

車両音源分布を用いた沿線騒音の評価手法

山崎 展博* 長倉 清** 北川 敏樹*
宇田 東樹* 若林 雄介***

Estimation of Wayside Noise of Shinkansen train based on Noise Source Distribution

Nobuhiro YAMAZAKI Kiyoshi NAGAKURA Toshiki KITAGAWA
Toki UDA Yusuke WAKABAYASHI

A method to estimate the noise level along the wayside of Shinakansen is proposed based on two-dimensional sound pressure level distribution measured with a 2 dimensional microphone array. First, noise sources distributed around the train are modeled as discrete point sound sources. Second, the noise level at the point 25 m apart from the track center is estimated by considering the effect of the acoustic barrier and the difference in the lower region noise due to the track conditions. The estimated results are validated by comparison with the results measured by a usual omni-directional microphone in the field test.

キーワード：沿線騒音，マイクロホンアレイ，新幹線，騒音予測

1. はじめに

新幹線から発生する騒音は大きな沿線環境問題であり，その低減が強く求められている。新幹線の車両から発生する騒音は主として(1)パンタグラフ空力音，(2)車両上部空力音，(3)構造物音，(4)車両下部から発生する騒音(以下，車両下部音)から構成されている。これに対し現在営業線で走行している新幹線には様々な騒音低減対策が施されている。しかし，今後の高速化に伴い，更なる騒音低減手法の開発を効率的に進めるためには，騒音の発生源やその強さを把握することに加え，新幹線の標準的な構造である防音壁の設置されている高架橋区間(以下，防音壁区間)で，近接軌道から25m離れた地上1.2m高さにおける評価地点での影響を評価することが重要となる。

防音壁区間における新幹線騒音の音源別寄与度を評価する手法として，長倉らは防音壁区間で一次元状に配列したマイクロホンアレイ(以下，一次元アレイ装置)によって得られた音圧レベル分布の情報等をもとにした手法を提案している¹⁾。ここで用いられているマイクロホンアレイは，新幹線車両まわりの特定の領域(以下，照準点)から伝播する音を選択的に取得し，部位毎の音源強さを把握するものである。ただし，従来法においては音圧レベル分布の情報が一次元であるため，車両下部音と集電部騒音といった上下方向の分離が直接行えない。

* 環境工学研究部 騒音解析研究室
** 環境工学研究部
*** 東日本旅客鉄道株式会社

一方沿線における新幹線騒音の評価は，一般に防音壁区間で行われる。このため新幹線騒音の評価は音源の強さのみならず，防音壁の遮蔽効果等を考慮する必要がある。

そこで本研究では，二次元マイクロホンアレイ(以下，二次元アレイ装置)により得られた新幹線車両まわりの，鉛直方向ならびにレール方向からなる二次元音圧レベル分布をもとに車両各部位の音源強さを測定し，防音壁等の影響を補正したうえで，防音壁区間における騒音への寄与度を推定する手法を提案する。

2. 二次元音圧レベル分布による騒音推定手法

2.1 推定手順の概要

今回提案する防音壁区間における音源別寄与度の推定手順を図1に示す。本手法では，防音壁の無い軌道側方の開放区間および防音壁が設置されている防音壁区間で得られた騒音測定結果を用いる(図2)。Step 1では防音壁の無い開放区間に設置した二次元アレイ装置を用いて，車体側部に設定したレール方向および鉛直方向からなる解析平面上での二次元音圧レベル分布を計算する。ここで，従来法¹⁾で使用しているアレイ装置の照準点は正面に限られているが，本研究では列車の移動に応じて照準点を時々刻々追尾させる。Step 2では音源要素を列車上に分布させた音源として定義し，集電系，車両下部および車両上部に離散的に配置する。これらの音源要素の音圧レベルをStep 1で得られた結果に基づき計算する。

