

# Acoustic Intensity 計測法に関する研究 第1報

## — 音響パワーレベル測定への応用 (基礎的検討) —

Study on Acoustic Intensity Measuring Method (1)

Application to Sound Power Level Measurements (Basic Investigations)

橘 秀樹\*・矢野博夫\*

Hideki TACHIBANA and Hiroo YANO

### 1. ま え が き

音響測定のひとつは、音圧測定によっているが、音響的パワーフローの大きさを表す音の強さ (Acoustic Intensity) を測定することができれば、各種の騒音源の音響放射パワーの測定、あるいは建築音響分野における遮音測定などを直接的に行うことができる。そこでかなり古くから種々の試み (音響ワットメータの開発など) がなされてきたが、特に粒子速度の測定が困難であることから、なかなか実用化されるには至らなかった。しかし最近になって、デジタル信号処理技術の発達などに支えられて、近接した2点の音圧から粒子速度を近似的に求める方法が開発され、それにもとづく Acoustic Intensity 計測法<sup>1)</sup>(以下では、AI法と呼ぶ)が実験段階から実用段階に入ってきた。

この方法は、現在欧米を中心に盛んに研究されているが、我々も建築音響・騒音制御の分野での応用を目的として種々の検討を行っている。そこでまず本報では、音源の放射パワーの測定への応用に関して行った基礎的な実験的検討の結果を報告する。

### 2. AI 計測法の原理と音響パワー測定への応用

音場の一点における  $r$  方向の音の強さ  $I_r$  は、一般的に次式で表される。(— は時間平均を表す。)

$$I_r = \overline{p(t) \cdot u_r(t)} \quad (1)$$

ただし、 $p(t)$ : 音圧

$u_r(t)$ : 粒子速度の  $r$  方向成分

音源から十分離れた場所で、(2)式の関係がほぼ成立する場合には、(3)式によって音圧のみから音の進行方向の音の強さ  $I$  を求めることができる。

$$p(t) = \rho c u(t) \quad (2)$$

ただし、 $\rho$ : 空気の密度、 $c$ : 音速

$$I = \overline{p^2(t)} / \rho c \quad (3)$$

しかし、音源の近傍など(2)式が成立しない音場では、 $p(t)$ 、 $u_r(t)$ の両方を測定して(1)式によって音の強さを求める必要があるが、一般に粒子速度を音圧と位相関係を正確に保った条件で測定することは難しい。

そこで、粒子速度を近似的に求める方法として、音波に関する基礎式(4)式に着目し、その第2項を(5)式のように近似すると、 $r$ 方向の粒子速度  $u_r(t)$ は近似的に(6)式で表すことができる。

$$\rho \frac{\partial u_r}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{p_2(t) - p_1(t)}{\Delta r} \quad (5)$$

ただし、 $p_1(t)$ 、 $p_2(t)$ は、 $r$ 方向に微小距離  $\Delta r$  だけ離れた2点における音圧を表す。

$$u_r(t) = -\frac{1}{\rho \Delta r} \int_{-\infty}^t [p_2(t_1) - p_1(t_1)] dt_1 \quad (6)$$

したがって、 $r$ 方向への音の強さ  $I_r$  は、近似的に次式によって表される。

$$I_r \doteq -\frac{1}{\rho \Delta r} \frac{[p_1(t) + p_2(t)]}{2} \int_{-\infty}^t [p_2(t_1) - p_1(t_1)] dt_1 \quad (7)$$

(7)式にもとづいて、近接した2点の音圧から、図-1に示すような測定システムを用いて音の強さを直接的に測定する方法(直接法)もあるが、ある周波数帯域ごとに音の強さを求めるためには、通過帯域特性、位相特性ともに完全に一致した二つの帯域フィルターを用いる必要がある。

一方、(7)式の間係を周波数領域表示で演算することにより、 $f_1 \sim f_2$ の周波数帯域の音の強さ  $I_r(f_1 \sim f_2)$ を表す次式の間係が導かれる。<sup>2),3)</sup>

$$I_r(f_1 \sim f_2) \doteq -\frac{1}{2\pi \rho \Delta r} \int_{f_1}^{f_2} \frac{I_m\{G_{12}(f)\}}{f} df \quad (8)$$

