

招待論文 音源探査装置の開発とその活用

Development and its utilizing method of the equipment which can search the position of a sound source and display visually

和田浩之*, 大脇雅直**, 山下恭弘***

Hiroyuki Wada, Masanao Owaki, Yasuhiro Yamashita

*中部電力(株) 電力技術研究所土木建築グループ (〒459-8522 愛知県名古屋市緑区大高町北関山 20-1)

** 博士(工学), (株)熊谷組技術研究所建設技術研究部音環境研究グループ (〒162-8857 東京都新宿区津久戸町 2-1)

*** 工博 信州大学教授, 工学部社会開発工学科 (〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1)

It is very difficult to discover from which machine sound has come out of many machines. Then, we developed the equipment which can search the position of a sound source and display visually. In this paper, we explain the principle of the equipment which can search the sound source position. Next, the following three items were examined using the equipment which can search this sound source position. 1) The attenuation effect of the sound by diffraction of a sound isolation wall. 2) How to presume a sound source position under the influence of reflected on the ground surface. 3) How to display correctly the sound source position of the car which is moving.

Key Words: sound source inquiry equipment, noise propagation, moving sound source, cross spectrum

キーワード: 音源探査装置, 騒音伝搬, 移動音源, クロススペクトル

1. はじめに

騒音の音響パワーレベルの卓越周波数が低音域にある場合, 音源の指向性が低く音源位置の特定が困難である場合が多い。音源の位置を特定する方法については, いくつかの研究が行われている。山田, 牧野, 林は航空機の位置判別に音源探査手法を用いる研究を行い, 広帯域のノイズ性音源について位置の推定が可能であることを示した¹⁾。また, 三輪, 芝山, 王はMUSIC法を用いて音源方向を推定するアルゴリズムについて検討を行っている²⁾。山室, 春日井, 上杉は, トランス音源の方向推定を試み, 周囲の反射の少ない条件において方向推定が可能であることを示している³⁾。山崎等は近接4点法と一般化調和解析を合わせた音源の位置推定法について検討を進めている^{4), 5)}。しかし, 航空機騒音に対してなど, 一部に音源探査装置として実用化されているものの, より精度の高い音源探査を目指して検討している段階であり, 一般的な手法として確立しているとはいえない。

また, 電気音響や音声処理の分野でも音源方向の推定⁶⁾や複数音源の分離方法についての研究^{8), 9)}が行われている。しかし, これらの研究は, 音源近傍や室内などスケールの小さい範囲内で高い精度を追求するもので, 音源としては, 音声を対象としているものが多い。

筆者らは, 現在, 簡易な操作により音情報と画像を組み合わせた音源位置の探査装置の開発を進めている^{10), 11), 12), 13), 14), 15)}。この装置は, 音情報と画像を同時に記録する事

で, 音の到来方向を視覚的にわかるようにしている。さらに, 短時間で音情報と画像を時系列上に示し, 画像上の音源を簡単に確認できるようにしていることである。

本報では, 6本のマイクロホンを用いて, 無響室及び屋外で壁の設置効果の可視化を検討した結果, 移動する音源に適用した結果, さらに, 音源の解析周波数範囲を拡張するためにマイクロホンの数を5本とした装置を用いて検討した結果を示す。次に, これまでの検討から, 地表面の反射や音源が複数あると音源位置を正しく推定できない場合があることが分かってきている。そこで地表面による反射音の経路を物理的に遮蔽することで, 反射音による干渉が原因で生じる推定方向の誤差を低減させる方法について, 実験的に検討をおこなった結果について報告する。

2. 方向推定式

音源位置を計算するために用いる6個のマイクロホンの位置関係を図-1に示す。 $M_1 \sim M_6$ はマイクロホン, L はマイクロホン間の距離(m)とする。この時, 水平角 θ (°)及び仰角 ϕ (°)は, 以下のように表される。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{D_{35}}{D_{24}} \quad \dots (1)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{D_{16}}{\sqrt{D_{24}^2 + D_{35}^2}} \quad \dots (2)$$

但し, D_{ij} は, 図-1において M_i に対する M_j の時間の遅れ

(sec)であり、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角情報 Ψ (rad)から求める。なお、 f は周波数とする。

$$D_{ij} = \frac{1}{2\pi f} \psi[P_{ij}(f)] \quad \dots (3)$$

(1), (2)式は、音源と受音点間で平面波が仮定でき、マイクロホン間の距離を半波長とする周波数以下で成立する。

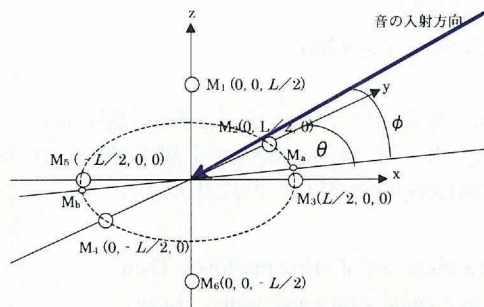


図-1 マイクロホンの位置関係

3. 音源探査装置の構成

音源探査装置のシステム構成を図-2に示す。マイクロホンの間隔を20cmとして、850Hzまで解析できるようにした。A/D変換は、多チャンネルA/Dカードを使用し、サンプリング周波数は、10kHzとした。なお、チャンネル間変換速度が10μsecあるため、解析時に時間の補正を行っている。また、ローパスフィルタは、遮断周波数1.6kHz、40dB/octとした。

