

# Acoustic Intensity 計測法に関する研究 (第6報)

## —— 2 マイクロホン法による材料の斜め入射吸音率の測定 ——

Study on Acoustic Intensity Measuring Method (6)

— Measurement of Oblique Incident Sound Absorption Coefficients of Materials by use of 2-Microphone 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吸音率は、音の入射条件によって異なる。そのうち最も単純な条件である垂直入射、およびランダム入射条件の場合については測定法も比較的簡単であり、すでに標準測定法として JIS A 1405 (管内法による建築材料の垂直入射吸音率測定方法) および JIS A 1409 (残響室法吸音率の測定方法) として規格化されている。

一方、音波が任意の角度で入射したときの吸音率、すなわち斜め入射吸音率については、その測定方法がきわめて難しいこともあって、現在のところ一般化された測定方法はない。しかし、室内音響設計を詳細に行う場合、あるいはコンピュータ・シミュレーションで音場の計算を行う場合などには、この斜め入射吸音率が必要となる。そこで本研究では、この斜め入射吸音率の新たな測定方法として、2 マイクロホン法を利用した2種類の測定法を理論的・実験的に検討したので報告する。

### 2. 理論的考察

斜め入射吸音率の測定法としては、これまでも音圧測定による方法として、(1)パルス音源を用いて入射音・反射音を時間的に分離する方法、(2)音源スピーカ、マイクロホンに指向性をつけて入射音・反射音を分離する方法、(3)測定試料の表面音圧に着目する方法、(4)試料前面における入射音・反射音の干渉縞を解析する方法、(5)相互相関法によって入射音・反射音を分離する方法、などが試みられている<sup>1)</sup>。しかし、これらのいずれもフィールド測定などに利用することはかなり難しく、実用的な測定方法とは言い難い。

また音響インテンシティー法を吸音率測定に利用する方法として、これまでに Atwal<sup>2)</sup>、Gerges<sup>3)</sup> などの報告があるが、これらの方法では、音の入射条件は垂直または拡散入射に限定されている。

そこで本研究では、音響インテンシティー法 (2 マイクロホン法) を利用して任意の入射角度に対する吸音率を測定する方法として、以下に述べる2種類の方法を新たに考案した。

#### (1) 複素音響インテンシティー法による方法

この方法では、試料前面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に着目することによって、入射パワーと反射パワーを分離することにもとづいている。その原理については前報<sup>4)</sup>で報告したのでここでは省略することとし、結果だけを述べると、分離された単位面積当たりの入射パワー  $P_i$  と反射パワー  $P_r$  とから斜め入射吸音率  $\alpha_\theta$  は次式のように求められる。

$$\alpha_\theta = 1 - \frac{P_r}{P_i} \quad (1)$$

$$P_i = \frac{1}{2} \left[ |I_{cx}(x)|_{\max} + I_x(x) \right] \quad (2)$$

$$P_r = \frac{1}{2} \left[ |I_{cx}(x)|_{\max} - I_x(x) \right] \quad (3)$$

ただし、 $|I_{cx}(x)|_{\max}$ :  $x$  点における  $x$  方向の複素音響インテンシティーの絶対値の最大値

$I_x(x)$ :  $x$  点における  $x$  方向のアクティブインテンシティー

本論文では、以上の測定原理にもとづいて直接法による音響インテンシティー分析法によって1/3オクターブバンド分析を行う方法をA法、また同じ原理でFFT分析器を用いたクロススペクトル法によって狭帯域分析を行う方法をA'法と呼ぶこととする。

#### (2) 近接2点の音圧のワースペクトル、クロススペクトルに着目する方法

図1において、試料面に平面波が角度  $\theta$  で入射する条件を考える。この場合、試料前面のある点における  $x$  方向の音響インピーダンス  $z_x$  はその点における音圧  $p(t)$  および  $x$  方向の粒子速度  $u_x(t)$  の比として次のように表さ

