

# Acoustic Intensity 計測法に関する研究(第5報)

## —複素音響インテンシティーによる斜め入射音響透過損失の測定—

Study on Acoustic Intensity Measuring Method (5)

—Measurement of Oblique Incident Sound Transmission Losses of Materials by use of Complex Intensity Technique—

橘 秀 樹\*・矢 野 博 夫\*・日 高 新 人\*  
浜 田 幸 雄\*・内 田 季 延\*

Hideki TACHIBANA, Hiroo YANO, Yoshito HIDAKA, Yukio HAMADA and Hidenobu UCHIDA

### 1. ま え が き

材料の基本的な音響特性である音響透過損失や吸音率は、音波の入射角度に依存する。そのうち最も単純な垂直入射あるいはランダム入射の条件については、測定も比較的容易で、標準測定法がほぼ確立されている。一方、任意の入射角度、すなわち斜め入射条件におけるこれらの特性の測定方法については、これまでにも多くの研究が行われているが、一般化されたものはまだない。

そこでわれわれは、音響インテンシティー計測法の応用研究の一つとして、反射音場の複素音響インテンシティーおよび音圧分布から入射パワー-反射パワーを分離することによって、材料の斜め入射音響透過損失および吸音率を測定する方法を考案した。そのうち本報では、斜め入射音響透過損失の測定方法について、測定原理および模型実験による検討結果について述べる。

### 2. 測 定 原 理

図1に示すように、無限の大きさをもつ境界面に平面

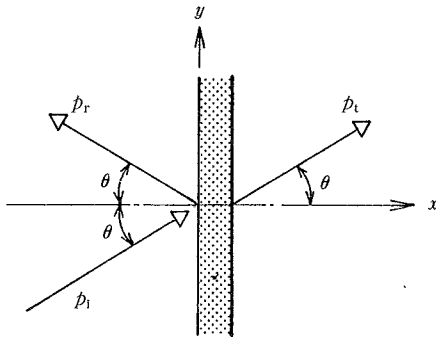


図1 境界面(試料)への音の斜め入射

波が角度 $\theta$ で入射する場合を考える。境界面の複素音圧反射係数を $re^{j\varphi}$ とすれば、入射音圧 $p_i$ 、反射音圧 $p_r$ はそれぞれ次のように表される(ただし、時間項 $e^{j\omega t}$ は省略する)。

$$p_i = Ae^{-jk(x\cos\theta + y\sin\theta)} \quad (1)$$

$$p_r = rAe^{-jk(-x\cos\theta + y\sin\theta) + j\varphi} \quad (2)$$

ただし、 $A$  : 音圧振幅、 $k$  : 波長定数

したがって、入射波と反射波の合成波の音圧 $p(x)$ および粒子速度の $x$ 方向成分 $u_x(x)$ は、それぞれ次のように表される。

$$p(x) = Ae^{-jk(x\cos\theta + y\sin\theta)} + rAe^{-jk(-x\cos\theta + y\sin\theta) + j\varphi} \quad (3)$$

$$u_x(x) = \frac{A\cos\theta}{\rho c} e^{-jk(x\cos\theta + y\sin\theta)} - \frac{rA\cos\theta}{\rho c} e^{-jk(-x\cos\theta + y\sin\theta) + j\varphi} \quad (4)$$

ただし、 $\rho c$  : 空気の固有音響抵抗

(3)、(4)式より、境界面の前面の点 $x$ における $x$ 方向の複素音響インテンシティー $I_{cx}(x)$ は次式で表される。

$$I_{cx}(x) = \frac{1}{2} p(x) \cdot u_x^*(x) = I_x(x) + jQ_x(x) \quad (5)$$

$$I_x(x) = \frac{(1-r^2)A^2\cos\theta}{2\rho c} \quad (6)$$

$$Q_x(x) = \frac{rA^2\cos\theta}{\rho c} \sin(2kx\cos\theta + \varphi) \quad (7)$$