Step 3では防音壁区間での防音壁による遮蔽効果および開放区間と防音壁区間での車両下部音の違いによる影

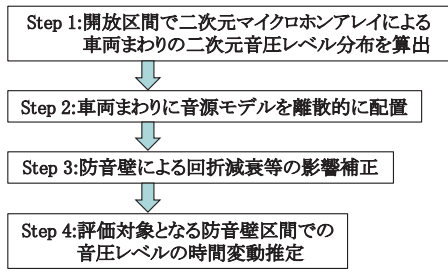


図1 騒音レベルの推定手順

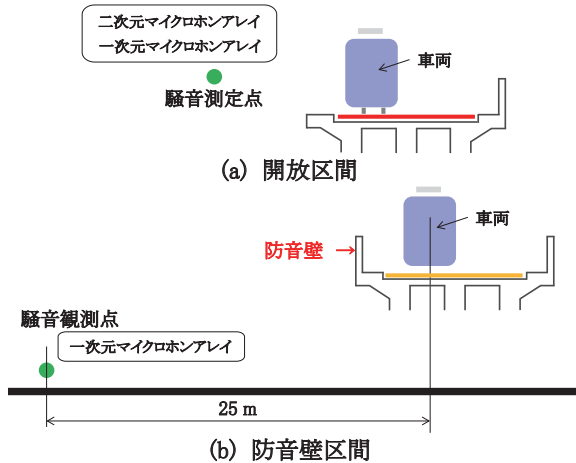


図2 騒音測定地点の模式図

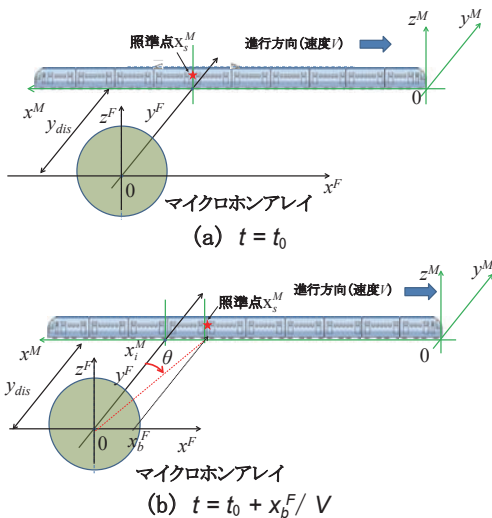


図3 移動音源を対象としたビームフォーミング処理

響を、現地試験で一次元アレイ装置により得られた一次元音圧レベル分布をもとに補正する。Step 4では測定点前での音源要素の移動を考慮することで、防音壁区間での音圧レベルの時間変化を算出する。

2.2 二次元音圧レベル分布の算出

Step 1において、地上に設置された二次元アレイ装置と移動する車両との位置関係を図3に示す。二次元アレイ装置の中心を原点とする固定座標系と、先頭車両の先端部を原点とする移動座標系をそれぞれ $x^F(x^F, y^F, z^F)$ と

$x^M(x^M, y^M, z^M)$ とする。また解析平面は車体側面を含む $x^M - z^M$ 平面に設定する。時刻 t において照準点 $x_s^M = (x_s^M, y_s^M, z_s^M)$ から放射される音波の音圧 p_d は、従来用いられているビームフォーミング法²⁾により式(1)で表される。

$$p_d(x_s^M, t) = \frac{1}{N} \sum_m p_m(t + \frac{r_m(t)}{c}) r_m(t) / r_0 \quad (1)$$

$$r_m(x_s^M, t) = \sqrt{(x_b^F - x_m)^2 + y_{dis}^2 + (z_s^M - z_m)^2} \quad (2)$$

$$t = t_0 + x_b^F / V \quad (3)$$

ここで、 x_m, z_m は m 番目のマイクロホンの固定座標系における x 軸および z 軸座標、 V は列車速度 [m/s]、 p_m は m 番目のマイクロホンで検出される音圧 [Pa] である。また N はマイクロホンの総数、 c は音速 (340 m/s)、 r_0 は基準距離 (1m) である。 r_m は照準点から m 番目のマイクまでの距離で式(2)により与えられる。時刻 t については、照準点が $x^F = 0$ に到達する時刻 t_0 および照準点の x^F 軸座標である x_b^F を用いて式(3)により定義する。式(1)から短時間FFTにより算出される指向性音圧レベル

$$L_0 = 10 \log_{10} \left(\frac{p_d^2}{p_0^2} \right), \quad (p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ [Pa]})$$

