (e^{-jk_x((m+1/2)\Delta h)} \\
&\quad - e^{-jk_x((-m-1/2)\Delta h)}) \quad (2.34) \\
&= -p^0 Z^{n+\frac{1}{2}} e^{-jk_x((l_x+\frac{1}{2})\Delta h)} e^{-jk_y(l_y\Delta h)} 2j \sin(k_x(m + \frac{1}{2})\Delta h)
\end{aligned}$$

同様に y 方向は

$$v^{n+1}\left(l_x, l_y + \frac{1}{2}\right) - v^n\left(l_x, l_y + \frac{1}{2}\right) \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned}
&= (Z^{1/2} - Z^{-1/2})v^0 Z^{n+1/2} e^{-jk_x(l_x\Delta h)} e^{-jk_y((l_y+1/2)\Delta h)} \\
&p^{n+1/2}(l_x, l_y + m + 1) - p^{n+1/2}(l_x, l_y - m) \\
&= -p^0 Z^{n+\frac{1}{2}} e^{-jk_x(l_x\Delta h)} e^{-jk_y((l_y+\frac{1}{2})\Delta h)} 2j \sin(k_y(m + \frac{1}{2})\Delta h) \quad (2.36)
\end{aligned}$$

$$p^{n+1/2}(i, j) - p^{n-\frac{1}{2}}(i, j) = (Z^{1/2} - Z^{-1/2}) p^0 Z^n e^{-jk_x(l_x \Delta h)} e^{-jk_y(l_y \Delta h)} \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} u^n \left(i + m + \frac{1}{2}, j \right) - u^n \left(i - m - \frac{1}{2}, j \right) \\ = u^0 Z^n e^{-jk_x(l_x \Delta h)} e^{-jk_y(l_y \Delta h)} 2j \sin(k_x \left(m + \frac{1}{2} \right) \Delta h) \end{aligned} \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} v^n \left(i, j + m + \frac{1}{2} \right) - v^n \left(i, j - m - \frac{1}{2} \right) \\ = v^0 Z^n e^{-jk_x(l_x \Delta h)} e^{-jk_y(l_y \Delta h)} 2j \sin(k_y \left(m + \frac{1}{2} \right) \Delta h) \end{aligned} \quad (2.39)$$

最終的にこれらの方程式を行列にまとめると式(2.40)が得られる。

$$\begin{bmatrix} Z^{\frac{1}{2}} - Z^{-\frac{1}{2}} & 0 & -\frac{\Delta t}{\rho_0 \Delta h} \sum_{m=0}^M C_m 2j \sin \frac{k_x h}{2} \\ 0 & Z^{\frac{1}{2}} - Z^{-\frac{1}{2}} & -\frac{\Delta t}{\rho_0 \Delta h} \sum_{m=0}^M C_m 2j \sin \frac{k_y h}{2} \\ -\frac{\kappa \Delta t}{\Delta h} \sum_{m=0}^M C_m 2j \sin \frac{k_x h}{2} & -\frac{\kappa \Delta t}{\Delta h} \sum_{m=0}^M C_m 2j \sin \frac{k_y h}{2} & Z^{\frac{1}{2}} - Z^{-\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^0 \\ v^0 \\ p^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

式(2.40)のベクトル $[u^0, v^0, p^0]^T$ が非ゼロベクトルであるためには、 3×3 ベクトルの行列式の値がゼロとならなくてはならない。この条件により、 Z に関する以下の方程式が得られる。

$$\begin{aligned} (Z^{1/2} - Z^{-1/2})^3 - \left(Z^{\frac{1}{2}} - Z^{-\frac{1}{2}} \right) \left\{ \frac{\kappa \Delta t}{\Delta h} \sum_{m=0}^M C_m 2j \sin \left(k_x \left(m + \frac{1}{2} \right) \Delta h \right) \right\}^2 \\ - \left(Z^{\frac{1}{2}} - Z^{-\frac{1}{2}} \right) \left\{ \frac{\kappa \Delta t}{\Delta h} \sum_{m=0}^M C_m 2j \sin \left(k_y \left(m + \frac{1}{2} \right) \Delta h \right) \right\}^2 \end{aligned} \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned} Z^2 - 2Z \left\{ \sum_{m=0}^M C_m 2j \sin \left(k_x \left(m + \frac{1}{2} \right) \Delta h \right) \right\}^2 \\ + \left\{ \sum_{m=0}^M C_m 2j \sin \left(k_y \left(m + \frac{1}{2} \right) \Delta h \right) \right\}^2 \left(\frac{\kappa \Delta t}{\Delta h} \right)^2 + 1 = 0 \end{aligned} \quad (2.42)$$

ここで、 $\gamma = c\Delta t/\Delta h$ 、 $\nu = \Delta h/\lambda$ として A を以下のとおりとすると Z に関する方程式が得られる。

$$A = \left[\left\{ \sum_{m=0}^M C_m j \sin \left(2\pi \cos \theta \left(m + \frac{1}{2} \right) \nu \right) \right\}^2 + \left\{ \sum_{m=0}^M C_m j \sin \left(2\pi \sin \theta \left(m + \frac{1}{2} \right) \nu \right) \right\}^2 \right] \gamma^2 \quad (2.43)$$

$$Z^2 - 2AZ + 1 = 0 \quad (2.44)$$

式(2.44)の解は

$$Z = \begin{cases} A \pm \sqrt{A^2 - 1} & (A < -1) \\ A \pm j\sqrt{A^2 - 1} & (-1 \leq A \leq 1) \end{cases} \quad (2.45)$$

となるが、式(2.45)において Z の絶対値が 1 より大きい場合、時間ステップとともに振幅が増大し、発散する。したがって $-1 \leq A \leq 1$ が安定条件である。

ここで、正弦関数 $|\sin \theta| \leq 1$ 、 θ : 実数の条件を利用すると、式(2.44)が解をもつ条件は式(2.46)で表される。

$$\begin{aligned} 0 &\leq \left[\left\{ \sum_{m=0}^M C_m j \sin \left(2\pi \cos \theta \left(m + \frac{1}{2} \right) \nu \right) \right\}^2 + \left\{ \sum_{m=0}^M C_m j \sin \left(2\pi \sin \theta \left(m + \frac{1}{2} \right) \nu \right) \right\}^2 \right] \gamma^2 \\ &\leq 2 \left[\sum_{m=0}^M |C_m| \right]^2 \gamma^2 \leq 1 \end{aligned} \quad (2.46)$$

したがって、安定化の条件は式(2.47)で表される。

$$\gamma = \frac{c\Delta t}{\Delta h} \leq \frac{1}{\sqrt{2} \sum_{m=0}^M |C_m|} \quad (2.47)$$

差分近似の次数 $M+1$ に対する γ を表 2.1 に示す。表 2.1 より、差分近似の増加（高次化）に伴い、時間離散幅を小さくとらなければならない。

表 2.1 差分近似の次数 $M+1$ の差分近似の安定化条件

M (差分近似の次数 $M+1$)	$\frac{1}{\sqrt{2} \sum_{m=0}^M C_m }$
0	0.70711
1	0.60609
2	0.56948
3	0.55100

2.4.5 開領域における吸音境界条件

差分法は領域型解法であるため、開領域を対象とする場合には境界面からの反射波を低減するために境界面を特別なモデルで近似する必要がある[95]。

領域終端にエネルギーを吸収する層（吸音層）を設定することにより、音場領域内に戻る反射波を減衰させる。この概念に基づく手法で最も効果的であるとされているのが PML（Perfectly Matched Layer）[96, 97]である。

PMLでは、空気領域と吸音層の特性インピーダンスが共に入力波の周波数および入射角度に関わらず一致する仮想的な媒質を設定することにより、両領域の境で反射が発生しないようにしている。線形音波に対する PML では、吸音層内における音響伝搬の支配方程式に減衰定数 R_x , R_y を導入した以下の式を用いる。

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + R_x u + \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial p_x}{\partial t} + \frac{R_x}{\rho_0} p_x + \kappa \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2.48)$$

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + R_y v + \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial p_y}{\partial t} + \frac{R_y}{\rho_0} p_y + \kappa \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.49)$$

$$p = p_x + p_y \quad (2.50)$$

$R_x=R_y=0$ として整理すると、空気中の音波伝搬を表す式(2.5)～(2.7)と一致する。

図 2.4 に、2 次元音場を対象として PML の設定の概要を示す。x 方向に音波を浸透させる場合には $R_x=0$ とする。PML 層の幅を N グリッドとする。図中破線で示す、空気領域と PML 層の境で R_x, R_y の値がゼロから非ゼロの値へと変化すると、その不連続性によって数値的な反射波が生じ、誤差要因となる。そこで、本論文では次式のように空気領域と PML 層の境からの距離の関数として、減衰定数 R の値を空間的に滑らかに変化させて与える。

$$R(ih) = R_{\max} \left(\frac{ih}{Nh} \right)^m \quad (2.51)$$

ただし、 ih は interface からの距離、 Nh は PML 境界層厚さ、 R_{\max} は減衰定数の最大値、 m は R の空間分布を与える定数であり、文献を参考に $m=3$ 、 $R_{\max}=1.47 \times 10^3$ とする[97, 100]。計算領域終端部からの反射音を十分に低減するため、幅 5 m の境界吸収層を配置する。

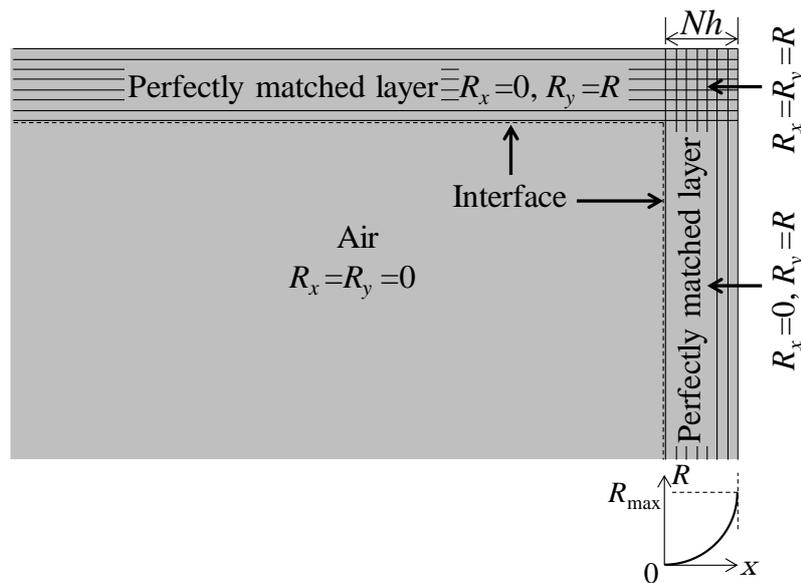


図 2.4 PML の設定

2.4.6 数値解析で用いる音源

線形・時不変のシステムでは、インパルス応答はそのシステムの全ての情報を含む重要な物理量である。FDTD 法は時間発展型の解法であるため、インパルス音源を近似する空間関数を初期値として解けば、インパルス応答の近似解を直接求めることが

でき、非常に有効である。インパルス音源は理想的にはデルタ関数で表されるが、強い不連続性をもつため、微分方程式を離散系で表現して解く数値解法でこれをそのまま取り扱うことはできない。そこで、音源の初期条件としてはある程度連続性をもった滑らかな関数を設定することになる。このような関数として正弦パルスやガウシアンパルスを初期の空間分布として与える手法が提案されている。

① 正弦パルス

$$p_0(r) = \begin{cases} 1 + \cos\left(\frac{\pi r}{d}\right) & (r \leq d) \\ 0 & (r > d) \end{cases} \quad (2.52)$$

② ガウシアンパルス

$$p_0(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{d^2}\right) \quad (2.53)$$

ここで、 r は音源からの距離[m]、 d は初期空間波形の幅を代表するパラメータ[m]である。音場解析では初期の粒子速度は0とする。正弦パルスはその特性上高周波数成分を多く含み分散誤差が発生しやすいのに対し、ガウシアンパルスは高周波成分が少なく安定性が高いため[98]、本論文ではガウシアンパルスを用いることにする。

時刻 $t=0$ で式(2.53)の音圧分布をとり、初期速度が全領域にわたってゼロとなる条件のもとで自由空間中の音波伝搬を解くと下式のようなになる[99]。

$$p(r, t) = \frac{1}{2r}(r - ct)e^{-\frac{(r-ct)^2}{d^2}} + \frac{1}{2r}(r + ct)e^{-\frac{(r+ct)^2}{d^2}} \quad (2.54)$$

式(2.54)第一項は音源から外側方向に向かう進行波、第二項は無限遠から音源に向かう後退波を表している。自由音場遠方では、式(2.54)の寄与はゼロに漸近し、進行波の影響のみと考えるもよい。そこで第一項をフーリエ変換してスペクトルを求めると下式のようなになる。

$$Fp(r, t) = \frac{\sqrt{\pi}d^2}{2rc^2} e^{-j\omega \frac{r}{c}} \cdot \omega d \cdot e^{-\frac{(\omega d)^2}{4c^2}} \quad (2.55)$$

これを $\omega d/c$ をパラメータとして図示したものが図 2.5 である。この初期条件による音波伝搬解には以下の特徴が見られる。

- (1) 低周波数帯域では周波数に比例してスペクトル成分が増加する。

- (2) スペクトルのピークは $\omega d/c = 2$ ，すなわち $f = c / (2\pi d)$ で現れる．ピーク周波数以上の周波数では急激にスペクトル成分が低下するローパスフィルタの性状を示す。
- (3) ピーク周波数は初期空間波形の幅を代表するパラメータ d に反比例する。

また，図 2.5 を見ると，ピークから 3dB 下がったところが， $\omega d/c = e$ である。本研究ではその点を対象とする周波数の上限 f_{\max} と設定し，

$$d = \frac{ce}{\omega_{\max}} = \frac{ce}{2\pi f_{\max}} \quad (2.56)$$

となるように d を設定した。例えば 2.5kHz の 1/3 オクターブバンド上限を f_{\max} とした場合， $d=0.06$ m 程度である。

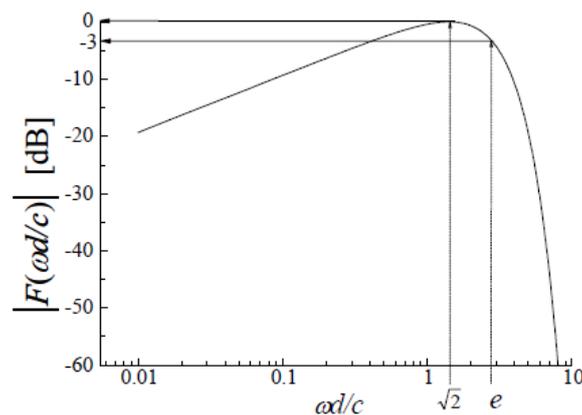


図 2.5 ガウシアンパルスのスペクトル

数値計算の上限周波数を 2.5 kHz に設定し，差分近似は 4 次 ($M=3$)，時間および空間の離散化幅を $\Delta t=15.6 \mu\text{s}$ ($1/64,000$ s)， $\Delta x=\Delta y=16$ mm とすることで，安定化条件 $\gamma=c\Delta t/\Delta h=0.332 < 0.551$ を満足させた。また，初期音圧の幅は $d=\Delta h \times 3=48$ mm とした [100]。

2.5 まとめ

本章では、既往の在来鉄道騒音の予測計算方法および波動音響解析について概説した。まず、本論文において検討する既往の騒音予測式（鉄道総研式）の計算手法および適用範囲について概説した。つぎに、本研究で用いる時間領域有限差分法（FDTD法）による音場の数値解析手法について概説するとともに、2次元音場内の基本方程式である「運動の式」および「連続の式」の2つの偏微分方程式に、スタガードグリッド系による空間差分と時間差分の概念を適用し、その基本方程式の定式化を行った。また、開領域における吸音境界条件として PML 無反射境界条件や、音源条件としてガウシアンパルスに関する設定方法について述べた。さらに、空間および時間の分解能と数値計算の安定性の関係を差分の近似次数をパラメータに整理した。

第3章 在来鉄道騒音に対する予測手法の適用に関する検討

3.1 概要

近年，都市部においては沿線に近接して建築物が建てられている場合が多く，これらの高層階に対する鉄道騒音の正確な予測や低減対策が課題となっている。これまでに公表されている在来鉄道騒音の予測手法の中で，森藤らや安部らの提案手法が広く用いられているが，沿線の高所空間における予測精度は十分に検証されていない。

鉄道騒音について実車の走行試験や模型実験を用いた転動音の仰角方向の指向特性の検討が行われたが，長倉らの研究[32]では車両断面内の鉛直方向で小さく，水平方向に強い指向特性を有していることを示しているが，試験線における実車試験データ（列車速度は 32～33km/h）による検討結果である。一方，中澤の検討[34]によると，新幹線鉄道沿線における騒音測定の結果，高架橋と測定点までの間に建つ建物の遮蔽効果を含んだ結果ではあるが，地上付近より高所で騒音レベルが大きくなることを示している。

以上の背景から，騒音予測・対策が求められる在来鉄道の営業線において高所空間を含めた検証測定を行う必要があると考えられる。そこで，まず，関東近郊の在来鉄道（平地・盛土・高架区間の3箇所）において沿線の高所空間を含む騒音分布測定を実施する。この実測結果をもとに，転動音および車両機器音を主音源とする在来鉄道の走行音の空間分布を求めると共に，既往の騒音予測式（鉄道総研式）の高所空間への適用について検討を行う。

また，波動数値解析により沿線の騒音伝搬を予測する場合，計算メモリや計算時間の制約から2次元解析を適用することが多い。しかし，実際の鉄道騒音は非干渉性線音源であるのに対して，2次元解析では干渉性線音源を仮定するため，解析結果の妥当性について検討する必要がある。そこで，上記の騒音分布をもとに，鉄道騒音の伝搬予測に対して2次元波動数値解析手法を適用する際の音源のモデル化について検討を行い，予測精度を検証する。

3.2 高所空間を含めた騒音伝搬特性（鉛直断面の指向特性）

の把握

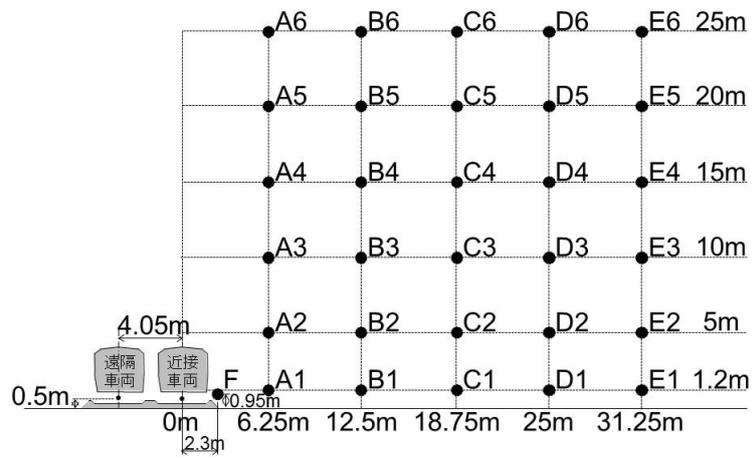
3.2.1 測定箇所

関東近郊の在来鉄道の路線から、平地区間、盛土区間、コンクリート高架橋区間の各線路構造を対象に、周囲に建物が少なく十分な見通しが確保できる測定箇所として、壁無しの平地区間と盛土区間、直壁のコンクリート高架橋区間の3箇所を選定した。

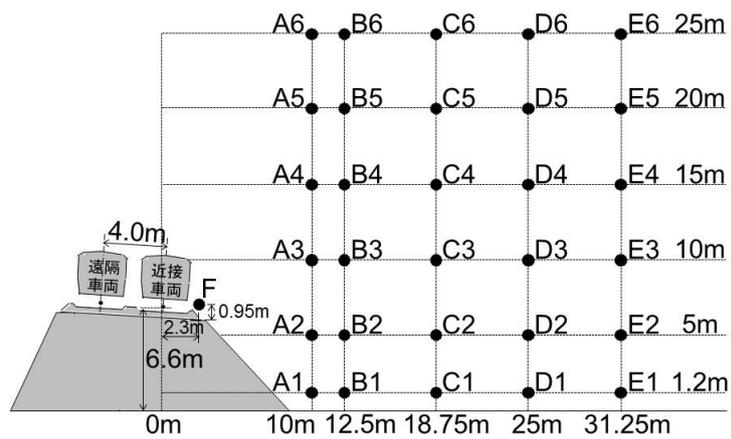
3.2.2 測定方法

図 3.1 に示すように、近接側軌道中心からの水平距離 6.25 m（盛土区間のみ 10 m）～31.25 m、地上からの高さ 1.2 m～25 m の範囲に 30 点、軌道近傍に 1 点、計 31 の測定点を配置した。コンクリート高架橋区間では、さらに遮音壁天端 1 点、高架橋下 2 点（地上からの高さ 1.2 m, 5.0 m）の測定点を追加した[101, 102]。測定状況を図 3.2 に示す。いずれの線路構造においても、沿線の地盤面はアスファルト舗装もしくは固い土の反射性で、ほぼ平坦な地面であった。

今回の騒音測定は近郊型電車が対象で、天候が良く、風の弱い日（風速 1.5 m/s 以下）を選んで測定を実施した。結果、(a)平地区間は列車速度 $V=53\sim63$ km/h、(b)盛土区間は $V=72\sim80$ km/h、(c)コンクリート高架橋区間は $V=78\sim96$ km/h の実測データが得られた。1 箇所あたりの測定本数は 30～50 列車であったが、とくに暗騒音の影響が小さい測定列車を対象に分析を行った。

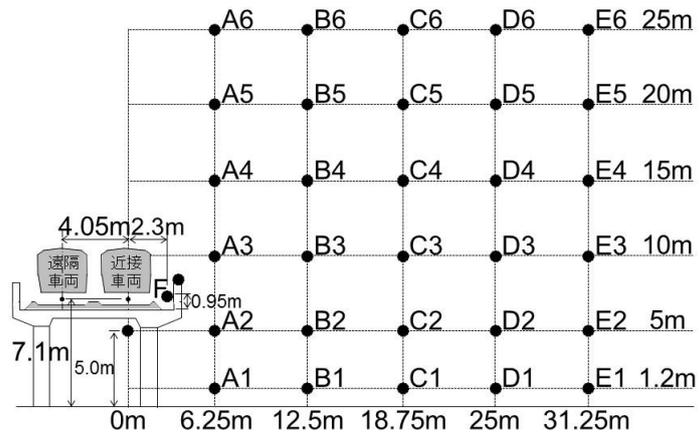


(a) 平地区間



(b) 盛土区間

図 3.1 在来鉄道沿線における測定点配置図
(平地区間, 盛土区間)



(c) コンクリート高架橋区間

図 3.1 在来鉄道沿線における測定点配置図
(コンクリート高架橋区間)



图 3.2 測定状況

3.2.3 測定結果の概要

(1) 線路構造別の走行音の伝搬特性

図 3.3 に、軌道近傍の単発騒音暴露レベル L_{AE} を基準とした相対レベルの空間分布を線路構造別に示す。各分布図は 3 列車のパワー平均で、 V_{avg} はその平均速度を示す。

(a) 平地区間 ($V_{avg} = 55$ km/h)

列車の走行音は、走行車線の軌道中心付近から斜め上 $30\sim 40^\circ$ に向かって強く伝搬していて、この向きに強い指向性が見られる。また、地上高さ 1.2 m は他の高さより大きな距離減衰特性となっている。

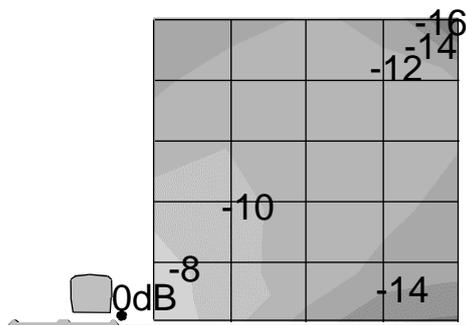
(b) 盛土区間 ($V_{avg} = 76$ km/h)

高所空間について見ると、平地区間と同様に、斜め上 $30\sim 40^\circ$ 方向に強く伝搬していることが分かる。軌道より低い範囲（地上高さ 1.2 m, 5.0 m）では高さが低くなるほど騒音レベルが低下しているが、これは盛土法面の肩部による回折減衰の影響である。

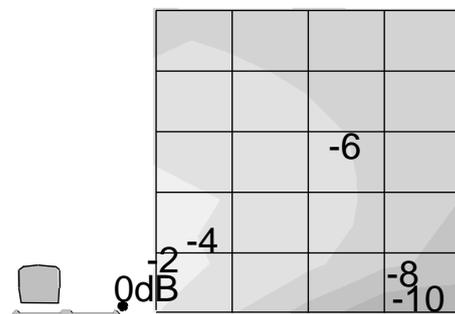
(c) コンクリート高架橋区間 ($V_{avg} = 93$ km/h)

高所空間では、車両と反射性直壁の間で多重反射した音が遮音壁天端を越えて、斜め $40\sim 45^\circ$ 方向に強く伝搬している。一方、直壁背後では、直壁による回折減衰により、高さが低くなるほど騒音レベルが低下している。また、遮音壁天端 (-3.5 dB) と比べて高架橋下 (-25.9 dB) の相対レベルが非常に小さいことから、沿線騒音に対する高架構造物音の寄与度は低いと推察される。

以上より、通常の騒音評価点である地上からの高さ 1.2 m 地点よりも上方の地点の方が、騒音が大きくなることが明らかになった。高さ方向の騒音を評価するにあたっては、これらの騒音伝搬特性を考慮していくことが必要と考えられる。

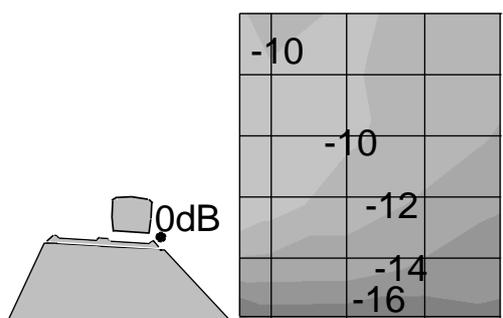


(a-1) 近接車両

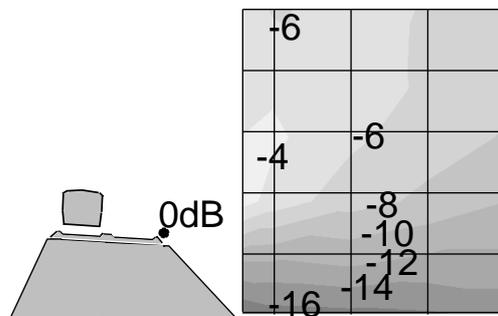


(a-2) 遠隔車両

(a) 平地区間

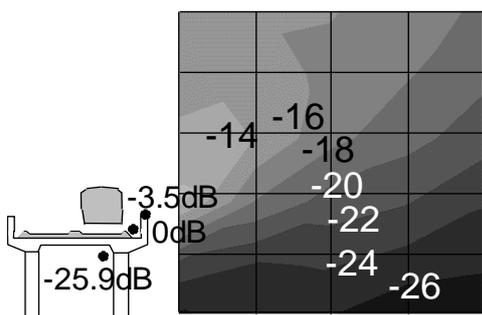


(b-1) 近接車両

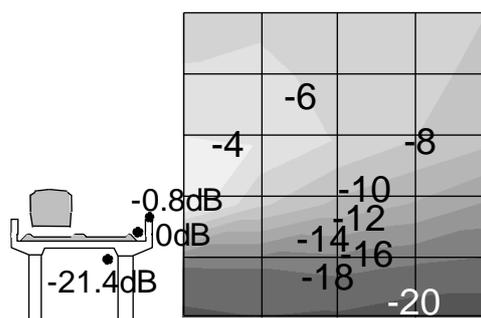


(b-2) 遠隔車両

(b) 盛土区間



(c-1) 近接車両



(c-2) 遠隔車両

(c) コンクリート高架橋区間

図 3.3 軌道近傍を基準とした騒音レベルの空間分布

(2) 走行音の周波数特性

コンクリート高架橋区間の近接車両における軌道近傍（図 3.1(c) の F 点）、高架橋直下、地上付近（水平距離 12.5 m、地上高さ 1.2 m）、高所空間（水平距離 12.5 m、地上高さ 25 m）の 3箇所での単発騒音暴露レベル L_{AE} の周波数特性を求めた。図 3.4 に分析結果を示す。高所空間（水平距離 12.5 m、地上高さ 25 m）での周波数特性は軌道近傍とほぼ等しく、高架橋直下とは大きく異なっている。この結果からも、高所空間における主音源は転動音や車両機器音であり、高架構造物音の寄与度は低いことが分かる。

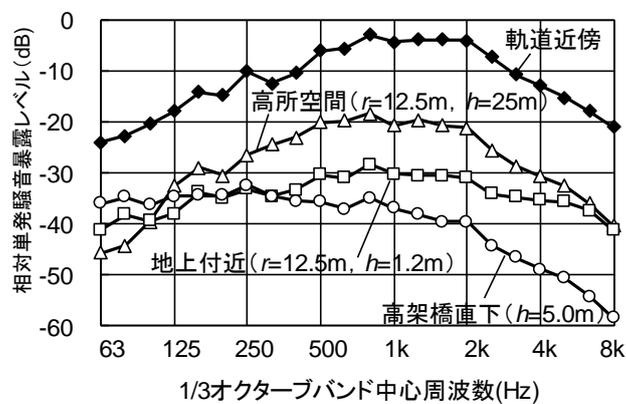


図 3.4 走行音の周波数特性（コンクリート高架橋区間、近接車両）

3.3 既往の騒音予測式の適用に関する検討

3.3.1 検討概要

式(3.1)に示す鉄道総研式を用いて各測定点における単発騒音暴露レベル L_{AE} を予測する。

$$L_{AE} = L_w - 10 \log_{10} 4vr - \Delta L_{dl} - \Delta L_g \quad (3.1)$$

ここで、 v は列車速度[m/s]、 r は点音源列を含む直線から受音点までの距離[m]、 ΔL_{dl} は指向性線音源に対する回折減衰量、 ΔL_g は地表面による超過減衰量である。

(1) パワーレベルの算出

鉄道総研式では台車（転動音の音源）やモータファン搭載（車両機器音の音源）の数から速度乗則（列車速度 v ）に従ってパワーレベル L_w を設定するが、2.2.1 節で述べたように、鉄道総研式で設定された主要音源のパワーレベル L_w は一般的な高架橋（高さ 7 m 程度）での沿線 12.5 m 点での騒音レベルを予測した結果が既存手法[26, 65]での予測結果（パワーレベルのばらつきの中央値を用いた場合）と一致するように定めたものであり、これと異なる車両が走行する場合はパワーレベルの値が異なり、予測値と実測値が乖離する要因となるため、実測データに基づく音源パワーの推定を行う。

沿線の単発騒音暴露レベルから音源パワーを推定した場合、音源の指向性や地面の超過減衰など伝搬の影響が含まれる可能性がある。したがって、各測定点での単発騒音暴露レベル L_{AE} の予測値は、軌道近傍点（鉄道の敷地端部）での単発騒音暴露レベル $L_{AE,ref}$ から算出したパワーレベル L_w をもとに算出した。

パワーレベル L_w は軌道近傍点での単発騒音暴露レベル $L_{AE,ref}$ をもとに式(3.2)より、列車速度 v [m/s]、列車の走行軌道から観測点までの最短距離 r_{ref} [m]から算出する。

$$\begin{aligned} L_{AE} &= L_w - 10 \log_{10} 4vr \\ &= L_w - 6 - 10 \log_{10} v - 10 \log_{10} r \\ \therefore L_w &= L_{AE,ref} + 6 + 10 \log_{10} v + 10 \log_{10} r_{ref} \end{aligned} \quad (3.2)$$

(2) 地表面効果による補正量

地表面効果については、鉄道総研式が参考とした ASJ RTN-Model においてこの補正項の計算方法が示されている。一般的な在来鉄道騒音の周波数スペクトルは道路交通騒音のスペクトルと類似していることから[26, 68]、本検討についても地表面効果による超過減衰量の計算に ASJ RTN-Model 2013[30]の計算方法を適用することとした。

地表面効果による補正量は、音源から予測地点に至る間の軌道面、構造物の法面および沿線の地面の地表面ごとに伝搬経路に対応した減衰効果の和で近似する。地表面効果による補正值 ΔL_g の基本式は以下に示すとおりである。

$$\Delta L_g = \sum_{i=1}^n \Delta L_{\text{grnd},i} \quad (3.3)$$

$$\Delta L_{\text{grnd},i} = \begin{cases} -K_i \log_{10} \frac{r_i}{r_{c,i}} & r_i \geq r_{c,i} \\ 0 & r_i < r_{c,i} \end{cases} \quad (3.4)$$

ここで、 $\Delta L_{\text{grnd},i}$ は i 番目の地表面による減衰に関する補正量[dB]、 K_i は i 番目の地表面による超過減衰に関する係数、 r_i は i 番目の地表面上の伝搬距離[m]、 $r_{c,i}$ は i 番目の地表面による超過減衰が生じ始める距離[m]である。

地表面上での距離減衰を与える係数 K_i は地表面の種類と平均伝搬経路高 $H_{a,i}$ を用いて次式で計算する。

① 柔らかい畑地

$$K_i = \begin{cases} 3.93\sqrt{H_{a,i} + 0.081} + 15.1 & 0.6 \leq H_{a,i} < 1.5 \\ 20.0 & H_{a,i} \geq 1.5 \end{cases} \quad (3.5)$$

② 草地

$$K_i = \begin{cases} 6.98\sqrt{H_{a,i} - 0.537} + 9.85 & 0.6 \leq H_{a,i} < 1.5 \\ 2.48\sqrt{H_{a,i} - 1.42} + 16.0 & 1.5 \leq H_{a,i} < 4.0 \\ 20.0 & H_{a,i} \geq 4.0 \end{cases} \quad (3.6)$$

③ 固い地面

$$K_i = \begin{cases} 4.97H_{a,i} - 0.472H_{a,i}^2 + 5.0 & 0.6 \leq H_{a,i} < 3.0 \\ 1.53\sqrt{H_{a,i} - 2.94} + 15.3 & H_{a,i} \geq 3.0 \end{cases} \quad (3.7)$$

ここで、平均伝搬経路高 $H_{a,i}$ は図 3.5 に示すように最短伝搬経路を考え、対象とする地表面の両端における伝搬高さ H_{i-1} と H_i の平均値として次式で計算する。

$$H_{a,i} = \frac{H_{i-1} + H_i}{2} \quad (3.8)$$

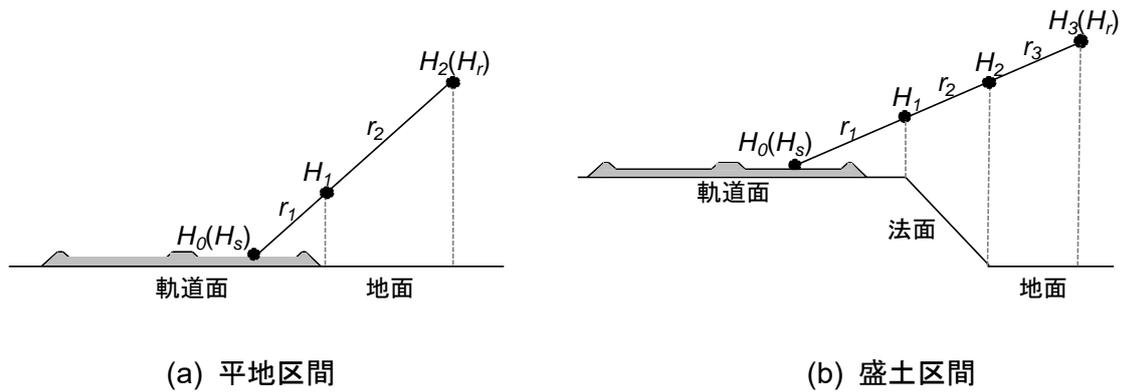


図 3.5 各地表面上の伝搬経路高さ

地表面による超過減衰が生じ始める距離 $r_{c,i}$ は次式で与えられる。

$$r_{c,i} = g(Z_i) \cdot (H_{a,i})^{f(Z_i)} \quad (3.9)$$

ここで、 Z_i は対象とする地表面の両端における伝搬高さ H_{i-1} と H_i から次式で計算する。

$$Z_i = \frac{|H_{i-1} + H_i|}{(H_{i-1} + H_i)} \quad (3.10)$$

また、 $f(Z_i)$ および $g(Z_i)$ は Z_i の関数として計算する。

①柔らかい畑地

$$f(Z_i) = \begin{cases} 2.09 & 0.0 \leq Z_i < 0.4 \\ 2.09 - 0.124(Z_i - 0.4) \\ \quad + 0.711(Z_i - 0.4)^2 \\ \quad - 2.47(Z_i - 0.4)^3 & 0.4 \leq Z_i < 0.8 \\ 2.00 - 1.72(Z_i - 0.8) \\ \quad + 21.6(Z_i - 0.8)^2 \\ \quad - 189(Z_i - 0.8)^3 & 0.8 \leq Z_i < 1.0 \end{cases} \quad (3.11)$$

