

小特集—マイクロホンアレー—

多次元インテンシティプローブのマイクロホン配置について*

鈴木英男 (オンテックアールアンドデー㈱)**

1. はじめに

音響インテンシティ計測は音場の可視化、音源探査、音響パワー測定などに最近よく使われています。複数のマイクロホンからなる音響計測用のセンシング部分をマイクロホンアレーと呼ぶものとすれば、2個のマイクロホンをを用いる1軸型の音響インテンシティプローブは最も簡単なマイクロホンアレーと言えます。3個のマイクロホンを一つの直線に乗らないように(一つの面を形成するように)配置すれば2次元のプローブ、4個のプローブを一つの平面に乗らないように配置すれば3次元のプローブができあがります。

最初に音響インテンシティ計測の原理について述べ、更に、3個以上のマイクロホンが必要となる2次元及び3次元音響インテンシティプローブのマイクロホン配置例と各軸の音響インテンシティ成分を求める方法について解説します。

2. 音響インテンシティ計測の原理
(1次元の場合)

音響インテンシティ(音の強度)は単位時間に単位面積を通過するエネルギーのことで、単位は W/m^2 です。パワーは電気では電圧(V)と電流(A)の積、機械では力(N)と速度(m/s)の積で与えられますが、音響の場合も機械系と同様に考えることができます。図-1は空間に仮想面 S を考え、それに働く力 PS (P は音圧(N/m^2))とその面に垂直な速度 V (粒子速度と呼ばれます)を表しています。粒子速度とはマクロに見たときの空気粒子の波動に伴う速度のことです。音響的な有効パ

ワーは $PVS(\cos\phi)/2$ で与えられます。ただし、 P 及び V はそれぞれ音圧及び粒子速度の振幅値、 ϕ はそられの位相差です。このパワーを面積 S で割り、単位面積当たりのパワーに直したものが音響インテンシティ $PV(\cos\phi)/2$ です。ここで、仮想面の向きをエネルギーの流れに対してどの方向にとるかにより音響インテンシティの大きさが変わります。それは粒子速度が計る方向により異なる(方向性を持っている)ベクトル量であるからです。これがスカラ量である音圧と大きく異なる点です。

音響インテンシティは音圧と粒子速度とそれらの位相差を計ることができれば求められます。音圧はマイクロホンで精度よく測定できます。一方、粒子速度を直接精度よく測定する便利なセンサがないため、近接した2点間の音圧から求める方法が一般的に採用されます¹⁾。ここでは「粒子速度の注目する方向の成分は音圧のその方向の微分を時間積分することにより求められる」という関係式を利用しています²⁾。微分は2点間を波長に対して小さくとることにより差分に置き換えられますので、2点間の音圧の測定から音圧及び粒子速度が求められます。図-2は1軸型のマイクロホンプローブを模式的に示したもので、二つのマイクロホン m_1 と m_2 を結ぶ方向(x 方向)の音響インテンシティが求められます。クロススペクトル法で求めるときの式を示しますと、

$$I = \frac{-\text{Im}[G_{12}]}{2\pi f \rho d}$$

で与えられます。ここで $\text{Im}[G_{12}]$ は m_1 及び m_2 での音圧のクロススペクトル G_{12} の虚数成分であり、2チャンネルのFFTアナライザを用いれば簡単に求められます。 f は周波数、 ρ は空気密度、 d はマイクロホン間の距離です。有効パワー(複素パワーの実数成分)を求めるためにどうして虚

* Microphone arrangements for multi-dimensional intensity probes.

** Hideo Suzuki (Ontek R&D Co., Ltd., Yokohama, 226)

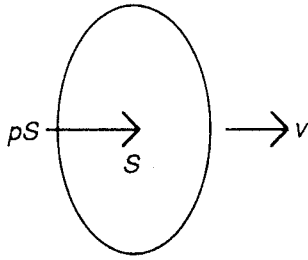


図-1 仮想面 S 上の音圧 P と粒子速度 V

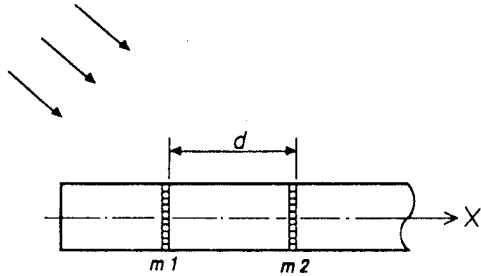


図-2 1次元音響インテンシティプローブ

数成分かと言うと、粒子速度と音圧を周波数軸上で表したときそれらの関係式の中に虚数単位 j が入る（時間軸上で粒子速度が音圧の積分で与えられる）ためです。音響インテンシティプローブの指向性は $\cos\theta$ (θ は入射角) であり、入射角が 60 度でも正面方向に対して $1/2$ (-3 dB) にしかならず、指向性のマイクロホンアレーとしてはシャープな特性を有しているとは言えません。

