マイクロホンの指向性を考慮した音源位置同定法に関する研究*

畛 田 道 雄 ** 石 川 憲 一 **

Study on Sound Source Identification Method using Microphone Directivity Pattern

Michio UNEDA and Ken-ichi ISHIKAWA

It is an extremely important matter to identify the noise sources and the noise emitted frequency, when abating the noise such as the engine noise, the machinery noise, etc. Moreover, the visualizing the noise sources is very useful for understanding the various noise problems intuitively. With these backgrounds, the previous study discussed the sound source identification methods and the visualization methods such as an acoustic holography (AH) method, a modified acoustic holography (MAH) method and a MUSIC method. However, there are few studies on the sound source identification method using a microphone directivity pattern. Nevertheless, we have to consider the directivity pattern of used microphones when we actually apply these identification methods. This paper discusses effect of the directivity pattern upon the identification error through the computation and the experimental examination when we used the AH, MAH and MUSIC methods. Furthermore, this paper proposes the identification methods which can consider the microphone directivity pattern for the AH, MAH and MUSIC methods.

Key words: sound source identification, microphone directivity pattern, MUSIC, acoustic holography

1. 結 言

各種機器や工作機械等に対する静穏性の要求が高まっている中にあって、騒音源を可視化してその位置を同定する方法に関する研究開発が各所で進められている¹⁾。音源位置同定法に関し、優位性を有すると考えられる方法として、音響ホログラフィ (Acoustic Holography: AH) 法²⁾や MUSIC 法³⁾があり、また、音響ホログラフィ法の同定精度を改善する方法として、著者らによって改良型音響ホログラフィ (Modified AH: MAH) 法⁴⁾が提案されている。これらの方法は、アルゴリズム自体は異なるものの、いずれも多数 (複数) のセンサを用いるアレー信号処理に属するものであり、各々のセンサが得る受信信号の振幅情報と位相情報をそれぞれの同定演算に用いるものである⁵⁾。

ところで、現在までに議論されている方法においては、実際に騒音を受信するためのセンサとして使用するマイクロホンは無指向性であると仮定して解析を行う場合が殆どである⁶⁾。しかしながら、使用するマイクロホンによっては、受信信号の振幅情報に関しては無指向性を示すものの、位相情報に関しては何らかの指向性を有するものが多いにも拘わらず、マイクロホンの指向性を考慮した音源位置同定法に関する検討は少ないのが現状である⁷⁾。

本研究では、MUSIC 法、並びに AH 法、MAH 法に着目し、これらの方法で用いられるマイクロホンが指向性を有する場合に、指向性を考慮して音源位置の同定計算を行う場合と考慮せずに同定計算を行う場合での同定精度を比較、検証することを目的としている。特に、本論文においては、音源から単一球面波が発せられていると仮定できる環境下において、マイクロホンの指向性を考慮して同定できる方法を示すとともに、この方法を用いた計算機シミュレーション、並びに実験を行った際に

得られた結果について言及するものである。

2. マイクロホンの指向性を考慮した受信信号と AH 法、MAH 法および MUSIC 法の概要

2.1 マイクロホンの指向性を考慮した受信信号

球面波を発すると仮定できる音源 S_k ($k: 1 \sim K$ までの自然数, K : 音源の数) から発信される音を図 1 に示すような形態を有するアレーマイクロホンによって受信する場合を考える。このとき、音源 S_k から距離 $r_{kf,m}$ にあるセンサ m ($m: 1 \sim M$ までの自然数, M : センサの数) が時刻 t で受信する音圧波形 $p_m(t)$ は、音速を c とすると、

$$p_m(t) = \sum_{k=1}^K \frac{P_k \left(t - \frac{r_{kf,m}}{c} + \phi_k \right)}{r_{kf,m}} \quad (1)$$