②草地

$$f(Z_i) = \begin{cases} 2.3 & 0.0 \leq Z_i < 0.4 \\ 2.3 - 0.387(Z_i - 0.4) \\ \quad + 0.920(Z_i - 0.4)^2 \\ \quad - 5.47(Z_i - 0.4)^3 & 0.4 \leq Z_i < 1.0 \end{cases} \quad (3.12)$$

③固い地面

$$f(Z_i) = \begin{cases} 2.3 & 0.0 \leq Z_i < 0.2 \\ 2.3 + 0.170(Z_i - 0.2) \\ \quad - 1.38(Z_i - 0.2)^2 \\ \quad - 0.648(Z_i - 0.2)^3 & 0.2 \leq Z_i < 1.0 \end{cases} \quad (3.13)$$

$g(Z_i)$ は次式で計算する。

$$g(Z_i) = a + bZ_i + cZ_i^2 + dZ_i^3 \quad (3.14)$$

上式における係数 a , b , c , d は、地表面の種類別に表 3.1 で与えられる。ただし、固い地面で $H_{a,i} < 1.1$ の場合には、 $r_{c,i}$ は次式で計算する。

$$r_{c,i} = g(Z_i) \cdot (1.1)^{f(Z_i)} \cdot 10^{(H_{a,i}-1.1)h(Z_i)} \quad (3.15)$$

ここで,

$$h(Z_i) = 0.517 - 0.0592Z_i - 1.30Z_i^2 + 1.19Z_i^3 \quad (3.16)$$

表 3.1 $g(Z_i)$ における係数

地表面の種類	a	b	c	d
柔らかい畑地	35.1	3.26	-61.2	30.3
草地	23.8	1.69	-38.2	23.3
固い地面	18.6	0.946	-32.5	32.2

3.3.2 実測結果に基づく検討結果

遮音壁がない条件の平地区間、盛土区間について、式(3.1)から求めた単発騒音暴露レベルの予測値と実測値の差の傾向を確認する。既往の鉄道総研式では、鉛直方向に対する指向特性が考慮されていないため、予測値と実測値のレベル差を鉛直方向の指向特性の影響と仮定する。ここで、レベル差は単発騒音暴露レベルの実測値から鉄道総研式により算出した予測値を差し引いた値とする。なお、予測計算においては盛土法肩部による回折減衰量および地表面効果による超過減衰量の補正値を考慮した。盛土法肩部による回折減衰量は図 5.5(a)に示すチャートを用いて算出した。

また、既往の騒音予測式の適用範囲は遮音壁天端より低い位置となっていることから、本研究ではレールレベルより高所空間の範囲について検討する。

(1) 盛土区間

分析対象の列車は車両形式 A・15 両編成および車両形式 B・15 両編成とした。それぞれの列車について、軌道近傍点での単発騒音暴露レベル L_{AE} をもとに式(3.2)からパワーレベル L_w を算出すると共に、そのパワーレベル L_w から推定した単発騒音暴露レベルの予測値と実測値のレベル差を算出した。車両形式 A・15 両編成および車両形式 B・15 両編成の単発騒音暴露レベルの実測値から予測値を差し引いた値を表 3.2 に示す。また、盛土区間の沿線地面は固い土であったため、地表面の種類は固い地面として超

過減衰量を算出した。表中の実測値と予測値の差は列車形式ごとのレベル差の算術平均値を表している。

また、実測値と予測値の差を車両形式ごとに近接車両と遠隔車両でまとめ、近接軌道からの距離ごとに仰角 θ で整理した結果を図 3.6 に示す。ここで、仰角 θ は当該車線の軌道中心と観測点を結ぶ線分とレールレベル（水平線）の成す角度で、レールレベルを基準（ $\theta=0^\circ$ ）として上方向を正、下方向を負とした。図 3.6 は鉄道総研式の適用範囲外である測定点（ $\theta \geq 0^\circ$ ）の範囲を示している。

近接軌道からの距離 $r=10, 12.5\text{ m}$ では、仰角に対する実測値と予測値の差のばらつきが大きくなっていて、予測値に対して実測値の方が小さくなっていることから、音源との水平距離が近い領域では指向性が弱くなっていると考えられる。また、近接車両と比較して遠隔車両の方が明確な角度分布になっていて、角度依存性が大きく指向性の影響が大きいと考えられることから、鉛直方向の指向特性に対する補正式が提案できる可能性がある。これに対して、近接車両はとくに $r=10, 12.5\text{ m}$ においてばらつきが大きくなっているが、遠隔車両と比較して音源と受音点の水平距離が近いいため、指向性の影響が小さくなったと考えられる。

近接車両、遠隔車両ともに $25\sim 40^\circ$ が最大となる指向特性であることが分かる。仰角 $0^\circ \leq \theta \leq 65^\circ$ （測定点 A3～E6）で予測と実測は概ね一致しており、車両形式 A の予測と実測との差は、近接車両で $-1.3\sim +1.1\text{ dB}$ 、遠隔車両は $-1.6\sim +1.5\text{ dB}$ であった。また、同様にして、車両形式 B の両者の差は近接車両で $-1.7\sim +0.8\text{ dB}$ 、遠隔車両で $-1.1\sim +1.9\text{ dB}$ であった。車両形式 A、車両形式 B の列車形式間での差もほとんど見られないことが分かる。したがって、列車形式に依らず実測値と予測値の差は最大 2 dB 程度であることが分かった。

表 3.2 単発騒音暴露レベルの実測値と予測値の差（盛土区間）

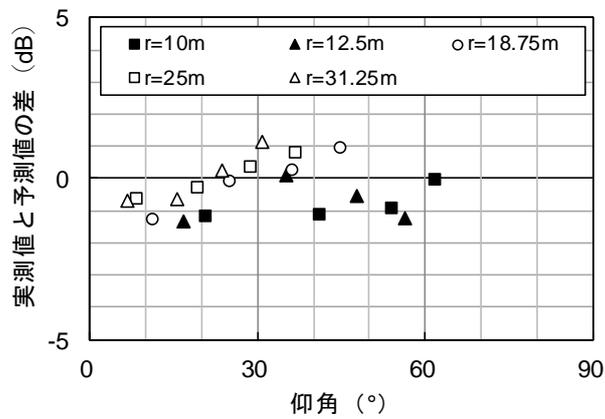
(a) 車両形式 A・15 両編成

Point	r(m)	h(m)	近接車両				遠隔車両			
			仰角 θ (°)	回折 減衰量 ΔL_{dl}	超過 減衰量 ΔL_g	実測値と 予測値の 差	仰角 θ (°)	回折 減衰量 ΔL_{dl}	超過 減衰量 ΔL_g	実測値と 予測値の 差
A1	10	1.2	-26.6	16.3	0.4	5.0	-19.6	18.6	0.8	4.9
B1	12.5	1.2	-21.8	14.6	0.3	5.2	-16.8	17.0	0.7	4.7
C1	18.75	1.2	-14.9	11.7	0.3	3.6	-12.4	14.0	0.6	3.2
D1	25	1.2	-11.3	10.2	0.3	3.3	-9.8	12.1	0.6	2.5
E1	31.25	1.2	-9.1	9.2	0.3	3.9	-8.1	10.9	0.6	2.8
A2	10	5	-6.8	9.4	0.3	3.1	-4.9	10.5	0.6	1.6
B2	12.5	5	-5.5	8.5	0.3	3.0	-4.1	9.5	0.6	1.2
C2	18.75	5	-3.7	7.3	0.2	3.6	-3.0	8.1	0.6	1.8
D2	25	5	-2.7	6.8	0.2	2.8	-2.4	7.4	0.6	1.2
E2	31.25	5	-2.2	6.4	0.2	2.8	-1.9	7.0	0.6	1.6
A3	10	10	20.8	0.0	0.2	-1.2	15.1	0.0	0.6	0.6
B3	12.5	10	16.9	0.1	0.2	-1.3	12.9	0.0	0.6	-0.4
C3	18.75	10	11.5	0.6	0.2	-1.3	9.5	0.1	0.6	-1.4
D3	25	10	8.6	1.2	0.2	-0.6	7.5	0.5	0.6	-1.3
E3	31.25	10	6.9	1.8	0.2	-0.7	6.1	0.9	0.6	-1.6
A4	10	15	41.3	0.0	0.2	-1.1	32.1	0.0	0.5	0.1
B4	12.5	15	35.1	0.0	0.2	0.1	28.0	0.0	0.6	1.1
C4	18.75	15	25.1	0.0	0.2	-0.1	21.1	0.0	0.6	0.4
D4	25	15	19.4	0.1	0.2	-0.3	16.9	0.0	0.6	-0.3
E4	31.25	15	15.7	0.1	0.2	-0.6	14.0	0.0	0.6	-0.7
A5	10	20	54.1	0.0	0.1	-0.9	44.5	0.0	0.3	-0.1
B5	12.5	20	47.8	0.0	0.1	-0.5	39.8	0.0	0.4	0.4
C5	18.75	20	36.4	0.0	0.2	0.2	31.2	0.0	0.5	0.5
D5	25	20	28.9	0.0	0.2	0.4	25.4	0.0	0.5	0.8
E5	31.25	20	23.8	0.0	0.2	0.3	21.4	0.0	0.6	0.5
A6	10	25	62.0	0.0	0.1	0.0	53.2	0.0	0.2	0.8
B6	12.5	25	56.4	0.0	0.1	-1.2	48.6	0.0	0.3	-0.6
C6	18.75	25	45.1	0.0	0.1	0.9	39.5	0.0	0.4	1.0
D6	25	25	36.9	0.0	0.2	0.8	32.9	0.0	0.5	1.0
E6	31.25	25	31.0	0.0	0.2	1.1	28.0	0.0	0.5	1.5

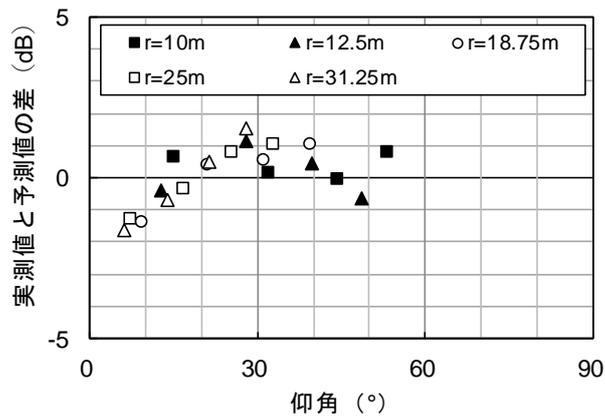
表 3.2 単発騒音暴露レベルの実測値と予測値の差（盛土区間）

(b) 車両形式 B・15 両編成

Point	r(m)	h(m)	近接車両				遠隔車両			
			仰角 θ (°)	回折 減衰量 ΔL_{dl}	超過 減衰量 ΔL_g	実測値と 予測値の 差	仰角 θ (°)	回折 減衰量 ΔL_{dl}	超過 減衰量 ΔL_g	実測値と 予測値の 差
A1	10	1.2	-26.6	16.3	0.4	4.8	-19.6	18.6	0.8	5.5
B1	12.5	1.2	-21.8	14.6	0.3	5.0	-16.8	17.0	0.7	5.3
C1	18.75	1.2	-14.9	11.7	0.3	3.4	-12.4	14.0	0.6	4.0
D1	25	1.2	-11.3	10.2	0.3	3.0	-9.8	12.1	0.6	3.3
E1	31.25	1.2	-9.1	9.2	0.3	3.7	-8.1	10.9	0.6	3.5
A2	10	5	-6.8	9.4	0.3	2.9	-4.9	10.5	0.6	2.2
B2	12.5	5	-5.5	8.5	0.3	2.7	-4.1	9.5	0.6	1.7
C2	18.75	5	-3.7	7.3	0.2	3.1	-3.0	8.1	0.6	2.3
D2	25	5	-2.7	6.8	0.2	2.5	-2.4	7.4	0.6	1.8
E2	31.25	5	-2.2	6.4	0.2	2.5	-1.9	7.0	0.6	2.1
A3	10	10	20.8	0.0	0.2	-1.4	15.1	0.0	0.6	1.1
B3	12.5	10	16.9	0.1	0.2	-1.7	12.9	0.0	0.6	0.1
C3	18.75	10	11.5	0.6	0.2	-1.6	9.5	0.1	0.6	-0.9
D3	25	10	8.6	1.2	0.2	-0.9	7.5	0.5	0.6	-0.8
E3	31.25	10	6.9	1.8	0.2	-0.9	6.1	0.9	0.6	-1.1
A4	10	15	41.3	0.0	0.2	-1.4	32.1	0.0	0.5	0.7
B4	12.5	15	35.1	0.0	0.2	-0.2	28.0	0.0	0.6	1.8
C4	18.75	15	25.1	0.0	0.2	-0.4	21.1	0.0	0.6	0.9
D4	25	15	19.4	0.1	0.2	-0.7	16.9	0.0	0.6	0.2
E4	31.25	15	15.7	0.1	0.2	-0.9	14.0	0.0	0.6	-0.2
A5	10	20	54.1	0.0	0.1	-1.2	44.5	0.0	0.3	0.6
B5	12.5	20	47.8	0.0	0.1	-0.9	39.8	0.0	0.4	1.1
C5	18.75	20	36.4	0.0	0.2	0.0	31.2	0.0	0.5	1.1
D5	25	20	28.9	0.0	0.2	0.1	25.4	0.0	0.5	1.3
E5	31.25	20	23.8	0.0	0.2	0.0	21.4	0.0	0.6	0.9
A6	10	25	62.0	0.0	0.1	-0.3	53.2	0.0	0.2	1.3
B6	12.5	25	56.4	0.0	0.1	-1.5	48.6	0.0	0.3	-0.1
C6	18.75	25	45.1	0.0	0.1	0.6	39.5	0.0	0.4	1.6
D6	25	25	36.9	0.0	0.2	0.5	32.9	0.0	0.5	1.6
E6	31.25	25	31.0	0.0	0.2	0.8	28.0	0.0	0.5	1.9

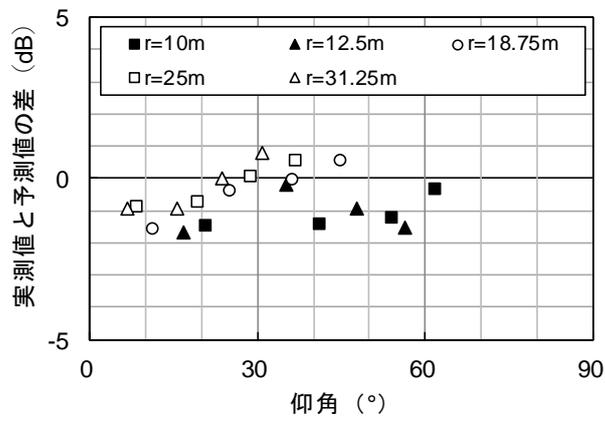


(a) 近接車両

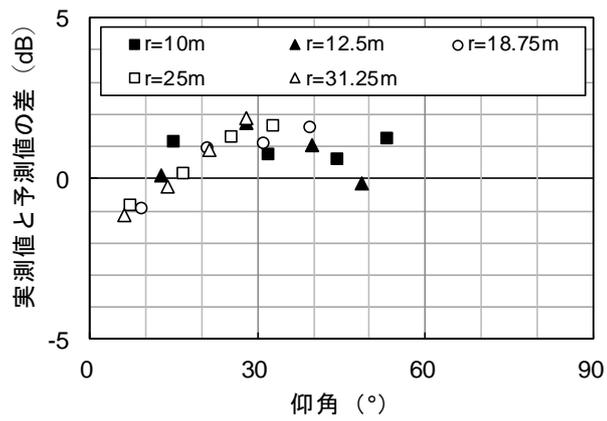


(b) 遠隔車両

図 3.6 盛土区間における実測値と予測値の差
(車両形式 A・15 両編成)



(a) 近接車両



(b) 遠隔車両

図 3.6 盛土区間における実測値と予測値の差
(車両形式 B・15 両編成)

(2) 平地区間

平地区間においても盛土区間と同様に単発騒音暴露レベルの実測値と予測値のレベル差を算出した。分析対象の列車は車両形式 C・6 両編成とした。単発騒音暴露レベルの実測値から予測値を差し引いた値を表 3.3 に示す。予測計算においては地表面効果による超過減衰量の補正を行った。なお、平地区間においても沿線地面は固い土であったため、地表面の種類は固い地面として超過減衰量を算出した。表中の実測値と予測値の差はレベル差の算術平均値を表している。また、実測値と予測値の差を車両形式ごとに近接車両と遠隔車両でまとめ、仰角 θ で整理した結果を図 3.7 に示す。

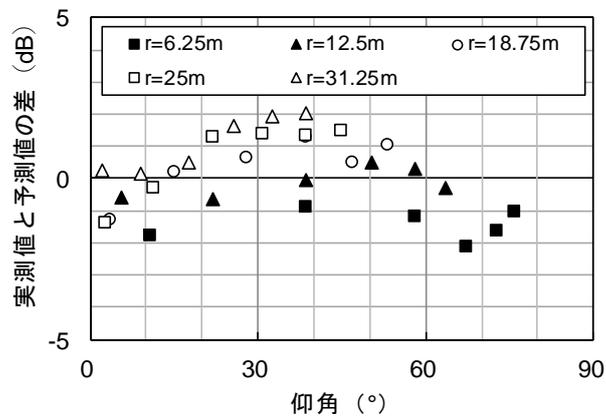
実測値と予測値の差は盛土区間と同様の傾向が見られ、遠隔車両の方が明確な角度分布になっていて、 $30\sim 40^\circ$ の方向に一定の指向性を持つと考えられる。近接車両は仰角により両者の差にばらつきが見られるが、遠隔車両と同様に $30\sim 40^\circ$ が最大となる指向特性となっている。

仰角 $0^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$ の範囲において予測と実測は概ね一致しており、両者の差は近接車両で $-2.1\sim +2.1\text{dB}$ 、遠隔車両は $-1.5\sim +1.0\text{dB}$ であった。したがって、盛土区間と同様に平地区間においても実測値と予測値の差は最大 2dB 程度であることが分かった。

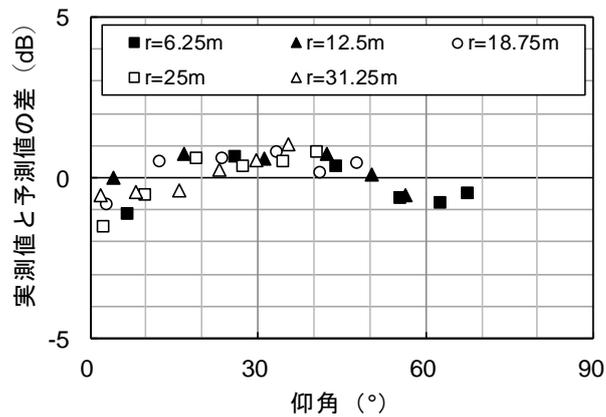
実測値と予測値の差について、盛土区間と平地区間を比較すると盛土区間は $30\sim 40^\circ$ 、平地区間は 30° となり、どちらもほぼ一定の方向に指向性を持つことが分かる。

表 3.3 単発騒音暴露レベルの実測値と予測値の差（平地区間）

Point	r(m)	h(m)	近接車両			遠隔車両		
			仰角 θ (°)	超過 減衰量 ΔL_g	実測値と 予測値の 差	仰角 θ (°)	超過 減衰量 ΔL_g	実測値と 予測値の 差
A1	6.25	1.2	10.9	0.6	-1.7	6.6	1.0	-1.1
B1	12.5	1.2	5.5	1.3	-0.6	4.1	2.1	0.0
C1	18.75	1.2	3.7	2.5	-1.3	3.0	3.1	-0.8
D1	25	1.2	2.7	3.4	-1.4	2.4	3.9	-1.5
E1	31.25	1.2	2.2	4.2	0.3	1.9	4.6	-0.6
A2	6.25	5	38.7	0.2	-0.9	25.9	0.3	0.7
B2	12.5	5	21.8	0.4	-0.6	16.8	0.5	0.7
C2	18.75	5	14.9	0.5	0.2	12.4	0.6	0.5
D2	25	5	11.3	0.7	-0.3	9.8	0.8	-0.5
E2	31.25	5	9.1	0.9	0.2	8.1	1.1	-0.4
A3	6.25	10	58.0	0.1	-1.1	44.2	0.1	0.3
B3	12.5	10	38.7	0.2	0.0	31.1	0.2	0.6
C3	18.75	10	28.1	0.2	0.7	23.7	0.3	0.6
D3	25	10	21.8	0.3	1.3	19.0	0.3	0.6
E3	31.25	10	17.7	0.4	0.5	15.8	0.4	-0.4
A4	6.25	15	67.4	0.1	-2.1	55.5	0.1	-0.6
B4	12.5	15	50.2	0.1	0.5	42.2	0.1	0.8
C4	18.75	15	38.7	0.1	1.3	33.3	0.1	0.8
D4	25	15	31.0	0.2	1.4	27.3	0.2	0.3
E4	31.25	15	25.6	0.2	1.7	23.0	0.2	0.3
A5	6.25	20	72.6	0.1	-1.6	62.8	0.1	-0.8
B5	12.5	20	58.0	0.1	0.3	50.4	0.1	0.1
C5	18.75	20	46.8	0.1	0.5	41.3	0.1	0.1
D5	25	20	38.7	0.1	1.4	34.5	0.1	0.5
E5	31.25	20	32.6	0.1	2.0	29.5	0.1	0.5
A6	6.25	25	76.0	0.0	-1.0	67.6	0.0	-0.5
B6	12.5	25	63.4	0.1	-0.3	56.5	0.1	-0.5
C6	18.75	25	53.1	0.1	1.0	47.6	0.1	0.4
D6	25	25	45.0	0.1	1.5	40.7	0.1	0.8
E6	31.25	25	38.7	0.1	2.1	35.3	0.1	1.0



(a) 近接車両



(b) 遠隔車両

図 3.7 平地区間における実測値と予測値の差

3.3.3 鉛直断面の指向特性に関する補正式の検討

3.3.2 節で算出した単発騒音暴露レベルの実測値から鉄道総研式により算出した予測値を差し引いた値を鉛直断面の指向特性に関する補正值と仮定して、長倉らが提案した補正式[32]（以下、長倉らの補正式）および EU において面的な騒音予測で用いられている CNOSSOS モデル[103]（以下、CNOSSOS 補正式）と比較し、検証を行う。

(1) 長倉らの補正式

長倉らの補正式を式(3.17)に示す。また、式(3.17)について補正值と仰角の関係を図 3.8 に示す。長倉らの補正式では $\theta=0^\circ$ でのレベル値を 0dB とした相対レベルを用いている。鉛直断面における指向性は鉛直方向で小さく、水平方向に強い指向特性を有していて、水平方向 ($\theta=0^\circ$) と鉛直方向 ($\theta=90^\circ$) との騒音レベル差は 10dB となる。これは、音源そのものの指向特性ではなく、車体が音源の上方にあることにより生じるものと考察されている。なお、式(3.17)に示す補正式は鉄道総研の試験線による実車試験により導出されたものであるが、1 両編成の気動車、列車通過速度が 32~33 km/h の条件において構築されたモデルであり、都市部における列車の走行条件と大きく異なっている。また、軌道中心からの距離（軌道中心からの半径）が 6m および 10 m の測定結果により算出されているため、適用範囲が限定されていると考えられる。

$$\Delta = 0.1 + 0.9 \cos \theta \quad (3.17)$$

(2) CNOSSOS 補正式

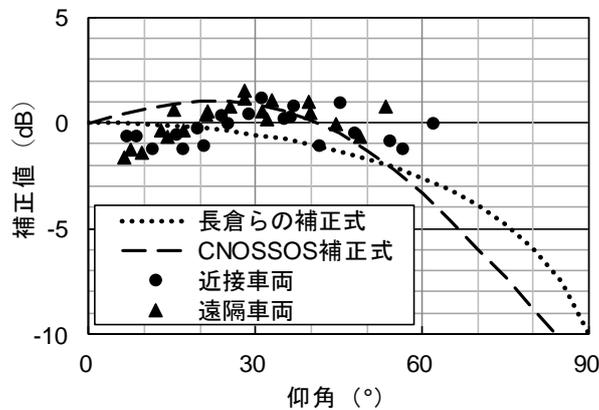
CNOSSOS 補正式を式(3.18)に示す。補正式を見ると周波数帯域ごとに補正值が設定されているため、平地区間の近接車両において軌道近傍点（図 3.1(a)の F 点）で測定した周波数特性（中心周波数 50~2.5 kHz の 1/3 オクターブバンドレベル）をもとに補正值を算出した。補正值と仰角の関係を図 3.8 に示す。CNOSSOS 補正式では長倉らの補正式と同様に $\theta=0^\circ$ でのレベル値を 0dB とした相対レベルを用いている。補正值の最大値は仰角 25°付近となっていて、本検討結果と概ね対応しているが、補正值の最大値は 1dB 程度と小さい。なお、長倉らの補正式と比較すると、仰角が 40°以上で補正值が急激に減少していることが分かる。CNOSSOS 補正式に関して、文献[103]には式の導出過程や式の適用条件等について記載がないことから、妥当性の検証が必要と考えられる。

$$\Delta = \left(\frac{40}{3} \times \left[\frac{2}{3} \times \sin(2\theta) - \sin \theta \right] \times \log_{10} \left[\frac{f + 600}{200} \right] \right) \quad (3.18)$$

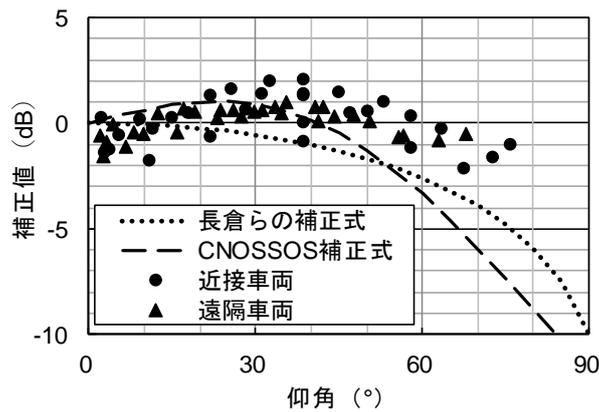
長倉らの補正式および CNOSSOS 補正式と 3.3.2 節で算出した補正值を図 3.8 に示す。本検討結果では盛土区間、平地区間のいずれにおいても仰角 30~40°の補正值が 0°より 4dB 程度大きくなり、斜め上方に強い指向性を持つことが分かった。導出した補正值に対して、長倉らの補正式および CNOSSOS 補正式と比較すると、仰角 0~40°

でCNOSSOS補正式に近い値となっているが、40°以上では乖離が大きくなっている。これらの提案式によると、仰角 60°の補正值は-3dB 程度であるが、本検討結果では-1dB にとどまっている。

また、本検討結果による補正值に対して、これらの提案式と同様に仰角 $\theta=0^\circ$ でのレベル値を 0dB とした場合、補正值は図 3.8 に示す結果より 1~2dB 大きくなり、補正值は最大で 4dB に及ぶことから、これらの補正式を適用した場合、仰角によっては騒音レベルを過小評価する（危険側の予測となる）ことが想定される。



(a) 盛土区間



(b) 平地区間

図 3.8 補正值と仰角の関係

3.4 波動音響解析の適用に関する検討

平地・盛土・コンクリート高架橋区間の3箇所において実測した在来鉄道沿線の騒音分布をもとに、鉄道騒音の伝搬予測に対する2次元波動数値解析手法の適用に関して妥当性を検証する。

3.4.1 検討概要

(1) 対象領域

図3.1の現車試験の測定断面に対して、2次元時間領域有限差分法を適用する。解析領域は、半自由音場（幅50m×高さ35m、外周に幅5mの境界吸収層）とした。

(2) 計算条件

時間差分は2次近似、空間差分は4次近似、離散化幅を $\Delta t=15.6\ \mu\text{s}$ 、 $\Delta x=\Delta y=16\ \text{mm}$ 、計算時間長を2.048sとし、上限帯域を中心周波数2.5kHzの1/3オクターブバンドとして、任意形状に対して階段近似によるモデルの誤差を小さくするため、空間離散幅は計算対象上限周波数における波長の1/10程度とした。軌道上の厚さ300mmのバラストの吸音特性は、機械系置換モデルにより吸音特性を模擬した[100]。バラストの音響インピーダンスおよび垂直入射吸音率を内径100mmの音響管を用いてJIS A 1405-2に準じて計測した。各材料の音響インピーダンスの実測結果をもとに、計算上で扱う境界面のFDTDモデルを作成した。このモデル化作業では、音響インピーダンスの周波数特性を図3.9に示す「バネ+抵抗+質量」を基本形とする多自由度の機械振動の周波数特性で置き替える。

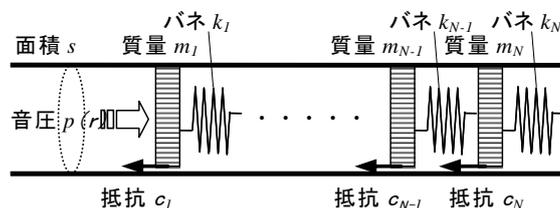


図 3.9 N 自由度の機械振動系を用いたモデル

置換する機械振動系の自由度は 2 kHz 以下の吸音率のピークの数をもとに決め、在来鉄道騒音の主要な帯域 500~1 kHz で実測値と FDTD モデルが一致するようにバネ定数, 抵抗値, 質量の大きさを調整した。N 自由度 (バネ, 質量, 抵抗の組合せが N 個) の振動系の場合, 音圧と粒子速度の比 $z(\omega)$ は式(3.19)となる。

$$z(\omega) = \frac{1}{j\omega s} \cdot \left[\begin{array}{c} (-\omega^2 m_1 + j\omega c_1 + k_1) - \frac{k_1^2}{-\omega^2 m_2 + j\omega c_2 + (k_1 + k_2)} - \frac{k_2^2}{-\omega^2 m_3 + j\omega c_3 + (k_2 + k_3)} - \dots - \frac{k_{N-1}^2}{-\omega^2 m_N + j\omega c_N + (k_{N-1} + k_N)} \end{array} \right] \quad (3.19)$$

厚さ 300 mm のバラストの音響インピーダンスおよび垂直入射吸音率の実測値と対応する FDTD モデルの計算値を図 3.10 に示す。400 Hz 以下の周波数範囲で計算と実測の吸音率に乖離が見られるが, 在来鉄道騒音の主要な周波数帯域 500~2 kHz では計算値と実測値はよく一致している。

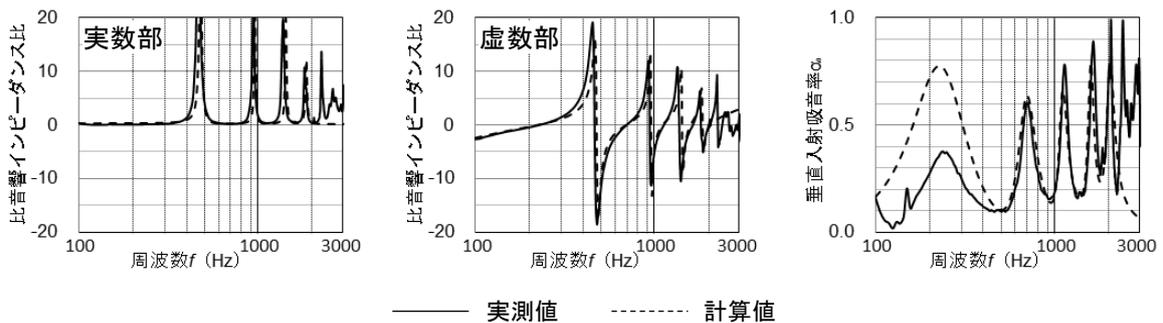


図 3.10 実測値と計算値の比較 (厚さ 300 mm のバラスト : 5 自由度)

図 3.11 に示すとおり車両下部に仮想的に点音源を単一または複数配置し，初期音圧としてガウシアンパルスを与えた。本検討では音源の高さは①レールレベル (R.L0.00 m) と②車輪中心部 (R.L0.43 m)，断面位置は①軌道中心 (車両中心)，②レール，③車両端に設定した。車両モデルは，台車，パンタグラフ，屋根上機器を除いた車両の断面形状のみを再現した。

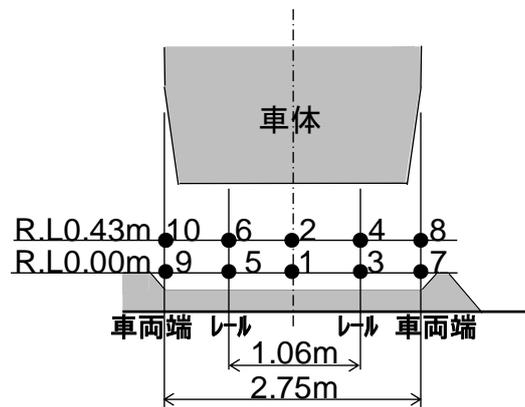


図 3.11 数値解析における音源モデル図

(3) 騒音レベルの算出方法

仮想音源に対して得られた各受音点の音圧応答から 1/3 オクターブバンド音圧レベルを算出した。複数音源の場合，音源間の等パワーと非干渉性を仮定し，各音源に対する音圧レベルの合成値を求めた。音源のスペクトル補正は，後述する参照点の実測値を用いて帯域ごとに行うものとし，最終的に各受音点の A 特性音圧レベルを計算した。なお，参照点が複数の場合，現場実測と実験結果の算術平均値同士が周波数特性上で一致するように補正を行った。今回，中心周波数 50～2.5 kHz の 1/3 オクターブバンド音圧レベルから帯域合成して騒音レベルを算出した。

3.4.2 検討結果

仮想音源および音源スペクトル補正用の参照点に関して，各々の個数と位置を変化させた場合の計算値と実測値の差を比較し，2次元解析による在来鉄道沿線の騒音予測における両者の設定について検討した。また，在来鉄道騒音の周波数特性を加味し

た予測精度を求めるため、式(3.20)、(3.21)に従い、各測定点における中心周波数 50～2.5 kHz の各 1/3 オクターブバンドレベルの計算値 $L_{f,calc}$ と実測値 $L_{f,meas}$ の差 δ_f ($= |L_{f,calc} - L_{f,meas}|$) に、その測定点での実測値 A.P 値に占める各 1/3 オクターブバンドレベルの実測値 $L_{f,meas}$ の寄与率 w_f を乗じ、周波数帯域ごとに重み付け平均した計算誤差 Δ を算出した。

$$\Delta = \sum \delta_f \cdot w_f \quad (3.20)$$

$$w_f = 10^{L_{f,meas}/10} / 10^{L_{A.P}/10} \quad (3.21)$$

(1) 参照点を変化させた場合

音源はレール頭頂面高さ (R.L0.00 m) で車両下部の車両端 2 点 (図 3.11 の音源位置 7, 9) に設置し、参照点を(1) 軌道近傍点 (図 3.1 の F 点), (2) A1 点, (3) A1 点, B1 点, C1 点, (4) A1 点, A2 点, A3 点に設定した場合の 4 ケースについて計算値と実測値の差を比較した。

ケース(1) は参照点を車両下部音の音源に最も近い位置に 1 点設定したパターンで、騒音予測式による評価手法においてパワーレベルを推定する際に参照点として扱われている[24]。地物の影響を受けないためパワーレベルを推定する際に最も好条件と考えられるが、騒音計マイクロフォンの設置位置が鉄道用地内となるため、マイクロフォン設置の際に鉄道事業者との協議が必要となる。

ケース(2) は鉄道用地外において比較的音源に近い位置で、マイクロフォンの標準的な設置高さ (地上 1.2 m) 1 点での参照を想定したもので、参照点の設定 (現地での測定) が最も容易である。しかし、高架橋や高い盛土では遮音壁や軌道の肩部による回折効果の影響も含まれるため、この測定結果からパワーレベルを推定する際はこれらの影響を考慮する必要がある。

