

# 薄型チャンバーを用いた斜入射吸音率測定法に関する研究

Study on a measurement method for oblique-incidence absorption coefficient using a thin chamber.

学籍番号 47-166737

氏名 坂吉 佑太 (Sakayoshi, Yuta)

指導教員 佐久間 哲哉 准教授

## 1 はじめに

### 1.1 研究背景

室内音響，騒音防止計画においては，対象空間の性質・使用目的に応じて様々な音響性能が求められる。このような音響性能の予測では，用いる材料の吸音率のような部材性能のデータが不可欠である。吸音率は実験室での測定値が用いられるが，この測定誤差が予測誤差につながり，音響設計のミスにつながる。従って，正確なデータ及びその取得法の整備が必要不可欠である。

吸音率とは，ある面に音波が入射した時に，入射エネルギーに対する反射されないエネルギーの割合である。また，吸音率は入射条件・材料設置条件・周波数によって変化する。入射条件については，主に垂直入射・斜入射・ランダム入射の3条件考えられ，一般に音響設計の際にはランダム入射吸音率が広く用いられる。一方で，高架下や防音壁の吸音設計や，ホールなどでの初期反射音予測などのケースでは，入射方向がある程度特定可能である。このような場合斜入射吸音率を用いることでより正確な予測が見込まれる。

現在吸音率測定法に関しては，垂直入射，ランダム入射条件についてはISO規格が存在する。一方，斜入射条件の場合に関して工業規格が存在せず，様々な測定法が提案されているものの<sup>[1][2]</sup>，計測の規模，難度の高さから普及には至っていない。

## 2 研究目的

以上の状況をふまえ，本論文では比較的小規模かつ容易に計測可能な，新しい斜入射吸音率測定法として，矩形の二次元音場内におけるモード解析に基づく計測手法の実測のための試作システムを構築した。本システムで各種測定条件の検証，各種吸音材の測定を行うことで，システムの妥当性を明らかにするとともに，実用化に向けた課題を整理することを目的とする。

斜入射吸音率測定法が確立できれば，斜入射吸音率のデータが整備され，先述のようなケースの音響設計の精度向上が見込まれる。また，斜入射時の吸音メカニズム解明にもつながる。

## 3 薄型チャンバーを用いた斜入射吸音率測定法の構築

### 3.1 測定原理

二次元の矩形空間において，Helmholtz方程式の平面一般解に， $x$ 方向の剛境界条件を考慮すると，

$$p(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} [a_n \exp(-jk_y^n y) + b_n \exp(jk_y^n y)] \cos(k_x^n x) \quad (1)$$

と表され， $x$ 方向に関する固有モードの重ね合わせとして音圧が表される。ただし，

$$k_x^n = n\pi/W, \quad k_y^n = \sqrt{k^2 - k_x^{n2}}$$

であり， $W$ は $x$ 方向の幅である。この時各 $n$ 次モードは，Fig. 1に示すように $x$ 軸に平行な

断面における位相変化が丁度 $n\pi$ となる方向に伝搬する平面波を表している。Eq. (1)において $a_n, b_n$ はそれぞれ平面波の進行・後退波の振幅を表しており、

$$\begin{cases} a_m \\ b_m \end{cases} = \frac{1}{2j \sin k_y^m \Delta y} \begin{bmatrix} e^{jk_y^m y_2} & -e^{jk_y^m y_1} \\ -e^{-jk_y^m y_2} & e^{-jk_y^m y_1} \end{bmatrix} \begin{cases} \bar{p}_m(y_1) \\ \bar{p}_m(y_2) \end{cases} \quad (2)$$

により各モードの進行・後退波の複素振幅を決定することができる。ここで、 $\bar{p}_m(y_1), \bar{p}_m(y_2)$ はそれぞれの測定断面での積分値を表している。Eq. (2)により求められた $a_m, b_m$ により、各伝搬モードに対応する入射角(Eq. (4))での斜入射吸音率を Eq. (3)により求めることができる。

$$\alpha_{\theta_m} = 1 - \left| \frac{b_m}{a_m} \right|^2 \quad (3)$$

$$\theta_m = \sin^{-1} \left( \frac{k_x^m}{k} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{mc_0}{2Wf} \right) \quad (4)$$

### 3.2 測定システムの構築

試作された薄型チャンバーの仕様・寸法を Fig. 2 に示す。チャンバー内寸は、幅 1.3 m、奥行き 0.5~0.6 m、高さ 0.05 m である。奥行きに関しては、試料後壁が可動式になっており、最大 0.1 m の試料厚まで対応可能である。試料厚が 0.1 m 以下であれば背後空気層をとることも可能である。

