

○関根秀久, 寺尾道仁(神奈川大・工)

1. はじめに

最近、外気冷房やペリメータレス空調などを目的として、二重グレージングに通気制御機能を加えた通気機能付二重グレージング型の窓システムやカーテンウォールが開発されている。そのような窓システムでは、隙間による遮音性能の劣化が懸念されるが、その程度や性質については不明なところが多い。そこで基本的な2次元の通気機能付二重窓システムの遮音性能について境界要素法数値解析により調べる。

2. 数値解析方法

2.1 解析対象 図1に解析を行った2次元のガラス窓型式を示す。厚さ200mmの無限剛壁内に高さ2mのガラス窓が嵌め込まれる場合を想定した。板ガラスは厚さ5mm、面密度12.1kg/m²一定とした。窓上部と下部の隙間(スリット型開口)の幅をそれぞれ b_H および b_L として $b_L = b_H = 0, 1, 5, 10\text{mm}$ と変化させた。気密、すなわち、 $b_L = b_H = 0$ の場合は、無限大の単層壁および二重壁の理論値との比較により、本解析の有効性のチェックを目的とした。

通気機能付二重ガラス窓は、(ii) 外気取入型、すなわち、通気開口を屋外側板ガラスの下部と室内側板ガラスの上部に設置した場合と(iii) ガラス面冷却型、すなわち、通気開口を屋外側板ガラスの上下部に設けた場合の2種類とした。入射波は屋外側ガラス面から十分遠方の点音源(距離 $r = 1\text{km}$ 、点音源振幅 $S = 100\text{Pa}$)により励起した。