ケース(3) は鉄道用地外において音源からの水平距離が異なる地上高さ 1.2 m の 3 点で参照し、ケース(2) に対して参照点の数と範囲を拡張したパターンである。現地での測定は容易であるが、パワーレベルを推定する際に、前述した遮音壁等による回折効果に加えて地表面効果による減衰の影響も考慮する必要がある。

ケース(4) は鉄道用地外において鉛直方向に参照点を設定する。実務における測定の実現可能な高さは気象観測用ポールを用いて地上高さ 10 m 程度と考えられる。し

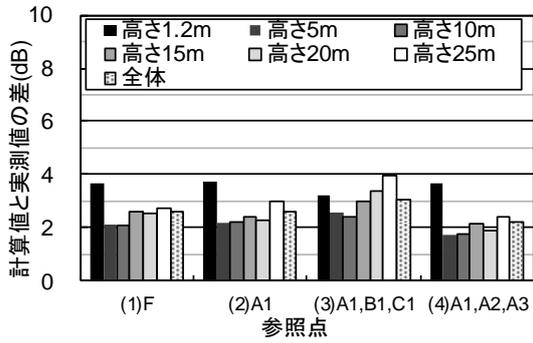
たがって、本検討では、地上高さ 1.2 m と 10 m、また、これらの中間点となる地上高さ 5 m の 3 点に設定した。高架橋と遮音壁の高さによっては参照点において回折効果や鉄道車体と壁の多重反射の影響が含まれる可能性がある。

各参照点パターンに対して受音点の高さごとに算出した 5 点の計算誤差 Δ の算術平均値を図 3.12 に示す。また、参照点を(1) F 点、(4) A1 点、A2 点、A3 点に設定した場合の D1 点、D3 点、D6 点での計算値と実測値の周波数特性の比較を図 3.13～図 3.15 に示す。

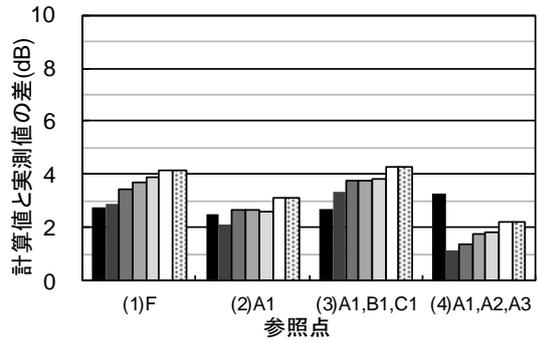
図 3.12 より、地上高さ 1.2 m の騒音を予測する場合、構造種別、車両の走行位置に関わらず参照点は (1) F 点に比べて、(2) A1 点、(3) A1、B1、C1 点の方が実測に対する計算誤差が小さい。予測地点が地上高さ 1.2 m の場合は地上高さ 1.2 m の参照点でパワーレベルを推定することが妥当と考えられる。なお、参照点を地上高さ 1.2 m に配置した(2)A1 点、(3)A1 点、B1、C1 点の計算誤差は同程度であり、参照点の数や範囲の違いによる差は見られなかった。したがって、計算誤差と実測における作業量を考慮すると、参照点は(2)A1 点の 1 点が望ましいと考えられる。

一方、地上高さ 5 m 以上の場合、(4) A1 点、A2 点、A3 点のときの計算誤差が最も小さく、図 3.13～図 3.15 に示す周波数特性でも実測と比較的良く一致している。地上高さ 25 m 程度まで騒音レベルを精度よく予測するには、地上高さ 1.2～10 m 範囲の複数点を参照点に設定するべきであることがわかる。とくに、2 次元解析の場合、異なる高さの複数地点を基準として参照し、2 次元解析の結果がもつ特異なピーク・ディップの周波数特性を平均化する手順は特異な干渉の影響を抑制する上で有効な手段の一つであると考えられる。

本研究では、盛土および高架橋高さが標準的な 5～10 m の箇所を選定した。盛土および高架橋高さが 10 m 以上の特殊な箇所を対象として予測をする場合、参照点をレールレベルより高所に設定することが困難となり、高所空間における予測精度が保証できない場合が想定される。その場合、構造条件によっては参照点を軌道近傍に設定することで精度を確保することが可能と考えられる。

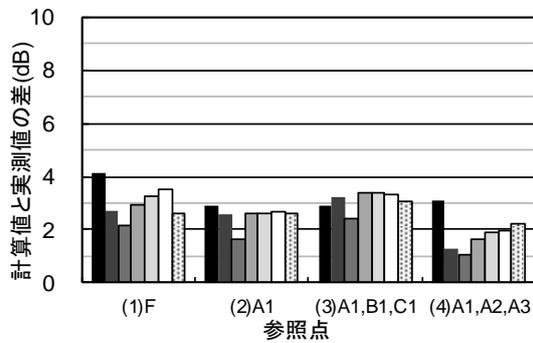


(a-1) 近接車両

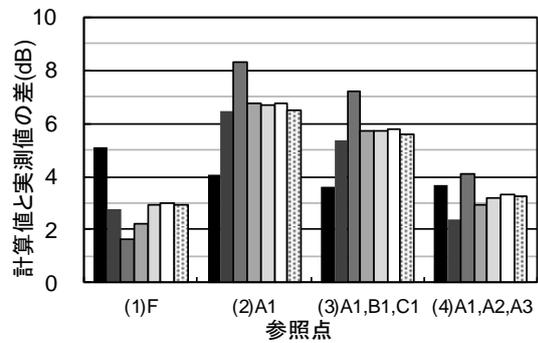


(a-2) 遠隔車両

(a) 平地区間

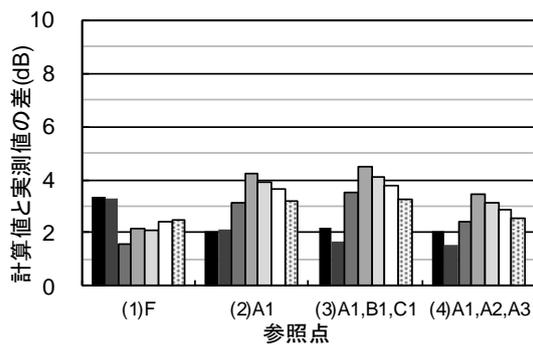


(b-1) 近接車両

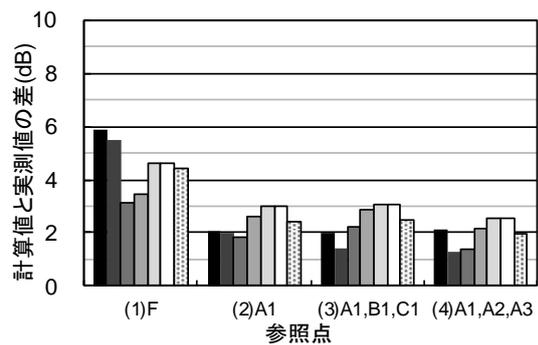


(b-2) 遠隔車両

(b) 盛土区間



(c-1) 近接車両



(c-2) 遠隔車両

(c) コンクリート高架橋区間

図 3.12 参照点の違いによる計算値と実測値の差（高さ別平均と全体平均）

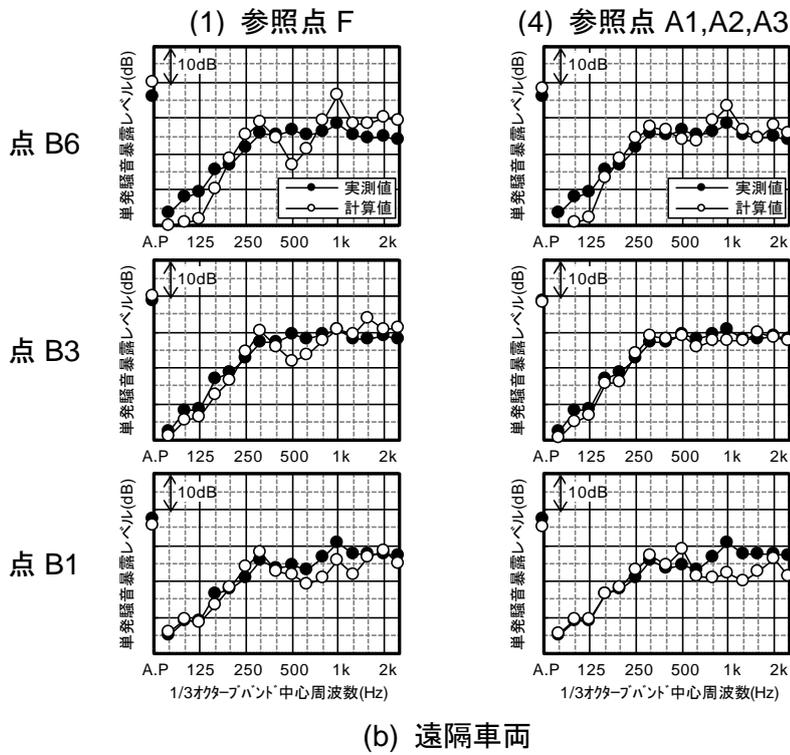
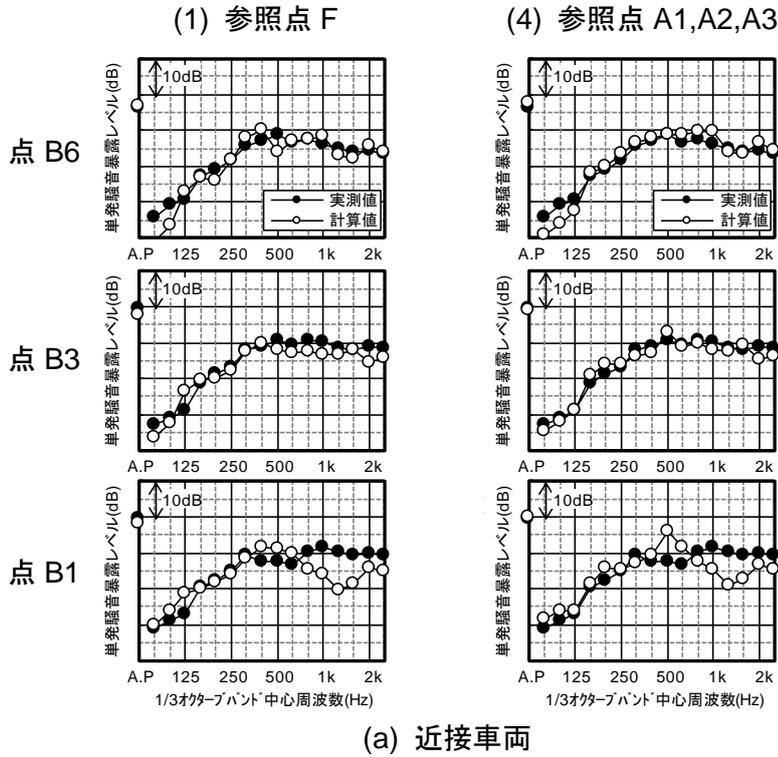


図 3.13 参照点の違いによる計算値と実測値の比較 (平地区間)

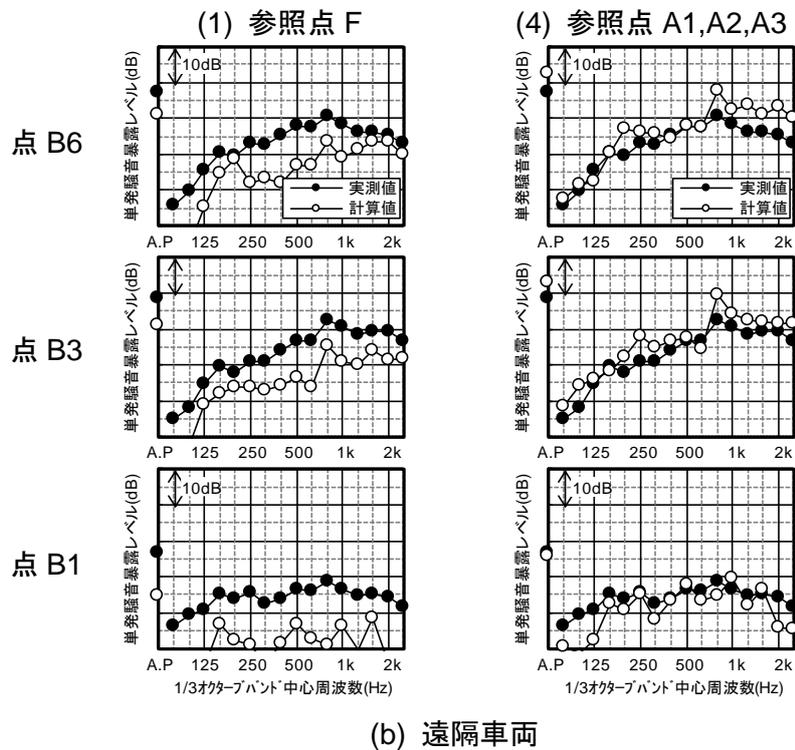
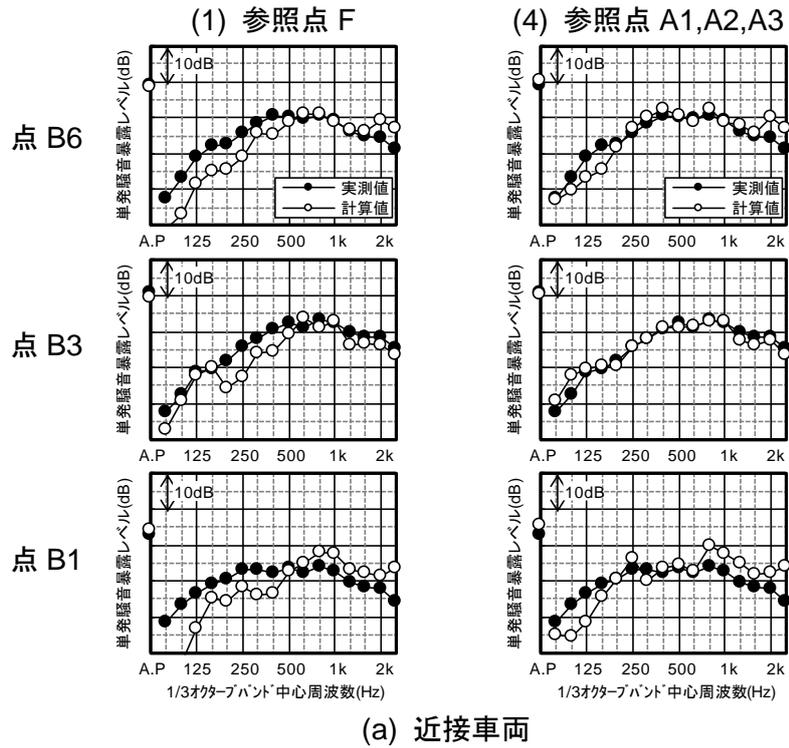


図 3.14 参照点の違いによる計算値と実測値の比較（盛土区間）

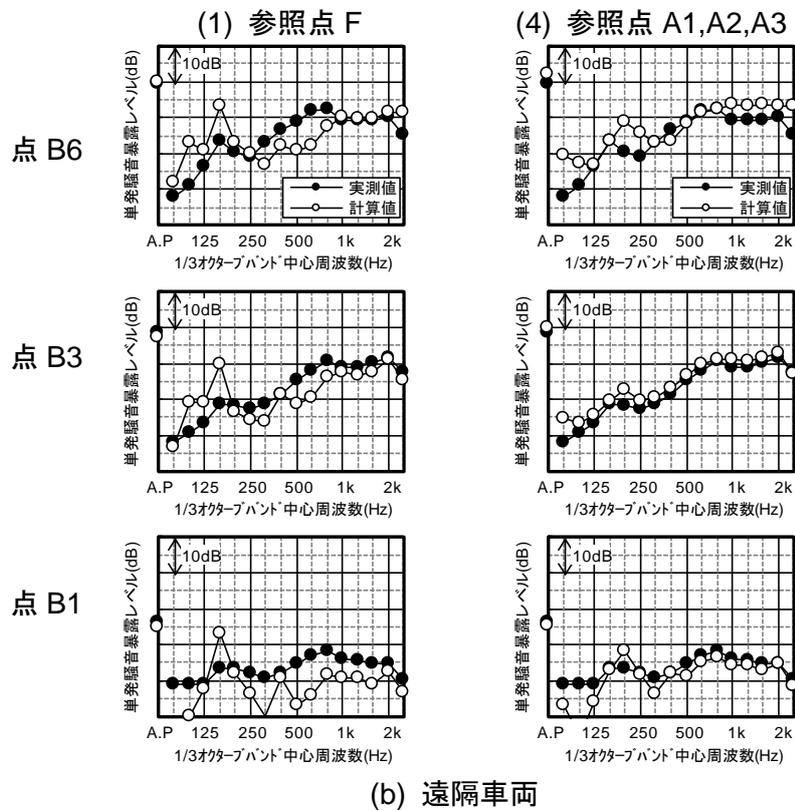
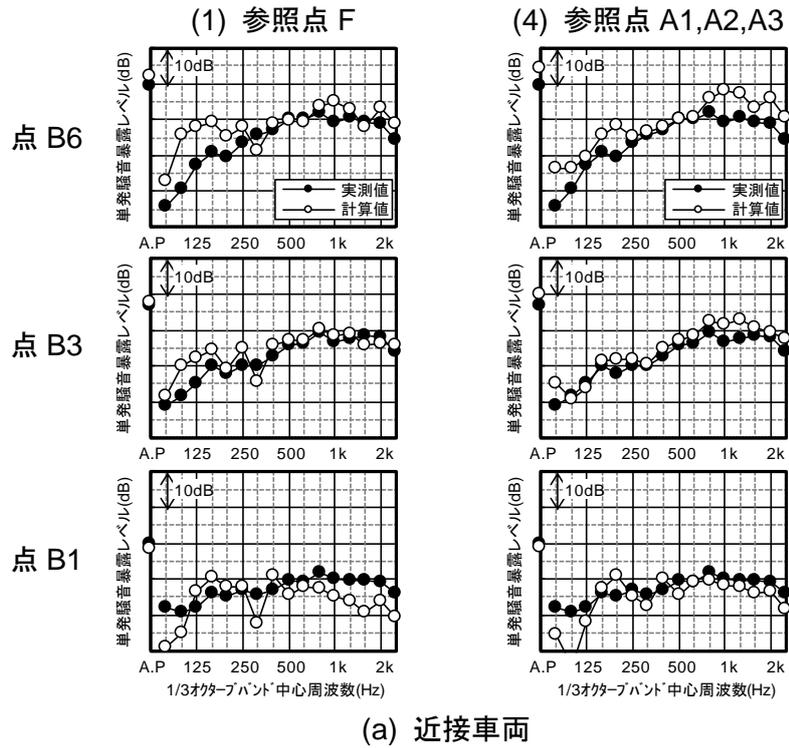


図 3.15 参照点の違いによる計算値と実測値の比較（コンクリート高架橋区間）

(2) 音源の数および位置を変化させた場合

つぎに、参照点(4) A1, A2, A3 点のときの音源の数と位置を変化させた場合の計算誤差を検討した。音源の組合せは車両下部音の放射特性が車両中心に対して左右対称になるように設定した。音源の数と位置に対する各構造形式の計算誤差を表 3.4 に示す。また、音源の数に対する高さ別平均と全体平均の計算誤差（表 3.4 に示す同一音源数ごとの計算誤差の最小値）を図 3.16 に示す。

a. 音源の数

平地区間およびコンクリート高架橋区間、盛土区間の遠隔車両においては、音源の数の増加に伴い計算誤差が小さくなっている。音源を 1 つから 2 つに増やすことで、計算誤差は最大で 1dB ほど改善しているが、3 つ以上に増やしても精度は 0.1~0.2dB 程度しか向上していない。一方、盛土区間の近接車両では音源数の増加による計算精度の改善はない。音源数の増加に伴う計算時間の増加を考慮した場合、適切な音源数は最大で 2 つ程度と考える。

b. 音源の位置

表 3.4 において、音源の数が 2 で計算誤差の全体平均が最小となる音源配置パターンを灰色で示した。最適な音源位置は構造形式により異なるが、構造形式および車両位置の違いによる条件を平均した場合、音源位置 7, 9（レール頭頂面高さで車両下部の車両端）に対する計算誤差が最も小さい。

道路交通騒音や鉄道騒音の数値解析は、音源位置を車両中心、音源高さを地面（鉄道の場合、軌道面もしくはレールレベル）に設定し、音源数を 1 点として計算を行うことが多い。しかし、鉄道の場合、主要な騒音源となっている車両下部音（レール、車輪、モータ）の音源は車両中心軸を対称に 2 点对に存在すると考えられることから、計算上においても音源を車両下部に車両中心軸を対称に 2 点以上配置することが望ましいと考えられる。

以上の検討結果から、今後の数値解析による検討は音源位置を 7, 9 の 2 点に配置することとした。

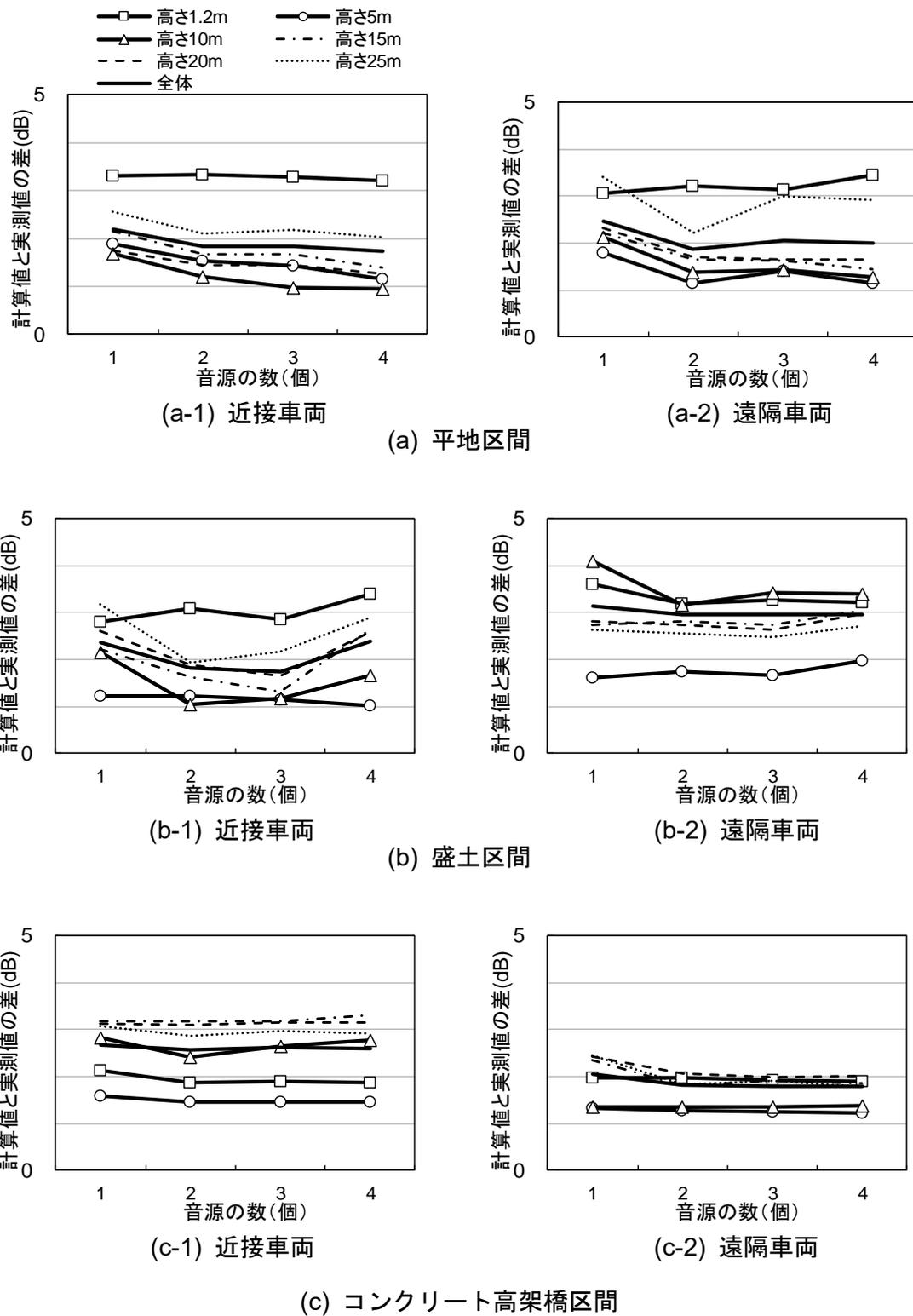


図 3.16 音源の数の違いによる計算値と実測値の差（高さ別平均と全体平均）

表 3.4 音源の位置の違いによる計算値と実測値の差（高さ別平均と全体平均）

(a) 近接車両

音源数	音源の位置	①平地区間							②盛土区間							③コンクリート高架橋区間							平均						
		高さ 1.2m	高さ 5m	高さ 10m	高さ 15m	高さ 20m	高さ 25m	全体	高さ 1.2m	高さ 5m	高さ 10m	高さ 15m	高さ 20m	高さ 25m	全体	高さ 1.2m	高さ 5m	高さ 10m	高さ 15m	高さ 20m	高さ 25m	全体	高さ 1.2m	高さ 5m	高さ 10m	高さ 15m	高さ 20m	高さ 25m	全体
1	1	3.9	2.2	2.4	2.5	2.2	3.3	2.7	2.8	1.2	2.2	2.2	2.6	3.2	2.4	2.1	1.6	2.8	3.2	3.5	3.3	2.8	3.0	1.7	2.5	2.6	2.7	3.3	2.6
	2	3.3	1.9	1.7	2.1	1.7	2.6	2.2	3.7	1.9	2.3	3.4	3.3	3.5	3.0	2.1	1.7	2.8	3.2	3.1	3.1	2.7	3.0	1.8	2.3	2.9	2.7	3.0	2.6
2	3,5	4.0	2.0	2.3	2.0	1.8	2.8	2.4	3.9	1.2	2.6	4.2	5.2	6.1	3.9	2.0	1.5	3.0	3.8	3.5	3.5	2.9	3.3	1.6	2.6	3.3	3.5	4.2	3.1
	4,6	3.3	1.5	1.2	1.7	1.4	2.1	1.8	3.4	1.3	2.0	2.9	2.7	3.6	2.6	1.9	1.6	2.8	3.5	3.3	3.0	2.7	2.9	1.5	2.0	2.7	2.5	2.9	2.4
	7,9	3.7	1.7	1.8	2.1	1.9	2.4	2.2	3.1	1.3	1.1	1.6	1.9	1.9	1.8	2.0	1.6	2.4	3.5	3.1	2.9	2.6	2.9	1.5	1.7	2.4	2.3	2.4	2.2
	8,10	3.7	1.6	1.3	1.7	1.6	2.1	1.9	3.6	1.3	2.5	3.4	3.4	3.8	3.0	1.9	1.6	3.1	3.2	3.2	3.0	2.7	3.1	1.5	2.3	2.8	2.7	3.0	2.5
3	1,3,5	3.9	2.0	2.3	2.0	1.8	2.9	2.4	3.5	1.1	2.0	3.4	4.4	5.5	3.3	2.0	1.5	2.9	3.6	3.4	3.4	2.8	3.1	1.5	2.4	3.0	3.2	3.9	2.9
	2,4,6	3.3	1.6	1.2	1.8	1.4	2.2	1.9	3.4	1.4	2.0	2.9	2.7	3.3	2.6	1.9	1.6	2.8	3.4	3.2	3.0	2.6	2.9	1.5	2.0	2.7	2.4	2.8	2.4
	1,7,9	3.7	1.7	1.7	1.9	1.6	2.5	2.2	2.9	1.4	1.2	1.3	1.6	2.2	1.8	2.0	1.5	2.7	3.4	3.3	3.1	2.7	2.9	1.5	1.9	2.2	2.2	2.6	2.2
	2,8,10	3.6	1.4	1.0	1.7	1.5	2.2	1.8	3.6	1.2	2.2	3.2	3.1	3.4	2.8	1.9	1.5	3.0	3.2	3.1	3.0	2.6	3.0	1.4	2.1	2.7	2.6	2.9	2.4
4	3,5,7,9	3.8	1.8	1.8	1.8	1.6	2.5	2.2	3.7	1.1	2.0	3.2	3.7	4.3	3.0	2.0	1.5	2.8	3.7	3.3	3.1	2.7	3.2	1.4	2.2	2.9	2.9	3.3	2.6
	4,6,8,10	3.5	1.4	0.9	1.6	1.4	2.0	1.8	3.5	1.1	2.1	3.0	2.9	3.6	2.7	1.9	1.6	3.0	3.3	3.3	3.0	2.7	3.0	1.4	2.0	2.6	2.5	2.9	2.4
	3,4,5,6	3.2	1.3	1.2	1.4	1.3	2.3	1.7	3.7	1.0	2.1	3.3	3.8	4.8	3.1	1.9	1.4	2.9	3.6	3.3	3.0	2.7	2.9	1.3	2.1	2.8	2.8	3.4	2.5
	7,8,9,10	3.4	1.2	1.0	1.5	1.6	2.1	1.7	3.4	1.1	1.7	2.6	2.6	2.9	2.4	1.9	1.5	2.8	3.3	3.1	2.9	2.6	2.9	1.3	1.8	2.5	2.4	2.6	2.2

(b) 遠隔車両

音源数	音源の位置	①平地区間							②盛土区間							③コンクリート高架橋区間							平均						
		高さ 1.2m	高さ 5m	高さ 10m	高さ 15m	高さ 20m	高さ 25m	全体	高さ 1.2m	高さ 5m	高さ 10m	高さ 15m	高さ 20m	高さ 25m	全体	高さ 1.2m	高さ 5m	高さ 10m	高さ 15m	高さ 20m	高さ 25m	全体	高さ 1.2m	高さ 5m	高さ 10m	高さ 15m	高さ 20m	高さ 25m	全体
1	1	4.2	1.8	2.3	2.4	2.7	3.9	2.8	3.6	1.6	4.1	5.1	5.1	4.3	4.0	2.0	1.4	1.4	2.7	3.4	3.6	2.4	3.3	1.6	2.6	3.4	3.7	3.9	3.1
	2	3.1	1.8	2.1	2.2	2.3	3.4	2.5	3.6	2.9	4.2	2.7	2.8	2.6	3.2	2.0	1.3	1.8	2.4	2.4	2.4	2.1	2.9	2.0	2.7	2.4	2.5	2.8	2.6
2	3,5	4.1	1.8	2.3	2.5	2.4	3.7	2.7	3.5	1.7	3.8	4.5	4.6	4.3	3.7	2.0	1.4	1.4	2.4	3.3	3.2	2.3	3.2	1.7	2.5	3.1	3.4	3.7	2.9
	4,6	3.2	1.6	1.7	1.7	2.0	3.1	2.2	3.3	2.6	3.8	2.8	2.7	2.5	3.0	2.0	1.4	2.0	2.1	2.1	1.8	1.9	2.8	1.9	2.5	2.2	2.3	2.5	2.4
	7,9	3.3	1.2	1.4	1.7	1.8	2.2	1.9	3.7	2.4	4.1	3.0	3.2	3.3	3.3	2.1	1.3	1.4	2.1	2.5	2.5	2.0	3.0	1.6	2.3	2.3	2.5	2.7	2.4
	8,10	3.7	1.4	1.4	1.7	1.7	2.9	2.1	3.2	2.1	3.2	3.3	3.2	3.0	3.0	2.0	1.3	1.9	1.8	2.1	1.9	1.8	3.0	1.6	2.2	2.3	2.3	2.6	2.3
3	1,3,5	4.1	1.8	2.3	2.4	2.4	3.7	2.7	3.5	1.7	3.9	4.7	4.8	4.2	3.8	2.0	1.3	1.4	2.5	3.3	3.3	2.3	3.2	1.6	2.5	3.2	3.5	3.7	2.9
	2,4,6	3.2	1.6	1.7	1.8	2.0	3.2	2.2	3.4	2.7	3.9	2.7	2.6	2.5	3.0	1.9	1.4	1.9	2.2	2.2	2.0	1.9	2.8	1.9	2.5	2.2	2.3	2.6	2.4
	1,7,9	4.1	1.5	2.0	1.8	2.0	3.3	2.4	3.6	2.0	4.0	3.8	4.0	3.6	3.5	2.0	1.3	1.4	2.3	2.7	2.8	2.1	3.2	1.6	2.5	2.6	2.9	3.2	2.7
	2,8,10	3.5	1.4	1.4	1.6	1.7	3.0	2.1	3.3	2.3	3.4	3.0	3.0	2.8	3.0	1.9	1.3	1.8	1.9	2.0	1.9	1.8	2.9	1.7	2.2	2.2	2.2	2.6	2.3
4	3,5,7,9	4.1	1.6	2.0	2.0	2.0	3.4	2.5	3.5	2.0	3.9	3.9	4.1	3.9	3.5	2.1	1.3	1.4	2.3	2.8	2.8	2.1	3.2	1.6	2.4	2.7	3.0	3.4	2.7
	4,6,8,10	3.5	1.4	1.4	1.6	1.6	2.9	2.0	3.2	2.3	3.5	3.0	3.0	2.7	2.9	1.9	1.3	1.9	1.9	2.0	1.8	1.8	2.9	1.7	2.3	2.2	2.2	2.5	2.3
	3,4,5,6	3.4	1.4	1.6	1.6	1.8	3.0	2.1	3.3	2.2	3.8	3.5	3.5	3.2	3.2	1.9	1.4	1.8	2.2	2.4	2.2	2.0	2.9	1.7	2.4	2.4	2.5	2.8	2.4
	7,8,9,10	3.8	1.2	1.3	1.4	1.7	3.1	2.0	3.3	2.2	3.4	3.1	3.1	2.9	3.0	1.9	1.2	1.6	1.8	2.1	2.0	1.8	3.0	1.5	2.1	2.1	2.3	2.7	2.3

(c) 近接車両および遠隔車両の平均

音源数	音源の位置	①平地区間							②盛土区間							③コンクリート高架橋区間							平均						
		高さ 1.2m	高さ 5m	高さ 10m	高さ 15m	高さ 20m	高さ 25m	全体	高さ 1.2m	高さ 5m	高さ 10m	高さ 15m	高さ 20m	高さ 25m	全体	高さ 1.2m	高さ 5m	高さ 10m	高さ 15m	高さ 20m	高さ 25m	全体	高さ 1.2m	高さ 5m	高さ 10m	高さ 15m	高さ 20m	高さ 25m	全体
1	1	4.0	2.0	2.4	2.4	2.4	3.6	2.8	3.2	1.4	3.1	3.6	3.8	3.7	3.2	2.1	1.5	2.1	2.9	3.4	3.4	2.6	3.1	1.6	2.5	3.0	3.2	3.6	2.8
	2	3.2	1.8	1.9	2.2	2.0	3.0	2.3	3.6	2.4	3.2	3.1	3.1	3.0	3.1	2.0	1.5	2.3	2.8	2.8	2.8	2.4	3.0	1.9	2.5	2.7	2.6	2.9	2.6
2	3,5	4.0	1.9	2.3	2.2	2.1	3.2	2.6	3.7	1.5	3.2	4.4	4.9	5.2	3.8	2.0	1.4	2.2	3.1	3.4	3.4	2.6	3.3	1.6	2.6	3.2	3.5	3.9	3.0
	4,6	3.3	1.6	1.4	1.7	1.7	2.6	2.0	3.3	2.0	2.9	2.8	2.7	3.1	2.8	1.9	1.5	2.4	2.8	2.7	2.4	2.3	2.8	1.7	2.3	2.4	2.4	2.7	2.4
	7,9	3.5	1.4	1.6	1.9	1.9	2.3	2.0	3.4	1.9	2.6	2.3	2.5	2.6	2.5	2.1	1.4	1.9	2.8	2.8	2.7	2.3	3.0	1.6	2.0	2.3	2.4	2.5	2.3
	8,10	3.7	1.5	1.4	1.7	1.6	2.5	2.0	3.4	1.7	2.9	3.3	3.3	3.4	3.0	1.9	1.4	2.5	2.5	2.6	2.5	2.2	3.0	1.5	2.2	2.5	2.5	2.8	2.4
3	1,3,5	4.0	1.9	2.3	2.2	2.1	3.3	2.6	3.5	1.4	2.9	4.0	4.6	4.9	3.6	2.0	1.4	2.2	3.1	3.3	3.4	2.5	3.2	1.6	2.5	3.1	3.3	3.8	2.9
	2,4,6	3.2	1.6	1.5	1.8	1.7	2.7	2.0	3.4	2.1	2.9	2.8	2.7	2.9	2.8	1.9	1.5	2.4	2.8	2.7	2.5	2.3	2.8	1.7	2.3	2.4	2.4	2.7	2.4
	1,7,9	3.9	1.6	1.9	1.8	1.8	2.9	2.3	3.2	1.7	2.6	2.6	2.8	2.9	2.6	2.0	1.4	2.0	2.9	3.0	3.0	2.4	3.1	1.6	2.2	2.4	2.5	2.9	2.4
	2,8,10	3.6	1.4	1.2	1.6	1.6	2.6	1.9	3.4	1.7	2.8	3.1	3.0	3.1	2.9	1.9	1.4	2.4	2.5	2.6	2.5	2.2	3.0	1.5	2.1	2.4	2.4	2.7	2.3
4	3,5,7,9	3.9	1.7	1.9	1.9	1.8	2.9	2.3	3.6	1.5	2.9	3.5	3.9	4.1	3.3	2.0	1.4	2.1	3.0	3.1	3.0	2.4	3.2	1.5	2.3	2.8	2.9	3.3	2.7
	4,6,8,10	3.5	1.4	1.2	1.6	1.5	2.5	1.9	3.3	1.7	2.8	3.0	3.0	3.1	2.8	1.9	1.4	2.4	2.6	2.6	2.4	2.2	2.9	1.5	2.1	2.4	2.4	2.7	2.3
	3,4,5,6	3.3	1.4	1.4	1.5	1.5	2.7	1.9	3.5	1.6	2.9	3.4	3.6	4.0	3.2	1.9	1.4	2.3	2.9	2.9	2.6	2.3	2.9	1.5	2.2	2.6	2.7	3.1	2.5
	7,8,9,10	3.6	1.2	1.1	1.5	1.6	2.6	1.9	3.4	1.7	2.5	2.8	2.8	2.9	2.7	1.9	1.4	2.2	2.6	2.6	2.5	2.2	3.0	1.4	2.0	2.3	2.4	2.6	2.3

