

# 画像に音情報を組み込んだ音源探査装置（音カメラ）の開発と騒音防止対策への活用

大 脇 雅 直・中 島 潤 二

工場や道路のどの部分から音が発生しているかを特定することは、騒音防止対策を検討する上で非常に重要である。マイクロホン間の位相差を用いた音源探査装置を開発した。さらに、本装置に騒音対策を必要とする音源に対して仮想の防音壁を設定し、防音壁の効果の予測を行う機能を持たせた。この音源探査装置の原理、実際の探査例を紹介する。

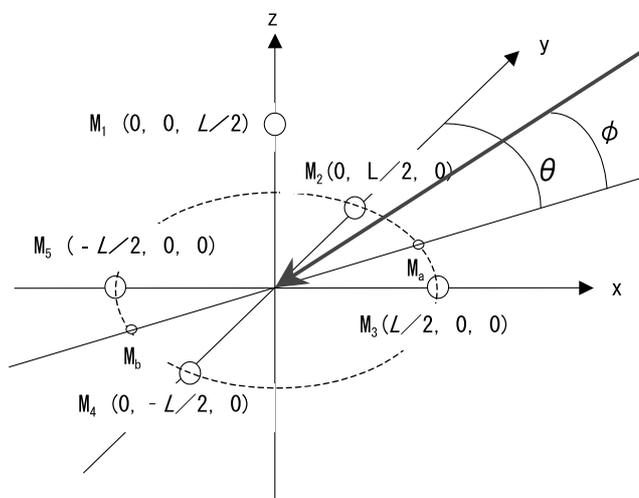
キーワード：音源探査，騒音対策，防音壁

## 1. はじめに

工場や道路のどの部分からどのような周波数特性の騒音が発生しているかを特定することは、騒音防止対策を検討する上で非常に重要である。騒音防止対策を行う必要がある建物部位や機械を明確にすることによって、効果的な対策を検討することが可能となる。しかし施設の敷地が広大であったり、騒音源となる機器が複数存在したりするような場合、音源や対策部位を特定するために多くの時間と労力を要していた。そこで、筆者らは、マイクロホン間の位相差を用いた相関法による音源方向推定式を導出し<sup>1)</sup>、その推定した音源方向を画像上に表示する音源探査装置（音カメラ）を考案した<sup>2)</sup>。さらに、本装置に対策を必要とする音源に対して仮想の防音壁を設定し、防音壁の効果の予測を行う機能を持たせた。この音源探査装置の原理、移動音源である自動車に対して適用した事例および防音壁の効果の予測を行った事例について述べる。

## 2. 音源方向の推定方法

5個のマイクロホンを用いて音源方向を推定する方法を示す。マイクロホンを図—1に示すように配置する。M1～M5はマイクロホン、Lは水平面のマイクロホン間隔とする。ここで、音源はマイクロホン位置から充分離れており、平面波として入射すると仮定する。図—2にマイクロホンM<sub>i</sub> - M<sub>j</sub>間における平面波の進行距離の概念図を示す。D<sub>ij</sub>をM<sub>i</sub>に対するM<sub>j</sub>の時間遅れ(sec)、cを音速(m/sec)とする。M<sub>i</sub>, M<sub>j</sub>を通過する平面波の進行距離はD<sub>ij</sub>・c(m)となる。



図—1 マイクロホンの配置

図—1における水平角を $\theta$  (°)、仰角を $\phi$  (°)とすると、M<sub>2</sub> - M<sub>4</sub>間およびM<sub>3</sub> - M<sub>5</sub>間における平面波の進行距離は式(1)、(2)で表される。

$$D_{24} \cdot c = L \cdot \cos \theta \cdot \cos \phi \quad (\text{m}) \quad (1)$$

$$D_{35} \cdot c = L \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi \quad (\text{m}) \quad (2)$$

次に、XZ平面およびYZ平面における進行距離を求めると式(3)、(4)となる。

$$(D_{13} + D_{15}) \cdot c = \sqrt{3} \cdot L \cdot \sin \phi_x \cdot \cos \theta \quad (\text{m}) \quad (3)$$

$$(D_{12} + D_{14}) \cdot c = \sqrt{3} \cdot L \cdot \sin \phi_y \cdot \cos \theta \quad (\text{m}) \quad (4)$$

