

2708 全方位音源探査システム（ノイズビジョン）による 車内騒音侵入経路調査法について

正〔機〕 山本 克也（鉄道総研）
正〔機〕 間々田祥吾（鉄道総研）
○小池 宏寿（日東紡音響）
中川 博（日東紡音響）

正〔機〕 山本 大輔（鉄道総研）
佐藤 大悟（鉄道総研）
倉光 拓馬（日東紡音響）

An investigation method for penetration area of the interior noise using sound source analysis system (Noise Vision)

Katsuya YAMAMOTO, Railway Technical Research Institute 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji City, Tokyo

Daisuke YAMAMOTO, Syogo MAMADA, Daigo SATO, Railway Technical Research Institute

Hiromasa KOIKE, Takuma KURAMITSU, Hiroshi NAKAGAWA, Nittobo Acoustic Engineering

It is important to figure out the penetration path from the noise source into the cabin to implement countermeasure of the interior noise of railway vehicle. This paper describes about a new method using sound source analysis system (Noise vision), that analyses the noise level and directions of the incident noise to the system by the 31 microphones and 12 cameras. We carried out the test to the interior noise of deck in running Shinkansen, and confirmed that the system useful to the verification of the penetration path of the railway vehicle.

Keywords: interior noise, penetration path, visualization, deck noise

1. はじめに

鉄道車両では、台車あるいは車体周辺の騒音源で発生する固体伝搬音および透過音が、車内に侵入して騒音（以下「車内騒音」という）となっている。騒音源から車内までの騒音伝搬経路は複雑であり、かつ走行速度や走行区間により変化する。車内騒音の低減を目的に、その対策法を検討する際に、騒音侵入経路の把握は、初期段階で最も重要である。これまでの騒音侵入経路の特定は、内装板の振動と評価点の騒音との寄与度を算出する手法¹⁾や、詳細な内装振動データを用いた境界要素法による騒音解析²⁾、あるいは3次元インテンシティマイクロホンを用いた音響インテンシティによる評価法³⁾などがある。第1、第2の手法は内装振動と放射音の特性を十分に関連付けることが重要であり、一般に測定の手間が大きい。また、第3の手法は、インテンシティマイクロホン位置への音響エネルギーの大きさと方向をベクトル値で求めるため、複数の範囲から騒音侵入が大きいとその合成方向を出力する問題があり、正確な特性を把握ができない可能性がある。

そこで、本研究ではマイクロホンとCCDカメラを球状に配置した全方位音源探査システム（ノイズビジョン-Noise Vision）により、鉄道車両において車内騒音の侵入経路の把握が可能か検証することを目的とする。なお、対象空間は新幹線車両のデッキ部とし、通常乗客が立位で乗車する側引戸近傍への騒音侵入経路で検証することとした。

2. 全方位音源探査システム (Noise Vision) について

2.1 全方位音源探査である利点

本検証に入る前に、検討に使用した Noise Vision について紹介する。

「全方位音源探査」とは、人間の聴覚のようにセンサーを取り囲むあらゆる方向で発生した音に対して、その音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⁴⁾。

「全方位」での音源探査が可能であることは、従来から用いられてきている一般的な平面アレイマイクロホン（以後“平面アレイ”と略す）を用いた音源探査システムでは、音源探査を行う事が難しかった状況での調査を可能とする。例えば閉空間である室内において、発生する方向が不特定である場合（透過音あるいは異音など）、意図した方向とは別の方向から音が到来してくる可能性があるため、音源方向をあらかじめ設定する平面アレイでは、音源の方向の特定が難しいが、Noise Vision では「全方位」の探査が可能であるため、そのような状況でも十分対応ができる所に利点がある。

