

◎大川真平, 寺尾道仁, 関根秀久, 文珠川潔 (神奈川大)

1. はじめに

壁面換気開口部からの音響透過に関しては、丸断面の非内貼り開口の場合、垂直入射に対する Wilson らの近似解析解および実験[1]、また、大内らによる市販換気開口器具に対する測定[2]がある。それに対し本研究では、散逸要素を含む多様な形状の開口の任意入射角における解析を可能とするため境界要素法の適用を試みる。ここでは、まず、その基本的な妥当性について実験および Wilson らの解析解と比較して確認し、次に様々な入射角に対する開口流路壁面への吸音材内貼りの効果を調べる。

2. 壁面開口の透過損失

図1に示すような半無限空間に開放する単独単純な円形断面の壁面開口について、その一方から平面進行波が到来する場合の透過損失を調べる。ここでは開口から十分遠方(距離  $r_i = 1\text{km}$ )に点音源(点音源振幅  $s_s = 100/4\pi$ , 距離 1m における音圧レベル約 114dB)を配置し、これによる開口付近への到来波は平面波とみなす。開口の透過損失  $R$  の定義は Wilson らに従い、

$$R = 10 \log_{10} P_i / P_t \quad (1)$$

とする。ここで、開口の正面面積を  $S_F$  とし、入射方向(入射角  $\theta_i$ )から見た開口面積  $S_F \cos \theta_i$  を通過する入射波の音響パワーを  $P_i$ 、開口透過波の音響パワーを  $P_t$  としている。すなわち、入射(到来)波の音響パワーは

$$P_i = S_F \cos \theta |s_s|^2 / 2\rho_0 c r_i^2 \quad (2)$$

一方、開口の透過側に流出する音響パワー  $P_t$  は、透過側領域の開口を囲む閉曲面をとり、

これを  $N$  個の要素に分割し、その  $n$  番目の要素の面積を  $S_n$  として

$$P_t = \sum_{n=1}^N I_n S_n \quad (3)$$

により求める。ただし、 $I_n$  は第  $n$  要素のネットインテンシティで複素音圧振幅の共役複素数を  $p_n^*$ 、面垂直方向粒子速度成分の複素振幅を  $u_n$  として

$$I_n = (1/2) \text{Re}(p_n^* u_n) \quad (4)$$

により得られる。なお、入射側音場から開口部に流入する音響パワーを  $P_F$  とすれば、 $P_F$  は  $P_i$  の場合と同様に求められる。このとき