但し、 $\phi_x$ ,  $\phi_y$ はそれぞれXZ平面、YZ平面に入射する仰角である。ここで、式(3)、(4)の右辺は等しくなるので式(5)の関係で表せる。

$$D_{1a} + D_{1b} = D_{12} + D_{14} = D_{13} + D_{15}$$

$$= \frac{D_{12} + D_{14} + D_{13} + D_{15}}{2} \quad (5)$$

水平角は式 (1), (2) から式 (6) で, 仰角は式 (1), (2), (5) から式 (7) で表せる。

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{D_{35}}{D_{24}} \right] \quad (6)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[ \frac{D_{12} + D_{14} + D_{13} + D_{15}}{(2\sqrt{3} \cdot \sqrt{D_{24}^2 + D_{35}^2})} \right] \quad (7)$$

なお, 式 (6), (7) の  $D_{ij}$  は, 2 個のマイクロホンに入力される信号のクロススペクトル  $P_{ij}(f)$  を求め, 対象とする周波数の位相情報  $\psi$  から求めることができる。

$$D_{ij} = \frac{1}{2\pi f} \psi [P_{ij}(f)] \quad (8)$$

但し,  $f$  は周波数とする。

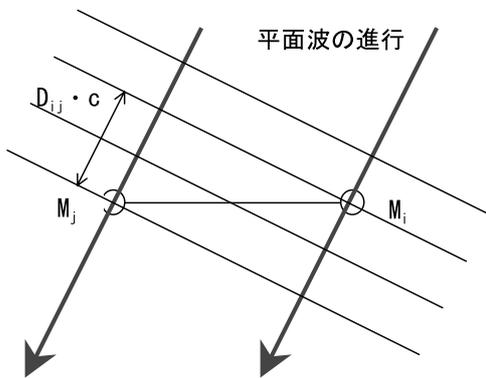


図-2 平面波の進行距離の概念

### 3. 音源探査装置の概要

図-3 に音源探査装置の構成を, 写真-1 に概観を示す。センサ部は5つのマイクロホンと小型カメラから構成されており, カメラから取り込んだ画像の上に音源方向, 周波数, 音圧レベルを○印の大きさで表示するようにしている。5つのマイクロホンの間

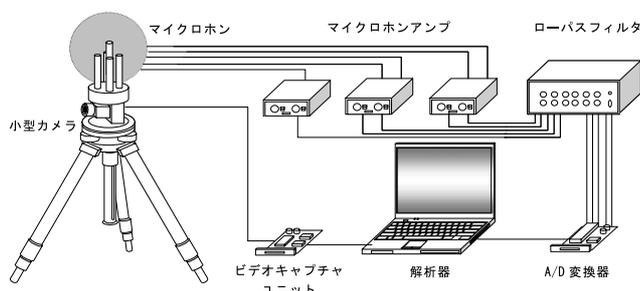


図-3 音源探査装置の構成



写真-1 音源探査装置の概観 (左) およびマイクロホン部 (右)

