

# 衝撃音源の音響エネルギーの表示・測定方法

Methods of Describing and Measuring the Acoustic Energy of Impulsive Sound Sources

橋 秀 樹\*・矢 野 博 夫\*

Hideki TACHIBANA and Hiroo YANO

## 1. ま え が き

騒音問題では、一般に騒音源の音響的出力の情報を得ることが最も基本である。定常音を発生する音源については、単位時間あたりの音響エネルギーをレベル表示した音響パワーレベル (sound power level) が定義されており、その測定方法として、放射音場 (自由音場または半自由音場、および拡散音場) の音圧を基本測定量とした方法が確立されている。また、最近では音響インテンシティー計測法を応用する方法も実用化されつつある。一方、衝撃音など過渡的な音を発生する音源については、その音響的出力を表す方法が約束されておらず、したがってその測定方法も確立されていない。

そこで本稿では、まず衝撃性音源の音響的出力の表示方法の提案として、音源の全放射エネルギーをレベル表示した音響エネルギーレベル (sound energy level) を他の音響諸量との整合を考慮した形で定義する。ついでその測定方法として、自由 (または半自由) 音場および拡散音場を用いて音圧を測定する方法、ならびに音響インテンシティー計測法による方法について理論的に考察し、その妥当性を実験的に検討した結果を示す。

## 2. 音響エネルギーレベルの定義

定常音を放射する音源については、放射パワー (図-1 (a)参照) を次式のようにレベル表示した音響パワーレベル (sound power level)  $L_w$  が定義されている。

$$L_w = 10 \log_{10} \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (1)$$

ただし、 $P$  : 音源の放射パワー ( $W = J/s$ )

$P_0 = 10^{-12} W$  : 基準の音響パワー

これに対して、衝撃性音源など音の放射が有限時間に限られている音源の音響的出力の表し方としては、全放射エネルギー (図-1 (b)参照) に着目し、それをレベル表示した量として、次式で表される音響エネルギーレベル (sound energy level)  $L_E$  を定義する。

$$L_E = 10 \log_{10} \left( \frac{E}{E_0} \right) \quad (2)$$

ただし、 $E$  : 音源が放射する全エネルギー (J)

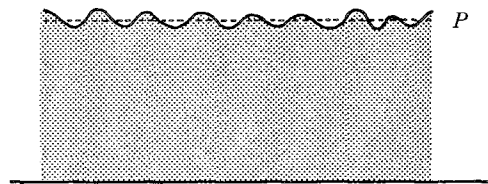
$E_0 = 10^{-12} J$  : 基準の音響エネルギー

## 3. 音響エネルギーレベルの測定方法

定常音源の音響パワーレベルの測定方法としては、原理的に次の三つに分類できる。

- 1) 音源を自由 (または半自由) 音場内に置いたときの遠距離音場における音圧を測定し、音の強さ (sound intensity) を推定する方法
  - 2) 音源を拡散音場内に置いたときの音場の平均音圧を測定し、音響エネルギー密度 (sound energy density) を推定する方法
  - 3) 音源からの放射音の音の強さを直接測定する方法
- 1), 2)の方法は、いずれも p-square method (音圧 2

(a) Stationary sound source



(b) Impulsive sound source

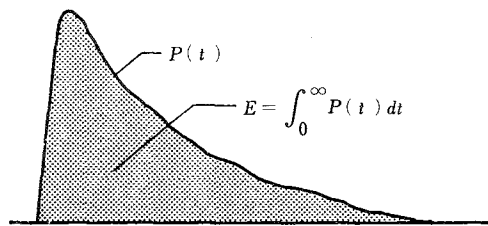


図-1 定常音源と衝撃音源

\*東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報  
 乗法)と呼ばれ, 原理的には音圧から音の強さあるいは音場の音響エネルギー密度を推定し, それから音響パワーを求める方法である。これらの測定方法については, ISO規格が整備されており, 現在わが国でもJIS規格の作成が進められている<sup>1)</sup>。3)の方法は, 2マイクロホン法などのいわゆる音響インテンシティー計測法を応用する方法で, 現在実用化研究が盛んに行われている。