は、照準点 x_s^M から放射される音波の 1m 離れにおける音圧レベルとみなすことができる。列車の移動に伴い固定座標系における照準点の位置も変化するため、指向性音圧レベルは時間 t の関数となる。マイクロホンアレイ平面と平行に列車が一定速度 V で移動する場合には、 $x^F - y^F$ 平面内で、 y^F 軸がマイクロホンアレイ中心と照準点を結ぶ線との成す角 $\theta(t)$ [°] は式(4)ようになる。

$$\theta(t) \approx \tan^{-1}(x_b^F / y_{dis}) = \tan^{-1}(V(t - t_0) / y_{dis}) \quad (4)$$

以下 $\theta(t)$ について変数 t の記載を省略する。指向性音圧レベル L_0 は時間 t (あるいは θ) の関数となり、列車の移動に伴う音源の時間変化を Step 4 で実施する観測点での音圧レベルの計算に反映させる。

2.3 音源モデル

Step 1 で得られた二次元音圧レベル分布をもとに、ビームフォーミング処理で得られた一定範囲の格子点を

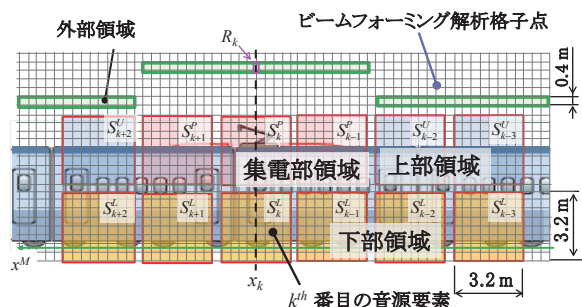


図4 車両まわりでの音源要素配置

含む領域として音源要素 S_k ($k = 1, 2, \dots$) を定義する。ビームフォーミングの解析平面上での音源要素の配列を図4に示す。本研究では音源要素 S_k を上部領域、集電部領域および下部領域の三領域に分類(上付き添え字 U, P, L で記載)することで、各領域の音源寄与度を分離する。なお本推定手法では開放区間での測定結果にもとづき各音源領域の音を推定するため、下部領域音に対する構造物音の影響はほとんど無視できると考えられる。

マイクロホン間隔に比べて波長が短くなる高周波数領域では、後述する音源領域内で指向性音圧レベルを積分する過程で、サイドローブの影響により大きな誤差が生じる。今回の手法では車体外部の領域での指向性音圧レベルを各音源領域内に含まれる指向性音圧レベルから引くことでこの影響の低減を図る(以下、外部領域補正)。特に新幹線騒音のようにレール方向に対して音源が広範囲に分布している場合、外部領域での指向性音圧レベルはパンタグラフや先頭台車で大きな騒音源の影響で x^M 軸に沿って大きく変化する。このため外部領域補正は x^M 座標に依存した関数とする。外部領域補正を適用した k 番目の音源要素 S_k の音圧レベル $L_E(k, f, \theta)$ は、音圧レベル $L_0(x_s^M, f, \theta)$ ならびに外部領域補正を行った音圧レベル $L_c(x_s^M, f, \theta)$ により式(5)、式(6)で定義される。

$$L_c(x_s^M, f, \theta) = 10 \log_{10} \left[10^{(L_0/10)} - \frac{1}{n} \sum_{x_s^M \in R_k} 10^{(L_0/10)} \right] \quad (5)$$

$$L_E(k, f, \theta) = 10 \log_{10} \left[\sum_{x_s^M \in S_k} 10^{(L_c(x_s^M, f, \theta)/10)} \right] - L_G(f, \theta) \quad (6)$$

ここで f は周波数である。式(5)右辺の括弧内第二項は外部領域補正を示している。外部領域補正項は図4に示す列車外の領域 R_k 内で指向性音圧レベルを平均化して算出した。また式(5)中の右辺の括弧内の数値が負の場合 $L_c = 0$ とする。式(6)中の $L_G(f, \theta)$ は指向性積分値から単一の無指向性マイクロホンによる測定値への換算係数である。ここでは無指向性点音源が音源要素の中心に位置すると仮定した場合の指向特性により算出した結果を適用する。