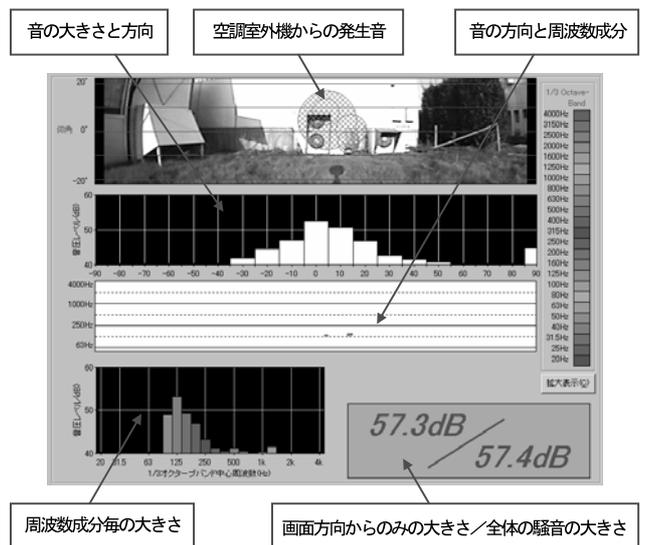
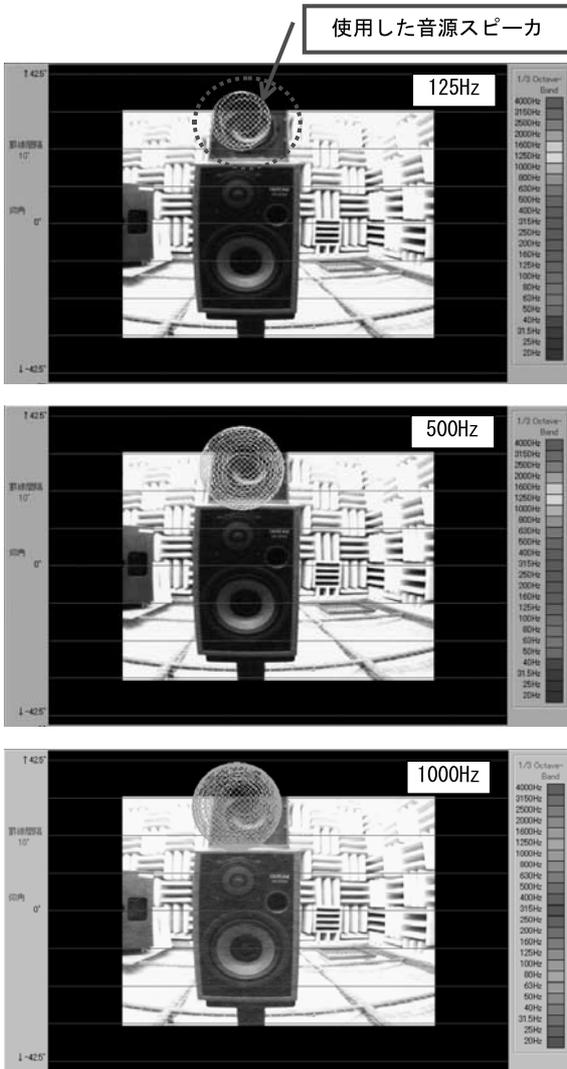


図-4 測定結果の表示例 (屋外: 空調室外機)

隔は各々 35 mm とし, 解析可能周波数の上限は理論上 4,500 Hz となっている。なお, 周波数の下限は, 100 Hz としている。音源探査装置による測定結果の表示例を図-4 に示す。

### 4. 無響室における動作確認実験

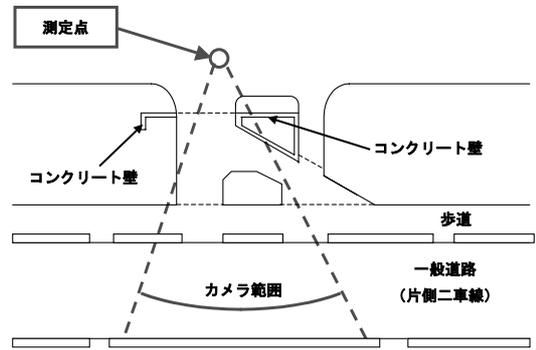
無響室内にフルレンジのスピーカをセットし, 450 mm 離れた場所に音源探査装置のマイクロホンを設置して音源方向の測定を行った様子を図-5 に示す。音源として 100 Hz ~ 4,500 Hz のスイープパルス音を用いた。音源スピーカの画像の上に音源方向を示す○印が表示されている様子から, 各周波数範囲において音源方向を正しく示していることが確認できた。



