

共鳴器型吸音パネルの吸音率予測

真田 明・章 忠・岩国 信夫*

Akira SANADA, Zhong ZHANG, Nobuo IWAKUNI

キーワード ヘルムホルツ共鳴器／吸音パネル／吸音率／音響インピーダンス密度

KEY WORDS Helmholtz resonator /Sound absorber /Sound absorption coefficient /Acoustic impedance density

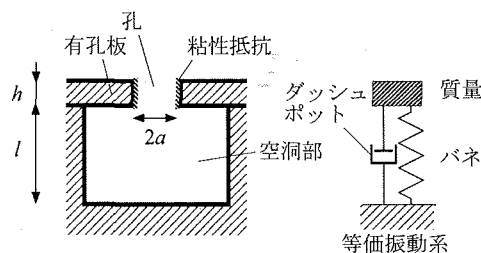
1 はじめに

ヘルムホルツ共鳴器を用いた吸音パネルは、中・低周波数の音を低減するために古くから用いられている^{(1)~(4)}。ヘルムホルツ共鳴器は、図1(a)に示すとおり、有孔板の背後に空気室（空洞部）が配置された構造をしている。孔の部分の空気が質量、空洞部の空気がバネの役割をして振動系を構成し、この固有振動数と同じ周波数の音が入射したときに共鳴が生じ、孔部分の粘性摩擦により音が吸収される。この共鳴器を複数配置した図1(b)のような吸音パネルの吸音率は、共鳴器のサイズや孔部分の粘性抵抗値などの要因によって決まることが分かっている。しかしながら、孔部分の粘性抵抗値を正確に見積もることが難しく、実際の吸音パネルの製作では実験による試行錯誤が必要であった。このことは開発期間や試作費の増大などを引き起こし、吸音パネル開発において大きな問題となっていた。そこで、本研究では音響インピーダンス測定により孔部分の粘性抵抗値を実験的に求め、吸音パネルの吸音率を予測する手法について検討を行った。また、求めた粘性抵抗値を用いて予測した吸音率と実験結果とを比較した。その結果について報告する。

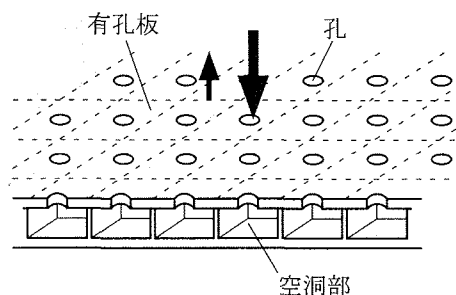
2 拡散入射吸音率

2.1 吸音率の予測式導出

N種類のヘルムホルツ共鳴器が組み込まれた共鳴器型吸音パネルを対象とし、吸音率の予測式を導出する。ここでは検討する周波数帯域において音波の波長に対して、共鳴器の孔のピッチや孔径、空洞部の寸法が十分小さいとする。この仮定の下では入射音波が平面波の場合、平均的には反射音も平面状になるとみなせる。また共鳴器内部においては、パネルに対して垂直方向の平面波として音波が進行すると考えることができる。ここでは



(a) ヘルムホルツ共鳴器



(b) 共鳴器型吸音パネル

図1 吸音パネル

孔部分や空洞部分の断面は円形とする。

まず、単一種類の共鳴器による吸音パネルの表面の音響インピーダンス密度 Z_s を求める。孔の面積を s 、有孔板の厚みを h 、空気密度を ρ 、孔の部分の粘性抵抗値を R 、有孔板表面の音圧を P_s 、裏面の音圧を P_b 、孔部分の空気の振動変位を x とすると孔部分の空気に関する運動方程式は次式で記述できる。

$$sh'\rho \frac{dx^2}{dt^2} + R \frac{dx}{dt} = P_s s - P_b s \quad (1)$$

ただし、 $h' = h + \delta$ であり、 δ は孔部分の空気への付加質量を考慮した管端補正值である。この値は、Ingard によると次式により表すことができる⁽⁴⁾。

$$\delta = \delta_e + \delta_i \quad (2)$$

ただし、 δ_e は孔の外部空間側の補正值、 δ_i は空洞部側の補正值であり、孔及び空洞部の断面を円

*リョービ（株）

形とした今の場合、次式で記述できる。

$$\delta_e = \frac{8}{3\pi} a \quad (3)$$

$$\delta_i = 0.48 \cdot s^{1/2} \left(1 - 1.25 \frac{a}{r} \right) \quad (4)$$

ただし、 a は孔の半径、 r は空洞部分の半径である。これより、有孔板における開口率を p とすると、表面の音響インピーダンス密度 Z_s は、

$$Z_s = \frac{1}{p} \left[\frac{R}{s} + j\omega\rho h' \right] + \frac{1}{p} \frac{s}{S} Z_b \quad (5)$$