スピーカは試料設置位置の反対側に等間隔に 10ヶ所設置が可能である。測定の際は

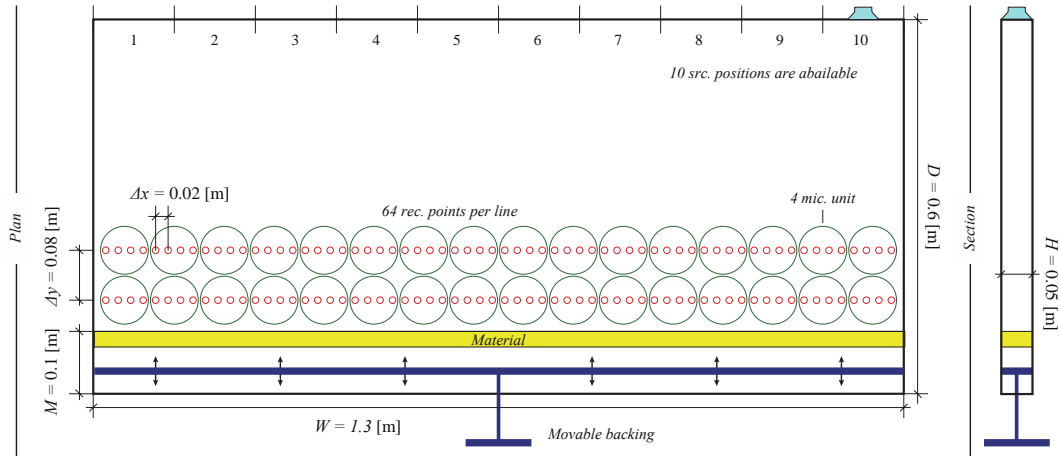


Fig. 2 A geometrical specification of the proto-type chamber.

いずれか1ヶ所に設置する。

マイクロフォンは、正確性を確保するため、4本1セットのマイクロフォンユニットとダミーユニットを入れ替えながら計測を行う。また、測定は一行あたり64点、計128点の多点計測を行う。

### 3.3 測定可能周波数

本手法では、Eq. (4)により決まる角度・周波数の関係の吸音率が得られる。よって、任意の角度・周波数の関係の吸音率が得られるわけではないことに注意が必要である。Fig. 3 に本システムで測定可能な角度・周波数の関係を示す。

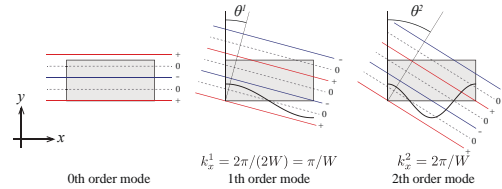


Fig. 1 Geometrical interpretation of the propagation modes.

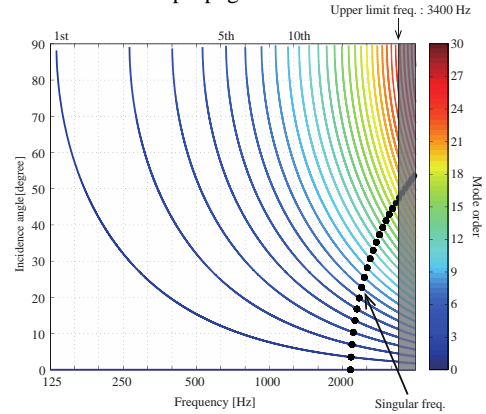


Fig. 3 Relation between frequency and incidence angle in the chamber.

### 3.4 誤差要因

本手法では、Eq. (2)式において $k^m \Delta y = \pi$ になる場合解が一意に定まらない特異周波数が存在する。また、本システムでは、スピーカの中心とモードの節が一致する際に励起が小さくなる非励起モードも存在する。さらに、測定されたインパルス応答には、インパルス発生前にノイズが発生しており、このノイズの影響で値が暴れることを確認している。これらは前処理で除去した上で分析を行った。

## 4 測定結果

### 4.1 多孔質型吸音材

多孔質型吸音材としてグラスウール(GW)、ウレタンフォーム(UF)、岩綿吸音板(RB)の測定を行った。比較として Kato model<sup>[3]</sup>による理論値を算出した。

**垂直入射吸音率** Fig. 4(a)に垂直入射吸音率の算出結果を理論値と併記して示す。GWとUFは理論値との対応が見られるが、RBは良い対応が見られなかった。また、1 kHz以下では全材料で同様の測定値になっており、チャンバー筐体の振動や微小な隙間の影響が示唆された。

**斜入射吸音率** Fig. 5に斜入射吸音率の算出結果を理論値と併記して示す。全材料、理論値と良い対応を示しているが、GWとRBでは、70°付近の入射角において理論値との若干の乖離が見られる。これは、両材料異方的な材料であり、内部パラメータが音波伝搬方向に依存する可能性が考えられる。

