

◎文珠川潔, 寺尾道仁, 関根秀久 (神奈川大・工)

1. はじめに 壁面粘性・熱伝導境界層は多孔質吸音材料が不向きな給排気系および室内音響の低周波数域の音響制御において重要な音響散逸要素である。また, 建築における低周波数域の音響調整で重要なヘルムホルツ共鳴器の吸音力は壁面の空気粘性・熱伝導散逸に依存する。そこで, 空気粘性・熱伝導散逸を考慮した境界要素法の適用を試み, その妥当性について精密な物理実験を行い検討した。

2. 供試スリット型共鳴器 対象としたスリット型共鳴器および記号を Fig.1 に示す。ダクトと空洞部は PVC (板厚  $t=30\text{mm}$ ) により接着加工した。ダクトと空洞の間の開口部仕切板とその材質は Table.1 に示す。ここで PVC および真鍮製仕切板の場合は共鳴器・ダクト間に挟み, ねじ接合とし, 鋼板製仕切板の場合は共鳴器・ダクト (いずれも板厚  $t=10\text{mm}$ ) と一体溶接である。

3. ヘルムホルツ共鳴器の特性 ある角周波数  $\omega$  について, 共鳴器開口前面音圧の複素振幅を  $p_F$ , 開口断面内粒子速度の複素振幅を  $u_A$ , その比, すなわち単位面積音響インピーダンスを  $Z_{HR}$ , 開口の断面積を  $S_A$  とすればヘルムホルツ型共鳴器の音響インピーダンス  $Z_{HR}/S_A$  は,

$$Z_{HR}/S_A = p_F/S_A u_A = R_A + jX_{HR} \quad (1)$$

の形で表される。ここで, 音響リアクタンス  $X_{HR}$  は  $X_{HR} = \omega M_A - 1/\omega C_C$  の形で表される。 $C_C = V_C/(\rho_0 c^2)$  は音響コンプライアンスを,  $M_A = \rho_0(\ell_A + \Delta\ell_M)/S_A$  は開口の音響イナータンス,  $\rho_0$  は空気密度,  $c$  は音速,  $\Delta\ell_M$  は開口の付加質量補正長でスリットの場合の Kostenら[1]の式を用いた。一方, 音響レジスタンス  $R_A$  については Ingard の経験式 [2]  $R_A = 2R_v(\ell_A + \Delta\ell_R)/(aS_A)$  を用いた。ここで,  $\Delta\ell_R$  は付加抵抗補正長で  $\Delta\ell_R \cong 2a$  である。 $R_v$  は壁面粘性散逸係数で次項に示す。 $a$  は開口断面の半径であるが, スリットの等価断面半径  $b_A$  であるから  $a$  に代えて  $b_A$  を用いた。

以上に対して, 共鳴器の吸音率  $\alpha$  は,

$$\alpha = 4R_A \rho_0 c \sigma / \{(\rho_0 c \sigma + R_A)^2 + X_A^2\} \quad (2)$$

のように表される。ただし,  $\sigma$  は開口のポロシティでダクト断面積を  $S_D$  とすれば  $\sigma = S_A/S_D$  で表される。

4. 音響境界層連成数値解析 数値解析は疎密波モード場 Helmholtz-Kirchhoff 積分定理に基づく2次元部分領域型境界要素法により, 開口部壁面では寸法  $0.1\text{mm}$ , その他の壁面では  $1\text{mm}$  の一定要素で離散化した。その境界条件, すなわち, 壁面における疎密波モードの音圧  $p$  とその外向き法線方向の勾配  $q$  との関係は疎密波, 粘性および熱伝導モードの合成速度と壁面速度の整合条件から,

$$\frac{q}{-j\omega\rho} = \left[ \frac{1}{z_w} + (1+j) \left\{ \frac{R_h}{\rho^2 c^2} - \frac{R_v \nabla_{\tan}^2}{\rho^2 \omega^2} \right\} \right] p \quad (3)$$

のように与えられる[3]。ここで,  $z_w$  を壁面のインピーダンス, また, 粘性および熱伝導境界層厚をそれぞれ  $d_v = \sqrt{2\mu/\omega\rho}$  および  $d_h = \sqrt{2\kappa/\omega\rho c_p}$  とし,

$$R_v/\rho c \equiv \omega d_v/2c \approx 2.0\sqrt{f} \times 10^{-5}$$

$$R_h/\rho c \equiv \omega(\gamma-1)d_h/2c \approx 0.96\sqrt{f} \times 10^{-5} \quad (4)$$

ただし,  $\mu$  および  $\kappa$  は, それぞれ空気粘性係数および熱伝導率,  $c_p$  は定圧比熱,  $\gamma$  は比熱比,  $f$  は周波数である。 $\nabla_{\tan}^2$  は壁面の接線方向に関するラプラシアンで, 固体境界面を滑らかな境界面素に分割し, それぞれの面素の  $\nabla_{\tan}^2 p$  はそれに隣接する面素との差分表現に変換し, 端部

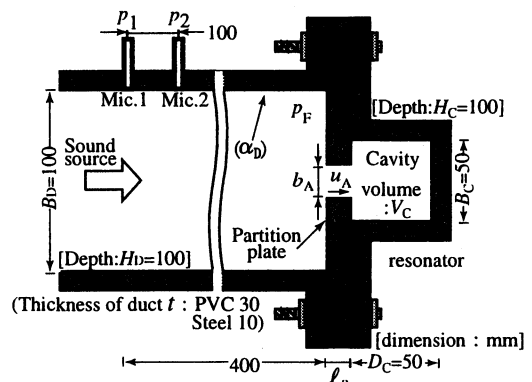


Fig.1 Slit resonator and observation duct.

