

3次元音響インテンシティの自動計測用プローブ

メタデータ	言語: jpn
	出版者: 室蘭工業大学
	公開日: 2014-03-04
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 西田, 公至, 岩倉, 正雄
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/1102

3次元音響インテンシティの自動計測用プローブ

西田公至・岩倉正雄*

A Probe for Automatic Measurement of Spatial Acoustic Intensity

Kohshi NISHIDA and Masao IWAKURA

Abstract

In this paper, a method of measuring acoustic intensity automatically is presented. The method uses measurments of the cross spectrum of the pressures at two closely spaced microphones. The acoustic intensity probe used is composed of two microphones which are arranged in parallel and with a short distance slided along those axes, and combined symmetrically with respect to a holder axis. The holder can be turned around its axis by steps of a constant angle for measuring three directional components of an acoustic intensity vector. The acoustic intensity at a field point can be automatically measured by using such composed microphones. A transfer function technique is used for approximately correcting the phase-mismatch error between the instrumentation of the signal channels of two microphones. This method of measuring acoustic intensity automatically is actually applied to a visualization technique of the flow pattern of sound energy emitted from one aperture of an enclosure with a speaker inside.

The experimental results show that the acoustic intensity probe used is an appropriate sensor for the automatic measuremend of spatial acoustic intensity vectors.

1.緒 言

かっては,音響計測で直接測定できる物理量は音圧のみであったが,最近では,音の強さを表 わす音響インテンシティを直接測定することが可能となった。この音響インテンシティは,任意 の測定点における音響パワー流速密度であり,音圧と粒子速度の積の時間平均によって表わされ るベクトル量である。したがって,音響インテンシティ計測法を用いれば,音の流れのエネルギ の強さ,およびその方向を測定することができることから,その応用として,音源の放射パワー の測定,¹¹²⁾機械の主要な発音部位を同定するための音源探査,³¹⁴⁾音響パワー流れのパターンの 可視化,⁵⁾およびパネルの透過損失の測定⁶⁾等に関する研究が行われている。

音響インテンシティの計測法では、粒子速度を近接した2点の音圧の差から近似的に求める方法によっているため、2本のマイクロホンから成るインテンシティプローブを必要とする。その構成方法としては、2本のマイクロホンをその軸上に向い合せに配置した FACE TO FACE、背

^{*}日立製作所

西田公至・岩倉正雄

合せに配置した BACK TO BACK, および並列に配置した SIDE BY SIDE 構成が考えられてい る。⁷⁾方向軸の決定の容易なことと位相特性がよいことなどから,向い合ったマイクロホンの振 動膜間に隔壁を設けた FACE TO FACE の構成原理に基づくインテンシティプローブが市販され るようになった。しかし,ベクトル量である音響インテンシティを3次元的に測定するには,測 定点ごとに3つの座標軸方向のインテンシティ成分を測定しなければならないが,それらの測定 を自動化することを考えた場合,上述した3種類のマイクロホン構成のプローブでは,いづれも 構造上,自動計測への適用は困難である。現状では,人手により多くの時間と労力を要してい る。

本研究では,音響インテンシティの3次元的自動計測を行うために,新たな構成のインテンシ ティプローブと自動計測装置を試作し,その特性評価を行った。さらに,実際の適用例として, 内部音源を有する直方体エンクロージャの一つの側面に設けた円孔からの放射音を対象に,音の エネルギ流れの可視化を表わすインテンシティベクトルの分布を求め,用いた方法の有効性を検 討した。

2. 音響インテンシティの自動計測原理

・2-1 クロススペクトル法

音響インテンシティは、音場のある点において、単位面積を単位時間に通過する音のエネル ギ、すなわち、音響パワー流速密度を表わすベクトル量で、音圧 p (t) と粒子速度 u(t) の積の時 間平均として、次式で表わされる。

$$\vec{\mathbf{I}} = \vec{\mathbf{p}(t)} \cdot \vec{\mathbf{u}}(t) \tag{1}$$

ここで, 音場のある点における r 方向の音響インテンシティ Ir を考えると, 粒子速度の r 方向成分を u_r(t) として, 次式のように表わされる。

$$I_r = \overline{p(t) \cdot u_r(t)}$$
⁽²⁾

理論的には, p(t)とu_r(t)とを測定すれば式(2)により lr が求まることになるが, 粒子速度を直 接測定することは困難である。そこで, 粒子速度を求める方法として, 音波に関する運動方程式 (3)に着目し, その音圧勾配を式(4)のように近似すれば, r 方向の粒子速度 u_r(t) は式(5)によって近 似的に表わすことができる。

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}_{\mathrm{r}}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial r} = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial r} \doteq \frac{\mathbf{p}_{2}(t) - \mathbf{p}_{1}(t)}{\Delta r} \tag{4}$$