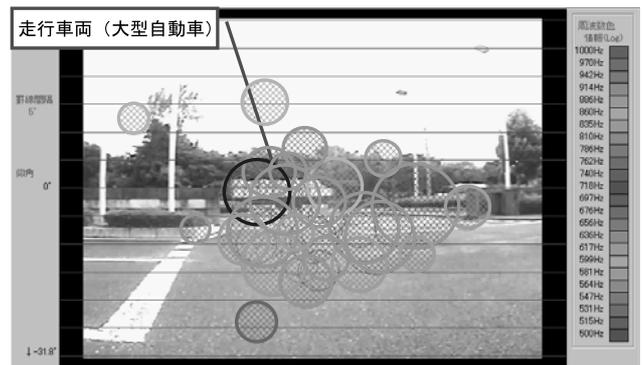
図一五 無響室におけるスピーカ音源の方向推定結果

### 5. 移動音源への適用

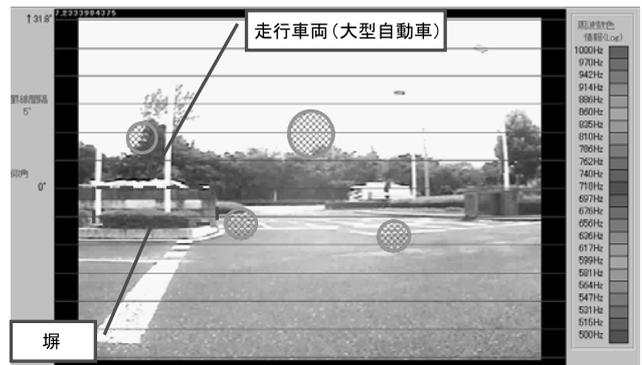
本音源探査装置は、道路交通騒音のように移動する音源に対応するため、測定結果を動画処理して音の発生状況の時間変化を確認することができる機能を持たせている。道路を走行する自動車に対して音源探査装置を用いて測定した例を示す。図一六に測定を行った場所の平面図を示す。大型自動車が走行した場合には、図一七に示すように大型自動車の上に音源方向を示す○印が表示される。次に、この大型自動車が、塀の背後にくると、図一八に示すように音源方向を示す○印がほとんど現れなくなり、大型自動車の走行音が塀によって遮蔽されている様子を視覚的にみることができる。次に、大型自動車が2台走行するときにも両方の自動車に音源方向を示す○印が表示されていることが図一九からわかる。なお、表示画面上で音の大きさおよび周波数帯域を指定することによって、



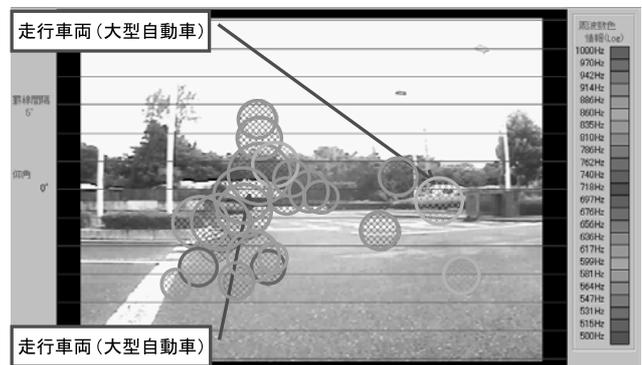
図一六 自動車走行音測定配置



図一七 大型自動車が走行した場合の表示

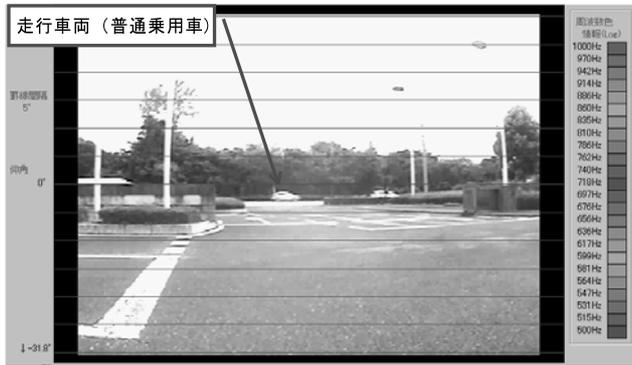


図一八 大型自動車が塀に隠れた場合の表示



図一九 大型自動車が2台走行している時の表示例

図一十に示すように、大型自動車に比べて音圧レベルの小さい普通自動車では、表示画面上で音の発生方



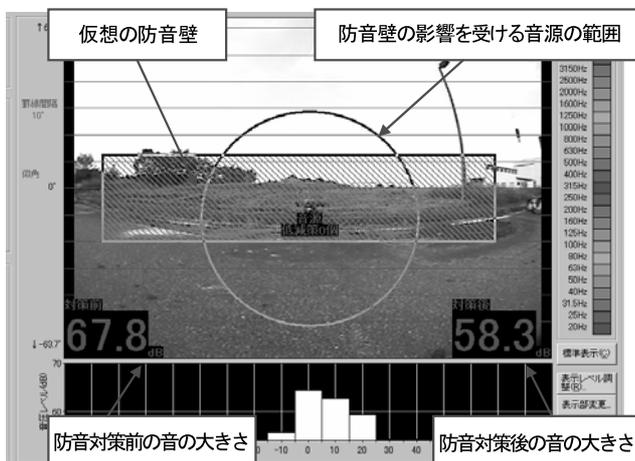
図一 10 設定した音圧レベル以下の場合の表示

向を示す○印を表示させなくすることができる。この機能を用いることによって、たとえば一定の音圧レベルより大きな音を発生させる整備不良車や不正改造車を特定することが可能となる。