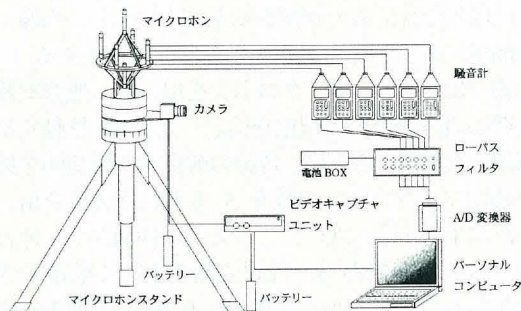


図-2 システム構成

4. 壁による遮音効果の可視化

4-1 無響室実験概要¹⁶⁾

無響室に、図-3に示すように音源、受音点及び遮音壁を設置する。なお、音源スピーカは設定A、設定Bの2パターンとした。遮音壁は、厚さ22mmの合板で、横1,820mm×高さ1,820mmである。音源は、2kHz以下のM系列信号を用いた。解析は、FFTデータ長512個、平均回数64回として、最大値から50個以内を選択した。

4-2 装置画面による検討

壁の有無による装置画面の結果を図-4, 5に示す。図中にプロットされている点は、クロススペクトルの位相角から時間差を計算して求めた音源の推定方向である。設定Aにおいては、壁の無い状態ではスピーカの位置に点がブ

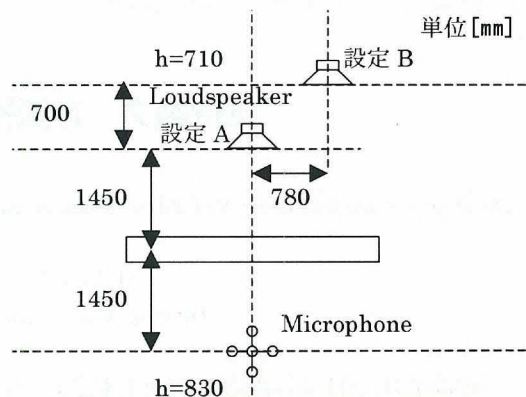


図-3 音源、受音点と遮音壁の配置

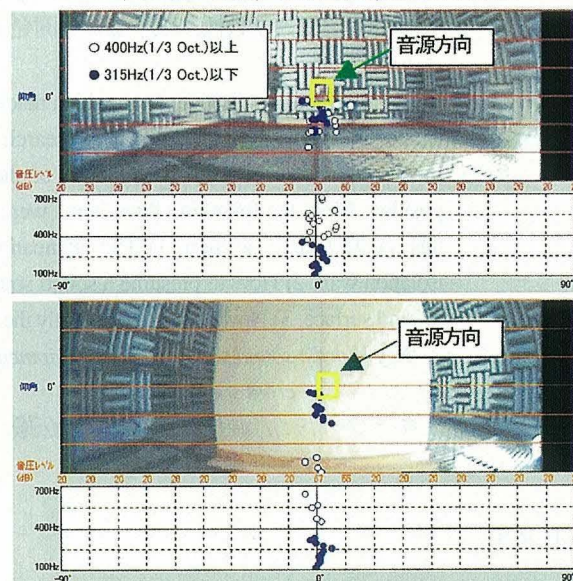


図-4 設定Aの装置画面結果(上:壁なし, 下:壁あり)

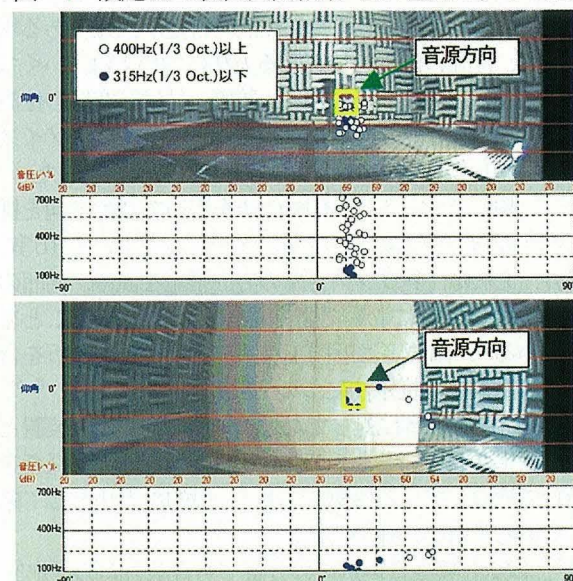


図-5 設定Bの装置画面結果(上:壁なし, 下:壁あり)

