

# 小型スピーカと音響粒子速度センサを用いた 車内騒音寄与度解析手法

朝比奈 峰之\* 山本 克也\* 後藤 友伯\*

An Analytical Method of Noise Contribution Ratio in a Railway Vehicle Using a Small Speaker  
and an Acoustic Particle Velocity Sensor

Mineyuki ASAHINA Katsuya YAMAMOTO Tomonori GOTO

To apply a noise reduction countermeasure properly in a railway vehicle, it is significant to clarify the contribution ratio from each noise generation site at a noise evaluation position. The acoustic characteristics at the evaluation position in enclosed space can be represented as the product of acoustic particle velocity near the noise source and the acoustic transfer function between the noise source and the evaluation position. Therefore, the authors have been developed a new analytical method to estimate the acoustic characteristics at an arbitrary evaluation position in the space and noise contribution ratio using an acoustic particle velocity sensor and a small loudspeaker. This paper describes the outline of the method and verification results in stationary test vehicle excitation test.

キーワード：車内騒音，寄与度，音響粒子速度，伝達関数

## 1. はじめに

鉄道車両の車内における乗客の快適性を向上させるため、車内騒音をさらに低減することが求められている。鉄道車両の車内騒音は、台車や車体で発生した騒音や振動が振動として伝搬（固体伝搬音）もしくは車体構体を透過（透過音）することにより、客室内で音として放射される。これらの騒音源から車内騒音に至る伝搬経路は複雑であることから、車内騒音の低減対策を効果的に施工するには、まず床板、側パネル、天井パネルなど（以下、まとめて「内装パネル」という）の各部位からの放射音が車内騒音評価点（受音点）に対して、どのくらいの寄与があるか（寄与度）を把握することが重要である。

鉄道車両の車内騒音の寄与度解析はこれまで多く行われているが<sup>1) 2)</sup>、近年はその手法までを詳述している文献は国内では少ない。これらの解析の中では、加速度センサ等で測定した内装パネルの振動と受音点の音圧への伝搬特性から算出する手法や、詳細な内装振動データを用いた境界要素法などによる音響の数値解析が活用されていると推察される。しかし、前者では内装パネルの振動および放射音と受音点の音響特性を十分に関連付けることが必要であり、後者の数値解析では解析に大きな労力を要することが課題である。

そこで筆者らは、近年実用化された音響粒子速度センサを用いて、走行状態における内装パネル近傍の音響粒

子速度を直接測定し、さらに定置において小型スピーカから発する音により内装パネルと受音点間における音響系の伝達関数を算出し、それらを組み合わせることで、簡易な手順で車内騒音の寄与度を求める解析手法を考案した。本稿では、本手法の概要と定置加振試験における試験車両内での検証試験の結果について報告する。

## 2. 寄与度解析手法の概要

### 2.1 基礎理論<sup>3) 4)</sup>

まず、図1に示す、鉄道車両の客室内のような壁面で囲われた空間について考える。この壁面が振動し対象空間内に音を放射している場合、周波数領域では、壁面（音源）からの放射音は、図1および式(1)に示す通り、音

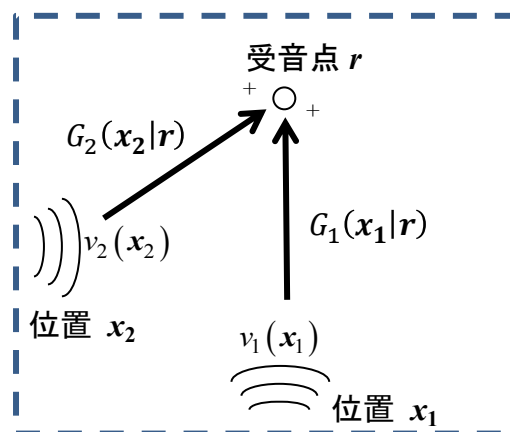


図1 ある対象空間における音源からの放射音

\* 車両構造技術研究部 車両振動研究室

特集：車両技術

源表面位置の音響粒子速度と対象空間の音響伝搬特性である伝達関数の積を音源の表面積の領域で積分することで得られる<sup>5)</sup>。

$$p(\mathbf{r}) = j\omega\rho_0 \int_{S_0} G(\mathbf{x}|\mathbf{r})v(\mathbf{x})dS \quad (1)$$