上述のように、1次元の音響インテンシティ成分はマイクロホンを 2 個、誤差を考慮して波長より十分小さい間隔 (約 $1/100$ から $1/5$) で並べることにより求めることができます。これが最も簡単なマイクロホンアレーと言えます。

3. 2次元音響インテンシティプローブ

2 又は 3 軸方向を同時に測定できれば計測時間を大幅に短縮できます。音源を探索する場合でも音の方向がリアルタイムで表示できますので便利です。更に、再現不可能な過渡現象の方向性を解析するにはどうしても 2 又は 3 軸を同時に測定できる多次元の音響インテンシティプローブが必要です。

2, 3次元の音響インテンシティプローブは1次元のそれを発展させて簡単に得られます。図-3 (a) は x, y 軸にそれぞれ 1 軸型のプローブを原点を共通に配置するタイプのマイクロホンアレー

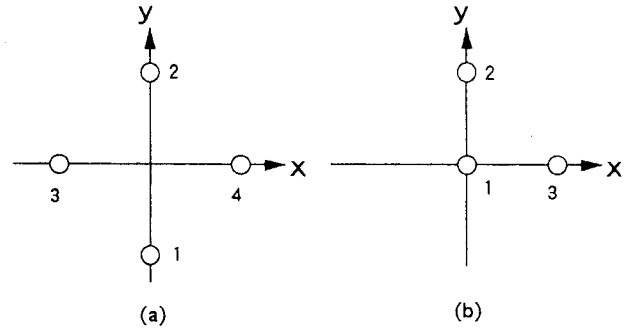


図-3 2次元の直交タイプマイクロホン配置

です(これを直交タイプと呼ぶことにします)。このときの x 及び y 軸の正の方向へ向かう音響インテンシティは $I_x = I_{12}$ 及び $I_y = I_{34}$ で与られます。ここで I_{12} 及び I_{34} はマイクロホン 1 から 2 及び 3 から 4 の方向へ向かう音響インテンシティです。このタイプのマイクロホン配置の利点は原点が共通であるため、測定位置が明確に 1 点(原点)に決められることです。欠点としては、2次元の測定のためには 1 個余計なマイクロホンを使用しており、プローブの構造が複雑になることです。図-3 (b) は (a) のタイプの変形で、測定位置が 1 点でないという欠点がありますが、マイクロホンの数を 3 個に低減できる効果があります。測定の原理は図-3 (a) と全く同じです。

図-4 は正三角形の頂点に 3 個のマイクロホンを配置するときのマイクロホンの位置を示したものです。平面を形成するように点を配置するには少なくとも 3 点必要ですが、その配置としては正三角形が最も妥当であると言えます (以下三角形タイプと呼ぶことにします)。この配置の場合の音響インテンシティの x 及び y 方向成分の求め方を少し詳しく述べます。

3 角形の重心(原点)での音圧は 3 点の平均で与えられるとします。

$$P_0 = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3}$$

各頂点と重心を結ぶ中間点の重心へ向かう方向の粒子速度は平均音圧と各頂点の音圧の差から求められます。例えば頂点 1 から原点へ向かう速度成分は音圧と粒子速度の関係を線形近似して