ロットされる。しかし、壁の設置により、低周波数帯域は壁の中央にプロットされるが、400Hz(1/3 Oct.)帯域以上では、壁の下方から音が到達していることがわかる。設定Bにおいては、壁の設置により200Hz(1/3 Oct.)帯域以上の周波数の音は壁の端部側に到達方向が変わっており、壁によ

る音波の回折が可視化されている。

4.3 屋外実験概要¹⁷⁾

測定点の配置を図-6に示す。合板で幅20m、高さ0.83mの遮音壁を設置した。遮音壁の幅を20mとし、中央で測定する事により、音の遮音壁上部からの回り込みに対し、両端からの回折の影響が、無視できるようにした。地面からの反射の影響を小さくするために、マイクロホン、音源スピーカーは、地面に近い位置にセットした。なお、音源は、2kHz以下のM系列信号を用いた。

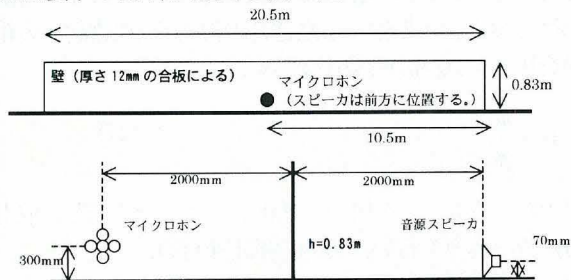


図-6 測定配置（上：マイクロホン側からみた場合、
下：透過断面からみた場合）

4.4 装置画面による検討

遮音壁の有無による周波数特性の違いを図-7に示す。図-8の装置画面に450Hz以下を●、450Hz以上を○で示し、図-7中にも同じ点をプロットしている。図-8において遮音壁が無い時には、スピーカーの方向を示す結果が

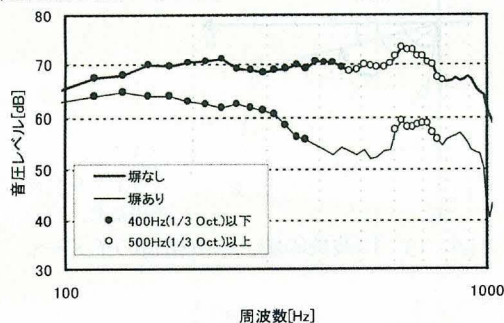


図-7 マイクロホンM₁における周波数特性

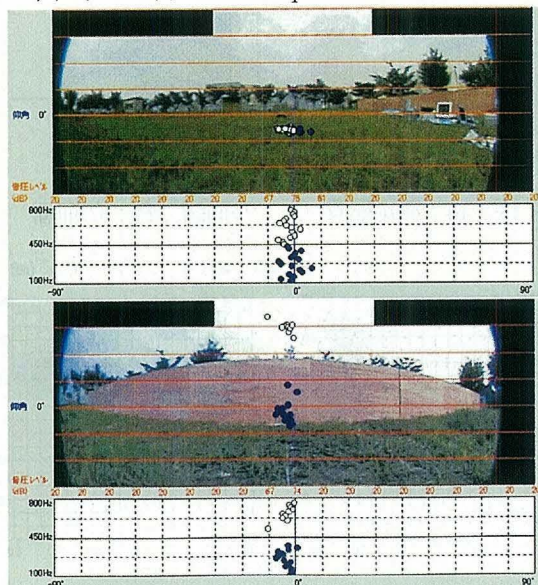


図-8 装置画面結果（上：遮音壁なし、下：遮音壁あり）

得られているが、遮音壁がある場合は、音の到来方向が2つに分かれる結果となっている。計算式(1)、(2)は、周波数毎に最もレベルの高い方向を算出する。このため、低い周波数帯域は、壁からの透過音を示し、高い周波数帯域は、質量則により透過経路が遮断され、壁の上部からの回り込み音が卓越していることを示している。これは、壁の遮蔽効果を可視化できていると考える。

5. 移動音源への適用¹⁸⁾

屋外における実験の配置を図-9に示す。測定場所として周辺に反射物が少ない地点を選んだ。音源は、中型トラックを用い、走行車線の中央から測定までの距離は、11m、マイクロホンの高さは、92cmとした。動画は、10フレーム/secで取得し、対応する音情報のデータ数(FFTデータ数8,192個)の中央に各画像が対応するように配置する。各コマ画像と分割した音情報を1組として解析をおこなう。図-10に音情報と画像の対応例を示す。

