

全方位音源探査システムを用いた車内騒音特性の評価

石森 章純* 山本 克也*
朝比奈 峰之* 小池 宏寿**

Evaluation of the Interior Noise Characteristics using the Sound Source Analysis System

Akiyoshi ISHIMORI Katsuya YAMAMOTO
Mineyuki ASAHINA Hirohisa KOIKE

There are various noise sources in the railway vehicles, and they generate the interior noise through the complicated propagation path. It is important to figure out the interior noise characteristics to establish the countermeasure of the interior noise. Therefore, as a method possible to figure out the interior noise characteristic intuitively by relatively easy measurement, we conducted the evaluation of the interior noise characteristics using the sound source analysis system. As a result of an excitation test using a Shinkansen-type test vehicle and a running test on a commercial line for a Shinkansen-train, it was confirmed that the evaluation method using this system is useful.

キーワード：車内騒音，音源探査，ビームフォーミング，近距離場音響ホログラフィ，可視化

1. はじめに

鉄道車両における車内騒音は、車体周辺あるいは台車の機器等が騒音源となり、これらが発する騒音の透過音や振動に起因する固体伝搬音が要因となっている。騒音源から車内騒音に至る伝搬経路は複雑であり、走行速度や走行区間によっても変化する。

このような車内騒音を低減するにあたり、主要な騒音源となっている部位や騒音の伝搬経路などを把握することが効果的な対策を施すために重要である。車内騒音特性を把握する手法としては、内装板の振動から評価点の騒音への寄与度を算出する手法や、詳細な内装振動データを用いた境界要素法による車内騒音解析手法が報告されている^{1) 2)}。しかし、これらの手法では内装振動と放射音の特性を十分に関連付けることが必要であり、測定の手間が大きいことが課題であった。

また、より一般的な騒音源位置を把握する手法として、マイクロホンアレイによる音源探査法がある。これに用いられるアレイは平面状であることが多く、音源探査が可能な範囲は空間内の一部の方向のみとなる。これは、騒音源が特定の方向のみに存在する場合においては有効であるが、鉄道車両客室内のような閉空間に対し、周囲の複数箇所が騒音源となる可能性がある場合には適用するのが困難である。

そこで、筆者らは客室内の車内騒音が周囲のどの範囲から侵入するかを把握することを目的に、全方位音源探査

システムを用いた評価手法の開発を行っている。全方位音源探査システムは球バップルマイクロホンアレイによるセンサ周囲の“全方位”の音源探査が可能なシステムであり、比較的容易な測定とそれにより得られるデータの解析結果から、音源が存在する方向を直感的に知ることができる。本報告では、この全方位音源探査システムを用いた、鉄道車両客室内全域を対象とした車内騒音特性の解析手法について、試験車体を用いた加振試験のデータによる基礎的な検証および新幹線車両での走行試験のデータによる検証結果を述べる^{3) 4)}。

2. 全方位音源探査システム

2.1 システムの概要

「全方位音源探査」とは、人間の聴覚のようにセンサを取り囲むあらゆる方向で発生した音に対して、その到来方向と強さを推定することを意味する造語である⁵⁾。

全方位音源探査システムは、図1に示すように球型のセンサ部と計測システムによって構成される。球型のセンサ部の直径は260mmであり、図2に示すように、球バップルに埋め込まれた31個のマイクロホンと12個のCCDカメラによって構成される。この球状のマイクロホンの配置とそれに特化した後述の解析アルゴリズムにより“全方位”の音源探査を可能としている。

鉄道車両の客室内のように、床や天井、壁面に囲まれた閉空間において、到来する音が大きい方向、すなわち要対策箇所を見出す際に、全方位の音源探査が可能であることが利点となる。