そこで, 前項で定義した衝撃性音源の音響エネルギーレベル  $L_E$  の測定方法について理論的に考察すると, 以下に述べるように上記の三つの方法に相当する測定方法が考えられる<sup>2,3,4)</sup>。

**(A) 自由または半自由音場法 (p-square method 1)**

音源を中心とする半径  $r$  の仮想球面上の一点における法線方向の音の強さの瞬時値 (instantaneous sound intensity)  $\vec{I}(t)$  は次式で表される。

$$\vec{I}(t) = p(t) \cdot \vec{u}(t) \tag{3}$$

ただし,  $p(t)$ : 音圧,  $\vec{u}(t)$ : 粒子速度  
 ここで, 遠距離音場では,

$$u(t) = p(t)/\rho c \tag{4}$$

ただし,  $\rho c$ : 空気の特性インピーダンス  
 の関係が成り立つので,  $\vec{I}(t)$  の絶対値は次式で表される。

$$I(t) = p^2(t)/\rho c \tag{5}$$

ここで, 次式で表されるような測定点における音の強さの全時間積分値を考え, ここではこれを衝撃音の音響エネルギー流密度 (sound energy flow density, 単位:  $J/m^2$ ) と呼ぶ。

$$e = \int_0^\infty I(t) dt = \frac{1}{\rho c} \int_0^\infty p^2(t) dt \tag{6}$$

また, この量を次式のようにレベル表示した量を音響エネルギー流密度レベル (sound energy flow density level) と呼ぶことにする。

$$L_e = 10 \log_{10} \left( \frac{e}{e_0} \right) \tag{7}$$

その場合, 音響エネルギー流密度の基準値  $e_0$  として,

$$e_0 = \frac{E_0}{S_0} = I_0 \cdot T_0 = \frac{p_0^2}{\rho c} T_0 = 10^{-12} (J/m^2)$$

ただし,  $I_0 = 10^{-12} W(J/s)$ ,  $T_0 = 1s$ ,

$$S_0 = 1m^2$$

とすることにより, (6), (7)式から次式が得られる。

$$L_e = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{T_0} \int_0^\infty \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right] = L_{PE} \tag{8}$$

すなわち遠距離音場では,  $L_e$  と  $L_{PE}$  (sound pressure exposure level: 単発音圧暴露レベル) とは等しい。

衝撃性音源が発生する全音響エネルギーは,

$$E = \int_S e ds = \bar{e} \cdot 4\pi r^2 \tag{9}$$

S: 測定球面,  $\bar{e}$ :  $e$  の平均値

したがって衝撃性音源の  $L_E$  は次式で表される。

$$\begin{aligned} L_E &= 10 \log_{10} \left( \frac{\bar{e} \cdot 4\pi r^2}{e_0 S_0} \right) \\ &= \bar{L}_e + 10 \log_{10} \left( \frac{r^2}{r_0^2} \right) + 11 \\ &= \bar{L}_{PE} + 10 \log_{10} \left( \frac{r^2}{r_0^2} \right) + 11 \end{aligned} \tag{10}$$

ただし,  $\bar{L}_{PE}$ :  $L_{PE}$  のエネルギー平均値,

$$r_0 = 1m$$

すなわち, 測定球面上の  $L_{PE}$  を測定することにより, 衝撃音源の音響エネルギーレベル  $L_E$  が求められる。(なお音源が半自由音場の反射面上に置かれた場合には, 上式における  $4\pi r$ , 11 はそれぞれ  $2\pi r$ , 8 となる。)

