

鉄道沿線における高所空間に適用可能な騒音予測手法

長倉 清* 安部 由布子** 北川 敏樹* 小方 幸恵*

Study on Prediction Model of Railway Noise at High-rise Buildings

Kiyoshi NAGAKURA Yufuko ABE Toshiki KITAGAWA Yukie OGATA

This paper introduces a prediction model of the railway noise applicable to various locations including high-rise buildings. In order to prepare a model adequate for prediction of noise at high-rise buildings, the vertical directivity of a noise induced by a passing train and multiple sound reflections between noise barrier and car surface should be taken into consideration. Firstly, the vertical directivity pattern of the noise radiated from the lower parts of a vehicle was investigated through both a field measurement and a scale-model test, and its empirical formula was derived. Next, the effect of multiple sound reflections between noise barrier and car surface was examined by an acoustic experiment with a scale model, the result of which indicated that the multiple sound reflections could be simulated by using an image sources model. Finally, a prediction model using the empirical vertical directivity pattern and the image sources model has been proposed and the prediction result by the model has been validated to be consistent with the result of the scale model test.

キーワード：鉄道騒音，予測法，高所空間

1. はじめに

近年、鉄道沿線の高層住宅における騒音が問題になりつつあり、これらの場所における騒音を精度よく予測する手法の確立が求められている。これまでに公表されている鉄道騒音の予測手法として、在来鉄道については、在来線高架鉄道を対象に石井・子安らが提案した方法¹⁾、「在来鉄道の 신설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方法²⁾、著者らが提案した離散点音源モデルおよびエネルギーベースの計算方法による手法³⁾などがある。一方、新幹線については、著者らが提案した予測手法⁴⁾が広く用いられている。しかし、これら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、線路に近接した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。また、高所空間においてはこれらの予測手法では考慮されていない音源の鉛直方向の指向特性（以下、単に「指向特性」と表記）や車両、防音壁による音の反射の影響があると考えられ、予測手法の精度を向上させるためには、これらの影響を把握し、予測手法に反映させることが必須である。

そこで、本研究では、音源パワーが大きく高所空間において特に問題となると考えられる車両下部から発生す

る騒音（転動音，主電動機ファン音等）について、音源の指向特性を現車試験と模型実験によって調査し、指向特性を表す実験式を導出した。次に模型実験により、防音壁がある場合の車両下部騒音のレベル分布を求め、従来の予測手法による計算値と比較し、従来の予測手法の問題点を抽出した。これらの結果をもとに、音源の指向特性や車両、防音壁での音の反射を考慮した騒音予測モデルを提案した。

2. 音源の鉛直方向の指向特性に関する検討

2.1 現車試験による検討

(1) 測定概要

車両下部から発生する騒音の一つである転動音の鉛直方向の指向特性を把握するため、鉄道総合技術研究所・国立研究所内の試験線（ループ線）において、列車が走行する際の騒音レベルを鉛直断面内の複数の測定点において同時に測定した。測定点の概要図を図1に示す。水平方向が軌道中心、高さ方向がレールレベルの位置を中心とした同心円（半径6mおよび10m）の円弧上に、水平方向からの仰角 ϕ を 0° から 75° までの 15° 間隔で無指向性マイクロホンを設置した。また、測定断面を台車が通過する正確なタイミングを把握するため、車軸検知装置を測定断面内のレールに設置した。測定区間は平地の曲線区間（ $R=160$ ）で、定尺レール（長さは約12m）を使用したバラスト軌道である。したがって、きしみ音や