ここで、 $p(\mathbf{r})$  は対象空間の位置  $\mathbf{r}$  (受音点) における音圧、 $S_0$  は音源の表面の領域、 $G(\mathbf{x}|\mathbf{r})$  はグリーン関数で音源表面位置  $\mathbf{x}$  から受音点位置  $\mathbf{r}$  に至る伝達関数に相当、 $v(\mathbf{x})$  は音源表面位置  $\mathbf{x}$  における音響粒子速度、 $dS$  は音源の微小面積、 $j$  は虚数単位、 $\omega$  は角周波数、 $\rho_0$  は媒質密度である。式 (1) より、受音点における音圧は、

- ①音源表面の音響粒子速度  $v(\mathbf{x})$  を測定 (走行状態で測定するが、今回については定置での加振状態で測定)
  - ②①の測定点と受音点間の伝達関数  $G(\mathbf{x}|\mathbf{r})$  を算出 (定置状態で音響粒子速度および音圧を測定し算出)
  - ③①と②の積を音源の表面積の領域において積分
- の3つの手順によって得られることがわかる。

2.2 音響粒子速度の測定

これまで、音響粒子速度を求める際には、音源表面に加速度センサを取り付け、得られた加速度を積分して速度に変換するなどの方法を用いていた。近年、図2に示すような、音響エネルギーによる空気の振動を熱線流速計と同じ原理で捉えることにより、音響粒子速度を直接測定できる音響粒子速度センサ (Microflown 社、オランダ) が実用化された<sup>6) 7)</sup>。この音響粒子速度センサは、前後方向に感度が高い8の字型の指向性を持つことから、周囲の音の影響を受けにくく、測定位置の音響粒子速度を精度よく測定できる利点がある。本手法では、この音響粒子速度センサにより、音源表面全体にわたって各位置の音響粒子速度を順次センサを移動して測定する。このとき、各測定点の音響粒子速度の位相差を考慮し、音響粒子速度を複素ベクトルとして求める。



図2 音響粒子速度センサ

2.3 伝達関数の算出

次に、測定点と受音点の伝達関数は、音源表面位置の微小領域における音響粒子速度に対する受音点の音響伝搬特性を表す周波数応答関数として求めることができ

る。実際の騒音発生状態では音源全体が振動するため、このような微小領域のみの音響粒子速度に対する特性を測定することは容易ではない。これまでは、音響特性の相反定理を利用し、受音点にスピーカなどを設置し、そこからの放射音による音源表面位置での音響粒子速度や音圧を測定することで伝達関数を求める手法が提案されている<sup>8)</sup>。本手法では小型で薄型のスピーカを音源表面に設置し、音を放射することで音源表面位置から受音点への順方向の伝達関数を取得することとする。2.2節の音響粒子速度を取得した測定点と同一の場所において、伝達関数を複素ベクトルとして算出する。

2.4 受音点における音響特性の推定

受音点における音響特性として音圧を求めることを考える。式 (1) の通り、2.2節の音源表面の音響粒子速度と、2.3節の伝達関数をそれぞれ掛け合わせ、音源表面で積分することにより、受音点における音圧が求められる。一般に、音響粒子速度および伝達関数は離散的に測定されるため、式 (1) は次式に書き直される。

$$p(\mathbf{r}) = j\omega\rho_0 \sum_{n=1}^N G(\mathbf{x}_n|\mathbf{r})v(\mathbf{x}_n)\Delta S(\mathbf{x}_n) \quad (2)$$

なお、 $N$  は音源表面の分割数、 $\Delta S(\mathbf{x}_n)$  は位置  $\mathbf{x}_n$  における微小面積である。ここで、伝達関数  $G(\mathbf{x}_n|\mathbf{r})$  は、以下の通り、記述できる。

$$G(\mathbf{x}_n|\mathbf{r}) = \frac{p'(\mathbf{r})}{v'(\mathbf{x}_n)} \quad (3)$$

$v'(\mathbf{x}_n)$  は小型スピーカから発する音の音響粒子速度、 $p'(\mathbf{r})$  はそのときの受音点における音圧である。すなわち、対象空間の音響伝搬特性が線形である場合、伝達関数を測定する際の小型スピーカから発する音の音響粒子速度は、必ずしも音源表面位置で実測される音響粒子速度と同じである必要はない。