\*Numerical analyses and high precision experiments on acoustic resistances of slit resonators.  
By K.Monjyugawa,M.Terao,H.Sekine(Knagawa University)

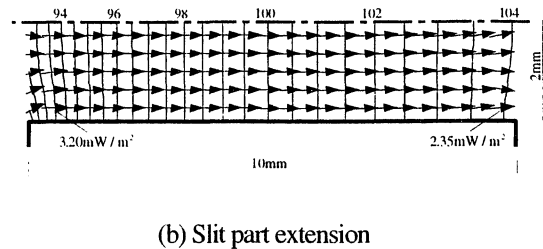
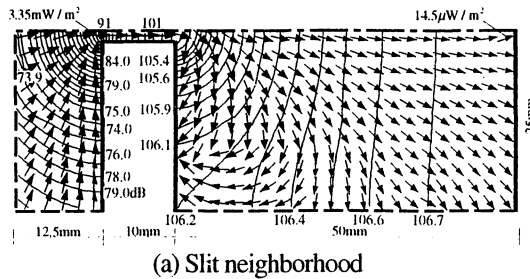


Fig.2 Sound pressure and net intensity distribution around slit resonator of  $\ell_A=10\text{mm}$ ,  $b_A=4\text{mm}$ , at 512Hz. Half side region about the axis of symmetry is shown.

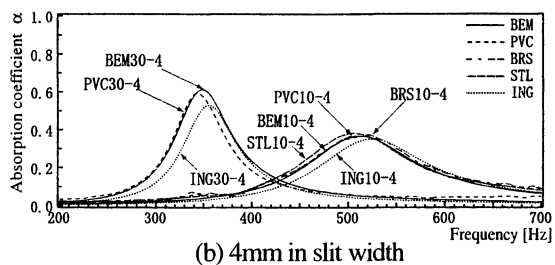
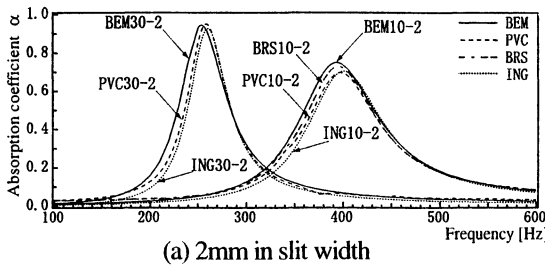


Fig.3 Difference in absorption coefficient by the methods.

面素に対しては音圧がこれに一致し面積0の仮想面素を端部に付加して処理している。

**5. 吸音率の観測** まず、ダクト内の2点音圧  $p_1$  と  $p_2$  の観測により式(1)の開口前面音圧  $p_f$  および開口断面内粒子速度  $u_A$  を求め、次に式(2)により吸音率  $\alpha$  を求める。ここでダクト壁面の散逸  $\alpha_p$  は共鳴器の散逸に含めている。

**6. 共鳴器スリット近傍の音場** Fig.2 に最大共鳴周波数における共鳴器スリット近傍の音圧およびインテンシティ分布の例を示す。Fig.2(a)はスリットの出入り口周辺の音場を示す。ダクト側には球面上の音圧ノード域が存在し、ここから開口流路を通じて空洞内まで、次第に音圧は上昇し、空洞内音圧はダクト音圧に比べて 30dB 程度大きくなっている。Fig.2(b)はスリット内の音場を詳細に見たものである。流路中央部では平面波に近い状態であるが、出入り口付近ではそれが崩れている。一方、音響インテンシティは全体的にスリット部分に向かっており、スリット部およびその近傍壁面での音響エネルギー散逸が大きいものと考えられる。

**7. 吸音率の測定および解析結果** Fig.3 に、Table.1 に示したスリット共鳴器の吸音率を示す。開口仕切り板材質について、PVC板は金属板に比べ音響散逸が僅かながら小さい。これは熱伝導の違いにあると考えられる。Ingard の経験式と Kosten の理論式との合成による式は満

Table.1 Materials,  $\ell_A$  and  $b_A$  of slits.

Substance of plate	$\ell_A$ [mm]	$b_A$ [mm]	Symbol
Numerical analysis by BEM	10	2	BEM10-2
		4	BEM10-4
	30	2	BEM30-2
		4	BEM30-4
Experience expression of Ingard and Theoretical formula of Kosten	10	2	ING10-2
		4	ING10-4
	30	2	ING30-2
		4	ING30-4
PVC plate	10	2	PVC10-2
		4	PVC10-4
	30	2	PVC30-2
		4	PVC30-4
Brass plate	10	2	BRS10-2
		4	BRS10-4
steel plate	10	4	STL10-4

足すべき一致を示しており、簡単な陽的計算であるにも関わらず有効であることがわかる。また、共鳴周波数付近から離れた周波数では、計算値に比べ実験による吸音率が大きい。これは剛壁条件による数値計算に対し、実験ではダクト自体の振動が存在するものとみられ、本数値解析法については、その有効性が検証できたものと考えられる。

**8. まとめ** スリット型共鳴器の周辺の音場や吸音率の予測における壁面空気粘性および熱伝導散逸を含む数値解析手法の有効性、また、Ingard の円形断面開口音響レジスタンス経験式のスリット開口に対する適用性などを明らかにした。

**参考文献**

[1] J.M.A. Smits and C.W. Kosten, Vol.1, 1951.  
 [2] U. Ingard, JASA, 25(6), 1953.  
 [3] P. Mores and U. Ingard, Theoretical Acoustics, pp290, 1968.