

小規模残響室における吸音率測定に関する研究*

吉田 裕紀, 鈴木 久晴, 尾本章 (九大・芸工)

1 はじめに

現在, 吸音材は音響設計において広く使われており, その音響性能を正しく把握することは非常に重要なことである. 吸音材の音響性能を表す指標として統計入射吸音率があり, 残響室における測定によって求められる残響時間から算出することができる. その測定方法は JIS A 1409 によって規定されている. JIS A 1409 によると残響室の容積は 200 m³ 以上, 測定に用いる試料面積は 12 m² 以上と定められており, 測定には大規模な残響室と試料面積が必要である. しかし, 実際に大規模な残響室を確保することはコストや立地面で難しい場合がある. また, 試料面積についても, 何度も試料を作り直す場合などに, 毎回 12 m² 以上の試料面積を確保することはコストの面から現実的でない場合がある.

そこで本研究では, 小規模な空間と試料面積で吸音材の吸音性能を測定するために一辺 1 m の立方体からなる小規模残響室を提案し, 残響室で測定した吸音率と比較することで, 小規模残響室の妥当性の限界について検討する.

また, この小規模残響室は低音域においてアクティブ制御での測定を考えているため, 本研究ではまず, パッシブでの測定がどの程度低い周波数まで可能であるのかを検討していく.

2 試料への音波の入射

2.1 矩形室の固有モード

音場の性質を波動的に扱うとき, 音場の音圧を固有モード関数に重ね合わせたモデルが広く使われている. 固有モード関数は, 音場内を伝搬する定在波の空間的パターンを表しているため, 固有モードが数多く存在するとき, 材料へ入射する音波も数多く存在することとなり, 統計入射に近づく. 以下, 矩形の室について固有モード関数を求めていく.

境界が剛で寸法が $l_x \times l_y \times l_z$ の矩形の室を考える. ヘルムホルツ方程式は直交座標系で,

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0 \quad (1)$$

と表すことができる. 変数分離型の解を仮定すると,

$$p(x, y, z) = p_1(x)p_2(y)p_3(z) \quad (2)$$

x, y, z のみに依存する 3 項の積の形で表現できる. これをヘルムホルツ方程式に代入することで 3 つの微分方程式に分解できる. x に関して解くと,

$$\frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} + k_x^2 p_1 = 0 \quad (3)$$

であり, 境界条件は次式のようになる.

$$\frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} = 0 \quad , x = 0 \quad \text{and} \quad x = l_x \quad (4)$$

y, z についても同様で, このとき波数について次の関係が成り立つ.

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2 \quad (5)$$

また, 式 (3) の一般解は次式のように表せる.

$$p_1(x) = A_1 \cos k_x x + B_1 \sin k_x x \quad (6)$$

ここで式 (4) の境界条件から, x 方向の微分係数が $x=0$ で 0 となるのは $B_1=0$ のときである. さらに, $x=l_x$ で x 方向微分が 0 となるためには, $k_x l_x$ が π の整数倍となることから $\cos(k_x l_x) = \pm 1$ と考えられる. したがって $n_x = 0, 1, 2, \dots$ とすると, 境界条件を満たす波数 k_x は次式のようになる.

$$k_x = \frac{n_x \pi}{l_x} \quad (7)$$

同様に y, z についても解くと,

$$k_y = \frac{n_y \pi}{l_y}, k_z = \frac{n_z \pi}{l_z} \quad (8)$$

と表すことができる. また, 固有周波数は次式のように表すことができる.

$$f = \frac{c}{2\pi} k = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (9)$$

* A study on absorption coefficient measurement in small reverberation chamber by Hiroki Yoshida, Hisaharu Suzuki and Akira Omoto (Kyushu University)

2.2 固有モードから求められる入射角度分布

固有値の配列を幾何学的な表現を用いて表すと Fig.1 のようになる．直交平面の交点が固有値を表し，原点とを結ぶ矢印は固有モードに対応している．この矢印の向きはその固有モードに対応する平面波の伝搬方向に一致する [1]．このことから， $x-y$ 平面に対する仰角を α ，方位角を β とし，固有モードから入射角の分布を求める．

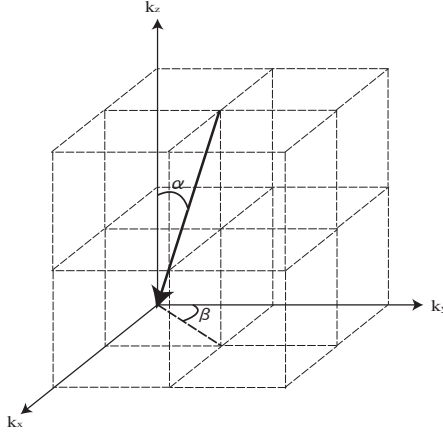


Fig. 1: Geometrical arrangement of normal mode

幾何学的に見ると，

$$k^2 \sin^2 \alpha = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 \quad (10)$$

$$k \sin \alpha \sin \beta = k_x \quad (11)$$

という関係が成り立ち．式 (5)(10)(11) から仰角 α ，方位角 β が次式のように表すことができる．

$$\alpha = \arcsin \sqrt{\frac{k_x^2 + k_y^2}{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}} \quad (12)$$

$$\beta = \arcsin \frac{k_x}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \quad (13)$$