### 6. 防音壁の効果の予測

従来、騒音対策を行うには、現地で詳細な騒音調査を行い、騒音源の位置や音の大きさなどの情報を把握していた。しかし、騒音源が近接してある場合には、音源の調査漏れが発生する場合があった。本音源探査装置による測定結果においては、任意の測定点における全方位の音情報を個別に記録することができるため、調査漏れの可能性が非常に小さい。この特性を利用して、本装置の測定結果を用いて防音壁による効果を予測計算することができれば非常に有用であると考えた。

さらに、従来は、防音対策の効果を計算するためには、騒音源の位置や音の大きさなどの情報を騒音予測計算プログラムに入力する必要がある、多くの手間と時間が必要であった。本装置に組み込んだ防音壁の予



図一 11 予測計算の方法について

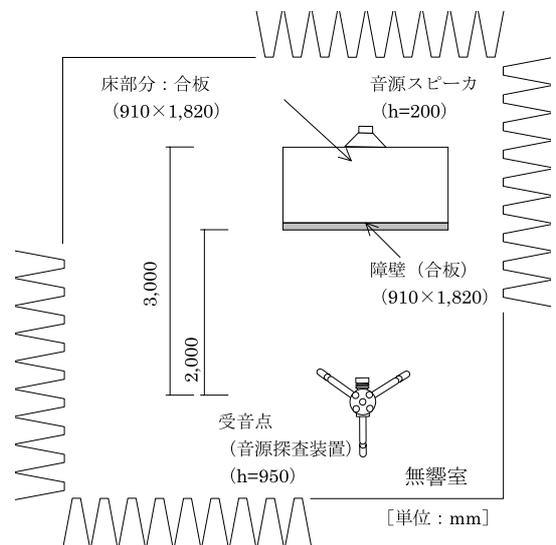
測計算機能は、測定結果の画面上において、図一 11 に示すように防音壁の影響を受ける音源の範囲や仮想の防音壁を設定し、計算に必要な数値をいくつか入力することのみで防音壁の効果を計算することができるようにしており、現地で即座に防音壁の効果を知ることができる。なお、予測計算において、有限長の防音壁による回折効果の計算は山本ら<sup>3)</sup>の提案する方法を用いた。

#### (1) 適用例

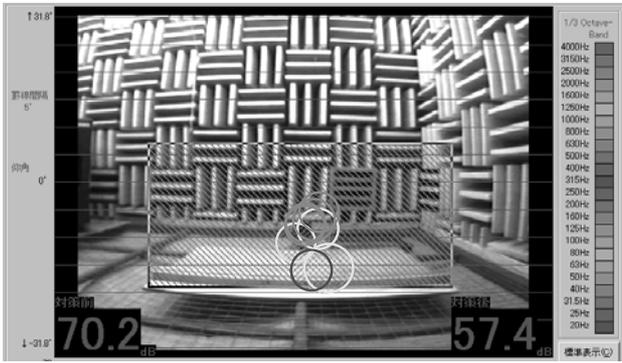
本装置を用いて防音壁の効果を予測計算した例をいくつか示す。図一 12 ~ 13 は無響室においてスピーカ音源 (白色雑音) に対して防音壁の効果を検討した事例である。防音壁は W1,820 × H9,1020 mm 厚さ 15 mm の合板を用いた。図一 14 ~ 15 は屋外に設置したコンプレッサに対して防音壁の効果を検討した事例である。防音壁としては、L 字型配置とし、W2,400 × H2,000 mm (正面) + W2,400 × H2,000 mm (右側面) の防音パネルを用いた。図一 16 ~ 17 は屋外の空調室外機に対して防音壁の効果を検討した事例である。防音壁は L 字型配置とし、W1,000 × H2,000 mm (左側面) + W2,000 × H2,000 mm (正面) の防音パネルとした。いずれも、実際に防音壁を設置した場合の実測結果と防音壁を仮定した予測計算結果の差は 1 dB 以内となり、良い予測精度を示した。