3.5 まとめ

関東近郊の在来鉄道の平地区間、盛土区間、コンクリート高架橋区間において、高所空間を含む沿線の鉄道騒音の分布測定を実施した。その結果、壁なし条件の平地区間、盛土区間では走行軌道から、直壁条件のコンクリート高架橋区間では遮音壁天端上から斜め上方向に強く伝搬する傾向が見られた。また、騒音測定結果を踏まえて、単発騒音暴露レベルの実測値と予測値のレベル差について検討した。壁なし条件の平地区間および盛土区間のいずれにおいても、仰角が $20\sim 50^\circ$ の領域では予測値が実測値より小さくなるものの、実測値と予測値の差は最大 2dB 程度であることが分かった。

本研究では、実測値と予測値の差から指向特性に関する補正量を定量的に検討したものの、補正式の定式化には至らなかった。今後の検討課題として、音源の鉛直面内の指向特性に関する補正式を導出するために、営業線において原点（軌道中心、レールレベル高さ）を中心とした同心円の円弧上に複数の測定点を配置した調査が必要と考えられる。

つぎに、実測した在来鉄道の近接車両および遠隔車両における騒音分布をもとに、鉄道騒音の伝搬予測に対して 2 次元波動数値解析手法の適用する際の音源のモデル化について検討を行い、精度を検証した。その結果、地上高さ 25 m 程度まで騒音レベルを精度よく予測するには、高さ $1.2\text{ m}\sim 10\text{ m}$ の複数点を参照点に設定するべきであることが分かった。とくに、2 次元解析の場合、異なる高さの複数地点を基準として参照し、2 次元解析の結果がもつ特異なピーク・ディップの周波数特性を平均化する手順は特異な干渉の影響を抑制する上で有効な手段の一つであると考えられる。

また、車両下部に配置する音源の数が多いほど計算誤差は小さくなるが、音源数の増加に対する精度の改善量と計算時間の増加量を勘案した結果、音源の数は 2 つ、レール頭頂面高さで車両端 2 点に設置したケースが最適と考えられる。

第4章 鉄道車体と遮音壁間の多重反射が遮音性能に与える影響

4.1 概要

現在、広く利用されている反射性の遮音壁では、車体と遮音壁の間で生じる多重反射音が沿線に伝搬して騒音レベルを増加させる。森藤らの手法では多重反射の影響による補正は一律に 2dB 加えるとしているが、遮音壁の高さは 1~2 m に限定されている。また、都市部では軌道の両側に遮音壁が設置されることが多いが、遮音壁の高さによっては、反対側の遮音壁と車体、および両側の遮音壁間でも多重反射が生じるため、沿線騒音の予測においてその影響を無視できないことが予想される。

そこで、まず、数値解析手法として 2 次元時間領域有限差分法を用いて、多重反射が生じる条件下で騒音低減量を算出し、遮音壁の高さ、車体と遮音壁の距離、先折れ遮音壁の角度を要因としたケーススタディにより多重反射の影響の挙動を把握する。

また、2 次元数値解析結果の妥当性を 1/25 縮尺模型を用いた実験により検討する。つづいて、数値解析から求めた多重反射の影響を在来鉄道騒音の予測に適用する手順について検討する。前川チャートを用いて計算した多重反射を考慮しない場合の回折減衰量と、数値解析から求めた多重反射を考慮した場合の回折減衰量のレベル差を算出し、その値を補正量として鉄道総研の予測手法に加算することを前提に、車体と遮音壁間の多重反射に対応する補正量、および両側遮音壁の多重反射に対応する補正量を定量的に検討する。

4.2 数値解析による騒音低減効果の検討

遮音壁による騒音低減効果に関して、車体と遮音壁の距離、遮音壁の高さ、遮音壁先端の傾斜角度、加えて、高架端の両側に同じ高さの遮音壁を設置した場合の影響を検討するため、鉄道沿線の騒音伝搬を模擬した2次元モデルに時間領域有限差分法を適用し、数値解析によるケーススタディを行う。

4.2.1 数値解析の方法

(1) 対象領域

図 4.1 に示すように、片側遮音壁の場合は近接軌道中心から 3 m 離れの高架端に、両側の場合は近接および遠隔の各軌道中心から 3 m 離れの両高架端に遮音壁が設置されている状況を解析断面として想定した。解析領域は、地表面反射の影響を除外するため[104]、高架鉄道を対象とした2次元自由音場（幅 40 m×高さ 40 m、外周に幅 5 m の境界吸収層）とした。

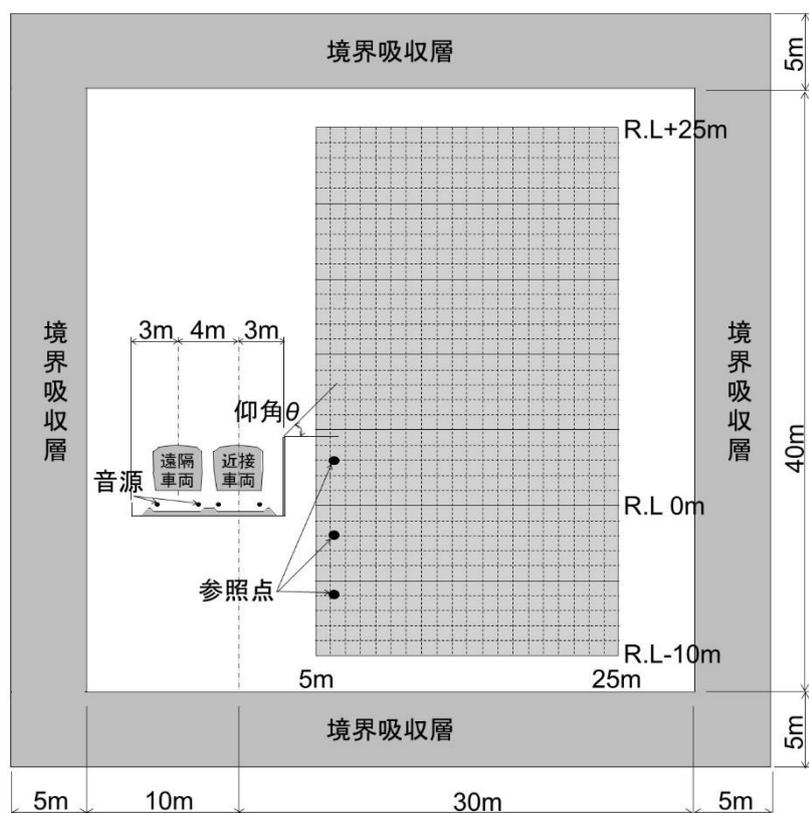


図 4.1 2次元解析モデル

(2) 計算条件

時間差分は2次近似，空間差分は4次近似，各離散化幅を $\Delta t=15.6 \mu\text{s}$ ， $\Delta x=\Delta y=16 \text{ mm}$ ，計算時間長を 2.048 s とし，上限帯域を中心周波数 2.5 kHz の $1/3$ オクターブバンドとして，任意形状に対して階段近似によるモデルの誤差を小さくするため，空間離散幅は計算対象上限周波数における波長の $1/10$ 程度とした。軌道には厚さ 300 mm のバラストを使用し，機械系置換モデルにより吸音特性を模擬した。音源は，実際の指向性により近似させるため，近接・遠隔車両の各々に対して図 4.3 に示すようにレール頭頂面高さの車両端に点音源2点（図 3.11 の音源位置 7,9）を配置し，初期音圧としてガウシアンパルスを与えた。音源の周波数特性については，高架端の両側に 1.7 m の直壁が設置されている高架橋の近接軌道中心から水平方向に 6.25 m 離れ， $\text{R.L}+3 \text{ m}$ ， $\text{R.L}-2 \text{ m}$ ， $\text{R.L}-6 \text{ m}$ の受音点3点を参照し，各帯域でA特性補正をかけた単発騒音暴露レベルの算術平均値が一般的なコンクリート高架橋における現場実測と数値解析で一致するようにスペクトル補正を行うこととした。

近接車両で軌道中心から水平に 6.25 m 離れ， $\text{R.L}+3 \text{ m}$ ， $\text{R.L}-2 \text{ m}$ ， $\text{R.L}-6 \text{ m}$ の3点で実測した走行騒音の周波数特性の平均値を図 4.2 に示す。車両モデルは，台車，パンタグラフ，屋根上機器を除いた車両の断面形状のみを再現した。受音点は遮音壁背後の水平距離 $20 \text{ m} \times$ 高さ 35 m の範囲内に 1 m 間隔の格子状に配置し，受音点での単発騒音暴露レベルを求めた。また，本稿では図 4.1 に示すとおり，近接車両側の遮音壁先端を中心とした仰角をパラメータとして整理した。

仰角は近接車両側の遮音壁先端と測定点を結ぶ線分と遮音壁先端の水平線の成す角度で，遮音壁先端の高さを基準（仰角 $\theta=0^\circ$ ）として上方向を正の値とした。また，各測定点における仰角を 30° 間隔に区分し，区分した仰角ごとの騒音低減量の算術平均値により騒音低減効果を評価した。表 4.1 に遮音壁の計算ケースを示す。

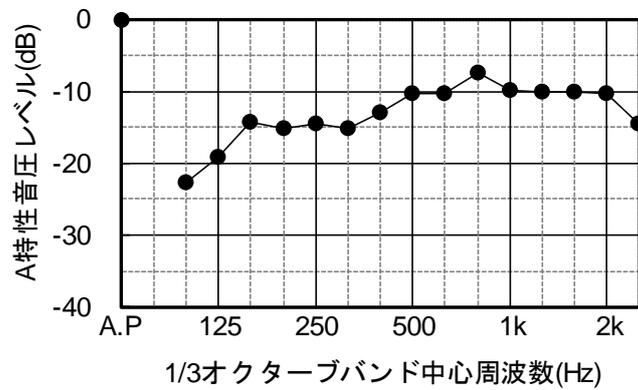


図 4.2 在来鉄道騒音の周波数特性（参照点 3 点の平均値）

表 4.1 遮音壁の計算ケース

遮音壁	片側 遮音壁	両側 遮音壁
直壁	0m(遮音壁なし)	0m(遮音壁なし)
	1m	1m
	2m	2m
	3m	3m
	4m	4m
	5m	5m
	6m	6m
先端 傾斜型	2m+1m 0°(直壁3m)	-
	2m+1m 15°	-
	2m+1m 30°	-
	2m+1m 45°	-
	2m+1m 60°	-
	2m+1m 75°	-
	2m+1m 90°(逆L型)	-
車体の有無	車体あり, 車体なし	車体あり

注1) スペクトル補正の補正値を算出するため、両側遮音壁1.7mのケースを実施する。

注2) 近接車両、遠隔車両の両ケース実施する。

4.2.2 解析結果

(1) 車体と遮音壁間の多重反射の影響

遮音壁の騒音低減効果として、遮音壁が無い条件を基準とした騒音低減量を算出する。さらに、車体なしの騒音低減量から車体ありの騒音低減量を差し引いた値を車体・遮音壁間の多重反射に伴う騒音レベルの増加量として評価した。

a. 直壁の高さを変化させた場合

図 4.3 に示すように、直壁の高さを 1~6 m まで 1 m ごとに变化させる。図 4.4 に各条件の仰角ごとの車体なしに対する車体ありの場合の騒音レベル増加量の算術平均値を示す。近接車両の場合、直壁の高さを上げると増加量は増えるが、直壁 3~4 m で最大となっている。一方、直壁の高さが車体の高さを超える 5 m 以上になると増加量は小さくなる。遠隔車両の場合、仰角 0~30°において増加量は大きくなるが、それ以外の領域ではほぼ一定の値になっている。

図 4.5 に近接車両における直壁 1 m, 3 m, 5 m の騒音レベル増加量のコンター図を示す。直壁 1 m では増加量は R.L より低い位置で 1~3dB 程度、R.L より高い位置で -1~1dB 程度であり、多重反射の影響は小さいと考えられる。一方、直壁 3 m では増加量が最大で 11dB 程度で、特に遮音壁先端から斜め上方の空間において大きくなっている。直壁 5 m での増加量は遮音壁先端から低い空間において最大で 4dB 程度であるが、遮音壁先端から斜め上方の空間では、車体ありの方が車体なしより大きくなっている。

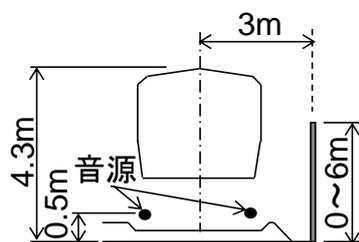
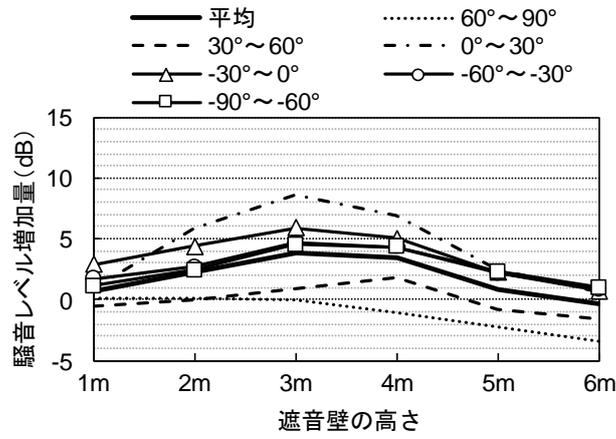
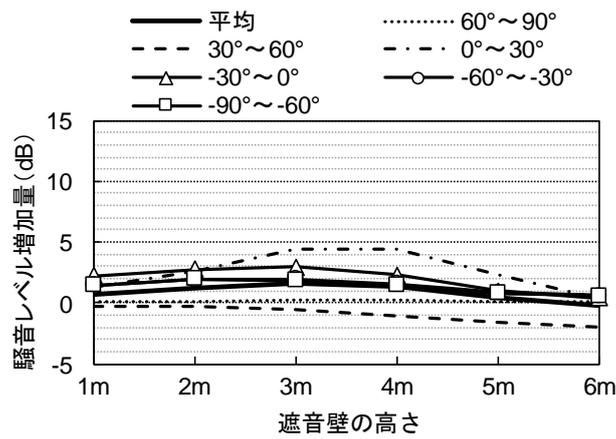


図 4.3 遮音壁の形状（直壁高さの変化）



(a) 近接車両



(b) 遠隔車両

図 4.4 車体なしに対する車体ありの場合の騒音レベル増加量 (片側・直壁高さの変化)

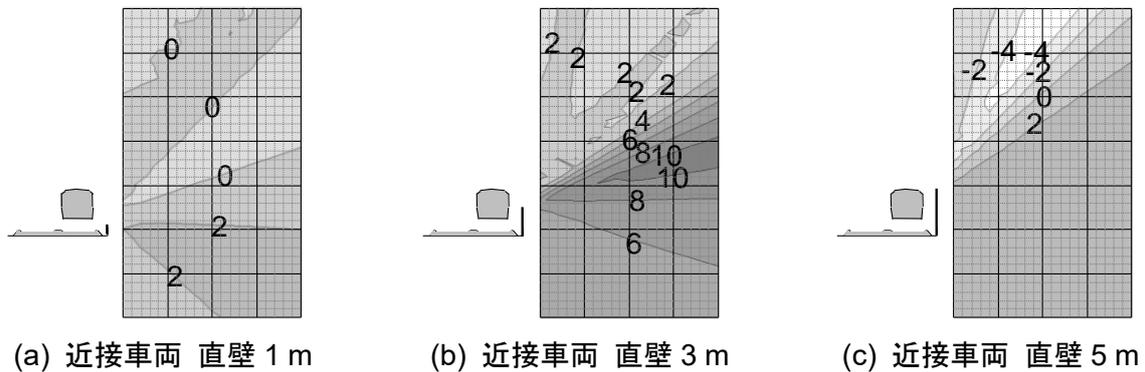


図 4.5 車体なしに対する車体ありの場合の騒音レベル増加量のコンター図
(片側・直壁高さの変化)

b. 遮音壁先端の傾斜角度を変化させた場合

図 4.6 に示すように、遮音板先端の傾斜角度を 0° ～ 90° まで 15° ごとに変化させる。

図 4.7 に各条件の仰角ごとの騒音レベル増加量の算術平均値を示す。

近接車両の場合、増加量は仰角 0° ～ 30° を除くと遮音壁先端の傾斜角度 0° (直壁) が最大で、遮音壁先端の角度が大きくなると減少し、仰角 30° 以下の空間では角度 45° ～ 60° で最小となっている。遮音壁の先端を車体側へ傾斜させることにより、遮音壁先端の上方の空間で多重反射の影響を軽減することができると考えられる。遠隔車両では、仰角 0° ～ 30° における増加量は角度 60° で最小になるものの、他の空間では遮音壁先端の角度の違いによる増加量の変化は見られない。

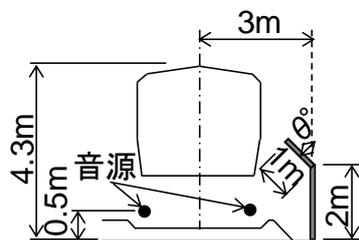
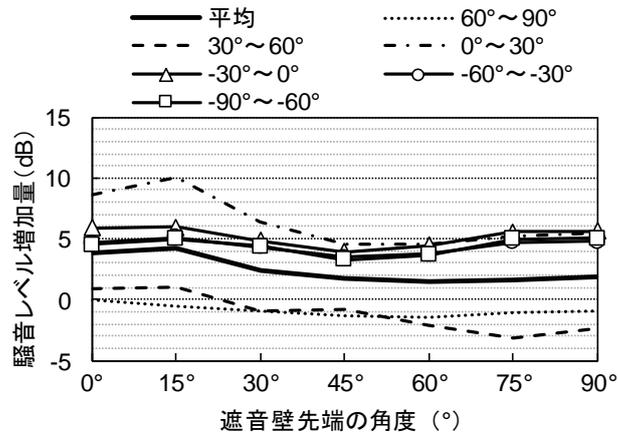
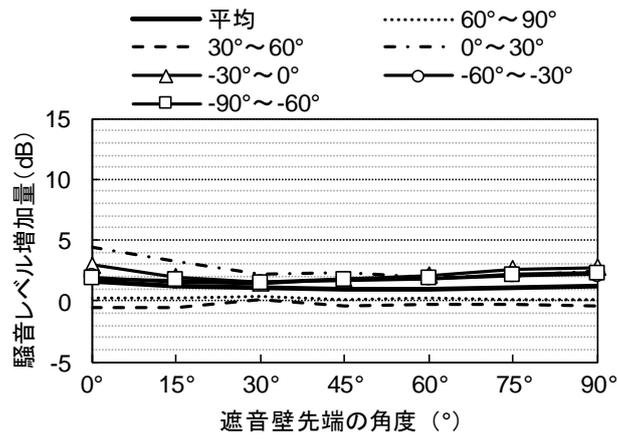


図 4.6 遮音壁形状 (遮音壁先端角度の変化)



(a) 近接車両



(b) 遠隔車両

図 4.7 車体なしに対する車体ありの場合の騒音レベル増加量

(片側・遮音壁先端角度の変化)

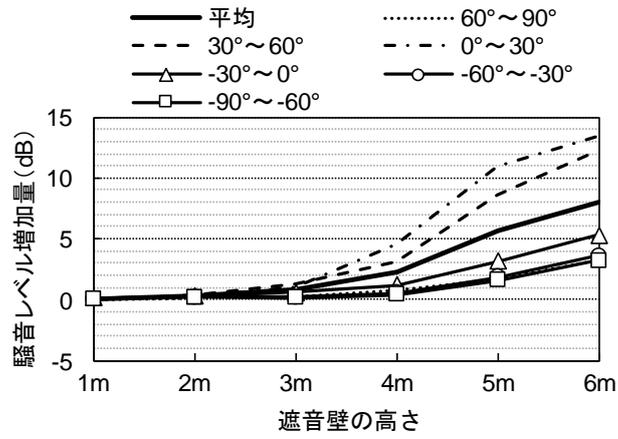
(2) 遮音壁間の多重反射の影響

近接・遠隔側の高架端両側の直壁の高さを1～6 mまで1 mごとに変化させる。図4.8に各条件の仰角ごとの近接側軌道の高架端にのみ遮音壁を設置した場合（車体あり）を基準として、近接・遠隔側高架端の両側に同じ高さの遮音壁を設置した場合の騒音レベル増加量の算術平均値を示す。

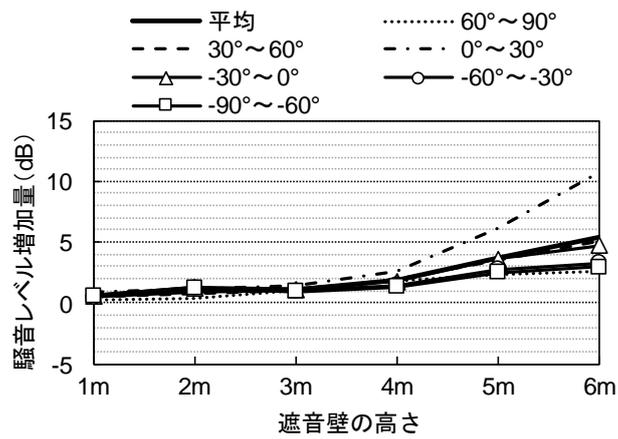
近接側軌道の高架端のみの片側遮音壁条件と比べて、両側遮音壁ではほぼ全ての空間で騒音レベルが増加している。この騒音増加は、遠隔側軌道の高架端に設置された直壁で反射された車両下部騒音の影響で、直壁の高さが車体の高さを超える5 m以上のケースで増加量が大きくなり、特に仰角0～30°の空間で大きいことが分かる。

図4.9に近接車両における直壁1 m、3 m、5 mの騒音レベル増加量のコンター図を示す。

直壁の高さが3 mより低い場合は、遠隔側の直壁からの反射音が車体で遮蔽されるために増加量は2dB未満であるが、直壁5 mの場合、遠隔側の直壁が直接見通せる高所空間の受音点では反射音の影響が著しく、増加量が10dBを越える領域が見られる。遮音壁が反射性で、かつ直壁高さが4 mを超える場合には、両側の遮音壁を組合せて騒音の低減効果を推定する必要がある。

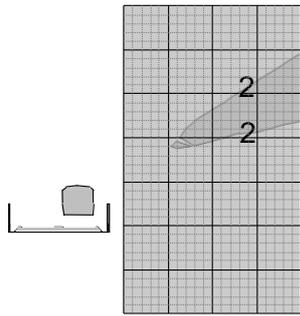


(a) 近接車両

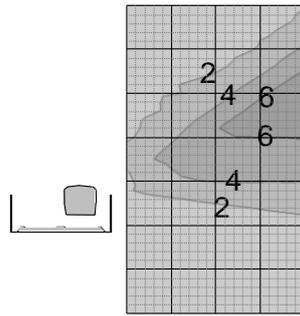


(b) 遠隔車両

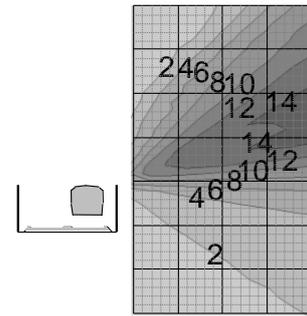
図 4.8 片側に対する両側遮音壁の場合の騒音レベル増加量（両側高さの変化）



(a) 近接車両 直壁 3 m



(b) 近接車両 直壁 4 m



(c) 近接車両 直壁 5 m

図 4.9 片側に対する両側遮音壁の場合の騒音レベル増加量のコンター図 (両側高さの変化)

4.3 縮尺模型を用いた検証実験

騒音レベルに対する模型実験結果と 2 次元の数値解析結果を比較し、両者の対応を検証する。

4.3.1 模型実験

高架橋区間の軌道，列車，遮音壁の模型を縮尺 1/25，すべて反射性のアクリル材で製作した。図 4.10 に高架橋の軌道および列車の縮尺模型の設置状況を示す。軌道と遮音壁の模型は実寸換算 160 m 分，車両模型は 120 m 長とした。車両模型の下には列車と同じ長さの模型用の非干渉性線音源を配置した。模型用の線音源は圧縮空気を利用した非干渉性線音源で，音源に供給する圧縮空気の圧力に比例して放射音が増加するが，同時に時間的な変動も大きくなる。実験準備の段階で，出来る限り大きな SN 比が確保でき，かつ 10 秒程度で平均音圧が計測できる空気圧の条件を確認し，すべての実験条件を通して常に圧縮空気の圧力を一定（5 気圧）に保持するようにした。

図 4.11 の各測定点で 10 秒間平均の 1/3 オクターブバンド音圧レベルを計測した。音源の周波数特性については，高架端の両側に 1.7 m の直壁が設置されている高架橋の近接軌道中心から水平方向に 6.25 m 離れ，R.L+3 m，R.L-2 m，R.L-6 m の受音点 3 点から直線補間法により R.L+5 m，R.L 0 m，R.L-5 m それぞれの騒音レベル（A 特性音圧レベル）を算出し，各帯域での算術平均値が現場実測と模型実験で一致するようにスペクトル補正を行った。表 4.2 に遮音壁の実験ケースを示す。

表 4.2 遮音壁の実験ケース

遮音壁	片側 遮音壁	両側 遮音壁
直壁	0m(遮音壁なし)	0m(遮音壁なし)
	1.7m	1.7m
	3m	3m
	5m	5m
車体の有無	車体あり	車体あり

注1) 近接車両，遠隔車両の両ケース実施する。



図 4.10 高架橋の軌道，列車の設置状況

4.3.2 模型実験の数値解析モデル

図 4.11 の模型実験の測定断面に対して，FDTD 法を適用する。音源は，模型実験と同様にレール頭頂面高さの軌道中心に音源 1 点を配置し，軌道面の境界条件は完全反射とした。上記以外の数値解析の条件は 4.2.1 節と同様とした。

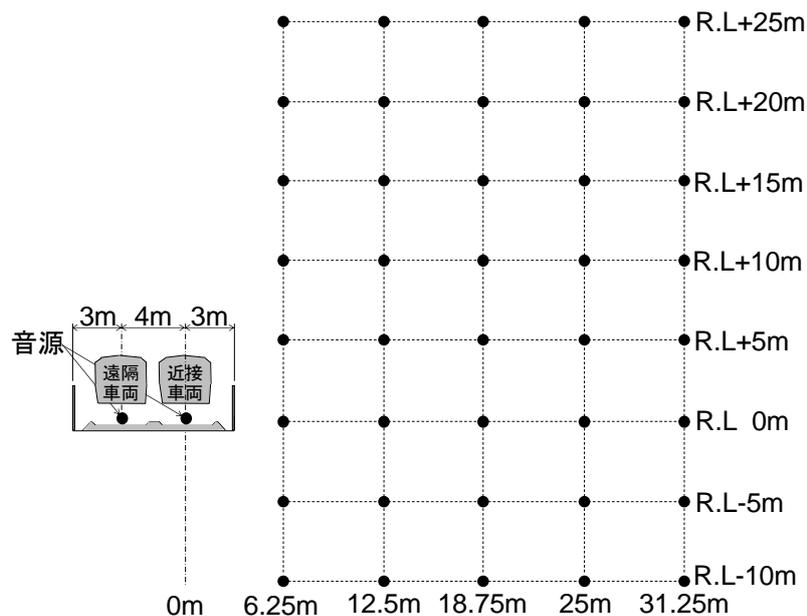


図 4.11 模型実験における測定点配置

4.3.3 模型実験結果と数値解析結果の対応

(1) 騒音レベルの空間分布

高さ 1.7 m, 3 m, 5 m の直壁を近接側軌道の高架端（片側）と近接・遠隔側高架端の両側に設置した場合（両側）の実験値と計算値の騒音レベルの差を測定点ごとに求め，その差について最大値，最小値，平均値，標準偏差を算出した。その結果を表 4.3 に示す。遠隔車両では実験値が計算値を上回り，直壁 5 m を両側に設置した場合の両者の差は 3dB を超えるものの，近接車両では比較的騒音レベルの差は小さくなっており，全体として両者の傾向は対応している。

また，近接車両における壁なし条件を基準として，車体と遮音壁間の多重反射の影響が大きい直壁 3 m と遮音壁間の多重反射の影響が大きい直壁 5 m を片側および両側

に設置した場合の騒音レベルのコンター図を図 4.12 に示す。騒音レベルは 4.4.2 節で算出するパワーレベルを基準とした相対値とした。

計算値の騒音レベルは実験値と比較して数 dB 小さい領域もあるが、空間分布は概ね一致している。騒音レベルの空間分布に関して、FDTD 法は実験値を比較的精度よく予測できていることがわかる。

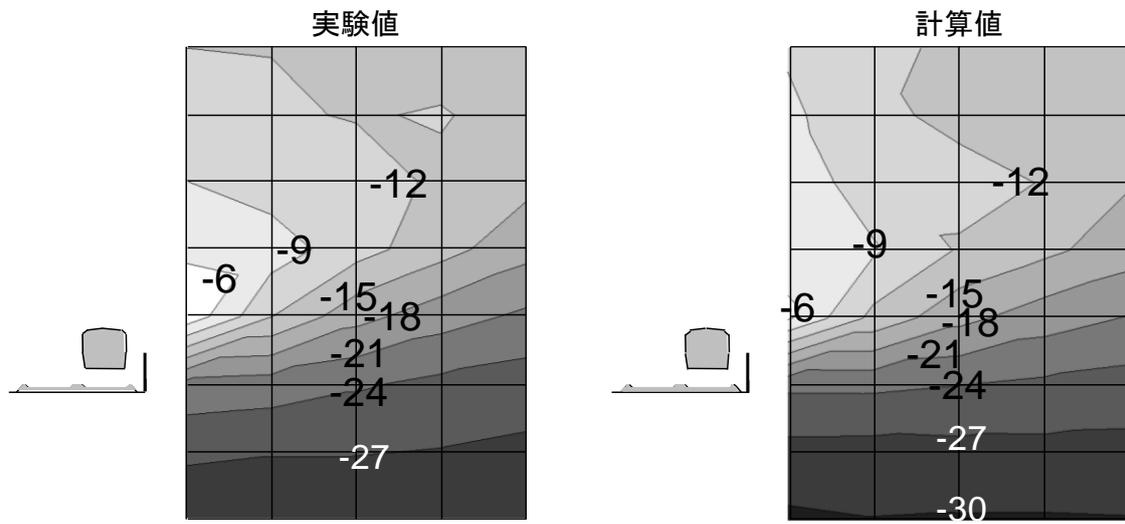
表 4.3 実験値と計算値の騒音レベルの差

(a) 近接車両

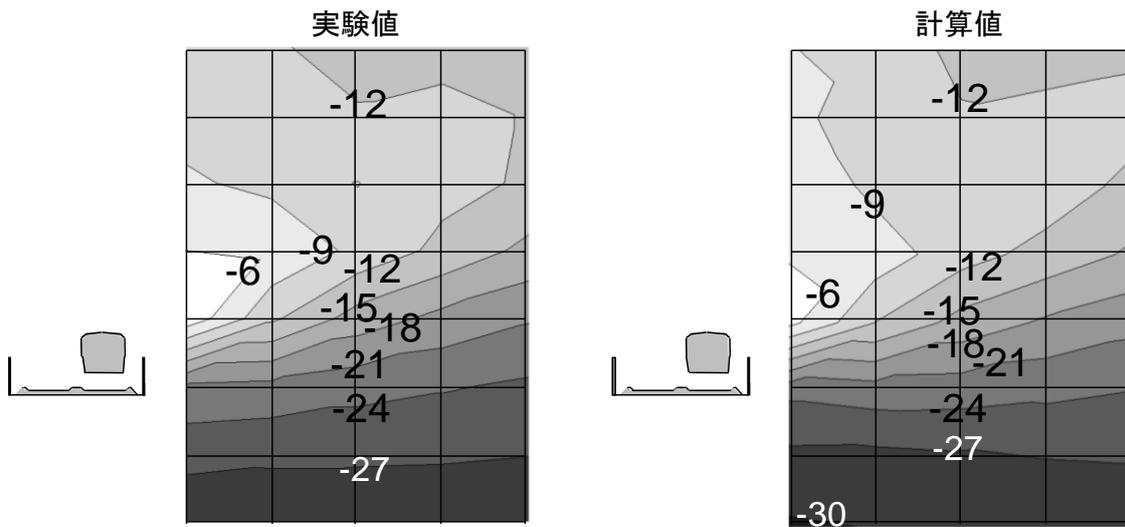
	騒音レベルの差			標準偏差 (dB)
	平均値 (dB)	最大値 (dB)	最小値 (dB)	
片側 直壁 1.7m	-0.5	2.8	-2.6	1.5
両側 直壁 1.7m	-0.5	2.8	-2.5	1.4
片側 直壁 3m	-0.3	2.6	-1.8	1.1
両側 直壁 3m	-0.1	2.8	-1.9	1.1
片側 直壁 5m	0.3	2.4	-1.3	0.8
両側 直壁 5m	1.1	2.5	-0.4	1.3

(b) 遠隔車両

	騒音レベルの差			標準偏差 (dB)
	平均値 (dB)	最大値 (dB)	最小値 (dB)	
片側 直壁 1.7m	0.5	2.7	-1.4	1.1
両側 直壁 1.7m	1.1	2.7	-0.5	1.4
片側 直壁 3m	1.2	2.9	-0.4	1.5
両側 直壁 3m	1.5	2.8	0.2	1.7
片側 直壁 5m	0.5	2.9	-1.5	1.2
両側 直壁 5m	1.7	3.5	-0.1	1.9