* 環境工学研究部（騒音解析）

** 人間科学研究部（人間工学）

特集：環境技術

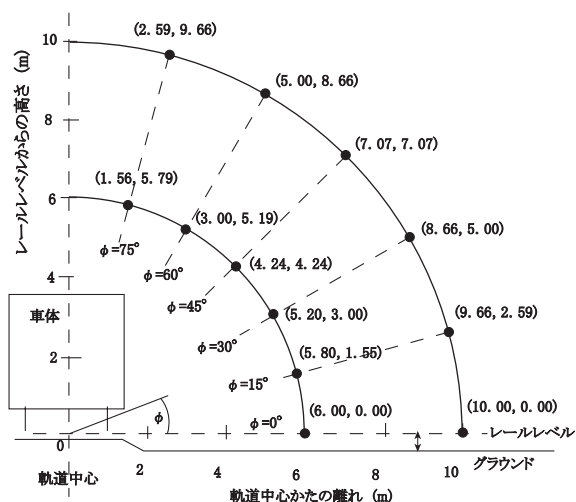


図1 現車試験における測定点

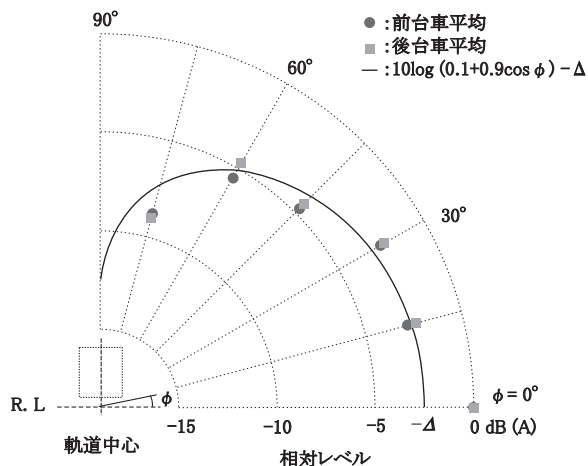


図2 現車試験で得られた転動音の指向特性
(気動車惰行時, 10m 離れ点)

レール継ぎ目での衝撃音が生じやすいため、測定日として小雨の日を選択し、かつ定尺レール継ぎ目の中間位置を測定断面とすることで、きしみ音や継ぎ目の衝撃音による影響が極力小さくなるように配慮した。測定対象車両は、気動車(キハ30-15, 台車間距離13.7m, 軸距2.1m, エンジン1機搭載)1両とし、エンジン音を除外するため測定断面の20~30m手前からは惰行での走行とした。測定断面における列車通過速度は32~33km/hである。

(2) 測定結果

列車走行中の騒音レベルの測定結果から、きしみ音や衝撃音の影響があらわれているものを除外し、転動音が判別可能なものとして計4回分の走行時のデータを選択し解析対象とした。各測定点での時間重み特性Fでの騒音のレベル変動図および車軸検知信号から、車両の前台車、後台車に対応するレベルピークを読みとった値をその測定点での転動音の騒音レベルとする。4走行分の騒音レベルを各台車ごとにパワー平均して得られた値を測定点の水平方向からの角度 ϕ に対してプロットした結果を図2に示す。ここで、 $\phi=0^\circ$ でのレベル値を0dBとした相対レベルを用いる。なお、(3)で示す数式による指向特性の近似曲線もあわせて示した。

これらの結果より、列車走行時の転動音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がわかる。また、 $\phi=0^\circ$ の測定点では $\phi=15^\circ$ の測定点に比べて2~2.5dB程度大きな騒音レベルを示しているが、これは地面反射音によるレベル増加であると考えられる。

(3) 指向特性の数式表示

現車試験で得られた転動音の指向特性を高所空間における騒音予測法に適用するため、指向特性を数式で表すことを試みる。現車試験での指向特性において、水平方向にやや強めの指向特性を示していることから、転動音