ただし、 $I_m$ : 虚数部を表す。

$G_{12}(f)$ :  $p_1(t)$ 、 $p_2(t)$ の(片側)クロススペクトル

\* 東京大学生産技術研究所 第5部

研 究 速 報

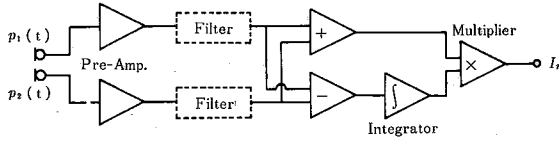


図-1 直接法

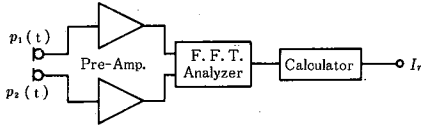


図-2 クロススペクトル法

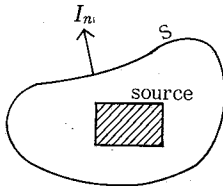


図-3 音源を囲む閉曲面

関数

すなわち、近接した2点における音圧信号の間のクロススペクトル関数を求め、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の強さが求められる(クロススペクトル法、図-2参照)。

つぎに図-3において、ある音源を囲む任意の閉曲面Sを設定したとき、その面上における法線方向の音の強さInがわかれば、次式によって音源の放射パワーPが求められる。

$$P = \iint_S I_n ds \quad (9)$$

その場合、(3)式にもとづき、音圧測定から音の強さを求めてPを計算する方法(自由音場法)が従来よく行われているが、その場合には、無響室などの自由音場内に音源を置き、それから波長ならびに音源の寸法に比べて十分大きな半径をもつ球面を測定面として設定する必要がある。それに対して、上に述べた近接2点の音圧から音の強さを求める方法によれば、音源の近傍に測定曲面を任意に設定することができる。これは、複合的な音源について、部位ごとの放射パワーを測定する場合などに極めて好都合である。

3. 計測システム

前項で述べたように、2マイクロホン法によるAI計測法では、信号の処理の方法として、直接法(時間領域処理)とクロススペクトル法(周波数領域処理)の二つがあるが、本研究では、計測器の汎用性の点から主とし

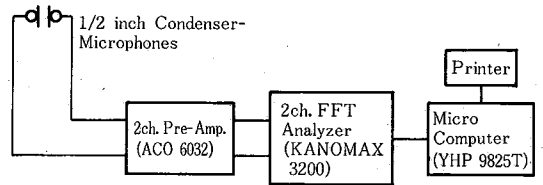


図-4 AI計測システム(クロススペクトル法)

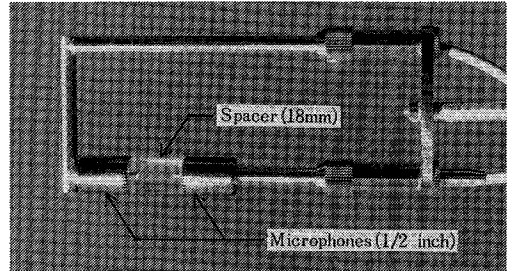


写真-1 インテンシティー・プローブ

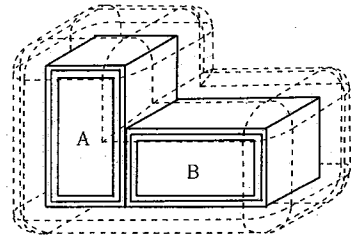


図-5 モデル音源

て後者によることとし、具体的には図-4に示すような計測システムを用いている。このシステムでは、音の強さのレベルだけでなく、近接2点における音圧レベルのエネルギー平均値も同時に求められるようにプログラムされている。インテンシティー・プローブとしては、振幅特性、位相特性ともによくそろった二つの1/2インチ・コンデンサー・マイクロホン(B&K 4165)を選定し、写真-1に示すようにアクリル樹脂製のスペーサーをはきんで対面配置の形にしている。マイクロホン間隔Δrとしては、測定周波数範囲を125 Hz~5 kHz(1/3オクターブバンド)とした場合には、18 mmとしている。システム全体の計測精度、感度校正方法などについても基礎的な検討を行っているが、その詳細はここでは省略する。