* 車両構造技術研究部 車両振動研究室

** 日本音響エンジニアリング株式会社

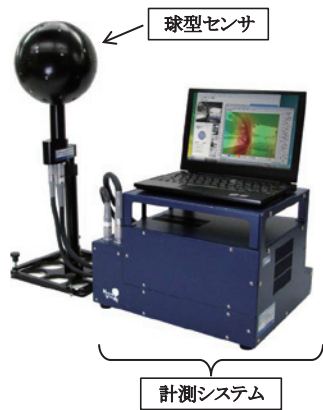


図1 全方位音源探査システム

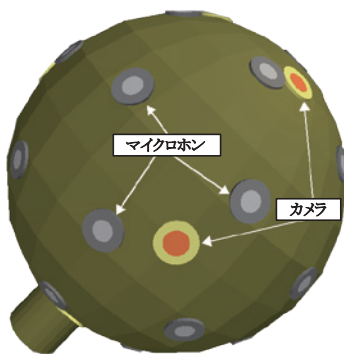


図2 球型センサの構成

また、鉄道車両の車内騒音、特に高速鉄道車両の客室内の騒音は、500Hz以下の低周波数域の低減が求められることが多い。本システムは、ビームフォーミング法および球面近距離場音響ホログラフィ法と呼ばれる後述の2種類の解析アルゴリズムを備えており、前者は概ね200Hz以上の周波数帯域、後者は概ね50Hz以上の周波数帯域を対象とした解析が可能であるため、問題となる低周波数域の車内騒音特性を捉えることができる。

2.2 解析アルゴリズム

2.2.1 ビームフォーミング法

ビームフォーミングは、複数のマイクロホンが直線状や平面状に配置されたマイクロホンアレイによる音源探査において一般的に用いられている手法である。直線状あるいは平面状のマイクロホンアレイでは、センサ周囲の一部の方向のみの音源探査が可能であるのに対し、本システムでは、このビームフォーミングを球面状のマイクロホン配置に拡張することで球型センサ周囲の全方位の音源探査を可能としている。

ビームフォーミング法による解析結果の例を図3に示す。球型センサ周囲の全方位を12分割し、到来する音の強さを表すコンター図と、CCDカメラによって撮影した測定点周囲の画像を重ね合わせて表示することにより、直感的に音源の位置を捉えることが可能となってい

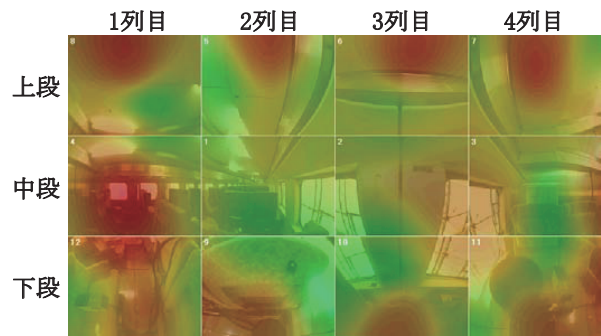


図3 ビームフォーミング法による解析結果

表1 ビームフォーミング法解析結果で表示される方向

	垂直方向 (仰角)	水平方向 (方位角)	
上段	+30° ~ +90°	1列目	-135° ~ -45°
中段	-30° ~ +30°	2列目	-45° ~ +45°
下段	-90° ~ -30°	3列目	+45° ~ +135°
		4列目	+135° ~ +225°

(ただし、垂直方向は水平面を0°、上方を+90°、下方を-90°とし、水平方向は前方を0°、右方を+90°、左方を-90°、後方を+180°とする。)

る。12分割されたそれぞれの画像が示す範囲は表1の通りである。

ここで、コンター図が表すのは背景画像に写るそれぞれの方向から到来する音の強さであり、測定点や画像に写る位置における音圧とは異なることに注意が必要である。

2.2.2 球面近距離場音響ホログラフィ法

球面近距離場音響ホログラフィは、近距離場音響ホログラフィを本システムの球状のマイクロホンアレイに特化した解析手法である。球型センサ周囲の全方位にわたって音圧と粒子速度を再現できる手法であり、これらを用いて音の強さと向きを示す音響インテンシティを導出することができる。なお、“近距離”という名が示すようにセンサの近傍が解析対象範囲となり、球型センサの直径260mmに対し、解析対象は直径800mm程度の球状の範囲となる。

