

多孔質吸音材測定方法に関する研究*

竹林健一 藤原恭司(九州大) 藤本卓也(四元音響)

1 はじめに

グラスウール(以下 GW), ロックウール(以下 RW)などの繊維材料に代表される多孔質吸音材料はホールやスタジオなどの残響調整,あるいは工場家屋などの建築物において吸音材料として用いられる。それらを等方均質な媒質であると仮定すると垂直入射吸音率などの音響特性が特性インピーダンス(以下 Z_c), 伝搬定数(以下 γ)の二つのパラメータによって決定される。この二つのパラメータを求める一般的な測定方法として two-thickness method がある。また,別の方法として材料の単位厚さ流れ抵抗から Z_c, γ を推定する Miki モデルがある。ただし, Miki モデルは試料の密度や周波数に対してどの程度まで信頼性があるのか明確にされていない。そのため本研究では Miki モデルの適用限界を調査することを一つの目的としている。しかし, Miki モデルを検証するための本来正しい値である two-thickness method による実測値は測定条件によってばらつきが生じる場合があり, Miki モデルの適用限界を知るためにも two-thickness method でのばらつきを調べることは重要と考えられる。本報告では two-thickness method での測定に関して試料の密度や試料の厚さなど測定条件の違いによって特性インピーダンス, 伝搬定数の実測結果がどのように変化するのか一例を紹介するとともに, その一原因について考察した結果について述べる。

2 特性インピーダンス, 伝搬定数

特性インピーダンス Z_c は等方均質な媒質の中を平面波が伝搬する場合の媒質中の音速 c_m と媒質中の実効密度 ρ_m との積で定義され

る。伝搬定数は定常状態の平面進行波において, 媒質中の一点での音圧とその点から単位長さだけ離れた点における音圧との複素比の自然対数をとったものである。この時, 実部を減衰定数 α と呼び, 虚部を位相定数 β と呼ぶ。空気中では $\alpha = 0$ となり, $\beta (= \omega/c)$ は波数 k と一致する。

3 流れ抵抗, Miki モデル

流れ抵抗は試料に垂直に空気を通した時の空気の流れにくさを表す指標であり, 試料両面の圧力差及び流速から求めることができる。Miki モデルはさまざまな Z_c, γ の実測結果から回帰直線を導き出し, 流れ抵抗をパラメータとした周波数の関数として表したものである。流れ抵抗を σ , 周波数を f , 空気の密度を ρ , 空気中の音速を c とすると特性インピーダンス及び伝搬定数は式(1), 式(2)で与えられる。

$$z = \frac{Z_c}{\rho c} = R(f) + jX(f) \quad (1)$$

ただし,

$$R(f) = 1 + 0.070 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.632}$$

$$X(f) = -0.107 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.632}$$

$$\gamma = \alpha(f) + j\beta(f) \quad (2)$$

ただし,

$$\alpha(f) = \frac{\omega}{c} \left[0.160 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.618} \right]$$

$$\beta(f) = \frac{\omega}{c} \left[1 + 0.109 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.618} \right]$$

* A study of measurement method for porous materials.

by KENICHI Takebayashi, KYOUJI Fujiwara (Kyushu Univ.), TAKUYA Fujimoto (Yotsumoto Acoustic Design Inc.)

4 Z_c, γ の測定方法

4.1 two-thickness method

two-thickness method は音響管内に設置された厚さ $d, 2d$ の試料表面の法線方向比音響インピーダンス Z_1, Z_2 から特性インピーダンス, 伝搬定数を計算する方法である。測定した比音響インピーダンス Z_1, Z_2 から式 (3), 式 (4) により Z_c, γ が求められる。

$$Z_c = \{Z_1(2Z_2 - Z_1)\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{1}{2d} \ln \left(\frac{1+a}{1-a} \right) \quad (4)$$

ただし,

$$a = \left(\frac{2Z_2 - Z_1}{Z_1} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Fig.1 は two-thickness method における音響管内での試料の設置状態を示す。