また、式 (2) は各測定位置に対する受音点の音圧が複素ベクトルとして算出され、これらを全て足し合わせた合成ベクトルが受音点の音圧の複素ベクトルであり、その大きさが受音点の音圧であることを示している。なお、受音点の音響特性としては、音圧だけでなく音響インテンシティなどその他の音響特性にも適用可能である。

2.5 寄与度の算出

前述の通り、受音点における音圧は複素ベクトルとして求められる。一方で、受音点における音源の部位別の寄与度はスカラー量であるため、複素数の音圧を用いてスカラー量の寄与度を算出しなければならない。

本稿における寄与度の算出方法に関する概要を図3に示す。これは、ある周波数に着目したときの受音点における音源 1, 2 から伝搬する音の音圧と、受音点での音圧

の複素ベクトルを複素平面上に示したものである。本稿では、受音点における音圧の音源別寄与度は受音点の音圧のベクトルの向きに対する、各音源からの音圧のベクトルの成分比と定義する。式で表すと式(4)の通りである。

$$C_i = \frac{p_i(r) \cos \theta_i}{p(r)} \quad (4)$$

ここで、 $C_i$ は*i*番目の音源の寄与度、 $p(r)$ は受音点の音圧の合成ベクトル、 $p_i(r)$ は*i*番目の音源からの音圧のベクトル、 $\theta_i$ は受音点の音圧のベクトル $p(r)$ と*i*番目の音源からの音圧のベクトル $p_i(r)$ のなす角度である。各音源からの音圧のベクトル $p_i(r)$ は、 $-\pi/2 < \theta_i < \pi/2$ では、受音点の音圧のベクトルを大きくするよう作用するため、「正の寄与度」として $C_i$ は正の値となる。逆に、 $\pi/2 < \theta_i < 3\pi/2$ では、受音点の音圧のベクトルを小さくするよう作用するため「負の寄与度」として $C_i$ は負の値となる。

このように寄与度を正負で表すことで、受音点においてどの音源からの音による打ち消し合い（キャンセレーションメカニズム）が発生しているかを示すことができる。このような音の伝搬状況においては、正負ともに1以上の寄与度が算出されることも想定される。なお、この寄与度の定義では、何らかの対策等によりある部位か

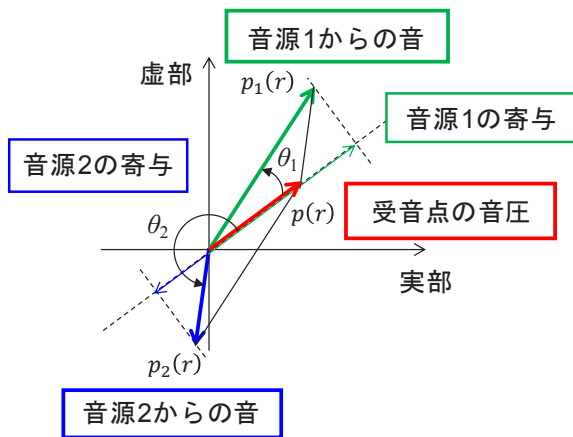


図3 寄与度の算出方法の概要

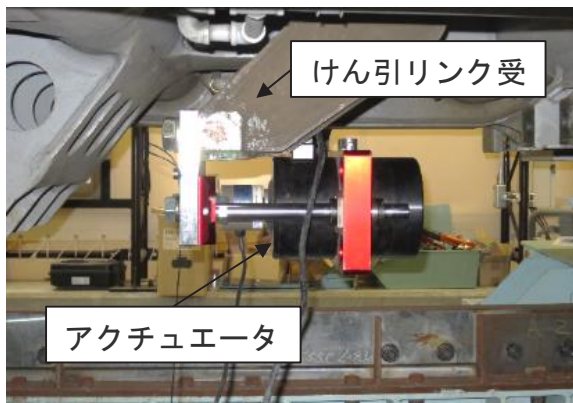


図4 定置加振試験における加振装置

らの発生音が変化すると、受音点の音圧の合成ベクトルも変化するため、各部位からの寄与度 $C_i$ について改めて計算し直す必要がある。

### 3. 定置加振試験における寄与度解析

#### 3.1 試験の概要

本手法を検証するのにあたり、鉄道総研が所有する新幹線型の試験車両に対して、定置において加振試験を実施し、その時に発生する車内騒音を対象に、受音点2か所における音圧特性と寄与度を推定した。