音響インテンシティは、音の強さと向きを示すベクトル量であるため、解析結果は図4に示すように、球型センサを示す中心の黒い球とその周囲に球状に分布する三次元ベクトルとして表される。ベクトルの矢印の色と長さは音響インテンシティの大きさを表し、矢印の向きが流れる方向を表す。すなわち、このベクトルは全方位から到来する音を合成した流れであるため、音の侵入方向を示すビームフォーミング法による解析結果とは異なることに注意しなければならない。本報告では、解析結果図の紙面上での見易さを考慮して、特定の断面部分のみを表示した結果を示すこととする。

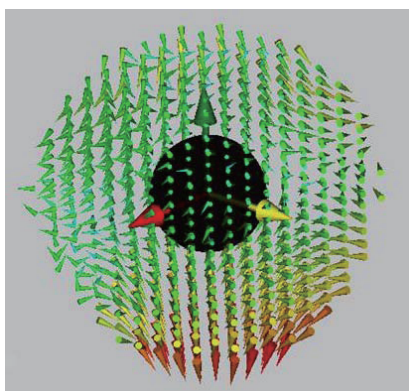


図4 球面近距離場音響ホログラフィ法による解析結果

3. 加振試験における検証

3.1 測定車両および測定点

本システムによる鉄道車両客室内における車内騒音特性の評価について、鉄道総研が所有する試験車両を用いて基礎的な検証を行った。使用した試験車両の車体断面形状、車両長さ、構体構造は既存の標準的な新幹線車両と同一である。客室内は図5のようになっており、荷棚は省略されているものの、床板や側面および天井の内装パネル、腰掛などは設置されている。

客室内の測定点の位置を図6に示す（ただし、車体両端のデッキ部は省略し、客室部のみを表示する）。客室内は約3m×20m程度の空間であり、場所により騒音の特性は異なると考えられるため、客室内の全域にわたって5×5点の測定を行うこととした。それぞれの測定点について、球形センサの中心高さが床上1200mmとなるよう設置した。このセンサ中心高さは、腰掛に座った際の耳元付近の位置にあたる。



図5 試験車両客室内

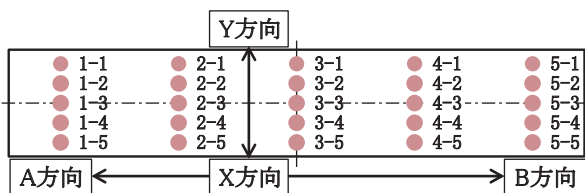


図6 客室内測定点

3.2 加振方法（車内騒音発生方法）

本システムによる測定を行うにあたり、車内に騒音を発生させるため、試験車両のヨーダンパ受1箇所を動電型加振器により加振した。加振点の位置は図6の測定点5-5のほぼ真下の位置にあたる。加振信号は20～500Hzのバンドランダム波であり、加振器により発生した振動が客室内の内装へ伝わり、客室内に固体伝搬音を発生させる。また、加振点は測定点5-5のほぼ真下の1箇所のみであるため、加振点近傍で発生した音が、図6のA方向へと流れると予想される。