$$V_1 = -\frac{P_1 - P_0}{j2\pi f \rho a}$$

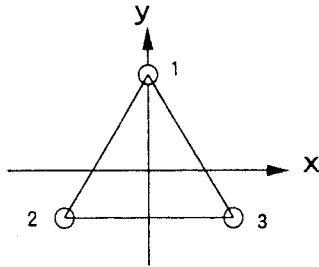


図-4 2次元の3角形タイプマイクロホン配置

$$= -\frac{2P_1 - P_2 - P_3}{j6\pi f \rho a}$$

で与えられます。ただし、 a は重心から頂点までの距離です。このときの頂点1から重心へ向かう音響インテンシティは次式で与えられます。

$$\begin{aligned} I_1 &= -\text{Re} \left[\frac{(P_1 + P_2 + P_3) * (2P_1 - P_2 - P_3)}{j18fa} \right] \\ &= -\text{Im} \left[\frac{G_{12} + G_{13}}{6\pi f \rho a} \right] \\ &= -\text{Im} \left[\frac{G_{12} + G_{13}}{\sqrt{3} 2\pi f \rho d} \right] \\ &= \frac{I_{12} + I_{13}}{\sqrt{3}} \quad (= -I_y) \end{aligned}$$

ここで、 $*$ は複素共役を表し、 $d (= a)$ は3角形の辺の長さです。 I_1 は y 軸方向の音響インテンシティ $-I_y$ と等しく、それは頂点1から頂点2及び3へ向かう音響インテンシティ成分 (I_{12} , I_{13}) を $2/\sqrt{3}$ 倍して、平均をとることで与えられることが分かります。頂点2から3へ向かう成分は y 軸に直角であり、 I_y には寄与しません。 I_2 , I_3 も同様にそれぞれ I_{23} , I_{12} 及び I_{13} , I_{23} を用いて(7)式と同じ形で表せます。 I_x は更に頂点2, 3から重心へ向かう音響インテンシティ I_1 及び I_2 から

$$\begin{aligned} I_x &= \frac{(I_2 - I_3)}{\sqrt{3}} \\ &= \frac{(I_{23} + I_{13} - I_{12})}{3} \end{aligned}$$

と表すことができます。 I_x に対する I_{23} の寄与は I_{13} 及び I_{12} の2倍であることが分かります。

各軸成分ごとの測定位置をどのように考えるかですが、 y 軸成分の場合には I_{12} , I_{13} の測定位置はそれぞれの辺の中心であると考えられるので、更にそれら2点の中心を測定位置とすれば、3角形の重心からのずれは $d/4\sqrt{3}$ となり、かなり重心に近い位置であることが分かります。

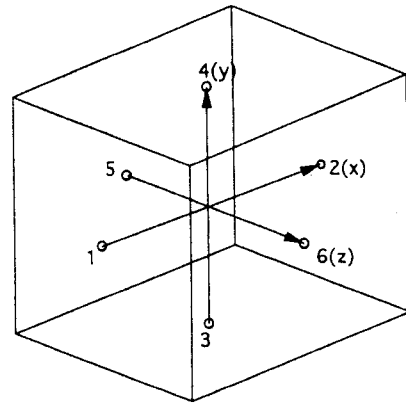


図-5 3次元の直交タイプマイクロホン配置

4. 3次元音響インテンシティプロープ

3次元への拡張も2次元への拡張の場合と全く同じです。3次元音響インテンシティプロープについては文献4)に詳しく述べられていますのでそれを参照下さい。ここでは概要を説明します。

3次元の直交タイプのマイクロホン配置は図-5で与えられます³⁾。この場合は6個のマイクロホンが必要となります。各成分はそれぞれ $I_x = I_{12}$, $I_y = I_{34}$, $I_z = I_{56}$ で与えられます。実際のマイクロホンプロープの例を図-6に示します。

図-7は正4面体の頂点に4個のマイクロホンを置く3次元の3角形タイプのマイクロホンアレイです。この場合の音響インテンシティの各軸成分は2次元の場合と同様な考え方で求めることができます。以下にその結果だけを示します⁴⁾。

$$\begin{aligned} I_x &= \frac{-3}{2\pi f \rho d} \frac{1}{12} \text{Im} (G_{34} - G_{24} - 2G_{23} \\ &\quad + G_{12} - G_{13}) \\ I_y &= \frac{-3}{2\pi f \rho d} \frac{\sqrt{3}}{36} \text{Im} (G_{34} + G_{24} - 2G_{14} \\ &\quad - 3G_{12} - 3G_{13}) \\ I_z &= \frac{-3}{2\pi f \rho d} \frac{\sqrt{2}}{6\sqrt{3}} \text{Im} (-G_{34} - G_{24} - G_{14}) \end{aligned}$$

