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*

畝 田 道 雄 ** 石 川 憲 一 **

Study on Basic Performance Comparison of Acoustic Holography and MUSIC Methods in Sound Source Identification

Michio UNEDA and Ken-ichi ISHIKAWA

When machinery has emitted unusual noise, it is shown in many cases that the noise has a certain problem and failure in some of these machineries etc. Therefore, it is thought as a very important matter for the diagnosis on operation of a machine, and related technology to identify the sound sources localization. Also, in order to solve a noise problem as machine diagnostic technology, the development of sound source identification techniques with high resolution have become made important, and various researches such as acoustic holography (AH), acoustic double holography (ADH) and MUSIC methods have been studied. In this paper, the basic performance comparison with AH, ADH and MUSIC methods were discussed. Furthermore, the modified AH (MAH) and the modified ADH (MADH) for improving localization accuracy of AH and ADH were proposed and discussed these performances. Several advantages of MUSIC surpassed the other method have been confirmed through the computer simulation and experimental examination.

Key words: MUSIC, acoustic holography, sound source identification, spherical sound source

1. 結 言

自動車エンジン、モータからの騒音や高速走行する電車の流体騒音に加えて、各種工作機械から発せられる騒音に対して、その低減策を検討する場合、問題となる周波数の騒音がどの部位から発せられているのかを把握することは極めて重要な事柄である^{1)~3)}。また、騒音源を可視化することは、各種騒音問題を直感的に把握しやすくするためにも、非常に有用である⁴⁾。

このような産業界からのニーズもあって、従来までに音源探索、可視化法に関する研究が進められており、その中でも、音響ホログラフィ (AH) 法⁵⁾、近距離音響ホログラフィ法⁶⁾、音響インテンシティ法⁷⁾等に関する研究や性能試験が進められている。また、AH 法における騒音源の同定分解能を向上させることを目的として、音響二重ホログラフィ法 (ADH) 法²⁾が開発されている。

これらの方法に加えて、受信信号の共分散行列から音源位置及びパワースペクトルを同定する方法としての MUSIC 等が提案されており^{8,9)}、著者らは MUSIC による機械診断技術に関連した基礎技術について検討を進めてきている¹⁰⁾。ところで、これら各種の方法の個別性能に関しては論述されてきているが、それぞれの性能を詳細に比較した研究は少ないのが現状である¹¹⁾。特に、AH 法に代表される音源再生可視化法と MUSIC 法に代表される固有値解析法を比較した研究は殆ど見受けられない。

本研究では、AH 法及び MUSIC 法に着目し、音源から球面音波^{11,12)}が発せられていると仮定できる環境 (一般に文献⁶⁾で取り扱う近距離場に対して、遠距離場と見なせる環境)において、これらの基本性能比較を行うことを目的としている。特に、本論文においては、周波数領域における音源分離は離散フーリエ変換 (DFT) ベースで行うものとし、DFT で分離した特定の周波数成分を有する単一音源における位置同定を行う場合を取り

扱う。そして、この場合における AH 法と MUSIC 法の基本性能比較を計算機シミュレーション、並びに実験を行って得られた結果を言及する。

2. 音源の球面波モデルの概要及び音響ホログラフィ法と MUSIC 法の概要

2.1 音源の球面波によるモデル化

音源を球面波としてモデル化する場合、音源中心から広がる音圧波形は、その振幅が音源からの距離 r に逆比例するとして与えることができる^{11,12)}。したがって、音源 S_k ($k: 1 \sim K$ までの自然数, K : 音源の数) から距離 r_{km} 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、

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

で与えることができる。ここで、 $P_k(t)$ は音源 S_k から発せられる単位距離の音圧、 ϕ_k は音源 S_k の初期位相である。

この音圧波形を 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 ($m: 1 \sim M$) における複素受信信号 $R_m(f)$ が得られる。特に、 K 個の音源波形が互いにインコヒーレントで DFT によって完全に分離が可能であるとき、センサ m の座標を (x_m, y_m, z_m) 、周波数 f の成分を有する音源 S_{kf} の座標を (x_{kf}, y_{kf}, z_{kf}) とすると、 $R_m(f)$ は、特にそれを複素形式で表記するとき、