3.3 解析結果

3.3.1 ビームフォーミング法

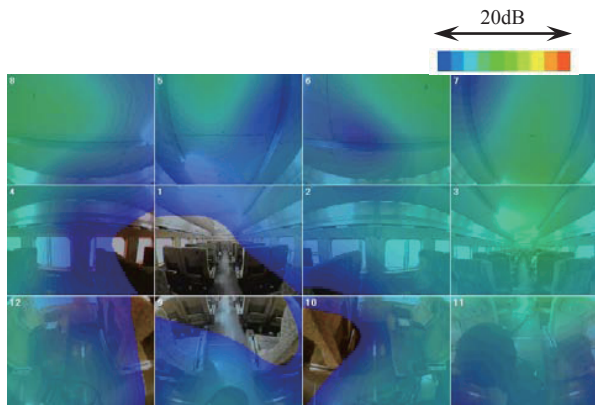
客室内の5×5点のうち、代表例として、(a) 客室中央（測定点3-3）、(b) 客室端部（測定点5-3）、(c) 客室端部側寄り（測定点5-5）における測定データをビームフォーミング法により解析した結果を図7に示す。図6のA方向を前方とした、200Hz帯の1/3オクターブバンドの解析結果であり、コンター図の表示レンジは全測定点における解析結果の最大値を基準とした20dBの範囲である。また、最大値から20dB以上下回る部分のコンター図は透明となる。

図7(a)より、加振点から離れた客室中央（測定点3-3）においては大きな音が到来する（赤色で示される）方向は無い。また、前方は透明となっており到来する音はほとんど無いのに対し、後方は水色で示され、加振点の方向から音が伝搬している様子が現れている。一方で、図7(b)より加振点に近い客室端部（測定点5-3）では客室中央に比べ、全体的に到来する音が大きくなっており、特に床及び天井方向からの音が大きくなっていることがわかる。加振点直上にあたる客室端部側寄り（測定点5-5）においては図7(c)より、床方向からの音は図7(b)に比べやや小さくなっているが、天井方向に加えて、加振点に近い左方の窓、壁面方向からの音が大きくなっている。

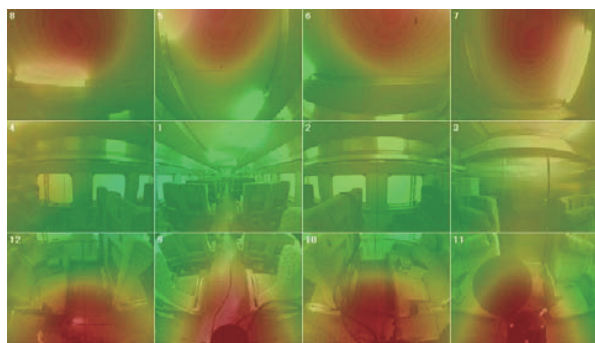
それぞれの測定点における解析結果より、加振点に近い客室端部付近の内装が音源となっており、客室中央ではほとんど音が発生していないことが確認できる。加えて、200Hz帯における床方向から到来する音は、加振点に最も近い客室端部の側寄りよりも中央の方が大きいことがわかる。

3.3.2 球面近距離場音響ホログラフィ法

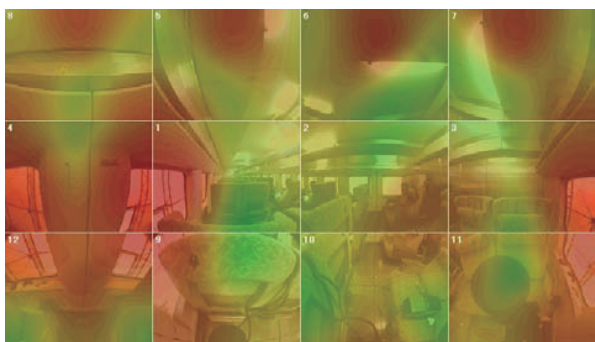
前項と同じ測定データを球面近距離場音響ホログラフィ法により解析した結果を図8に示す。前項と同様に、測定結果の代表例として、(a) 客室中央、(b) 客室端部、(c) 客室端部側寄りにおける200Hz帯の1/3オクターブバンドの解析結果を示す。表示レンジは20dBであり、床上1200mmの高さにおける水平方向の断面の音響インテンシティ分布である。図8(a)より、客室中央で



(a) 客室中央(測定点3-3)



(b) 客室端部(測定点5-3)