上部領域音源要素の音圧レベルについては、以下に示す理由から誤差が生じる。近年の新幹線車両では車両間の間隙部を平滑化する等の対策が取られているため、上部領域音に比べて車両下部音が非常に大きい。しかし防音壁区間では車両下部音の寄与は防音壁により小さくなり、上部領域騒音の寄与が相対的に大きくなる。このため防音壁区間における上部領域騒音の寄与度の推定精度は、開放区間における二次元アレイ装置による測定精度に依存する。ここで隣接する下部領域の音源要素 S_k^L と上部領域の音源要素 S_k^U にまたがる鉛直線上での指向性の概念図を図5に示す。空間分解能は低周波数領域に

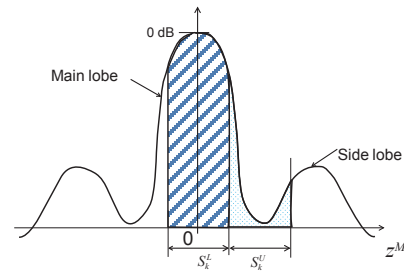


図5 隣接する音源領域と指向特性の関係図

なるほど劣化するため、下部領域の音源要素の音圧レベルが上部領域に比べて非常に大きい場合、メインローブの漏れが上部領域の音源要素の音圧レベルに影響を及ぼし、上部領域音の過大評価につながる。

そこで上部領域に対して以下の補正を行う(上部領域補正)。下部領域音が上部領域音よりも非常に大きい状況で、式(6)により得られる上部領域の k 番目の音源要素の音圧レベル $L_E^U(k, f, \theta)$ は、レール方向に隣接する3つの下部領域での音源要素の音圧レベルから影響を受けていると仮定する。この場合下部領域の影響を除去した音圧レベル $l_E^U(k, f, \theta)$ を式(7)の通り推定する。

$$l_E^U(k, f, \theta) \approx 10 \log \left\{ 10^{(L_E^U(k, f, \theta)/10)} - \sum_{i=1}^3 \alpha_i 10^{(L_E^L(k+i, f, \theta)/10)} \right\} \quad (7)$$

ここで α_i は指向特性の広がりによる、下部領域音源要素内の指向性音圧レベルの積分値と上部領域内での指向性音圧レベルの積分値とのパワーの比である。ここでは下部領域音源要素中心に存在する無指向性点音源を仮定して α_i を計算した。これにより得られた l_E^U を上部領域の音源要素の音圧レベルとして適用する。

2.4 防音壁区間への伝播モデル

Step 3 では防音壁の遮音効果や二次元マイクロホンアレイでの測定を行った開放区間、および音圧レベルの評価対象となる防音壁区間での軌道条件の違いに起因する下部領域音の変化に対する補正を行う。観測点での音圧レベルの時間波形 $L^R(f, t)$ は、 k 番目の音源要素の中心から単位距離離れた位置での音圧レベルとみなされる L_E を用いて式(8)~(10)で表わされる。

集電部領域

$$L^R(f, t) = 10 \log_{10} \left\{ \sum_k 10^{(L_E^L(k, f, \theta)/10)} / \left[R^2 + (x_b^F)^2 \right] \right\} \quad (8)$$

上部領域

$$L^R(f, t) = 10 \log_{10} \left\{ \sum_k 10^{(l_E^U(k, f, \theta)/10)} / \left[R^2 + (x_b^F)^2 \right] \right\} \quad (9)$$

特集：環境工学

下部領域

$$L^R(f, t) = 10 \log_{10} \left\{ \sum_k 10^{\left(\frac{L^R(k, f, \theta)}{10} \right)} / \left[R^2 + (x_b^F)^2 \right] \right\} - \Delta L_d - \Delta L_s \quad (10)$$

$(-\theta_L < \theta < \theta_L)$

ここで R はマイクロホンアレイ平面から観測点までの y 軸方向距離である。音圧レベル L^R が定義された各音源領域が速度 V で移動する場合の時間変化を、音源要素の音圧レベル自体の時間変化を考慮したうえで算出した。 θ_L はこの際の音源要素の移動範囲を表す。