ここで、 ρ は空気の密度、 p_1 (t), p_2 (t)はr方向に微少距離 Δ r離れた2点における音圧を表わす。

$$\mathbf{u}_{\mathbf{r}}(\mathbf{t}) = -\frac{1}{\rho \Delta \mathbf{r}} \int_{-\infty}^{\mathbf{t}} \left\{ \mathbf{p}_{2}\left(\tau\right) - \mathbf{p}_{1}\left(\tau\right) \right\} d\tau$$
(5)

したがって、式(2)は近似的に次式によって表わされる。

$$I_{r} \doteq -\frac{1}{\rho \Delta r} \frac{p_{1}(t) + p_{2}(t)}{2} \int_{-\infty}^{t} \{p_{2}(\tau) - p_{1}(\tau)\} d\tau$$

$$(6)$$

式(6)による時間領域での関係を周波数領域で表示⁸⁾すると、インテンシティの周波数成分 Ir (f)、および周波数帯域 ($f_1 \sim f_2$) での音響インテンシティ Ir ($f_1 \sim f_2$)は、それぞれ、式(7)、式(8)によって表わされる。

$$I_{r}(f) = -\frac{\text{Im} \{G_{12}(f)\}}{2 \pi \rho \Delta r}$$
(7)

$$I_{r}(f_{1} \sim f_{2}) = -\frac{1}{2\pi\rho\Delta r} \int_{f_{1}}^{f_{2}} \frac{\operatorname{Im} \{G_{12}(f)\}}{f} df$$
(8)

ここで, Im {G₁₂ (f)} は p₁(t), p₂(t) のクロススペクトル密度関数(片側)の虚数部を表わす。以 上のように, r 方向に微少距離Δr だけ離れた2点における音圧のクロススペクトル密度関数を 求め, その虚数部について上式の演算を行うことにより,任意の周波数帯域の音響インテンシテ ィを求めることができる。本研究では,以上のクロススペクトル法による測定原理を用いる。

2-2 インテンシティプローブ

音響インテンシティの3次元的自動計測を行うためには,既存のイ ンテンシティプローブは,構造上の理由から使用することが困難であ る。そこで,本研究では,図1に示すようなマイクロホン構成のプ ローブを用いる。すなわち,2本のマイクロホンを,それぞれの軸が ホルダーの軸に対称となるように配置し,相互に微小距離Δhだけ軸 方向にずらした構成となっている。この場合,測定方向は2つのマイ クロホンの振動膜の中心を通る直線方向である。このようなマイクロ ホン構成のプローブを用いれば,そのホルダー軸まわりに一定角度 (45°)ずつ2度回転させ,回転前と合せて3回の測定により,同一測



図ー1 マイクロホンの構成

定点でのインテンシティの3軸成分を容易に求めることができる。3軸成分の求め方について は、以下に詳細に述べる。

測定点における音の伝搬方向の音響インテンシティ,すなわち,音の強さを Ir とし,直交3 軸 (x, y,および z 軸)・に対する伝搬方向の方向余弦を (l, m, n,) とすれば,音の強さの3 軸成分 (Ix, Iy, Iz) は次式により表わされる。

 $(I_x, I_y, I_z) = (I_r I, I_r m, I_r n)$ (9)また,図2に示すような(1),(2),および(3)のそれぞれのマイク ロホンの状態において、マイクロホンNo.1の中心からNo.2の 中心に向う方向余弦を, それぞれ, (l1, m1, n1), (l2, m2, n2), お よび (l₃, m₃, n₃)とすると、マイクロホンの各状態で測定される 音響インテンシティ I₁, I₂, および I₃ は次式の関係を満す。 $I_1 = I_r(II_1 + mm_1 + nm_1)$ $I_2 = I_r(ll_2 + mm_2 + nm_2)$ (10) $I_1 = I_r(ll_1 + mm_1 + nm_1)$ $(1_1, m_1, n_1)$ $(1_2, m_2, n_2)$ ただし、 $l^2 + m^2 + n^2 = 1$ (1) (2) ここに /.l. m. n. 図-2 インテンシティプローブの (11) $d/\sqrt{2} \ \Delta h \ d/\sqrt{2}$ $l_2 m_2 n_2$ 回転方法 ただし、 $\Delta r = \sqrt{d^2 + \Delta h^2}$

 $(1_3, m_3, n_3)$

(3)