Fig.1 Coordinate system of array microphones and sound source

* 原稿受付 平成 17 年 2 月 21 日

** 正 会 員 金沢工業大学 (石川郡野々市町扇が丘 7-1)

で与えられる。ここで、 $P_k(f)$ は音源 S_k から発せられる単位距離での音圧、 ϕ_k は音源 S_k の初期位相に起因する伝搬遅延時間である⁷⁾。

この音圧波形を離散フーリエ変換 (DFT) することによって、周波数領域ベースでの複素フーリエ係数に対応したセンサ m ($m: 1 \sim M$) における周波数 f での複素受信信号 $R_m(f)$ が得られる。そして、 $R_m(f)$ は次式で与えられる。

$$R_m(f) = \frac{P_{kf}}{r_{kf,m}} e^{-j\frac{2\pi f}{c} r_{kf,m}} \quad (2)$$

$$r_{kf,m} = \sqrt{(x_m - x_{kf})^2 + (y_m - y_{kf})^2 + (z_m - z_{kf})^2}$$

なお、 (x_m, y_m, z_m) はセンサ m の座標、 (x_{kf}, y_{kf}, z_{kf}) は周波数 f の成分を有する音源 S_k の座標であり、 P_{kf} は音源 k の周波数 f における単位距離での音圧である。

ここで、式(2)の複素受信信号はセンサであるマイクロホンの指向性は考慮されておらず、あくまでもマイクロホンが設置されている空間位置での音圧波形を与えるものである。一方、マイクロホンの指向性として、マイクロホンへの音の入射角度に対する受信パターンは、第4章で後述するように、図1に示した仰角 θ のみに依存すると仮定できると考える。このとき、指向性 $a(\theta)$ に関し、 $A(\theta)$ を振幅パターン、 $\varphi(\theta)$ を位相パターンとして、

$$a(\theta) = A(\theta) e^{j\varphi(\theta)} \quad (3)$$

と表すとき、指向性 $a(\theta)$ を考慮したマイクロホンの複素受信信号 $R'_m(f)$ は、

$$R'_m(f) = a(\theta) R_m(f) \quad (4)$$

となる。なお、仰角 θ は

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{z_m - z_{kf}}{r_{kf,m}} \right) \quad (5)$$

として与えられる。

2.2 マイクロホンの指向性を考慮した AH 法, MAH 法および MUSIC 法

マイクロホンの指向性を考慮しない、すなわち、マイクロホンが無指向性であると仮定した従来までの AH 法や MAH 法における音源位置同定のための評価関数 $P_{AH, MAH}(x, y, f)$ は、

$$P_{AH, MAH}(x, y, f) = \left(\sum_{m=1}^M R_m(f)^H \cdot g(x - x_m, y - y_m, z - z_m) \right)^2 \quad (6)$$

として与えられる。 $g(x - x_m, y - y_m, z - z_m)$ に関しては、AH 法の場合、

$$g(x - x_m, y - y_m, z - z_m) = \frac{e^{-j\frac{2\pi f}{c} r_{g,m}}}{r_{g,m}} \quad (7)$$

$$r_{g,m} = \sqrt{(x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2} \quad (8)$$

であり、MAH 法の場合、

$$g(x - x_m, y - y_m, z - z_m) = e^{-j\frac{2\pi f}{c} r_{g,m}} \quad (9)$$

である⁴⁾。

同様に、マイクロホンが無指向性であると仮定した MUSIC 法の評価関数 $P_{MUSIC}(x, y, f)$ は、受信信号から計算される相関行列を固有値解析することで得る雑音部分空間に対応した固有ベクトルを $\mathbf{e}_n = [\mathbf{e}_{2n}, \dots, \mathbf{e}_{m_n}, \dots, \mathbf{e}_M]$ で表すとき、

$$P_{MUSIC}(x, y, f) = \frac{1}{\sum_{n=2}^M |\mathbf{e}_n^H \cdot \mathbf{a}(x, y, f)|^2} \quad (10)$$

$$\mathbf{a}(x, y, f) = [a_1(x, y, f) \ a_2(x, y, f) \ \dots \ a_M(x, y, f)]^T \quad (11)$$

$$a_m(x, y, f) = \frac{1}{r_{g,m}} e^{-j\frac{2\pi f}{c} r_{g,m}} \quad (12)$$

で与えられる⁴⁾。

ところで、いずれの方法においても受信信号の振幅情報と位相情報を用いて音源位置の同定計算を行うものであるが、特に位相情報は同定精度に及ぼす影響が大きいことが明らかにされている⁸⁾。ここで、使用するマイクロホンが指向性を有すると仮定すると、受信する音の入射角度によってもマイクロホンが出力する信号の振幅・位相成分は変化する。このことから、AH 法、MAH 法、MUSIC 法のそれぞれを用いて音源位置の同定を行う場合、式(6)~(12)までに示した無指向性のマイクロホンを使用するとして従来方法においては、実際にはマイクロホンが有する指向性に起因した振幅・位相情報の変化によって、同定精度は低下すると考えられる。