加振源として動電型のアクチュエータ（有限会社旭製作所 SW-1015）を試験車両のけん引リンク受（車体側）に装着しランダム波で前後方向に加振した（図4）。

車内には、図5に示す通り、マイクロホン（騒音計（リオン株式会社 NL-20）を使用）を客室の2列目のマクラギ方向の中央（受音点C）と、車内中央からデッキ部を見て左側の座席（受音点L）の床上1200mm高さの2か所に設置した。音響粒子速度および伝達関数は、Microflow社製の音響粒子速度センサ（PU regular）により、1～3列目の床面、左右の2側面、天井、妻面のそれぞれ9点ずつ合計45点を測定した。床面と天井は各列の左右腰掛部と通路部の3点、左右の側面は各列の

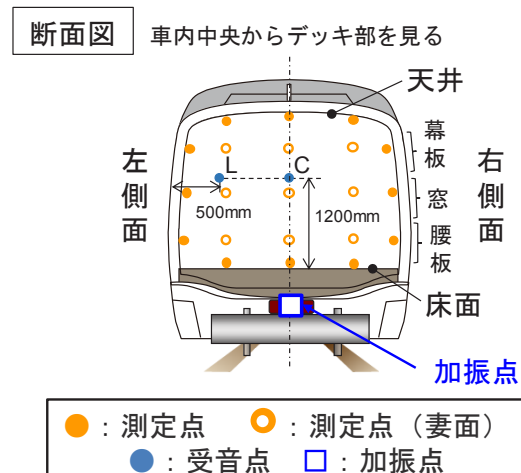
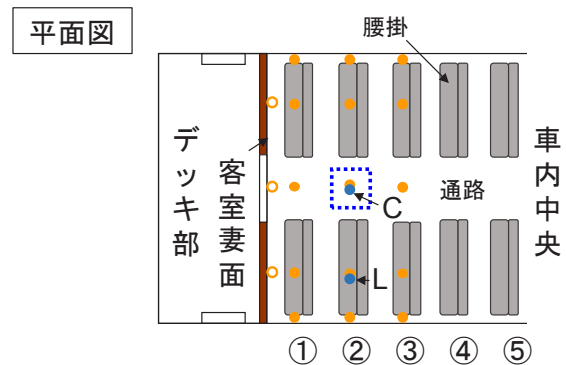