の指向特性 $D(\phi)$ を式(1)で表すものとする。

$$D(\phi) = \beta + (1 - \beta) \cos \phi \quad (1)$$

図2に示した結果では、 $\beta = 0.1$ のときに測定結果と良い近似が得られた。そこで、

$$D(\phi) = 0.1 + 0.9 \cos \phi \quad (2)$$

を転動音の指向特性を示す実験式とする。

2.2 模型実験による検討

現車試験の測定結果から、転動音の鉛直方向の指向特性は式(2)により近似できることがわかったが、これは音源そのものの指向特性ではなく、転動音の音源であるレールや車輪の上部に車両があることによって上方への騒音伝搬が抑えられることにより生じた可能性もある。現車試験で得られた指向特性の原因を確認するために、無響室において1/20縮尺模型実験を実施した。模型実験での測定点は現車試験と同じ位置とし、図1に示される各測定点のほか、現車試験では測定困難な $\phi=90^\circ$ の点においても測定を行った。

模型実験の音源として、直径20mmで周方向には無指向性となる圧縮空気を利用した線音源を測定点側のレール位置に設置した。車両は矩形に成形したアルミ板で模擬し、車両幅、高さを実車と同じ在来鉄道相当のものとした。車両模型と音源の設置状況を図3に示す。図中寸法は実車換算のものである。

転動音の示す指向特性が車両の影響によるものかどうかを調査するため、車両模型を線音源の上部に設置した場合と設置しない場合の騒音レベル分布を測定した。

模型実験で得られた結果について、1/3オクターブバンド周波数を1/20倍した後、模型実験に用いた音源と実車での音源の周波数スペクトルの差を考慮することに

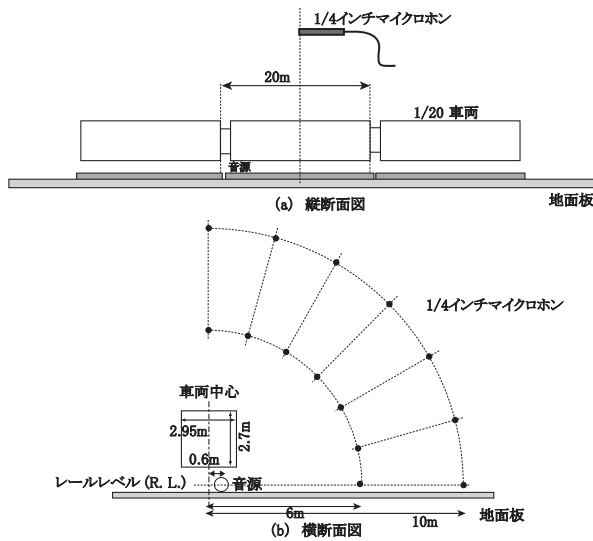


図3 模型実験の概要（寸法は実車換算）

よって実車対応の1/3オクターブバンドレベルを求め、さらにそれらのパワー和を求めることによってオーバーオールレベルを算出した。ここで、実車音源の周波数スペクトルとしては、6m離れ、 $\phi=0^\circ$ の測定点において得られた騒音のスペクトルを用いた。

図2と同様に、 $\phi=0^\circ$ との相対レベルを角度 ϕ に対してプロットすることによって得られた指向特性を図4に示す。この図には式(2)で示される指向特性を表す近似曲線も示す。図4より、車両模型がある場合には、地面反射の影響が大きいと考えられる $\phi=0^\circ, 15^\circ$ の地点を除き、指向特性は式(2)により近似できると考えて良い。なお、車両模型がない場合にも水平方向にやや強い指向特性を示しており、 $\phi=0^\circ$ と $\phi=90^\circ$ では5dB程度の差がみられる。これは、車両模型がない条件において、上方の測定点では地面からの反射音が音源自身によって遮蔽されるためと考えられる。

