三次元音響インテンシティの自動計測方法*

西田 公至**, 富田 隆士***

Automatic Measurement of Spatial Acoustic Intensity

by Kohshi NISHIDA and Takashi TOMITA

A method of measuring acoustic intensity automatically is presented in this paper. The method uses measurements of the cross spectrum of the pressures at two closely spaced microphones. The two microphones used are arranged side by side with a short distance between their axes, and combined symmetrically with a holder axis. The holder can be turned on 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 such composed microphones. This method is actually applied to a visualization technique of the flow pattern of sound energy emitted from a rectangular plate vibrating in resonant modes. As a result, an acoustic intensity probe composed of two microphones, as used in this study, has been proved to be an appropriate sensor for the automatic measurement of spatial acoustic intensity vectors.

Key Words: Sound, Automatic Measurement, Acoustic Intensity, Acoustic Intensity Probe, Microphone, Rectangular Plate

1. 緒 言

エネルギー流れとしての音波の強さを表す音の強さを直接測定するということは、音響計測の分野において永年の課題であった。近年、FFT 解析装置などのデジタル信号処理技術の進歩により、近接した2本のマイクロホンからの音圧を同時に求め、これに解析処理を施して音の強さを求める音響インテンシティ計測法が注目されている。この音響インテンシティ計測法は、音響インテンシティが任意の測定点における音響パワー流束密度であり、音圧と粒子速度の積の時間平均によって表されるベクトル量であるので、音源の放射パワーの測定⁽¹⁾、機械の主要な発音部位を同定するための音源探査⁽²⁾、音響パワー流れのパターンの可視化⁽³⁾、およびパネルの透過損失の測定⁽⁴⁾などに関する研究に応用されている。

音響インテンシティ計測法では、粒子速度を近接した二点の音圧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かい合わせに配置した、FACE TO FACE、背合わせに配置した 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⁽⁵⁾。現状では、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、向か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 の構成が一般的に用いられている。しかし、ベクトル量である音響インテンシティを三次元的に測定するには、測定点ごとに三つの座標軸方向の音響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プでは、いずれも構造上、自動計測への適用は困難である。また音響インテンシティ計測法では、2マイクロホンチャンネル間に位相差が存在する場合、低周波数域において大きな誤差を生ずる。したがって、マイクロホンチャンネル間の位相差の補正が必要となる。

本研究では、音響インテンシティの三次元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、このマイクロホン構成に対する位相差の補正を行った上で測定可能な周波数範囲を検討した。さらに、実際の適用例として、内部に音源を有するエンクロージャの一つの側面にボルト接合

* 昭和61年3月15日 東海支部第35期総会講演会において講演、原稿受付 昭和60年6月3日。

** 正員、室蘭工業大学工学部 (〒050 室蘭市水元町27-1)。

*** 学生員、室蘭工業大学大学院。

した長方形鋼板からの放射音を対象に、音のエネルギー流れの可視化を行い、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による音響インテンシティ
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ーすなわち、音響パワ一流束密度を表すベクトル量で、音圧 $p(t)$ と粒子速度 $\vec{u}(t)$ の積の時間平均として次式で表される。

$$\vec{I} = p(t)\vec{u}(t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

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 I_r を考えると、粒子速度の r 方向成分を $u_r(t)$ として、次式のように表される。

$$I_r = p(t)u_r(t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

理論的には、 $p(t)$ と $u_r(t)$ とを測定すれば式(2)により I_r 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、その音圧こう配を式(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すことができる。

$$\rho \frac{\partial u_r}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{p_2(t) - p_1(t)}{\Delta r} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 ρ は空気の密度、 $p_1(t)$ 、 $p_2(t)$ は r 方向に微小距離 Δr 離れた二点における音圧を表す。

$$u_r(t) = -\frac{1}{\rho \Delta r} \int_{-\infty}^t \{p_2(\tau) - p_1(\tau)\} d\tau \quad \dots\dots (5)$$

さらに、音圧 $p(t)$ を次式のように近似する。

$$p(t) = \{p_1(t) + p_2(t)\} / 2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

したがって、式(2)は式(5)、式(6)により近似的に次式によって表される。

$$I_r = -\frac{1}{\rho \Delta r} \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2} \times \int_{-\infty}^t \{p_2(\tau) - p_1(\tau)\} d\tau \quad \dots\dots\dots (7)$$