4. モデル音源を用いた基礎的検討

4.1 モデル音源

AI法によるパワーレベル測定法を検討するためのモデル音源として、木製スピーカボックス(54 cm×30 cm×23 cm)の前面に、厚さ10 mmの硬質塩ビ板(45

cm×20.5 cm) を板ゴムで周辺支持し、その内側に電磁型加振器を取り付けたものを二つ製作した。これらを図-5 に示すように組み合わせ、それぞれを別系統のノイズ信号 (A: ピンクノイズ, B: ホワイトノイズ) で駆動した。

4.2 通常法との比較

まず、上記のモデル音源の両方を同時に駆動した状態について、AI 法 (無響室使用)、自由音場法 (無響室使用, ISO 3745 に準拠)、拡散音場法 (容積 200 m<sup>3</sup> の残響室使用, ISO 3741 に準拠) の三種類の方法で全放射パワーレベルを測定してみた。ここで、AI 法による場合の測定面は、図-5 に示すように音源の表面から 10 cm 離れた面とし、分割面積は平面部分では 15 cm×15 cm を基本として曲面部分はそれとほぼ同じになるようにした。音の強さの測定点は、それぞれの分割面の中心とし、測定された音の強さ ( $I_i$ ) とそれぞれの代表面積 ( $S_i$ ) との積をとり、その総和 ( $\sum I_i \cdot S_i$ ) として全放射パワー ( $P$ ) を計算した。

図-6 に三種の方法による 1/3 オクターブ・パワーレベルの測定結果を比較して示すが、AI 法による結果と他の二つの方法による結果との差は 1 dB 以下となっており、AI 法によるパワーレベル測定の精度はほぼ満足できるものであることが確認された。

4.3 部分放射パワーの測定

複数の音源からなる複合音源について、AI 法によって部位ごとの放射パワーを測定する試みがいくつか行われている。そこでここでは、単純な条件における検討として、上記の二つのモデル音源を同時に駆動した状態で、AI 法によってそれぞれの放射パワーをどの程度分離して測定できるかを検討した。この場合、測定面は音源から 4 cm 離れた面とし、分割面積は 6 cm×6 cm を基本とした。

図-7 は上記の条件で A, B 音源を囲む個別の面を設定して求めたそれぞれの音源の放射パワーレベルと、それぞれの単独で駆動した場合について同様の方法で求めたパワーレベルを比較した結果であるが、相対的に放射パワーが小さい B 音源の低音域を除き、全体として同時駆動の場合と単独駆動の場合の測定結果はよく一致している。(B 音源の 400 Hz では、音の強さが負になっているが、これは A 音源の影響による測定誤差と思われる。) 図-8 は、二つの音源を同時駆動したときの上述の測定結果について、全体の放射パワーを基準 (0 dB) とし、それに対する音源 A, B の寄与率を表した結果である。

4.4 測定音場に関する検討

音源を囲む閉曲面上の音の強さの測定から放射パワーを求める方法によれば、原理的には閉曲面外部からの音

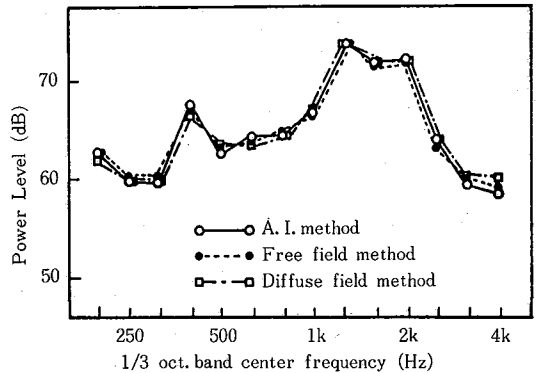


図-6 三種類の方法によるパワーレベル測定結果の比較 (A, B 音源同時駆動)