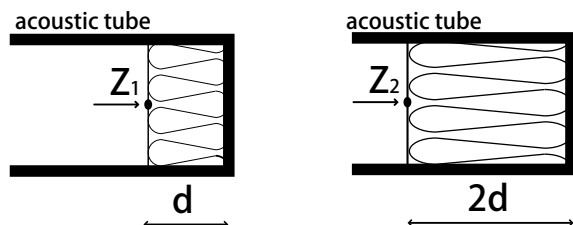


Fig. 1 material settings of two-thickness method

4.2 比音響インピーダンスの測定

比音響インピーダンスは、矩形断面の音響管を用いて 2 マイクロホン伝達関数法により測定した。測定周波数帯域は 40Hz ~ 5000Hz であり、900Hz ~ 5000Hz は 30mm の音響管、40Hz ~ 1500Hz は 100mm の音響管を用いた。

5 Z_c, γ の測定結果

5.1 比較対象

two-thickness method の結果と比較する対象として Miki のモデルを用いる。今回は実測値のばらつきを検討するために Miki モデ

ルを用いるが、Miki モデルが Z_c, γ の真の値を表しているわけではないことに留意する必要がある。

5.2 試料厚さによる測定値の変化

グラスウールの中でもっとも軽い密度 10 kg/m^3 の試料(通称 GW10k)を対象とし、まず全測定帯域について厚さ 50mm と 100mm の試料を用いて two-thickness method による測定を行うとともに、Miki モデルとの比較を行った。Miki モデルに用いる流れ抵抗は $1200 \text{ Pa}\cdot\text{s/m}^2$ (測定値)を採用した。結果を Fig.2 に示す。200Hz 以下の低域及び、3300Hz あたりで Miki モデルとは異なった結果が生じている。

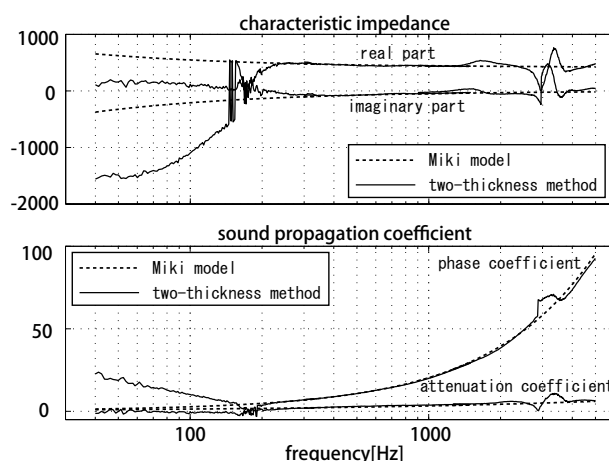


Fig. 2 characteristic impedance and sound propagation coefficient of GW10k obtained by Miki model and two-thickness method

次に周波数帯域ごとに試料の厚さを変化させて測定を行った。Table.1 に試料厚さと測定周波数帯域の関係を示す。波長が長い低域では試料の厚さを厚く、高域では波長が短いため試料の厚さを薄くしている。結果を Fig.3 に示す。Fig.2 とは違い、測定帯域すべてで Miki モデルとほぼ同じ値をとった。

5.3 密度による違い

次に、密度の異なった二種類の試料を用いて測定を行い、それらの結果を比較した。対象とする試料は密度 32 kg/m^3 のグラスウール(通称 GW32k)と密度 200 kg/m^3 のロック

Table 1 correspondance of measurement frequency range to material thickness

frequency range	material thickness
40[Hz] - 340[Hz]	250[mm] , 500[mm]
300[Hz] - 1500[Hz]	50[mm] , 100[mm]
900[Hz] - 5000[Hz]	25[mm] , 50[mm]

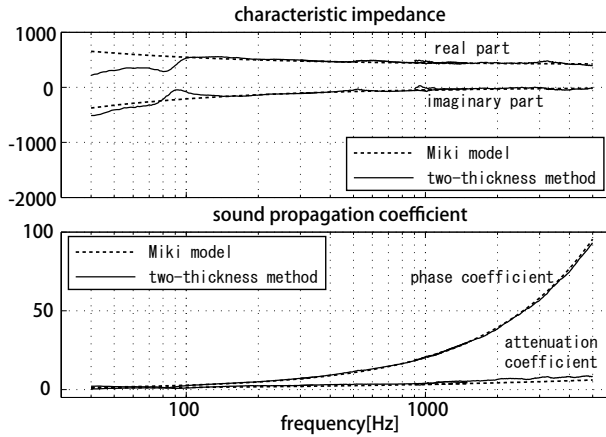


Fig. 3 characteristic impedance and sound propagation coefficient of GW10k obtained by Miki model and two-thickness method