図5 受音点，測定点および加振点

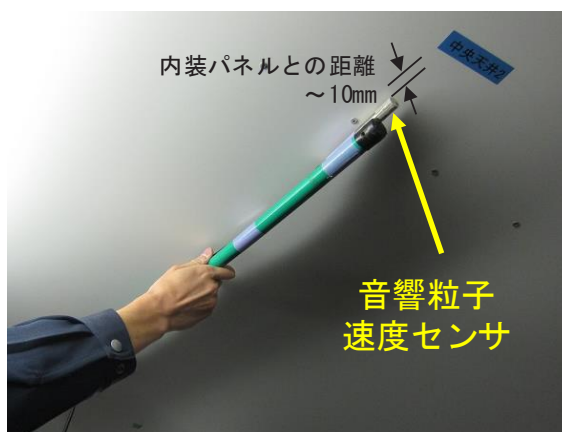


図6 内装パネル近傍の音響粒子速度の測定状況



図8 小型スピーカ直近の音響粒子速度の測定状況

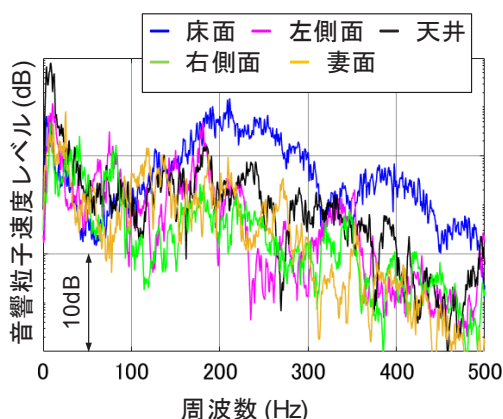


図7 車内各部位の音響粒子速度の周波数特性

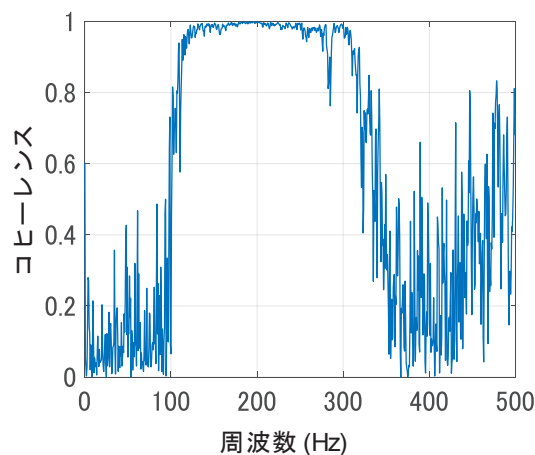


図9 小型スピーカ直近の音響粒子速度と受音点Cにおける音圧とのコヒーレンスの一例

幕板、窓、腰板のそれぞれ中央3点、妻面は全体を9分割したときの各中央位置の9点とした。

### 3.2 内装パネル近傍の音響粒子速度の測定結果

音響粒子速度センサによる内装パネル近傍の音響粒子速度の測定状況を図6に示す。このように、振動しているパネルにセンサを近接することで、非接触で内装パネル近傍の音響粒子速度を直接測定することができる。

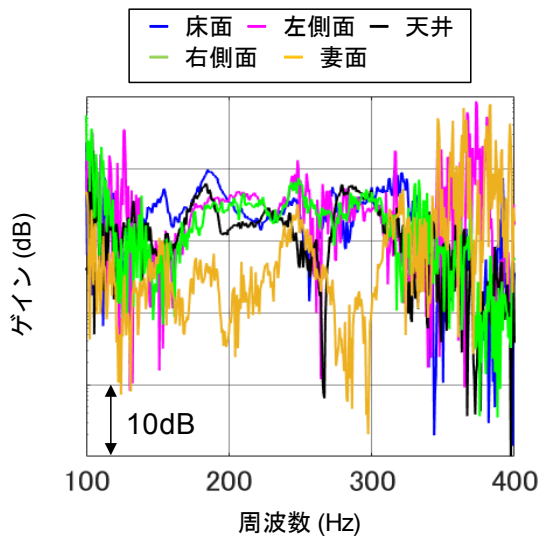
2列目座席位置における各部位の中央位置と、妻面の2段目中央位置の音響粒子速度の周波数特性を図7に示す。けん引リンク受を加振した場合、近傍の音響粒子速度は特に150Hz以上においては床面が最も大きく、その他の部位はほぼ同じレベルであった。

### 3.3 伝達関数の算出結果

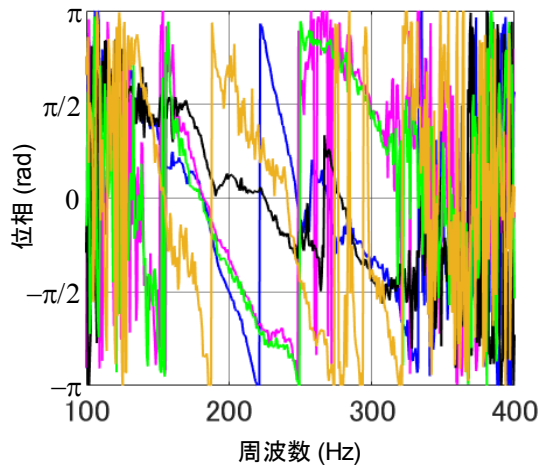
図5の各測定点に置いた小型モノラルスピーカ（株式会社プリンス PPS-BTS3BL、以下、小型スピーカ）から音（ランダム波）を発生させ、直近に取り付けた音響粒子速度センサで測定した発生音の音響粒子速度と受音点の音圧から伝達関数を求めた。小型スピーカ直近の

音響粒子速度の測定状況を図8に示す。ここで、小型スピーカ直近の音響粒子速度と受音点Cにおける音圧とのコヒーレンスを確認する。コヒーレンスは、図9に示す通り、100～300Hzにおいて高い数値を示している。この帯域のコヒーレンスが高いのは、使用している音響粒子速度センサの感度が180Hzを中心に高くなっているためと考えられる。よって、ここでは100～300Hzを中心に検証する。

