

開放窓を経由する側路伝搬音予測図表と実験的検証



土屋 裕造*1

福山 忠雄*1

河井 康人*2

概 要

隣接する室間の遮音値は、それぞれの室の外部に面した窓を経由して伝搬する側路音によってしばしば影響を受ける。このような側路音の伝搬を予測することは、建築物の隣室間の遮音を考える上で必要と考えられる。本報告では、まず、境界積分方程式を用いた3次元側路伝搬音の距離減衰予測図表を示す。次に、この予測図表を検証するために行った1/10縮尺模型実験について示す。結果として、以下の知見が得られた。

1. 減衰予測図表は、模型実験とかなり一致し、建物の開口間側路音の伝搬性状予測などに有効であることが確認された。
2. 音源室の拡散状態等が解析モデルの条件と異なってくる場合、本予測図表と異なる伝搬性状になることがわかった。

A CHART ON THE DISTANCE ATTENUATION OF FLANKING SOUND PASSING THROUGH OPEN WINDOWS PLACED IN THE EXTERIOR WALL OF NEIGHBORING ROOMS, AND ITS EXPERIMENTAL VERIFICATION

Yuzo TSUCHIYA *1

Tadao FUKUYAMA *1

Yasuhito KWAI*2

The value of sound to shut out between the room which adjoins it often takes an influence by the side way sound which transmit through the window which faced the outside of each room. Transmission of such side way sound is predicted after it thinks about sound to shut out between the next rooms of the building, and it can think that transmission of such side way sound is predicted with the necessity. A distance decline prediction chart on the three-dimensional side way transmission sound which a boundary integral equation was used for first is shown by this report. Next, it is shown about the 1/10 scale model experiment which went to verify this prediction chart. The following knowledge could get it as a result.

1. A decline prediction chart was, the model experiment, and a decline prediction chart corresponded, and confirmed that it was effective in transmission nature prediction of the side way sound and so on between open windows of the building.
2. It was found out that it became transmission nature which was different from this prediction chart when the diffusion condition of the sound source room and so on was different from the condition of the analytic model.

*1 技術研究所 *2 関西大学工学部 建築学科 助教授・工博

*1 Technical Research Institute *2 Assoc.Prof., of Architecture Faculty of Eng., Kansai Univ., Dr. Eng.

開放窓を経由する側路伝搬音予測図表と実験的検証

土屋 裕造*1
 福山 忠雄*1
 河井 康人*2

1. はじめに

隣接する室間の遮音値は、それぞれの室の外部に面した窓を経由して伝搬する側路音によってしばしば影響を受ける。とりわけ、窓を開放することが多い夏季には、側路音が間仕切りや界壁からの透過音よりも卓越することも考えられる。このような側路音の伝搬を予測することは、建築物の隣室間の遮音を考える上で必要であろう。筆者らは既に、2次元音場において、境界積分方程式を用いて側路伝搬音の距離減衰を予測する図表を発表したが¹⁾、実用上は3次元における予測がより重要である。本報告では、まず、別報²⁾に示した境界積分方程式を用いた3次元側路伝搬音の解法を改めて示し、これによる距離減衰予測図表を表示する。次に、この予測図表を検証するために行った1/10縮尺模型実験について示す。

2. 理論

2.1 解析モデル

解析法は基本解が異なることを除けば2次元の場合と同様であるが、以下で簡単に述べる。図-1の如く、無指向性点音源が純音を放射している音源室 Ω_1 及び受信室 Ω_2 が隣接しており、また、それぞれの室の外壁面 S_1, S_2 に開口 A_1, A_2 があり、音源室側の開口 A_1 から放射された音波が外部空間 Ω_0 を伝搬して受信室側開口 A_2 に入射する場合の音場を考える。音源室側開口への入射音を単純なものとするため、音源室は数値計算上半無限空間と