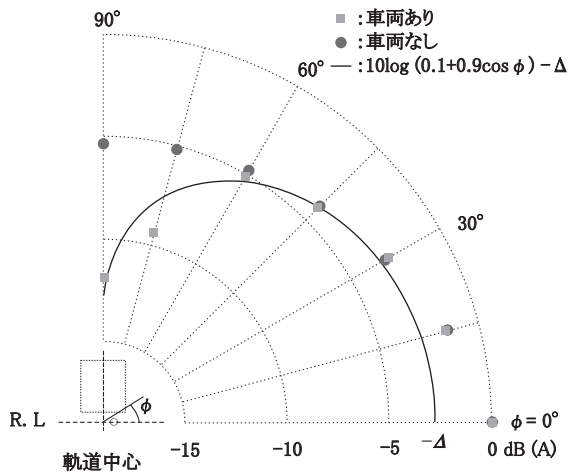


図4 縮尺模型実験で得られた指向特性（10m離れ相当点）

以上の結果から、転動音の鉛直方向の指向特性は、車両が音源の上部に存在することが騒音伝搬に影響して生じると考えられる。また、車両が指向特性に影響を与えていることから、車両の下にある他の音源（主電動機ファン騒音等）についても転動音と同様の指向特性を持つことが推察される。さらに、模型実験により得られた指向特性と現車試験で得られた指向特性がほぼ同等であることから、模型実験によって線路に対して鉛直断面内の騒音伝搬特性をほぼ模擬できると考えてよい。

3. 車両・防音壁の影響に関する検討

第2章では防音壁がない条件での音源の鉛直方向の指向特性を検討したが、防音壁がある条件では、音源の指向特性に加え、車両と防音壁における音の反射が沿線の騒音レベル分布に影響することが推測される。そこで、防音壁を設置した条件で模型実験を実施し、防音壁および車両がある状況での沿線騒音レベル分布を把握するとともに、車両と防音壁における音の反射の影響を考慮していない従来の予測手法による騒音レベル分布との比較を行った。従来の予測手法による騒音レベル分布としては、新幹線騒音予測手法⁴⁾での車両下部騒音に対する計算値（音源1個当たりのパワーレベルを100dBとして計算）を用い、車両の両数等の条件は以下で述べる模型実験での条件と合わせた。

3.1 模型実験の概要

無響室において1/25縮尺模型実験を実施した。車両には1/25縮尺の代表的な新幹線車両を模擬した模型（長さ4m、実車換算で4両分）を用い、高架橋内はスラブ軌道を模擬した。測定点は、高さはR.L.+25m~-7.5m、近接側軌道中心からの離れは6.25m~50mの範囲の格子点上に設置した。車両下部騒音を模擬するため、第2章の模型実験で用いたものと同じ線音源を車両模型下部（測定点側レールに対応する位置）に配置した。防音壁高さは2m、3mの2条件、車両模型位置は近接側軌道と遠隔側軌道の2条件（計4条件）で実験を行った。実車への換算方法は第2章で行った模型実験と同様であるが、実車音源の周波数スペクトルとしては、新幹線騒音予測手法で用いている新幹線車両下部騒音の代表スペクトル（音源1個当たりのパワーレベルを100dBとして計算）を用いた。

3.2 実験結果と予測結果の比較

防音壁高さが3m、車両位置が近接側軌道の条件における模型実験での沿線騒音レベル分布を図5(a)に、同条件での予測計算による沿線騒音レベル分布を図5(b)に示す。軌道に近接した高所空間に着目すると、予測手法による計算値では軌道からの水平距離が小さくなるに