二重窓については、ガラス窓枠への吸音材の挿入効果も調べた。その場合、吸音材はグラスウール、厚さ50mm、密度32kg/m³とした。

2.2 部分領域化境界要素モデル

図2に通気機能付二重ガラス窓の2次元境界

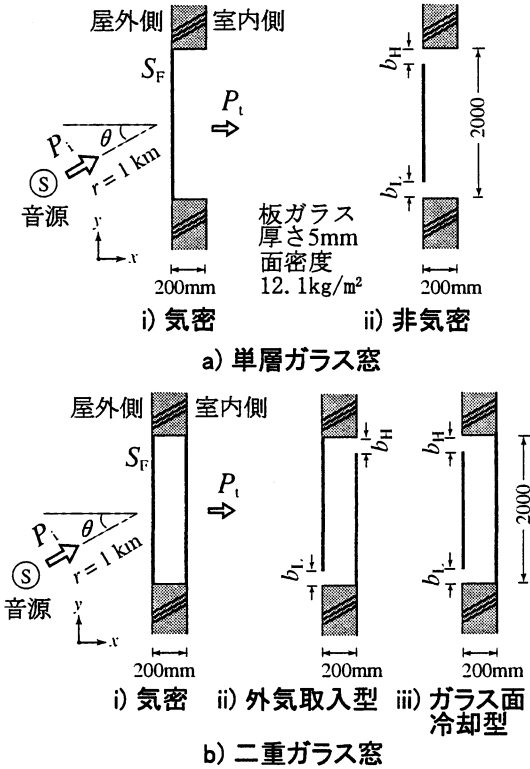


図1 解析対象としたガラス窓型式

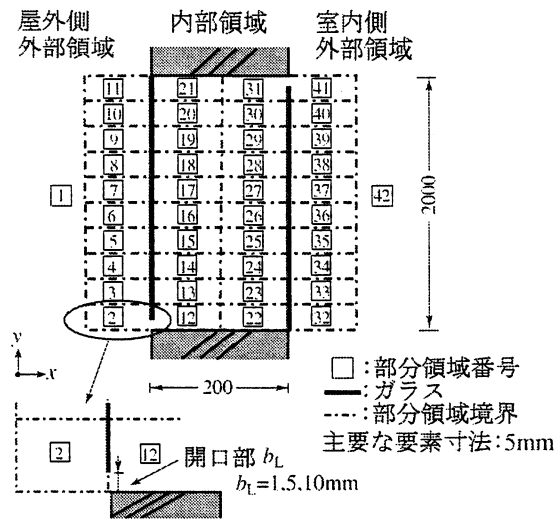


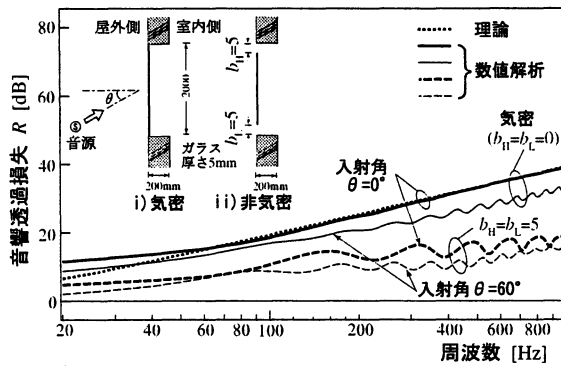
図2 通気機能付二重ガラス窓の2D-BEMモデル

要素法(2D-BEM)モデルを示す。42の部分領域に分割し、境界要素の寸法は5mmとした。

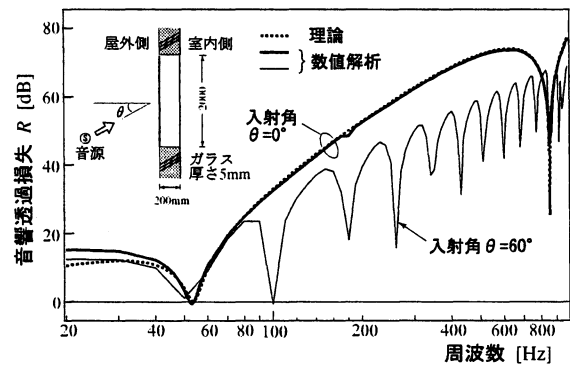
無限大の壁面は、鏡像を考慮したGreen関数の採用により達成した。解析周波数は20~1,000Hz

* Numerical analyses on sound insulation of double-glazed windows with ventilation gaps.

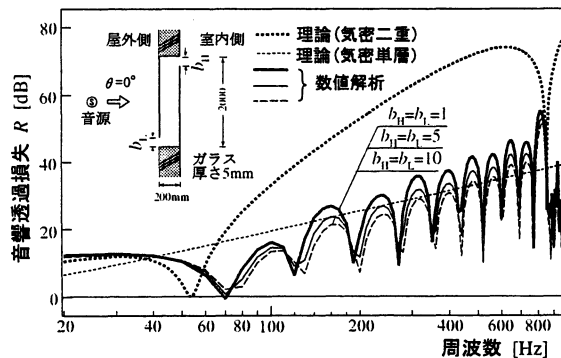
By Hidehisa Sekine and Michihito Terao (Kanagawa university)