ウール (通称 RW200k) である。試料の厚さは Table1 に示した値とする。Miki モデルに用いる流れ抵抗は GW32k で約 $6500\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$, RW200k で約 $71000\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ とした (ともに実測値)。

Fig.4 の GW32k の結果を見ると Z_c, γ それぞれ Miki モデルと同様の傾向が見られることが分かる。しかし, RW200k では, Z_c は 200Hz 以下の低域で測定結果に激しいピークディップが生じており, γ では Miki モデルとは減衰定数, 位相定数ともに大きく異なった傾向となっている。

6 考察

試料の厚さ, 密度を変えて測定を行ったところ, 波長と試料の厚さには重要な関係があった。また比較的密度の低い試料では two-thickness method による測定結果と Miki モデルによる計算結果がほぼ一致するものの, 密度が高い RW200k では特に γ の結果が Miki モデルとかなり異なった結果になった。

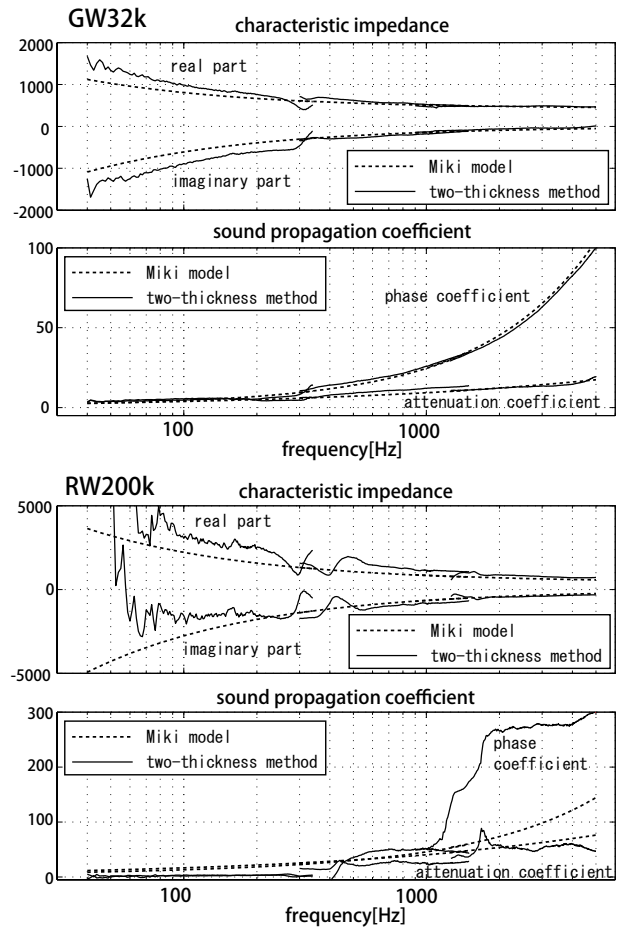


Fig. 4 characteristic impedance and sound propagation coefficient of GW32k and RW200k obtained by Miki model and two-thickness method

その中でも 900Hz から 5000Hz の帯域で γ の位相定数が Miki モデルから大きく外れているのは顕著な傾向といえる。ここで試料表面での比音響インピーダンスに注目する。Fig.5 は厚さ 25mm と厚さ 50mm の試料表面での比音響インピーダンスと特性インピーダンス Z_c を示した図であるが, これを見ると厚さ 50mm の比音響インピーダンスと Z_c が重なってほぼ等しい値をとっていることが分かる。いま, $Z_c = Z_2$ として式 (3) に代入すると $Z_c = Z_1$ となりこれを式 (4) に代入すれば

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{1}{2d} \ln \left(\frac{Z_1 + Z_1}{Z_1 - Z_1} \right) \\ &= \infty \end{aligned}$$