続いて、各部位の音響粒子速度と受音点Cの音圧間の伝達関数を図10に示す。図10(a)より、受音点Cには床面、各側面、天井からの放射音はほぼ同じ大きさで伝搬するものの、妻面からの伝搬は小さいことが分かる。また、図10(b)の通り、各内装パネルから放射された音が受音点Cには、位相がずれて伝搬することも分かる。この位相のずれにより、受音点Cにおいて互いの音圧を相殺するキャンセレーションメカニズムが発生することが想定される。



(a) ゲイン (振幅)



(b) 位相

図 10 各部位の音響粒子速度と受音点 C における音圧間の伝達関数

### 3.4 受音点における音圧の推定結果

図 11 にけん引リンク受加振時の受音点 C における音圧の実測値と本手法による推定結果を示す。なお、推定結果の音圧レベルの大きさは、実測と同じレベルに揃うよう一定倍している。図 10 の伝達関数が良好に取得できた 100～300Hz の帯域の内、概ね 130～300Hz においては (図 11 の青矢印範囲)、両者はほぼ同じ特性が得られた。それ以外の周波数帯域は、伝達関数が良好に取得できなかったことからずれが生じたもので、いずれの帯域も良好に音響粒子速度と伝達関数を得ることができれば、受音点の音圧を推定できるものと考えられる。

### 3.5 受音点における音圧の複素ベクトルと寄与度

式 (1) の通り、各部位から受音点 C および受音点 L に伝搬する音圧は複素ベクトルとして求められる。図 12

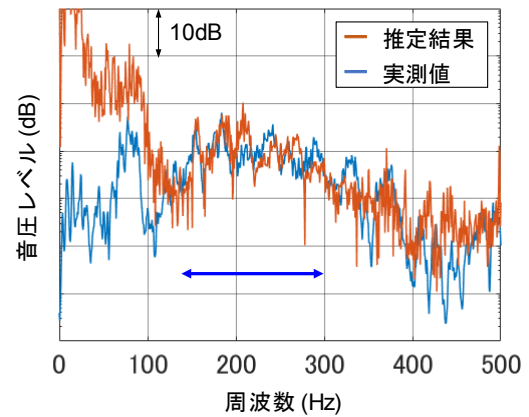


図 11 音圧のスペクトル比較

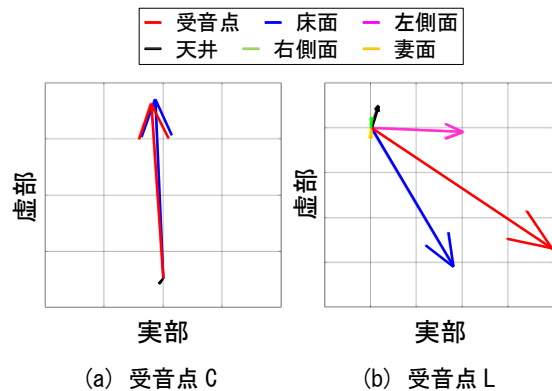


図 12 音圧の複素ベクトル表示 (200Hz 帯)

に 200Hz 帯 (1/3 オクターブバンド) における各受音点の音圧の複素ベクトルと、各部位からの放射音の音圧の複素ベクトルを示す。図 13, 14 に各受音点の寄与度の結果を示す。図 12(a) より、受音点 C と床面からの放射音の音圧の複素ベクトルはほぼ同じであり、その他の部位からの放射音の音圧の複素ベクトルは非常に小さかった。これにより、式 (2) に従い部位別の寄与度を算出した結果、図 13 に示す通り、床面の寄与度が最も大きいことが示された。これは、図 7 の音響粒子速度および図 10 の伝達関数の特性から妥当な結果と言える。天井、右側面、妻面の寄与度は小さいながらもマイナスの値を示しており、キャンセレーションメカニズムによって受音点 C の音圧を下げるように作用していると推察される。

次に、受音点 L における結果を見ると、図 12(b) の通り、受音点 L における音圧は、床面だけでなく左側面からの放射音の影響も現れている。図 14 の受音点 L の寄与度について、図 13 の受音点 C の結果と比較すると、床の寄与度は約 0.7 と小さくなり、左側面の寄与度が約 0.3 と大きくなった。これは、受音点 L は図 5 に示すように、受音点 C よりも左側面に近いため、そこからの放射音の影響が大きくなった結果、相対的に床面の寄与度