ここで、それぞれの従来方法における評価関数に関して、AH 法では式(7)を

$$g(x - x_m, y - y_m, z - z_m) = \frac{a(\theta) e^{-j\frac{2\pi f}{c} r_{g,m}}}{r_{g,m}} \quad (13)$$

とし、MAH 法では式(9)を

$$g(x - x_m, y - y_m, z - z_m) = a(\theta) e^{-j\frac{2\pi f}{c} r_{g,m}} \quad (14)$$

とし、また、MUSIC 法では式(12)を

$$a_m(x, y, f) = \frac{a(\theta)}{r_{g,m}} e^{-j\frac{2\pi f}{c} r_{g,m}} \quad (15)$$

とするように、指向性を考慮した評価関数を設けることによって、たとえ指向性を有するマイクロホンを用いた場合であっても、無指向性のマイクロホンを用いて式(6)~(12)による同定計算を行う場合と同等の精度を有する音源位置同定を行い得ると考えられる。

3. マイクロホンの有する指向性が音源位置の同定精度に及ぼす影響に関する計算機シミュレーション

マイクロホンが指向性を有する場合として、図2、並びに式(16)で与えられるように、位相情報が仰角に対して線形となる指向性を有する場合を考え、振幅情報に関しては、無指向性を有するものと仮定する。すなわち、

$$a(\theta) = A(\theta) e^{j\varphi(\theta)} = e^{j\alpha\theta} \quad (16)$$

である。なお、 α は指向性の強さを表す係数であり、 $\alpha = 0$ の場合が無指向性となる。また、 $\alpha < 0$ の場合が音波のマイクロホンの通過による位相遅延、 $\alpha > 0$ の場合が位相回転 (進延) を意味するものである。なお、表1に主なシミュレーション条件を示す。

図3はマイクロホンが $\alpha = 1$ となる位相指向性を有する場合に関して、点(100mm, 100mm, 1000mm)にある音源の位置をマイクロホンの指向性を考慮しない従来の方で同定した結果 (図3(I))、並びに指向性を考慮して同定した結果 (図3(II)) であり、

Fig.2 Model for simulation of effect of microphone directivity pattern on identification characteristics

Table 1 Computer simulation conditions

Array sensor	Uniformly square array
Aperture center of array sensor	(0mm, 0mm, 0mm) (in origin)
Number of sensors	2×2
Distance between sensors	300mm
Snap shot	4000
Number of sources	1
Frequency of source	1000Hz
Location of source (x, y, z)	x = y = 0mm to 200mm in 25mm step z = 1000mm
Signal to noise ratio	30dB
Coefficient of directivity pattern α	-1 to 1

評価関数の分布を等高線表記したものである。なお、図 3(I), (II) の双方において、(a) AH 法、(b) MAH 法、(c) MUSIC 法の結果

を示しており、いずれの図においても評価関数の最大値を基準 (=0dB) とする dB 単位で表記した。すなわち、等高線間隔 (ダイナミックレンジ) が広いほど分解能は高く、音源同定を行う上で重要であることを意味している。また、各図においてのプロット (+) は真の音源位置であり、その近傍にある小さな円あるいは点は音源同定位置である。

これらの結果から、評価関数の計算に位相情報に基づいたマイクロホンの指向性を考慮しない通常の同定方法の場合にあっては、いずれの方法でも同定位置は真の音源位置から離れていることが分かる。一方、指向性を考慮した方法において、MAH 法、並びに MUSIC 法においては真の音源位置の近傍に評価関数のピークが現れており、正確な音源位置同定を行えていることが分かる。また、AH 法においては、レーザホログラフィ法の原理を利用していることに起因した評価関数に考慮される距離情報 (式(7)における r_{gm}) によって同定精度は低下する⁴⁾ことから、たとえ指向性を考慮した場合であっても、真の音源位置近傍に評価関数のピークが現れないものと考えられる。

ここで、等高線間隔に起因した音源同定分解能に着目すると、AH 法や MAH 法においては指向性を考慮しない場合と考慮した場合では殆ど等高線間隔に差違は見られないことから、分解能も殆ど変化は無いと考えられる。一方、MUSIC 法においては指向性を考慮しない場合 (図 3(I)-(c)) と考慮した場合 (図 3(II)-(c)) で等高線間隔に大きな差違が見られ、指向性を考慮した場合の方が格段に分解能、並びに同定精度が高いことが分かる。