2.2 Noise Vision の特徴

全方位音源探査を実現するためのセンサー及び解析システムは次の特徴を持つ。

A) 2.1でも記述しているが、球状にマイクロホンを配置していることから、全方位に対して、ほぼ平等な指向性を持つ。つまり、特定の方向に対して強い感度を持たない。

B) 見えない音を見えるようにできる。音の可視化を実現するために、球状にカメラを備えている。

C) 定常的な音のみならず、非定常な音に対する分析機能（突発的に発生する間欠性の音）を備えていること。

D) 測定機器がコンパクトにまとめられており（図1参照）、設置場所を選ばない。

A)に関して、Noise Vision では剛球面にマイクロホンを分散配置し、全ての方向に対してほぼ平等な指向性を

持たせる事に成功している。図1にセンサーを含むシステム全体の写真を、図2にマイクロホン配置の概略を示す。

マイクロホンは、正12面体及び正20面体の頂点の頂点を基準に31個配置されている。32個でないのは、球体下部にケーブル接続用のポートを設けているためである。

マイクロホンの間隔は測定可能な周波数に影響を及ぼすため、マイクロホンの数と相まって、センサー、すなわち球のサイズを適切なサイズに設定する必要がある。マイクロホンの間隔が波長に比べて広くなりすぎると、測定結果には真の音源の他に「サイドローブ」と呼ばれる偽の音源が現れてしまう。31個のマイクロホンを利用して、5kHz程度までの計測が可能となるように、Noise Visionでは直径0.26mの球体を利用している。

B)に関しては、12個のカメラを球表面に配置している。Noise Visionでは、カメラもセンサーの構成要素としての重要な位置を占める。各カメラには広角レンズを採用し、それぞれの撮影領域がオーバーラップするようにカメラを配置している。なおこのカメラによって撮影された画像に、方向別の音の強さを表すコンターを重ね合わせることで、非常に分かりやすいアウトプットを実現しており、現場に居合わせない第三者への説明を容易にしている。

C)に関しては、音源探索のアルゴリズムを工夫し、いわゆる「異音」「不思議音」⁵⁾といわれるような突発的に発生する非定常な音に対しても対応可能なシステムとなっている。

D)に関しては、図1の写真をみてもわかるとおり、Noise Visionのフロントエンド部は31chのA/Dとカメラ切替器を一体化しており、ノートパソコン上のソフトウェアで制御できるようになっている。その結果、従来実験室レベルで行われていた音源探索の測定を現場レベルで容易に実施できるようにしている。

2.3 全方位音源探索のアルゴリズム

Noise Visionでは、音源探索のアルゴリズムとしてビームフォーミングを採用している。通常、ビームフォーミングはマイクロホンが平面状あるいは直線状に複数配置されたマイクロホンアレイに対して用いられる事が多い。これらの手法はマイクロホンで収録した音声データに対して、音源の方向を仮定した場合に生じるマイクロホン間の理論的な遅延（位相差）をデジタル信号処理により補正した上で合成し、指向性を制御する。すなわち、複数のマイクロホンを利用して、指向性を後処理で実現すると考えると分かりやすい。超指向性マイクロホンとの根本的な違いは、超指向性マイクロホンがマイクロホンを向けた方向に対してのみ強い指向性を持つ事に対し、ビームフォーミングでは強い指向性を持つ方向を任意に制御できる点にある。ただし、Noise Visionでは、アレイを構成するマイクロホンが球表面に配置されているため、各マイクロホン間の理論的な遅延（位相差）を補正するだけで鋭い指向性を持たせる事は難しい。

そこでNoise Visionでは、一般的に行われている遅延補正のアルゴリズムを一般化⁶⁾し、剛球表面での振幅の変化、位相の遅れをとともに補正後、全ての信号を合成し、鋭い指向性を得ることに成功している。