ΔL_d は防音壁による遮蔽効果、 ΔL_s は開放区間と防音壁区間での下部領域騒音の差に対する補正值である。本手法ではこれらの補正值の和 $\Delta L_c (= \Delta L_d + \Delta L_s$: 以下、観測点間補正值) を現地試験での実測値により求めることとする。開放区間および防音壁区間で一次元アレイ装置より測定された一次元音圧レベル分布の測定例を図6に示す。先頭車両通過時に生じるピークが主として下部領域騒音によるものと仮定すると、これら2つのピークの音圧レベルの差は軌道条件補正值と以下のように関連づけられる。

$$\Delta L_c(x, f) = L_N^A(x, f) - L_N^B(x, f) + 20 \log_{10}(r_A / r_B) \quad (11)$$

ここで、 r_A と r_B はそれぞれ開放区間での解析平面からアレイ装置、ならびに防音壁区間における軌道中心からアレイ装置までの距離である。また L_N^A および L_N^B はそれぞれ開放区間および防音壁区間で一次元アレイ装置によって得られた先頭車両部でのピーク音圧レベルである。この軌道条件補正值を下部領域音源要素の音圧レベルに適用する。

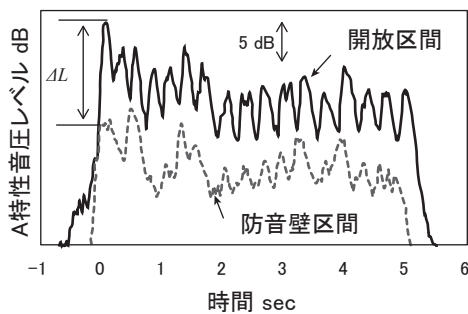


図6 開放区間および防音壁区間における一次元音圧レベル分布の測定例

3. 提案手法の妥当性検証

3.1 現地試験の概要

本推定手法の妥当性を検証するため、現地試験で得られた騒音測定結果との比較を行った。開放区間（バラスト軌道）と防音壁区間（スラブ軌道）での測定概要を図

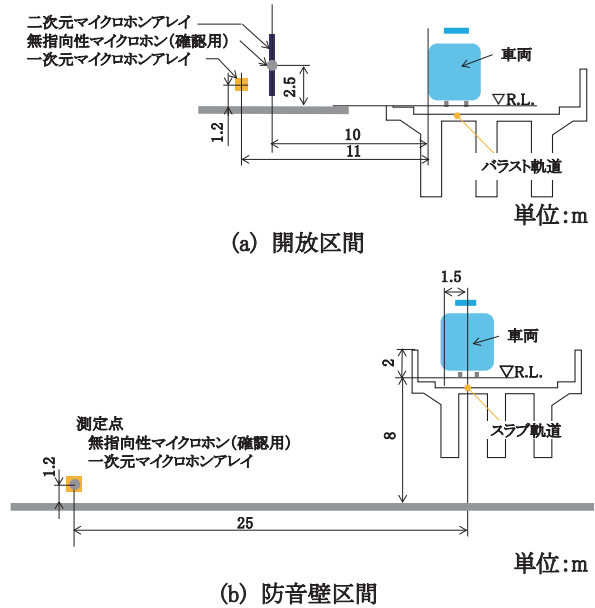


図7 現地試験での軌道とアレイ装置の位置関係

表1 各音源要素の音圧レベルの設定条件

| [上部領域, 集電部領域] | | |
|---------------|---|---|
| 移動範囲 | $-61^\circ \leq \theta \leq 61^\circ$ ($-18 \text{ m} \leq x^F \leq 18 \text{ m}$) | $61^\circ < \theta < 67^\circ$ ($18 \text{ m} < x^F < 24 \text{ m}$) |
| 上部領域 | $L_E^U(k, f, \theta)$ | $L_E^U(k, f, 61^\circ)$ |
| 集電部領域 | $L_E^P(k, f, \theta)$ | $L_E^P(k, f, 61^\circ)$ |
| [下部領域] | | |
| 移動範囲 | $-31^\circ \leq \theta \leq 31^\circ$ ($-6 \text{ m} \leq x^F \leq 6 \text{ m}$) | $31^\circ < \theta < 67^\circ$ ($6 \text{ m} < x^F < 24 \text{ m}$) |
| 下部領域 | $L_E^L(k, f, \theta)$ | $L_E^L(k, f, 31^\circ)$ |