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

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

として与えられる。なお、 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。

* 原稿受付 平成 16 年 7 月 29 日

** 正 会 員 金沢工業大学 (石川郡野々市町扇が丘 7-1)

Fig.1 Coordinate system between sensor plane and source

2.2 AH 法及び ADH 法の概要

AH 法は、前項のように与えられる M 個のセンサからなる受信信号によってホログラム面（観測面）を形成し、それから音源が存在すると予想される面（再生面）に関して、ホログラム面で記録した音を再生すれば元の音波が再現できるという原理に基づいて再生面上での信号強度分布を求める。それによって音源像を可視化し、位置を同定する方法である。すなわち、図 1 に示すように、 M 個のセンサが同一面にあると仮定 ($z_m (m=1 \sim M) = z_o$) し、また、音源とセンサ面（ホログラム面）との間が $z_d (=z_k - z_o)$ 離れていると考えると、周波数 f における音源再生式 $P_{AH}(x, y, f)$ は次のように表される²⁾。なお、添え字 H は複素共役転置である。

$$P_{AH}(x, y, f) = \left(\sum_{m=1}^M R_m(f)^H \cdot g(x - x_m, y - y_m, z_d) \right)^2 \quad (3)$$

$$g(x - x_m, y - y_m, z_d) = \frac{e^{-j\frac{2\pi}{c} r_{g,m}}}{r_{g,m}}$$

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

一方、ADH 法は AH 法における音源再生の感度を向上させることを目的に提案された方法である。その原理は図 1 中に示したように、センサ面（前方計測面）に対して d 隔てた後方に第二のセンサ面（後方センサ面）を設け、これら両面で得られた信号に対して、次式のような処理を行うことで、その感度を向上させている²⁾。

$$R_{mb}(f) = \frac{P_{kf}}{r_{kf,mb}} e^{-j\frac{2\pi}{c} r_{kf,mb}} \quad (4)$$

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

$$R_{mbf}(f) = R_m(f) \frac{r_{d,m}}{r_{g,m}} e^{-j\frac{2\pi}{c} (r_{d,m} - r_{g,m})} \quad (5)$$

$$r_{d,m} = \sqrt{(x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 + (z_d + d)^2}$$

$$R_{mf}(f) = R_m(f) + \alpha (R_m(f) - R_{mbf}(f)) \quad (6)$$

すなわち、ADH 法での音源再生式 $P_{ADH}(x, y, f)$ は、式(3)に示した AH 法における式 $P_{AH}(x, y, f)$ においての $R_m(f)$ を式(6)で与えられる $R_{mf}(f)$ に置き換えることによって得られる。 α は増幅係数と呼ばれ、これが零のときは AH 法と同等となる。中野ら²⁾の検討と

同様に、本論文では $\alpha=2$ とした。

2.3 MUSIC 法の概要

MUSIC 法は、式(2)により得られる複素受信信号から共分散行列を求め、それを固有値解析することによって導かれる雑音部分空間を利用して解析を行うものであり、いわゆるヌル点を探す方法である。

すなわち、 M 個のセンサによって得られた複素受信信号（複素フーリエ係数）をベクトル $\mathbf{R}(f)$ で表すと、

$$\mathbf{R}(f) = \begin{bmatrix} R_1(f) \\ R_2(f) \\ \vdots \\ R_m(f) \\ \vdots \\ R_M(f) \end{bmatrix} \quad (7)$$