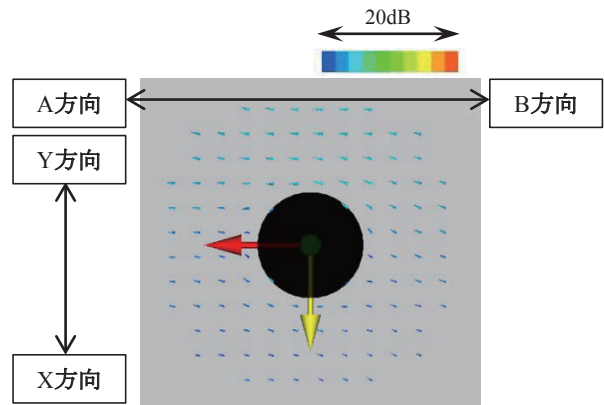


(c) 客室端部側寄り(測定点5-5)

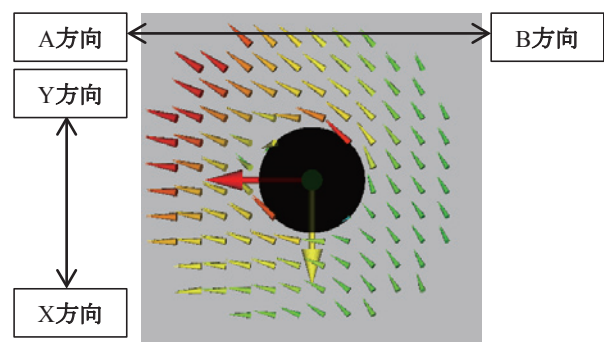
図7 ビームフォーミング法による解析結果

は全体的に音響インテンシティは小さいものの、加振点が存在する B 方向から A 方向への音の流れが確認できる。図 8 (b) より、客室端部では、A 方向を前方として、全体的に右前方への流れが表れている。これは、加振点が存在する左方からの音の流れと後方の妻壁からの放射音または反射音の流れが合成された結果であると考えられ、これに床方向からの音に加わり大きな音の流れになっているものと考えられる。次に、図 8 (c) より客室端部側寄りでは、加振点側の左方の窓、壁面方向からの音の流れが確認でき、これと後方の妻壁からの放射音または反射音により、全体的には右前方へと音が流れていることが確認できる。

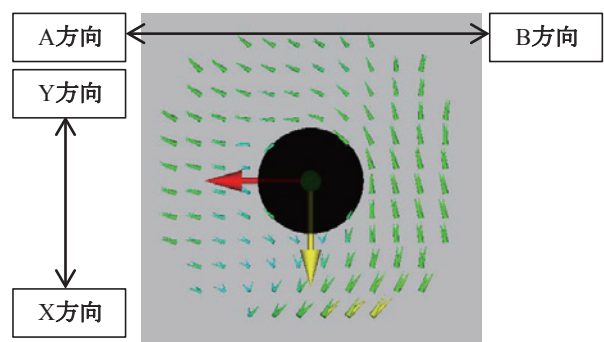
これら 2 種類の解析手法は、どちらの手法を用いても



(a) 客室中央(測定点3-3)



(b) 客室端部(測定点5-3)



(c) 客室端部側寄り(測定点5-5)

図8 近距離場音響ホログラフィ法による解析結果

主要な音源となっている箇所等、発生している車内騒音の特性を把握することが可能である。両手法による解析結果を比較すると、ビームフォーミング法では、複数の方向に音源が存在する、あるいは複数の方向から音が到来するような場合にも、それらを区別して捉えることが可能である。ただし、客室内の壁面からの反射音が存在する場合、この壁面の方向にも音源が存在するように示されることに注意が必要である。一方、球面近距離場音響ホログラフィ法では、より低周波域の解析も可能であり、音の流れまでも確認できるが、複数の方向に音源が存在する場合には、各々の矢印はそれぞれの音源から放射された音を合成した結果のみが得られることに注意が必要である。