し、直接音のみが開口 A_1 へ入射するものとした。また、受信室も外部から侵入した音波が内壁で反射した後、開口から再放射される部分を除去するため、同様に半無限空間として計算した(図-1では、両室とも1/4無限空間として描かれているが、それぞれの室内から間仕切り壁を見たとき、その表面は完全な吸音面とみなすことになる)。このようにすれば、音源室側開口から放射されるエネルギーと受信室側開口に入射するエネルギーを求めることにより、開放窓間の側路伝搬音そのものを正確に見積ることができるであろう。なお、外壁面の厚みは無視している。

2.2 理論式

側路音が伝搬する半無限空間 Ω_0 に Green の公式を適用する。時間項は $\exp(-i\omega t)$ を用い、また、基本解には鏡像を考慮した Green 関数

$$G(P, Q) = \frac{\exp(ikr)}{4\pi r} + \frac{\exp(ikr_i)}{4\pi r_i} \quad (1)$$

を用いる。ただし、 $r = |r - r_i|$ で P は面 S_1, S_2, A_1, A_2 に対する P の鏡像を表す(図-2参照)。 S_1, S_2 上で粒子速度成分が0、また、 S_1, S_2, A_1, A_2 上で $\partial G / \partial n = 0$ を考慮すれば、 P 点の速度ポテンシャルとして

$$\Phi(P) = - \int_{A_1 + A_2} \frac{\partial \Phi(Q)}{\partial n} G(P, Q) dS_Q \quad (2)$$

$(P \in \Omega_0, A_1, A_2, S_1, S_2)$

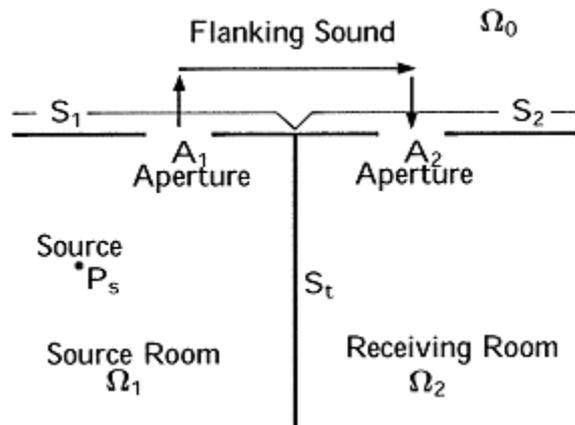


図-1 開放窓を経由する側路伝搬音 解析モデル図

*1 技術研究所 *2 関西大学工学部 建築学科 助教授・工博

(2)は、点Pが境界面 A_1, A_2 上にあるときには、 A_1, A_2 上の粒子速度 $\partial\Phi/\partial n$ を未知関数とする境界積分方程式である。

一方、 Ω_1 (数値計算上は半無限空間)に対しては、法線を外向きにとり、基本解として、(1)と同様に鏡像を考慮し、また、音源が存在することを考慮して

$$\begin{aligned} \Phi(P) &= \Phi_D(P) + \Phi_D(P_i) \\ &+ \int_{A_1} \frac{\partial\Phi(Q)}{\partial n} G(P, Q) dS_Q \quad (3) \\ &(P \in \Omega_1, A_1, S_1) \end{aligned}$$

を得る。(2)式の場合と同様に、 P_i は Ω_1 内の点Pの面 S_1, A_1 に対する鏡像である。

なお、 $P \in A_1, S_1$ のときには $\Phi_D(P_i) = \Phi_D(P)$ となる。

領域 Ω_2 (数値計算上は半無限空間)に対しても法線を外向きにとり、音源がないことを考慮すると、

$$\begin{aligned} \Phi(P) &= \int_{A_2} \frac{\partial\Phi(Q)}{\partial n} G(P, Q) dS_Q \quad (4) \\ &(P \in \Omega_2, A_2, S_2) \end{aligned}$$