となり、その共分散行列 $\mathbf{V}(f)$ は、

$$\mathbf{V}(f) = \mathbf{R}(f) \cdot \mathbf{R}(f)^H \quad (8)$$

となる。 $\mathbf{V}(f)$ を固有値解析すると、その固有値 $[u_1, u_2, \dots, u_m, \dots, u_M]$ 、並びに、それぞれの固有値に対応した固有ベクトル $[\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_m, \dots, \mathbf{e}_M]$ が得られるが、信号部分空間に対応した固有ベクトル $[\mathbf{e}_1]$ と雑音部分空間に対応した固有ベクトル $[\mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_m, \dots, \mathbf{e}_M]$ が直交する性質を利用して、式(9)のような評価関数 $P_{MUSIC}(x, y, f)$ を設けると、そのピークを探すことによって、音源位置の同定を可能にする。なお、ここでの表記は DFT によって K 個の音源波形が完全に分離される場合を想定していることから、周波数 f に対応した音源の数は 1 と見なすことができる。

$$P_{MUSIC}(x, y, f) = \frac{1}{\sum_{n=2}^M |\mathbf{e}_n^H \cdot \mathbf{a}(x, y, f)|^2} \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{a}(x, y, f)$ は、

$$\mathbf{a}(x, y, f) = \begin{bmatrix} a_1(x, y, f) \\ a_2(x, y, f) \\ \vdots \\ a_m(x, y, f) \\ \vdots \\ a_M(x, y, f) \end{bmatrix} \quad (10)$$

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

と表される。

3. 計算機シミュレーションによる基本性能比較

本章では、AH 法、並びに MUSIC 法における音源位置同定の基本性能評価・比較に関して、計算機シミュレーションによって検討した結果を述べる。ここでのシミュレーションにおいては前章でも示したとおり、センサで受信した音圧波形を 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 ($m: 1 \sim M$) での複素受信信号 $R_m(f)$ が得られるものとする。また、周波数 f の成分を有する音源の数は 1 つであり、それは点音源であるとして検討する。表 1 に主なシミュレーション条件を示す。

図 2 は音源位置が (I) 開口中心の延長上にある場合、(II) 開口中心から離れた位置にある場合において、その位置を (a) AH 法、(b) ADH 法、(c) MUSIC 法を用いて同定し、等高線表記した結果

Table 1 Computer simulation conditions

Array sensor	Uniformly square array
Aperture center of array sensor	(0mm,0mm,0mm) (in origin)
Number of sensors	5×5 (in AH and MUSIC) 5×5×2 (in ADH)
Distance between sensors	170mm
Distance between front and rear measurement planes in ADH	100mm
Snap shot	4000
Number of sources	1
Frequency of source	200,500,1000,2000Hz
Location of source (x,y,z)	(0mm,0mm,2000mm) (100mm,100mm,2000mm) (200mm,200mm,2000mm) (300mm,300mm,2000mm) (400mm,400mm,2000mm) (500mm,500mm,2000mm)
Signal to noise ratio	10dB

である。なお、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 (○) は音源同定位置である。

これらの結果から、AH 法に比較して ADH 法の方が音源可視化における分解能は幾分向上しているものの、これらと MUSIC 法との間の分解能には大きな相違があり、MUSIC 法による分解能は著しく高いことが分かる。このことは、AH 法や ADH 法は指向性ビーム走査¹³⁾に基づいた信号源位置同定法に分類されることに対して、MUSIC 法はヌル走査¹³⁾に基づくものであることに起因すると考えられる。AH 法及び ADH 法の評価関数は式(3)で与えられるように、複数センサを有するアレー受信装置で得られる各センサの指向性パターンを重ね合わせる (積分する) ことに基づいている。すなわち、音源位置では位相が揃ったものを重ね合わせることによって評価関数が大きくなることに対し

て、音源位置以外では位相が揃わないことを利用して評価関数の値に差違を作る方法であることから、あまりに明確な分解能は得られにくいものと考えられる。そして、基本的にはこの方法による分解能はメインローブの太さ、すなわち指向性パターン幅に依存することから、分解能を向上させるにはアレーセンサの開口長を大きくする必要がある。

一方、MUSIC 法は AH 法等のビーム走査法の発想を逆転させヌル点を走査する方法であり、アレー指向性におけるヌル点を音源位置の方向に向けるように走査する方法である。そして、ビーム走査に比較してヌル走査の方が分解能は高い¹³⁾ことから、このような結果が得られたものと考えられる。