7に示す。開放区間では沿線に二次元および一次元アレイ装置、また参照用の無指向性マイクロホンを設置した。防音壁区間では、一次元アレイ装置と参照用の無指向性マイクロホンを近接軌道中心から水平方向に25m離れた地上1.2m高さの位置に設置した。ビームフォーミング処理での短時間FFT分析におけるサンプリング周波数は16384 Hz、周波数分解能は32 Hzである。音源領域の大きさはビームフォーミング解析平面内における9点×9点(3.2 m×3.2 m)の正方形領域とした。下部領域の z^M 軸上範囲はR.L.-0.5 m～R.L.+2.7 m、上部領域および集電部領域はR.L.+3.1 m～R.L.+6.3 mである。また式(8)中の θ_L は 67° とした。ただし θ が大きくなるに従い、①空間分解能が劣化すること、②今回測定を行った開放区間では防音壁の未設置区間が $-8.5 \text{ m} < x^F < 8.5 \text{ m}$ の範囲に限定されていることから、各音源領域の音源要素の音圧レベルの値を表1に示す通りとした。音圧レベルの時間変化を算出する際の時定数は35msとした。

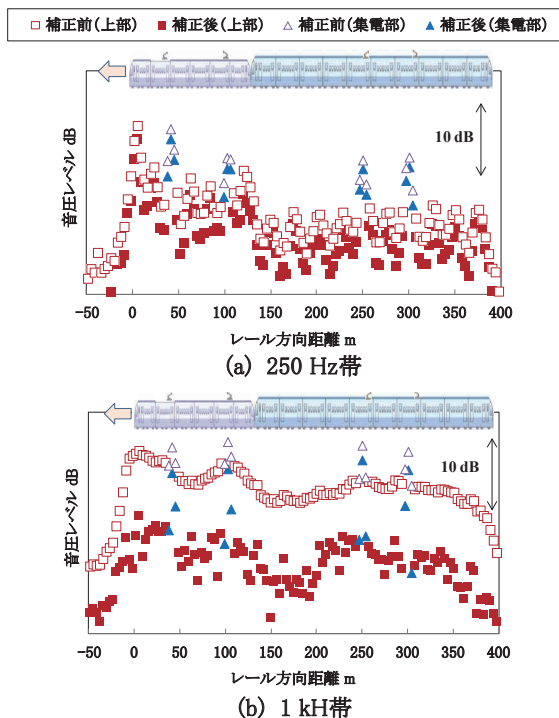


図8 音源領域の音圧レベルに与える外部領域補正の影響

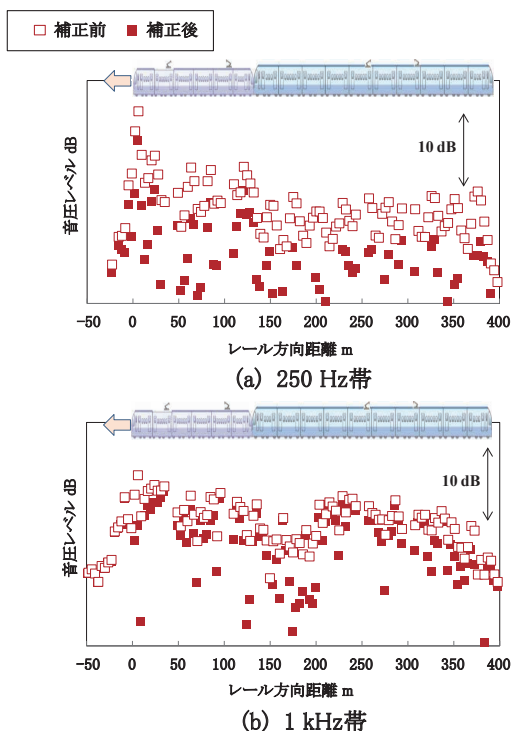


図9 上部領域の音圧レベルに与える上部領域補正の影響

表2 観測点間補正值 [dB]

| 周波数帯 Hz | 250 | 500 | 1k | 2k |
|--------------|-----|-----|-----|------|
| ΔL_c | 5.4 | 9.1 | 7.8 | 13.2 |

3.2 各音源要素の音圧レベル特性

上部領域ならびに集電部領域の音源要素の音圧レベルに対して外部領域補正を行った影響を図8に示す。なお、音源要素の音圧レベルのレール方向分布を示す図8～10では、領域間の大小関係をわかりやすくするため、 $-30^\circ < \theta < 30^\circ$ のパワー平均値をプロットする。また、図中に示す1点が図4に示す一音源要素の音圧レベルに対応する。高周波数領域(1kHz帯)では外部領域補正により上部領域音が大幅に低減しており、上部領域と集電部領域の違いが明瞭に現れている。