式(9)、式(10)および式(11)から、音の強さおよびその3軸成分が次式のように表わされる。

$$I_{x} = -\frac{(2 + \sqrt{2}) \Delta r}{2 d} \{ (\sqrt{2} - 1) I_{1} - \sqrt{2} I_{2} + I_{3} \}$$

$$I_{y} = \frac{(2 + \sqrt{2}) \Delta r}{2 \Delta h} \{ I_{1} - \sqrt{2} I_{2} + I_{3} \}$$

$$I_{z} = -\frac{(2 + \sqrt{2}) \Delta r}{2 d} \{ I_{1} - \sqrt{2} I_{2} + (\sqrt{2} - 1) I_{3} \}$$

$$I_{r} = \sqrt{I_{x}^{2} + I_{y}^{2} + I_{z}^{2}}$$
(12)

したがって、測定点において (I1, I2, I3)を測定すれば、その点における音の強さおよび3軸成分 を式(12)によって求めることができ、さらに、式(9)によって、音の伝搬方向を求めることができ る。

2-3 計測誤差および位相差補正

2つのマイクロホンを用いる音響インテンシティ計測による誤差として,式(4)の有限差分近似 による理論上の誤差および2つのマイクロホンチャンネル間の位相差による誤差が考えられる。 ここで,インテンシティプローブの方向軸の方向(r方向)に伝搬する単一周波数の平面波又は 構成マイクロホン間の距離Δrによる減衰が微小な球面波を考えると、有限差分近似の結果とし て、測定される音響インテンシティ Ir と理論値 Irt との関係として次式が得られる。⁸⁾

$$I_{r} = I_{rt} \frac{\sin k \Delta r}{k \Delta r}$$
⁽¹³⁾

ここに、k は波長定数で k = 2 π f/c, f は周波数, c は音速を表わす。式(13)によれば、周波数が 高くなると誤差が大きくなることを示している。すなわち、高域周波数での誤差により、測定周 波数の上限が定まることがわかる。さらに、マイクロホンチャンネル間に位相差 ϕ が存在する時 は式(13)の関係は次式のように表わされる。

$$I_{r} = I_{rt} \frac{\sin(k\Delta r - \phi)}{k\Delta r}$$
(14)

式(14)は低周波数域での誤差が位相差 ϕ により影響されることを示している。したがって、測定周 波数の下限は位相差の大きさにより定まることになる。2つのマイクロホン・増幅系の位相誤差 は FFT アナライザーとコンピュータからなる計測システムにより、補正することができる。本 研究では以下のような伝達関数による方法を用いる。マイクロホン増幅系1および2の周波数応 答を H_1, H_2 とし、それぞれの入力音圧のフーリェ成分を P_1, P_2 、出力音圧のフーリェ成分を $P'_1,$ P'_2 とする。このとき、以下の関係が成り立つ。

$$P_1' = H_1 P_1, \quad P_2' = H_2 P_2$$
 (15)

したがって、測定されるクロススペクトル密度関数を G'12 とすれば、次式の関係が成り立つ。

$$G_{12} = G'_{12} / H_1^* H_2 \tag{16}$$

ここに、H[•]₁はH₁の共役複素数を表わす。2つのマイクロホンを同一音場に置くならば、P₁ = P₂となるため、次式が成り立つ。

$$\frac{1}{H_1^*H_2} = \frac{1}{H_{12} |H_1|^2}$$
(17)

ここに、 H_{12} は $P'_2 = H_{12} P'_1$ の関係を表わす伝達関数である。 式(16)、式(17)を用いると式(7)は次のように表わされる。

$$I_{r}(f) = -\frac{\operatorname{Im} \{G'_{12}(f)/H_{12} ||H_{1}|^{2}\}}{2 \pi \rho \Delta r}$$
(18)

式(18)の G'₁₂, H₁₂ は容易に測定できるが, H₁ は, 測定周波数範囲に対する正確な校正音源がな いと測定できない。 H₁ は測定系1で用いる騒音計の周波数応答のゲインであり, FLAT 特性に 対し, 100 Hz ~4000 Hz の範囲では±1 dB 以内となっている。このことを考慮して, ここで は, H₁²を省略した簡単な補正方法を用いることにする。この場合, 測定される音響インテン シティには±1 dB 以内の誤差が生じうることとなる。

3. 実験装置および実験方法

インテンシティプローブの自動走 査装置を図3に示す。プローブは4 個のステップモータにより,直交3 軸方向へ一定間隔で移動することが でき,さらに,ホルダー軸の回りに 一定角度ずつ回転移動することがで きる。これらの移動することがで きる。これらの移動することが でき、さらに、ホルダー軸の回りに 一定角度ずつ回転移動することが でき、さらに、ホルダー軸の回りに 一定角度ずつ回転移動することがで きる。これらの移動することが でき、さらに、ホルダー軸の回りに ー定角度ずつ回転移動することがで きる。これらの移動はコンピュータ により制御される。3軸(x,y,z)方 向の移動可能範囲は、それぞれ、 1200mm、900mm、1000mmとなってい る。使用マイクロホンは1/2in.コン デンサーマイクロホンである。マイ クロホン構成はる。マイ