\*東京大学生産技術研究所 第5部

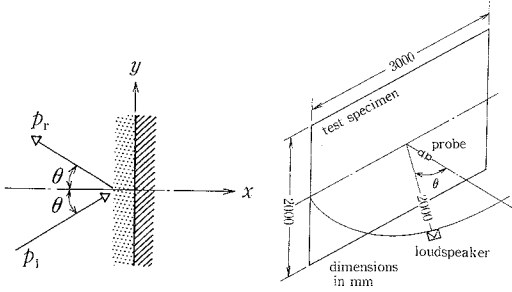


図 1 試料面への音の斜め入射 図 2 測定位置関係

れる。

$$z_x = \frac{p(t)}{u_x(t)} \quad (4)$$

ここで、文献 5) によれば音場が確定的である場合には、 $p(t)$ 、 $u_x(t)$  のフーリエ変換の比として表した音響インピーダンス  $Z_x(f)$  は次式で表される。

$$Z_x(f) = \frac{P(f)}{U_x(f)} = \frac{G_{up}(f)}{G_{uu}(f)} \quad (5)$$

ただし、

$G_{up}(f)$  :  $u_x(t)$  と  $p(t)$  のクロススペクトル関数

$G_{uu}(f)$  :  $u_x(t)$  のパワースペクトル関数

ここで、2 マイクロホン法による有限差分の方法によれば、 $p(t)$  および  $u_x(t)$  のフーリエ変換  $P(f)$ 、 $U_x(f)$  は次のように表せる (ただし 2 つのマイクロホンを結ぶ軸は  $x$  軸に一致するものとする)。

$$P(f) = \frac{P_1(f) + P_2(f)}{2} \quad (6)$$

$$U_x(f) = \frac{P_1(f) - P_2(f)}{j\omega\Delta r} \quad (7)$$

ただし、 $P_1(f)$ 、 $P_2(f)$  : それぞれ近接した 2 点における音圧  $p_1(t)$ 、 $p_2(t)$  のフーリエ変換

$\rho$  : 空気の密度、 $\omega$  : 角周波数

$\Delta r$  : 2 点の間隔

上式を用いれば、 $G_{up}(f)$ 、 $G_{uu}(f)$  はそれぞれ次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} G_{up}(f) &= E \left[ U_x^*(f) P(f) \right] \\ &= E \left[ \frac{P_1^*(f) - P_2^*(f)}{j\omega\Delta r} \frac{P_1(f) + P_2(f)}{2} \right] \\ &= \frac{G_{11}(f) - G_{22}(f) - 2j \operatorname{Im}\{G_{12}(f)\}}{2j\omega\Delta r} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} G_{uu}(f) &= E \left[ U_x^*(f) U_x(f) \right] \\ &= E \left[ \frac{P_1^*(f) - P_2^*(f)}{j\omega\Delta r} \frac{P_1(f) - P_2(f)}{j\omega\Delta r} \right] \end{aligned}$$

$$= \frac{G_{11}(f) + G_{22}(f) - 2j \operatorname{Re}\{G_{12}(f)\}}{(\omega\Delta r)^2} \quad (9)$$

ただし、 $G_{11}(f)$ 、 $G_{22}(f)$  : それぞれ音圧  $p_1(t)$ 、 $p_2(t)$  のパワースペクトル関数

$G_{12}(f)$  : 音圧  $p_1(t)$  と  $p_2(t)$  のクロススペクトル関数

\* : 複素共役を表す。

$\operatorname{Re}$ 、 $\operatorname{Im}$  : それぞれ実数部、虚数部を表す。

したがって、 $Z_x(f)$  は次式で表される。

$$Z_x(f) = \frac{j\omega\Delta r}{2} \frac{G_{11}(f) - G_{22}(f) - 2j \operatorname{Im}\{G_{12}(f)\}}{G_{11}(f) + G_{22}(f) - 2j \operatorname{Re}\{G_{12}(f)\}} \quad (10)$$