式(7)による時間領域での関係を周波数領域で表示⁽⁶⁾すると、音響インテンシティの周波数成分 $I_r(f)$ 、および周波数帯域 ($f_1 \sim f_2$) での音響インテンシティ $I_r(f_1 \sim f_2)$ は、それぞれ、式(8)、式(9)によって表される。

$$I_r(f) = -I_m\{G_{12}(f)\} / 2\rho \Delta r f \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$I_r(f_1 \sim f_2) = -\frac{1}{2\rho \Delta r} \int_{f_1}^{f_2} \frac{I_m\{G_{12}(f)\}}{f} df \quad (9)$$

ここで、 $I_m\{G_{12}(f)\}$ は、 $p_1(t)$ 、 $p_2(t)$ のクロススペクトル密度関数(片側)の虚数部を表す。以上のように、 r 方向に微小距離 Δr だけ離れた二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 自動計測用インテンシティプローブ 音響インテンシティの三次元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、測定方向は二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、そのホルダ軸まわりに一定角度(45°)ずつ2度回転させ、回転前と合わせて3回の測定により、同一測定点での音響インテンシティの三軸成分を容易に求めることができる。三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 I_r とし、直交三軸 (x, y, z 軸) に対する伝搬方向の方向余弦を (l, m, n) とすれば、音の強さの三軸成分 (I_x, I_y, I_z) は次式により表される。

$$(I_x, I_y, I_z) = (I_r l, I_r m, I_r n) \quad \dots\dots\dots (10)$$

また、図2に示すような(1)、(2)、(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 の中心に向かう方向余弦を、それぞれ (l_1, m_1, n_1)、(l_2, m_2, n_2)、(l_3, m_3, n_3) 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 I_1, I_2, I_3 は次式の関係を満たす。

$$I_i = I_r(l l_i + m m_i + n n_i) \quad \dots\dots\dots (11) \\ i=1, 2, 3$$

ここに

図1 2マイクロホンの構成

$$\begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta r} \begin{bmatrix} d & \Delta h & 0 \\ d/\sqrt{2} & \Delta h & d/\sqrt{2} \\ 0 & \Delta h & d \end{bmatrix}$$

ただし $\Delta r = \sqrt{d^2 + \Delta h^2}$ (12)

式(10), 式(11)および式(12)から, 音の強さおよびその三軸成分が次式のように表される.

$$\left. \begin{aligned} I_x &= \frac{\Delta r}{d(\sqrt{2}-2)} \{ (\sqrt{2}-1)I_1 - \sqrt{2}I_2 + I_3 \} \\ I_y &= -\frac{\Delta r}{\Delta h(\sqrt{2}-2)} (I_1 - \sqrt{2}I_2 + I_3) \\ I_z &= \frac{\Delta r}{d(\sqrt{2}-2)} \{ I_1 - \sqrt{2}I_2 + (\sqrt{2}-1)I_3 \} \\ I_r &= \sqrt{I_x^2 + I_y^2 + I_z^2} \end{aligned} \right\} \text{.....(13)}$$

したがって, 測定点において (I_1, I_2, I_3) を測定すれば, その点における音の強さおよび三軸成分を式(13)によって求めることができ, さらに式(10)によって, 音の伝搬方向を求めることができる.

2.3 音響インテンシティの理論誤差 二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二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また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 I_r と理論値 I_{rt} との関係として次式が得られる⁽⁶⁾.

$$I_r = I_{rt} \sin(k\Delta r)/k\Delta r \text{(14)}$$

ここに, k は波長定数で $k=2\pi f/c$, f は周波数, c は

音速を表す. 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(14)の関係は次式のように表される.

$$I_r = I_{rt} \frac{\sin(k\Delta r - \phi)}{k\Delta r} \text{(15)}$$

図3は, $\phi=0^\circ, \pm 0.2^\circ, \pm 0.5^\circ$, および本研究で用いたマイクロホン構成値 $\Delta r=14.6 \text{ mm}$ に対する理論誤差である. この図から, 式(14)により高周波数域で誤差が大きくなり, 位相差 ϕ により低周波数域で誤差が大きくなるのがわかる. したがって, 有限差分近似による誤差が測定周波数の上限を与え, 下限は位相差の大きさにより定まることになる.