を得る。

ここで、 $P \in A_1$ の場合、境界積分方程式(2)と(3)の差

をとれば、

$$\begin{aligned} &\frac{1}{\pi} \int_{A_1} \frac{\partial\Phi(Q)}{\partial n} \frac{\exp(ikr)}{r} dS \\ &+ \frac{1}{2\pi} \int_{A_2} \frac{\partial\Phi(Q)}{\partial n} \frac{\exp(ikr)}{r} dS_Q \quad (5) \\ &= -2\Phi_D(P) \quad (P \in A_1) \end{aligned}$$

となる。また、 $P \in A_2$ の場合、(2)と(4)の差をとれば

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2\pi} \int_{A_1} \frac{\partial\Phi(Q)}{\partial n} \frac{\exp(ikr)}{r} dS \\ &+ \frac{1}{\pi} \int_{A_2} \frac{\partial\Phi(Q)}{\partial n} \frac{\exp(ikr)}{r} dS_Q \quad (6) \\ &= 0 \quad (P \in A_2) \end{aligned}$$

を得る。境界積分方程式(5)と(6)を連立させることにより A_1, A_2 上の $\partial\Phi/\partial n$ が求められ、また、任意の点の Φ は(2),(3),(4)式に代入することにより求めることができる。開口 A_1 から放射されるエネルギー I_1 及び A_2 から侵入するエネルギー I_2 は、求まった $\partial\Phi/\partial n$ を(2)に代入して、面 A_1, A_2 上のポテンシャル Φ を求め、音圧 p 、及び粒子速度の法線方向成分 v との関係

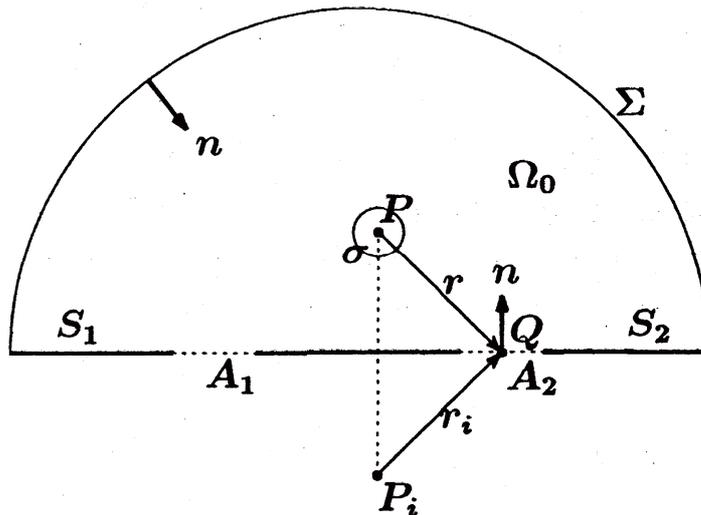


図-2 開放窓を経由する側路伝搬音 概念図

$$\begin{cases} p = -i\omega\rho\Phi \\ v = -\frac{\partial\Phi}{\partial n} \end{cases} \quad (7)$$

を用いて

$$I_1 = \int_{A_1} \frac{1}{2} (pv^* + p^*v) dS \quad (8)$$

$$I_2 = \int_{A_2} \frac{1}{2} (pv^* + p^*v) dS \quad (9)$$

により求められる³⁾。ただし、 p^* 、 v^* は、 p 、 v の共役複素数である。側路伝搬音の距離減衰量は

$$TR = 10 \log_{10} \frac{I_2}{I_1} \quad (10)$$

として求めることができる。

騒音対策においては、通常、音源室の窓にオクターブバ

ンドノイズが乱入射する場合に対する側路伝搬音の減衰量を知ることが要求されるであろう。数値計算においては、このオクターブバンドノイズの乱入射条件をシミュレートするため、入射音は平面波とし、立体角でほぼ均等になるように 825 の入射条件を考慮した。また、オクターブは1/6オクターブに分割し、それらの中心周波数で計算を行った。これら全ての条件における A_1 からの放射エネルギーの総和と A_2 への入射エネルギーの総和の比をとって減衰値を求めた。