次いで、音源位置の同定精度について考えると、同図(I)から、開口中心の延長線上に音源がある場合には、いずれの方法においても音源位置近傍に評価関数のピークが現れている。一方、同図(II)の場合のように開口中心の延長線上に音源が無い場合には、AH 法及び ADH 法では音源位置から開口中心の延長線上側 (同図中の原点側) にずれた位置にピークがあることに対して、MUSIC 法では正しい位置にピークが現れていることが分かる。

ここで、同定精度並びに分解能について詳細に検討するために、AH 法、ADH 法、MUSIC 法のそれぞれにおいて、同定精度と分解能に及ぼす音源周波数、音源位置の影響を検討した。これらの結果をそれぞれ図 3(I), (II)に示す。なお、分解能の評価方法に関しては、同定ピーク (=0dB) に対して、その位置から X 軸方向に 10mm 離れた場所での評価関数の値 (同図中 “◆” プロット) 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。また、それぞれの結果については、各計算条件において 100 回の計算を行い、それで得られた結果の平均値 (プロット) と標準偏差 (エラーバー) を示している。

これらの結果より、(I)音源周波数、並びに(II)音源位置の影響ともに、MUSIC 法では音源周波数が小さくなると分解能と精度

Fig.2 Contour diagrams of cost function by acoustic holography (AH), acoustic double holography (ADH) and MUSIC methods

Fig.3 Identification error and resolution by acoustic holography (AH), acoustic double holography (ADH) and MUSIC methods

が幾分低下する傾向にあること以外は、これらの影響を殆ど受けていないことが分かる。一方、AH 法や ADH 法では、音源周波数が小さくなるにつれて同定精度や分解能は大きく低下して

いる¹⁴⁾とともに、音源位置が開口中心の延長上から離れるにつれて、それも低下していることが分かる。また、同図中に標準偏差を示しているが、同定誤差が大きくなるにも拘わらず、標準偏差はいずれの条件でも殆ど零に等しいことが分かる。このことから、AH 法や ADH 法で生じる誤差はこれらの原理に基づいたものであると考えられる。

ここで、AH 法は元来、光によるホログラフィの理論をベースとするものであり、例えばレーザホログラフィでは、ホログラムにレーザ光を当てて物体像を再生することに対応するものである⁵⁾¹⁵⁾。そして、それを音響分野に応用するときには記録した音を再生すれば元の音波が再現できる¹⁷⁾というものである。したがって、この原理を数式で表すときには、式(3)のような定義式となる。しかしながら、物体像を再生するとき、計測面で受信した複素音圧信号を基準にした信号を発信し、これらの合成によって再生面を形成するが、この再生面を形成する場合にも当然、波長の振幅は距離に比例して減衰することになる。このことから、再生面を作る際にも生じる減衰は正確な再生面を作る上における精度低下の要因になると考えられる。

一方、最近のコンピュータの発展に伴って、現在においては受信した複素音圧信号を用いて再生面を形成する場合には、コンピュータ上のデジタル信号処理によって行うことができる。したがって、このような状況下にあつては、AH 法の再生式

Fig.4 Contour diagrams of cost function by modified acoustic holography (MAH), modified acoustic double holography (MADH) methods at Location of source (x,y) of (300mm,300mm)

Fig.5 Identification error and resolution by modified acoustic holography (MAH), modified acoustic double holography (MADH) methods at Location of source (x,y) of (300mm,300mm)

(a) Appearance

(b) Configuration

Fig.6 Coordinate system between sensor plane and source in experimental system

となる式(3)を

$$P_{MAH}(x, y, f) = \left(\sum_{m=1}^M R_m(f)^H \cdot g^i(x - x_m, y - y_m, z_d) \right)^2 \quad (11)$$

$$g^i(x - x_m, y - y_m, z_d) = e^{-j \frac{2\pi}{c} r_{g,m}}$$

のように考えることによって、上記の減衰による影響を無視することができると考えられる。これにより、たとえ AH 法であっても低周波領域、あるいは開口中心の延長上から離れた音源であっても、その位置を高精度に同定可能であると考えられる。