4. 走行試験における測定

4.1 試験概要

本システムの実際の走行状態における有効性を検証するため、新幹線車両での走行試験を実施した。測定点は加振試験時と同様に図6に示す位置における床上1200mmとした。測定の対象区間は、試験の走行区間に明かり区間とトンネル区間を1つずつ設定し、それぞれについて20秒間の測定を行った。また、測定の際には本システム2台を用い、試験の走行区間を1往復する毎に測定点を変更して順に測定を行った。そのため、後に示す解析結果には、走行速度が約15km/hの範囲で異なるものも含まれるが、走行中の車内騒音の全体的な傾向を把握することは可能であると思われる。

4.2 解析結果

走行中の新幹線車両における測定データをビームフォーミング法により解析した結果の例を図9, 10に示す。図9は明かり区間における(a)客室端部(測定点1-3)および(b)客室中央(測定点3-3)の測定データの200Hz帯における1/3オクターブバンドの解析結果である。表示レンジはいずれも表示範囲における最大値から6dBであり、絶対値は異なる。図9(a)の客室端部は床方向からの音が最も大きいのに対し、図9(b)

の客室中央では天井方向からの音が最も大きくなっていることがわかる。客室端部は台車直上の位置にあたるため、台車振動に起因する固体伝搬音により床方向からの音が大きくなるのに対し、客室中央では台車からの固体伝搬音の影響が小さくなるため、相対的に天井方向からの空力音などの透過音が大きくなる様子が表れていると考えられる。

図10は(a)明かり区間、(b)トンネル区間での客室端部(測定点1-3)における500Hz帯の1/3オクターブバンドの解析結果である。図9と同様、表示レンジはいずれも6dBであり、絶対値は異なる。明かり区間では200Hz帯と同様に、床方向からの音が大きいのに対し、トンネル区間では、天井方向を始め、広い範囲からの音が大きくなっていることがわかる。これは、トンネル内の騒音は壁面の反射により一様な分布となり、天井からの透過音が増大する様子が良く表されている。

また、図9(a), 図10(a)より、明かり区間の客室端部で床方向以外に天井方向からも音が到来する様子が表れているが、これは床方向からの音が天井で反射する音を含んでいることに注意が必要である。

次に、明かり区間での客室端部の1列(測定点1-1~1-5)における測定データを球面近距離場音響ホログラフ法により解析した結果を図11に示す。妻壁側から見た垂直方向の断面における音響インテンシティ分布で

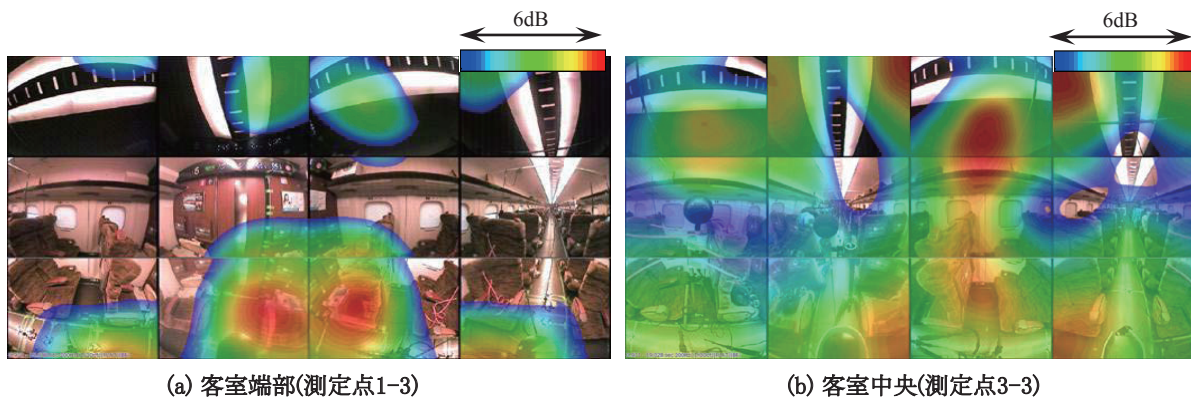


図9 走行中の新幹線車両客室内における測定結果(明かり区間, 200Hz帯)