2.3 減衰予測図表

図-3は、このようにして求めた減衰量を窓中心間距離を変化させてグラフにしたものである。音源側、受信側窓間の距離が離れるに従い、倍距離当り概ね 6dB の減衰が生じている。なお、側路伝搬音の距離減衰量は、窓の面積にはあまり影響されないことが数値計算の結果わかった。また、開口面積が双方で異なる場合には、面積比で補正を行うことで対応できる。

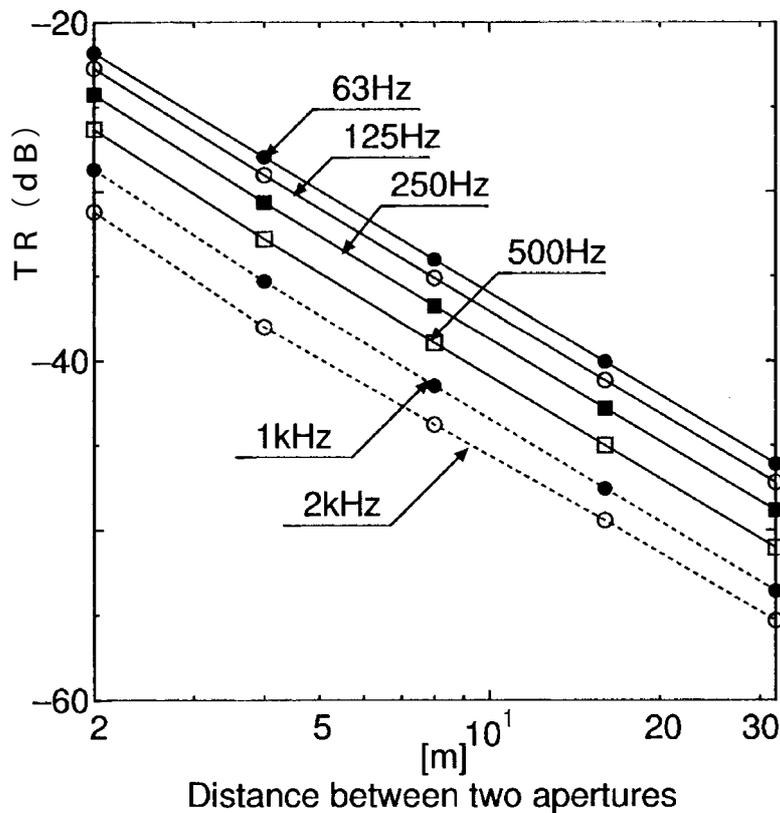


図-3 距離減衰予測図表

3. 実験的検証

3.1 実験方法

1) 実験装置

実験室は、比重の異なる3層の平板型吸音材で囲われている室で行なった。この室の1/3オクターブ周波数帯域における逆自乗則の測定結果をオクターブとびに実物換算で図-4に示したが、逆自乗則をほぼ満足しており、実験は、このエリアで実施した。図-5に模型の概要を示すが、模型は1/10縮尺とし、試験体は、透明塩化ビニル板厚10mmで製作した箱を2体作り、それぞれに開口を設けた。開口の条件は、高さ方向で箱の中心とし、開口高を200mmに統一し、開口幅は200,300,400mmの3種類に変化させた。また、開口の中心間距離は表-1に示すとおりで

ある。音源室・受音室は振動的に絶縁し、開口のある外壁面には、室自体の壁寸法よりできるだけ大きい面を取り付けた。距離減衰に関する実験では、音源室を固定し、受音室を移動して、両者の間に介材を付加した。

2) 音場の調整

実験は、音源室・受音室共、前項の解析モデルにできるだけ近い条件で行った。室内は、音場が均一に拡散し、居室に近い残響時間となるよう音響調整した。天井にプラ

表-1 両開口の中心間距離 [模型スケール]