図 4 は本シミュレーションにおける指向性係数 α が音源位置の同定精度に及ぼす影響を計算した結果であり、図 4(a) が AH 法、図 4(b) が MAH 法、図 4(c) が MUSIC 法の場合をそれぞれ示している。これらの結果から、(a)AH 法の場合にあっては、前述

Fig.3 Contour diagrams of cost function by acoustic holography (AH), modified acoustic holography (MAH) and MUSIC methods when microphones have directivity pattern at coefficient α of 1 (Intervals of contour lines are 0.5dB in AH and MAH methods, and 5dB in MUSIC method. Peak level of contour lines are 0dB in all figures.)

(a) AH method

(b) MAH method

(c) MUSIC method

Fig. 4 Effect of microphone directivity pattern coefficient α on sound source identification accuracy in AH, and MAH and MUSIC methods (Location of source (x, y) is (100mm, 100mm).)

の通り評価関数に含まれる距離情報の影響によって、たとえ無指向性のマイクロホンを使用した場合でも音源同定位置が真の位置から離れる傾向にある⁴⁾。このことから、指向性を有するマイクロホンを使用して評価関数に指向性の項を考慮した場合であっても、同定位置は真の位置から離れると考えられる。一方、MAH法、MUSIC法の場合にあっては、無指向性のマイクロホンを使用した場合において正確な音源同定を行えることが既報において明らかにされている⁴⁾、そして、図4(b), (c)から、指向性を有するマイクロホンを使用する場合であっても、評価関数に指向性を考慮することによって、正確な音源同定を行えるという結果が得られていることが分かる。

図5はMUSIC法の場合において同定分解能に及ぼす指向性係数 α の影響を検討した結果である。なお、ここでは同定分解能としては、同定ピーク (=0dB) に対して、ピークの位置からX軸方向に10mm離れた場所での評価関数の値として評価するものとし、その値が小さいほど(値の絶対値が大きいほど)、同定のピークは明瞭であり分解能は高いことを意味している。この結果から、 α の絶対値が大きくなることによって、指向性を考慮せずに評価関数を計算する通常の方法の場合には、分解能は大きく低下していることが分かる。

このように、実際のマイクロホンは指向性を有していながら評価関数に指向性を考慮しない場合に同定精度や分解能が低下することについては、アレーマイクロホンに振幅・位相の偏差がある場合と等価となる現象を生じるためであると考えられる。

Fig. 5 Effect of microphone directivity pattern coefficient α on sound source identification resolution in MUSIC method

Fig. 6 Effect of location of sound source on identification accuracy in MUSIC method

すなわち、前報⁸⁾で示したとおり、アレーマイクロホンに位相差がある場合には、同定精度や分解能は低下するという結果が得られており、位相情報に基づいた音源位置同定を行うアルゴリズムにとって、マイクロホンの有する指向性を考慮することは非常に重要であると考えられる。

図6は $\alpha=1$ とする場合において、音源位置の変化が同定精度に及ぼす影響を計算した結果である。この結果から、指向性の項を考慮しない場合、音源位置が原点、すなわちアレーマイクロホンの開口中心の延長上にある場合には真の位置に同定できている一方、開口中心の延長上から離れるにしたがって、同定精度は低下していることが分かる。音源位置が原点にある場合、マイクロホンに入射する音波の仰角 θ はすべてのマイクロホンで等しいことによって、たとえ指向性を評価関数に考慮しなくてもマイクロホン間の位相差から音源位置を同定する方法にとっては、指向性の影響を受けなかったものと考えられる。一方、音源位置が原点から離れるにつれて、それぞれのマイクロホンに入射する仰角 $\theta_1 \sim \theta_4$ は変化し、指向性に関連した最大位相偏差 (=max($\theta_1 \sim \theta_4$) - min($\theta_1 \sim \theta_4$)) が増大することによって、このような結果になったと考えられる。また、評価関数に指向性を考慮することによって、たとえ音源位置が変化した場合であっても、正確に音源位置同定を行い得ることが明らかとなった。