図4、図5は式(11)を用いた改良型音響ホログラフィ(Modified AH: MAH)法、並びに改良型音響二重ホログラフィ(MADH)法による音源位置同定で得られた評価関数の等高線図、並びに、同定誤差を検討した結果である。なお、計算条件は図2(II)及び図3と同一である。これらの結果より、MAH法においては、図2(c)及び図3(c)に示した MUSIC 法での結果と比較して、分解能は大きく劣るものの、同定精度は殆ど変化の無いことが分かる。一方、分解能に関しては図2(a)-(b)、図3(a)-(b)に示した結果と比較して、MAH法、MADH法ともに殆ど変化の無いことが分かる。したがって、AH法をデジタル信号処理として捉える場合、式(11)による改良型の方法を用いた方が、従来方法である AH 法、ADH 法での分解能を維持したまま、同定精度の向上を可能にするという好結果を得ることができると考えられる。一方、MADH 法では ADH 法に比較すると大きく同定精度は向上しているものの、低周波数領域及び音源位置が開口中心の延長上から離れた場合における同定精度は、MUSIC 法や MAH 法での結果に比較して劣っていることが分かる。このことは、ADH 法の原理に基づくものであり、特に増幅係数 α の影響を受けるものであると考えられるが、その原因については別報で詳しく述べるものとする。

4. 実験検証による性能比較

前章までの検討によって、AH 法及び ADH 法に比較して

Table 2 Experimental conditions

Array sensor	Uniformly linear array
Number of sensors	5
Distance between sensors	125mm
Snap shot	1024
Number of sources	1
Frequency of source	1000Hz
Location of source (x,y,z)	(0mm,0mm,1000mm)* (10mm,0mm,1000mm) (20mm,0mm,1000mm) (30mm,0mm,1000mm) (40mm,0mm,1000mm) (50mm,0mm,1000mm)*

*: Sound sources for compensated array deviations

(a) 10mm

(b) 20mm

(c) 30mm

(d) 40mm

Fig.7 Experimental results as basic performance comparison of acoustic holography (AH), modified acoustic holography (MAH) and MUSIC methods

MUSIC 法の方が単一音源に対しては同定精度、並びに分解能ともに優れていることが明らかとなった。また、AH 法、ADH 法の同定精度を向上させることを目的とした MAH 法、MADH 法を検討した。本章では特に、AH 法、MAH 法及び MUSIC 法の性能比較を実験結果から検討する。

実験は図6のような環境で行った。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5つのコンデンサマイクロホンからなるリニアアレー受信装置によって受信する場合を検討した。主な実験条件を表2に示す。スピーカに関しては、図6(b)で示すように、アレー受信装置の開口中心の延長線上で1000mm離れた場所を基準位置($x = 0\text{mm}$)として、そこから同図X軸方向に位置を50mmまで10mm間隔で変化させ、それぞれの音源位置における信号を受信した。また、 $x = 0\text{mm}$ 、並びに50mm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た¹⁶⁾。

図7は本実験によって得られた受信信号をAH法、MAH法、並びにMUSIC法によって解析した結果である。同図において、いずれの結果も最大値を基準とするdB表示を行った。この結果より、いずれの位置から発せられた音源に対しても、その位置を高精度に同定し得ていることが分かる。一方、AH法やMAH法と比較して、MUSIC法の方が明らかに同定感度は高いということが分かり、前章までに示した計算機シミュレーションによる結果と同等な性能を実験によっても確認することができた。

5. 結 言

本研究では、機械診断技術に関連した音源位置同定法として MUSIC 法を用いることを検討している。現状、音源位置同定法としては、AH 法が広く用いられていることから、本論文では MUSIC 法の性能を AH 法及び ADH 法と比較することを目的として検討を行った。特に、検討方法としては、単一点音源を対象とした計算機シミュレーションに留まらず、モデル実験を行うことで、性能比較シミュレーションの有効性を検証した。ここでは、本論文で得られた結果を要約し、以下にまとめる。