ただし、 $I_x(x)$  : active intensityの $x$ 方向成分

$Q_x(x)$  : reactive intensityの $x$ 方向成分

(6)、(7)式からわかるように、 $I_x$ は $x$ によらず一定であるが、 $Q_x$ は $x$ によって変化する。そこでここでは、 $|Q_x(x)|$ が最大となるとききの $|I_{cx}(x)|$ の最大値に着目すると、それは次のように表される。

$$|I_{cx}(x)|_{\max} = \frac{(1+r^2)A^2\cos\theta}{2\rho c} \quad (8)$$

\*東京大学生産技術研究所 第5部

研 究 速 報

以上の関係式から、境界面の単位面積あたりの入射パワー、反射パワーは、それぞれ次のように表される。

$$P_i = \frac{A^2 \cos^2 \theta}{2\rho c} = \frac{1}{2} \left[ |I_{cx}(x)|_{\max} + I_x(x) \right] \quad (9)$$

$$P_r = \frac{r^2 A^2 \cos^2 \theta}{2\rho c} = \frac{1}{2} \left[ |I_{cx}(x)|_{\max} - I_x(x) \right] \quad (10)$$

したがって、平面波が角度 $\theta$ で入射したときの境界面(試料)の音響透過率 $\tau(\theta)$ および音響透過損失 $TL(\theta)$ は、次のように表される。

$$\tau(\theta) = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2P_t}{|I_{cx}(x)|_{\max} + I_x(x)} \quad (11)$$

$$TL(\theta) = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{\tau(\theta)} \right] \quad (12)$$

ただし、 $P_t$ : 境界面を透過する単位面積あたりの音響パワー

さて、ここで  $|I_{cx}(x)|_{\max}$  の求め方が問題となる。その1つの方法としては、実際の測定の際にインテンシティープローブを $x$ 方向に移動させて  $|Q_x(x)|$  の最大値を測定する方法も考えられるが、それでは周波数ごとにそれを行わなければならない、広い周波数範囲にわたって測定を行う場合には実用的でない。そこで本研究では、 $x$ 点における平均2乗音圧

$$\begin{aligned} \overline{p^2}(x) &= \frac{1}{2} p(x) \cdot p^*(x) \\ &= \frac{1}{2} (1+r^2) A^2 + r A^2 \cos(2kx \cos \theta + \varphi) \end{aligned} \quad (13)$$

に着目し、次式より  $|I_{cx}(x)|_{\max}$  を求める方法をとった。

$$\begin{aligned} |I_{cx}(x)|_{\max} &= \frac{(1+r^2) A^2 \cos^2 \theta}{2\rho c} \\ &= \frac{I_x^2(x) + Q_x^2(x) + [\overline{p^2}(x)/\rho c]^2 \cos^2 \theta}{2 [\overline{p^2}(x)/\rho c] \cos \theta} \end{aligned} \quad (14)$$

以上の内容を要約すると、入射パワー $P_i$ は任意の $x$ 点におけるアクティブ・インテンシティーおよび複素音響インテンシティーの絶対値の最大値から求められる。一方、透過パワー $P_t$ は、通常の音響インテンシティー法によって透過側におけるアクティブ・インテンシティーを測定することによって求められる。したがって、これらの結果から、斜め入射音響透過損失が得られる。

3. 実験的検討

以上の測定原理の妥当性を調べるために、縮尺模型実験による検討を行った。実験は生研の無響室内で行い、その中央に図2に示すような隔壁を設置した。その中央部には、36cm×27cmの測定試料取り付け開口が設けられるようになっている。音源としては、試料の中心から2m離れた点にスピーカを設置し、広帯域ノイズを放射さ