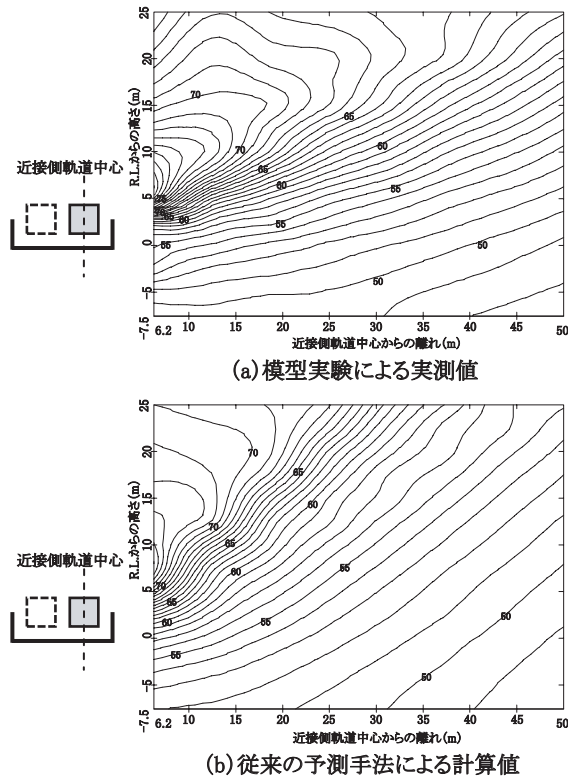


図5 防音壁高さが3m, 車両位置が近接側軌道の条件での騒音レベル分布 (寸法は実車換算)

つれて騒音レベルが増大するのに対し、模型実験による実測値では軌道に近づくにつれて騒音レベルが減少する。これは、模型実験においては、音源が側方へ大きく上方へ小さい指向特性を持つためと考えられる。また、防音壁に近く、防音壁上端よりも高い位置においては、防音壁による遮蔽が期待できないため騒音レベルが高くなっているが、模型実験の方がより低い位置まで騒音レベルが高い領域が広がっている。この領域は車両側面から防音壁上端を通して斜め上方に向かう方向にあり、車両側面と防音壁との間を多重反射した音がこの方向に放射される影響と考えられる。

図6に防音壁高さ、車両位置条件ごとの計算値と実測値のレベル差の分布を示す。防音壁高さが3m, 車両位置が近接側軌道の条件に着目すると、軌道に近接した高所空間では計算値が実測値を最大で5dB程度上回っている一方で、車両側面から防音壁上端を通して斜め上方に向かう領域においては、実験値が計算値を最大で8dB程度上回っている。なお、ここには示していないが、防音壁高さが2mの場合も、実験値と計算値の差は縮まるものの、ほぼ同様の傾向が見られる。これらの領域において予測精度を向上させるためには、音源の鉛直方向の指向特性や車両、防音壁での音の反射の影響を考慮する必要があると考えられる。車両位置が遠隔側軌道の条件においては、多重反射音の影響が小さく、水平面からの仰角

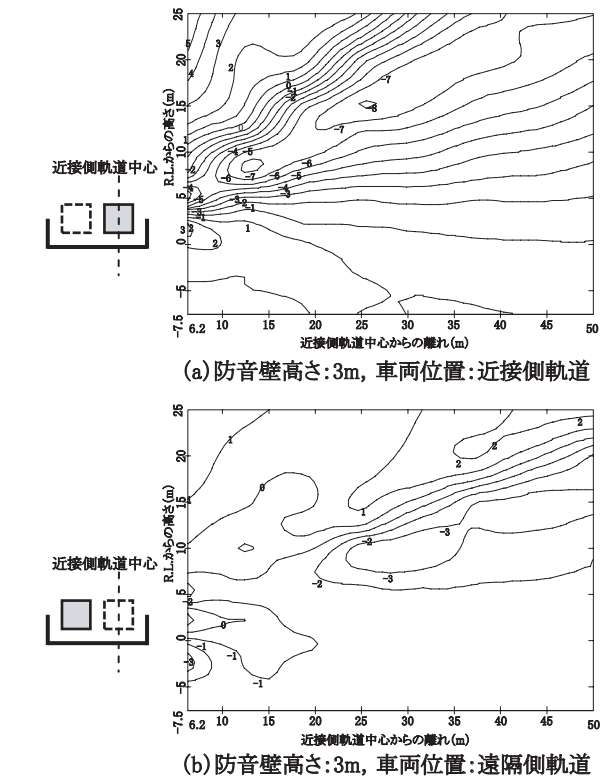


図6 従来予測手法による計算値と模型実験による実測値の騒音レベル差の分布 (寸法は実車換算)