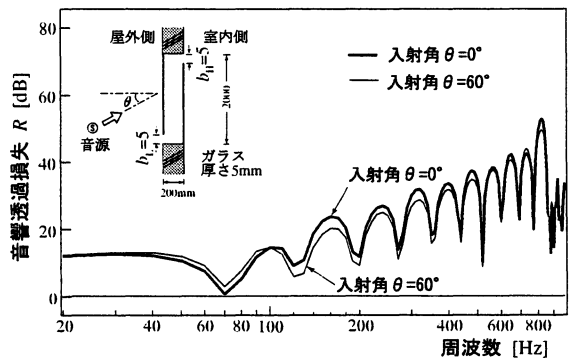
(a) 単層ガラス窓



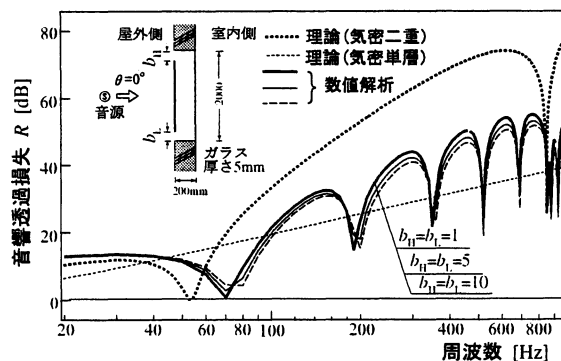
(b) 気密二重ガラス窓



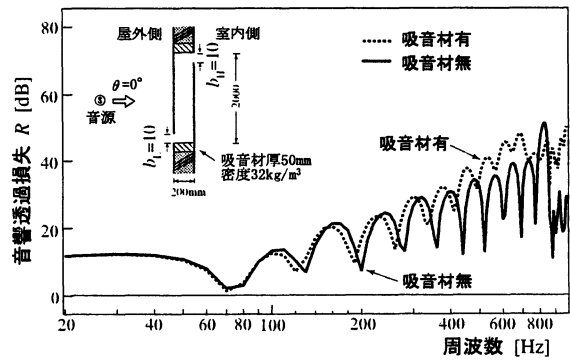
(c) 外気取入型二重ガラス窓



(d) 入射角の依存性（外気取入型の場合）



(e) ガラス面冷却型二重ガラス窓



(f) 吸音材の挿入効果（外気取入型の場合）

図3 各ガラス窓型式の音響透過損失の比較

の範囲で10Hz刻みとした。

板ガラスについては、ここでは曲げ剛性を無視し質量効果のみ考慮した。すなわち、面密度 m の板ガラス要素については、その法線方向速度 v とその要素を挟んだ両領域の音圧差を Δp として、 $\Delta p = -j\omega m v$ の条件を課した。[1]。

2.3 ガラス窓の音響透過損失

音響透過損失 R は

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

の定義により結果を表示した。ここで、入射角を θ 、ガラス窓の面積を S_f として、 P_i は $S_f \cos \theta$

に到来する入射波の音響パワー、また、 P_t は透過波の音響パワーである。

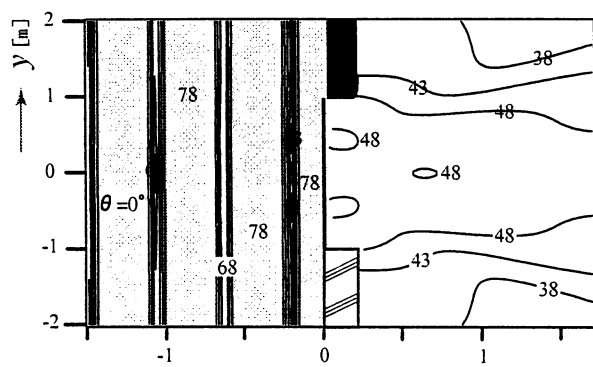
3. 数値解析結果

3.1 音響透過損失

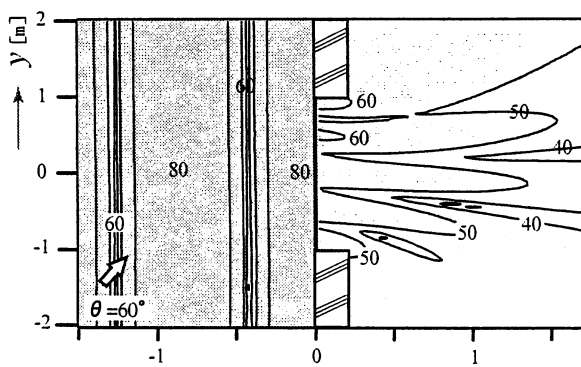
図3(a)～(f)に音響透過損失の数値解析結果例を示す。

a) 数値解析値の有効性

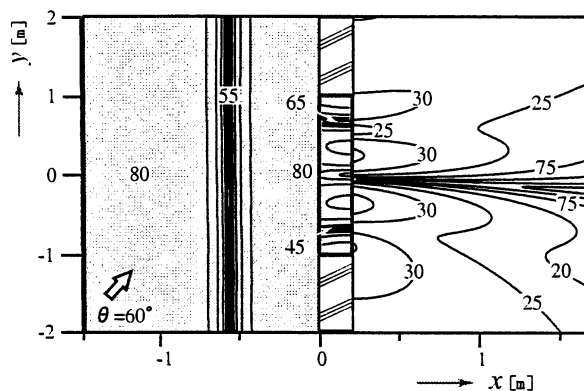
図3(a)および(b)に示すように、単層ガラス窓、二重ガラス窓ともに、気密で垂直入射音 ($\theta = 0^\circ$) の場合、約 50Hz 以下の低周波数域を除けば、数値解析値は理論値によく一致する。



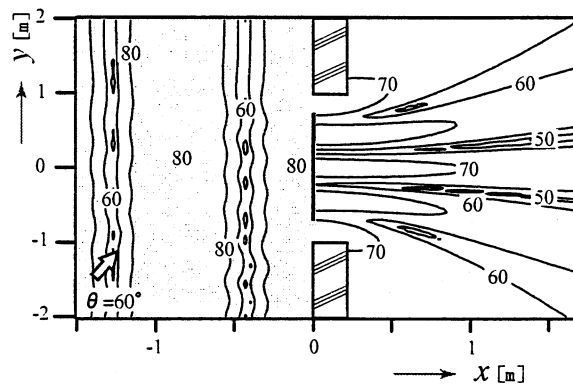
(a) 気密単層ガラス窓
(周波数400Hz, $\theta=0^\circ$, $b_H=b_L=0$ mm)



