

特性インピーダンスおよび伝搬定数を用いた 垂直入射吸音率の理論予測

機械・材料技術部 機械計測グループ 小島 真路

1 はじめに

家電や産業機械をはじめ様々な機器に対して、音や振動に係わる要求が従来に増して高まっている。騒音対策に多く使用される吸音材の選定や開発の際には、実測定による評価だけでなく、吸音率を計算によって求めることが、開発時間の短縮やコスト削減に有効である。

本研究では、2 マイクロホン法による音響管計測で得られる音響パラメータ（特性インピーダンスおよび伝搬定数）を用いて、次の3つの場合の垂直入射吸音率の理論予測プログラムを作成した。①吸音材の厚さを変更した場合、②二種類の吸音材を積層した場合、③吸音材の背後に空気層がある場合。計算結果は、実測定結果と比較し妥当性を検証した。

2 垂直入射吸音率の理論予測

2.1 特性インピーダンスおよび伝搬定数の計測

音響管の構成を図1に示す。音響管の一端に取り付けられたスピーカによって管内に平面波を励起し、2本のマイクロホン間の伝達関数から垂直入射吸音率を算出する。また、吸音材の表裏面の音響インピーダンス Z_a 、 Z_b も測定により求まる。 d と L はそれぞれ吸音材と背後空気層の厚さである。特性インピーダンス Z_c と伝搬定数 γ は、吸音材の背後空気層を変えて測定した二つの音響インピーダンスから次式で求まる。ここで、背後空気層の厚さを L' としたときの表裏面の音響インピーダンスを Z'_a 、 Z'_b とする。

$$Z_c = \pm \sqrt{\frac{Z_a Z'_a (Z_b - Z'_b) - Z_b Z'_b (Z_a - Z'_a)}{(Z_b - Z'_b) - (Z_a - Z'_a)}} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{1}{2d} \ln \left(\frac{Z_a + Z_c}{Z_a - Z_c} \frac{Z_b - Z_c}{Z_b + Z_c} \right) \quad (2)$$

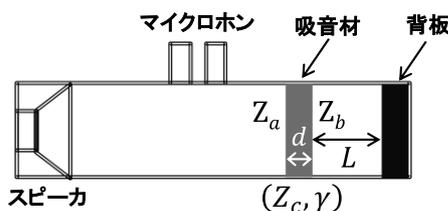


図1 音響管の構成

2.2 垂直入射吸音率の算出

(a) 吸音材の厚さを変更した場合

剛壁面に密着した厚さ d の吸音材の音響インピーダンス Z_a^* は、次式で表される¹⁾。

$$Z_a^* = Z_c \coth \gamma d \quad (3)$$

ここで、特性インピーダンス Z_c と伝搬定数 γ は、実験で得られる値であり、吸音材の厚さ d を指定すれば音響インピーダンス Z_a^* が求まる。反射係数 r および垂直入射吸音率 α は次式で算出される。

$$r = \frac{Z_a^* - \rho_0 c_0}{Z_a^* + \rho_0 c_0}, \quad \alpha = 1 - |r|^2 \quad (4)$$

ただし、 ρ_0 は空気の密度、 c_0 は音速である。

(b) 二種類の吸音材を積層した場合

図2において、スピーカ側および背板側の吸音材の特性インピーダンス、伝搬定数、厚さについて、それぞれ添え字1、2で表すと、音圧 p と粒子速度 u との関係は次式で表すことができる¹⁾。

$$\begin{pmatrix} p_a \\ u_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \gamma_1 d_1 & Z_{c1} \sinh \gamma_1 d_1 \\ \frac{1}{Z_{c1}} \sinh \gamma_1 d_1 & \cosh \gamma_1 d_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_b \\ u_b \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} p_b \\ u_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_c \\ u_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \gamma_2 d_2 & Z_{c2} \sinh \gamma_2 d_2 \\ \frac{1}{Z_{c2}} \sinh \gamma_2 d_2 & \cosh \gamma_2 d_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_d \\ u_d \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここで、

$$\begin{pmatrix} p_a \\ u_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_d \\ u_d \end{pmatrix} \quad (7)$$

とすれば、音響インピーダンス Z_a^* は、式(7)の u_d を0として、次式で表される。

$$Z_a^* = \frac{p_a}{u_a} = \frac{A_1 A_2 + B_1 C_2}{C_1 A_2 + D_1 C_2} \quad (8)$$