φも最大で70°程度に収まるため、近接側軌道の条件に比べると、実験値と計算値との乖離は小さい。

なお、レールレベルより低い領域(盛土・高架橋区間において地上高さ1.2m点に相当する領域)では、防音壁高さ、車両位置によらず、実測値と計算値はよく一致している。

4. 予測手法の改良

第3章での検討により、高所空間での予測精度を向上させるには、音源の鉛直方向の指向特性や車両、防音壁での反射の影響を考慮する必要があることが明らかになった。そこで、本章ではこれらの影響を考慮して従来の予測手法を改良することを検討した。ここで検討する対象は車両下部騒音のみであり、その他の音源については、従来の予測手法をそのまま用いる。なお、以下の検討では、新幹線騒音予測手法⁴⁾を例に挙げるが、同様の考え方を行えば、在来鉄道騒音の予測手法にも転用が可能である。

4.1 音源モデル

(1) 音源種別

防音壁や車両による反射を考慮するため、図7に示す3つの音源を考える。

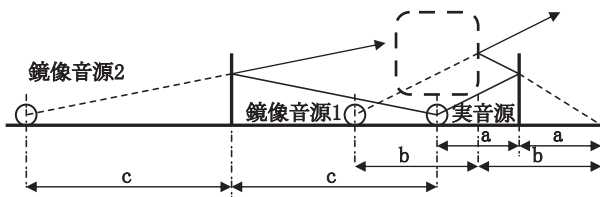


図7 実音源、鏡像音源1、2の位置

- ① 実音源：実際の騒音発生源に相当する音源
- ② 鏡像音源1：観測点側の防音壁と車両に1回ずつ反射して観測点側防音壁と車両の間から漏れてくる音
- ③ 鏡像音源2：観測点と逆側の防音壁で反射して車両を乗り越えて伝搬してくる音

(2) 指向特性

第2章での考察にしたがい、車両下部騒音の鉛直方向の指向特性は、音の放射方向（車両断面への投影）の水平面からの仰角を ϕ として、 $D(\phi) = 0.1 + 0.9\cos\phi$ とする。なお、観測点から音源を見通すことができる場合は、 ϕ を観測点と音源を結ぶ直線と水平面のなす角とするが、音源が防音壁によって遮蔽される場合には、 ϕ は防音壁上端と音源を結ぶ直線と水平面のなす角とする。

(3) パワーレベル

実音源については従来の予測手法で示されているパワーレベルと同等とする。鏡像音源1、2については、防音壁あるいは車両において完全反射するのであれば実音源と同じ値となるが、この音源モデルにおいて鏡像音源1、2を実音源と同じパワーレベルとすると、後で行う第3章で実施した模型実験結果との比較において、反射音を過大に評価することがわかった。そこで、ここでは模型実験結果と合うように、実音源のパワーレベルから2dBを減じた値を鏡像音源1、2のパワーレベルとする。

4.2 伝搬モデル

各音源からの騒音の伝搬式は、従来の予測手法の式（点音源あるいは線音源からの伝搬式に防音壁による回折補正項 ΔL_{dif} を加えたもの）に、鉛直方向の指向特性を表す補正項 $\Delta L_D = 10\log[D(\phi)]$ [dB] を加えた式を用いる。ただし、鏡像音源1、2については、反射面である防音壁あるいは車両の大きさが有限であることから、図8に示すような防音壁高さあるいは車両高さに等しい幅のスリットを設けて、スリット回折による補正項 $\Delta L_{dif,slit}$ を加える（スリット回折の計算方法は ASJ RTN-Model 2003⁵⁾ を参照）。また、鏡像音源2については車両による回折減衰を考慮する。

防音壁による回折補正項 ΔL_{dif} は、従来予測手法と同様の方法で求める。ただし、従来予測手法では、車両が近接側軌道を通り、かつ防音壁に吸音材が貼り付けない場合には、多重反射音の影響により防音壁の効果