3. 走行車両における検証試験

3.1 試験実施概要

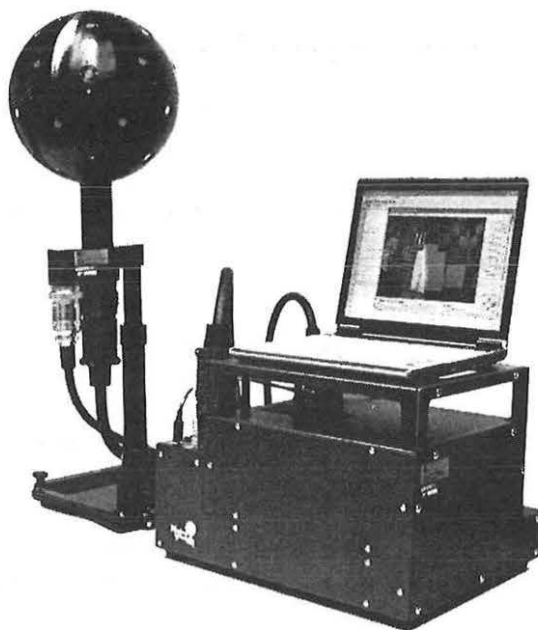


Fig.1 Noise Vision System

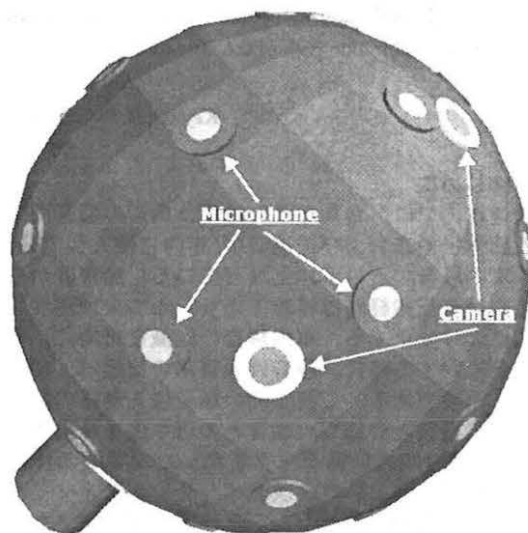


Fig.2 Location of the microphone and camera in the sensor of Noise Vision

Noise Visionを用いた騒音侵入経路の検証は、新幹線車両のデッキ部騒音を対象に実施した。Noise Visionは、乗客が側引戸近傍に立つことが多いことを考慮して側引戸近傍に設置し、この位置における騒音に対する、天井、側引戸、外妻壁、内妻壁、床からの騒音侵入量の大小について評価することとした。図3に測定の概要図と状況写真を示す。

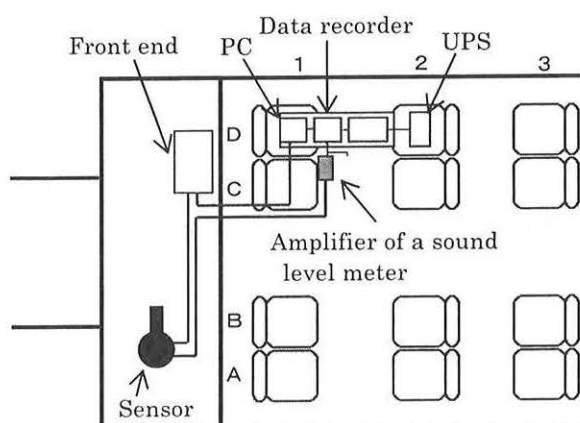
Noise Visionは、センサー部を上にして立てて使用することが多いが、この場合、支柱が邪魔をして真下方向がやや死角となるため、床板からの放射音を正確に捉えられない可能性が懸念された。鉄道車両の場合、台車が近いなどの理由により、床から車内への侵入音の寄与が小さくないことが、過去に実施したデッキ部での騒音侵入経路を特定するための測定からわかっているため、今回はNoise Visionを横向きに設置し、センサー部の支柱を反対の側引戸側に向けるように設置した。その際、セン