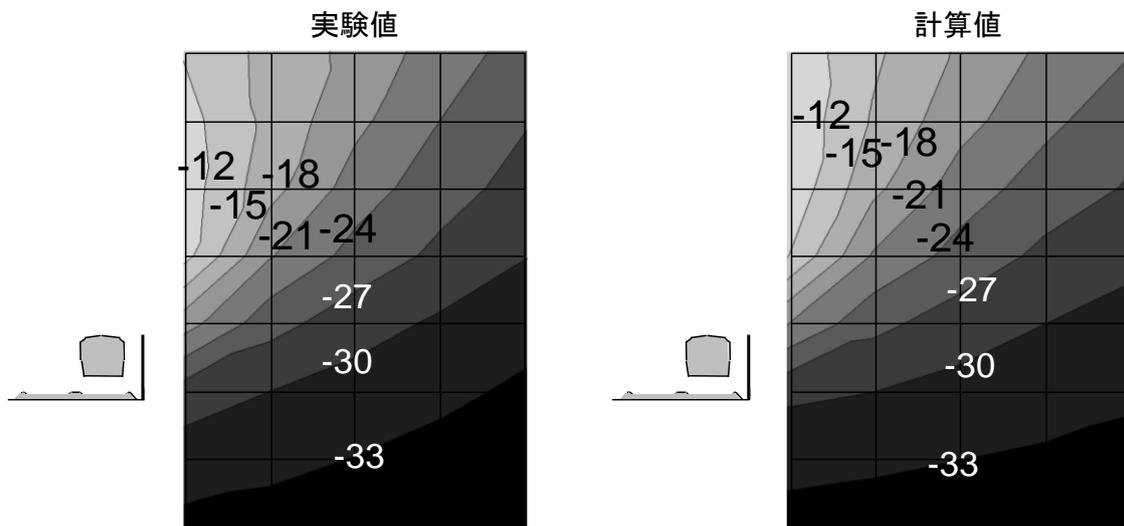
(a) 片側 直壁 3 m



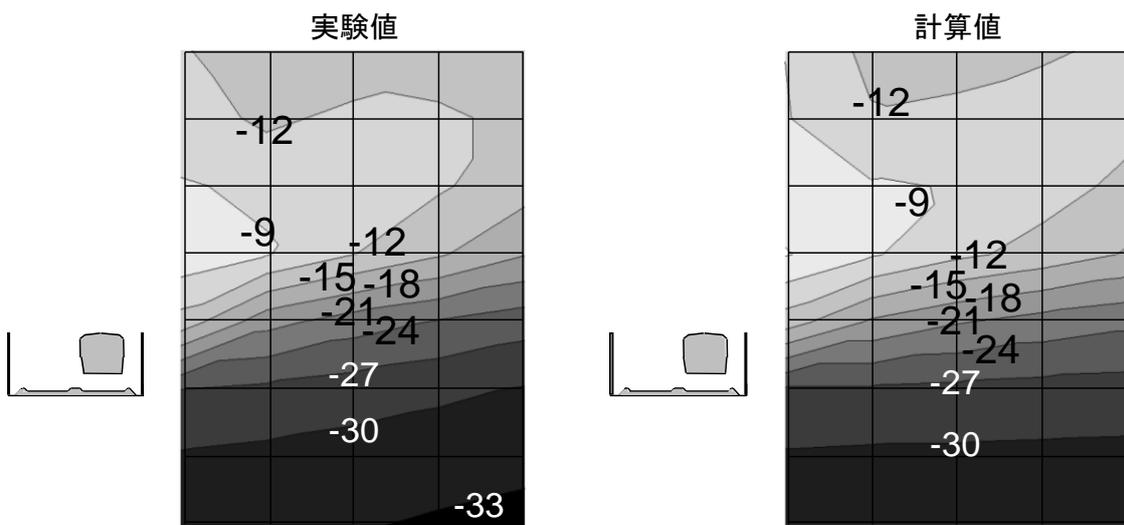
(b) 両側 直壁 3 m

図 4.12 騒音レベルのコンター図

(直壁 3m, パワーレベルを基準とした相対騒音レベル)



(c) 片側 直壁 5 m



(d) 両側 直壁 5 m

図 4.12 騒音レベルのコンター図

(直壁 5m, パワーレベルを基準とした相対騒音レベル)

(2) 騒音レベルの周波数特性

「在来鉄道の新設又は大規模改良に際しての騒音対策指針について」[3]の標準点である近接軌道中心から水平方向に 12.5 m の距離について、高さ R.L-10 m, R.L+10 m, R.L+25 m における近接車両の周波数特性を図 4.13 に示す。数値解析は 2 次元音場を対象としているため、軌道面や遮音壁面による反射音との干渉に伴うピーク・ディップの多い周波数特性となっている。そのため、いずれの条件においても計算値と実験値が乖離する周波数も見られるが、全体では計算値と実験値の周波数特性はよく合っていることが分かる。

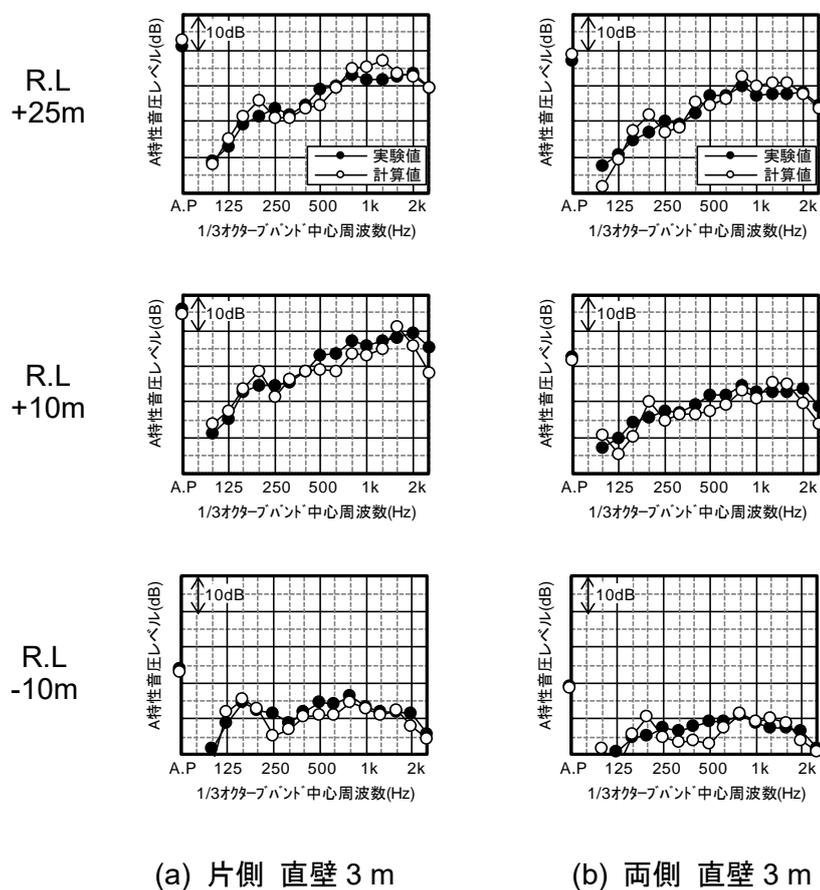


図 4.13 実験値と計算値の周波数特性（直壁 3 m, 近接軌道中心から 12.5 m 離れ）

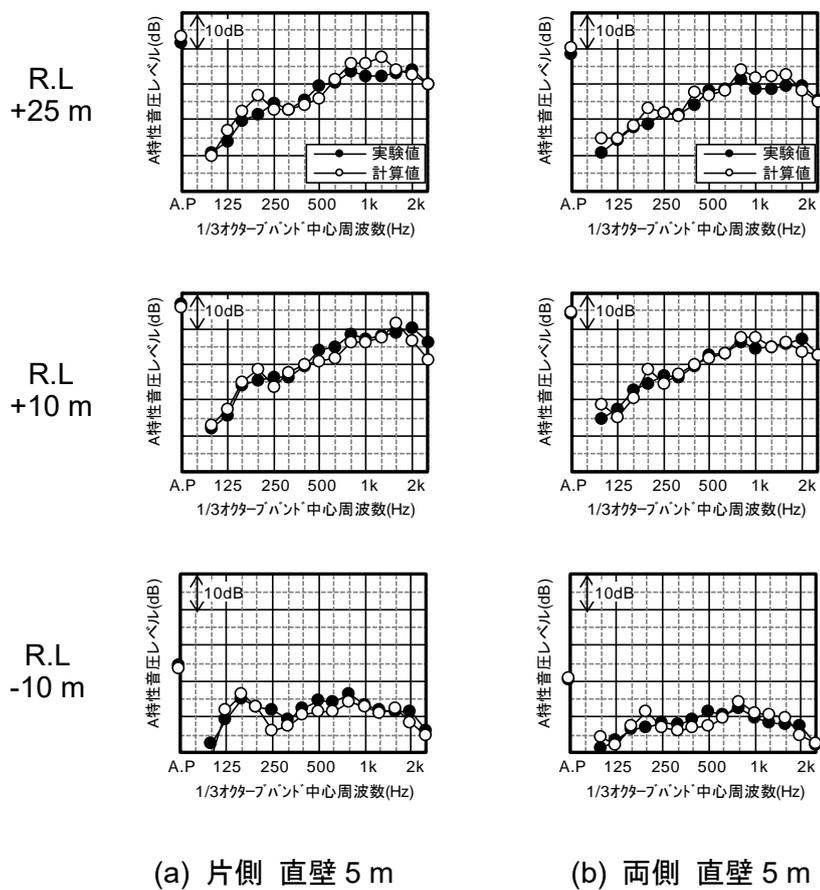


図 4.13 実験値と計算値の周波数特性 (直壁 5 m, 近接軌道中心から 12.5 m 離れ)

4.4 車体の有無による回折減衰量の比較

4.4.1 車体無しの条件における回折減衰量

互いに無相関な無指向性点音源が一様に並んだ非干渉性線音源に対する回折減衰量 ΔL_{dl} は、位置 x の点音源に対する回折減衰量 $\Delta L_d(x)$ (前川チャート) を用いて次式により算出する。

$$\Delta L_{dl} = -10 \log_{10} \left[\frac{\int_{-\infty}^{\infty} 10^{\frac{-\Delta L_d(x)}{10}} / R(x)^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} 1/R(x)^2 dx} \right] \quad (4.1)$$

ここで、 x は点音源の線路方向の位置、 $R(x)$ は受音点と点音源の距離を示し、 $x=0$ のとき点音源は受音点の正面位置で、 $R(0)=r$ (最短距離) となる。

また、音源位置はレール頭頂面高さの軌道中心とする。

4.4.2 車体ありの条件における回折減衰量

車体ありの条件における回折減衰量 $\Delta L_{dl,cal}$ は、4.2 節の数値解析で算出した単発騒音暴露レベル $L_{AE,cal}$ を用いると、次式で表される。

$$\Delta L_{dl,cal} = L_w - 10 \log_{10}(4vr) - L_{AE,cal} \quad (4.2)$$

ここで、 L_w は列車全体のパワーレベル、 v は列車速度、 r は走行軌道と測定点間の距離、 $L_{AE,cal}$ は数値解析から算出した単発騒音暴露レベルである。鉄道総研予測式では L_w を車両機器の搭載条件や速度乗則から設定するが、ここでは軌道近傍の単発騒音暴露レベルから次式により逆算するものとする。

$$L_w = L_{AE,ref} + 10 \log_{10}(4vr_{ref}) \quad (4.3)$$

ここで、 $L_{AE,ref}$ は遮音壁がない軌道近傍点における単発騒音暴露レベル、 r_{ref} は近接車両の軌道中心から軌道近傍点までの最短距離である。最終的に、式(4.3)を式(4.2)に代入した式(4.4)から各測定点での回折減衰量 $\Delta L_{dl,cal}$ を算出する。

$$\Delta L_{dl,cal} = L_{AE,ref} - L_{AE,cal} - 10 \log_{10} \left(\frac{r}{r_{ref}} \right) \quad (4.4)$$

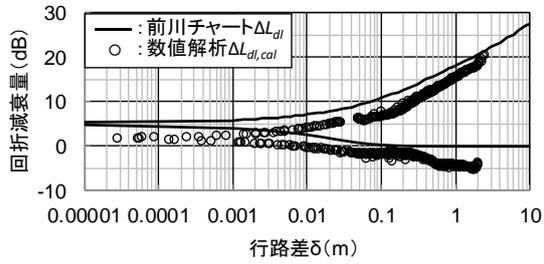
なお、本論文では、高架端両側に高さ 1.7 m の直壁が設置されている区間における近接車両の軌道近傍（軌道中心から水平距離 2.3 m，レールレベルから高さ 0.45 m）で実測した単発騒音暴露レベルを用い、実測した音場を対象とした直壁あり・なしの数値解析結果から、遮音壁の影響を差し引いて $L_{AE,ref}$ を与えている。

4.4.3 解析結果

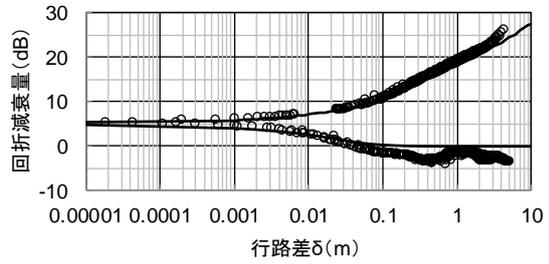
式(4.2)から求めた近接側軌道の高架端のみの遮音壁条件において、直壁 1 m, 3 m, 5 m の回折減衰量 $\Delta L_{dl,cal}$ を図 4.14 に示す。ここで、式(4.1)より算出した正の行路差に対する回折減衰量 ΔL_{dl} は右上がりの実線、負の行路差に対する回折減衰量 ΔL_{dl} は右下がりの実線で表す。

近接車両ではいずれのケースについても $\Delta L_{dl,cal}$ は ΔL_{dl} より小さい。とくに直壁 3 m で $\Delta L_{dl,cal}$ と ΔL_{dl} の差が大きくなっている。

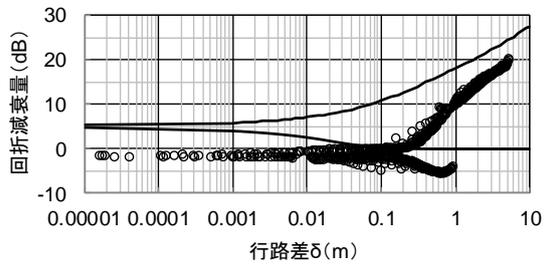
一方、近接車両に比べると、遠隔車両における $\Delta L_{dl,cal}$ と ΔL_{dl} の差は小さく、直壁 1 m では $\Delta L_{dl,cal}$ と ΔL_{dl} の差は $\pm 1 \sim 2$ dB 程度である。しかし、直壁 3 m で $\Delta L_{dl,cal}$ は ΔL_{dl} より小さくなっており、遠隔車両の場合も多重反射の影響で回折減衰量が小さくなっており、この影響を考慮する必要があると考えられる。



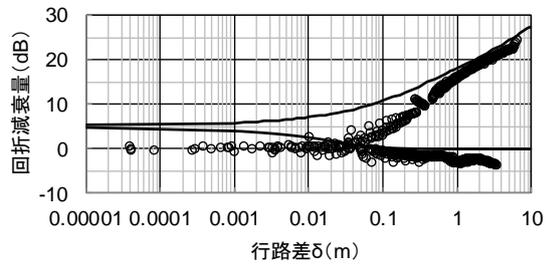
(a) 近接車両 直壁 1 m



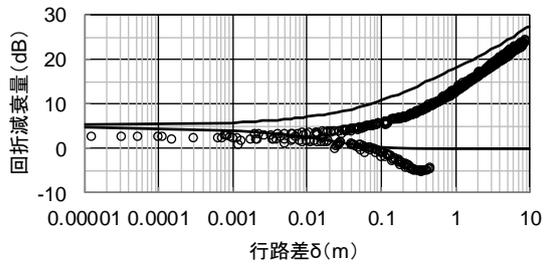
(d) 遠隔車両 直壁 1 m



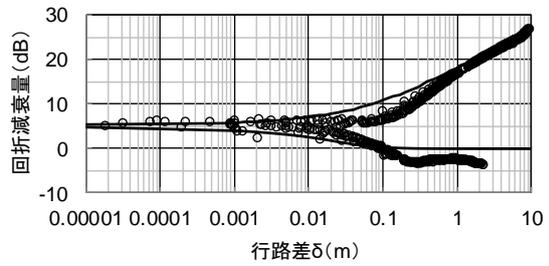
(b) 近接車両 直壁 3 m



(e) 遠隔車両 直壁 3 m



(c) 近接車両 直壁 5 m



(f) 遠隔車両 直壁 5 m

図 4.14 回折減衰量に対する前川チャートと数値解析結果の比較

4.5 多重反射による補正量の算出

4.5.1 補正量を考慮した騒音予測式の概要

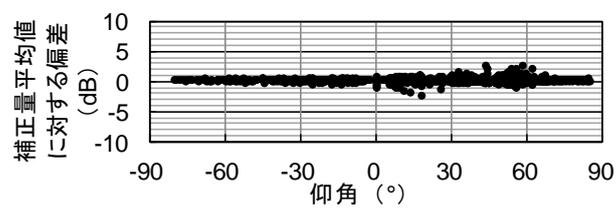
車体・遮音壁間の多重反射が生じた場合の単発騒音暴露レベル $L_{AE, pred}$ について、多重反射による補正量 ΔL_{cor} を導入した以下の予測式を想定する。

$$L_{AE, pred} = L_w - 10 \log_{10}(4vr) - \Delta L_{dl} + \Delta L_{cor} \quad (4.5)$$

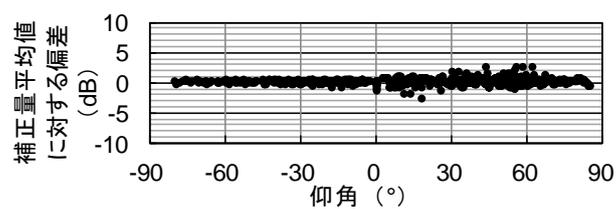
ここで、 ΔL_{dl} は式(4.1)から算出する車体無しの片側遮音壁の回折減衰量である。次節では、数値解析結果より補正量 ΔL_{cor} を算出し、考察を行う。

4.5.2 補正量の算出結果

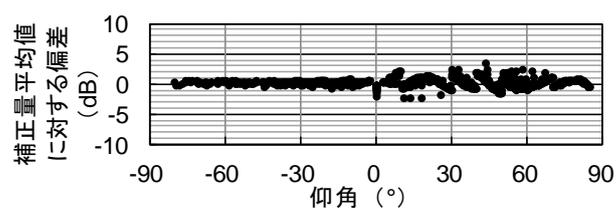
多重反射による騒音レベル増加量は、図 4.5 に示すとおり近接車両側の遮音壁先端を中心とした放射状の分布におおよそなっていることから、遮音壁先端からの仰角をパラメータとして整理する。式(4.1)から算出した回折減衰量 ΔL_{dl} と数値解析による回折減衰量 $\Delta L_{dl, cal}$ の差を多重反射による補正量 ΔL_{cor} ($=\Delta L_{dl} - \Delta L_{dl, cal}$) とする。また、仰角 $-90^\circ \sim +90^\circ$ の範囲を 1° 、 5° 、 10° 、 15° 間隔に区分した補正量の算術平均値を算出し、補正量の算術平均値に対する各測定点の偏差を求め、角度区分の設定について検討する。近接車両における片側直壁 3 m と両側直壁 5 m の補正量の算術平均値に対する偏差を図 4.15 に示す。また、偏差について最大値、最小値、標準偏差、偏差が ± 2 dB を超える測定点の割合を算出した。その結果を表 4.4 に示す。偏差は角度区分の間隔の増加に伴い大きくなり、特に両側直壁 5 m では角度区分の間隔が 10° 以上になると仰角 0° 以上で偏差が大きくなり、偏差が 2 dB を超える測定点の割合が 10% 程度になることから、 5° 間隔ごとの補正量の算術平均値を適用する。



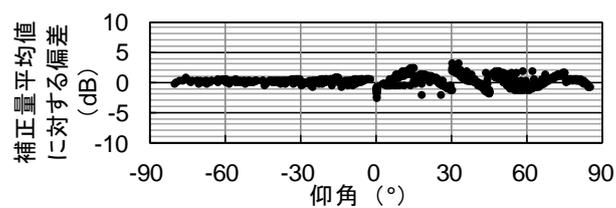
(a) 片側 直壁 3 m 1°間隔



(b) 片側 直壁 3 m 5°間隔



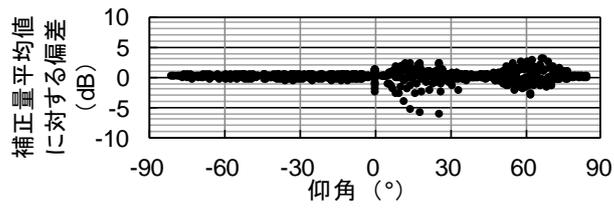
(c) 片側 直壁 3 m 10°間隔



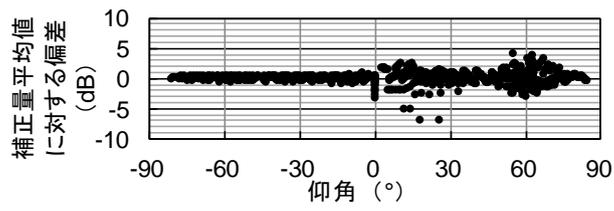
(d) 片側 直壁 3 m 15°間隔

図 4.15 多重反射補正量の平均値に対する偏差

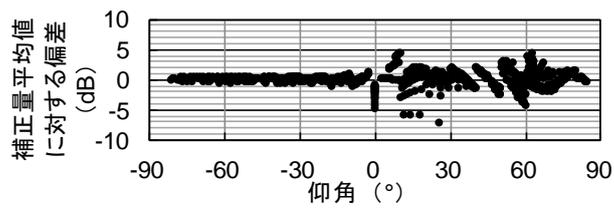
(片側 直壁 3 m, 角度区分の間隔の変化)



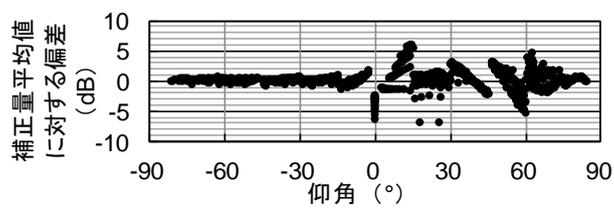
(e) 両側 直壁 5 m 1°間隔



(f) 両側 直壁 5 m 5°間隔



(g) 両側 直壁 5 m 10°間隔



(h) 両側 直壁 5 m 15°間隔

図 4.15 多重反射補正量の平均値に対する偏差
(両側 直壁 5 m, 角度区分の間隔の変化)

表 4.4 多重反射補正量の平均値に対する偏差（角度区分の間隔の変化）

(a) 片側 直壁 3 m

角度区分 の間隔	偏差		標準偏差 (dB)	偏差が ± 2 dB以上の割合
	最大値 (dB)	最小値 (dB)		
1°	2.5	-2.5	0.4	0.5%
5°	2.5	-2.9	0.5	0.9%
10°	3.2	-2.5	0.7	1.2%
15°	3.1	-2.8	0.9	2.2%

(b) 両側 直壁 5 m

角度区分 の間隔	偏差		標準偏差 (dB)	偏差が ± 2 dB以上の割合
	最大値 (dB)	最小値 (dB)		
1°	2.9	-6.1	0.8	4.2%
5°	4.0	-7.0	1.0	6.2%
10°	4.4	-7.2	1.3	9.3%
15°	6.0	-7.1	1.6	17.3%

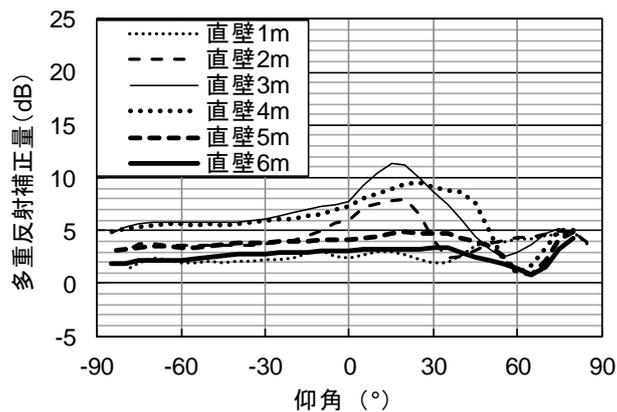
(1) 片側直壁における多重反射の影響

片側直壁における多重反射補正量の平均値と仰角の関係を図 4.16 に示す。

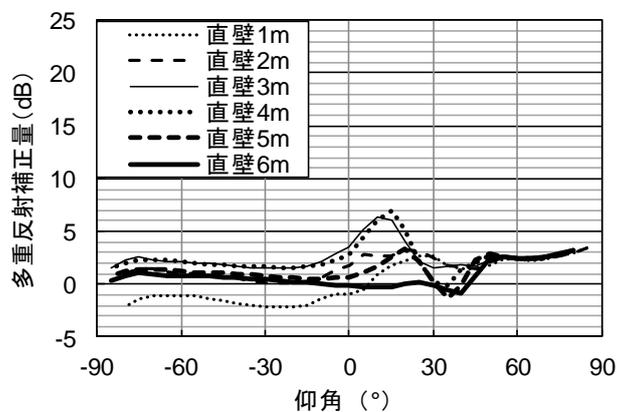
近接車両の場合、直壁の高さを上げると補正量は大きくなり、直壁 3 m で 4~12dB、仰角 20°付近で最大となる。一方、直壁の高さが車体の高さを超える 5 m 以上になると補正量は最大で 6dB である。

一方、遠隔車両の場合、直壁 4 m 仰角 15°付近で補正量は最大となるが、その値は 7dB 程度である。また、直壁 6 m では、仰角 40°以下で-1~1dB となり、多重反射の影響は小さい。

近接車両の直壁 2 m, 4 m, 6 m において、図 4.16 に示す補正量の算術平均値に対する各測定点の偏差を図 4.17 に示す。直壁 4 m で仰角 45°以上で偏差が 3dB を超える測定点も見られるが、ほとんどの測定点で偏差は 2dB 以内に収まることが分かる。

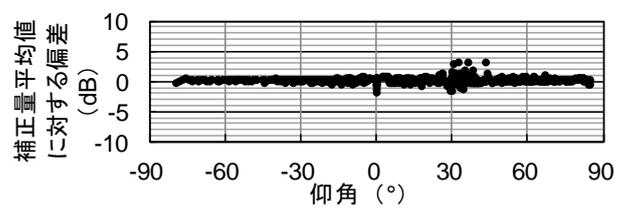


(a) 近接車両

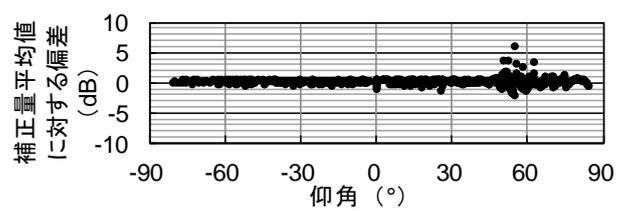


(b) 遠隔車両

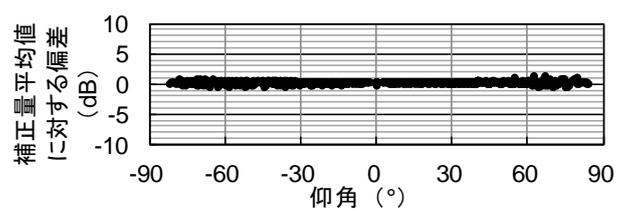
図 4.16 多重反射補正量の平均値と仰角の関係 (片側・直壁高さの変化)



(a) 近接車両 直壁 2 m



(b) 近接車両 直壁 4 m



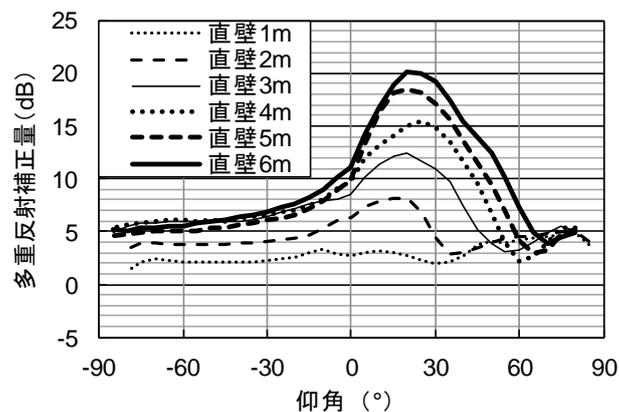
(c) 近接車両 直壁 6 m

図 4.17 多重反射補正量の平均値に対する偏差 (片側・直壁高さの変化)

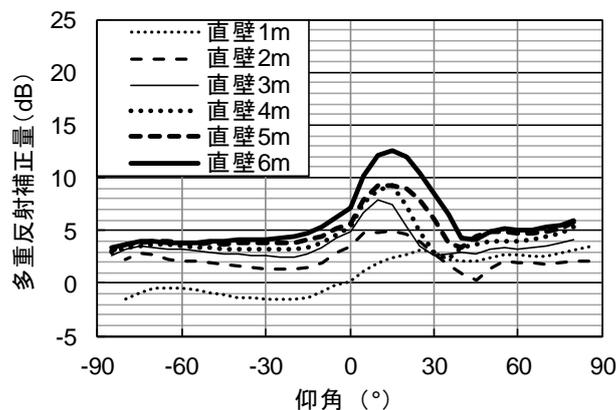
(2) 両側直壁における多重反射の影響

遠隔車両側に近接車両側と同じ高さの直壁を設置した場合の車両および遮音壁間の多重反射の影響について、前節と同様に ΔL_{cor} を仰角 θ で整理した。結果を図 4.18 に示す。いずれの車両においても補正量は仰角 $0\sim 30^\circ$ で最大となり、直壁の高さを上げると値は大きくなる。

補正量は直壁 6 m の場合、近接車両では仰角 20° 付近で 20dB、遠隔車両では仰角 15° 付近で 13dB 程度と最大となる。また、前節と同様に、近接車両における直壁 2 m、4 m、6 m において、図 4.18 に示す補正量の算術平均値に対する各測定点の偏差を図 4.19 に示す。直壁 4 m と 6 m の場合、仰角 $0\sim 30^\circ$ で偏差が 5dB を超える測定点も見られるが、ほとんどの測定点で偏差は 2dB 以内に収まることが分かる。

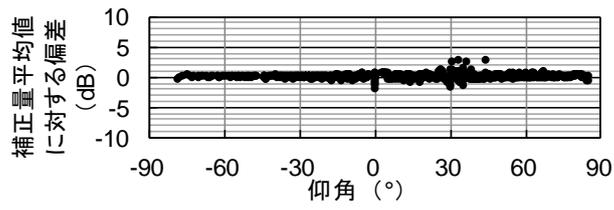


(a) 近接車両

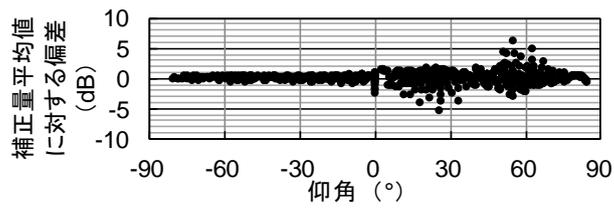


(b) 遠隔車両

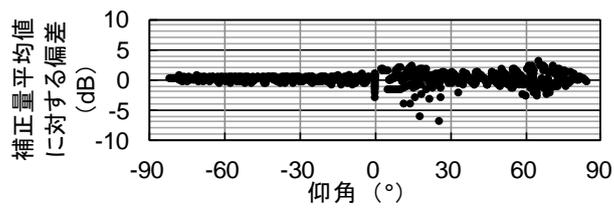
図 4.18 多重反射補正量の平均値と仰角の関係 (両側・直壁高さの変化)



(a) 近接車両 直壁 2 m



(b) 近接車両 直壁 4 m



(c) 近接車両 直壁 6 m

図 4.19 多重反射補正量の平均値に対する偏差（両側・直壁高さの変化）

4.6 まとめ

都市近郊の在来鉄道沿線における騒音予測を精度よく行うため、最も一般的な騒音対策である遮音壁について、回折減衰量に与える車体と遮音壁間の多重反射、両側遮音壁の場合に生じる多重反射の影響を検討した。まず、片側および両側遮音壁の各条件において、遮音壁の高さ、車体と遮音壁の距離などをパラメータとして騒音低減効果に及ぼす影響について2次元時間領域有限差分法を用いた数値解析により検討した。

多重反射に伴う騒音レベルの増加量は、片側遮音壁において直壁高さ3~4 mで最大化するのに対して、両側遮音壁では直壁高さ6 mまで単調に上昇し、特に遮音壁の上方かつ陰の領域において増加が生じることが確認された。一方、遮音壁の先端を車体側へ傾斜させることにより、遮音壁先端の上方の空間で車体と遮音壁間の多重反射による増加量が小さくなることが確認された。また、1/25縮尺の模型実験を実施し、数値解析結果との比較を行ったところ、両者の比較的良好な対応が確認された。

次に、数値解析から求めた多重反射の影響を補正量として在来鉄道騒音の予測手法に加える手順で、騒音予測を改善することを前提に、片側および両側遮音壁の多重反射に対応した補正量を定量的に検討した。補正量の算術平均値に対する精度を検証した結果、概ね2dB程度の差で騒音レベルを予測できることが明らかになった。

本研究では、数値解析結果から車体と遮音壁間の多重反射、両側遮音壁の場合に生じる多重反射の影響について遮音壁高さごとに補正量を定量的に検討したものの、これらの多重反射は現象そのものが複雑であり、定式化には至らなかった。

今後の課題として、多重反射に関する物理的なメカニズムを解明した上で、汎用性の高い補正式の構築が望まれる。

第5章 在来鉄道騒音に対する有限長遮音壁の 挿入損失の検討

5.1 概要

大都市圏においては、高さ4 m以上の遮音壁やセミシェルター型遮音壁などの高大な遮音壁を設置するケースも増えてきた。この場合、高架橋の補強や遮音壁を支えるための支柱および基礎の構築が必要となることから、工事費や施工時間を最小限にするために設置長さをできるだけ短くすることが求められている。一方、遮音壁の騒音低減効果は無限長の場合に前川チャートを用いて算出することができるものの、有限長遮音壁の設置区間の算定方法は必ずしも明確ではない。既往研究において有限長遮音壁の挿入損失の計算方法は提案されているが、非干渉性の無指向性点音源を直線状に連続的に一様分布させた場合が前提となっているため、水平方向に指向性を持つ在来鉄道騒音への適用については検証が必要である。

そこで、まず、指向性点音源の配列を想定した既往の鉄道騒音予測手法において、道路交通騒音予測等で用いられる遮音壁上方の回折経路のみを考慮する1パスの方法[30, 54]を適用し、有限長遮音壁の挿入損失を計算する。計算条件としては遮音壁の長さや高さ、走行車線と受音点の位置を変化させたケーススタディを行い、音源の指向性と遮音壁の見通し角が挿入損失に及ぼす影響の傾向を確認する。

続いて、線音源を想定した騒音伝搬の簡易計算における有限長遮音壁の取扱いとして、音源の指向性と遮音壁の見通し角を考慮した挿入損失の近似式を提示し、その近似精度を前節の計算結果との比較により検証する。さらに、この近似式に基づいて、無限長遮音壁に対する挿入損失の低下量が所定の値となる遮音壁の見通し角を算出し、遮音壁の必要長さに関する検討を行う。

最後に、在来鉄道沿線に設置された遮音壁の側方端部付近において現車の騒音測定を実施し、挿入損失の実測値と近似式による計算値との比較を行い、指向性を考慮した簡易計算による予測の妥当性を検証する。

5.2 指向性音源に対する有限長遮音壁の挿入損失の検討

5.2.1 計算対象

有限長遮音壁のケーススタディにあたっては、遮音壁長さの影響が明確に現れる条件として、回折減衰量が比較的大きい高架下への伝搬を想定し、地面反射の影響を無視した計算モデルを設定する。具体的には、図 5.1 に示す複線の高架鉄道を対象とし、遮音壁は近接軌道中心から 3 m 離れに設置する。遮音壁の高さはレールレベル（音源高さ）から 1 m, 3 m, 5 m とし、受信点はレールレベル下方 5 m, 近接軌道中心から 12.5~50 m 離れ、また、線路方向には遮音壁の中心線 ($x=0$ m) から 100 m ごとに 300 m まで配置する。遮音壁の長さは中心線を対称に 0~1,000 m まで 10 m ごとに変化させ、各受信点の騒音レベルを算出する。最終的に、遮音壁の挿入損失は、遮音壁の無い条件（長さ 0 m）の騒音レベルとの差として算出する。