$l_{x,y,z}=1$ m 及び $n_{x,y,z} = 0, 1, 2, 3 \dots 100$ とし，この式 (12)(13) を図示したものが Fig.2 である．横軸は角度で，縦軸はその角度で入射するモードの数を表している．また，仰角の角度分布には立体角の補正を行っている．図より仰角及び方位角は 45° を中心に正規分布になっている．寄与するモードの数が多いとき，物理量が正規分布に近づくため，この音場は統計的に扱えると考えられる．

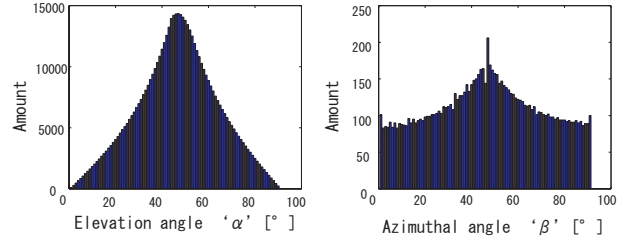


Fig. 2: Distribution of incidence angle by normal mode

2.3 1 オクターブバンドごとの入射角度分布

次に Fig.2 で示した仰角 α 及び方位角 β と周波数との関係を考えていく．1 オクターブごとの仰角 α の分布を Fig.3 に，方位角 β の分布を Fig.4 に示す．Fig.3, 4 から仰角と方位角ともに中心周波数が 2 kHz の場合からモードの数が増加し，正規分布の傾向が明らかになっている．このことから統計的な扱いができるのは中心周波数が 2 kHz 以上の場合であると考えられる．