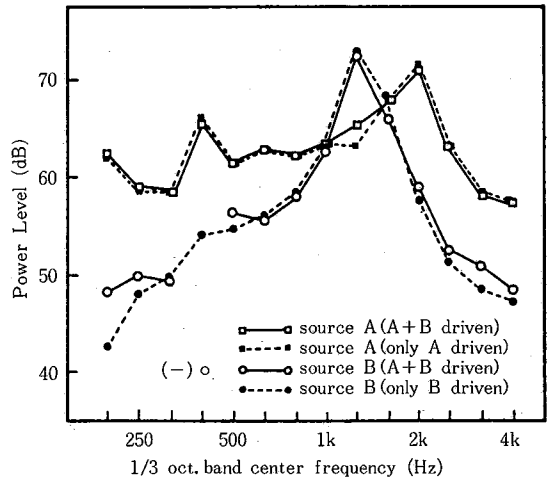


図-7 部分放射パワーの測定結果

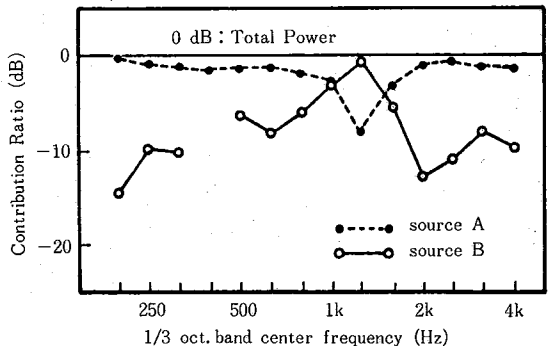


図-8 全放射パワーに対する各音源の寄与率

の影響を受けにくいという利点がある。そこでこの点を検討するために、極端な条件としてモデル音源を容積 200 m<sup>3</sup> の残響室の中央部 (床上) に設置し、図-9 に示すように音源の幾何学的中心から半径 1 m の半球面を設

## 研 究 速 報

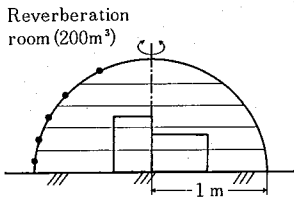


図-9 音源を囲む半球測定面 (残響室内)

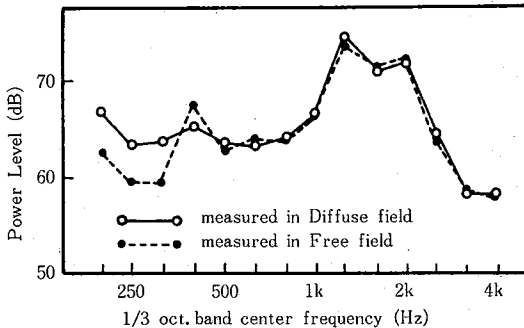


図-10 測定結果 (反射音場の影響)

定して、放射パワーを測定してみた。この場合、測定面は ISO 3745 の規定に従って音源の中心からみた立体角が等しくなるように層状に分割し、それぞれの分割面の中央部に沿ってプローブ (音源中心に向けた) を水平に回転させてインテンシティーを積分した。(なおこの測定には、B&K 社のインテンシティー計測器 3360 を使用した。)

測定結果を無響室内で AI 法によって行った測定値と比較して、図-10 に示す。500 Hz 以上では両者はきわめてよく一致しているが、低音域では 5 dB 程度の誤差が生じている。これは反射音がきわめて多い残響室の音場

の影響によるものと考えられ、一般的な室内音場では、これほどの測定誤差は生じないものと考えられる。

## 5. む す び

新しい音響測定法である AI 法は自動車のエンジンなど、複合音源である機械類の部位別放射パワーの測定<sup>4)</sup>に実際に用いられているが、その測定精度については十分な検討が済まされているとは言えない。そこで本研究では、AI 法による音響パワーレベルの測定精度に関して、モデル音源を用いた基礎的な検討を行った。その結果、AI 法による近接測定によれば、現在パワーレベルの標準測定法となっている自由音場法、あるいは拡散音場法によった場合とほぼ一致した結果が得られること、また複合音源の部位別の放射パワーが定量的に求められることなどが確かめられた。なお現在、AI 法の建物の遮音測定への応用を検討中であり、その結果については次の報告で述べる予定である。(1983年10月11日受理)

## 参 考 文 献

- 1) F. J. Fahy: "Measurements with an intensity meter of the acoustic power of a small machine in a room" J. S. V. Vol.57(3)1978
- 2) F. J. Fahy: "Measurement of acoustic intensity using the cross-spectral density of two microphone signals" J. A. S. A.62 1977
- 3) J. Y. Chung: "Cross-spectral method of measuring acoustic intensity without error caused by instrument phase mismatch" J. A. S. A. Vol.64 1979
- 4) M. J. Crocker: "The use of surface and acoustic intensity techniques to identify noise source on machines" Center Technique des Industries Mecaniques.1981