3. 位相差補正法

上述したように, 音響インテンシティの理論誤差は, マイクロホンチャンネル間に位相差が存在する時低周波数域で大きくなる. このためマイクロホンチャンネル間の位相差の補正が必要となる. 位相差の補正方法には, (1)伝達関数アプローチ⁽⁷⁾, (2)スイッチングアプローチ⁽⁶⁾, (3)改良形スイッチングアプローチ⁽⁵⁾などが考えられている. 本研究では, 改良形スイッチングアプローチによって位相差の補正を行った. この補正方法は, 二つのマイクロホンを校正のために同一音場におく必要がないことと, 測定の都度マイクロホンをスイッチングする必要がないことから, (1), (2)よりも簡単に位相差の補正を行うことができる. 以下に改良形スイッチングアプローチによる位相差の補正法を示す.

図4のようにスイッチング前のマイクロホン・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エ成分を P_1, P_2 , 出力音圧のフーリエ成分を P'_1, P'_2 とする. またスイッチング後の周波数応答を H_1^s, H_2^s , 入力音圧のフーリエ成分を P_1, P_2 , 出力音圧のフーリエ成分を P'_1^s, P'_2^s とする. このとき, 以下の関係が成り立つ.

図2 マイクロホンの回転法

図3 音響インテンシティの理論誤差

$$\left. \begin{aligned} P'_1 &= H_1 P_1, P'_2 = H_2 P_2 \\ P'_1{}^s &= H_2 P_1, P'_2{}^s = H_1 P_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

したがって、測定される P'_1 と P'_2 の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。

$$G_{12} = G'_{12} / H_1^* H_2 \dots\dots\dots (17)$$

ここで、 H_1^* は H_1 の共役複素数、 G_{12} は位相差がない時のクロススペクトル密度関数である。式(16)より、式(17)は次式のように表すことができる。

$$G_{12} = \frac{G'_{12}}{(H_{12}/H_{12}^s)^{1/2} |H_1|^2} \dots\dots\dots (18)$$

ここで H_{12} , H_{12}^s は、それぞれ $P'_2 = H_{12} P'_1$, $P'_2{}^s = H_{12}^s P'_1{}^s$ の関係を表す伝達関数である。したがって、式(8)は次のように表せる。

$$I_r(f) = - \frac{I_m \{ G_{12}(f) / (H_{12}/H_{12}^s)^{1/2} |H_1|^2 \}}{2\pi\rho\Delta r} \dots\dots\dots (19)$$

式(19)の $|H_1|$ 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。 $|H_1|$ 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~4 000 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、本研究では、 $|H_1|^2$ を省略した簡便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 以内の誤差が生じることになる。

図 4 測定系

図 5 インテンシティプローブ自動走査装置

4. 実験装置および実験方法

音響インテンシティの測定には、試作によるインテンシティプローブ自動走査装置を用いる。自動走査装置を図5に示す。プローブは4個のステップモータにより、直交三軸方向へ一定間隔で移動することができ、さらに、マイクロホンホルダ軸の回りに一定角度ずつ回転移動することができる。これらの移動はコンピュータによって制御される。三軸 (x, y, z) 方向の移動可能範囲は、それぞれ 1200 mm, 900 mm, 1000 mm となっている。使用マイクロホンは 1/2 in. コンデンサマイクロホンであり、マイクロホン構成は $d=13.8$ mm, $\Delta h=5$ mm, $\Delta r=14.6$ mm となっている。各測定点での音響インテンシティの直交三軸成分、 I_x, I_y, I_z は、図2に示したマイクロホン状態(1), (2), (3)での音響インテンシティ I_1, I_2, I_3 を FFT 解析装置により測定し、この I_1, I_2, I_3 をコンピュータによって式(13)の演算をすることにより求める。これらの測定は、コンピュータと FFT 解析装置から成る

図 6 音響インテンシティ測定系

図 7 使用モデル音源

自動計測システムにより制御される。そのシステムを図6に示す。

マイクロホンチャンネル間の位相差の補正は、3章において述べたように、改良形スイッチングアプローチによって行う。補正には音源としてスピーカを用いホワイトノイズを入力した。またインテンシティプロープは、スピーカの中心を通る垂直線上に、そのホルダ軸と一致するように置いた。

音響インテンシティを測定するための音源として共振振動数で振動している長方形鋼板をモデル音源とした。図7に示すように、使用した長方形鋼板は寸法が長辺 400 mm、短辺 300 mm、板厚 3 mm であり、20