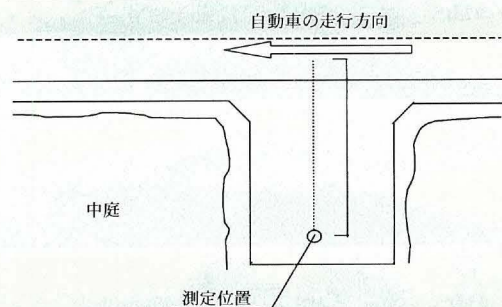


図-9 実験配置図

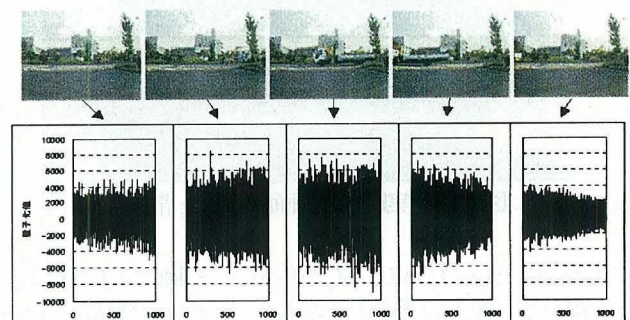


図-10 音情報と画像の対応例

解析結果を図-11に示す。これは、自動車が30km/hで走行し、音圧レベル45dB以上を表示している画面である。エンジン音の卓越周波数である250Hz帯域に着目した解析結果を図-12に示す。これを見ると、エンジン部分を中心に分布していることがわかる。移動音源に対しても、表示する周波数範囲を適切に選定すれば、音源位置を表示できる可能性があることを示している。

6. 5本のマイクロホンを用いた音源探索装置

屋外環境を考慮し、測定対象周波数を拡張し、さらに現場での移動を考慮して小型・軽量化を図るため、6本のマイクロホンを5本とし、マイクロホン間隔を35mmと

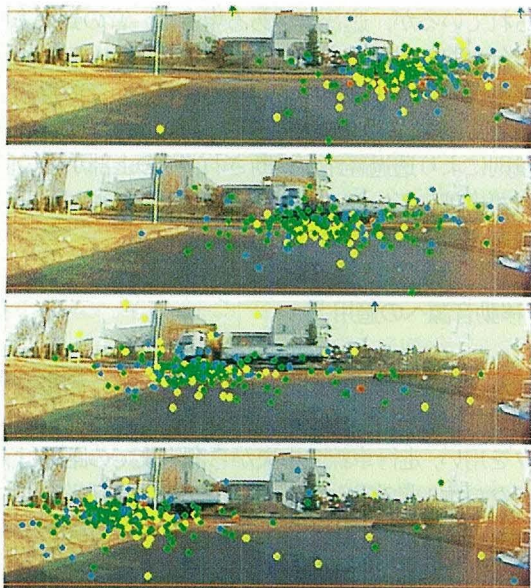


図-11 実験結果画面 (100~850Hz)



図-12 実験結果画面 (250Hz 帯域)

する。図-1において、 M_1 から M_5 の5個のマイクロホンを用いて音源方向を推定する場合、水平角及び仰角は以下のように表される。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{D_{35}}{D_{24}} \quad \dots (4)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{D_{12} + D_{13} + D_{14} + D_{15}}{2\sqrt{3} \cdot \sqrt{D_{24}^2 + D_{35}^2}} \right) \quad \dots (5)$$

これによって、小型化でき、かつ解析周波数の上限を4kHz(1/3Oct.)帯域まで拡張できる。

7. 地表面による反射の影響

7.1 地表面の音響特性を考慮した補正フィルタによる反射音の影響の低減¹⁹⁾

地表面からの反射音をキャンセルするフィルタを作成し、取得信号に畳み込みを行うことで、地表面からの反射

音の影響を低減する手法について検討する。周波数領域上の位相角のイメージを図-13に示す。地表面の音響特性を考慮した補正フィルタの位相補正值 $\Delta\theta$ は、地表面の騒音伝搬計算(22)による受音点における複素音圧振幅 ϕ 、直達音の複素音圧振幅 ϕ_1 の偏角を用いて式(6)から算出できる。

$$\Delta\theta = \arg\phi - \arg\phi_1 = \theta - \theta_1 \quad \dots (6)$$

振幅補正係数 β は、地表面の騒音伝搬計算による受音点における複素音圧振幅 ϕ と直達音の複素音圧振幅 ϕ_1 の絶対値を用いて式(7)から算出できる。

$$\beta = \frac{|\phi_1|}{|\phi|} \quad \dots (7)$$

以上から $\Delta\theta$ 、 β を用いて補正フィルタを作成し、取得信号に畳み込みを行い、方向の推定を行う。

(1) 実験概要

測定の配置を図-14に示す。音源は、草地に組んだ足場の上に設置した。音源は、M系列信号を用い、100Hz~800Hz間について解析を行った。なお、草地であるため、通気抵抗 σ は300cgs rays/cmを与えた。