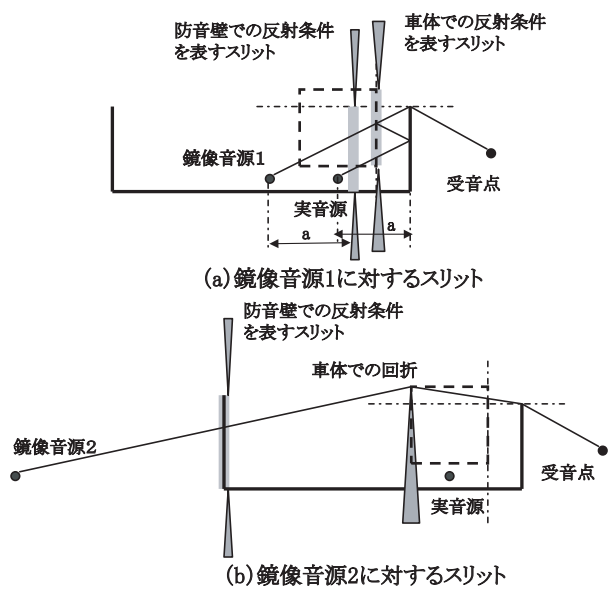


図8 スリット法での音の伝搬経路

を2dB減じるとしているが、改良した予測手法では多重反射音等の影響は鏡像音源1を設置することで考慮されているので、この補正は行わない。

防音壁に設置した吸音材の効果は、鏡像音源1、2のパワーレベルを減じることによって考慮する。防音壁に吸音材（対象音源の周波数スペクトルに対する吸音率 α ）が設置されている場合、パワーレベルに $10\log[1-\alpha]$ [dB] を加える（吸音材が壁の一部にのみ貼り付けてある場合は α として貼付面積率を α に乗じた値を用いる）。ただし、近接側軌道を通り、鏡像音源1は多重反射音を代表している音源であり、1回反射分に相当する以上に減衰すると考えられるため、パワーレベルに $20\log[1-\alpha]$ [dB]（2回反射に相当分）を加える。

5. 改良した予測手法の検証

第4章で提案したモデルの検証を行うため、第3章で行った模型実験結果と提案した予測手法による計算結果を比較する。図9に防音壁高さが3m、車両位置が近接側軌道の条件での予測手法による沿線騒音レベル分布を示す。軌道に近接した高所空間や車両側面から防音壁上端を通過して斜め上方に向かう領域における騒音レベル分布の傾向は、図5(a)に示した模型実験結果の傾向と良く一致している。図10に各防音壁高さ、車両位置条件における計算値と実測値のレベル差の分布を示す。防音壁高さが3m、車両位置が近接側軌道の条件では、軌道近接高所空間では最大で5dB程度あった差がほぼ1dB以内に、多重反射音の影響が大きい領域においては最大8dB程度あった差が3dB程度に収まっている。また、従来の方法において実験値と予測値がほぼ一致していた地上高さ