### 4.2 共鳴器型吸音材

共鳴器型吸音材として、穴あき板(PP)と、背後空気層をハニカム構造によって仕切ったハニカム共鳴器(HR)の測定をテープ気密の有無の2条件で行った。また、比較として Atalla model<sup>[4]</sup>による理論値を算出した。

**垂直入射吸音率** Fig. 4(b)(c)に垂直入射吸音率の算出結果を理論値と併記して示す。両材料ともテープ気密の有無で共鳴周波数が変化しており、テープ気密有りの場合に理論値との良好な対応が見られる。

**斜入射吸音率** Fig. 6に斜入射吸音率の測定値を理論値と併記して示す。PPは入射角度が大きくなるほど高音域にシフトしている。一方で、HRは共鳴周波数の入射角度依存性はほぼ見られなかった。これは背後空気層の仕切りの有無が関係しており、それを考慮した理論値との良好な対応がみられる。

## 5 おわりに

本研究では、薄型チャンバーを用いた斜入射吸音率測定法の実用化に向けた検討を行った。各種吸音材の測定では、多孔質型・共鳴器型吸音材共に理論値との定性的な一致が確認され、測定システムの妥当性が示唆された。一方で、チャンバー自体の問題点もいくつか確認された。問題点の原因、定量的な影響を明確にし、改善していくことが今後の課題である。

**参考文献** [1] K. Kimura, et al., Applied Acoustics, 2001. [2] 寺尾道仁他,音響学会講演論文集(春), 2001. [3]加藤大輔, 日本音響学会誌, 64, pp. 339-347, 2008. [4] N. Atalla et al., J. Sound Vib., 303, 2007.

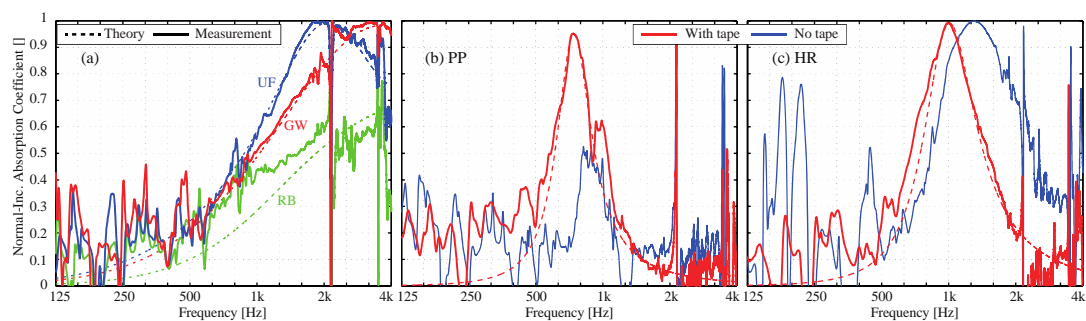


Fig. 4 Normal incidence absorption coefficients measured for four different materials. (a)Glass wool, Urethane Foam and Rockwool Board, (b)Perforated Panel and (c) Honeycomb Resonator.