本の M 4 ボルトで、厚さ 19 mm の鋼板溶接構造のエンクロージャに接合されている。また、振動板はエンクロージャ内部に設けられたスピーカによって空気加振される。スピーカ入力力は 1 W の正弦波入力とした。

測定面は(1)振動板の板面から 15 mm 離れた、板面に平行な平面と、(2)板面の中心点での法線を含み長辺に平行な平面の2とおりとした。測定面の大きさは(1)の場合 327.5 mm×452.5 mm、(2)の場合 400 mm×452.5 mm とした。また測定点は(1)の場合、測定面の2辺を 10×10 の格子に分割した格子点上、(2)の場合、8×10 の格子に分割した格子点上とした。

5. 結果および考察

図8(a)～(c)に用いたインテンシティプロープによる補正結果を示す。また図8(c)の低周波数域を拡大した位相差曲線を図9に示す。それぞれの図中には二つのマイクロホンチャンネル間における理論上の位相差($k\Delta r$)の±10%の誤差ラインを記し補正結果の有効性を検討した。位相差 ϕ が±10%以内に入る場合式(15)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 3 600 Hz となる。図8, 9の結果から、正面入射、側面入射の場合いずれも 5 kHz までほぼ良好な特性が得られた。また、低周波数域では 200 Hz 以上で良好な特性が得られたが、200 Hz 以下では誤差±10%をかなりオーバーする結果が得られた。位相差 ϕ 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ほうが大きく、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、マイクロホン間の干渉によるものと考えられる。以上のことから測定周波数の範囲は 200 Hz～3 600 Hz と考えられる。この周波数帯においては理論的な音響インテンシティの誤差範囲は-1～0.5 dB となる。実際には、3.1節で述べたようにさらに±1 dB 以内の誤差がこの値に加わる。図10に側面入射の場合の音響インテンシティレベル(IL_r)とマイクロホ

(a) 正面入射, $\Delta h=5$ mm

(b) 正面入射, $\Delta h=15$ mm

(c) 側面入射, $\Delta h=5$ mm

図8 マイクロホンチャンネル間の位相差補正結果

図9 低周波数域における位相差補正結果

ン No. 1 の音圧から求められた音響インテンシティーレベル (IL_{∞}) を示す。遠方音場では理論的には $IL_r = IL_{\infty}$ となることから両曲線を比較すれば音響インテンシティーの理論的な誤差をある程度明らかにすることができる。図 10 から明らかなように二つの波形はよく一致している。ただし、4 kHz 付近から IL_r が IL_{∞} よりも小さくなっていくことがわかる。また、低周波数域においてもこのような傾向がみられる。以上のことから、音響インテンシティーの理論的な誤差は、高周波数域に

図 10 IL_r と IL_{∞} との比較

(a) Mode (1,1) , Frequency 285 Hz

(b) Mode (3,1) , Frequency 737 Hz

図 11 音響インテンシティの測定結果

おいては式(14)の有限差分近似によって生じ、低周波数域においてはマイクロホンチャンネル間の位相差 ϕ により生じると考えられる。

図 7 に示したモデル音源による音響インテンシティの測定結果を図 11 に示す。図 11(a), (b) はそれぞれ振動板が (1, 1), (3, 1) の共振モードで振動している時の音響インテンシティの測定結果である。左図は、各測定点での y 軸方向成分の音響インテンシティー I_y を表し、右図は測定面上での音のエネルギー流れを表す。図から明らかなように (1, 1) 共振モードの場合には、音のエネルギー流れはほぼ球面状に放射されているのがわかる。また、(3, 1) 共振モードの場合には、板面の近傍において、短辺に平行な 2 本の節により 3 分割された長方形板の振動モードに対応した音響インテンシティ分布が得られた。また、音のエネルギー流れは両側の同相で振動している領域から主として放射され、中央の領域には一部流入の傾向がみられることがわかる。

6. 結 言

音響インテンシティの三軸方向成分を容易に自動測定することができるインテンシティプローブの構成を

考え、二つのマイクロホンチャンネル間の位相差を改良形スイッチングアプローチをもとにした簡便な方法により補正した後、実際にモデル音源を対象に音のエネルギー流れを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、そのホルダ軸まわりに一定角ずつ2度回転し、回転前と合せて3回の測定により、同一測定点での音響インテンシティの三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れば、三次元音響インテンシティを容易に自動計測することができ、実際に本方法の有効性を確認することができた。