ここで、試料前面のある点における入射波、反射波、およびそれらの合成波に対する音響インピーダンス  $Z_1$ 、 $Z_r$ 、 $Z_x(f)$  は、それぞれ次のように表される。

$$Z_1 = \frac{P_1(f)}{U_{x1}(f)} = \frac{\rho c}{\cos\theta} \quad (11)$$

$$Z_r = \frac{P_r(f)}{U_{xr}(f)} = -\frac{\rho c}{\cos\theta} \quad (12)$$

$$Z_x(f) = \frac{P_1(f) + P_r(f)}{U_{x1}(f) + U_{xr}(f)} = \frac{\rho c}{\cos\theta} \frac{P_1(f) + P_r(f)}{P_1(f) - P_r(f)} \quad (13)$$

ただし、 $P_1(f)$ 、 $P_r(f)$  : それぞれ入射波の音圧  $p_1(t)$ 、反射波の音圧  $p_r(t)$  のフーリエ変換

$U_{x1}(f)$ 、 $U_{xr}(f)$  ; それぞれ入射波の粒子速度  $u_{x1}(t)$ 、反射波の粒子速度  $u_{xr}(t)$  のフーリエ変換

$\rho c$  : 空気の固有音響インピーダンス

これらから、音圧に関する反射係数  $r_o(f)$  は次のように表される。

$$r_o(f) = \frac{P_r(f)}{P_1(f)} = \frac{Z_x(f) \cos\theta - \rho c}{Z_x(f) \cos\theta + \rho c} \quad (14)$$

したがって、斜め入射吸音率  $\alpha_o(f)$  は次式で求められる。

$$\alpha_o(f) = 1 - |r_o(f)|^2$$

本論文では、上に述べた測定原理にもとづいてクロススペクトル法によって狭帯域分析を行う方法を B 法と呼ぶこととする。

### 3. 実験的検討

#### (1) 実験室実験<sup>6)</sup>

以上に述べた測定原理の妥当性を調べるための基礎的検討として、無響室内における測定を行った。前報における実験と同様に、その中央に図 2 に示すような剛壁 (15 mm 厚塩ビ板、面積 6 m<sup>2</sup>) を設置し、その全面に測定試料としてグラスウール (12mm 厚、96kg/m<sup>3</sup>) を取り付けた。その場合、グラスウールを剛壁に密着した場合 (試料-1) と背後に 45mm の空気層 (仕切りあり) を設けた場合 (試料-2) の 2 条件とした。

音源としては、試料の中心から 2 m 離れた点にスピーカを設置し、広帯域ノイズを放射した。

音響インテンシティー計測には、2つの1/2 in. コンデンサマイクロホン (B&K 4165) を間隔12mmで組み合わせた2マイクロホン型プローブを使用した。分析システムとしては、直接法にもとづく音響インテンシティー分析器 (B&K 3360) と、FFT型分析器 (小野測器CF 920) を中心としたクロススペクトル法にもとづくシステムの2種類を使用した。

(測定に先立って、平面波入射条件および入射パワーと反射パワーの分離の精度などについて基礎的検討を行ったが、これについては前報で報告したので省略する。)

まず試料-1について、垂直入射吸音率の測定を行った。この測定では、A法による1/3オクターブバンド分析、およびA'法による狭帯域分析、およびB法による狭帯域分析を行った。

測定点は原則として、剛壁面より50mm, 80mm離れた面内にそれぞれ5点 (100mm角の正方形の各頂点および中心、背後空気層をもつ試料2の場合には、剛壁面より90mm, 120mm離れた面内) 配置した。

また比較のために、純音を音源とし、音響管 (直径5 cmおよび8 cmの円管) による通常の測定 (以下、C法と呼ぶ) も行った。これらの結果を比較して図3に示す。この測定結果をみると、2kHz以上では、A法、A'法およびB法による結果はよく一致している。それらに比べて、C法による結果はやや大きめとなっているが、測定試料の寸法および測定方法が全く異なることを考えれば、測定誤差範囲内と考えられる。A'法による結果で、1.6kHz付近で異常に高い値となっているが、これはプローブの位置がちょうど定在波の谷の部分に相当し、音響インテンシティーの測定精度そのものが低下したことによるものである。この種の誤差は、測定点を複数とることによ