上部領域補正を行った影響を図9に示す。メインローブの幅が比較的広い250Hz帯では、補正を行うことにより上部領域の音源要素の音圧レベルが小さくなり、補正の影響が現れていることが確認できる。一方メインローブの幅が小さくなる高周波数域(1kHz帯)での影響は小さい。

式(11)により算出した観測点間補正值 ΔL_c を表2に示す。防音壁による回折減衰効果は一般的に周波数に対して単調に増加すると考えられるが、1kHz帯での補正值は500Hz帯での補正值に比べて小さくなっている。これは軌道条件の差異に起因する車両下部音の変化の影響と考えられる。

外部領域補正および上部領域補正を適用した各音源領域の音源要素の音圧レベルを図10に示す。今回解析する車両の場合、下部領域と集電部領域の音源要素の音圧レベルが上部領域に比べて非常に大きいこと、下部領域の音源要素の数が集電部領域に比べて多いことが示されている。

3.3 音源寄与度の分析結果

Step 1 および Step 2 の妥当性を検証するため、開放区間における無指向性マイクロホンでの実測音圧レベルと推定値を比較する。この地点では補正值 $\Delta L_d = 0$ とみなす。推定音圧レベルと実測値の比較を図11に示す。全体領域に対する推定騒音レベルは誤差が概ね3dBの範囲内で実測値と一致している。また、防音壁が設置されていない状況では、いずれの周波数帯域でも下部領域音が支配的であることが分かる。

防音壁区間での地上25m地点における無指向性マイクロホンでの実測音圧レベルと推定値の比較を図12に示す。250Hz～1kHz帯における推定値と実測値の差は2dB程度であり、両者はよく一致している。なお、本推定手法での下部領域音には構造物音の影響が含まれていないが、構造物音の周波数分布は一般に他の音源よりも低周波数域に偏っているため、今回対象とした250Hz以上の周波数域では地上25m地点での構造物音の影響は小さいと考えられる。また、音源別寄与度の内訳から、今回解析対象とした車両の場合、防音壁区間におい