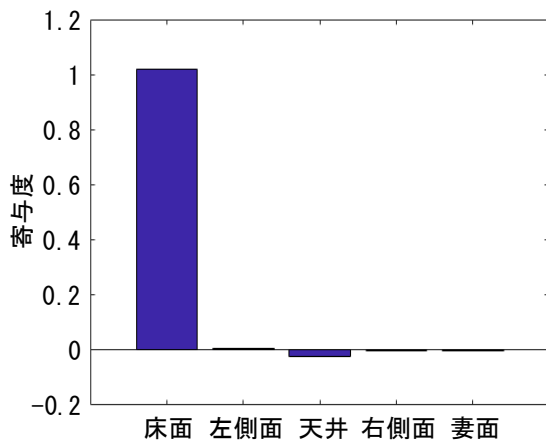


図 13 受音点 C における寄与度 (200Hz 帯)

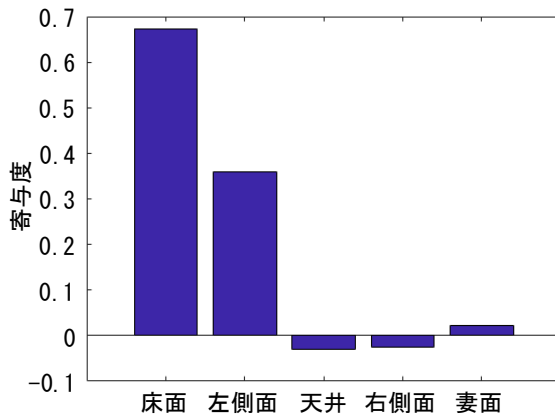


図 14 受音点 L における寄与度 (200Hz 帯)

が小さくなったものと考えられ、直感的な特性と符合する寄与度結果が得られた。

#### 4. まとめ

鉄道車両において車内騒音の低減対策を効果的に適用するには、車内騒音評価点に対する寄与度を把握することが重要であり、筆者らは小型スピーカと音響粒子速度センサを用いた新たな寄与度解析手法を考案した。この手法は、音響粒子速度センサを用いて、車内各部の近傍の音響粒子速度を直接測定し、さらに小型スピーカから発する音により車内各部と騒音評価点（受音点）間にお

ける伝達関数を測定することで寄与度を求めるものである。また、寄与度の算出において、車内各部からの放射音の音圧をベクトルで表すことで、正負の寄与度が求まる。ここで、負の寄与度は受音点において音圧を下げるもので、キャンセレーションメカニズムを表現することができる。

本手法を新幹線型の試験車両の定置での加振試験において適用し、車内の 2 箇所の受音点に対する車内各部位からの放射音の寄与度を求めた。得られた結果は、加振点に近い床面からの放射音の寄与が示されるとともに、左側面寄りの受音点では左側面からの放射音の寄与についても表現することができた。

今後は、本手法を適用できる周波数帯を拡大するとともに、実際の走行状態における鉄道車両の車内騒音に対して適用して検証を行いたいと考えている。

#### 文 献

- 1) 田中俊光, 杉本明男: 高速鉄道アルミ車両の車内低騒音化技術, 騒音制御, Vol.22, No.4, pp.205-210, 1998
- 2) 白石仁史: さらなる車内騒音の低減を目指して, JR EAST R&D REPORT, No.24, pp.16-17, 2013
- 3) 山本克也, 朝比奈峰之: 圧電スピーカと音響粒子速度センサを用いた音響伝搬推定手法, Dynamics and Design Conference 2017 USB 講演論文集, U00207, 2017
- 4) Yamamoto, K., Asahina, M., Suzuki, K.: A new estimation method for acoustic transmission using a small loudspeaker and an acoustic particle velocity sensor, Euronoise 2018, 2018.
- 5) 田中信雄: 振動音響制御, コロナ社, pp. 217-220, 2009
- 6) Microflown Technologies Co., Ltd. ホームページ: <https://www.microflown.com/products/> (参照日: 2019 年 6 月 11 日)
- 7) 株式会社東陽テクニカ ホームページ: [https://www.toyo.co.jp/mecha/products/list/?contents\\_type=728](https://www.toyo.co.jp/mecha/products/list/?contents_type=728) (参照日: 2019 年 6 月 11 日)
- 8) 中村政弘: 相反定理による遠隔点の振動放射音の予測, 日本機械学会論文集 (C 編), 63 巻, 616 号, pp.76-81, 1997