(2) 検討結果

補正を行う前の推定結果と補正を行った後の推定結果を、水平角、仰角 10° 毎の音圧レベル和にしてコンタ表示し

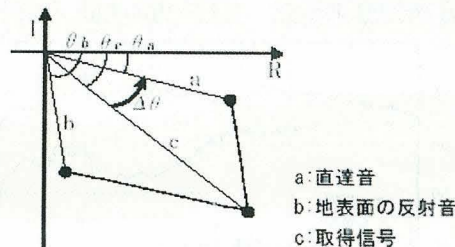


図-13 周波数領域上の位相角のイメージ

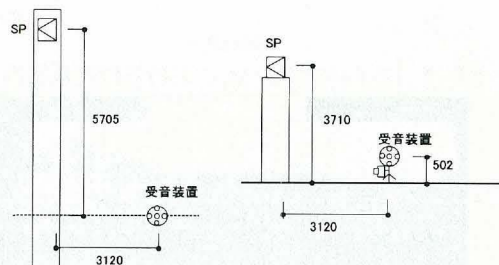


図-14 測定配置 (左: 平面図, 右: 立面図)

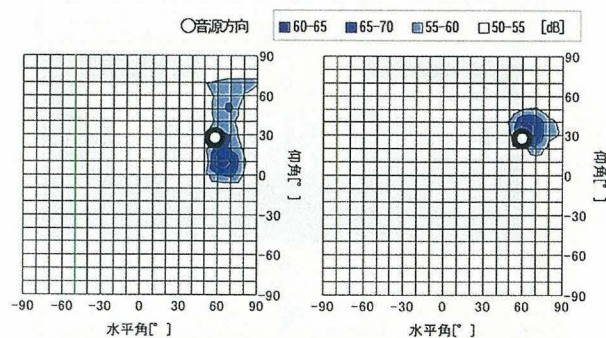


図-15 音圧分布 (左: 補正前, 右: 補正後)

たものを図-15 に示す。補正前には音源位置が仰角方向に広く分布していたが、補正後は、分布の中心部に音源位置が来ていることが確認できる。このことから、地表面の音響特性を考慮した補正フィルタが有効であることが示された。

7.2 パッシブな制御による反射音の影響の低減^{20), 21)}

地表面の音響特性を考慮した補正フィルタは、音源位置を事前に想定して計算しておく必要がある。従って、移動する音源や距離が特定できない音源に対しては、有効な方法ではない。そこで、図-16 に示すように、経路 A を直達音、経路 B を地表面からの反射音とした時に、反射音の経路を物理的に遮蔽することで直達音と反射音の干渉によって生じる誤差を低減させる方法を検討する。

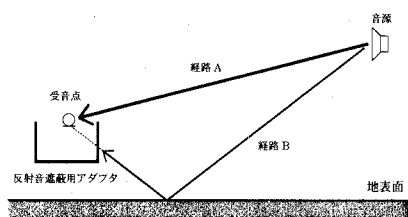


図-16 物理的な反射音の遮蔽イメージ

(1) 実験概要

図-17, 18 に示すように、無響室内に音源、床の反射面、受信点を配置する。実験は、床面に反射面として合板(1,670mm×1,800mm×12mm)を設置した時と設置しない時、及び、図-19 に示す地面反射遮蔽アダプタ(以下アダプタと略す)を装着した時と装着しない時について行った。音源は、100Hz～4,000Hz のピンクノイズを用いた。