せた。

測定システムとしては、2つの1/2 inコンデンサマイクロホンを間隔12mmで組み合わせた2マイクロホン型プローブと直接法にもとづく音響インテンシティー分析器(B&K 3360)を使用し、1/3 オクターブバンドごとの音響インテンシティーおよび音圧の測定を行った。それらのデータをもとにした各種演算には、パーソナル・コンピュータ(HP9816)を用いた。

斜め入射透過損失 $(TL(\theta))$ の測定に先立って、本測定法による入射パワーの分離がどの程度正確に行えるかを検討するために、隔壁全面を反射性のままとした場合と全面に多孔質吸音材(12mm厚、96kg/m<sup>3</sup>グラスウール)を張り付けた場合について単位面積あたりの入射パワーを垂直入射の条件で測定してみた。また比較のために、隔壁を取り除いて反射音が無い状態での測定も行った。図3は、それらの結果の比較として、隔壁がない場合の入射パワーを基準(0dB)として表したものであるが、反射性、吸音性の両条件ともに、1kHz以下の低音域で1dB前後の誤差が生じているものの、それ以上の周波数での誤差はきわめて小さい結果となっている。

$TL(\theta)$ の測定としては、まず最も基本的な均質平板として厚さ0.2mmのアルミ板を試料開口に取り付け、入射角度ごとの $TL$ を測定した。そのうち $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 70^\circ$ についての測定結果を図4に示す。これらの測定結果と図中に示す入射角度ごとの質量則による計算値を比較すると、 $\theta$ が小さいうちは両者はほぼ一致しているが、 $70^\circ$ の場合

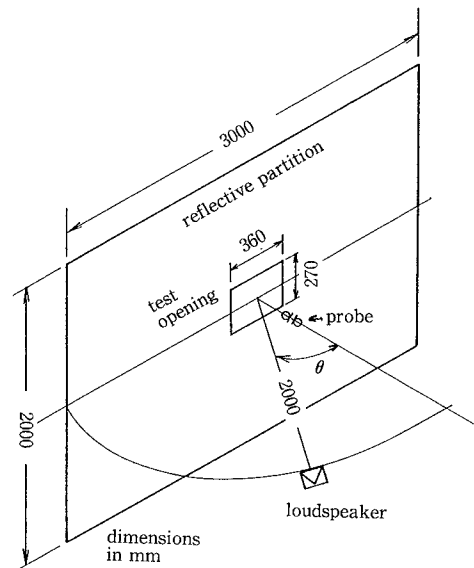


図2 無響室内に吊した反射隔壁と測定位置関係

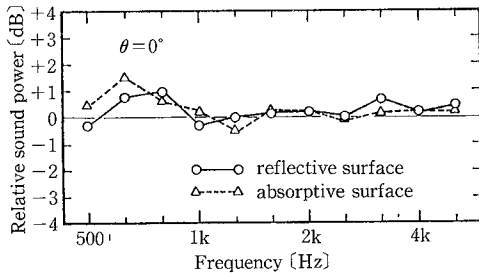


図3 単位面積当たりの入射パワーの測定結果 (基準0dB: 隔壁がない場合の測定値)