ここで, 自由音場における音圧 2乗法による定常音源の音響パワーレベルの測定方法は, 次の計算式にもとづいている。

$$L_w = \bar{L}_p + 10 \log_{10} \left( \frac{r^2}{r_0^2} \right) + 11 \tag{11}$$

(10)式と上式では, 右辺第1項が異なっているだけである。すなわち, (10)式の  $L_{PE}$  は音圧の2乗の時間積分値であるのに対し, (11)式の  $L_p$  は音圧の2乗の時間平均値 (実効値) である。

**(B) 拡散音場法 (p-square method 2)**

衝撃音源などの過渡音源が拡散音場内にある場合, エネルギー的な考察にもとづけば近似的に次の関係が成り立つと考えられる。

$$P(t) = V \frac{dE_a(t)}{dt} + \frac{c \cdot E_a(t)}{4} A \tag{12}$$

または,

$$\int_0^t P(\tau) d\tau = V \cdot E_a(t) + \frac{cA}{4} \int_0^t E_a(\tau) d\tau \tag{12'}$$

ただし,  $P(t)$ : 音源が放射する瞬時音響パワー ( $J/s$ )

$E_a(t)$ : 拡散音場の音響エネルギー密度 ( $J/m^2$ )

$V$ : 拡散音場の容積 ( $m^3$ )

$A$ : 拡散音場の等価吸音面積 ( $m^2$ )

(12')式で,  $t \rightarrow \infty$  とすれば  $E_a(t) \rightarrow 0$  であるから, 音源の全音響エネルギーは,

$$E = \int_0^\infty P(t) dt = \frac{cA}{4} \int_0^\infty E_a(t) dt \tag{13}$$

ここで, 拡散音場では,

$$E_a(t) = p^2(t)/\rho c^2 \tag{14}$$

の関係が成り立つので, (13)式は次のように書ける。

$$E = \frac{A}{4\rho c} \int_0^{\infty} p^2(t) dt \quad (15)$$

したがって、音源の  $L_E$  は次式で表される。

$$L_E = L_{PE} + 10 \log_{10} \left( \frac{A}{S_0} \right) - 6 \quad (16)$$

すなわち、拡散音場内における  $L_{PE}$  と等価吸音面積  $A$  (残響時間から求められる) とを測定することにより、衝撃音源の  $L_E$  が求められる。(実際の測定では、 $L_{PE}$  は空間平均値として求める必要がある。)

ここで、拡散音場における音圧 2 乗法による定常音源の音響パワーレベルの測定方法は、次の計算式にもとづいている。

$$L_w = L_p + 10 \log_{10} \left( \frac{A}{S_0} \right) - 6 \quad (17)$$

(16)式と上式の違いは、(10)式と(11)式の場合と全く同様であり、定常音源の音響パワーレベルを測定する場合には音圧の 2 乗の時間平均を求めるのに対して、衝撃音源の音響エネルギーレベルを測定する場合には音圧の 2 乗の時間積分値を求めることになる。

**(C) 音響インテンシティー計測法による方法**

第三の方法は、音響インテンシティー計測法によって音場の音の強さを直接測定する方法である<sup>4,5,6)</sup>。すなわち、音源を取り囲む閉曲面上の音の強さの瞬時値を測定し、その全時間積分値として音響エネルギー流密度  $e$  を求め、さらにそれを閉曲面上で積分することにより、音源の全音響エネルギー  $E$  が求められる。

この方法による場合の特長として、音響インテンシティー計測法による定常音源の音響パワーレベルの測定の場合と同様に、(4)式が成立しないような近距離音場でも測定が可能である。

なお、2 マイクロホン法による音響インテンシティー計測法によって衝撃音の音の強さを求める場合の有限差分近似による測定誤差は、衝撃音に含まれているスペクトル成分の上限とマイクロホン間隔の関係によって決まる。これは定常音の場合と全く同様である。