### 7. 音源探査の低周波音への拡張

音源探査装置の測定可能周波数範囲は、100 Hz ~ 4500 Hz である。近年、この下限周波数 (100 Hz) 以



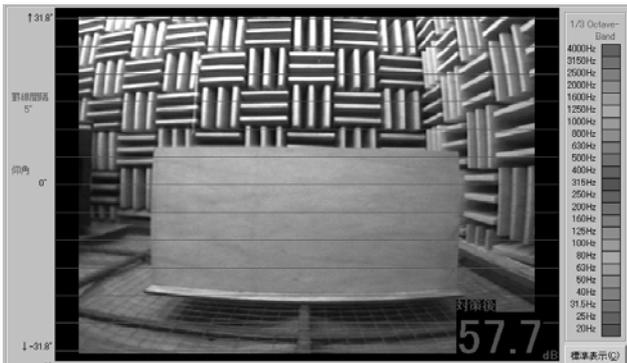
図一 12 無響室における実験 配置図



(予測計算結果)



(予測計算結果)



(実測結果)



(実測結果)

図-13 無響室における例 (スピーカ)

図-15 屋外における例 (コンプレッサ)

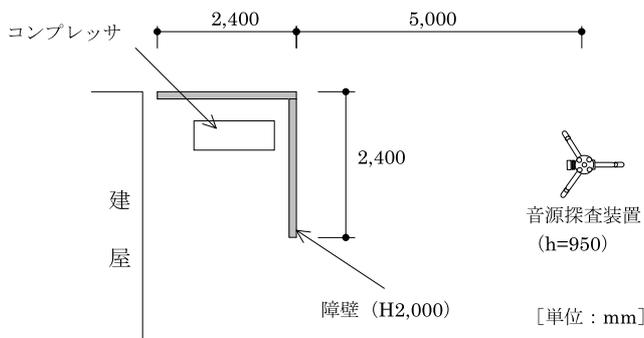


図-14 屋外における例1 (コンプレッサ) 配置図

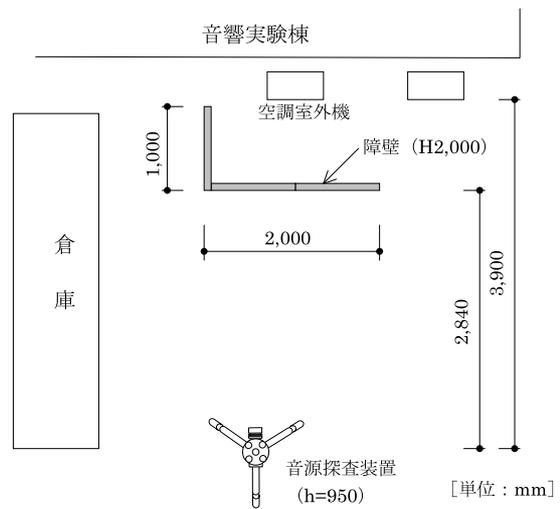
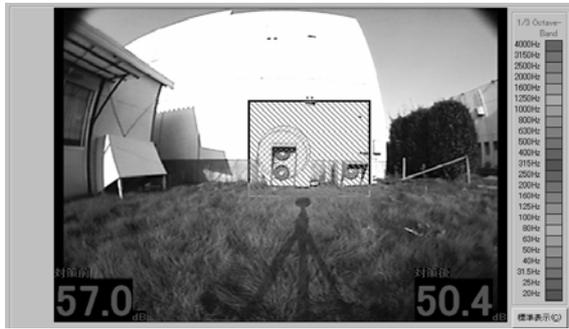


図-16 屋外における例2 (空調室外機) 配置図

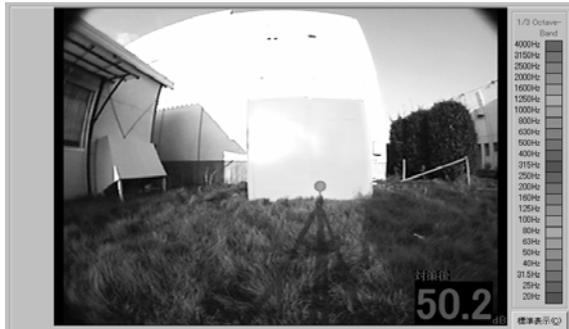
下の音源を探索できるようにするために、写真-2に示すようにマイクロホンの間隔を 300 mm とした装置を開発している。適用周波数範囲は、10 Hz ~ 550 Hz としている。無響室における実験の様子を写真-3に示す。図-18に低周波音発生用スピーカから 16 Hz の正弦波を発生させ、音源の方向を示す○印が表示されている様子を示す。さらに、防音建屋内に低周波音発生用スピーカを設置し、20 Hz の正弦波を発生させた時の測定結果を図-19に示す。防音建屋の扉開口部付近に音源の発生方向を示す○印が表示されていることがわかる。