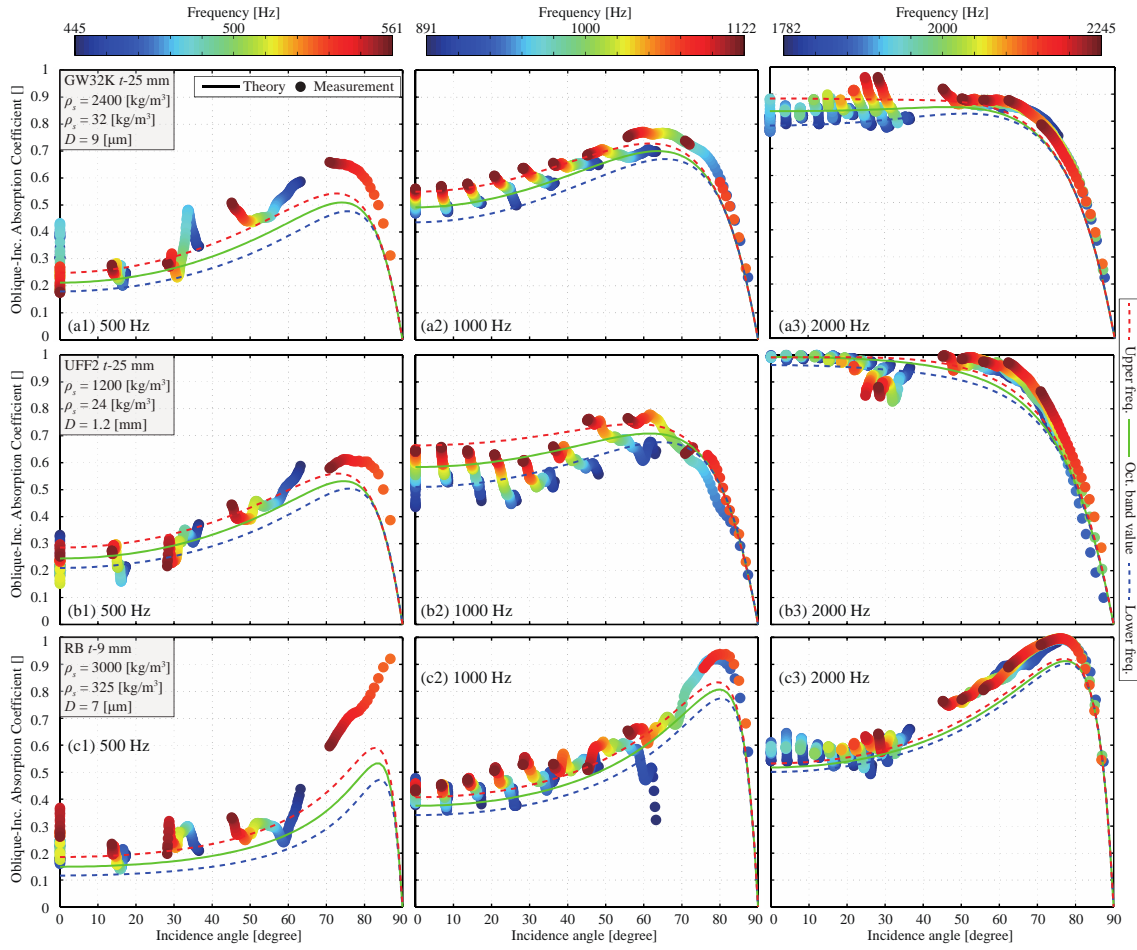


Fig. 5 Oblique incidence absorption coefficients measured for three different porous materials in the 1/3 octave bands of 500, 1000, 2000 Hz center frequency. (a)Glass wool,(b)Urethane Foam and (b)Rockwool Board.

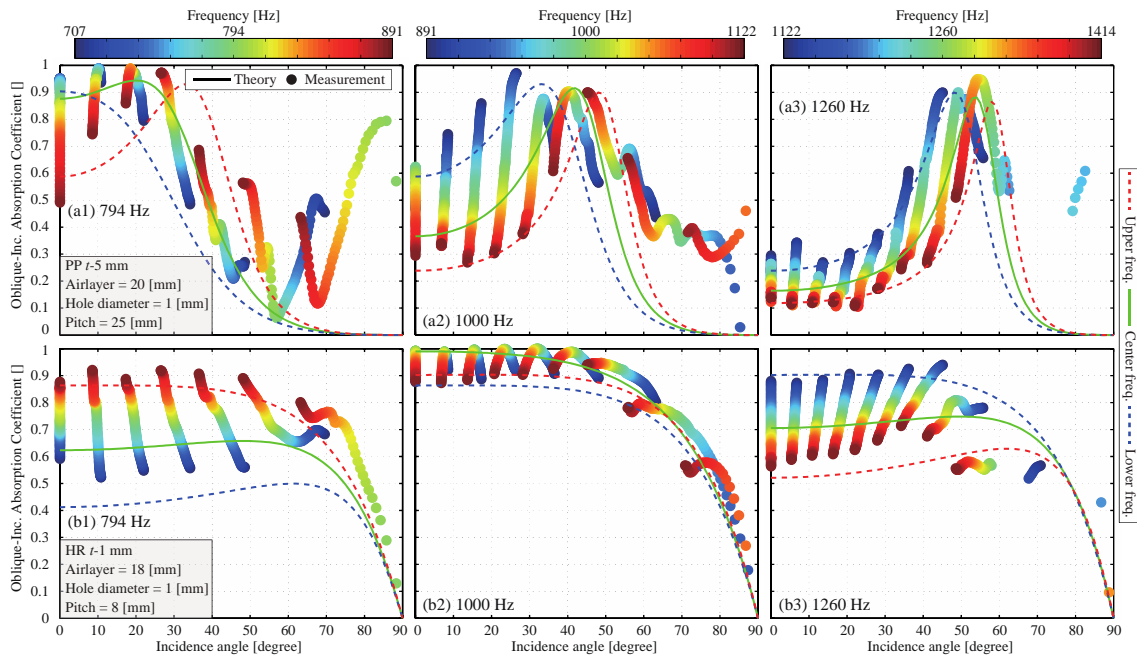


Fig. 6 Oblique incidence absorption coefficients measured for two different resonator materials in the 1/3 octave bands of 794, 1000, 1260 Hz center frequency. (a)Perforated Panel and (b)Honeycomb Resonator.