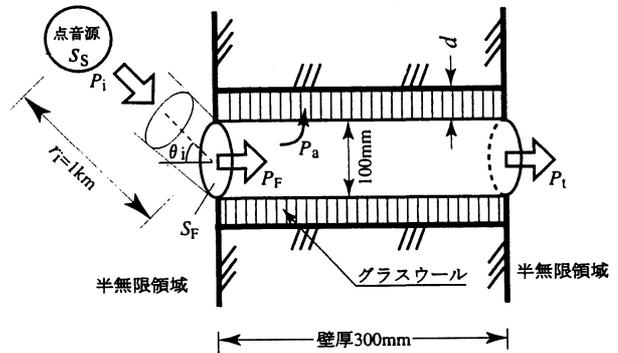


図1 壁面換気開口の音響透過

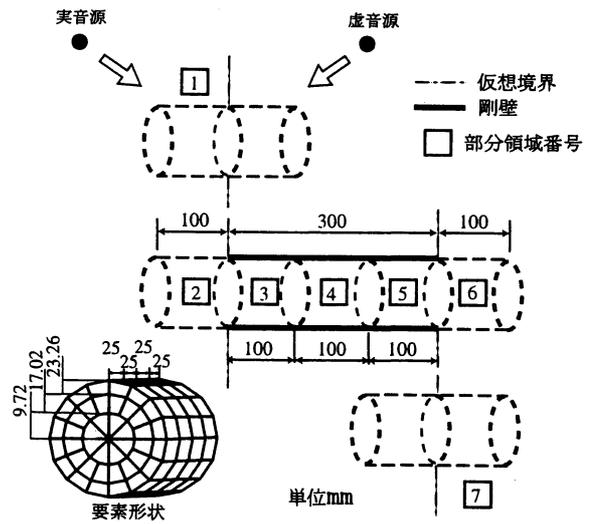


図2 壁面開口の部分領域分割モデル

\*Effect of acoustic liners on sound transmission of wall apertures for ventilation.  
by S. Ohkawa, M. Terao, H. Sekine, K. Monjugawa (Kanagawa University)

$P_s = P_f - P_i$  は開口内で散逸される音響パワーである。

### 3. 開口をもつ無限壁面の挿入損失

ここでは開口をもつ壁面の挿入損失  $D_{IL}$  は、壁面がないときの開口位置における到来波の音圧レベル

$$L_{p,i} = 10 \log \{ (p_i / \sqrt{2})^2 / p_0^2 \}$$

(5)

と開口付き壁面があるときの透過音のパワーレベル

$$L_{w,t} = 10 \log (P_t / P_0) \quad (6)$$

との差で定義する(その意味は後述)。すなわち、開口をもつ壁面の挿入損失  $D_{IL}$  は

$$D_{IL} = L_{p,i} - L_{w,t} \quad (7)$$

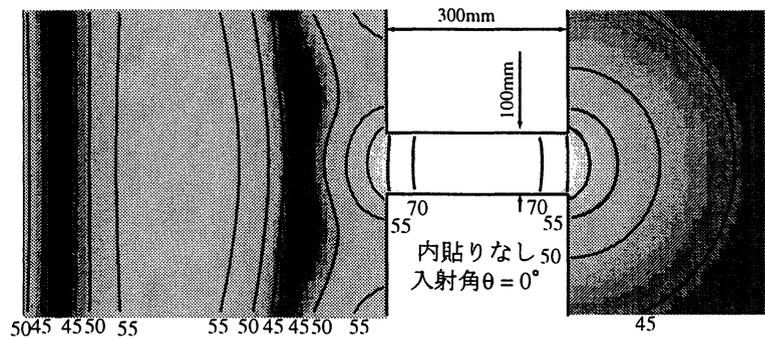
とする。ただし、 $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$  および  $P_0 = 10^{-12} \text{W}$  は、それぞれ音圧およびパワーレベルの基準値である。なお、この  $D_{IL}$  と Wilson らの定義による透過損失  $R$  とは