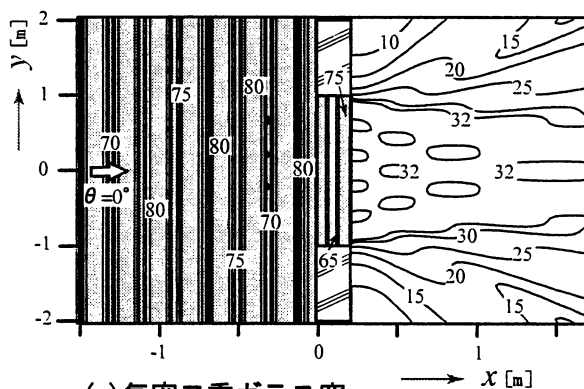
(b) 気密単層ガラス窓
(周波数400Hz, $\theta=60^\circ$, $b_H=b_L=0$ mm)



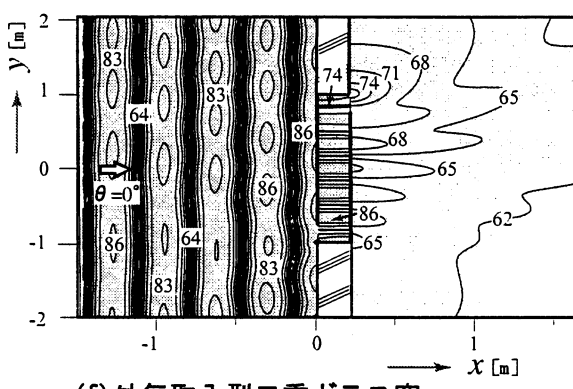
(c) 気密二重ガラス窓
(周波数300Hz, $\theta=60^\circ$, $b_H=b_L=0$ mm)



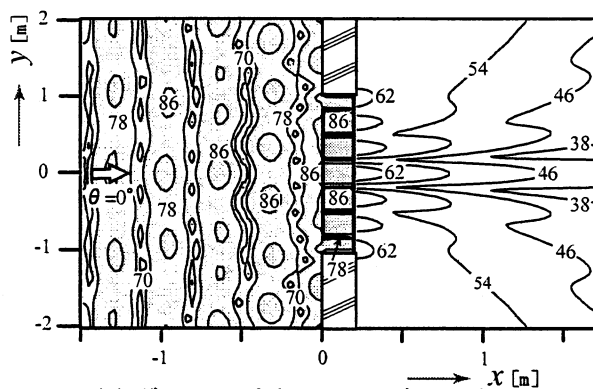
(d) 非気密単層ガラス窓
(周波数400Hz, $\theta=60^\circ$, $b_H=b_L=5$ mm)



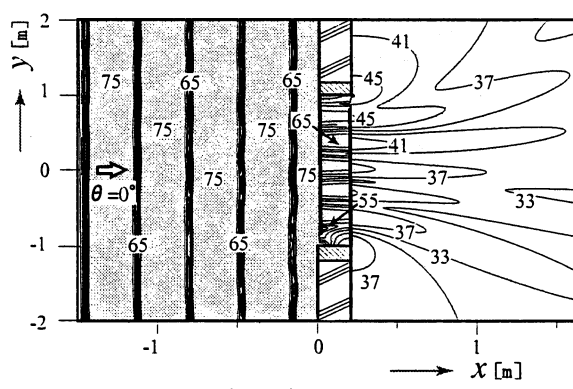
(e) 気密二重ガラス窓
(周波数850Hz, $\theta=0^\circ$, $b_H=b_L=0$ mm)



(f) 外気取入型二重ガラス窓
(周波数520Hz, $\theta=0^\circ$, $b_H=b_L=10$ mm)



(g) ガラス面冷却型二重ガラス窓
(周波数520Hz, $\theta=0^\circ$, $b_H=b_L=10$ mm)



(h) 吸音材の挿入効果(外気取入型の場合)
(周波数520Hz, $\theta=0^\circ$, $b_H=b_L=10$ mm)

図4 ガラス窓周辺の音圧分布[dB]