4. 実験による指向性の影響の基礎検証

4.1 マイクロホンの指向性測定

実験により指向性の影響を検証するにあたり、実験に用いるマイクロホンの指向性の測定を行った。なお、実験には、リオン株式会社製のコンデンサマイクロホン: UC-30、適用プリアンプ: NH-04を用いた。測定に際しては、基礎検証としてマイクロホンの受信周波数が1000Hzの場合のみを対象としたが、1000Hzに限定した場合であっても指向性の考慮の有無に関する重要性を評価するには十分であると考えられる。

実験に際しては図7(a)に示すように、指向性を測定したい被測定マイクロホンの1000mm前方に1000Hzの音波を発するスピ

(a) Measuring configuration (b) Definition of azimuth angle
Fig.7 Measuring method of microphone directivity pattern

(a) Amplitude characteristic

(b) Phase characteristic

Fig.8 Measuring result of microphone directivity pattern

一カを設置し、被測定マイクロホンを -50° から 50° までマイクロホンの先端位置を変え、角度 θ_{Az} を変化させ、各角度の場合における音波を受信した。ここで、被測定マイクロホンの横に基準マイクロホン（図7(a)の左側）を設置し、基準マイクロホンは常に固定した状態であるとした。なお、本実験ではX軸方向のみの指向性を測定し、次節においてX軸方向での音源位置の同定を実施することから、ここでの指向性は方位角方向の特性を測定することになる。ここで、X軸方向のみの検討では方位角の値と仰角の値は同じになる³⁾ことから、ここでの角度 θ_{Az} が第2章における仰角 θ と等価となる。また、このような方法で測定された指向性はマイクロホンを基準に（固定して）考えると、図7(b)のような方位角特性を有することになる。

このとき、指向性の計算方法としては、被測定マイクロホン及び基準マイクロホンで得られる受信信号に対して離散フーリエ変換を行う。そして、1000Hzにおける複素フーリエ係数から、被測定マイクロホン及び基準マイクロホンのそれぞれにおける受信位相・振幅（ $\phi_{measure}(\theta_{Az}) \cdot a_{measure}(\theta_{Az})$, $\phi_{base}(\theta_{Az}) \cdot a_{base}(\theta_{Az})$ ）を得ることができる。受信位相に着目すると、 $\phi_{base}(\theta_{Az})$ を基準に、

Fig.9 Photograph of experimental setup configuration

(a) Experimental result

(b) Computation result

Fig.10 Effect of identification accuracy on microphone directivity pattern by MUSIC method

位相差 $\Delta\phi_{measure}(\theta_{Az})$ は、

$$\Delta\phi_{measure}(\theta_{Az}) = \phi_{measure}(\theta_{Az}) - \phi_{base}(\theta_{Az}) \quad (17)$$

として得ることができ、マイクロホンの受信位相に関する指向性 $\Phi_{measure}(\theta_{Az})$ は、 $\theta_{Az} = 0^\circ$ の場合を基準にして、

$$\Phi_{measure}(\theta_{Az}) = \Delta\phi_{measure}(\theta_{Az}) - \Delta\phi_{measure}(0) \quad (18)$$

で与えられる。

一方、受信振幅に着目すると、 $a_{base}(\theta_{Az})$ を基準に振幅比 $\Delta a_{measure}(\theta_{Az})$ は、

$$\Delta a_{measure}(\theta_{Az}) = a_{measure}(\theta_{Az}) / a_{base}(\theta_{Az}) \quad (19)$$

として得ることができ、マイクロホンの受信振幅に関する指向性 $A_{measure}(\theta_{Az})$ は、 $\theta_{Az} = 0^\circ$ の場合を基準にして、

$$A_{measure}(\theta_{Az}) = \Delta a_{measure}(\theta_{Az}) / \Delta a_{measure}(0) \quad (20)$$

で与えられる。

このような方法で測定したマイクロホンの指向性の結果を図8に示す。図8(a)は振幅特性 $A_{measure}(\theta_{Az})$ であり、図8(b)は位相特性 $\Phi_{measure}(\theta_{Az})$ である。この結果から、振幅特性に関しては角度 θ_{Az}

5. 結 言

本研究では、音源位置同定法として用いられる MUSIC 法や AH 法、MAH 法を対象にして、音波を受信する際に用いられるマイクロホンの有する指向性が音源位置の同定精度に及ぼす影響を計算機シミュレーションと実験の両面から検討した。ここでは結言として、本論文で得られた結果を要約する。