テムを図4に示す。実際に音響インテンシティを 測定するための音源として、内部にスピーカを有 する直方体エンクロージャの側面に円孔を設けな モデル音源を用いた。エンクロージャの大きさは 400mm×300mm×324mmで400mm×300mmの面の中心 に円孔を設けてある。円孔の大きさは直径60mmお よび80mmの2種類を用いた。

4. 結果および考察

図5および図6に用いたインテンシティプロー ブの位相差の測定例を示す。2つのマイクロホン チャンネル間の位相差φが理論上の位相差(kΔr) の±10%以内に入る場合,式(9)による音響インテ ンシティの理論的誤差を1 dB 以内にするために は上限周波数は3600 Hz となる。図5の正面入射







図-4 音響インテンシティの測定系

の場合,位相差補正により,5 KHz 程度までほぼ良好な特性が得られている。しかし,図6の

側面入射の場合には、4 KHz 程度まで となっている。いずれの場合も、位相差 ♦の曲線は理論値の上下で変動している が、この変動は側面入射の方が大きく、 また、Δhを長くすると大きくなる結果 が得られていることから、マイケロホン 間の干渉によるものと考えられる。両図 からは明らかではないが. 低周波数域を 拡大すると位相差々は、ほぼ200 Hz 以 下で, 誤差±10%をかなりオーバーする 結果が得られている。以上のことから, 測定周波数の範囲は200 Hz ~ 3600 Hz と 考えられる。この周波数帯においては理 論的なインテンシティ誤差の範囲は-1 ~0.5 dBとなる。本実験では、1/2in.マ イクロホンを用いているが、1/4 in.マ イクロホンを使用し, 位相差補正の方法 を改善するならば、測定周波数範囲をさ らに広げることが期待される。図7およ び図8はエンクロージャの円孔から放射 する音のエネルギ流れの状態を, 用いた 音響インテンシティの自動計測方法によ って求めたものである。測定面は円孔の 中心を通り、板面に垂直な平面である。 図中の矢印は各測定点における 2 次元イ ンテンシティベクトルの向きとデシベル で表わした大きさを示している。図から 明らかなように、周波数が大きくなると 音波の直進性が増すことがよくわかる。 また、エンクロージャ側面への回折は周



図-5 2マイクロホンチャンネル間の位相差補正(正面入射)



図-6 2マイクロホンチャンネル間の位相差補正(側面入射)

波数が高くなると小さくなる様子がよく表わされている。

西田公至・岩倉正雄



5. 結 言

音響インテンシティの自動計測に適したインテンシティプローブとして、2本のマイクロホン の先端に距離差を設けた SIDE BY SIDE によるマイクロホン構成を考え、その位相差補正の方法 を検討し、さらに、モデル音源を対象に、音のエネルギ流れの状態を実際に、自動計測すること を試みた。以上の結果から次のような結論を得た。

- (1) 2本のマイクロホンの先端に距離差を設けた SIDE BY SIDE 構成のインテンシティプローブを用いれば、そのホルダー軸まわりに一定角度ずつ2度回転し、回転前と合せて3回の測定により、同一測定点でのインテンシティの3軸成分を容易に求めることができる。このようなインテンシティプローブを用いて、実際に、音響インテンシティを3次元自動計測することができた。
- (2) 2本の1/2 in. マイクロホンの方向軸方向の距離差 Δr を14.6mmとした場合,校正音源を用いない簡便な位相差補正の方法により, 2チャンネル間の位相差を4 KHz までの音波に対し,補正することができた。
- (3) エンクロージャ側面の円孔からの音エネルギ流れの状態を自動計測により,音響インテン シティベクトルの分布図として,容易に可視化することができた。

(昭和60年5月21日 受理)

文 献

- 1) Hüber, G.: CETIM, Senlis, France 171 (1981)
- 2) 橘 秀樹, 矢野博夫: 生産研究35 (12) (1983)
- 3) Krishnappa, G: CETIM, Senlis, France 137 (1981)

三次元音響インテンシティの自動計測用プローブ

- 4) Crocker, M. J.: CETIM, Senlis, France 127 (1981)
- 5) Sas, P., Snoeys, R.: CETIM, Senlis, France 119 (1981)
- 6) 橘 秀樹, 矢野博夫: 騒音制御 8, (4) 166 (1984)
- 7) 小白井敏明, 中村光男, 富岡幸雄: 騒音制御 6, (6) 323 (1982)
- 8) Chung, J. Y.: J. Acoust. Soc. Am. 64, (6) 1613 (1978)