開口幅 [mm]	開口中心間距離 [mm]			
	最近接	2倍	3倍	4倍
200	300	600	900	1200
300	400	800	1200	1600
400	500	1000	1500	-

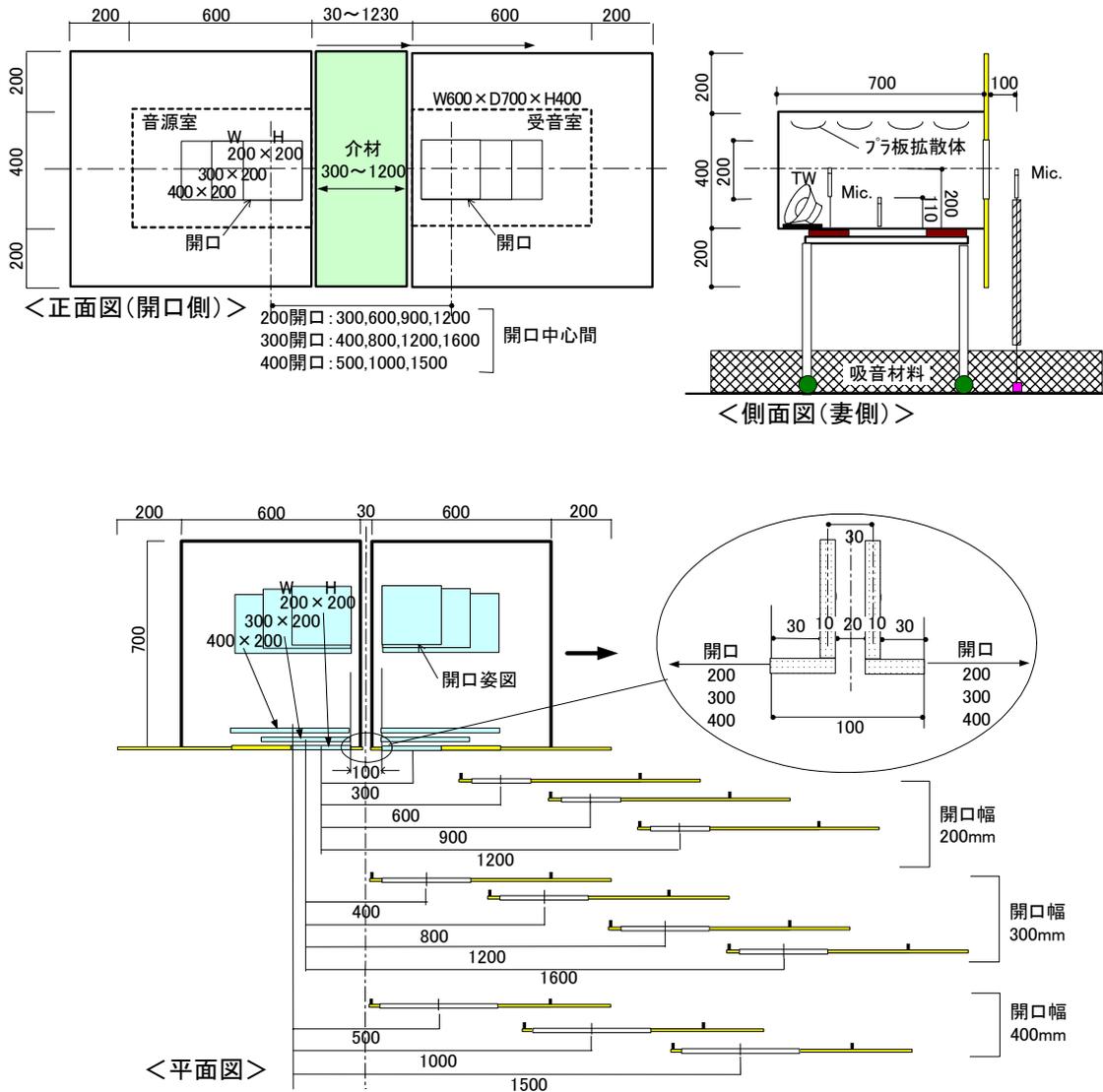


図-5 模型の概要図

スチック拡散板設置のみの状態で、開口からの放射音の放射指向特性を測定したところ、放射特性に偏りがみられたので、解析モデルにより近づけるため、開口側を除く壁3面に木の円柱を設置して調整した。