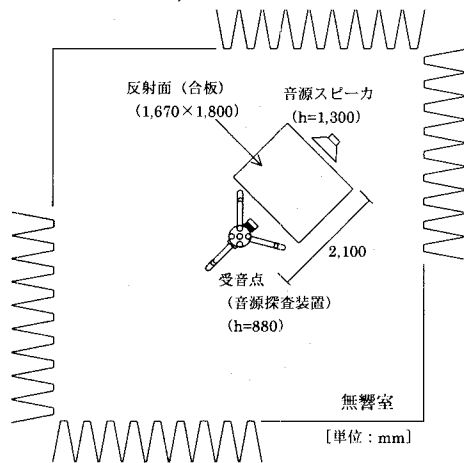


図-17 実験配置平面図

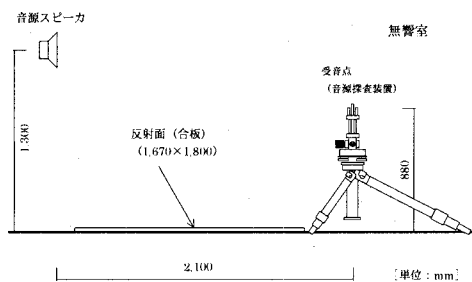


図-18 実験配置立面図

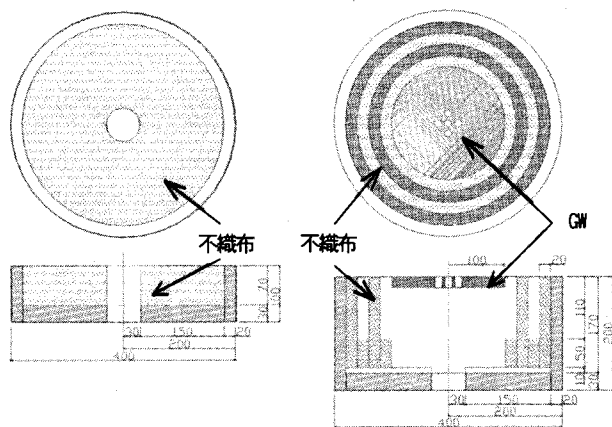


図-19 地面反射対策用遮蔽アダプタ

(2) 検討結果

アダプタを装着しない時の受信点における周波数特性を図-20 に示す。反射板がある場合には、直達音と反射音の干渉によって振幅にディップが周期的に生じている。このディップの部分に音源方向の推定に誤差を生じさせている。そこで、このディップ部分を含む 1,000Hz 帯域(1/1 Oct.)について解析を行う。反射板無しの場合の推定結果を水平角、仰角 10° 毎の音圧レベル和にしてコンタ表示したものを図-21～23 に、反射板有りの場合の推定結果を同様に図-24～26 に示す。反射板を床に設置した時は、アダプタを装着しない場合やアダプタ 1 では、仰角の推定誤差が 20° 程度有るが、アダプタ 2 では、5° 程度の誤差となっていた。このことから、地表面による反射の影響を物理的に除去するためには、①アダプタ内の吸音率が大きいこと②アダプタに扉の遮蔽効果を持たせることが反射音の影響の低減に有効であることがわかる。

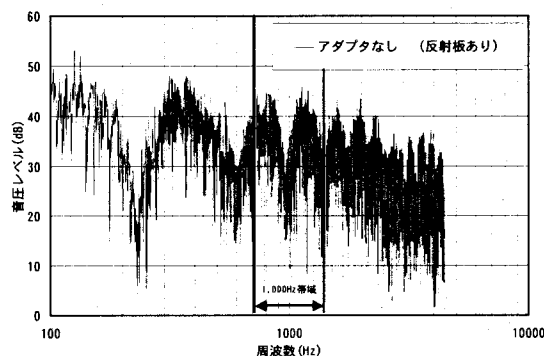
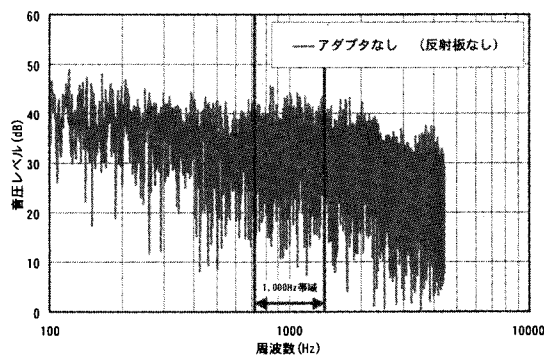


図-20 周波数特性 (アダプタなしの場合)