$$D_{IL} = R - 10 \log (S_F \cos \theta) \quad (8)$$

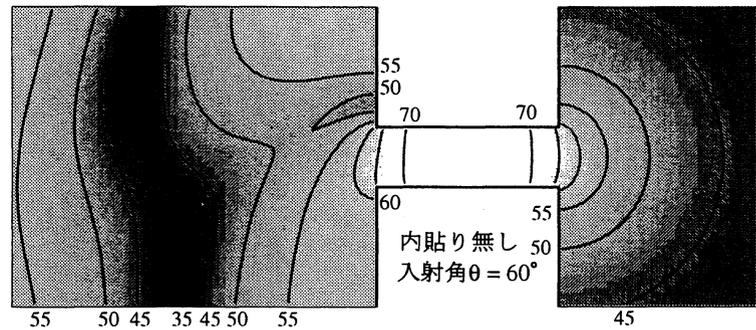
により関係づけられる。

### 4. 数値解析方法

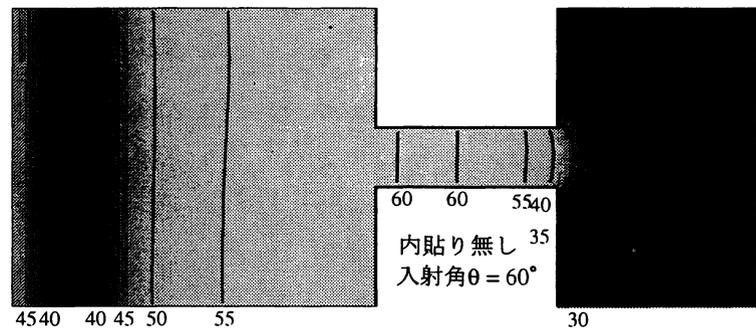
式(4)の音圧と粒子速度は境界要素解析により求めた。その部分領域分割を図2に示す。ここで外界にたいする領域1と領域7は、鏡像関係による無限剛壁面自由度の省略手法[3]をとっている。すなわち、領域2および領域2を剛壁面に対して反転させた領域の外部を仮



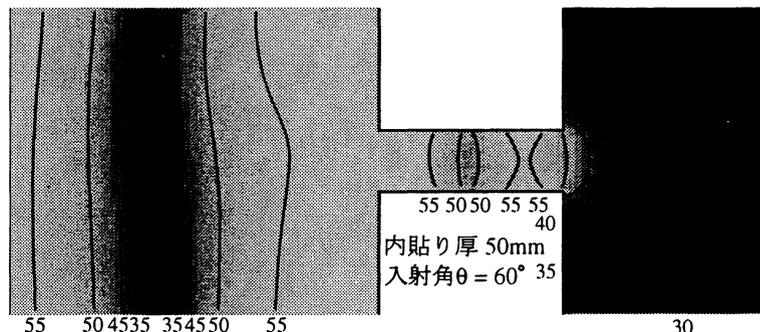
(a) 非内貼り開口 (垂直入射, 460Hz)



(b) 非内貼り開口 (入射角60°, 460Hz)



(c) 非内貼り開口 (入射角60°, 340Hz)



(d) 内貼り開口 (入射角60°, 460Hz)

図3 壁面開口付近の音圧分布 [dB]

想的に一つの領域として扱う。これにより剛壁に対して対称な音場が形成され、剛壁条件(法線方向粒子速度が0)が達成される。領域7についても同様である。領域2と領域6は、領域1と領域7に厚みをもたせ、構成方程式の特異化を避ける目的で付け加えたものである。境界面素は一定要素、その最大寸法は25mm(検討対象上限周波数1kHzの波長の約1/12)とした。

内貼り吸音材料は密度約 $32\text{kg/m}^3$ のグラスウール(単位厚の比流動抵抗を $\sigma = 8500\text{Pa}\cdot\text{s/m}^2$ )を想定してDelanyらの経験式による特性を用い、現象的把握を単純化するため局所作用モデルとした。また、非内貼り開口剛壁における音響境界層散逸は無視した。