この変化の比較を図-6に示す。また残響時間の調整は、木柱の一部を発泡ポリスチレン柱とすることなどによった。各条件での残響時間を図-7に示す。調整後の音源室内の音圧レベル

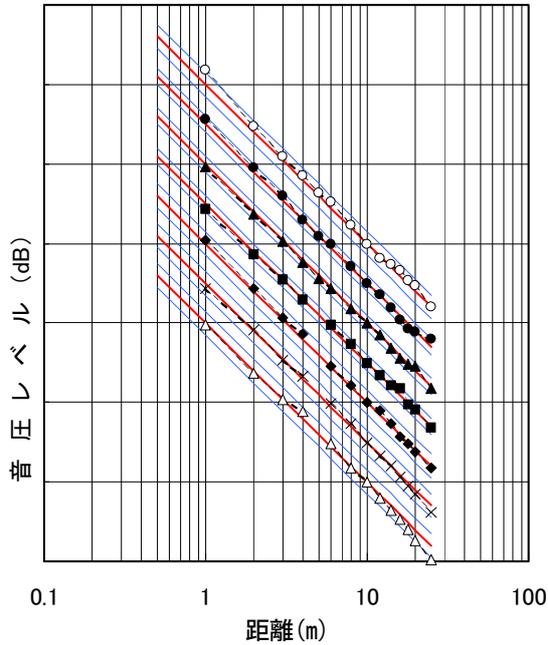
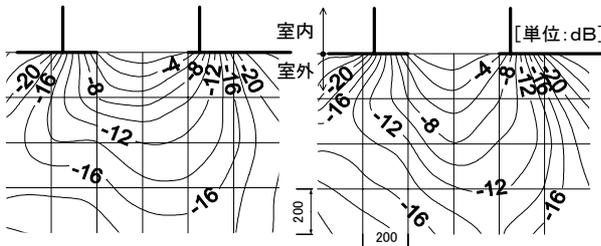
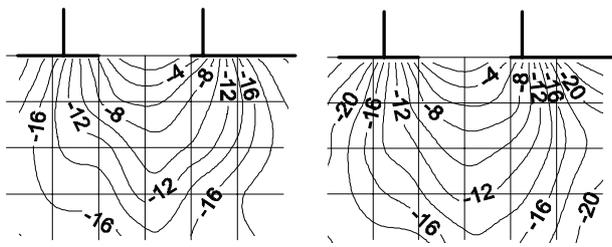