**4. 実験的検討**

前項で述べた 3 種類の測定方法の妥当性を実験的に確認するために、これらの方法によって同一の衝撃音源の音響エネルギーレベル  $L_E$  を測定してみた。

音源としては平面型スピーカ (Technics SB-R100) を用い、それに継続時間が 100 ms および 10 ms の 2 種類の M 系列信号 1 周期分の衝撃信号を入力した。

まず(A)および(C)の方法による測定として、図-2 に示すように無響室の床に板材料を敷いて反射性とし、その上に音源スピーカを上向きに置き、それをとり囲む半

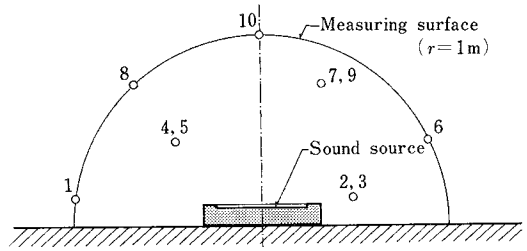


図-2 半自由音場における測定点の配置

径 1 m の測定半球面を設定してその面上に ISO 3745 および JIS Z 8732 に規定されている 10 点の測定点を設定した。

計測システムとしては、音圧測定、音響インテンシティー測定ともに B&K 3360 音響インテンシティー計測システム (プローブは B&K 4165 1/2 in. コンデンサーマイクロホン 2 個をギャップ 12 mm で組み合わせて使用) を用い、各測定点における音圧から  $L_{PE}$  を、また測定面に垂直な方向の音響インテンシティーから  $L_e$  を求めた。それらの結果から、それぞれ(A)、(C)の方法によって音源  $L_E$  を計算した。

つぎに(B)の方法による測定として、容積が 200m<sup>3</sup> で 500Hz で 7 秒の残響時間をもつ残響室の床の上に音源スピーカを置き、それより十分離れた領域内に 5 点の測定点を設定した。これらの点における音圧から  $L_{PE}$  を求め、そのエネルギー平均値および残響室の残響時間から、(16)式によって音源の  $L_E$  を求めた。この測定には、自由音場型 1/2 in. コンデンサーマイクロホン (B&K 4133) および計測用増幅器 (B&K 2134) を使用し、マイクロホン感度に関しては拡散音場補正を施した。

以上に述べた音源スピーカから衝撃音を放射させたときの音響エネルギーレベル  $L_E$  の測定と同時に、参考までに音源スピーカから定常ノイズ (M 系列信号) を放射させた場合の音響パワーレベル  $L_w$  の測定も行った。その場合の音源の設置、測定面、測定点の設定、および計測システムは  $L_E$  の測定と全く同様とし、半自由音場法、拡散音場法、音響インテンシティー法の 3 種類の方法によって測定を行った。

測定結果を音源の種類ごとに、図-3 (定常音源)、図-4 (継続時間 100 ms の衝撃音源) および図-5 (継続時間 10 ms の衝撃音源) に示す。

これらの測定結果を詳細にみると、まず定常音源とした場合については、低・中音域で(B)の方法による結果が他の二つの方法による結果に比べてやや小さめの傾向がみられる。しかしその差は最大 1.5 dB (1.25 kHz) であり、音響パワーレベル測定における測定方法の違いに

研 究 速 報

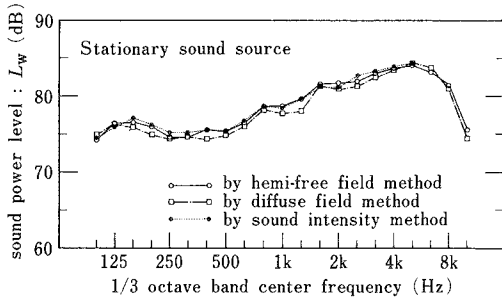


図-3 定常音源の音響パワーレベル ( $L_w$ )