## 5. 数値解析結果

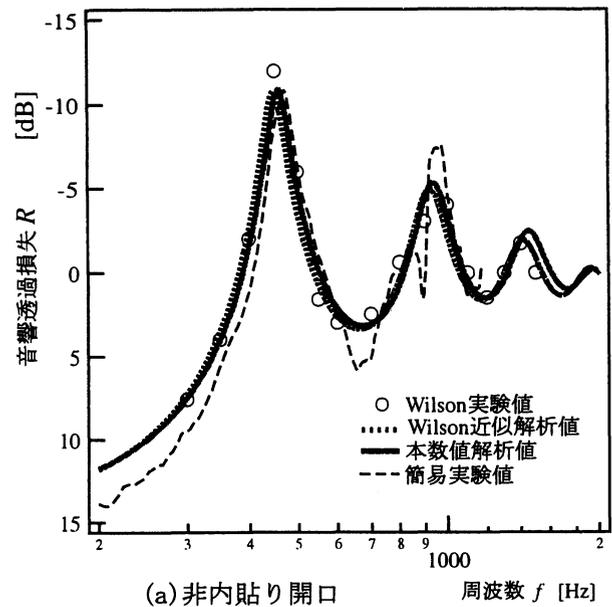
### 5.1 開口部付近の音圧分布

図3に数値解析による開口部付近の音圧分布の例を示す。平面到来波にたいし、透過波、また、開口部から音源側への放射波ともに球面波状であることが確認される。

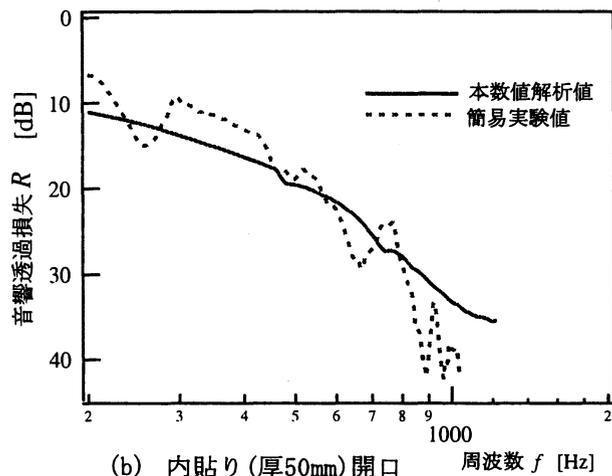
### 5.2 数値解析と実験値等との比較

とくに吸音材を含む数値解析の信頼性に関して、簡易無響室内において垂直入射の場合のみ簡単な実験を行った。図4(a)に非内貼り開口(流路内壁が剛壁)の垂直入射時の透過損失について、本数値解析値をWilsonらの実験値と近似解析解および簡易実験値を比較して示す。それぞれに誤差要因をもつが、今回の数値解析が検討対象とした1kHz程度以下の周波数領域については概ね良好な一致を示している。

図4(b)は内貼り開口の垂直入射の透過損失について、数値解析と簡易実験値を比較したものである。数値解析においては吸音材料のモデル化と特性量(この場合のみ吸音材サンプルによるチューブ法測定)に関する誤差要因がある。また、実験においては平



(a) 非内貼り開口



(b) 内貼り(厚50mm)開口

図4 実験と数値解析の比較  
(垂直入射時の音響透過損失)

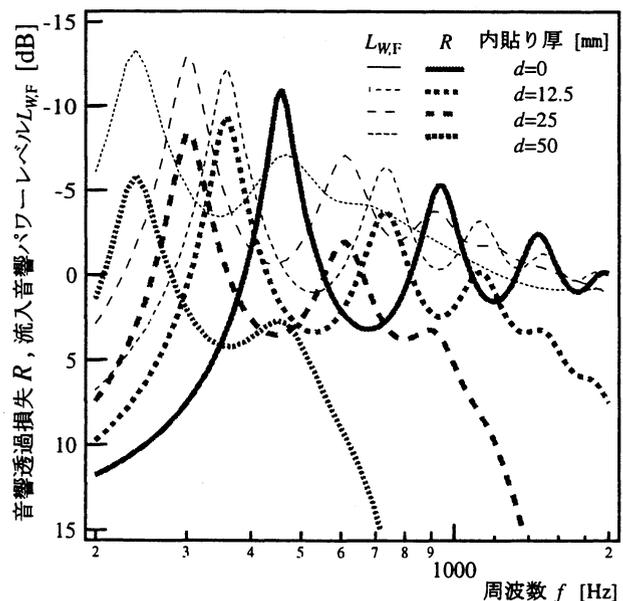


図5 内張り開口の音響透過と散逸(垂直入射時)

面波入射条件や壁体遮音の達成不備などによる誤差要因がある。それらを考慮すれば、吸音材料を含む場合についても、本数値解析手法の基本的有効性について確認できたものと判断される。