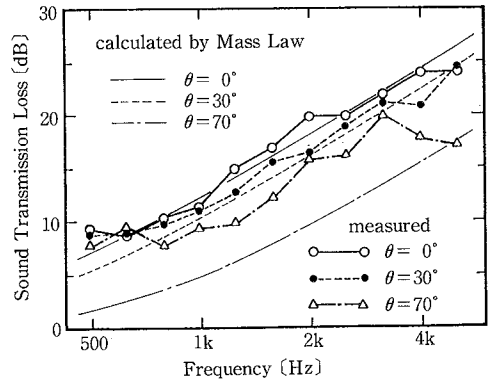


図4 アルミ板(0.2mm厚)の斜め入射音響透過損失

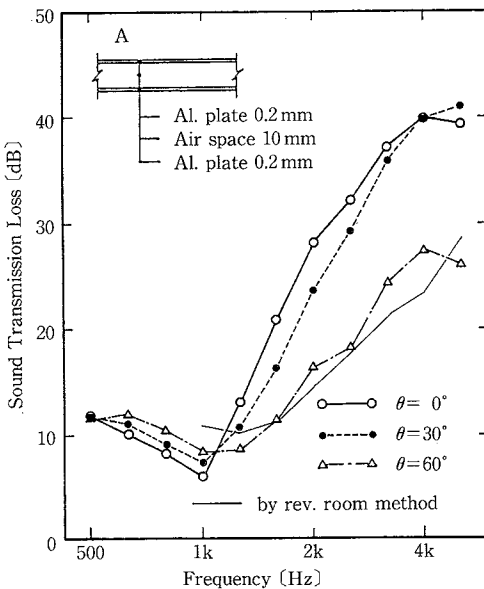


図5 試料A(中空二重壁)の音響透過損失の角度特性

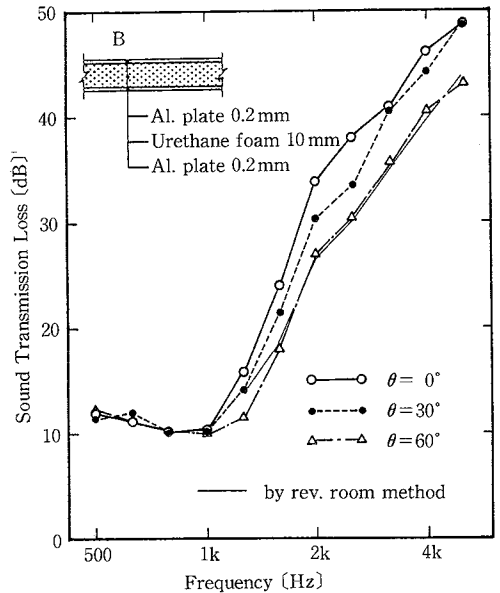


図6 試料B(多孔質材充填二重壁)の音響透過損失の角度特性

にはやや大きな差がみられる。これは入射角度が大きくなるにつれ測定精度が低下する可能性も考えなければならないが、マスリアクタンスのみを考慮した質量則が入射角度が大きい場合にも妥当であるか否かについても再検討してみる必要があると思われる。

つぎに、実用的にもきわめて重要な二重壁の遮音特性を調べるために、中空二重壁とその中空部に多孔質吸音材を充填した二重壁について検討を行った。模型試料としては、厚さ0.2mmのアルミ板2枚の間に10mmの空気層をとったものを中空二重壁(試料A)とし、その中空部にウレタンフォーム(通気性)を充填したものを多孔質材充填二重壁(試料B)とした。

図5は、中空二重壁についての測定結果のうち、 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ の結果を比較して示したものである。この結果では、入射角度が $60^\circ$ になると1kHz以上の周波数でTLが大幅に低下しており、また低域共振透過によるTLの谷が $\theta$ とともに高い周波数へ移行する傾向が認められる。

一方、図6は多孔質材充填二重壁についての同様の結果であるが、この場合には、 $\theta$ が大きくなったときの高周波数域でのTLの低下は中空二重壁に比べてわずかであり、また低域共振透過によるTLの低下も緩やかで、その周波数の入射角度による変化は比較的少ない。

図7は、これらの2種類の二重壁の中心周波数800Hz、1.6kHz、3.15kHzの各1/3オクターブバンドにおける

研 究 速 報

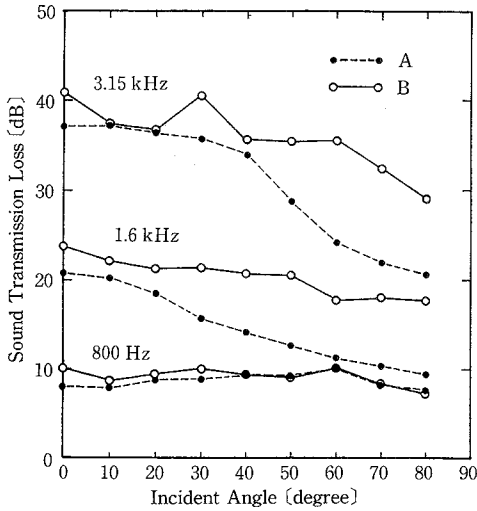


図 7 試料 A, B の斜め入射音響透過損失の比較(測定結果)