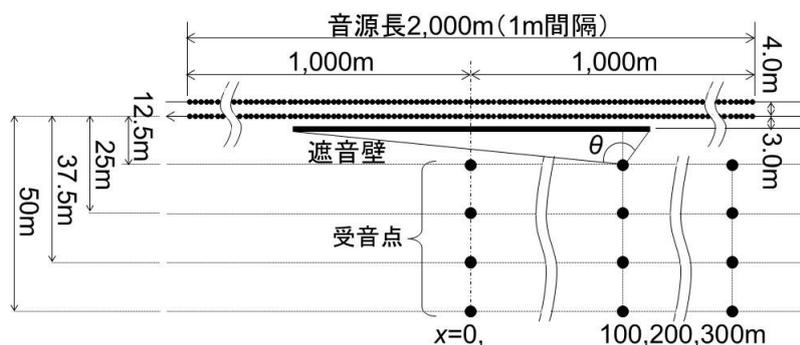
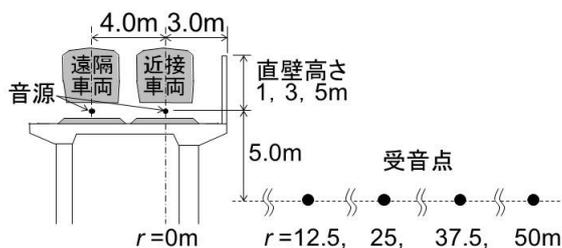


図 5.1 計算モデル

5.2.2 騒音伝搬の計算方法

(1) 音源モデル

図 5.1 に示すように，音源は近接・遠隔軌道中心上，遮音壁の中心線から両側 1,000 m の範囲に 1 m 間隔で 2,000 個の点音源を配列した[30]。音源の指向性については，既往の在来鉄道騒音の予測手法[21, 26]に倣って，図 5.2 に示すように $\cos^2 \phi$ の指向性を設定し，比較のために無指向性[23]の場合についても計算を行うこととした。

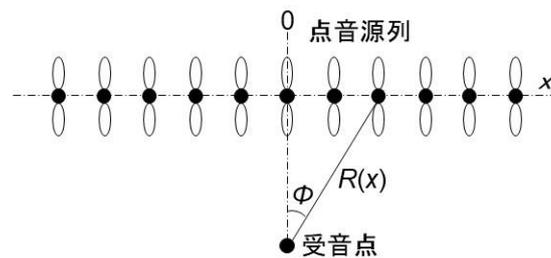


図 5.2 音源モデル

(2) 騒音レベルの計算

単位長さ当たりの音響パワーレベル L_w をもつ位置 x の点音源に対して，遮音壁の回折減衰量を ΔL_d とすると，受音点の騒音レベルは次式で得られる。

$$L(x) = L_w - 8 + 10 \log_{10} \left(\frac{\cos^n \phi(x)}{R^2(x)} \right) - \Delta L_d(x) \quad (5.1)$$

ここで，図 5.2 に示すように R は点音源から受音点までの距離， ϕ は線路に直交する面と，点音源と受音点を含む鉛直面のなす角である。音源の指向性を表す余弦関数のべき指数に関しては，無指向性の場合には $n = 0$ ，指向性の場合には $n = 2$ を想定する[21, 26]。

各々の音源位置における ΔL_d は半無限障壁の回折減衰量を示す前川チャートに基づき，在来鉄道騒音の周波数特性を考慮して，点音源と受音点を含む鉛直断面内の遮音壁上方の行路差から算出する。この 1 パスの方法[30, 54]では，図 5.3 に示すように，点音源と受音点の間に遮音壁がある場合は無限長遮音壁の回折減衰量を与え，無い場合は回折減衰量を 0 とし，最終的に全ての点音源による騒音レベルのエネルギー和を

算出する。なお、このケーススタディでは車体・遮音壁間の多重反射の影響は考慮しないものとする。

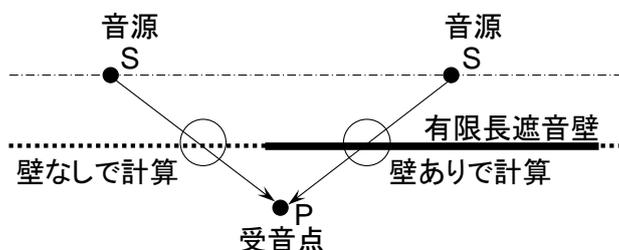
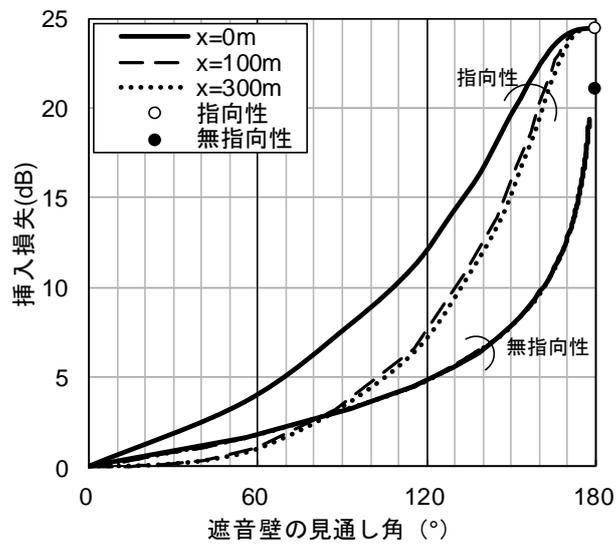


図 5.3 1パスの方法

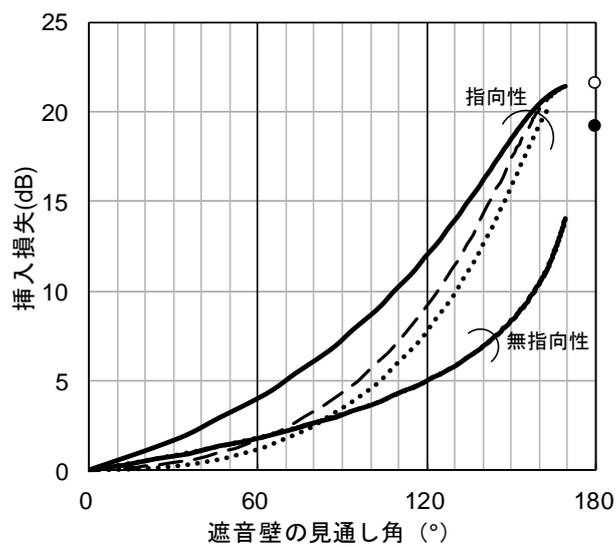
5.2.3 挿入損失の算出結果

各受信点における有限長遮音壁の挿入損失は、遮音壁がない場合の騒音レベルから遮音壁がある場合の騒音レベルを差し引いて算出する。指向性および無指向性音源に対する計算結果の一例として、近接車両を音源とし、遮音壁の高さ 3 m、近接軌道からの距離 $r = 12.5, 50 \text{ m}$ 、基準線からの距離 $x = 0, 100, 300 \text{ m}$ の各受信点における遮音壁の見通し角 θ と挿入損失の関係を図 5.4 に示す。なお、図中には無限長遮音壁の計算結果を見通し角 180° に丸印で記している。

いずれのケースにおいても、遮音壁の見通し角の増加に伴って挿入損失は単調に上昇し、上昇量は指向性音源の場合の方が顕著に大きいことが確認できる。また、 $150 \sim 180^\circ$ の範囲において見通し角が減少すると、無指向性音源では挿入損失が急激に低下するのに対して、指向性音源では遠方からの寄与が小さいため低下が緩やかとなっている。さらに、無指向性音源の場合、図中で遮音壁の中心線からの距離が異なる 3 条件の挿入損失がほぼ一致しており、従来の有限長線音源の理論通り、見通し角のみで定まることを示している。これに対して、指向性音源の場合は受信点が中心線から離れるほど挿入損失が小さくなる傾向にあり、その低下の割合は軌道からの距離によっても若干異なっている。以上の結果より、指向性音源に対する遮音壁の挿入損失は見通し角のみでは定まらないことが確認された。



(a) $r=12.5$ m



(b) $r=50$ m

図 5.4 遮音壁の見通し角と挿入損失の関係 (近接車両, 直壁 3 m)

5.3 有限長遮音壁の挿入損失の近似式に関する検討

5.3.1 無限長遮音壁の挿入損失

本節では、次節で示す有限長遮音壁の挿入損失の近似式に必要な無限長遮音壁の挿入損失について検討する。無指向性または指向性の非干渉性線音源に対する無限長遮音壁の挿入損失 ΔL_{∞} は、在来鉄道騒音の周波数特性を考慮した位置 x の点音源に対する回折減衰量 ΔL_d を用いて次式で表される。

$$\Delta L_{\infty, n} = -10 \log_{10} \left[\frac{\int_{-\infty}^{\infty} 10^{\frac{-\Delta L_d(x)}{10}} \cdot \frac{\cos^n \phi(x)}{R^2(x)} dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\cos^n \phi(x)}{R^2(x)} dx} \right] \quad (5.2)$$

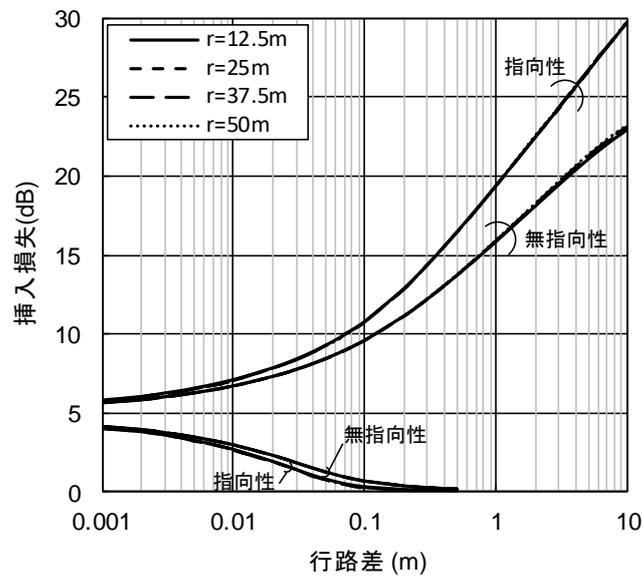
ここで、式(5.1)と同様に、無指向性音源の場合は $n = 0$ 、指向性音源の場合は $n = 2$ とする。上式は、無指向性音源の場合は式(5.3)に、指向性音源の場合は式(5.4)に変形できる。

$$\Delta L_{\infty, 0} = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} 10^{\frac{-\Delta L_d(\phi)}{10}} d\phi \right] \quad (5.3)$$

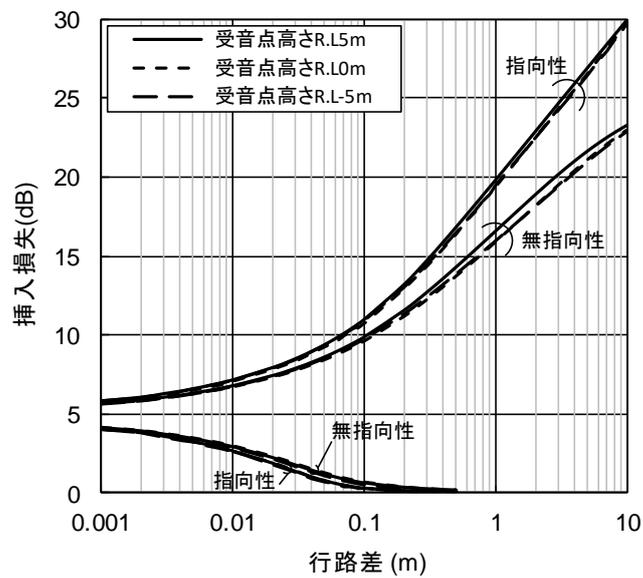
$$\Delta L_{\infty, 2} = -10 \log_{10} \left[\frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} 10^{\frac{-\Delta L_d(\phi)}{10}} \cos^2 \phi d\phi \right] \quad (5.4)$$

上式の見込み角に関する積分に台形則を適用して 1°刻みで近似的に計算し、無指向性および指向性線音源に対する挿入損失を算出する。計算条件は図 5.1 の計算モデルと同様に、線音源の位置は近接・遠隔軌道中心上、受音点の遮音壁からの離れは 4 箇所、ただしレールレベル下方 5 m に加えて同一高さ 0 m と上方 5 m にも受音点を設定した。各々の音源-受音点間に対して、遮音壁の高さを鉛直方向に変化させて受音点正面方向の行路差を変化させた。

挿入損失の計算結果を受音点正面方向の行路差との関係として図 5.5 に示す。無指向性音源に比べて指向性音源に対する挿入損失の方が全体的に大きいのが、(a)受音点の水平距離、(b)受音点の高さ、(c)音源位置による挿入損失の変化は十分小さいことがわかる。特に指向性音源の場合、無限長遮音壁の挿入損失は受音点正面方向の行路差からおおよそ推定可能であり、以降では(a)の音源・受音点が同一高さの場合の値を用いるものとする。

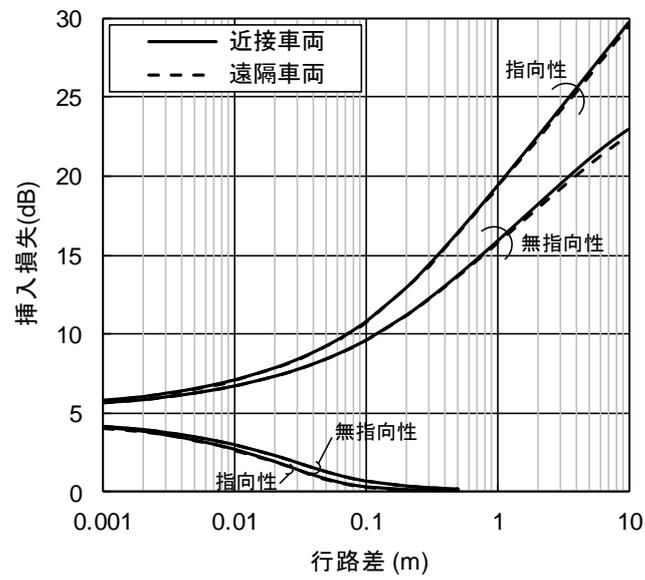


(a) 近接車両と受音点の離れの影響 (近接車両, 受音点高さ R.L 0 m)



(b) 受音点高さの影響 (近接車両, $r=12.5$ m)

図 5.5 挿入損失の計算結果



(c) 音源位置の影響 (受音点高さ R.L 0 m, $r=12.5$ m)

図 5.5 挿入損失の計算結果

5.3.2 有限長遮音壁の挿入損失の近似式

図 5.6 に示すように、受音点正面方向から両側に角度 θ_1, θ_2 まで設置された有限長遮音壁を想定する。なお、この場合の遮音壁の見通し角は $\theta = \theta_1 + \theta_2$ となる。無限長線音源を受音点から音源が見通せる可視区間と見通せない遮蔽区間に区分し、各々の区間からの寄与を合成する。その際、可視区間に対しては挿入損失を 0 とし、遮蔽区間に対しては無限長遮音壁の挿入損失 ΔL_∞ を近似的に与えるものとする、有限長遮音壁の挿入損失 ΔL_f は次式で表される。

$$\Delta L_{f,n} = -10 \log_{10} \left[\alpha_n 10^{\frac{-\Delta L_{\infty,n}}{10}} + (1 - \alpha_n) \right] \quad (5.5)$$

ここで、

$$\alpha_n = \int_{-\theta_1}^{\theta_2} \cos^n \phi d\phi / \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^n \phi d\phi \quad (5.6)$$

従って、無指向性音源の場合、

$$\alpha_0 = \theta / \pi \quad (5.7)$$

となり、遮音壁の見通し角で定まるのに対して、指向性音源の場合、次式のように両端の角度にも依存する。

$$\alpha_2 = [\theta + \sin \theta \cos(\theta_1 - \theta_2)] / \pi \quad (5.8)$$

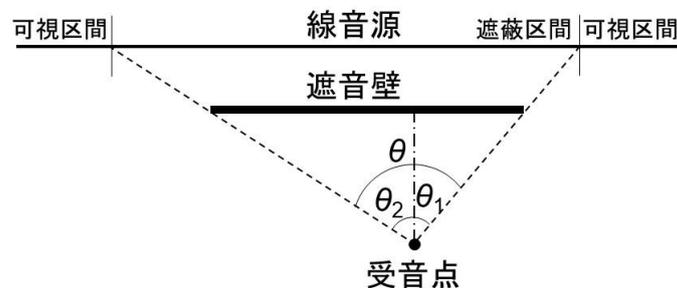
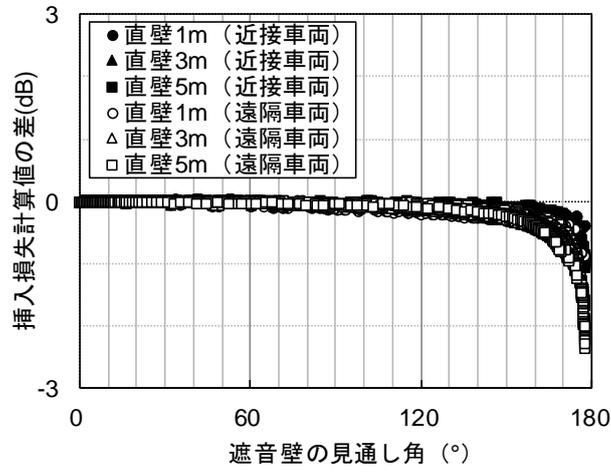


図 5.6 遮音壁の見通し角

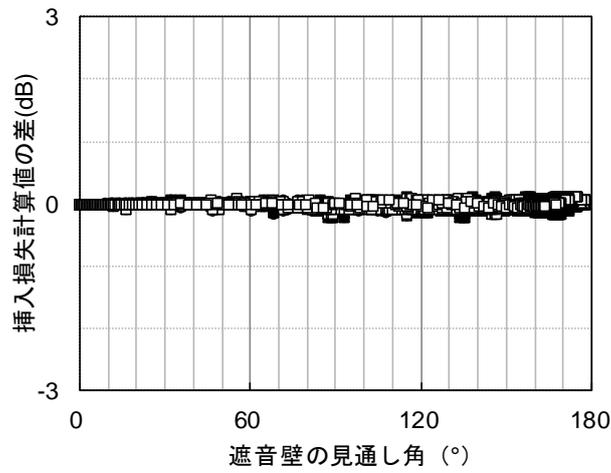
5.3.3 近似式の精度検証

前節で提示した有限長遮音壁の挿入損失の近似式に関して、5.2 節における 1 パスの方法による計算結果との対応を確認し、近似精度を検証する。ただし、5.2 節の計算対象は有限長線音源であり、遮音壁の見通し角が 180°付近では、挿入損失の計算値が無限長線音源に対する値より若干高くなる点に注意を要する。

5.2.1 節に記した遮音壁の高さおよび長さを変化させた全条件において、近似式による挿入損失の計算値から 1 パスの方法による計算値を差し引いた値を各受音点で算出する。近接・遠隔車両に対して指向性または無指向性音源を想定した場合の全受音点の計算結果を図 5.7 に示す。無指向性音源の場合、上述した有限長線音源の影響により見通し角が 150°以上では差が生じているが、指向性音源ではその影響も見られず、近似式の精度は 1 パスの方法とほぼ同等であることが確認された。



(a) 無指向性音源



(b) 指向性音源

図 5.7 1パスの方法と近似式による挿入損失計算値の差

5.3.4 遮音壁の必要長さに関する検討

本節では、有限長遮音壁の挿入損失の近似式に基づき、無限長に対する挿入損失の低下量が所定の値となる遮音壁の見通し角を算出し、特に指向性音源の場合の遮音壁の必要長さを明らかにする。式(5.5)を変形すると、次式が導かれる。

$$\alpha_n = \left(1 - 10^{\frac{-\Delta L_{f,n}}{10}}\right) / \left(1 - 10^{\frac{-\Delta L_{\infty,n}}{10}}\right) \quad (5.9)$$

上式より無限長と有限長の場合の挿入損失から α_n が定まる。従って、無指向性音源の場合、式(5.7)より遮音壁の見通し角は容易に算出できる。一方、指向性音源の場合、式(5.8)より見通し角は一意に定まらないが、以降では遮音壁の中央に位置する受音点を想定し、 $\alpha_2 = (\theta + \sin \theta) / \pi$ の関係より数値的に算出するものとした。

表 5.1 に無限長の挿入損失 10～25dB に対して低下量が 5dB となる遮音壁の見通し角ならびに遮音壁の必要長さを遮音壁から受音点までの距離で除した値（以降、全長比）を、無指向性および指向性線音源について示す。全長比は挿入損失が大きいくほど増大し、無指向性に比べて指向性音源では著しく小さくなることが確認できる。次に、指向性音源について、無限長遮音壁の挿入損失と低下量が 1～5dB となる遮音壁の全長比との関係を図 5.8 に示す。所定の遮音壁高さに対して無限長の挿入損失が定まる場合、この図を用いると、受音点で許容される低下量から全長比が求められ、遮音壁の必要長さを簡易に推定することができる。

表 5.1 無指向性および指向性音源に対する遮音壁の見通し角と全長比
(無限長に対する挿入損失の低下量 5dB の場合)

音源の指向性 見通し角・全長比	無指向性		指向性		
	見通し角	全長比	見通し角	全長比	
無限長の 挿入損失	25dB	178.8°	185.6	150.9°	7.7
	20dB	176.1°	58.3	137.0°	5.1
	15dB	167.3°	18.0	115.6°	3.2
	10dB	136.8°	5.0	80.3°	1.7

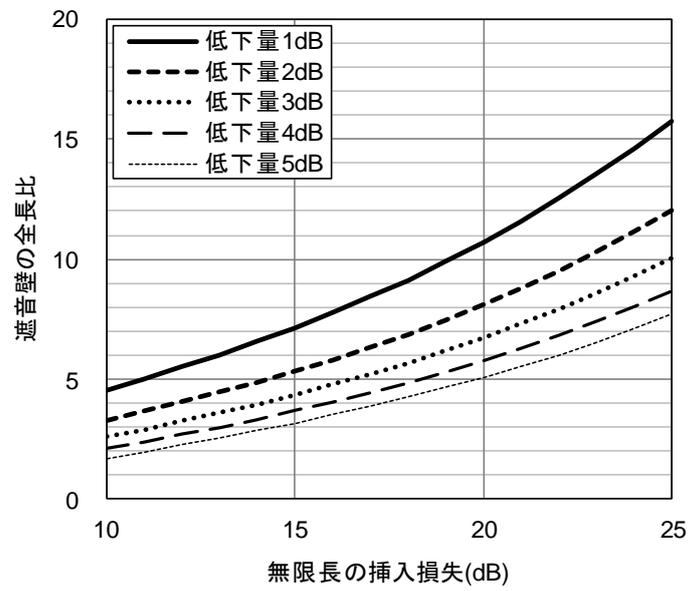


図 5.8 指向性音源に対する挿入損失の低下量と全長比の関係

5.4 現車試験による検証実験

在来鉄道沿線に設置された遮音壁の側方端部付近における現車試験を通して、挿入損失の実測値と前章で示した近似式による計算値との比較を行い、特に指向性を考慮した近似式の妥当性を検証する。

5.4.1 現車試験の方法

(1) 測定箇所

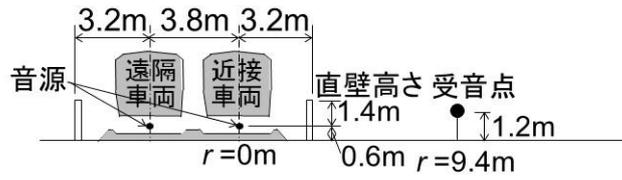
平地区間の直線軌道に対して周囲に建物が少なく十分な見通しが確保できる測定場所として、図 5.9 に示す 2 箇所を選定した。場所 A では近接軌道中心から 9.4 m 離れ、遮音壁の側方端部から +20 m（設置区間）～-20 m（非設置区間）の範囲に、場所 B では近接軌道中心から 12.7 m 離れ、遮音壁の側方端部から +20 m～-15 m の範囲に測定点を 4 点配置し、地上からの高さは 1.2 m とした。現車試験の状況を図 5.10 に示す。

(2) 測定列車

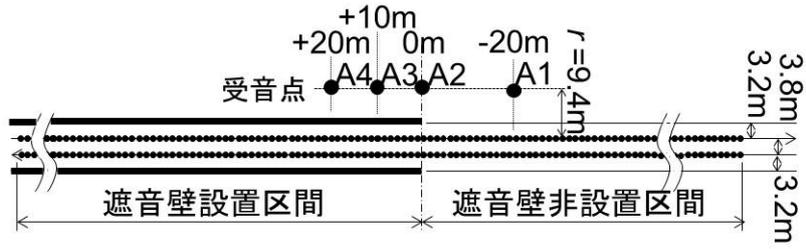
測定列車は速度 85～95 km/h で走行する近郊型電車とし、各場所において近接・遠隔車両の測定本数は 10～20 列車であったが、特に暗騒音の影響が小さい測定列車を対象に分析を行った。分析対象の列車は同一の車両形式とし、場所 A では 10 両編成、場所 B では 6 両編成とした。

(3) 騒音レベルの評価方法

騒音測定では、車両通過時の単発騒音暴露レベルを計測した。ただし、車両騒音の主要な帯域である中心周波数 80～2.5 kHz の 1/3 オクターブバンドレベルから騒音レベルの合成値を算出した。遮音壁の挿入損失に関しては、各場所における非設置区間の受音点 A1 または B1 を基準点として、設置区間の他の 3 点との騒音レベルの低減量を算出することとした。

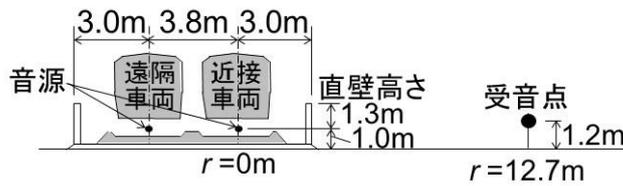


(a-1) 断面図

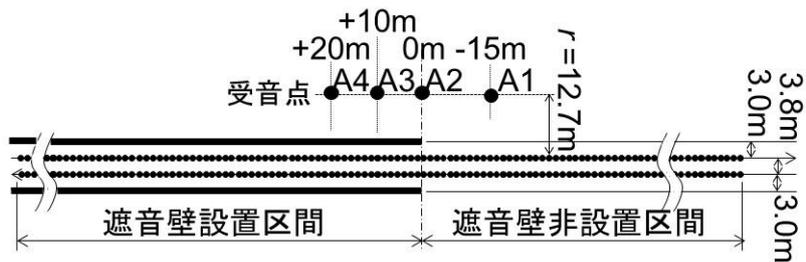


(a-2) 平面図

(a) 場所 A



(b-1) 断面図



(b-2) 平面図

(b) 場所 B

図 5.9 測定場所の略図



(a) 場所 A



(b) 場所 B

図 5.10 現車試験の状況

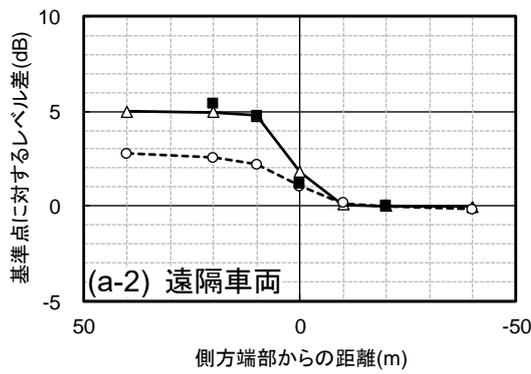
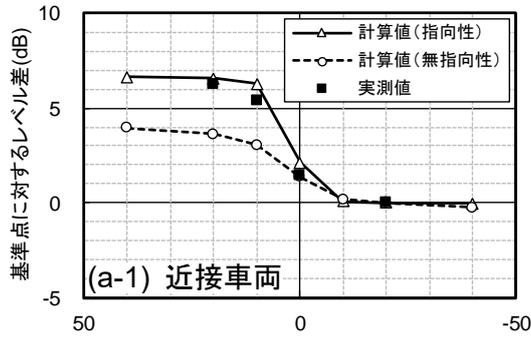
5.4.2 挿入損失の計算

図 5.9 の現車試験の測定断面に対して 5.3.2 節で提示した近似式により有限長遮音壁の挿入損失を算出する。音源には $\cos^2 \phi$ の指向性を設定し、比較のために無指向性の場合についても計算を行った。無限長遮音壁の挿入損失に関しては、遠隔軌道側の遮音壁による反射の影響を考慮するため、遮音壁に対する鏡像音源を想定した。また、車体と近接軌道側の遮音壁との多重反射の影響を考慮するため、実音源に対しては挿入損失を 2dB 減じた。各受音点において算出された挿入損失については、実測結果との比較のため、基準点 A1 または B1 における挿入損失からの増加量を算出することとした。なお、計算は遮音壁側方端部から両側 40 m の受音点まで行った。

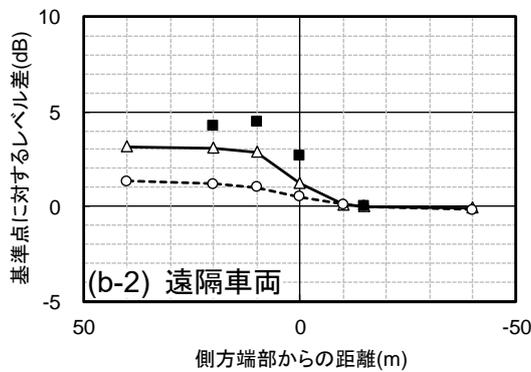
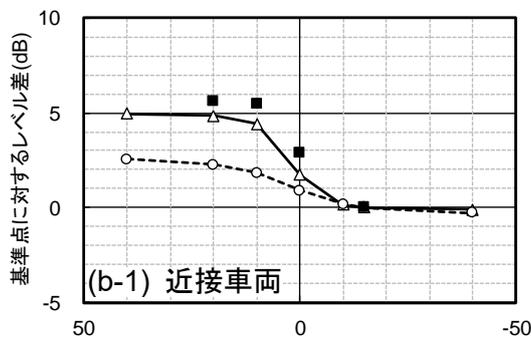
5.4.3 実測結果と計算結果の対応

近接・遠隔車両に対する挿入損失と遮音壁側方端部からの距離の関係について、場所 A および B における実測結果と計算結果を図 5.11 に示す。なお、基準点 A1 および B1 における挿入損失の計算値は 0.2dB 未満であったことから、実測による騒音レベルの低減量および計算による挿入損失の増加量はともに挿入損失と同等と見なせる。

計算値では、指向性音源に比べて無指向性音源に対する挿入損失の方が全体的に小さく、無限長遮音壁の挿入損失の違いが現れたものと考えられる。また、実測値と指向性音源に対する計算値を比較すると、場所 B において計算値は実測値を下回るものの、無指向性音源よりも比較的良好な対応が確認された。



(a) 場所 A



(b) 場所 B

図 5.11 騒音レベルの低減量（実測値）と挿入損失の増加量（計算値）の比較

5.5 まとめ

本研究では、在来鉄道騒音に対する有限長遮音壁の挿入損失に関して一連の検討を行い、特に指向性音源の影響に関して以下の知見を得た。まず、点音源列を想定して1パスの方法を適用したケーススタディにより、指向性音源に対する遮音壁の挿入損失は見通し角のみでは定まらないことを確認した。続いて、音源の指向性と遮音壁の見通し角を考慮した挿入損失の近似式を提示し、1パスの方法に対する近似精度は十分高いことを示した。また、近似式に基づいて、無限長遮音壁に対する挿入損失の低下量と遮音壁の見通し角との関係を明示し、遮音壁の必要長さの簡易推定の可能性を示した。最後に、現車試験により有限長遮音壁に対する挿入損失の実測値と近似式による計算値との比較を行い、指向性を考慮した簡易計算による予測の妥当性が確認された。ただし、今回の現車試験は、比較的低い遮音壁の側方端部付近に限定されており、今後は遮音壁が高い場合や設置区間が狭い場合における追加検証が必要である。

第6章 在来鉄道沿線の高所空間を対象とした 風荷重軽減型遮音壁の騒音低減効果

6.1 概要

本章では、在来鉄道沿線の高所空間における騒音低減と風荷重軽減の両立を目指し、新たな遮音壁の可能性について模型実験・数値解析・現場測定を通して検討する。具体的には、図 6.1 のような複数の傾斜した遮音板で構成される風荷重軽減型遮音壁を想定し、騒音低減と風荷重軽減の効果を定量的に検証する。

遮音壁の形状を検討するにあたり、まず、縮尺模型を用いた風洞実験を通して、遮音壁の開口率（正面から反対側が見通せる鉛直投影面積の割合）と遮音板の傾斜角度による風荷重軽減効果を確認する。次に、沿線の騒音伝搬を模擬した波動音響数値解析を通して、遮音板の傾斜角度・幅・間隔（枚数）・吸音性が騒音低減量に及ぼす影響を詳細に検討する。以上の検討を踏まえ、関東近郊の在来鉄道沿線に異なる仕様の風荷重軽減型遮音壁（以下、改良型遮音壁）を仮設し、現車試験により騒音低減量の確認を行う。また、現車試験を模擬した数値解析を行い、実測値との対応を検証する。

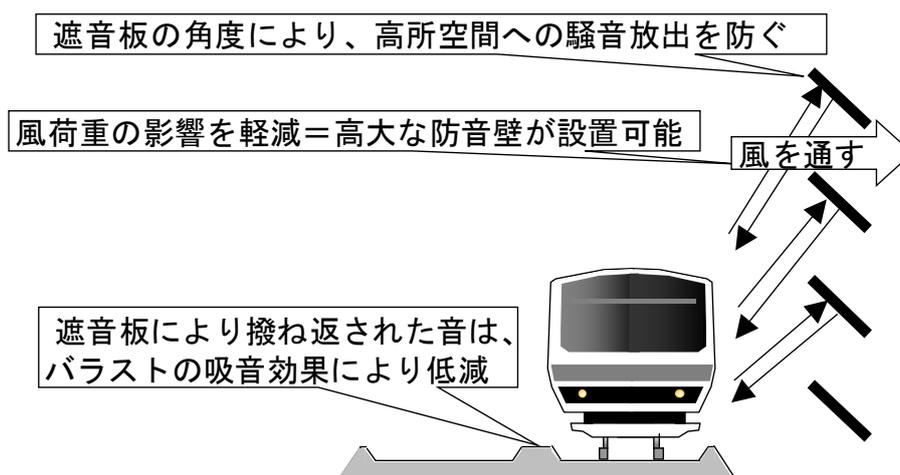


図 6.1 風荷重軽減型遮音壁の期待される効果

6.2 風洞実験による風荷重軽減効果の確認実験

6.2.1 遮音壁模型

改良型遮音壁の風荷重軽減効果を確認するため、模型実験による検討を行った。模型は1/5縮尺とし、図6.2に示すとおり遮音壁の開口率と遮音板の角度を変えた10試験体について風荷重測定を行った。外形寸法は高さ200mm×幅1,040mmとし、厚さ2mmのステンレス板を使用した。

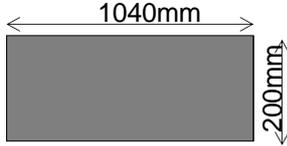
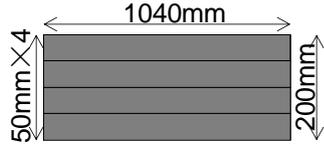
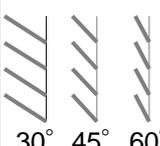
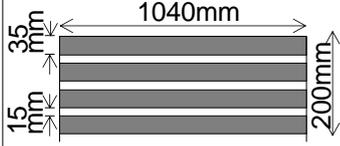
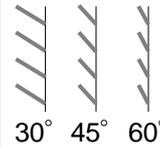
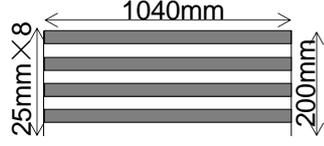
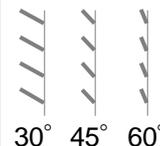
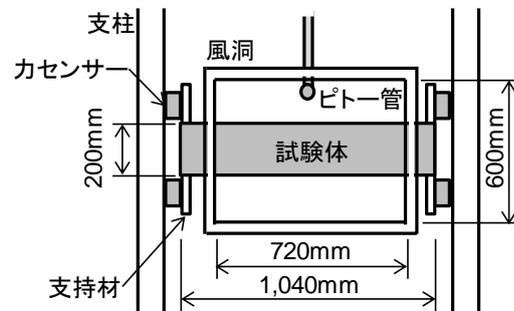
開口率	正面図	側面図
0% 直壁		
0%		
30%		
50%		