り解決できる。またB法による結果で、2 kHz以下で測定値の変動が大きいが、これは1/3オクターブバンドなどに合成することにより平均化される (約50Hz以下は測定限界以下である)。

つぎに、試料-1および試料-2について、A法 (1/3オクターブバンド分析) とC法 (音源: 純音) によって垂直入射吸音率を測定した結果を比較して図4に示す。いずれの測定結果についても、部分的に最大10%程度の差が認められるが、概略の吸音特性はほぼ一致した結果が得られている。

斜め入射吸音率の測定としては、試料-1および試料-2について、A法によって0°~80°の入射角度の範囲で10°ごとの測定を行った。まず試料-1についての測定結果を図5に示す。この結果では、中心周波数1 kHz以下では、音の入射角度による顕著な差は見られないが、1.25kHz~3.15kHzの帯域では60°付近で緩やかなピークを持つ特性となっている。それ以上の周波数帯域では、入射角度が大きくなるにつれて吸音率が小さくなる傾向が見られる。つぎに試料-2についての測定結果を図6に示すが、背後空気層の効果によって、試料-1の結果に比べて全体的に吸音率が大きくなっている。角度特性としては、500Hz~630Hzの低音域ではそれほど顕著でないが、3.15kHz, 4 kHzでは山谷のある複雑な特性となっている。それ以上の周波数では角度が大きくなるほど吸音率が小さくなる傾向が見られる。

(2) フィールド測定への応用<sup>7)</sup>

吸音率測定としては、実験室における測定と同時に、建物などに実際に施工されている吸音仕上げの特性を現場において測定することもきわめて大切である。そこで本研究で考案した斜め入射吸音率の測定方法を用いて、いくつかの測定を実施した。ここではその一例として、最近のオフィスビルなどの床仕上げとしてよく用いられ