特集：環境技術

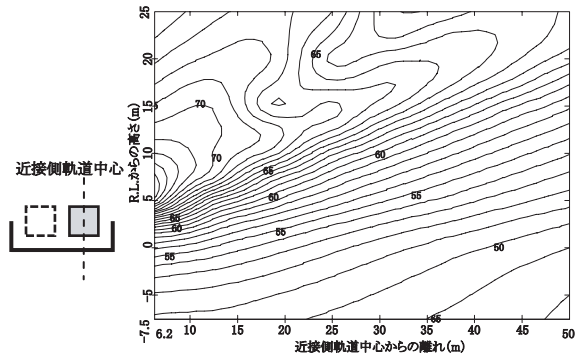
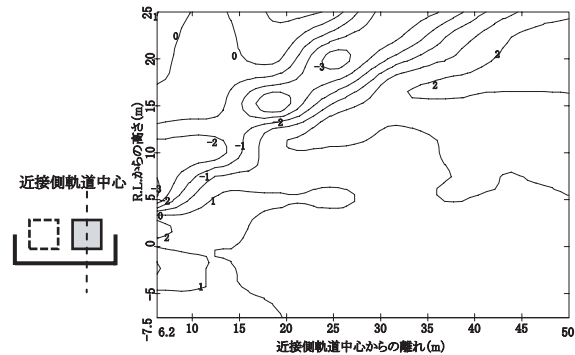
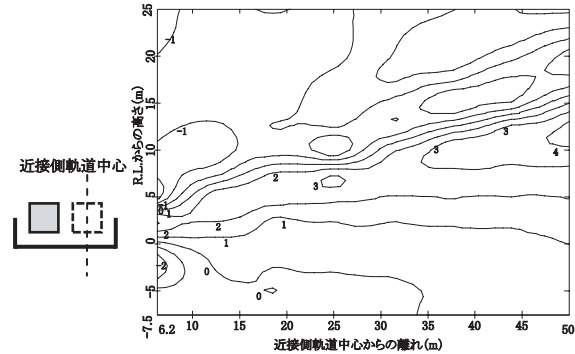


図9 改良した予測手法による騒音レベル分布計算値 (防音壁高さ:3m, 車両位置:近接側軌道, 寸法は実車換算)



(a) 防音壁高さ:3m, 車両位置:近接側軌道



(b) 防音壁高さ:3m, 車両位置:遠隔側軌道

図10 改良後の予測手法による計算値と模型実験による実測値の騒音レベル差の分布 (寸法は実車換算)

1.2m点に対応する領域においては、改良後の予測手法においても計算値と実測値はよく一致している。ここには示していないが、防音壁高さが2mの場合もほぼ同様の傾向である。

遠隔側軌道の条件でも軌道近接高所空間では改善されており、地上高さ1.2m点に対応する領域においても精度の悪化は見られない。ただし、防音壁上端から斜め上方

に向かった領域においては細い帯状に予測値が実測値を上回る領域が存在する。遠隔側軌道の条件では、模型実験では多重反射音の影響は小さいが、予測計算上は鏡像音源1が第4.2節で述べたスリット(図8(a)参照)を通して見通すことができるために、この領域で鏡像音源1の影響が過大に評価されたためと考えられる。

以上の検討結果から、第4章で提案した予測手法により、従来手法で精度が検証されている地上高さ1.2m点に対応する領域での精度を悪化させることなく、高所空間において精度良く騒音レベルを予測すること可能になったといえる。

なお、本研究では防音壁への吸音材の効果については未検証であるため、今後、検証のための模型実験等を実施する予定である。

6. まとめ

高所空間における騒音予測精度の向上を目的に、鉄道騒音の音源の鉛直方向の指向特性について、現車試験と模型実験によって調査し、転動音等、車両下部から発生する騒音の指向特性を表す実験式を導出した。次に模型実験により防音壁がある場合の車両下部騒音のレベル分布を求め、従来の予測手法による計算値と比較し、軌道に近接した高所空間や車両側面から防音壁上端を通して斜め上方に向かう領域において、予測手法による計算値と模型実験による実測値に乖離が見られることを示した。これらの結果をもとに、音源の指向特性や車両、防音壁での音の反射を考慮した騒音予測手法を提案した。提案した予測手法による騒音レベル分布は、高所空間を含めた広い領域において模型実験値とよく一致しており、手法の妥当性が確認された。

文献

- 1) 石井聖光ほか：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, Vol.4, No.2, 1980
- 2) 森藤良夫ほか：在来鉄道騒音の予測評価手法について、騒音制御, Vol.20, No.3, 1996
- 3) 安部由布子ほか：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委員会資料, N-2004-01, 2004
- 4) 長倉清ほか：新幹線騒音の予測手法について、日本音響学会騒音振動研究委員会資料, N-2000-01, 2000
- 5) 道路交通騒音の予測モデル"ASJ RTN-Model 2003", 日本音響学会誌 60巻4号, 2004