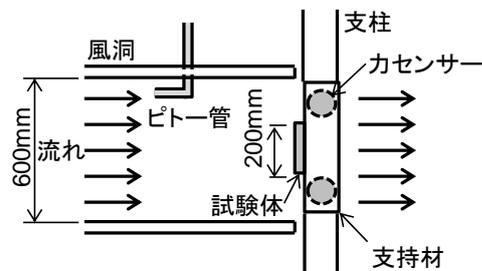
図 6.2 遮音壁の模型概略図

6.2.2 風荷重の測定方法

各試験体の風荷重測定は、風洞風速を 10, 20, 30, 40 m/s の 4 条件に設定して実施した。測定機器の設置状況を図 6.3 に、風洞実験の様子を図 6.4 に示す。試験体四隅に設置した力センサーにより水平力を計測し、その合計値として算出するものとした。ただし、無風条件でも水平力を計測し、その静荷重を補正している。風速は温度、湿度、大気圧および風洞内に設置したピトー管により計測した動圧から算出した。なお、各風速条件では 10 秒間平均の水平力を 3 回計測し、さらにその平均値を求めている。



(a) 正面図（風上側）



(b) 断面図

図 6.3 測定機器の設置状況

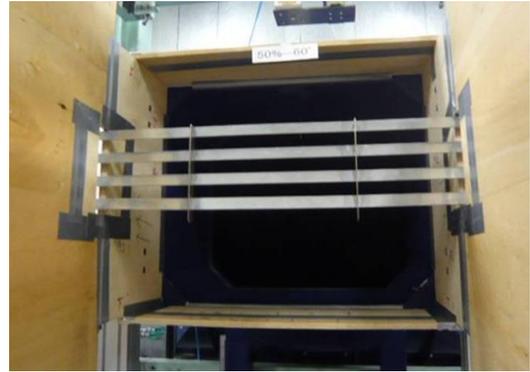
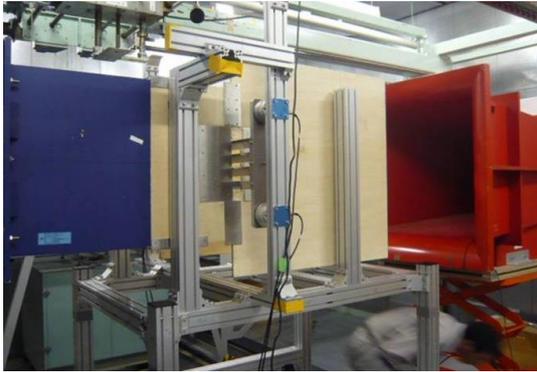


図 6.4 風洞実験の様子

6.2.3 測定結果

改良型遮音壁の風荷重軽減効果を評価するにあたり，従来型防音壁（直壁）に対する改良型遮音壁の風荷重比を算出した。その際，風速条件については，4条件の風荷重を平均した。図 6.5 に改良型遮音壁の風荷重比の測定結果を示す。

図 6.5 より，改良型遮音壁の風荷重比は，遮音板の角度が等しい場合，開口率が大きいほど小さくなり，また，開口率が等しい場合，遮音板角度が小さいほど風荷重は小さくなることが確認できる。従来型の直壁に対して，開口率 50%・角度 30°の改良型では，風荷重を 3 割程度に軽減できる。また，開口率が 0%の場合でも，遮音板角度を 30°にすることで，4 割程度まで軽減できることがわかる。

なお，風圧力が遮音壁の見付面積に比例し，遮音板の法線方向に作用するものと単純に仮定すると，開口率を a %，遮音板の角度を θ °として，改良型遮音壁の風荷重比は次式で表される。

$$F(a, \theta) = (1 - a/100) \sin \theta \quad (6.1)$$

図中の実線は上式の理論値を示しており，開口率 0%の場合，実験値は理論値をかなり下回るものの，開口率 30%および 50%の場合は理論値と概ね良く対応することがわかる。

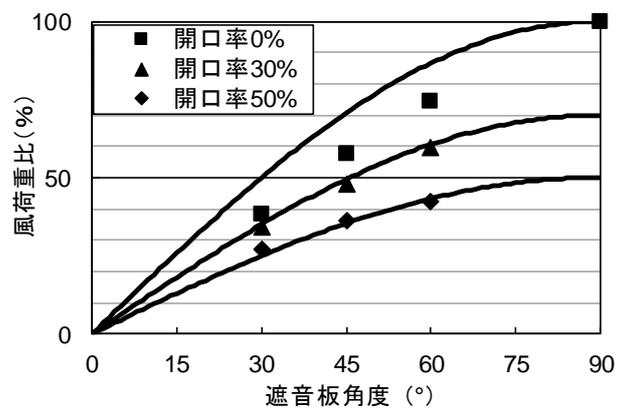


図 6.5 遮音壁の対直壁風荷重比の測定結果

(実線 : 式(6.1)の理論値)

6.3 2次元有限差分法を用いた数値解析による騒音低減効果

果の検討

改良型遮音壁の騒音低減効果に関して、遮音板の傾斜角度・幅・間隔（枚数）・吸音性の影響を検討するため、鉄道沿線の騒音伝搬を模擬した2次元モデルに時間領域有限差分法を適用し、数値解析によるケーススタディを行う。

6.3.1 数値解析の方法

(1) 対象領域

図 6.6 に示すように、軌道中心から水平距離 3 m の位置に高さ 6 m の遮音壁が設置されている状況を解析断面として想定した。解析領域は、地表面反射の影響を除外するため、高架鉄道を対象とした2次元自由音場（幅 35 m×高さ 40 m、外周に幅 5 m の境界吸収層）とした。

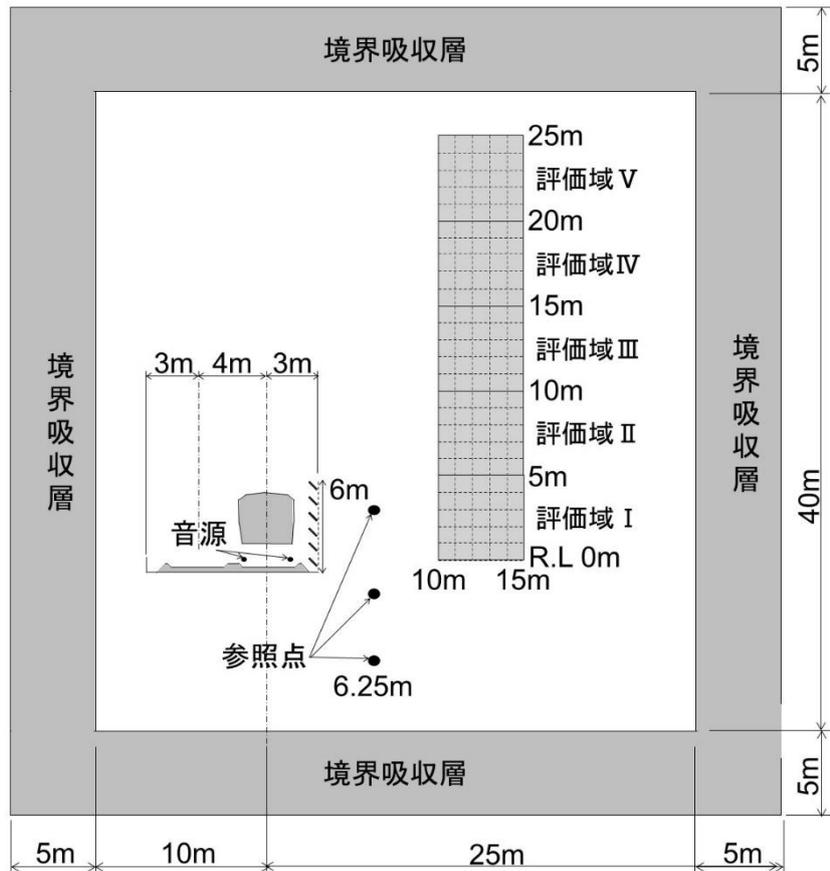


図 6.6 2次元解析モデル

(2) 計算条件

時間差分は2次近似，空間差分は4次近似，各離散化幅を $\Delta t = 15.6 \mu\text{s}$ ， $\Delta x = \Delta y = 16 \text{ mm}$ ，計算時間長を 2.048 s とし，上限帯域を中心周波数 2.5 kHz の $1/3$ オクターブバンドとして，任意形状に対して階段近似によるモデルの誤差を小さくするため，空間離散幅は計算対象上限周波数における波長の $1/10$ 程度とした。軌道には厚さ 300 mm のバラスト，遮音板に設置する吸音材は厚さ 25 mm のグラスウール (32 kg/m^3) [105] を使用し，機械系置換モデルにより吸音特性を模擬した。吸音材の垂直入射吸音率の周波数特性を図 6.7 に示す。

また，音源は，実際の指向性により近似させるため，近接・遠隔車両の各々に対して図 4.3 に示すようにレール頭頂面高さの車両端に点音源2点を配置し，初期音圧としてガウシアンパルスを与えた。音源の周波数特性については 4.2.1 節と同様に，高

架端の両側に 1.7 m の直壁が設置されている高架橋の近接軌道中心から水平方向に 6.25 m 離れ、R.L+3 m, R.L-2 m, R.L-6 m の受音点 3 点を参照し、各帯域で A 特性補正をかけた単発騒音暴露レベルの算術平均値が一般的なコンクリート高架橋における現場実測と数値解析で一致するようにスペクトル補正を行うこととした。車両モデルは、台車、パンタグラフ、屋根上機器を除いた車両の断面形状のみを再現した。

受音点は R.L より高所を対象として、遮音壁背後の水平距離 20 m×高さ 25 m の範囲内に 1 m 間隔の格子状に配置し、受音点での音圧波形を求めた。最終的に、遮音壁の騒音低減効果として、遮音壁が無い条件を基準とした騒音低減量を算出した。

また、本稿では図 6.6 に示すとおり、軌道中心から水平距離 10~15 m の範囲で R.L 0 m からの高さを 5 m ごとに評価域 I~V に区分し、各評価域の受音点 36 点における騒音低減量の平均値により騒音低減効果を評価した。

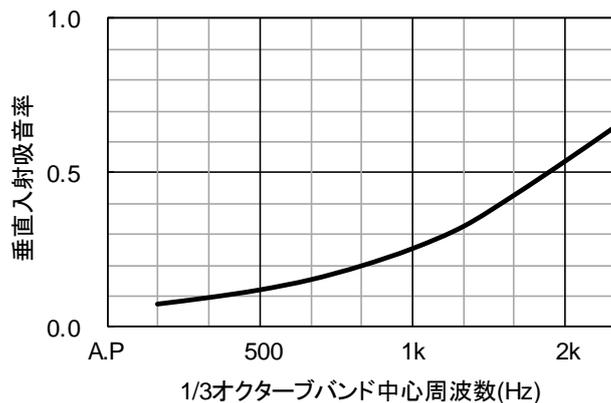


図 6.7 吸音材の垂直入射吸音率の周波数特性

6.3.2 解析結果

(1) 遮音板の傾斜角度を変化させた場合

図 6.8 に示すように、幅 500 mm と 1,000 mm の遮音板を等面積（角度 90°で開口率 50%相当）で設置し、角度を 0~90°まで 15°ごとに変化させる。図 6.9 に各条件の評価域ごとの騒音低減量および直壁に対する風荷重比の理論値を示す。遮音板角度が大きくなると低減量は増加し、幅 500 mm では角度 45°または 60°、幅 1,000 mm では角度 45°で最大となっている。

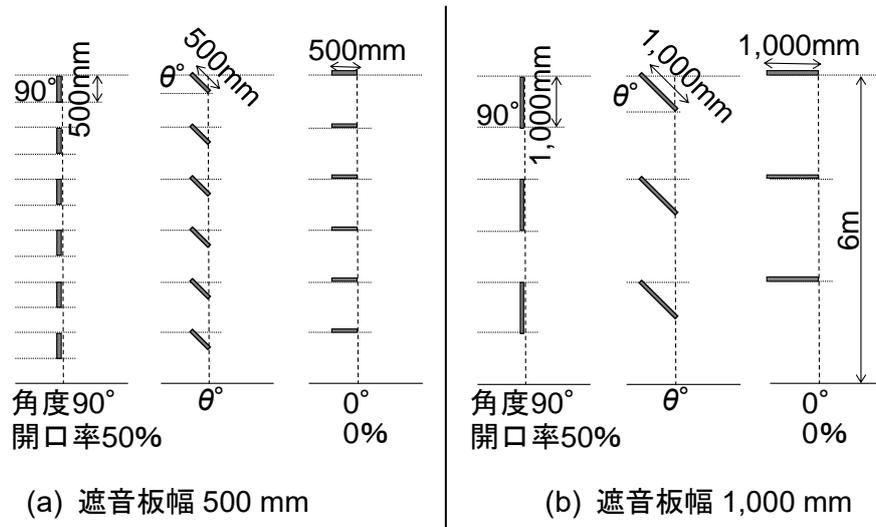
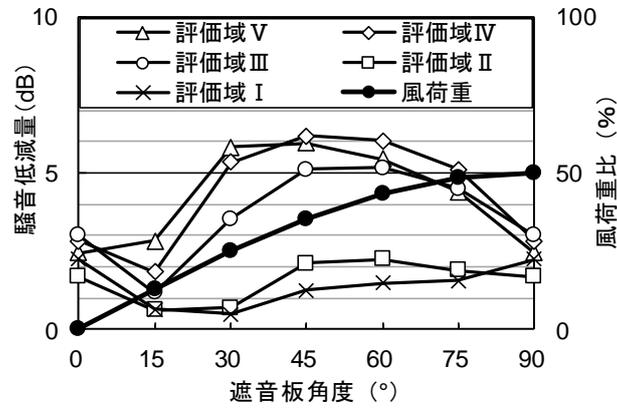
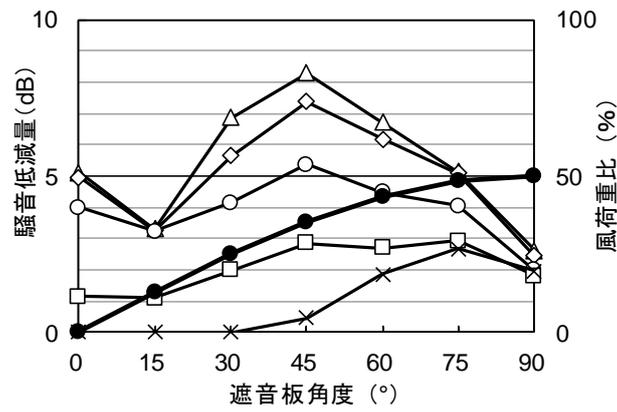


図 6.8 遮音壁形状 (遮音板角度の変化)



(a) 遮音板幅 500 mm



(b) 遮音板幅 1,000 mm

図 6.9 騒音低減量の解析結果（遮音板角度の変化）

(2) 風荷重を一定とした場合

開口率が 0%, 30%, 50%の遮音壁に対して、風荷重が同程度となるように、図 6.5 の結果から遮音板角度を設定した。遮音板幅を 1,000 mm として、遮音壁が受ける風荷重比が 30%, 50%となる遮音壁形状を図 6.10 に示す。図 6.11 に各条件の評価域ごとの騒音低減量を示す。風荷重比 30%の条件では、開口率 50% (角度 35°) で低減量は最も大きいものの、最大で 8dB 程度に留まっている。一方、風荷重比 50%の条件では、開口率 30% (角度 47°) が最も効果的で、高所で約 10dB の低減量が得られている。図 6.9 の結果と合わせると、遮音壁の開口率を下げるよりも、ある程度の傾斜角度の確保が効果的といえる。その理由として、列車走行音は軌道中心から斜め上 30~40°に強い指向性を有するため、遮音板をその方向に向けた場合、反射音が効果的にバラストに吸音されるものと考えられる。

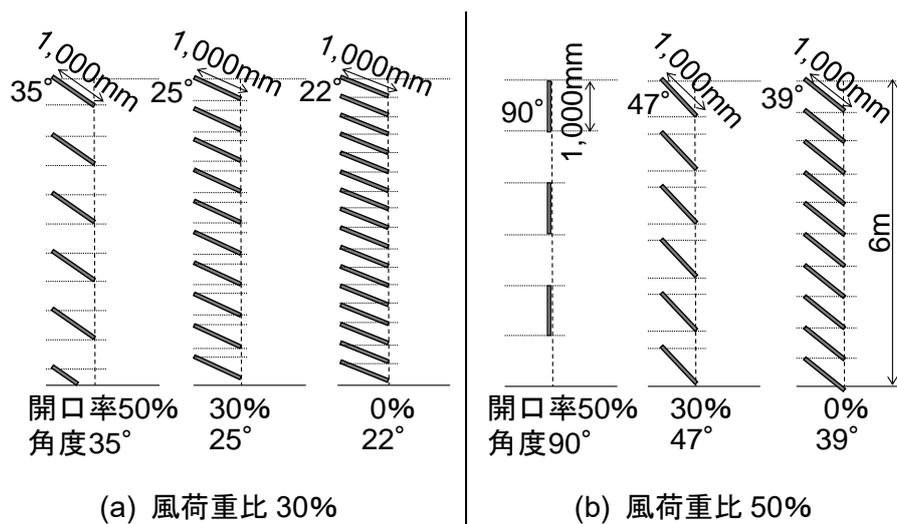
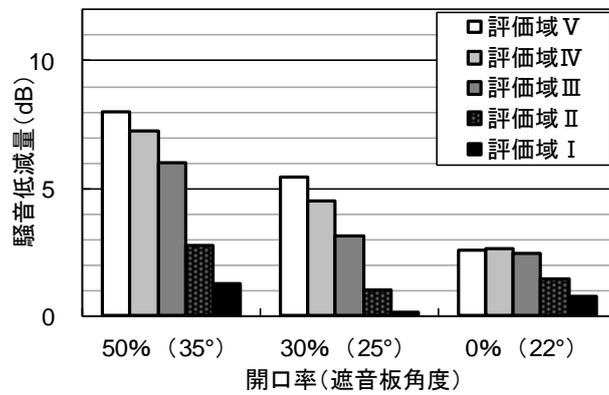
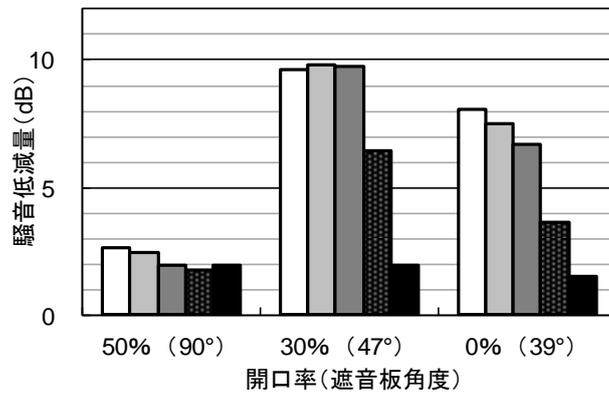


図 6.10 遮音壁形状 (風荷重一定条件)



(a) 風荷重比 30%

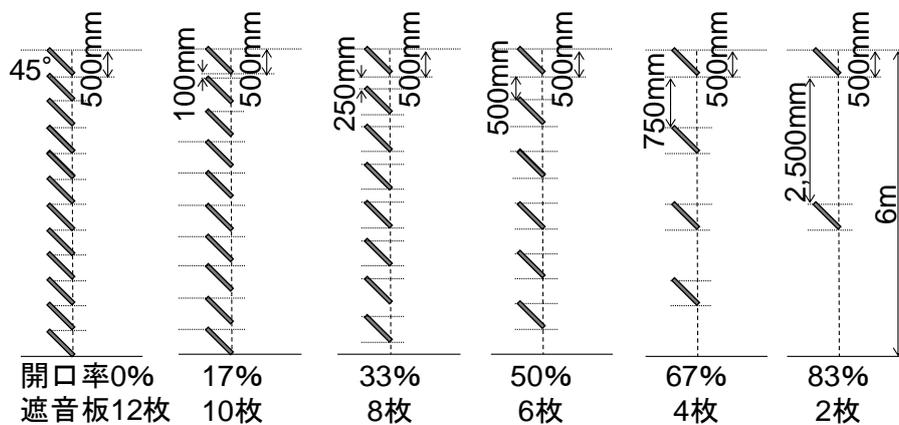


(b) 風荷重比 50%

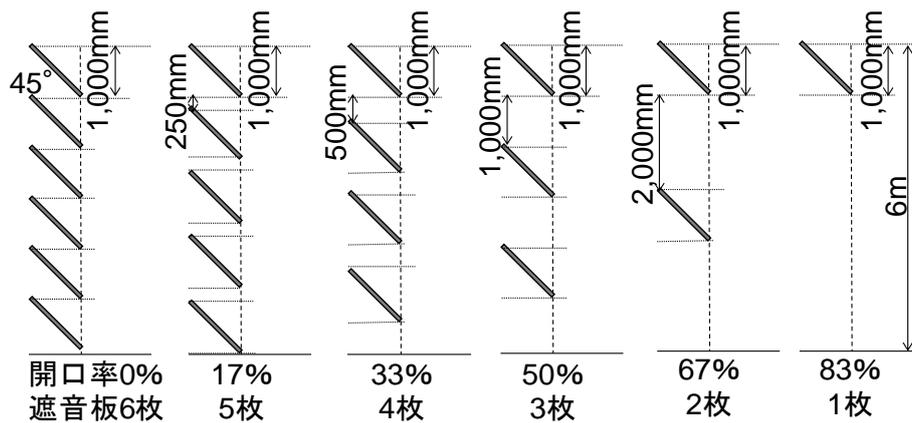
図 6.11 騒音低減量の解析結果 (風荷重一定条件)

(3) 遮音板の間隔を変化させた場合

図 6.12 に示すように、幅 707 mm と 1,414 mm の遮音板を角度 45°で設置し、間隔（枚数）を変化させる。図 6.13 に評価域ごとの騒音低減量と開口率の関係を示す。幅 1,414 mm の場合、低減量は開口率の増加に伴い単調に低下する傾向にあるが、幅 707 mm の場合、開口率 50%以下で低減量の変化はわずかであり、50%以上で急激な低下が生じている。また、遮音板幅で比較すると、開口率が小さい場合は幅 1,414 mm の方が低減量は大きいですが、開口率 50%では幅 707 mm の方が上回ることがわかる。

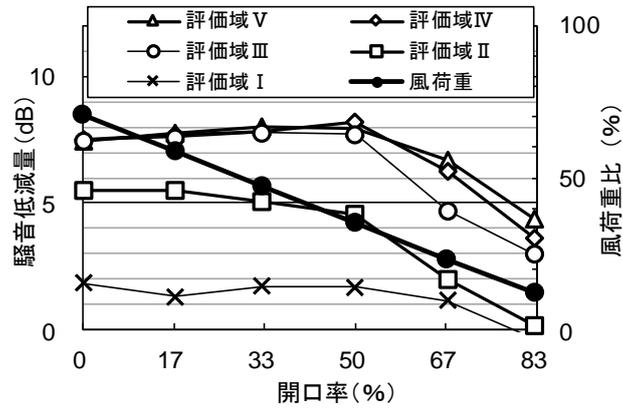


(a) 遮音板幅 707 mm

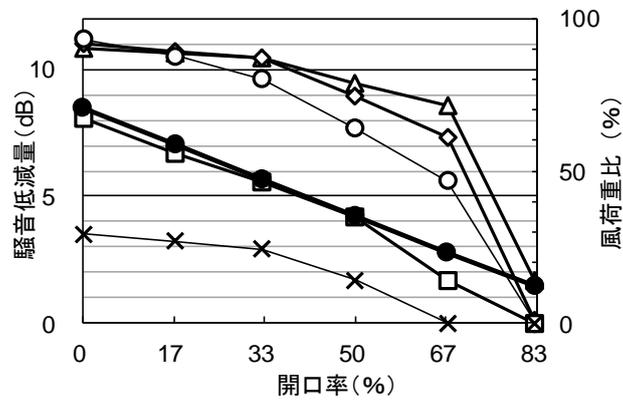


(b) 遮音板幅 1,414 mm

図 6.12 遮音壁形状（遮音板間隔の変化）



(a) 遮音板幅 707 mm



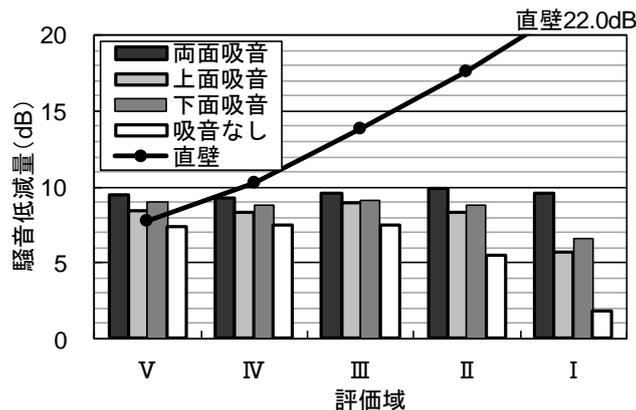
(b) 遮音板幅 1,414 mm

図 6.13 騒音低減量の解析結果 (遮音板間隔の変化)

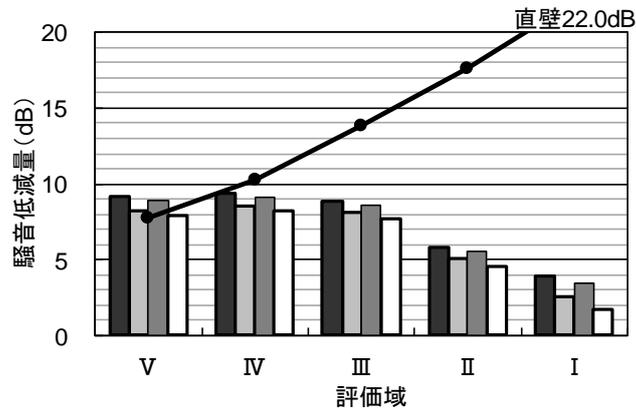
(4) 吸音材設置の効果

遮音板の角度 45°，幅 707 mm，開口率 0%と 50%の 2 ケースを設定し，遮音板の両面・上面・下面の 3 通りで吸音材を設置した場合と吸音材なしの 4 条件を比較する。図 6.14 に各条件の改良型遮音壁および同じ高さの直壁の評価域ごとの騒音低減量を示す。

開口率 0%では吸音材を上面と下面のいずれに設置しても騒音低減効果は同程度であり，両面設置により一層効果が大きくなっている。一方，開口率 50%では上面より下面に設置した方が効果は大きく，両面設置は下面のみとほとんど効果に差がないことがわかる。図 6.15 に両面吸音材ありの改良型遮音壁の騒音低減量のコンターを直壁の場合とともに示す。いずれの開口率でも，直壁と比べて下方の評価域では効果は著しく小さいが，上方では同等程度の効果が得られることが確認できる。

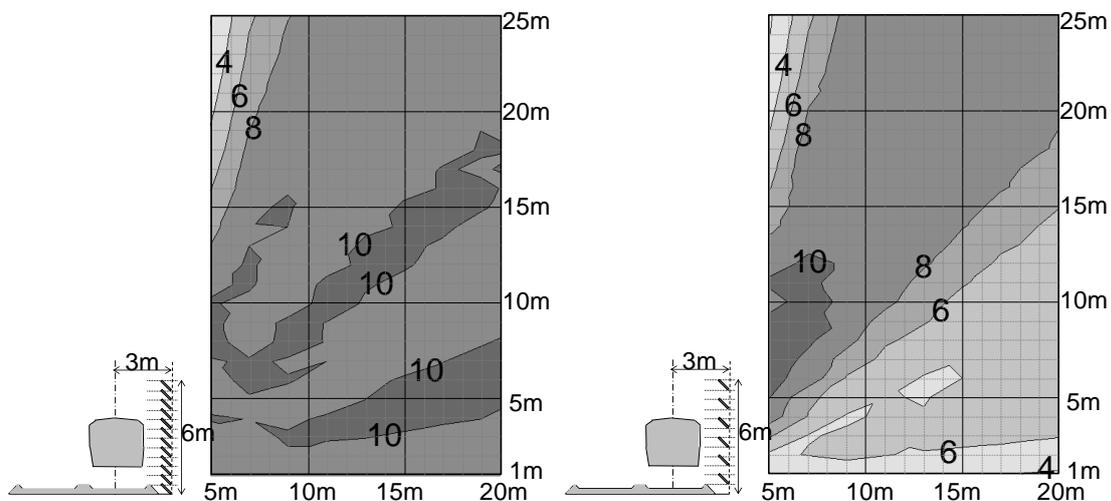


(a) 開口率 0%



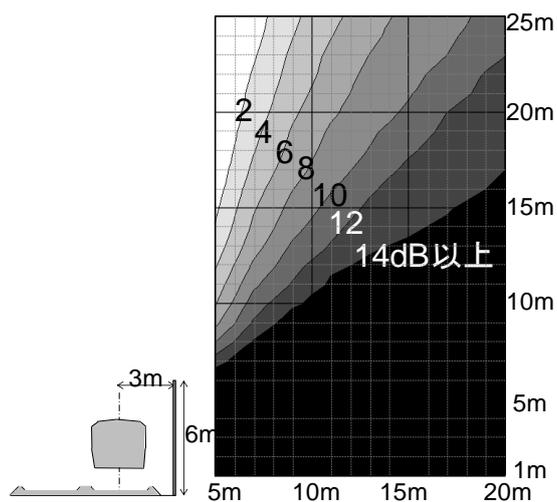
(b) 開口率 50%

図 6.14 騒音低減量の解析結果（吸音材の有無，遮音板幅 707 mm，角度 45°）



(a) 開口率 0%両面吸音

(b) 開口率 50%両面吸音



(c) 直壁

図 6.15 騒音低減量のコンター図（遮音板幅 707 mm, 角度 45°）

6.4 フルスケール実験（現車試験）による騒音低減効果の検討

6.4.1 現車試験の方法

関東近郊の在来鉄道沿線において改良型遮音壁を仮設し、現車試験により騒音低減効果を検証した。遮音板には長さ 1.8 m×幅 0.9 m×厚さ 12 mm のコンクリート型枠用合板を使用し、図 6.16 に示すように、遮音壁の位置は近接軌道中心から水平方向に 6 m 離れ、高さは地上 5 m、延長は測定断面を中心に両側 10 m、計 20 m とした。測定点は地上 1.2～10 m までの計 5 点、測定対象は速度 85～90 km/h で走行する 10 両編成車両とし、単発騒音暴露レベルを測定した。現車試験の状況を図 6.17 に示す。改良型遮音壁の仕様は、風洞実験と数値解析の結果から風荷重軽減と騒音低減の両方が見込まれる両面吸音材あり（グラスウール 32 kg/m³、厚さ 25 mm）の遮音板角度 45°・開口率 50%（タイプ 1）と遮音板角度 60°・開口率 38%（タイプ 2）に加えて、吸音材なしのタイプ 1 の形状（タイプ 3）を設定し、遮音壁なしの基準条件と比較する。表 6.1 に遮音壁の仕様を示す。なお、風荷重に関しては、タイプ 1 または 3 に対してタイプ 2 の方が理論値として 5 割程度大きくなる。

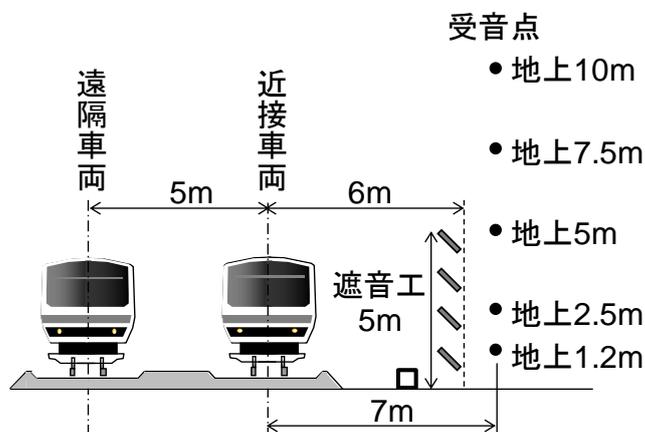


図 6.16 現車試験の測定断面



図 6.17 現車試験の状況

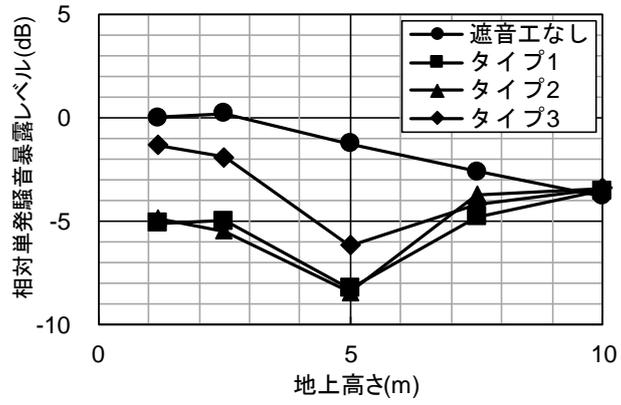
表 6.1 改良型遮音壁の条件 (タイプ1~3)

タイプ	タイプ1	タイプ2	タイプ3
開口率	50%	38%	50%
遮音板角度	45°	60°	45°
吸音材	両面あり	両面あり	両面なし
遮音工形状			
遮音板材質	コンパネt12 GW32K t25	コンパネt12 GW32K t25	コンパネt12

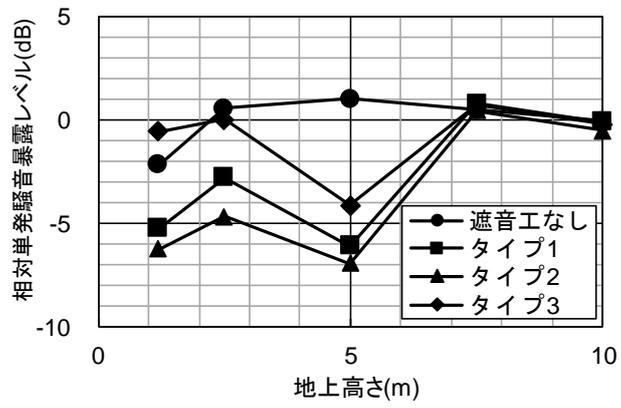
6.4.2 試験結果

近接車両，遮音壁なしの地上 1.2 m 点を基準とした場合の相対騒音レベルと地上高さの関係を図 6.18 に示す。遮音壁の騒音低減効果は，いずれのタイプでも近接・遠隔車両ともに地上 5 m で最も大きく，地上 10 m ではほとんど見られない。なお，今回の測定では音源と遮音壁の設置位置の離れが大きいため，地上 7.5 m 以上で低減効果が小さくなったと考えられる。遮音板角度の異なるタイプ 1 と 2 を比較すると，近接車両では地上 7.5 m でタイプ 1 の方が 1dB 程度低減量は大きいものの，遠隔車両では地上 5 m 以下でタイプ 2 の方が 1～2dB 上回っている。吸音材の効果としては，タイプ 1 と 3 の比較より，近接・遠隔車両ともに 3～4dB の低減が認められる。

図 6.19 に近接車両による相対騒音レベルの周波数特性を示す。地上 5 m では 400 Hz 以上の全帯域で遮音壁の効果が認められ，タイプ 1 と 2 の騒音低減量は約 7dB となっている。一方，地上 1.2 m では両タイプともに高音域の効果が小さくなり，約 5dB の低減量にとどまっている。なお，遠隔車両の場合，地上 5 m と 1.2 m において，タイプ 1 は 7dB と 3dB，タイプ 2 は 8dB と 4dB の低減量となり，地上付近での効果がより低下している。

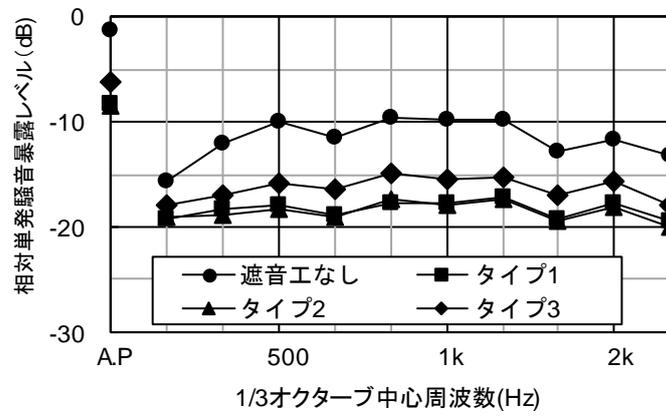


(a) 近接車両

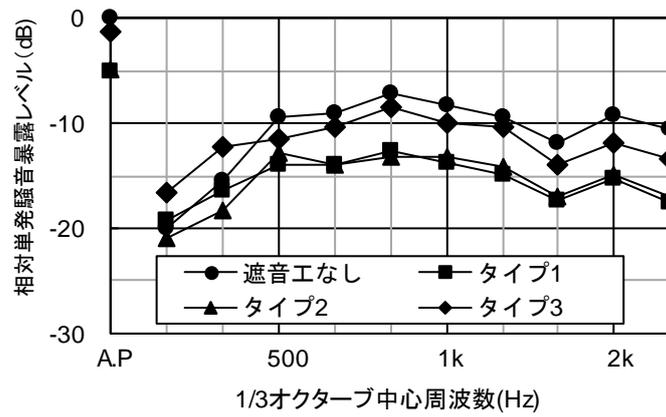


(b) 遠隔車両

図 6.18 騒音レベルの実測結果



(a) 地上 5 m



(b) 地上 1.2 m

図 6.19 騒音レベルの周波数特性 (近接車両)