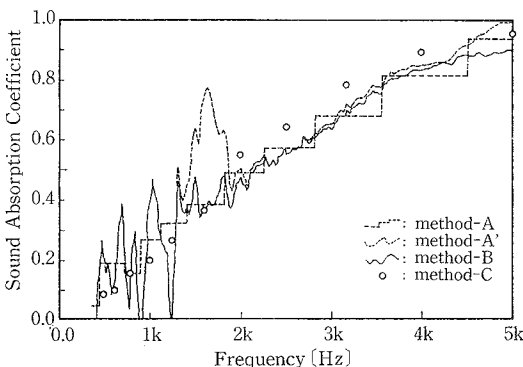


図3 試料-1 (グラスウール, 12mm厚, 96kg/m<sup>3</sup>) の垂直入射吸音率測定結果

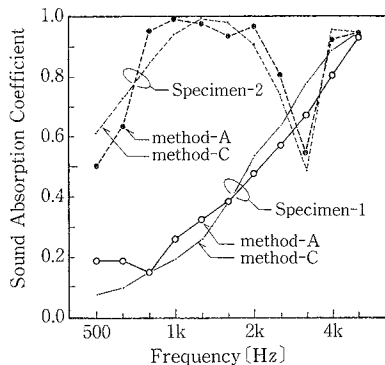


図4 A法とC法による垂直入射吸音率測定結果の比較

研 究 速 報

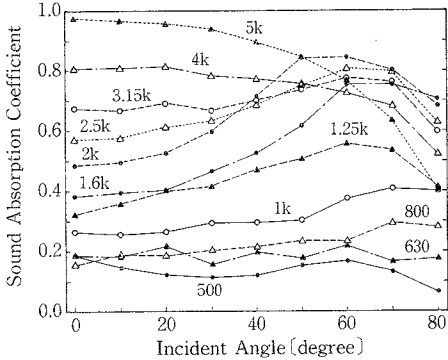


図 5 試料一 1 の斜め入射吸音率の角度特性

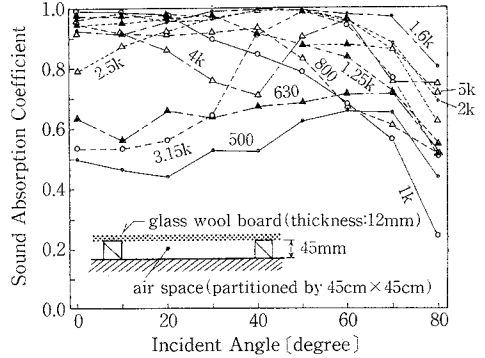


図 6 試料二 2 の斜め入射吸音率の角度特性

ているタイルカーペット (パイル長 3 mm) についての測定結果を示す。この測定では、P タイル仕上げの床にタイルカーペットを面積 10.5m<sup>2</sup> にわたって敷きつめ、0°, 30°, 60° の入射角度について斜め入射吸音率を A 法によって測定した。その場合、音源スピーカは試料の中心から 2 m 離して設置した。また参考までに、同一試料について音響管法 (C 法) による垂直入射吸音率および残響室法 (D 法) によるランダム入射吸音率の測定も行った。これらの測定結果を合わせて図 7 に示す。これらの結果をみると、まず垂直入射の条件については、A 法による結果と C 法による結果は中音域で約 5% 程度の誤差がみられるものの、全体的にはほぼ一致した結果となっている。この材料の斜め入射吸音特性としては、入射角度が大きくなるほど高音域で吸音率が高くなる傾向が見られる。入射角度が 60° の場合の測定結果は、残響室法吸音率の値に近くなっている。

4. む す び

以上、材料の斜め入射吸音率の測定方法として、2 マイクホン法を利用した測定原理を述べ、それにもとづいて行った実験的検討の結果を示した。これらの結果から、ここで示した新しい測定方法は、実験室測定ならびに現場測定で十分に利用できる可能性があることがわかった。しかし、入射角度が大きくなった場合の測定精度の問題、測定試料の最小面積、不均一面をもつ吸音仕上げへの適用性などが今後の検討課題として残されている。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12月1日受理)

参 考 文 献

1) 橋 秀樹, 矢野博夫, 石井聖光: 「各種吸音構造の斜め入射吸音特性 (相関法を用いた直接音消去法による測定)」, 日本音響学会誌, vol. 34, 1, (1978)

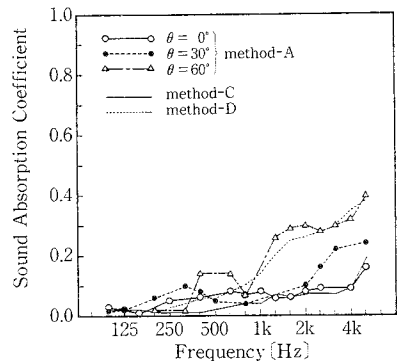


図 7 タイルカーペットの吸音率

2) M.S. Atwal, M.J. Crocker: "Measurement of the absorption coefficient of acoustical materials using sound intensity method", Proc. of 2nd International Congress on Acoustic Intensity (Senlis), (1985)

3) S.N.Y. Gerges, M.A.N. Araujo and E.B. de Andrade: "Absorption measurements using the two microphone intensity technique", Proc. of inter-noise 84 (1984)

4) 橋, 矢野, 日高, 浜田, 内田: Acoustic Intensity計測法に関する研究(第5報), 生産研究, vol. 39, No.12 (1987)

5) T. Lathi: "Application of Intensity Technique to Measurement of Impedance, Absorption and Transmission", Proc. of 2nd International Congress on Acoustic Intensity (Senlis), (1985)

6) 内田, 浜田, 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2. 吸音率測定への応用)」, 日本音響学会講演論文集, (1987. 3)

7) 内田, 浜田, 安久, 橋: 「複素音響インテンシティー計測による斜め入射吸音率のフィールド測定例」, 日本音響学会講演論文集, (1987.10)