図-4 簡易無響室の逆自乗則測定例
 <実物換算：1/3オクターブバンド>



i) 500Hz ii) 2kHz
 ①：天井プラスチック拡散体のみ



i) 500Hz ii) 2kHz
 ②：①+壁3面木柱拡散体

図-6 音源室拡散条件による放射指向特性の比較
 <400開口、実物換算>

を図-8に示すが、偏差は比較的小さい。以上の予備実験を基に、本測定は図-9の平面図に示すような模型の仕様で行った。

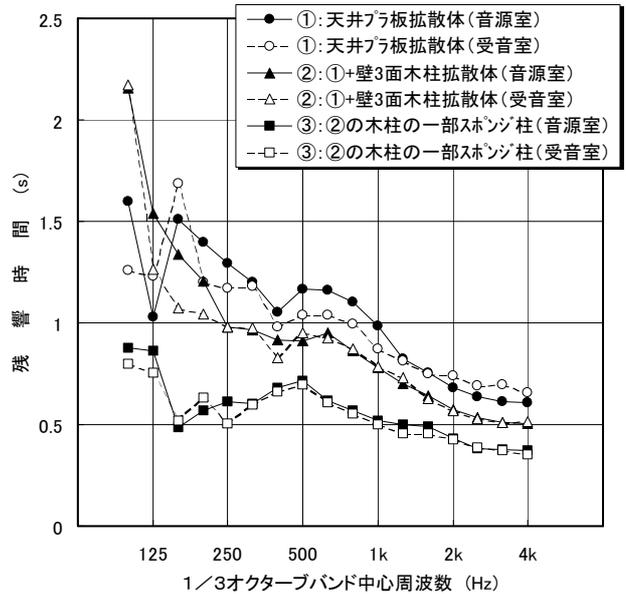


図-7 箱内拡散状態による残響時間の比較
 <実物換算>

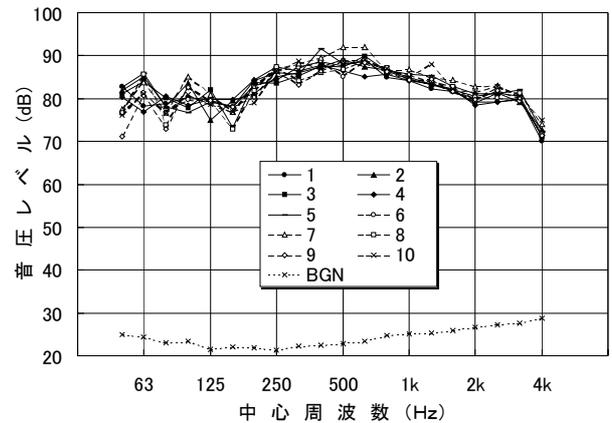


図-8 箱内の音圧レベルとその標準偏差
 <実物換算>

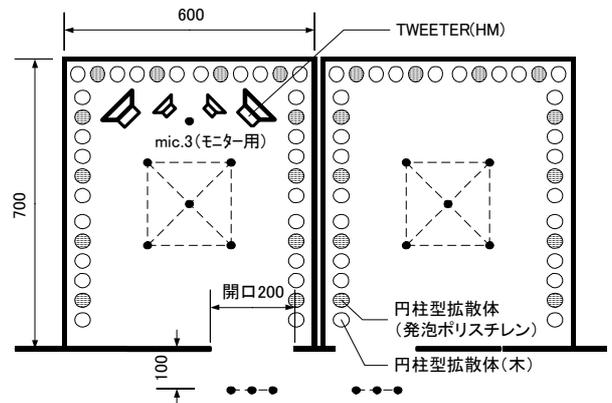


図-9 模型平面図

3) 測定器ブロックダイアグラム

測定は、図 - 10 に示す測定器ブロックダイアグラムにより行った。音源信号として、500～40kHzの1/1オクターブバンドノイズを、低音域用と高音域用の2種類に分けたツイータから出力した。受音には、FFTアナライザと1/4インチマイクを用い、1/3オクターブバンド音圧レベルを測定した。

3.2 実験結果

1) 各経路での音圧レベル差

まず、各経路の1/3オクターブバンド音圧レベル差を、主として開口幅200mm(以下、200開口と記す)について図 - 11 に示した。図中①は、各開口幅における音源室内から音源開口までの音圧レベル差であるが、開口の大きさによる差は生じていない。図中②は、音源開口から受音開口までの音圧レベル差であり、距離と回折による減衰を表している。図中③は、受音開口外と受音室内の差であるが、高域で開口間距離による差がみられる。