これを式(4)に代入して、反射係数 r および垂直入射吸音率

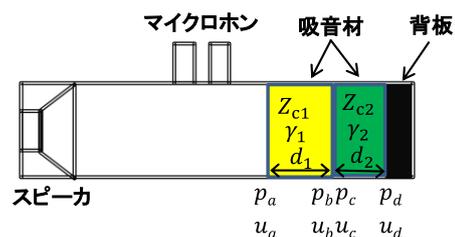


図2 吸音材を積層した場合の音響管の構成

α が算出される。

(c) 吸音材の背後に空気層がある場合

前項(b)の特性インピーダンス Z_{c2} と伝搬定数 γ_2 に空気の値を代入することで、反射係数 r および垂直入射吸音率 α が算出される。

3 実験結果と考察

本研究では、グラスウール、ウレタン、シンサレートの3種類の吸音材を対象とした。一例として、グラスウール(厚さ 40mm)の垂直入射吸音率の計算値と実測値の比較を図3(a)に示す。計算値は、厚さ 20 mmのグラスウールから得られた音響パラメータを用いて計算された値である。全周波数にわたり、実測値とよく一致している。ウレタンを対象とした場合も良好な結果が得られた。しかしながら、厚さ 10mmのシンサレートの実測値から厚さ 20mmの垂直入射吸音率を計算した結果は、図3(a)に示すように、3kHz以下の周波数領域で実測値とのずれが見られた。そこで、音響パラメータを求める際の背後空気層の厚さの組み合わせ(L, L')を3通りとして結果を比較したところ、グラスウールとウレタンに比べ、シンサレートでは、得られた特性インピーダンスの大きさにばらつきが生じていることが明らかとなった。特性インピーダンスの標準偏差を表1に示す。したがって、垂直入射吸音率の理論予測の誤差は、音響パラメータが正しく得られていないことが要因の一つであるといえる。

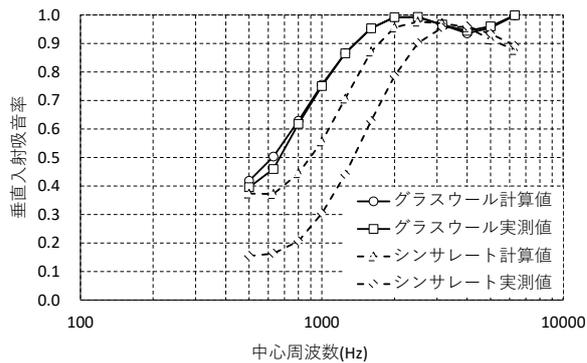
グラスウール(厚さ 20 mm)とウレタン(厚さ 25mm)を積層した場合の結果を図3(b)に示す。少しずれがあるものの、全周波数にわたり、良好な結果が得られた。

グラスウール(厚さ 20mm)の背後に空気層(厚さ 30mm)がある場合の結果を図3(c)に示す。吸音材の背後に空気層がある場合も、グラスウールとウレタンについては、良好な結果が得られた。

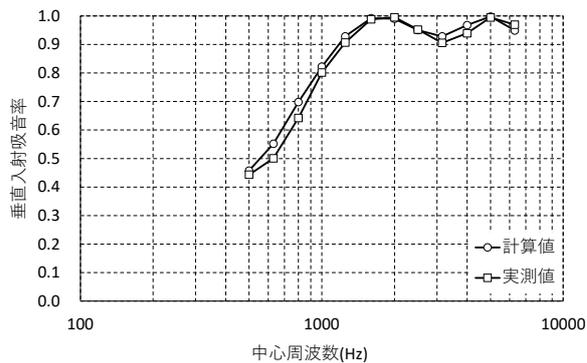
4 まとめ

本研究では、計測で得られる音響パラメータを用いて、垂直入射吸音率を理論予測するプログラムを作成した。吸音材の厚さを変更した場合、二種類の吸音材を積層した場合、吸音材の背後に空気層がある場合について検証した結果、シンサレートでは、計算値と実測値に誤差が見られたものの、グラスウールとウレタンについては、良好な結果が得られた。この理論予測を用いることで、実測することなく、吸音材の厚さと吸音率の関係を把握することが可能となることから、吸音材の特性評価に有効である。

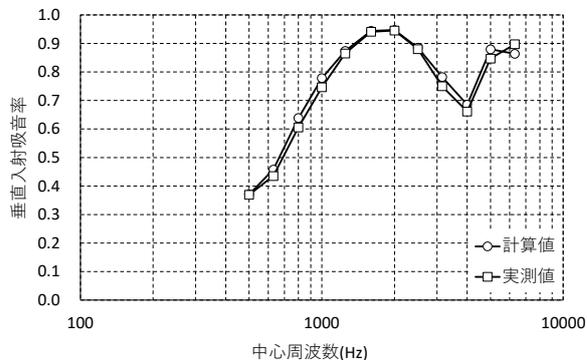
シンサレートで良好な結果が得られなかった要因は、特性インピーダンスが正しく計測できなかったためである。これは、吸音材の種類によって生じる避けることが難しい現象であり、正確な音響パラメータを得るための研究が多く



(a) 吸音材の厚さを変更した場合



(b) 二種類の吸音材を積層した場合



(c) 吸音材の背後に空気層がある場合

図3 垂直入射吸音率の計算値と実測値の比較

表1 特性インピーダンスの標準偏差

中心周波数(Hz)	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
グラスウール	0.51	0.31	0.16	0.03	0.05	0.04	0.03	0.02	0.04	0.01	0.07	0.29
ウレタン	0.02	0.03	0.05	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.09	0.05	0.19
シンサレート	0.93	0.51	0.25	0.27	0.32	0.33	0.41	0.41	0.49	0.49	0.22	1.03

行われている^{2), 3)}。当所においても、正しい音響パラメータを得るための手法について、今後検討していく予定である。

【参考文献】

1. 加藤大輔, 日本音響学会誌, **68**, 463-468(2012).
2. M.E.Delany and E.N.Bazley, *Apl.Acoust.*, **3**, 105-116(1970).
3. 加藤大輔, 日本音響学会誌, **63**, 635-645(2007).