6.5 数値解析とフルスケール実験の比較

6.3 節で実施した数値解析結果の妥当性を検証するために、現車試験音場を対象とした数値解析結果と実測値を比較して、実測値との対応を検証した。

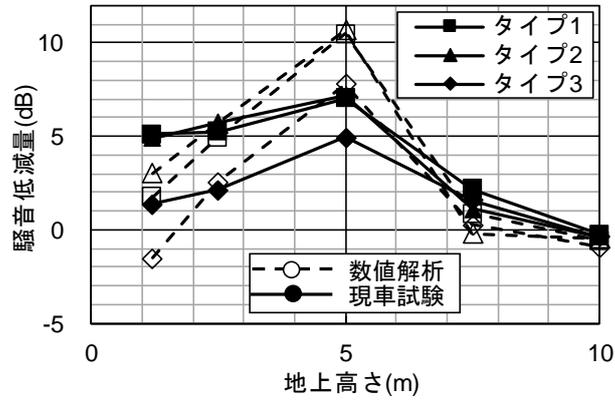
6.5.1 現車試験の数値解析モデル

図 6.16 の現車試験の測定断面に対して、2次元時間領域有限差分法を適用する。解析領域は、図 6.6 と同様の半自由音場（幅 40 m×高さ 35 m、外周に幅 5 m の境界吸収層）とし、近接・遠隔軌道には厚さ 300 mm のバラストの吸音特性を与えた。音源の周波数特性については、遮音壁なしの基準条件における地上 1.2~10 m の受音点 5 点を参照し、各帯域で騒音レベルの算術平均値が現場実測と数値解析で一致するようにスペクトル補正を行うこととした。なお、上記以外の数値解析の条件は 6.3 節と同様とした。

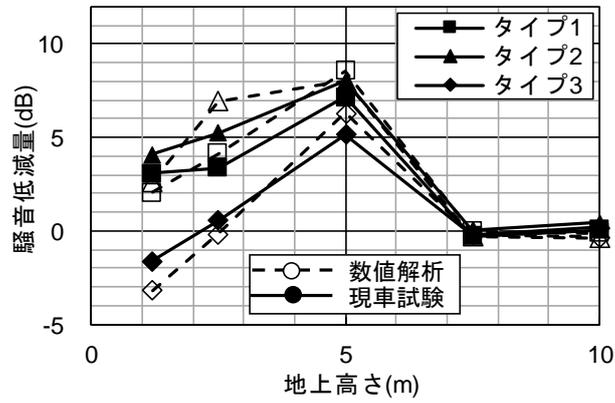
6.5.2 測定結果と解析結果の対応

近接・遠隔軌道の車両に対する 3 種類の遮音壁の騒音低減量と地上高さの関係について、現車試験による測定値と数値解析による計算値を図 6.20 に示す。両者を比較すると、近接車両に対する地上 5 m では計算値が測定値を大きく上回るものの、遠隔車両では比較的近い値となっており、全体として遮音壁の仕様による傾向は対応している。数値解析における低減量の過大評価は、線音源の干渉性を仮定した 2次元解析が主な原因と考えられ[106]、さらに現車試験における遮音壁の有限長の影響も加わっている。

近接車両、遮音壁なしの地上 1.2 m 点を基準とした場合の近接・遠隔車両による相対騒音レベルの周波数特性について、図 6.21 に地上 5 m における測定値と計算値を示す。近傍車両では低音域と高音域で計算値が 5dB 以上小さいのに対して、遠隔車両では全音域で比較的良い対応を見せている。近傍車両における乖離は、上述した 2つの原因に加えて、音源のモデル化にも起因すると考えられ、特に指向性の推定方法は今後の課題である。

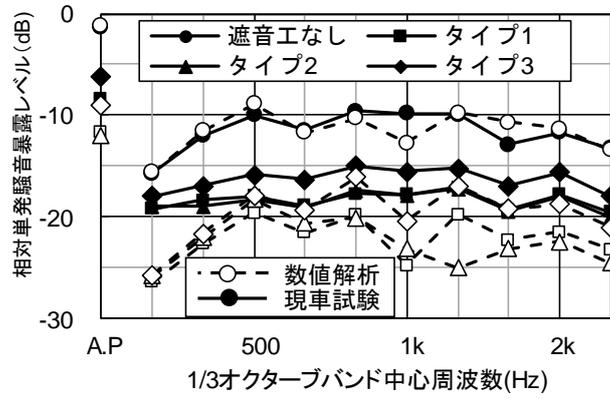


(a) 近接車両

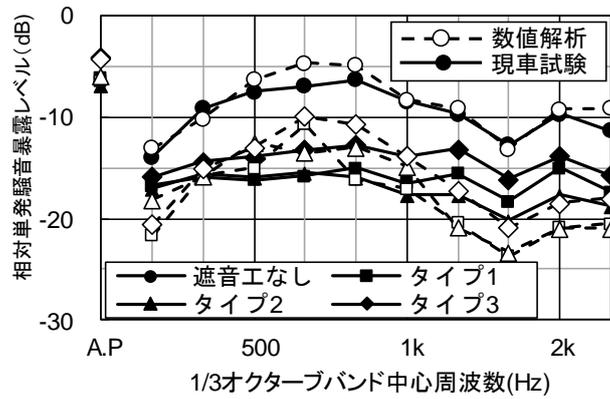


(b) 遠隔車両

図 6.20 騒音低減量の測定結果と解析結果



(a) 近接車両



(b) 遠隔車両

図 6.21 騒音レベルの周波数特性の測定結果と解析結果 (地上 5 m)

6.6 まとめ

高所空間における騒音低減と風荷重軽減の両立を目指した複数の遮音板で構成される改良型遮音壁を提案し、その形状について各種検討を行った。

風荷重に関する風洞実験の結果、改良型遮音壁の風荷重比は、遮音板の角度が等しい場合、開口率が大きいほど小さくなり、開口率が等しい場合、遮音板角度が小さいほど風荷重は小さくなることが確認された。

また、騒音低減に関する数値解析の結果、低減量は開口率の低下に伴い単調に増加し、遮音板角度は45～60°で最大となることが確認された。

風荷重に関する風洞実験と騒音低減に関する数値解析の結果、最適な遮音板角度は45°と考えられ、遮音板の傾斜角度と間隔の組み合わせによっては、風荷重を半分以下に軽減しつつ、高所空間の騒音低減量を直壁と同程度まで確保できることが確認された。

さらに、現車試験により改良型遮音壁の騒音低減効果を検証した結果、2次元モデルの数値解析結果までの効果は認められないものの、傾向の対応はある程度確認された。

本研究では、改良型遮音壁の基礎検討として、全面一律に間隔をあけて複数の遮音板を傾斜設置している。ただし、実用的には、支持構造に対する風荷重の負担が大きい上部のみに改良型を適用し、直壁に対して高さを稼ぐ対策が効果的と予想される。

第7章 総括

本章では、本研究の総括と今後の課題について述べる。

7.1 研究のまとめ

第1章では、鉄道騒音に関する現状、騒音予測に関する課題など研究の背景を概説し、本研究の目的について述べた。

第2章では、まず、既往の在来鉄道騒音の伝搬計算法および波動音響解析について概説した。つぎに、本研究で用いる時間領域有限差分法（FDTD法）による音場の数値解析手法について概説するとともに、その基本方程式の定式化を行った。また、開領域における吸音境界条件としてPML無反射境界条件や、音源条件としてガウシアンパルスに関する設定方法について述べた。さらに、空間および時間の分解能と数値計算の安定性の関係を差分の近似次数をパラメータに整理した。

第3章では、関東近郊の在来鉄道（平地区間、盛土区間、コンクリート高架橋区間の3箇所）において、高所空間を含む沿線の鉄道騒音の分布測定を実施した。その結果、走行音は壁なし条件の平地区間、盛土区間では走行軌道から、直壁条件のコンクリート高架橋区間では遮音壁天端上から斜め上方向に強く伝搬する傾向が見られた。また、騒音測定結果を踏まえて、単発騒音暴露レベルの実測値と予測値のレベル差について検討した。壁なし条件の平地区間および盛土区間のいずれにおいても、仰角が $20\sim 50^\circ$ の領域では予測値が実測値より小さくなるものの、実測値と予測値の差は最大2dB程度であることが分かった。つぎに、実測した騒音分布をもとに、鉄道騒音の伝搬予測に対して2次元波動数値解析手法を適用する際の音源のモデル化について検討を行い、精度を検証した。その結果、地上高さ25m程度まで騒音レベルを精度よく予測するには、高さ1.2m~10m範囲の複数点を参照点に設定するべきであることが分かった。とくに、2次元解析の場合、異なる高さの複数地点を基準として参照し、2次元解析の結果がもつ特異なピーク・ディップの周波数特性を平均化する手順は特異な干渉の影響を抑制する上で有効な手段の一つであると考えられる。また、車両下部に配置する音源数が多いほど計算誤差は小さくなるが、音源数の増加に対する精度の改善量と計算時間の増加量を勘案した結果、音源数は2つ、レール頭頂面高さで車両両端2点に設置したケースが最適と考えられる。

第4章では、在来鉄道における車体と遮音壁の間および対向する遮音壁間で生じる多重反射が遮音壁の騒音低減効果に及ぼす影響を検討した。まず、片側および両側遮音壁の各条件において、遮音壁の高さ、車体と遮音壁の距離などをパラメータとして騒音低減効果に及ぼす影響について数値解析により検討した。多重反射に伴う騒音レベルの増加量は、片側遮音壁において直壁高さ3~4 mで最大化するのに対して、両側遮音壁では直壁高さ6 mまで単調に上昇し、特に遮音壁の上方かつ陰の領域において増加が生じることが確認された。一方、遮音壁の先端を車体側へ傾斜させることにより、遮音壁先端の上方の空間で車体と遮音壁間の多重反射による増加量が小さくなることが確認された。また、1/25縮尺の模型実験を実施し、数値解析結果との比較を行ったところ、両者の比較的良好な対応が確認された。次に、数値解析から求めた多重反射の影響を補正量として在来鉄道騒音の予測手法に加える手順で、騒音予測を改善することを前提に、片側および両側遮音壁の多重反射に対応した補正量を定量的に検討した。補正量の算術平均値に対する精度を検証した結果、概ね2dB程度の差で騒音レベルを予測できることが明らかになった。

第5章では、在来鉄道騒音に対する有限長遮音壁の挿入損失に関して、点音源列を想定して遮音壁上方の回折経路のみを考慮する1パスの方法を用いて、遮音壁の長さ、高さ、走行車線と受音点の位置を変化させたケーススタディを行い、音源の指向性と遮音壁の見通し角が挿入損失に及ぼす影響を検討した。続いて、線音源を想定した騒音伝搬の簡易計算における有限長遮音壁の取扱いとして、音源の指向性と遮音壁の見通し角を考慮した挿入損失の近似式の精度を検証した上で、近似式を用いて遮音壁の必要長さの検討を行った。さらに、在来鉄道沿線に設置された遮音壁の側方端部付近において騒音測定を実施し、挿入損失の実測値と計算値との比較を行ったところ、両者に良好な対応が確認された。

第6章では、高所空間における騒音低減と風荷重軽減の両立を目指した複数の遮音板で構成される改良型遮音壁を提案し、その形状について各種検討を行った。風荷重に関する風洞実験と騒音低減に関する数値解析の結果、遮音板の傾斜角度と間隔の組み合わせによっては、風荷重を半分以下に軽減しつつ、高所空間の騒音低減量を直壁と同程度まで確保できることが確認された。また、現車試験により改良型遮音壁の騒音低減効果を検証した結果、2次元モデルの数値解析結果までの効果は認められないものの、傾向の対応はある程度確認された。

7.2 今後の課題

・新幹線騒音の予測手法への適用

新幹線 360 km/h での営業運転実現に向けて、沿線の騒音対策に関する研究開発がすすめられている[107, 108]。本論文では、車両下部音が支配的となっている在来鉄道騒音を対象としているが、新幹線の騒音予測を行う際は車両下部音の他に、車両上部空力音、集電系音、構造物音の 4 種類の音源を考慮する必要がある。とくに空力音は列車速度の 6 乗に比例して増大するため、高速化を実現する上で騒音の低減が最も難しい課題となっている。合理的な騒音対策工を提案する上で、これらの音源に対する騒音予測手法を構築していくことが重要である。

発表論文一覧

(1) 論文

- [1] 石川聡史, 加藤格, 廣江正明, 佐久間哲哉: 在来線沿線の高所空間を対象とした風荷重軽減型遮音壁の騒音低減効果, 騒音制御 Vol.40, pp.34-41, 2016.
- [2] 石川聡史, 廣江正明, 佐久間哲哉: 鉄道車体と遮音壁間の多重反射が騒音伝搬に及ぼす影響について, 騒音制御 Vol.41, pp.98-108, 2017.
- [3] 石川聡史, 廣江正明, 佐久間哲哉: 在来鉄道騒音に対する有限長遮音壁の挿入損失について, 騒音制御 Vol.42, 2018. (印刷中)

(2) 国際会議論文

- [1] S. Ishikawa, R. Shiraga, K. Yaginuma, T. Mathubara, M. Hiroe, K. Nagakura: An investigation on the method to predict noise level of conventional railway at high-rise buildings, Proc. Inter-Noise 2010 (Portugal) , No.146, 8p., 2010.
- [2] S. Ishikawa, I. Kato, M. Hiroe, T. Sakuma: Noise reduction effect of barriers for low wind load at high-rise buildings adjacent to conventional railways, Proc. Inter-Noise 2015 (San Francisco) , No.367, 12p., 2015.

(3) 国内会議論文

- [1] 石川聡史, 白神亮, 廣江正明, 杉江聡: 軌道近傍対策による高所空間での騒音低減効果について (数値解析手法による検討) , 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp.117-120, 2009.
- [2] 白神亮, 石川聡史, 柳沼謙一, 松原隆, 石塚康夫: 高所空間の在来線騒音測定に関する一考察, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp.121-124, 2009.

- [3] 廣江正明, 石川聡史, 白神亮, 岩瀬昭雄: 2次元の FDTD 法を用いた台車騒音の伝搬シミュレーション -軌道種類の取扱いと 3次元変換の適用事例-, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2010-02, 7p., 2010.
- [4] 廣江正明, 石川聡史: 台車騒音に対する各種防音壁の低減効果に関する数値解析, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2011-01, 7p., 2011.
- [5] 石川聡史, 柳沼謙一: 在来線沿線の高所空間を対象とした改良型遮音壁による騒音低減効果について, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp.45-48, 2011.
- [6] 石川聡史, 金子達哉, 伊戸川絵美, 廣江正明, 佐久間哲哉: 在来線沿線の高所空間を対象とした改良型遮音壁による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-2013-09, 8p., 2013.
- [7] 石川聡史, 伊戸川絵美, 廣江正明, 佐久間哲哉: 在来鉄道からの騒音伝搬に対する数値解析の適用, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp.21-24, 2013.
- [8] 石川聡史, 佐久間哲哉: 在来鉄道沿線の有限長防音壁に対する騒音低減効果について, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp.991-994, 2014.
- [9] 石川聡史, 加藤格, 廣江正明, 佐久間哲哉: 軌道面吸音対策の騒音低減効果の数値解析的検証, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2014-51, 8p., 2014.
- [10] 石川聡史, 加藤格, 廣江正明, 佐久間哲哉: 在来鉄道からの騒音伝搬に対する数値解析の適用, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2015-04, 8p., 2015.
- [11] 石川聡史, 廣江正明, 佐久間哲哉: 車体・遮音壁間の多重反射に伴う回折補正量に関する研究, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp.801-804, 2015.
- [12] 廣江正明, 小林知尋, 石川聡史: 2.5次元差分法解析を用いた在来鉄道騒音の伝搬解析 -平地鉄道の適用事例と模型実験による検証-, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp.805-808, 2015.
- [13] 石川聡史, 廣江正明, 佐久間哲哉: 車体・遮音壁間の多重反射が騒音低減効果に及ぼす影響について, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp.737-740, 2016.

- [14] 廣江正明, 小林知尋, 石川聡史: 2.5 次元数値解析を用いた車両・防音壁間の多重反射の影響評価, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp.741-744, 2016.
- [15] 廣江正明, 小林知尋, 石川聡史: 在来鉄道騒音に対する両側高防音壁の遮蔽効果, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp.59-62, 2016.
- [16] 石川聡史, 廣江正明, 佐久間哲哉: 在来鉄道騒音予測への 2 次元波動数値解析の適用に関する検討, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp.27-30, 2017.

謝辞

本研究は、著者が東京大学大学院新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻博士課程在学中に、同専攻 佐久間哲哉准教授の指導のもとに行った研究をまとめたものです。佐久間先生には、浅学の著者に対して専門知識だけでなく、論文作成における構成、論理の組み立て、文章の表現方法について多大なご指導を賜りました。心より感謝申し上げます。

学位論文審査の副査である東京大学大学院 新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻 佐々木淳教授、佐藤淳准教授、東京大学生産技術研究所 坂本慎一准教授、神奈川大学工学部建築学科 安田洋介教授には貴重なご指導、ご助言を賜りました。心より感謝申し上げます。

東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センター出向時には、増田達氏、清水満氏、柳沼謙一氏、白神亮氏、加藤格氏の方々には、本研究の実験にあたり実験データの提供をはじめ多大な協力とご助言をいただくとともに、多くの支援をいただき、心より御礼を申し上げます。

一般財団法人小林理学研究所 廣江正明氏には JR 東日本研究開発センター出向時より本研究の進行に際し、様々なご指導、ご助言をいただきました。ここに、深く感謝申し上げます。

J R 東日本コンサルタンツ株式会社 野口環境部長をはじめ社員の皆様には本研究の機会を与えていただき、多くの御配慮を賜りました。

最後に、大学での研究に理解を示し続けてくれた家族に、心から感謝いたします。

参考文献

- [1] 国土交通省: 2015 年度国土交通白書, 2015.
- [2] 新幹線鉄道騒音に係る環境基準について: 環境庁告示第 46 号, 1975.
- [3] 在来鉄道の新設又は大規模改良に際しての騒音対策の指針について(平成 7 年 12 月 20 環大一第 174 号), 1995.
- [4] 北川敏樹: 鉄道騒音の特性と防止策, 日本音響学会誌 Vol.64, No.10, pp.629-634, 2008.
- [5] 長倉清: 鉄道騒音問題への取り組み, 日本音響学会誌 Vol.66, No.11, pp.571-576, 2010.
- [6] 森圭太郎, 黒崎文雄, 高桑靖匡, 野澤伸一郎: 高性能逆 L 型防音壁の開発, JR EAST Technical Review, No.7, pp.57-63, 2004.
- [7] 村田香, 北川敏樹, 長倉清: 新幹線防音壁の形状に関する考察, 日本機械学会第 15 回環境工学総合シンポジウム 2005 講演論文集, pp.90-93, 2005.
- [8] 森圭太郎, 高桑靖匡, 野澤伸一郎, 島広志, 渡辺敏幸: 鉄道用新型騒音低減装置の効果検証実験, 土木学会論文集 G Vol.62 No.4, pp.435-444, 2006.
- [9] 大谷多香, 村田信之, 波田匡司, 大脇雅直, 杉木陽次: リサイクル(焼成発泡ガラス)吸音材を用いた防音壁の開発, 土木学会第 57 回年次学術講演会論文集, pp.553-554, 2002.
- [10] 山極伊知郎: 微細多孔板防音壁, 可視型山形防音壁, 騒音制御 Vol.36, No.6, pp.410-414, 2012.
- [11] 長倉清: 在来鉄道騒音の現状と対策, 音響技術, Vol.42, No.3, pp.54-58, 2013.
- [12] 北川敏樹: 防音壁に関する模型実験と数値シミュレーション, 鉄道総研報告 Vol.14, No.9, pp.11-16, 2000.
- [13] D. C. Hothersall, K. V. Horoshenkov, P. A. Morgan, M. J. Swift: Scale modelling of railway noise barriers, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.234, No.2, pp.207-223, 2000.

-
- [14] Y. Abe, K. Nagakura, T. Kitagawa, K. Murata: A study on effective configurations of sound barriers for Shinkansen track, Proceedings of inter-noise 2005, pp.1868-1876, 2015.
- [15] 村田香, 長倉清, 北川敏樹: 新幹線車両の音源分布に基づく模型実験による沿線騒音推定法, 鉄道総研報告 Vol.21, No.3, pp.5-11, 2007.
- [16] 小方幸恵: 音響模型試験による鉄道沿線騒音の評価, 音響技術, Vol.42, No.3, pp.42-46, 2013.
- [17] P. A. Morgan, D. C. Hothersall, S. N. Chandler-Wilde: Influence of shape and absorbing surface — a numerical study of railway noise barriers, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.217, No.3, pp.405-417, 1998.
- [18] P. Jean: The effect of structural elasticity on the efficiency of noise barriers, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.237, No.1, pp.1-21, 2000.
- [19] 廣江正明, 加来治郎, 森圭太郎, 高桑靖匡, 野澤伸一郎: 差分法を用いた台車騒音に対する逆L型防音壁の遮蔽効果の解析, 騒音制御 Vol.31, No.4, pp.322-332, 2007.
- [20] 小方幸恵, 長倉清, 安部由布子: 高所空間における鉄道騒音の予測と対策の検討, 日本機械学会第18回環境工学総合シンポジウム2008講演論文集, pp.90-93, 2008.
- [21] 買手正浩: 外部騒音予測における鉄道軌道発生音の伝搬特性について, 日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集, pp.125-128, 2009.
- [22] 橋本頼幸, 畑康介, 梅宮典子: 阪和線高架に面する集合住宅の騒音評価 — 鉄道騒音と道路交通騒音, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学1), pp.235-236, 2012.
- [23] 長倉清, 善田康雄: 新幹線沿線騒音予測手法, 鉄道総研報告 Vol.14, No.9, pp.5-10, 2000.
- [24] 森藤良夫, 長倉清, 立川裕隆, 緒方正剛: 在来鉄道騒音の予測評価手法について, 騒音制御, Vo.20, No.3, pp.32-37, 1996.
- [25] 石井聖光, 子安勝, 長祐二, 木庭紀之: 在来線高架鉄道からの騒音予測手法案について, 騒音制御, Vo.4, No.2, pp.4-10, 1980.

-
- [26] 安部由布子, 長倉清, 北川敏樹: 在来鉄道騒音の予測手法に関する検討, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2005-1, 2005.
- [27] 筑井啓介, 押野康夫, 橘秀樹: 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.
- [28] Y. Mori, A. Fukushima, K. Uesaka, H. Ohnishi: Noise directivity of vehicles on actual road, Proceedings of inter-noise 99, pp.209-212, 1999.
- [29] 安岡博人: 建物高層階への音の伝搬, 騒音制御 Vol.28, No.4, pp.238-242, 2004.
- [30] 道路交通騒音の予測モデル” ASJ RTN-Model 2013” , 日本音響学会誌 Vol.70, No.4, pp.172-230, 2014.
- [31] D. Hohenwarter: Railway noise propagation models, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.141, No.3, pp.17-41, 1990.
- [32] 長倉清, 安部由布子, 北川敏樹, 小方幸恵: 鉄道沿線における高所空間に適用可能な騒音予測手法, 鉄道総研報告 Vol.23, No.7, pp.23-28, 2009.
- [33] 植田知孝, 長岡宏典, 福井礼治, 吉田元臣, 井上淳平: 高層マンションにおける鉄道騒音の伝搬特性についての一考察, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp.167-170, 2010.
- [34] 中澤真司: 遮音設計のための鉄道騒音・鉄道振動の測定方法とその留意点, 音響技術, Vol.42, No.3, pp.10-13, 2013.
- [35] 坂本慎一, 福島昭則: 道路交通騒音予測への2次元波動数値解析の適用に関する数値解析的検討, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2003-71, 8p., 2003.
- [36] 坂本慎一, 福島昭則: 道路交通騒音予測への2次元波動数値解析の適用に関する実験的検討, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2003-72, 8p., 2003.
- [37] 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 Vol.18, No.4, pp.187-196, 1962.
- [38] 藤原恭司, 尾本章: 前川チャートについて, 日本音響学会誌 Vol.47, No.5, pp.348-350, 1991.

-
- [39] 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.
- [40] 緒方正剛, 藤原恭司, 北川敏樹, 長倉清: 在来型鉄道の騒音予測における防音壁の多重反射に関する高架構造モデルによる実験的検討, 日本機械学会・日本音響学会共催シンポジウム講演論文集, pp.209-212, 2000.
- [41] 北川敏樹, 長倉清: 鉄道騒音における伝搬系対策, 日本音響学会誌 Vol.68, No.12, pp.622-628, 2012.
- [42] 長倉清: 鉄道における防音壁, 騒音制御 Vol.36, No.6, pp.393-397, 2012.
- [43] 大久保朝直: 遮音壁による道路交通騒音対策, 環境技術, Vol.36, No.10, pp.732-738, 2007.
- [44] 鹿島建設株式会社, https://www.kajima.co.jp/tech/c_tohoku_jukan/flow/index.html
- [45] 阪神電気鉄道株式会社, <http://www.hanshin.co.jp/company/csr/environment/traffic.html>
- [46] 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 Vol.21, No.1, pp.1-7, 1965.
- [47] 野中宏: 有限長遮音壁の減音効果, 土木技術資料 国土交通省国土技術政策総合研究所, Vol.17, No.6, pp.293~299, 1975.
- [48] 西田公至, 藤塚桂男: 有限長障壁による音波回折の境界要素解析, 日本音響学会誌 Vol.44, No.11, pp.815-823, 1988.
- [49] André L'Espérance: The insertion loss of finite length barriers on the ground, J.A.S.A., Vol.86, No.1, pp.179-183, 1989.
- [50] 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 Vol.50, No.4, pp.271-278, 1994.
- [51] K. Takagi, R. Hotta, K. Yamamoto "A simple method for the calculation of noise attenuation by a finite length barrier, Applied. Acoustics. Vol.43, pp.353-365, 1994.
- [52] 井上瑞希, 藤原恭司: 防音壁用吸音性円筒エッジの有効取り付け長に関する研究, 日本音響学会誌 Vol.60, No.5, pp.258-267, 2004.

-
- [53] 安田洋介, 佐久間哲哉, 大嶋拓也: FMBEM による遮音壁の 3 次元解析 –有限長モデルと減音効果評価に関する検討–, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp.939-940, 2003.
- [54] 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.
- [55] 渡辺義則, 吉田勇, 久保喜延, 加藤九州男: 風の抵抗の低減を考慮した遮音壁の基礎的研究, 土木学会論文集 No. 530/IV-30, pp.117-122, 1996.
- [56] 渡辺義則, 久保喜延, 加藤九州男, 吉田勇, 吉行勝哉: 風の抵抗の低減を考慮した遮音壁の実車走行試験, 土木学会論文集 No. 562/IV-35, pp.151-158, 1997.
- [57] 松本敏雄, 堀田竜太, 山本貢平: ルーバー型遮音壁の騒音低減効果, 騒音制御, Vol.26, No.2, pp.129-137, 2002.
- [58] 松本敏雄: 吸音ルーバーによる道路交通騒音対策, 騒音制御 Vol.28, No.5, pp.334-338, 2004.
- [59] 松本敏雄, 大久保朝直, 山本貢平: 吸音ルーバーの遮音性能予測, 日本音響学会誌 Vol.67, No.9, pp.385-394, 2011.
- [60] 半坂征則, 佐藤大悟, 間々田祥悟, 谷口望: 風荷重低減型防音板の開発, 日本機械学会論文集 (C 編) 79 巻, 798 号, pp.201-205. 2013.
- [61] 半坂征則, 佐藤大悟, 間々田祥悟, 谷口望: 鉄道高架橋用風荷重低減型防音工の開発, 騒音制御 Vol.39, No.4, pp.110-119, 2015.
- [62] G.R.Watts, D.C.Hothersall, K.V.Horoshenkov: Measured and predicted acoustic performance of vertically louvred noise barriers, Applied. Acoustics. Vol.62, No.11, pp.1287-1311, 2001.
- [63] Ogata Y. and Nagakura K., Noise reduction effect of low barriers installed adjacent to rails, Quarterly Report of RTRI, Vol. 53, No.3, pp.173-179, 2012.
- [64] 鶴秀生: 音響数値解析の進歩と可視化と可聴化技術を用いた音響設計, J. Marine Acoust. Soc. Jpn. Vol.38, No.1, pp.8-18, 2011.
- [65] 北川敏樹, 長倉清, 緒方正剛: 在来鉄道の騒音予測方法, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp.735-736, 1999.

-
- [66] 朱鎮洙: 在来鉄道の騒音伝搬予測に関する研究, 博士論文, 東京大学, 1996.
- [67] 瀬林伝, 田中正一: 鉄道騒音の予測—指向性の検討—, 騒音制御, Vol.13, No.1, pp.37-40, 1989.
- [68] 小林知尋, 横山栄, 矢野博夫, 橘秀樹: 在来鉄道騒音の音源特性のモデル化, 日本音響学会誌 Vol.66, No.6, pp.257-264, 2010.
- [69] 日本建築学会 (編): 音環境の数値シミュレーション—波動音響解析の技法と応用—, 日本建築学会, 2011.
- [70] 日本建築学会 (編): はじめての音響数値シミュレーションプログラミングガイド, コロナ社, 2012.
- [71] 大久保朝直, 藤原恭司: ソフトな円筒エッジを持つ防音壁の遮音性能, 日本音響学会誌 Vol.52, No.12, pp.957-966, 1996.
- [72] 金哲煥, 藤原恭司: 音響管配列による T 型防音壁の遮音性能, 日本音響学会誌 Vol.54, No.3, pp.179-189, 1998.
- [73] 松本源生, 藤原恭司, 尾本章: 防音壁の遮音性能に及ぼす音源指向性の影響, 日本音響学会誌 Vol.57, No.4, pp.272-281, 2001.
- [74] 井上瑞希, 藤原恭司: 防音壁用吸音性円筒エッジの有効取り付け長に関する研究, 日本音響学会誌 Vol.60, No.5, pp.258-267, 2004.
- [75] 大久保朝直: 遮音壁の騒音低減効果に関する 2 次元境界要素法解析, 騒音制御 Vol.31, No.4, pp.278-284, 2007.
- [76] 藤原恭司, 大久保朝直: 先端改良型遮音壁による道路交通騒音の低減, 騒音制御 Vol.34, No.5, pp.347-352, 2010.
- [77] 福島昭則, 坂本慎一: 2 次元波動数値解析を用いた道路交通騒音での条件設定に関する検討, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2004-12, 9p., 2004.
- [78] 坂本慎一, 福島昭則: 道路交通騒音予測への 2 次元波動数値解析の適用に関する数値解析的検討, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2003-71, 8p., 2003.
- [79] 坂本慎一, 福島昭則: 道路交通騒音予測への 2 次元波動数値解析の適用に関する実験的検討, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2003-72, 8p., 2003.

-
- [80] 福島昭則: 干渉性線音源と非干渉性線音源について, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2005-01, 7p., 2005.
- [81] D. Duhamel: Efficient calculation of the three-dimensional sound pressure field around a noise barrier, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.197, No.5, pp.547-571, 1996.
- [82] S. Sakamoto: Calculation of sound propagation in three-dimensional field with constant cross section by Duhamel's efficient method using transient solutions obtained by finite-difference time-domain method, *Acoust. Sci. Tech.* Vol.30, No.2, pp.72-82, 2009.
- [83] 坂本慎一: 2次元過度応答解に基づく3次元音場解の計算法, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp.983-984, 2008.
- [84] 廣江正明, 加来治郎, 岩瀬昭雄: 2次元解から3次元解への積分変換—2次元のFDTD法の適用例—, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2008-37, 6p., 2008.
- [85] 坂本慎一: 有限差分法による音場の数値解析, 騒音制御 Vol.31, No.4, pp.263-270, 2007.
- [86] 坂本慎一: 道路交通騒音の伝搬対策とその効果予測, 日本音響学会誌 Vol.69, No.9, pp.514-518, 2013.
- [87] 坂本慎一: 差分法を用いた道路騒音の予測, 日本音響学会誌 Vol.71, No.8, pp.390-396, 2015.
- [88] 坂本慎一, 橘秀樹: 差分法を用いた過度応答計算における吸音境界条件の検討, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp.809-810, 1997.
- [89] S. Sakamoto, H. Nagatomo, A. Ushiyama, H. Tachibana: Calculation of impulse responses and acoustic parameters in a hall by the finite-difference time-domain method, *Acoust. Sci. Tech.* Vol.29, No.4, pp.256-265, 2008.
- [90] T. Yokota, S. Sakamoto, H. Tachibana: Visualization of sound propagation and scattering in rooms, *Acoust. Sci. Tech.* Vol.23, No.1, pp.40-46, 2002.
- [91] 前川純一, 森本政之, 阪上公博: 日本建築学会(編): 建築・環境音響学 第3版, 共立出版, 2011.

-
- [92] Mohammed F. Hadi, Melinda Piket-May: A modified FDTD (2,4) scheme modeling electrically large structure with high-phase accuracy, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION. Vol.45, No.2, pp.254-264, 1997.
- [93] 大久保寛, 呉星冠, 土屋隆生, 竹内伸直, 田川憲男: 高次差分による Asymmetric FDTD (A-FDTD) 法を用いた音波伝搬の数値シミュレーション, 電子情報通信学会 信学技報 IEICE Technical Report US2007-44, 2007.
- [94] 坂本慎一, 山本航介, 橘秀樹: FDTD 法における多点差分スキームの安定性解析, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp.953-954, 2004.
- [95] 安達純平, 大久保寛, 石塚 崇: 特性曲線法による音響シミュレーションにおける PML 吸収境界の比較評価, 電子情報通信学会 信学技報 IEICE Technical Report US2013-99, 2014.
- [96] Jean-Pierre Berenger: A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves, Journal of computational physics, Vol.114, pp.185-200, 1994.
- [97] 坂本慎一: 音波の進行方向に適応した PML 無反射境界, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp.909-910, 2005.
- [98] 山本航介, 坂本慎一, 橘秀樹: 高次差分を用いた FDTD 法の精度向上, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp.831-832, 2004.
- [99] 坂本慎一, 横田考俊: FDTD 法による音場解析とその応用, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp.1233-1236, 2006.
- [100] 廣江正明: 鉄道騒音に対する防音壁の遮蔽効果に関する研究, 博士論文, 新潟大学, 2010.
- [101] 長倉清: 鉄道騒音の測定と評価, 騒音制御 Vol.34, No.1, pp.18-22, 2010.
- [102] 廣江正明: 在来鉄道騒音測定マニュアルについて, 音響技術, Vol.42, No.3, pp.5-9, 2013.
- [103] Stylianos Kefhalopoulos, Marco Paviotti, Fabienne Anfosso-Lédée: Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU), To be used by the EU Member States for strategic noise mapping following adoption as specified in the Environmental Noise Directive 2002/49/EC JRC REFERENCE REPORTS, 2012.

-
- [104] 大久保朝直, 山本貢平: 先端改良型遮音壁の音響性能評価における地表面反射の影響, 日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集, pp.17-20, 2005.
- [105] S. Sugie, J. Yoshimura and T. Iwase: Sound insulation performance of double leaf partition improved with various types of absorbing materials at low frequencies, Proceedings of inter-noise 2006, pp.1868-1876, 2006.
- [106] 福島昭則, 藤原恭司: 線音源の干渉性／非干渉性が障壁の挿入損失に及ぼす影響, 日本音響学会誌 Vol.58, No.1, pp.10-19, 2002.
- [107] 加藤格, 篠原良治: 新幹線高速化に伴う地上側環境対策について, JR EAST Technical Review, No.44, pp.73-76, 2013.
- [108] 川上修: 新幹線に関する研究開発の概要, JR EAST Technical Review, No.57, pp.7-10, 2017.