サ一部が約8 kgと重くバランスが取りにくいいため、センサー部根元と支柱下部を二つの三脚で支持し、走行中の振動で転倒しないように手すりにひもで固定した。また、三脚と Noise Vision の接面にはスポンジを敷いて、床からの振動の影響を小さくするようにした。フロントエンド部は反対側の側引戸前の床面に置き、センサー部から延びるマイクロホンおよびカメラ用配線を接続した。フロントエンド部で収録されたデータは、客室内に設置したパソコンに LAN ケーブルで接続し、データ収録終了後直ちに客室で解析を行った。

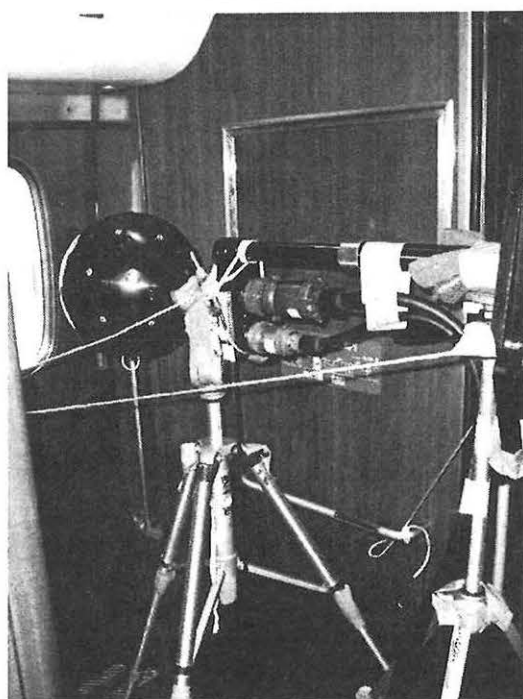
Noise Vision に内蔵されているマイクロホンは普通騒音計と同様に騒音レベルも測定できるが、球面バッフル内に埋め込まれていることもあり、測定値をそのまま騒音レベルとして評価することは推奨されていない。よって、普通騒音計をセンサー部の近傍に取り付け、騒音特性も同時に測定した。

3.2 測定結果

センサー部近傍に取り付けたマイクロホンによるデッ



(a) Measurement system for interior noise of a deck



(b) Picture of the setting of the sensor

Fig.3 Set up of a measurement in the deck

キ部騒音の周波数特性（A特性）の一例を図4に示す。この特性は、本騒音侵入経路探索法を検証するための参考データであるため、測定を行ったデッキ部の一般的な騒音特性を示すものではないことに注意願いたい。よって、測定時の走行区間や走行速度、騒音レベル値は示さないこととする。

この時のデッキ部騒音特性は、全体的に 100~200Hz を頂点とした山型の特性であり、さらに約 275Hz に鋭い卓越音がある。そこで、Noise Vision において、1/3 オクターブバンドで 200Hz 帯、250Hz 帯と、比較データとして 500Hz 帯の解析を行った。解析は、図4の騒音特性の評価区間とほぼ同じであり、騒音特性が概ね安定した区間を 30 秒間切り出して行った。

解析結果を図5に示す。Noise Vision が出力する結果は、通常3行4列に配列した12枚の画像データとして出力されるが、側引戸方向を中心に、天井、床、外妻壁、内妻壁の4方向に配列した展開図とした。複数のカメラの画像であるため、境界部分は不連続となっている。カラー表示の場合、レンジは最低値の青色から最大値の赤色まで6 dB であり、最大値を下回る範囲は透明で画像がそのまま映る。ここでは、赤色の領域を白色点線円で示す。

図5(a)より 200Hz では、天井と側引戸が赤色となっていることから騒音侵入が大きく、外妻壁および床板は緑色から青色であるため、騒音侵入が小さいことがわかる。次に、図5(b)の 250Hz ではやや結果が異なり、天井と外妻壁の中央から下側のやや貫通路寄りと床板の内妻壁寄りの侵入音が大きくなる一方で、側引戸からの影響は小さいことがわかる。この結果から、周波数帯域が違えば、騒音侵入部位が異なる様子を視覚的に確認することができる。このような騒音侵入経路が判別しやすい状態とは異なり、図5(c)の 500Hz の結果を見ると、天井の外妻壁寄り半面と外妻壁が赤色で、側引戸と内妻壁も赤色で表示され、一様に表示されている。これは、様々な部位から同様なレベルの騒音侵入があるためである。そのような場合は、カラーレンジを小さくし、分解能を高めることにより、騒音侵入が多い範囲をより詳細に把握することができる。図5(c)の条件で、カラーレンジを3 dB に変更した結果を図6に示す。