このタイプの特徴は漏れの成分が現れることです。 y 方向から入射する音を計測すると z 軸成分にある量の漏れが生じます。ただし、この大きさは計算により実用上問題ないことが分かります。3角形タイプの音響インテンシティプロープの実際例を処理装置 (FFT アナライザ) 及び校正器と併せて図-8に示します。図のように3角形タイプ

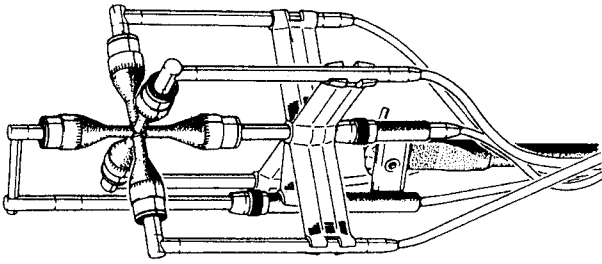


図-6 Brüel&Kjær 社による3次元インテンシティプローブ

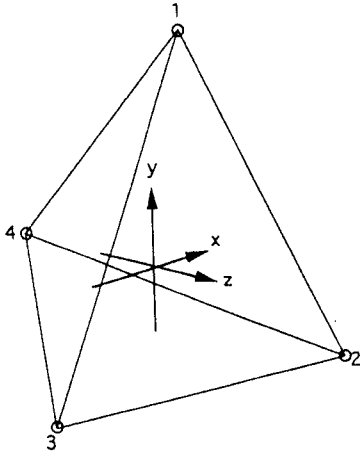


図-7 3次元の3角形タイプマイクロホン配置

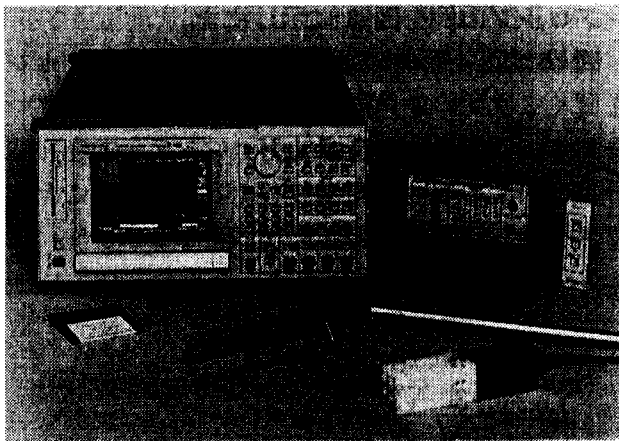


図-8 小野測器製3次元インテンシティプローブと処理装置及び校正器

は構造を簡素化することができる点が特徴です。構造の簡素化は特に高周波数領域の測定誤差を決める重要な要因となります。

5. マイクロホン配置の選定基準

どのタイプが多次元の音響インテンシティプローブとして適当かの判断は幾つかの判定基準を考慮して決められます。判断基準としては

- (1) 測定位置を1点に決められるかどうか、
- (2) 漏れ成分があるかどうか、
- (3) 音場を乱さないような簡単な構造が可能かどうか、

(4) チャンネル数を低減できるかどうかなどがあります。(1), (2)に重点を置けば直交タイプ, (3), (4)に重点を置けば3角形タイプを採用すべきであると言えます。実用的な観点から誤差が最小になるタイプの選定が肝要です。

6. ま と め

1次元音響インテンシティ計測の原理を最初に述べ、次に2及び3次元の音響インテンシティプローブのマイクロホン配置について、二つの方式(直交及び3角形タイプ)を解説しました。どちらの場合も各軸の音響インテンシティ成分は、二つのマイクロホンの組み合わせで得られる各音響インテンシティ成分を加重平均することにより求められます。音響インテンシティを許容できる誤差範囲で測定するにはマイクロホン間距離を波長の約1/100から1/5程度に押さえる必要があり、マイクロホンアレーとして構造をいかに簡素化するかがポイントとなります。

文 献

- 1) F.J. Fahy, *Sound Intensity* (Elsevier Applied Science, London, 1989).
- 2) 城戸健一, 音響工学 (コロナ社, 東京, 1991).
- 3) G. Rasmussen, "Measurement of vector sound fields," Proc. 2nd Int. Congr. on Acoustic Intensity, 53-58 (1985).
- 4) H. Suzuki, S. Oguro, M. Anzai and T. Ono, "Performance evaluation of a three-dimensional intensity probe," to be published in J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 16 (4) in 1995.