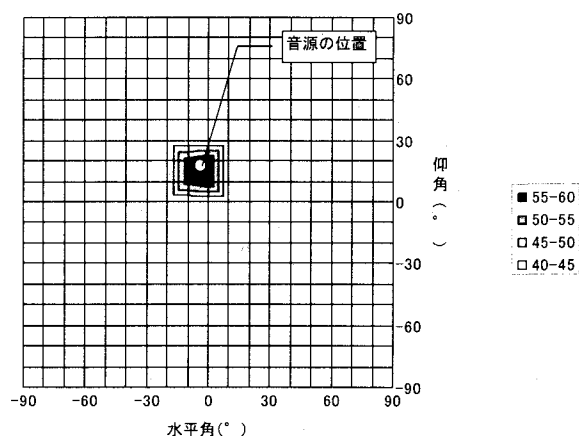


図-21 実験結果 アダプタなし（反射板なし）

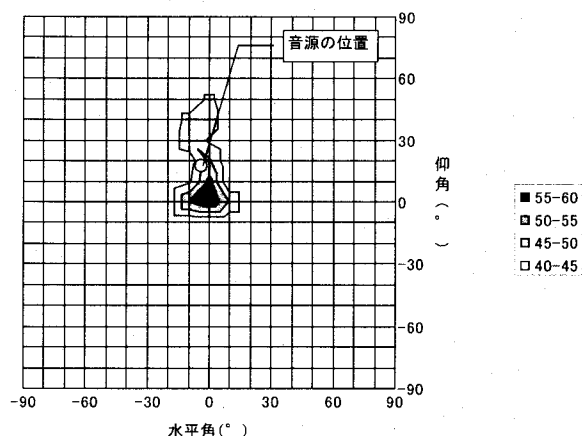


図-24 実験結果 アダプタなし（反射板あり）

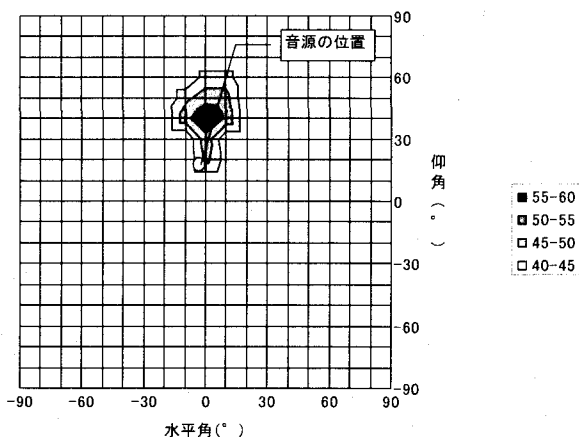


図-22 実験結果 アダプタ 1（反射板なし）

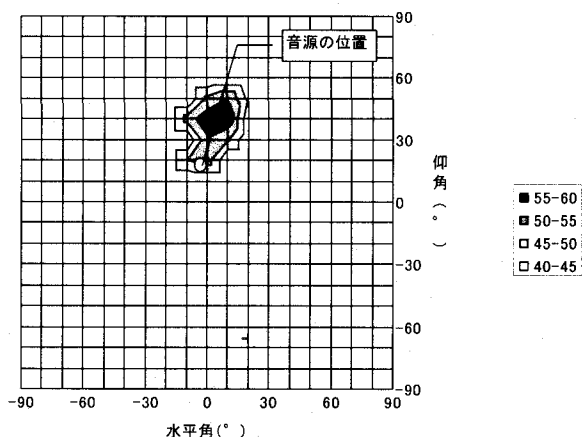


図-25 実験結果 アダプタ 1（反射板あり）

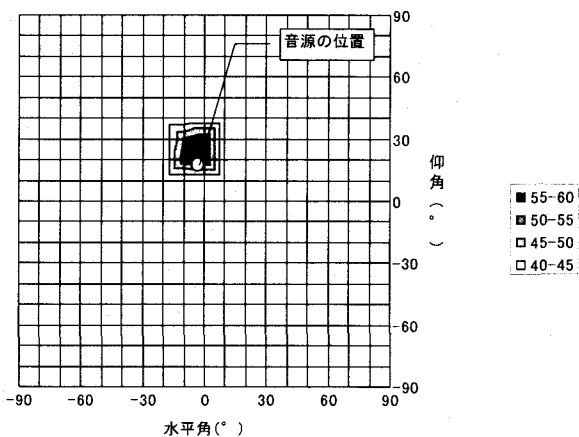


図-23 実験結果 アダプタ 2（反射板なし）

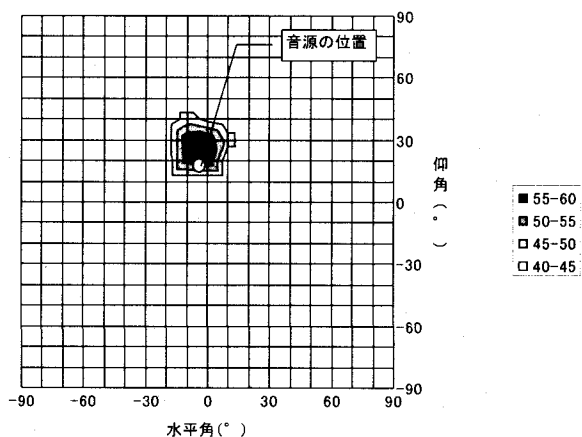


図-26 実験結果 アダプタ 2（反射板あり）

8. 音源探査装置の活用

本稿では、まず音源の位置を特定するために3次元での音源方向推定式を導出し、実験を行い、実用的な方向推定ができることを確認した。近年、土木建築分野において音環境に配慮し、防音対策として遮音壁を設置する事例が増加している。音源探査装置を用いることで、壁の遮音効果を視覚的に把握できることを示した。次に、交通騒音の把握のため、移動音源を評価する可能性について示した。

さらに、反射音の影響を低減させるため、地表面の音響特性を考慮した補正フィルタ処理、パッシブ制御による反射音の低減方法について検討した。今後、音源探査装置の活用が期待される分野としては、遮音壁の効果の確認や交通騒音評価だけでなく、構造物の劣化診断（タイルやモルタルの剥離等）などが考えられる。さらに音源の探査精度を向上させ、土木建築分野での活用を図っていく予定である。