また、本来騒音源が近くない内妻壁や客室仕切り戸の方向もやや赤くなっている。これは天井や外妻壁からの反射音の影響を受けているためと考えられる。反射音の影響は、例えば吸音材を設置することで多少は小さくすることができるため、内妻壁や客室仕切り戸等に設置し、入射音に特化した測定を行うことも可能である。当然ながら本来の状態として、反射音も含んだ状態を評価することもできるが、どのような状態で測定するかは評価指針に基づき決定することになる。

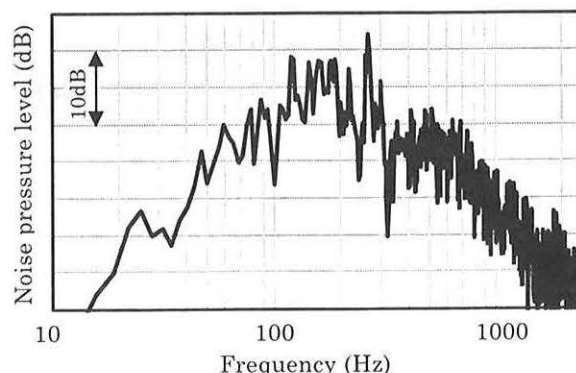


Fig.4 A-weighted noise frequency characteristics in a deck near door

4. 結論

マイクロホンとCCDカメラを球状に配列した全方位音源探索システム（Noise Vision）により、鉄道車両の車内騒音の侵入経路が調査できるか検証を行った。その結果、従来行われていたインテンシティマイクでの測定で