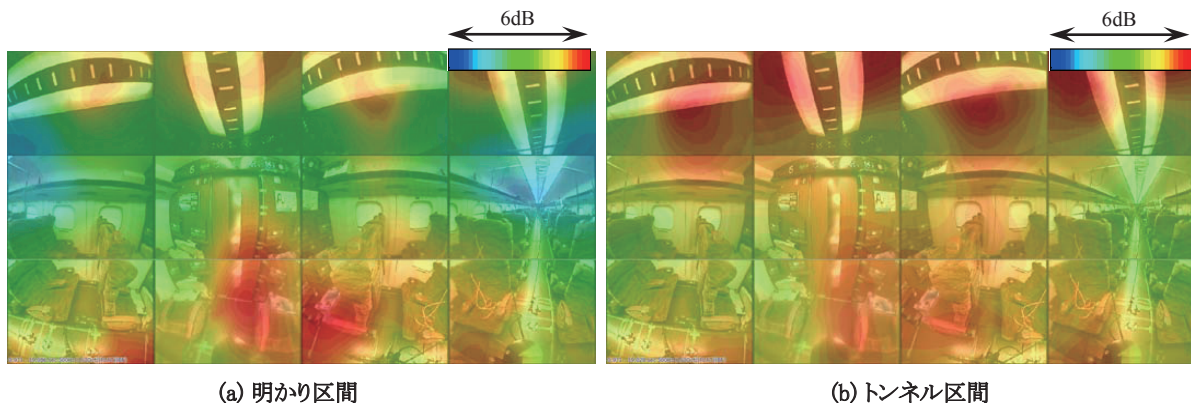


図10 走行中の新幹線車両客室内における測定結果(客室端部, 500Hz帯)