### 5.3 内貼りの散逸効果

図5は垂直入射時における開口流路への内貼りの透過損失に与える効果を調べた数値解析結果である。ここで、

$$L_{w,r} = 10 \log P_r / P_i \quad (9)$$

は開口入口の流入パワー  $P_r$  と到来波パワー  $P_i$  とのレベル差である。 $L_{w,r} - R$  は開口流路内の音響散逸パワー  $P_s = P_r - P_i$  に対応する。 $L_{w,r} - R$  は内貼り厚の増加につれて増加するが、同時に  $R$  の共鳴(筒抜け)周波数も急速な低下傾向を示す。内貼りダクトとしての減衰のピーク(透過損失のピーク要因)は 1kHz 以上(50mm 厚内貼りの場合約 2kHz)の範囲にあり、また、開管の共鳴周波数とすれば異常に大きな開口端補正になるなど、この現象は簡単には説明できないため、今後の検討課題としたい。

### 5.4 斜め入射の挿入損失

図6に斜め入射時の無限剛壁開口の遮音特性を式(7)による挿入損失  $D_{IL}$  により示す。この定義によれば、開口をもつ無限剛壁の挿入損失は高周波数域を除き入射角に依存しないことがわかる。これは開口入射面に働く駆動圧力  $2p_i$  が、低周波数域では位相を含め入射角によらず一様とみなし得ることによるものと考えられる。

### 6. 透過音の音圧レベルの簡易予測

式(7)の定義による挿入損失  $D_{IL}$  を用いれば、5.1 に述べた透過音が球面波である性質を考慮して透過側空間の音圧レベルは簡単に予測できる。とくにそれが半自由空間の場合には、開口からの距離約 40cm の点の音圧レベル  $L_{p,40cm}$  が  $L_{w,t}$  と数値的に等しいことを考慮すれば、 $L_{p,40cm}$  は式(7)、

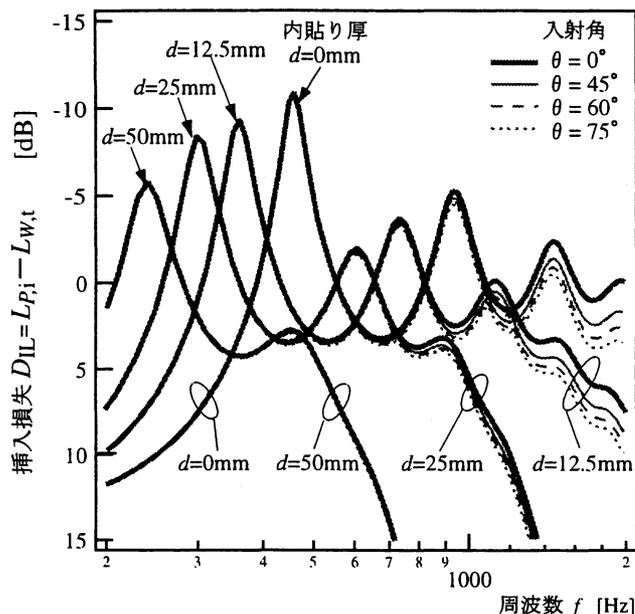


図6 内張り開口の挿入損失

すなわち、

$$L_{p,40cm} = L_{w,t} = L_{p,i} - D_{IL} \quad (10)$$

により所与の到来波音圧レベル  $L_{p,i}$  から直接的に求められ、これと異なる距離の音圧レベルも容易に予測される。

### 7. まとめ

壁面開口部音響透過の部分領域化境界要素解析手法の基本的有効性について、非内貼り開口に対しては Wilson らの解析解と実験値、内貼り開口に対しては簡易的実験値と比較して確認した。また、開口流路内壁への吸音内貼りの共鳴透過周波数に与える影響は極めて大きいこと、開口をもつ壁面の挿入損失の入射角による変化は少ないことなどを示した。

### 参考文献

- [1] G. P. Wilson and W. Soroka, Journal of the Acoustical Society of America, Vol.37, pp286-297, 1965.
- [2] 大内孝子, 松井昌幸, 小型換気装置の遮音性能に関する研究, 日本騒音制御工学会講演論文集, pp173-176, 1994.
- [3] 寺尾, 関根, 境界要素法の部分構造化による薄板および吸音材料を含む通気ダクト内音場解析, 日本計算数理工学会, 境界要素法論文集, 第4巻, pp179-184, 1987.