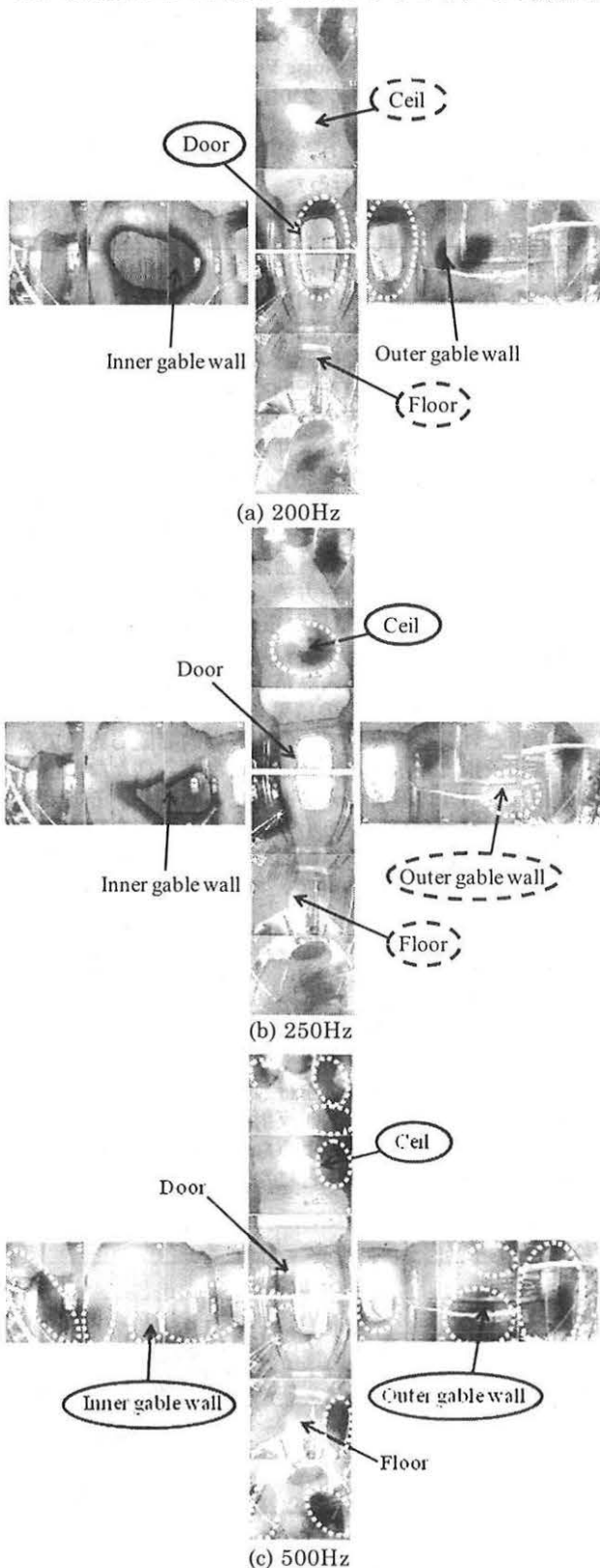


Fig.5 Results for the penetration path to a interior noise of the deck by the Noise Vision

は、困難であった複数個所からの侵入音を分離して特定でき、かつCCDの画像と騒音侵入量が直感的に把握できるなど、新たな方式として鉄道車両の騒音侵入経路の特定に使用できるものと判断できる。

今回は、他の手法による検証結果との比較を行っていないため、本方式による結果が正しいかを厳密には検証できていない。しかし、騒音対策検討の第一段階のツールとして用いるのには十分な性能を有していると思われる。今後、本方式で測定した結果に基づき、デッキ騒音あるいは客室騒音の騒音低減対策箇所を特定し、効率的な低減対策を実現したいと考えている。

参考文献

- 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, pp.365-368, 2003.
- 3) 南秀樹, 阿久津勝則, 劉岩: 車内騒音の音源解析法, 鉄道総研報告, Vol.13, No.10, pp.25-30, 1999.
- 4) 位音源探索システムの実現, 騒音制御 Vol28.No2, PP.98-101, 2004
- 5) 小池宏寿, 青木雅彦, 高島和博: 全方位音源探索システムを用いた騒音測定(第一報)事務所における不思議音の測定について, 騒音制御工学会, pp.45-48, 2006
- 6) 中島弘史, 山中高章, 中川 博: 不定項を用いた任意配置マイクロホンによるビームフォーミング, 日本音響学会講演論文集, PP.527~528, 2002

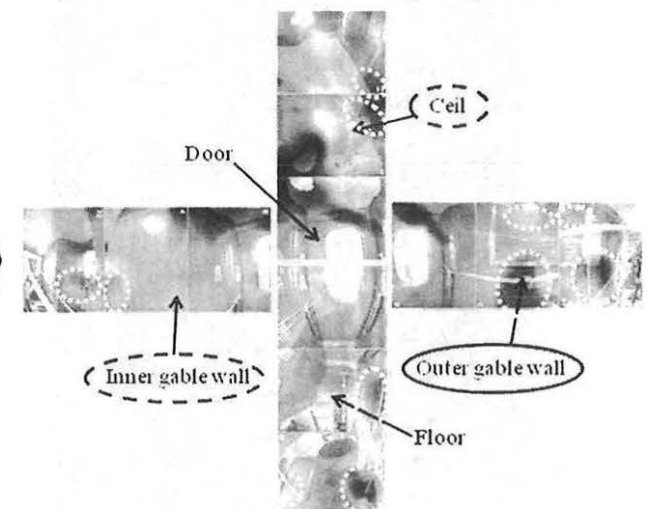


Fig.6 Results for the range resetting about the penetration path in 500Hz frequency range