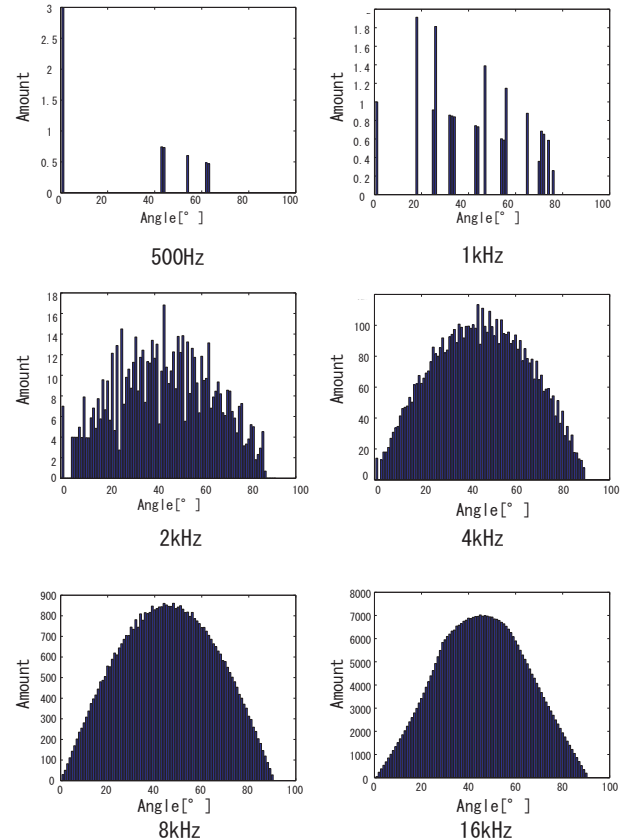


Fig. 3: Distribution of elevation angle ' α ' with respect to each frequency

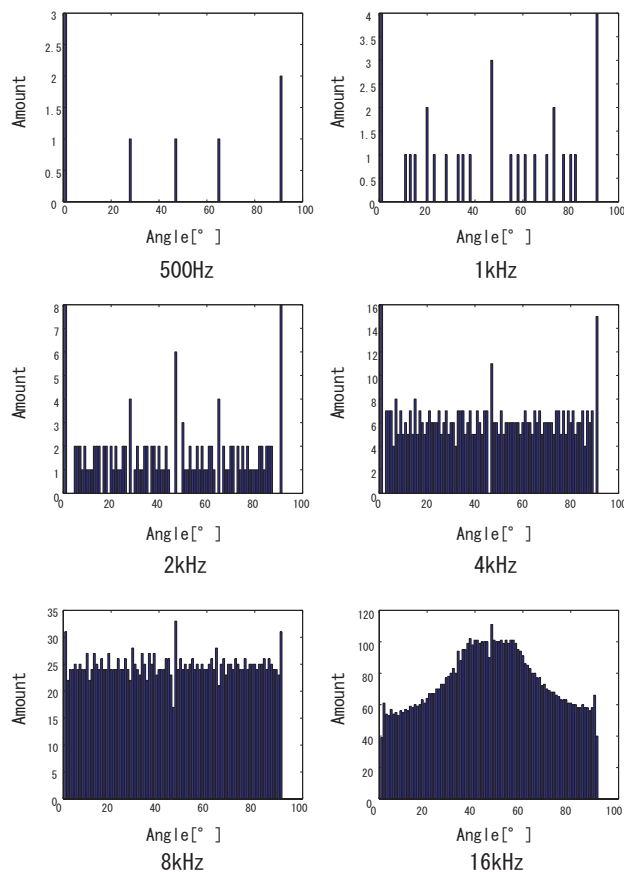


Fig. 4: Distribution of azimuthal angle ' β ' with respect to each frequency

3 小規模残響室での吸音率測定

この章では、残響室と小規模残響室において実際に行った測定の結果から吸音率の比較を行い、小規模残響室の妥当性を考察する。

3.1 試料のみの測定

まず試料として $60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ 、 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ のポリウールを用い、小規模残響室において残響時間の測定をそれぞれ行った。そこから Sabine の残響公式より吸音率を算出し、残響室で測定した残響室法吸音率と比較する。試料は密度 24 kg/m^3 で厚さ 10 mm 、 30 mm 、密度 36 kg/m^3 で厚さ 10 mm 、 30 mm 、 50 mm 及び密度 48 kg/m^3 で厚さ 10 mm の 6 種類を使用した。代表的なものとして密度 24 kg/m^3 で厚さ 10 mm 、密度 36 kg/m^3 で厚さ 10 mm 、 30 mm の結果を Fig.5 に示す。横軸は周波数、縦軸は吸音率である。前章で述べたように小規模残響室が統計的に扱える目安は 2 kHz 以上なので、考察は 2 kHz から 10 kHz までを考える。

Fig.5 の角グラフの 4 kHz に注目すると、 $60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ の材料では 4 kHz あたりから急激に吸音率が低くなっていることがわかる。この低下は試料の密度が大きく厚み大きい試料が大きくなっていることから、試料の吸音力が大きくなることでモード密度が低下し、残響時間の読み取りが難しくなったと考えられる。 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ の試料では比較的吸音力が小さいと考えられ、その急激な吸音率の低下はなくなっている。また、密度 24 kg/m^3 厚さ 10 mm 及び密度 36 kg/m^3 厚さ 10 mm の試料では残響室の吸音率とモードの数が多い 1 kHz までほぼ一致していることがわかる。しかし、密度 36 kg/m^3 厚さ 30 mm の試料では残響室の吸音率よりも大きくなっている。これは試料が小さいために面積効果の影響が大きくなっていると考えられる。

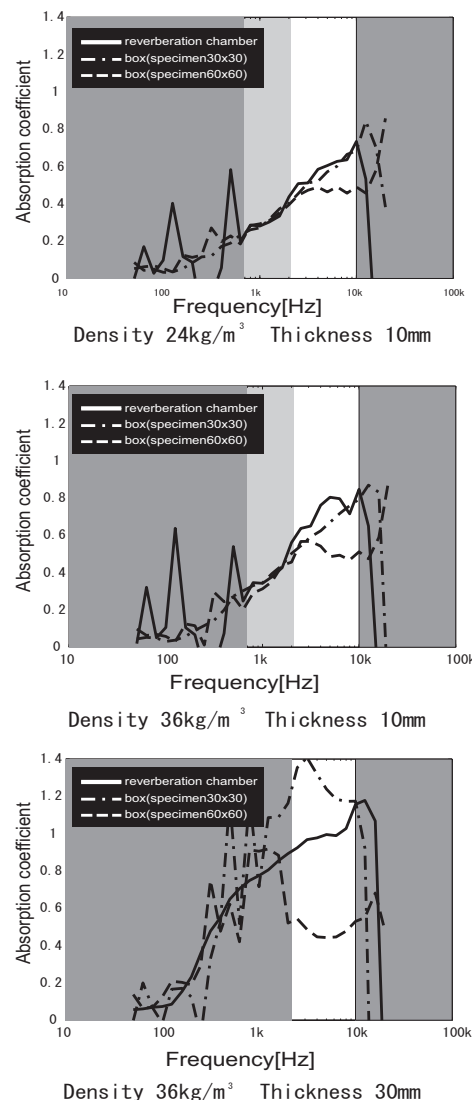


Fig. 5: Absorption coefficients of polyester bonded material in reverberation room and box