- (1) 使用するマイクロホンに指向性を有する場合において、MUSIC 法、AH 法、並びに MAH 法を用いて音源位置の同定を行うときに使用できる評価関数を示した。
- (2) MUSIC 法や MAH において、使用するマイクロホンに指向性を有するものの音源位置同定計算に指向性を考慮しない場合、同定精度は低下するが、同定計算に指向性を考慮することで高い同定精度が得られる。
- (3) AH 法では原理的に有する同定精度の低下要因に起因して、同定計算に指向性を考慮した場合であっても、同定精度は改善されない。
- (4) 指向性の影響に関する検証実験として、MUSIC 法によって検討した結果、実験結果からも指向性を考慮することの重要性を証明することができた。

参 考 文 献

- 1) 大野麻理恵, 佐藤太一, 田中基八郎: 異音評価に対する擬音語適用の基礎的検討 (第2報: 擬音語の発生音に着目した検討), 日本機械学会第3回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, (2004) 29.
- 2) 中野光雄, 鈴木浩平, 長松昌男, 吉村卓也: 音響二重ホログラフィ法による音源探索に関する研究, 日本機械学会論文集 (C 編), 59, 563 (1993-7) 2107.
- 3) 菊間信良: アレーアンテナによる適応信号処理, 科学技術出版, (1998) 29, 181.
- 4) 畛田道雄, 石川憲一: 音源位置同定法としての音響ホログラフィ法と MUSIC 法の基本性能比較に関する研究, 精密工学会誌, 71, 4 (2005) 掲載決定.
- 5) 永田仁史, 安倍正人, 城戸健一: 多数センサによる音源位置の同定, 日本音響学会誌, 46, 7 (1990) 531.
- 6) J.W.Choi, Y.H.Kim: Spherical beam-forming and MUSIC methods for the estimation of location and strength of spherical sound sources, Mechanical Systems and Signal Processing, 9, 5 (1995) 569.
- 7) 小橋 豊: 音と音波, 裳華房, (1994) 73.
- 8) 畛田道雄, 石川憲一: MUSIC による近距離音源の高分解能位置推定法に関する研究—センサ間の振幅・位相偏差とその補償処理が位置推定性能に及ぼす影響—, 精密工学会誌, 70, 8 (2004) 1111.

が変化しても $A_{measure}(\theta_{Az})$ はほぼ一定であることから、無指向性であるといえる。一方、位相特性に関しては、 θ_{Az} の変化に伴い $\Phi_{measure}(\theta_{Az})$ も変化し、その変化は θ_{Az} の変化に対して、ほぼ $\theta_{Az}=0$ を基準に対称になっていることが分かる。したがって、次節においては、このマイクロホンを用いた場合における音源位置同定実験を行い、指向性の考慮の有無に関する実験検証を行うことにする。このとき、図 8 中に示したとおり、振幅特性に対しては無指向性であるとみなし、位相特性に関しては図 8(b) 中の近似曲線に従うものとみなした。

4.2 指向性を考慮に入れた音源位置同定に関する実験検証

図 9 は本実験における実験環境並びに器材配置を表している。すなわち、音源にはスピーカを用い、信号生成器によって作られた信号を音として発生させた。そして、スピーカから発せられる音波を 2 つのコンデンサマイクロホンアレーによって受信する場合を検討した。スピーカ (音源) に関しては、マイクロホンアレーの開口中心の延長線上で 1000mm 離れた場所を基準位置 ($(X, Z)=(0\text{mm}, 1000\text{mm})$) として、そこから図 9 の X 軸方向に位置を 200mm まで変化させ、それぞれの音源位置における信号を受信した。なお、基準位置から発した信号に関しては、センサ間の振幅・位相偏差を補償するための校正用信号として用いている⁸⁾。

図 10(a) は本実験における結果であり、また、図 10(b) に本実験を模擬した計算機シミュレーションによる結果も示した。なお、解析には分解能、並びに同定精度ともに優れる MUSIC 法を採用した。両図において、三角プロットが指向性を考慮した MUSIC 評価関数を計算した場合、丸プロットが指向性を考慮しない従来の MUSIC 評価関数を計算した場合である。この結果から、指向性を考慮した評価関数を用いた場合の方が、真の音源位置により近い位置に同定できていることが分かる。これより、指向性を有するマイクロホンで音源位置の同定を行う場合、前もって指向性を測定し、測定された指向性を考慮した評価関数を用いて同定計算を行うと、より高い精度をもって音源位置の同定を行い得ることが実験結果からも明らかになった。