謝辞：本稿をまとめるに当たって議論し、貴重な御意見を頂いた株式会社熊谷組技術研究所の財満健史氏、信州大学大学院の富永大祐氏に深謝いたします。

参考文献

- 1) 山田一郎, 牧野康一, 林範章：騒音の到来方向の3次元的な変化の検出による音源識別, 信学技報, EA90-21, 1990
- 2) 三輪基敦, 柴山秀雄, 王 輝：複数の低周波音源の到来方向の推定, 日本音響学会講演論文集, p693-694, 2001年3月
- 3) 山村誠, 春日井浩道, 上杉武弘：音源探査手法に関する検討, 中部電力研究資料(第62号), 1978年7月
- 4) 野成一郎, 田中巧, 及川靖弘, 山崎芳男：近接4点法を用いた屋外の移動音源の計測, 日本音響学会講演論文集, p489-490, 2000年9月
- 5) 山崎芳男, 清山信正, 高林和彦, 伊藤毅, 伊勢史郎：近接4点法による室内音場の時間・空間情報の把握, 日本音響学会建築音響研究会, AA88-13, 1988年6月
- 6) 福留公利：球バツフル埋込みマイクロホンとその回折情報を利用した音源の方向及びスペクトル推定, 日本音響学会誌, vol.44, no.4, 1988, p.273-301
- 7) 山中高章, 倉光拓馬, 中島弘史, 高島和博, 中川 博, 大山 宏：球バツフルマイクロホンと組み込みカメラを用いた全方位音源探査, 日本音響学会講演論文集, 2002, p.813-814
- 8) 猿渡洋：アレー信号処理を用いたブラインド音源分離の基礎, 信学技報, 2001, p.49-56
- 9) 荒木章子, Robert Aichner, 牧野昭二, 西川剛樹, 猿渡 洋：死角型ビームフォーマを初期値に用いる時間領域ブラインド音源分離, 日本音響学会講演論文集, 2002, p.543-544
- 10) 上明戸昇, 山下恭弘, 財満健史, 大脇雅直, 杉山 武, 澤 克紀：低域周波数の音源位置推定手法に関する誤差検討, 日本音響学会講演論文集, p.657-658, 2000年3月
- 11) 財満健史, 大脇雅直, 上明戸昇, 山下恭弘, 杉山 武, 澤 克紀：トランス音源を想定した場合の音源方向推定に関する検討—その1 無響室実験による反射影響の基礎検討—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p.151-152, 2000年9月
- 12) 上明戸昇, 山下恭弘, 財満健史, 大脇雅直, 杉山 武, 澤 克紀：トランス音源を想定した場合の音源方向推定に関する検討—その2 音源方向推定誤差に関する屋外実験—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p.153-154, 2000年9月
- 13) 上明戸昇, 山下恭弘, 財満健史, 大脇雅直, 杉山 武, 澤 克紀：トランス音源を想定した場合の音源方向推定に関する検討—反射物の影響に関する検討—, 日本音響学会講演論文集, p.657-658, 2000年9月
- 14) 上明戸昇, 山下恭弘, 財満健史, 大脇雅直, 杉山 武：画像情報を組み合わせた音源方向推定システムの開発—野外実験による方向推定精度の検討—, 日本音響学会講演論文集, p.689-690, 2001年3月
- 15) 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, 一誤差要因の基礎的検討—, 日本建築学会計画系論文集, No.542, p.15-21, 2001年4月
- 16) 大脇雅直, 財満健史, 上明戸昇, 野上英和, 山下恭弘, 杉山 武, 和田浩之：音源探査システムを利用した遮音効果の可視化への適用, 日本音響学会建築音響研究会資料, AA2001-25, 2001年8月
- 17) 上明戸昇, 野上英和, 山下恭弘, 財満健史, 大脇雅直, 杉山 武, 和田浩之：音情報と画像を組み込んだ音源探査システムの開発—屋外における遮音効果可視化の検討—, 日本音響学会講演論文集, p.841-842, 2002年3月
- 18) 野上英和, 上明戸昇, 山下恭弘, 大脇雅直, 財満健史, 杉山 武, 和田浩之：音情報と画像を組み込んだ音源探査システムの開発—移動音源への適用—, 日本音響学会講演論文集, p.843-844, 2002年3月
- 19) 上明戸昇, 野上英和, 富永大祐, 山下恭弘, 財満健史, 大脇雅直, 杉山 武, 和田浩之：画像に音情報を組み込んだ音源探査システムの開発—反射影響の低減に関する検討—, 日本建築学会計画系論文集, 第564号, p.1-7, 2003年2月
- 20) 富永大祐, 野上英和, 山下恭弘, 財満健史, 大脇雅直, 杉山 武, 和田浩之：音情報と画像を組み込んだ音源探査システムの開発—パッシブ制御による反射影響の低減に関する検討—, 日本音響学会講演論文集, p.889-890, 2003年3月
- 21) 財満健史, 大脇雅直, 和田浩之, 富永大祐, 山下恭弘：音情報を視覚的に表示する音源探査装置の開発—地面からの反射音による影響の低減に関する検討—, 日本音響学会建築音響研究会資料 AA2003-26
- 22) 井清武弘：騒音伝搬に与える地表面の影響, 日本音響学会誌, 38巻5号, p.270-276, 1982年

(2003年9月12日受付)