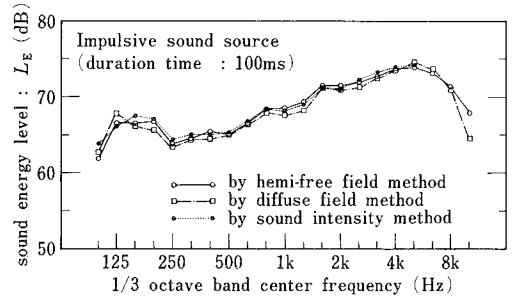


図-4 衝撃音源 (継続時間 100ms) の音響エネルギーレベル ( $L_E$ )

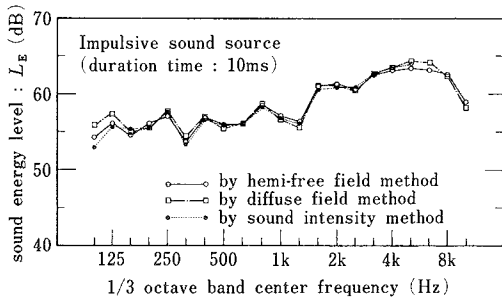


図-5 衝撃音源 (継続時間 10ms) の音響エネルギーレベル ( $L_E$ )

よる差として十分許容される程度である。

つぎに継続時間 100 ms の衝撃音源とした場合には、低音域において 3 種類の結果に 1.5 dB 程度の差が生じているが、これもきわめてわずかな差と言える。また 10 kHz では (A) と (B) の方法による結果に 3.5 dB の差がみられる。これは周波数が高いために、音源の指向特性や残響室における空気の音響吸収などの影響が大きく現れたものと考えられる。

継続時間 10 ms の衝撃音源とした場合には、最低周波数である 100 Hz で 3 dB 程度の差が生じているが、それ以外では 3 種類の方法による結果はきわめてよく一致している。

以上のように、いずれの音源についても 3 種類の方法による測定結果は、測定原理、測定音場の違いによる微小な差はあるものの全体としてみればきわめてよく一致している。これらの結果から、3 で述べた衝撃音源の音響エネルギーレベルの測定方法は、すでに確立されている定常音源の音響パワーレベル測定方法と同程度の精度をもつことが確認された。特に継続時間がきわめて短い

10 ms の場合でも、拡散音場の仮定にもとづく (B) の方法で十分な精度が得られることがわかった。

5. む す び

衝撃音源などの過渡的音源の物理的特性としては、瞬時的な時間変動特性なども重要であるが、少なくとも全放射エネルギーに着目した表示方法を他の音響諸量との関連のもとに約束しておくことが必要であると考え、音響エネルギーレベルの定義を提案した。またその測定方法として、定常音源の音響パワーレベル測定方法におけるのと同様に、自由 (または半自由) 音場あるいは拡散音場における音圧を直接測定量とする方法および音響インテンシティー計測法による方法を示した。

(1986年9月22日受理)

参 考 文 献

- 1) 子安 勝, 鈴木昭次, 橘 秀樹, 「一般の音場における音響パワーレベル測定方法 JIS 原案について」, 日本音響学会誌 42 卷 8 号 (1986)
- 2) 橘 秀樹, 吉久光一, 石井聖光, 「衝撃音源の発生エネルギーの測定方法」, 日本音響学会講演論文集 1982 年 3 月
- 3) 矢野博夫, 橘 秀樹, 「音響インテンシティー計測法による衝撃音の音響エネルギー測定」, 日本音響学会講演論文集 1985 年 9 ~ 10 月
- 4) H.Tachibana and H.Yano, "Measurement of Acoustic Energy by Impulsive Sound Sources", 12th I.C.A. (1986)
- 5) F.J.Fahy and S.J.Elliott, "Acoustic Intensity Measurements of Transient Noise Sources", Noise Control Engineering / Nov.-Dec. 1981
- 6) R.J.Alfredson, "The Direct Measurement of Acoustic Energy in Transient Sound Fields", J. of Sound and Vibration, 1980 70 (2)