3.2 Deep-well 処理

前節の結果より，面積効果の影響が大きいと考えられる密度 36 kg/m^3 厚さ 30 mm の試料について Deep-well 処理を施し測定を行った [2]．Deep-well 処理とは，面積効果の影響を制限するために Fig.6 のように試料を取り囲むようにして取り付けられた反射板のことであり，試料の表面やエッジに回りこむエネルギーの流入を防ぐことができる．

測定では，well の高さ H を 30 mm ， 50 mm ， 100 mm としている．結果は Fig.7 に示す．図から，Deep-well 処理を施したほうがより残響室で測定した吸音率に近づいていることがわかる．しかし，well が高くなれば残響室の吸音率より低くなっている．これは試料に回り込むエネルギーだけでなく直接試料に入射するエネルギーも防いでいる可能性があり，well の適切な高さは今後検討が必要である．

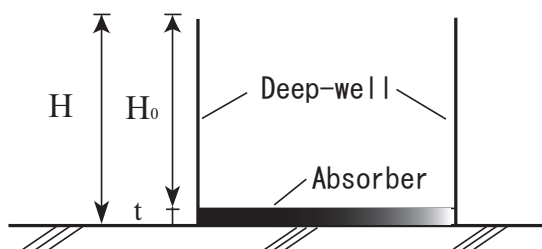


Fig. 6: Mechanism of Deep-well

4 まとめ

本研究では，一辺 1 m の立方体からなる小規模残響室を提案し，測定可能な周波数範囲について検討を行った．

固有モードによる理論計算から，モードの数が十分に多く，統計的に扱うことができるのは 2 kHz 以上とわかった．また，実際の測定から，比較的吸音力が小さいと考えられる試料は，モードの数が少ない 1 kHz 程度までは残響室で測定した値とよい対応を示すことがとわかり，吸音力が大きい試料でも Deep-well 処理を施すことで，残響室で測定した吸音率に近づくことがわかった．well の高さは今後さらに検討が必要である．

今後は，測定可能な周波数範囲をより低域まで拡大することを考え，アクティブ制御を用いた測定を行うことを考えている．

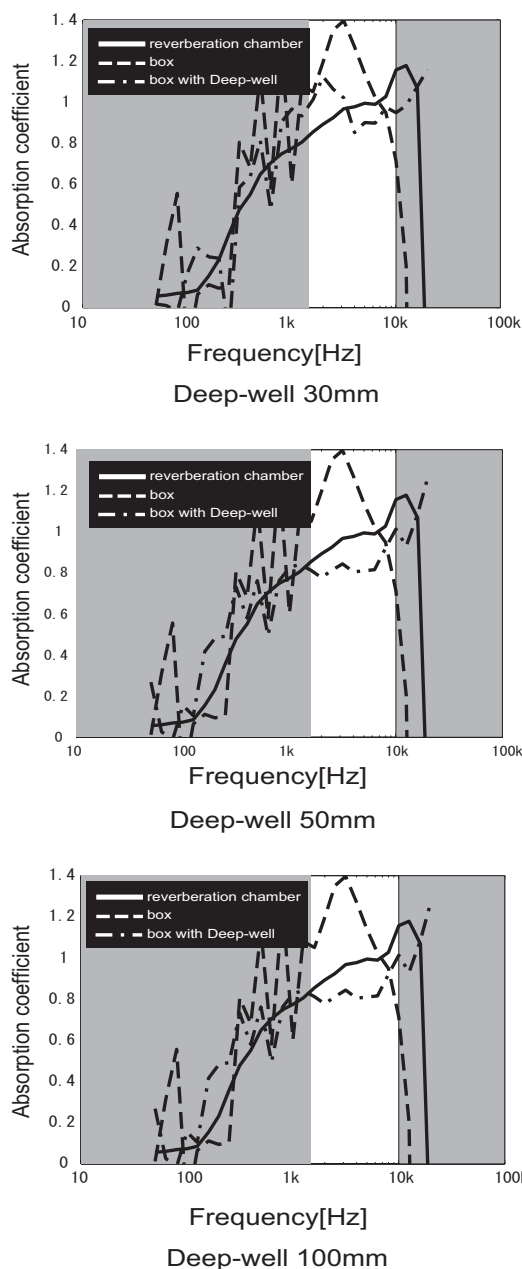


Fig. 7: Absorption coefficients of polyester bonded material in reverberation room and box with Deep-well

参考文献

- [1] ハイブリット・クットルフ著， 藤原 恭司， 日高 孝之訳 “室内音響学” 市ヶ谷出版社， 2003
- [2] F.Kawakami and T.Sakai:”Deep-well approach for canceling the edge effect in random incident absorption measurement”, J. Acoust. Soc. Jap. (E), 19, 5, pp.327-338(1998)