となり, 値が発散してしまう。実際は Z_c と Z が完全に一致していないので γ の値が数値

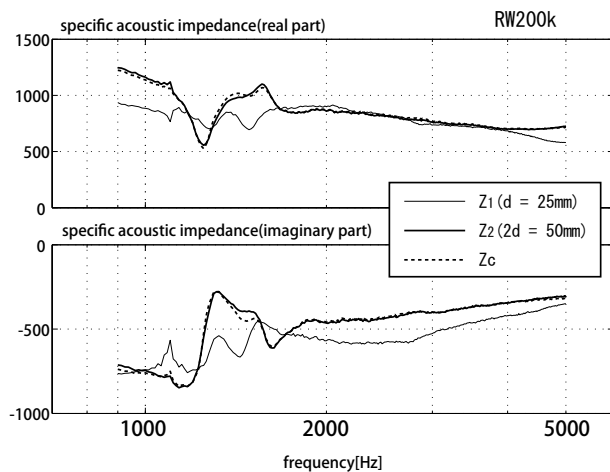


Fig. 5 RW200k specific acoustic impedance and characteristic impedance

的に発散することはないが、特性インピーダンス Z_c と比音響インピーダンス Z が近い値をとることは伝搬定数 γ の測定において避けなければならないと言える。

一般に、試料の厚さが無限大である時、 $Z_c = Z$ となることが知られており、 Z_c が Z と等しくなるということは試料の厚さが無限大に等しいと解釈出来る。これは試料密度が高くなり、試料内での音波の減衰が大きくなるため、試料背後の剛壁からの反射波がなくなってしまうためと考えられる。

この点を考慮し、900Hz から 5000Hz の帯域でさらに試料厚さを薄くし、厚さ 6mm、12mm の試料を用いて Z_c と Z が近い値をとらないようにして伝搬定数を測定した。結果を Fig.6 に示す。

Fig.4 の伝搬定数 γ の結果に比べ Miki モデルに近い値をとった。

7 まとめ

GW, RW などの多孔質吸音材の音響的物性値である Z_c, γ を two-thickness method を用いて測定をおこなった。試料厚さや密度を変えた時、波長に対して試料の厚さが厚すぎる、もしくは薄すぎる場合、Miki モデルとは異なった結果になることがわかった。密度が高い試料では特性インピーダンスと比音響

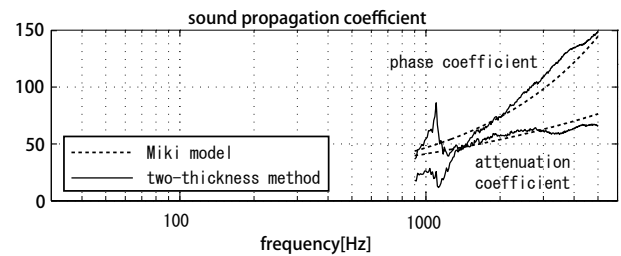


Fig. 6 RW200k sound propagation coefficient from Miki model and two-thickness method

インピーダンスが近い値をとり、伝搬定数の値が Miki モデルと異なった結果になる。それを避けるために密度の高い試料の伝搬定数測定には試料の厚さを密度の低い試料の厚さよりも薄くする必要がある。

今後は Miki モデルの適用限界を知るために、実測で安定した値を得ることが出来るような測定条件及び測定方法を検討する予定である。

参考文献

- [1] Yasuaki Miki *Acoustical properties of porous materials -Modifications of Delany-Bazley models-* J.Acoust.Soc.Jpn.(E),1(1992) pp.19-24
- [2] ISO 10534-2 *Acoustic-Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part2:Transfer-function method* (1998-11-15)
- [3] M.E.Deleny and E.N.Bazley *ACOUSTICAL PROPERTIES OF FIBROUS ABSORBENT MATERIAL* Applied Acoustics(3)(1970) pp.105-116
- [4] Charles D. Smith, Tony L. Parrot *Comparison of three methods for measuring acoustic properties of bulk materials* J.Acoust.Soc.Am.74(5),November(1983) pp.1577-1582