この低周波数域の数 dB の違いは、数値解析が 2m の板ガラスであるのに対し、理論値[2]は無限大のそれであることによる。これを考慮すれば本数値解析の有効性が確認されたものと考えられる。

b) ガラス窓型式による遮音性能の違い

図3(a)と(b)には、入射角が $\theta=0^\circ$ と $\theta=60^\circ$ の場合を比較して示す。単層ガラス窓の場合、図3(a)にみられるように、まず、気密のときは、約 200Hz 以上において、無限大板ガラスの入射角 $\theta=0^\circ$ に比較した音響透過損失の理論的低減値 $20\log_{10}(\cos 60^\circ)=-6\text{dB}$ が適用できることがわかる。200Hz 以下になると、入射角による違いは1~2dB 程度と少なくなる。一方、隙間(5mm)がある場合には、とくに約 300Hz 以上の周波数で遮音劣化が大きい。単層ガラス窓の場合、気密の場合に比べ隙間があると音響透過損失の入射角依存性が小さくなる傾向がみられる。

二重ガラス窓の音響透過損失は、まず、気密のときは、図3(b)にみられるように、斜入射 $\theta=60^\circ$ の場合、 $\theta=0^\circ$ に対し、約 100Hz 以上の周波数域で甚だしく減少し、とくに窓高さ方向の気柱共鳴(後述)による遮音の落込みが大きくなる。

一方、隙間(5mm)がある場合には、図3(c)、(e)に示すように、垂直入射においても窓高さ方向の気柱共鳴が発生し、気密の二重ガラス窓に比べて音響透過損失が激減する。この共鳴によるディップ部は、気密単層ガラス窓よりも劣化する恐れがある。なお、外気取入型、ガラス面冷却型とも、隙間寸法 $b_L=b_H=1, 5, 10\text{mm}$ の違いによる音響透過損失の変化は小さく 5dB 程度以下である。図3(d)は外気取入型について、入射角の影響をみたものである。入射角による違いは数 dB 程度で僅かである。図3(f)は二重ガラス窓枠への吸音材挿入効果を調べた結果を示す。吸音材挿入は、約 500Hz 以上の周波数域で音響透過損失の増加がみられるものの、それより低周波数域では大きな効果は期待できない。

3.2 ガラス窓周辺の音圧分布

図4(a)~(h)に各ガラス窓型式の特徴的な音圧分布を示す。図4(a)と(e)は、垂直入射の場合で、透過側音場の窓面近傍高さ方向の音圧変化が小さい例である。図4(e)の気密二重ガラス窓では、二重ガラス内空間にガラス面に垂直方向の気柱共鳴が発生している。これが、図3(b)の 850Hz の遮音劣化の原因である。

一方、図4(b),(c),(d)は斜入射の場合の音場をみたものである。図4(b)の気密単層ガラス窓の場合、窓の大きさが 2m と比較的大きいにもかかわらず、無限大壁面に関する音響透過理論における壁面透過側音圧分布形、すなわち、窓高さ方向の音圧一様の前提が成立していない。図4(d)の非気密単層ガラス窓では上下の開口部からの干渉で複雑な分布となり図4(a)に比べ遮音も低下している。図4(c)、(d)の透過側音場は、斜入射にもかかわらずガラス窓高さ方向にほぼ対称である。これは、そのような場合 $\cos\theta$ による遮音低減法則が成立しないことを意味する。

図4(c)、(f)、(g)は、二重ガラス窓内空間において、ガラス窓高さ方向の強い気柱共鳴が生じている。これは、図3の二重ガラス窓の音響透過損失に現れるピークディップの原因である。図4(f)に示す外気取入型では、屋外側通気開口 b_L から二重ガラス内空間に音が浸入し、室内側開口部 b_H からの透過音圧が大きくなっている。

図4(h)は吸音材を挿入した場合である。図4(f)に比べて二重ガラス内空間の共鳴は弱くなっている。

4. まとめ 2次元境界要素音場解析により、通気機能付二重ガラス窓の遮音性能を調べ、このタイプの遮音性能は単層ガラス窓のそれよりも劣化する場合があること、二重ガラス窓枠への吸音材挿入効果は、数百 Hz 以下の周波数域では大きな効果が期待できないことなどを明らかにした。

参考文献

- [1] 寺尾ほか、日本計算数理工学会境界要素法論文集、1986。
- [2] 前川ほか、建築・環境音響学第2版、p111、2000。