(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 14.6 mm とした場合、校正音源を用いない、改良形スイッチングアプローチをもとにした簡

便な位相差補正方法により、200 Hz～3 600 Hz までの音波に対し有限差分近似による理論的な誤差を -1 dB から 0.5 dB までの範囲で、また位相差補正法の簡略化による誤差を ± 1 dB 以内の範囲で、音響インテンシティを測定することができる。

(3) (1, 1), (3, 1) の振動モードで振動している長方形板からの放射音の音のエネルギー流れを自動計測により容易に可視化することができた。

文 献

- (1) Huber, G., *Proc. of CENTIM, Senlis, France*, (1981), 171.
- (2) Krishnappa, G., *Proc. of CENTIM, Senlis, France*, (1981), 137.
- (3) Sas, P. and Snoeys, R., *Proc. of CENTIM, Senlis, France*, (1981), 119.
- (4) 橘・矢野, 騒音制御, 8-4 (昭59), 1.
- (5) 小白井・ほか2名, 騒音制御, 6-6 (昭57), 323.
- (6) Chung, J. Y., *J. Acoust. Soc. Am.*, 64-6 (1978), 1613.
- (7) Krishnappa, G., *J. Acoust. Soc. Am.*, 69-1 (1981), 307.

討 論

〔質問〕 野 際 靖 雄

〔(株)東芝 総合研究所 機械研究所〕

簡単なマイクロホン構成で、三次元音響インテンシティを容易に自動計測できる方法を示されたことに、敬意を表する。理解を深めるため、下記の点についてお教え願いたい。

(1) 校正音源の必要がない改良スイッチングアプローチを用いたとあるが、式(19)の H_{12} を求める場合、どのような音源を用いたか、ご教示いただきたい。

(2) 図10で側面入射の場合の音響インテンシティレベルの比較があるが、この場合も図8、9と同じく、マイクロホンと音源の間隔は 300 mm か、その場合、 IL_{∞} との比較は、どのような意味になるか、お教えいただきたい。

(3) 図10の IL_r と IL_{∞} とは、図を見ると大きな差が認められないが、高周波数域と低周波数域で両者に有意差があるとお考えか、お教え願いたい。

〔回答〕 (1) 音源には寸法 300 mm×210 mm×230 mm の合板製直方体エンクロージャの一面に 10 cm のフルレンジ形コーンスピーカを取付けたものを用い、スピーカにホワイトノイズを入力した。 H_{12} , H_{12}^* は FFT アナライザにより測定しているが、その解析信号 (200 ms の解析時間) は広帯域の周波数

であるので時間的に変動する。そこで、原信号に等価な信号として解析するため、解析信号を 100 回加算平均している。

(2) マイクロホンと音源の間隔は図8、9と同じく 300 mm とした。 $IL_r = IL_{\infty}$ となる条件は、音源との距離 R とマイクロホン間隔 Δr とが $R \gg \Delta r$ なる関係を満たすことである。つまり、音源とマイクロホンとの距離が十分でなくとも、マイクロホン間隔が短く、上式を満たすならば $IL_r = IL_{\infty}$ が成り立つ。上述の $R \gg \Delta r$ が成り立たない場合における音響インテンシティと成り立つ場合のそれとの誤差 (Near Field Error と呼ばれる) が 1 dB 以内となるためには $R > 1.1 \Delta r$ なる関係を満たせばよいとされており(付1)、本研究では $R = 20 \Delta r$ 程となることから $IL_r = IL_{\infty}$ なる関係は十分成り立つと考えた。

(3) 付図1に高周波数域を拡大した IL_r と IL_{∞}

付図 1 IL_r と IL_{∞} との比較 (高周波数域拡大)

の関係を示す。付図 1 から 4KHz 付近から誤差が生じていることが明確にわかる。その大きさは 5KHz で約 -2dB 程である。この -2dB の誤差は音響インテンシティ $[W/m^2]$ に換算すると -37% の誤差となる。つまり、レベル値としては微少であっても、エネルギー的にみれば大きな誤差となるわけである。図 11 に示した

ような音のエネルギー流れを表す場合、式 (10) によりその方向を求めるので、エネルギー量としての音響インテンシティに大きな誤差が生ずるならば正確なエネルギー流れの方向を求めることが困難となる。

(付 1) Waser, P. and Crocker, J., *Noise Control Eng. J.* 22-3 (1984), 76.