- (1) AH 法や ADH 法では低周波領域の音源、並びにアレー受信装置の開口中心の延長線上から離れた位置に存在する音源位置の同定を行う場合、同定精度は低下する傾向にあるが、MUSIC 法では AH 法、ADH 法のような精度低下は見られない。
- (2) AH 法や ADH 法における精度低下の原因は、これらの方法の原理となる再生面の生成方法にあるが、デジタル信号処理によって音源位置の同定を行う場合には、精度低下を防ぐことができる。そして、本論文では改良型音響（二重）ホログラフィ法（MAH 法（MADH 法））と称した方法を提案、検討した。
- (3) MAH 法では上記(1)で見られた精度低下を抑制することができる一方、MADH 法では ADH 法に比較すると精度低下は抑制されるが、MUSIC 法や MAH 法に比較すると、精度は低下する結果が得られ、その原因は ADH 法の原理によるものと考えられる。
- (4) MUSIC 法、AH 法、MAH 法の性能評価に関して、モデル実験を通じて行い、得られた実験結果からも MUSIC 法の方が分解能は高いという結果を得た。

最後に、本論文においては単一点音源を対象とした検討を行ったが、実際に行われる音源位置同定においては、自動車のエンジン等、多周波数成分を有するとともに、音源自体も大きさ（広がり）を有したものである。そして、これらの場合における AH 法の性能に関しては、例えば文献²¹⁾⁴⁾で明らかにされていることから、今後、MUSIC 法でもこのような場合における性能評価

を行うことを通じて、AH 法並びに MUSIC 法における総合性能の比較検証を行う予定である。

謝 辞

本論文の執筆にあたり、適切なご助言を頂きました北海道工業大学 長松昌男先生、防衛庁技術研究本部第 3 研究所 西山文夫技官に謝意を表す。また、本研究の一部は科学研究費補助金（若手研究(B)，課題番号：15760069），並びに、公益信託 小野音響学研究助成基金の助成によって行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 高野 靖, 小野重亮: マイクロホンアレイによる移動音源探査, 非破壊検査, **47**, 7 (1998) 450.
- 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査に関する研究, 日本機械学会論文集 (C 編), **59**, 563 (1993-7) 2107.
- 3) 桑野園子: 音色の測定法・評価法, 精密工学会誌, **65**, 12 (1999) 1701.
- 4) 水野恵一郎: 騒音の可視化—騒音可視化の意義と可視化事例—, 超音波 TECHNO, **2** (2000) 28.
- 5) 上羽貞行: 音響ホログラフィ, 日本音響学会誌, **38**, 3 (1982) 166.
- 6) 古川 茂: 振動と音の可視化技術としての近距離場音響ホログラフィ, 日本音響学会誌, **52**, 12 (1996) 997.
- 7) 鈴木英男: 音響インテンシティによる音源探査, 非破壊検査, **47**, 7 (1998) 475.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 畠田道雄, 石川憲一: MUSIC アルゴリズムを用いた近距離音源の高分解能位置推定法に関する研究, 精密工学会誌, **70**, 4 (2004) 538.
- 11) 長松昌男: 音源探査手法における外乱の影響の比較, 日本機械学会機械力学・計測制御講演論文集, Pt2 (2000) 534.
- 12) 小橋 豊: 音と音波, 裳華房, (1994) 73.
- 13) 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) 181.
- 14) 自動車技術会編集 (中野光雄): 自動車の振動騒音低減技術, 朝倉書店, (1996) 60.
- 15) 林 卓郎: 最近の音響ホログラフィによる騒音源探査, 音響技術, **60**, 11 (1987) 23.
- 16) 畠田道雄, 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, 掲載決定.
- 17) 北條春夫: 音響ホログラフィ援用による機械の発生音探査, 非破壊検査, **47**, 7 (1998) 455.