### 8. まとめ

本装置を用いて、可聴音域や低周波音域における音源の方向、音圧レベル、周波数帯域を特定することができることを無響室および屋外実験によって示した。本装置は、屋外の移動音源 (大型自動車) の追跡や騒音防止対策にも適用できることを示した。本装置は防音壁の遮音効果の予測機能を付加しており、騒音源の調査から騒音防止対策として防音壁の検討まで現地で

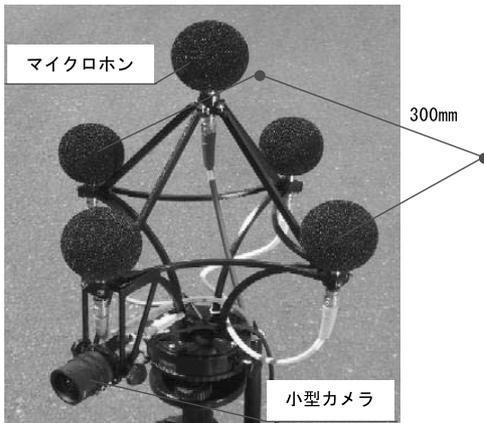


(予測計算結果)



(実測結果)

図一 17 屋外における例 (空調室外機)



写真一 2 マイクロホン・小型カメラ

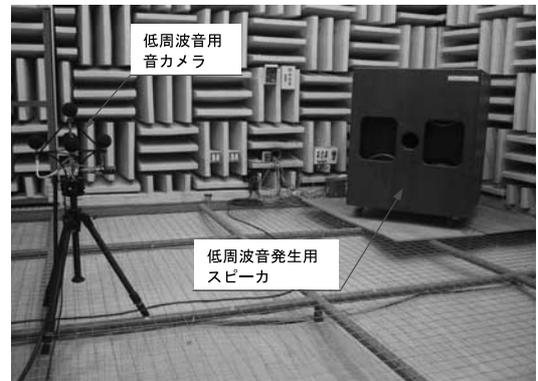
一貫して行うことができる。しかし、現在の装置では、同じ周波数で音圧レベルが同程度の音源が多数ある場合や建物壁面等で音が反射する場合には、1回の測定で音源方向を正しく表示できないため、複数の測定点で測定を行い、音源位置を工学的に判断する必要がある。

本装置の開発は、中部電力㈱、㈱熊谷組、信州大学工学部山下研究室の3者が共同で行っているものである。

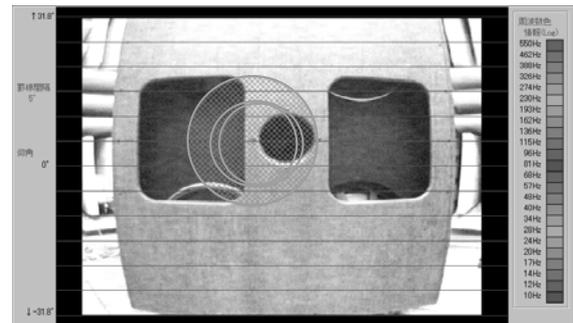
JCMA

【参考文献】

- 1) 上明戸昇・山下恭弘・財満健史・大脇雅直・杉山武・澤克紀：倍音を含む純音性音源の方向推定に関する検討—誤差要因の基礎的検討—, 日本建築学会計画系論文集, [542], pp.15-21 (2001.4)
- 2) 野上英和・上明戸昇・山下恭弘・大脇雅直・財満健史・杉山武・和田



写真一 3 無響室における実験



図一 18 無響室における実験結果 (16 Hz 正弦波)



図一 19 防音建屋の音源方向の表示 (20 Hz 正弦波)

浩之：音情報と画像を組み込んだ音源探索システムの開発—5チャンネル音源探索装置の開発—, 日本音響学会講演論文集, pp.857-858 (2001.10)

- 3) 山本貢平・堀田竜太・高木興一：有限長障壁に対する音の回折効果の計算方法について, 日本音響学会誌 50 [4], pp.271-278 (1994.4)

【筆者紹介】



大脇 雅直 (おおわき まさなお)  
 ㈱熊谷組  
 技術研究所  
 居住環境研究部  
 部長



中島 潤二 (なかじま じゅんじ)  
 中部電力㈱  
 発電本部  
 土木建築部建築グループ  
 専門課長