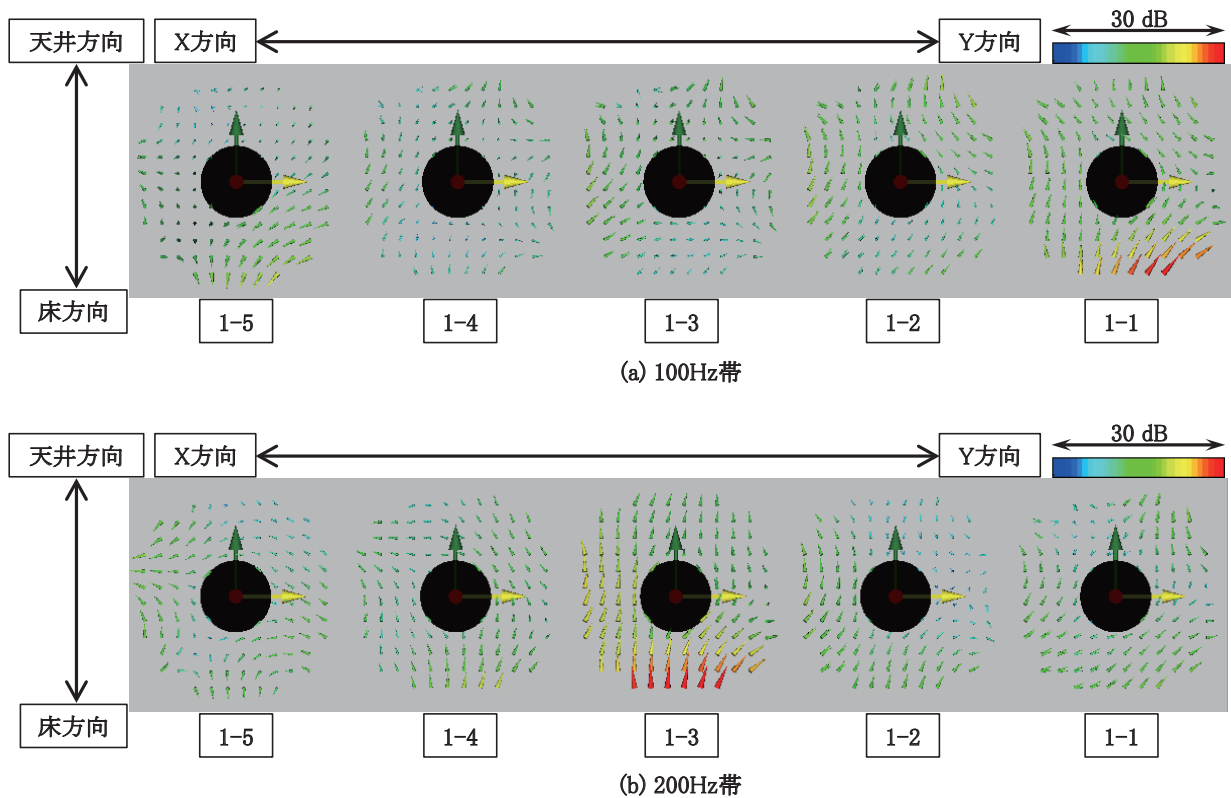


図 11 客室端部（測定点 5-1 ～ 5-5）における音響インテンシティ分布（明かり区間）

あり、(a) 100Hz 帯、(b) 200Hz 帯における 1/3 オクターブバンドの解析結果である。200Hz 帯では図 9 (a) にも表れていたように、中央の床方向が音源となっているのに対し、100Hz 帯では側寄りの床方向が音源となっており、周波数帯毎に対策が必要な部位が異なることがわかる。

このように、客室内の複数点での測定を行うことで、走行区間、周波数帯ごとに対策が有効な箇所を捉えることができ、車内騒音低減策を検討するにあたり有用な情報を得ることができる。

5. おわりに

本報告では、全方位音源探索システムを用いた車内騒音特性の解析手法について検証するため、試験車体での加振試験および新幹線車両での走行試験を行った。本システムによる複数点での測定を行うことにより、主に高速鉄道車両の客室内において低減が求められる低周波数域について、走行区間や周波数帯ごとに車内騒音特性を捉えることが可能であることが分かった。従って、本手法は鉄道車両の車内騒音低減策を検討する際に有用であると考えられる。

また、本報告では客室内の床上高さ 1200mm におけ

る水平方向の平面上を測定点としたが、台車直上やパンタグラフ直下など、垂直方向にも複数の位置で測定することで、さらに詳細な車内騒音特性が得られるものと考えられる。

文 献

- 1) 織田光秋, 矢野弘, 服部晃, 秋山悟: 新型新幹線車両の車内騒音予測と低騒音対策, 川崎重工技報, 138 号, pp.70-75, 1998
- 2) 山本克也, 田川直人, 梅原康宏, 角張勲, 水野耕, 寺井賢一: 内装振動データによる車内騒音分布解析と内装透過音低減の ANC システムによる消音効果予測について, J-RAIL2003 講演論文集, pp.365-368, 2003
- 3) 倉光拓馬, 小池宏寿, 山本克也, 朝比奈峰之: 近距離場音響ホログラフィの鉄道車両の車内騒音解析への適用, J-RAIL2012 講演論文集, pp.373-376, 2012
- 4) 山田大智, 石森章純, 山本克也, 朝比奈峰之, 小池宏寿, 倉光拓馬: 球面近距離場音響ホログラフィ法による走行車両における車内騒音伝搬特性の解析, J-RAIL2014 講演論文集, S5-1-5, 2014
- 5) 高島和博: 全方位音源探索システムの実現, 騒音制御, Vol.28, No.2, pp.98-101, 2004