と求めることができる。ただし、 S は空洞部断面積、 Z_b は有孔板裏面の音響インピーダンス密度である。空洞部の深さを l 、波数を k ($=\omega/C$) としたとき、 kl が十分小さければ Z_b は次式となる。

$$Z_b = -j \frac{\rho C^2}{\omega l} \quad (6)$$

したがって、式(5)、式(6)より、

$$Z_s = \frac{1}{p} \frac{R}{s} + j \frac{1}{p} \left[\omega\rho h' - \frac{s}{S} \frac{\rho C^2}{l} \frac{1}{\omega} \right] \quad (7)$$

となる。

次に N 種類の共鳴器を同一パネルに複合した場合の音響インピーダンス密度 Z_m は、 Z_m と各共鳴器が単独で存在する場合の音響インピーダンス密度 ($Z_1, Z_2, \dots, Z_N$) との関係が次式であることから求めることができる。

$$\frac{1}{Z_m} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \dots + \frac{1}{Z_N} \quad (8)$$

角度 θ で入射した場合の反射係数 $r(\theta)$ は、境界での粒子速度の連続条件より、

$$r(\theta) = \frac{Z_m \cos \theta - Z_0}{Z_m \cos \theta + Z_0} \quad (9)$$

となる。ただし、 Z_0 は空気の特徴インピーダンスである。また角度 θ で入射した場合の吸音率は、

$$\alpha(\theta) = 1 - |r(\theta)|^2 \quad (10)$$

により求めることができる。残響室法によって測定される吸音率は、拡散音場を仮定しているのので θ について $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲で積分を行えばよい。

2.2 孔部粘性抵抗測定

孔部分の粘性抵抗値 R を実験により求めた。測定には 2 マイクロホン法によるインピーダンス測定管 (B&K4206) を用いた。実験で用いる有孔板と同じ孔についてヘルムホルツ共鳴器を構成し、音響インピーダンス密度を測定した。音響インピーダンス密度は共鳴周波数において実数部のみになり、この値は次式で表される。

$$Z_R = \frac{1}{p} \frac{R}{s} \quad (11)$$

この式より逆に R を求めると次式となる。

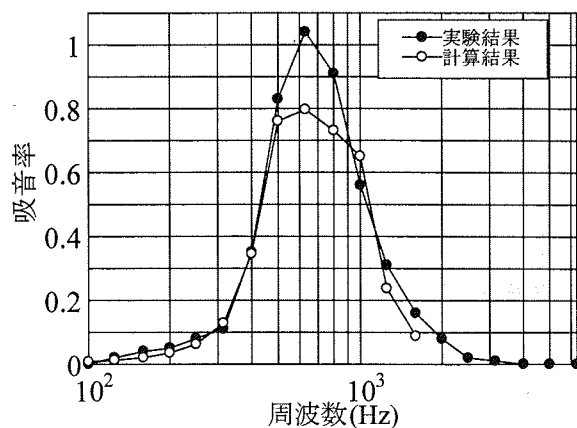


図2 吸音率予測結果及び実験結果

$$R = s p Z_R \quad (12)$$

したがって、共鳴周波数における Z_R の値より、 R を求めることができる。

3 予測結果および実験結果

吸音率を予測することで、共鳴器型吸音パネルを設計し、試作を行った。残響室法により実験を行い、予測結果との比較を行った。設計した吸音パネルは 7 種類 ($N=7$) の共鳴器を組み込んだものである。吸音率の予測結果、実験結果を図2に示す。両者を比較すると、630Hz、800Hz において実験結果が計算結果よりも高い値を示している他はよく一致している。630Hz で実験結果は 1 を超えているが、これは一般に吸音率測定で見られる回折の影響で、実験上の問題と考えられる。これらのことから、孔部分の粘性抵抗値 R を実測し、吸音率を予測する本手法が有効であることが確認できた。

4 まとめ

実験的に孔部分の粘性抵抗値を求めることで、共鳴器型吸音パネルの吸音率予測が可能であることが分かった。今後は、吸収したい音に対して最適な設計を行うための手法などについて検討を行っていく予定である。

参考文献

- (1) 前川, 森本, 阪上: "建築環境音響学", 共立出版(2000)p.86
- (2) 日本音響材料協会: "騒音振動対策ハンドブック", 技報堂出版(1993)p.262
- (3) 小口, 藤原: 騒音制御, 59-7, 396-398(2003)
- (4) U.Ingard: J. Acoust. Soc. Am., 25-6, 1037(1953)