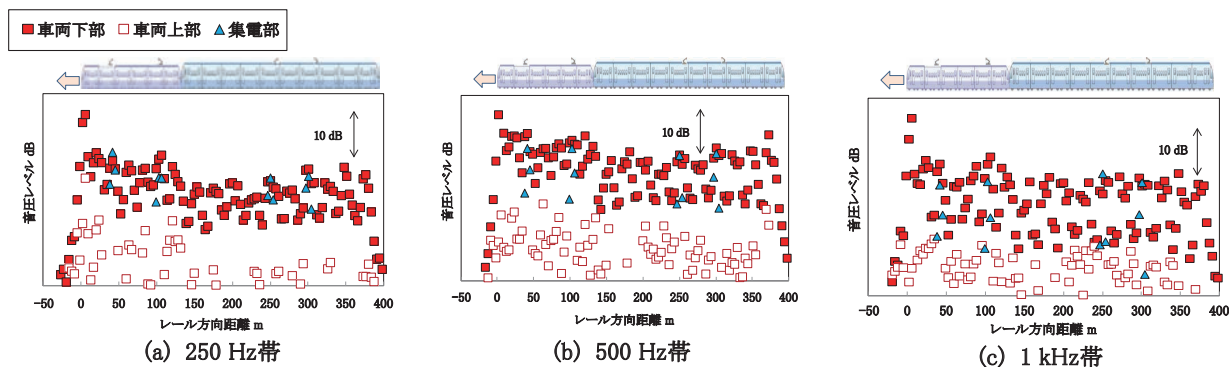


図 10 各音源領域の音圧レベル分布

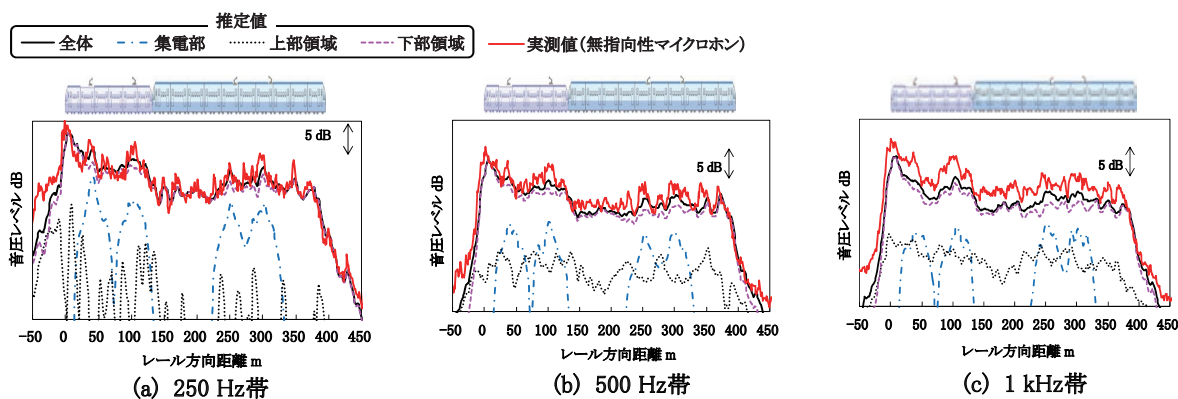


図 11 開放区間における車両部位別音源寄与度（時定数 35ms）

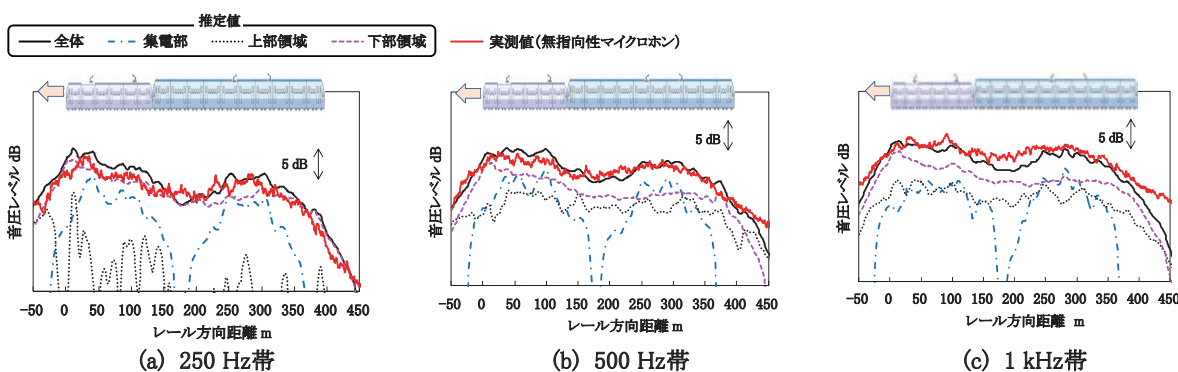


図 12 防音壁区間における車両部位別音源寄与度（時定数 35ms）

ても 250Hz 帯 ~ 1kHz 帯にかけては下部領域から発生する騒音の寄与が支配的である。この要因として、文献(1)での報告内容や、図 10 で示した各音源領域の音源要素の音圧レベルの分布傾向から、下部領域から発生する騒音のレベルが上部領域音に比べて大きいこと、また集電部領域に比べて広範囲に分布しているためと考えられる。

4. まとめ

本研究では、新幹線軌道沿線でのマイクロホンアレイで得られた二次音圧レベル分布に基づき、一般的な騒音測定点（防音壁区間）での音圧レベルの推定手法を提案した。車両上の離散的な音源要素を定量的にモデル

化し、騒音観測点前を通過する音圧レベルの時間変化を算出した。また防音壁による回折減衰や軌道条件が異なる場合に生じる下部領域からの騒音変化を補正した。防音壁区間点の推定騒音レベルと現地試験結果との比較から、本推定手法が誤差 3dB の範囲内でよく一致することが明らかとなった。また、集電部、上部領域および下部領域といった車両周りの音源の寄与度を明らかにした。

文献

- 1) 長倉清：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
- 2) 高野靖：2次元マイクロホンアレイによる高速車両の音源位置識別，騒音制御，Vol.22, No.1, pp.14-16, 1998