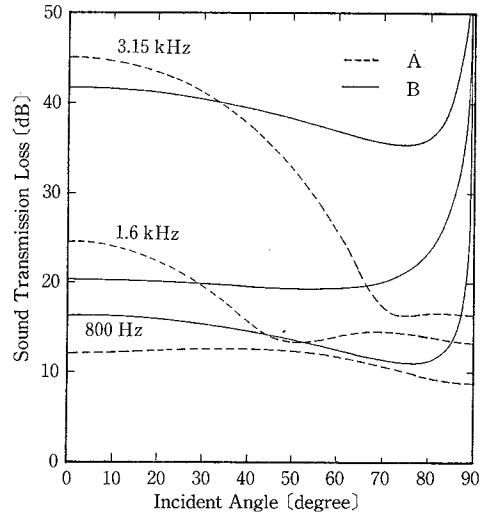


図 8 試料 A, B の斜め入射音響透過損失の比較(計算結果)

$TL(\theta)$ を横軸に入射角度をとって整理したものである。これをみると、800Hzを除いてそれ以上の周波数では、 $\theta$ が大きくなるにつれ、中空試料と多孔質材充填試料のTLの差が大きくなっている。そこで参考までに、以前に筆者らが検討した4端子回路網理論による多層構成壁のTL計算方法によって、今回対象とした2種類の試料の $TL(\theta)$ を計算した。その結果を図8に示すが、傾向としては図7の実測値とよく一致した結果が得られている。

以上の検討結果から、二重壁の遮音特性に関する結論として、中空層へ多孔質吸音材を挿入することによる効果は、垂直入射に近い範囲ではそれほど大きくはないが、入射角度 $\theta$ が大きい範囲で中空二重壁のTLが低下するのを防ぐ効果が大きいと言える。残響室法によるランダム入射条件のTLの測定で、中空二重壁と多孔質材を充填した二重壁の間に差が生じるのは、このような効果によるものと考えられる。これ以外の遮音構造壁についても、このような入射角度ごとの解析を行うことにより、詳細な遮音機構の解明が可能と考えられる。

4. む す び

音響インテンシティー計測法の応用としては、音源の放射音響パワーの測定など active intensity の計測を基

礎としたものがほとんどであるが、これを複素領域に拡張することにより、その応用性はさらに広がるものと考えられる。本報で示した例もその1つである。次報では、建築音響測定の中でも最も難しいとされている斜め入射吸音特性の測定への応用について報告する。なお、本研究には、中央大学大学院学生・安久司郎君も参加した。

(1987年8月14日受理)

参 考 文 献

- 1) 橋, 矢野: Acoustic Intensity 計測法に関する研究(第1報), 生産研究, Vol. 35, No. 12 (1983)
- 2) 橋, 矢野: 同上(第2報), 生産研究, Vol. 36, No. 3 (1984)
- 3) 橋, 矢野, 日高: 同上(第3報), 生産研究, Vol. 39, No. 9 (1987)
- 4) 橋, 矢野, 日高: 同上(第4報), 生産研究, Vol. 39, No. 11 (1987)
- 5) 浜田, 内田, 安久, 橋: 「複素音響インテンシティー計測による材料の音響特性の測定(その1: 透過損失測定への応用)」, 日本音響学会講演論文集(1987年3月)
- 6) 浜田, 日高, 橋: 「4端子回路網理論による多層壁のランダム入射透過損失の推定」, 日本建築学会計画系論文報告集, 第362号(1986年4月)