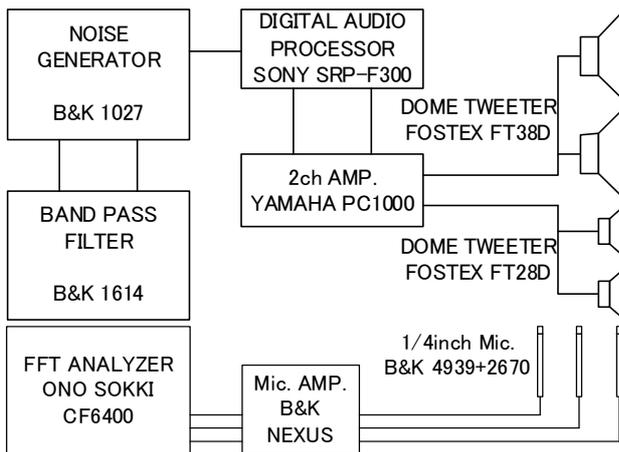
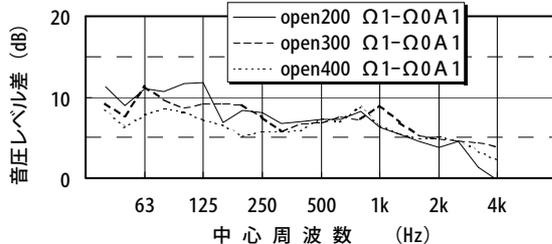


図 - 10 測定器ブロックダイアグラム



①音源室内→音源開口

2) 各開口寸法の室間音圧レベル差

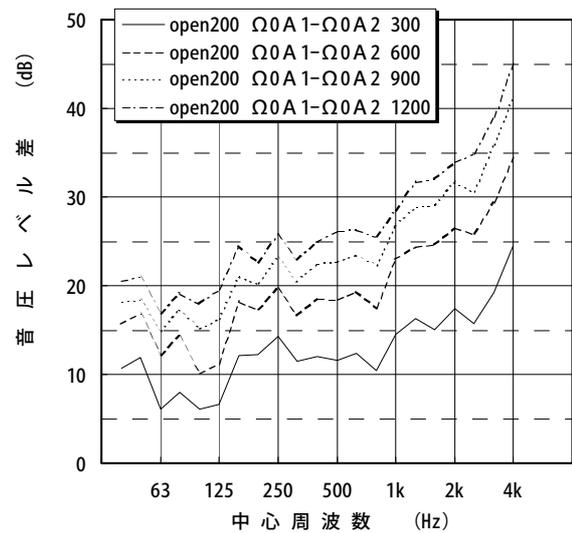
図 - 12に各開口寸法の室間平均音圧レベル差を示すが、いずれも、250Hz付近に特異な盛り上がりが生じている。

3) 減衰予測図表との比較

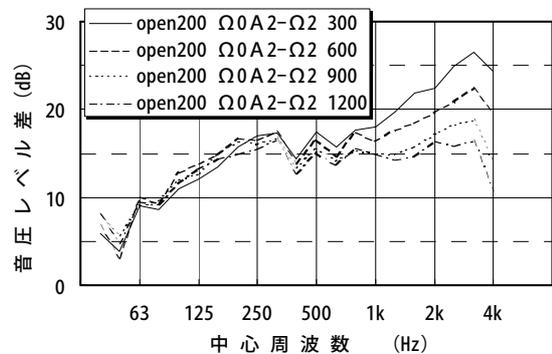
音源室内の平均音圧レベル L_1 と受音室内の平均音圧レベル L_2 との差は、室の吸音力を A 、音源室、受音室の開口面積をそれぞれ S_1 、 S_2 とすると、

$$L_1 - L_2 = TR + 10 \log (A / S_1 / S_2) \quad (11)$$

と表される。この11式に、図 - 12で示した実験結果を入れて、1/1オクターブバンドに変換し、減衰予測図表にプロットしたグラフを図 - 13に示す。200開口では、250Hzを除き、予測値と実験値とはかなり一致している。なお、開口幅に着目すると、幅が大きくなるに従い、予測図表と実測の差が大きくなる傾向がみられるが、今回の各開口寸法の範囲では、250Hzを除き、概ね±2dBの範囲内となっている。

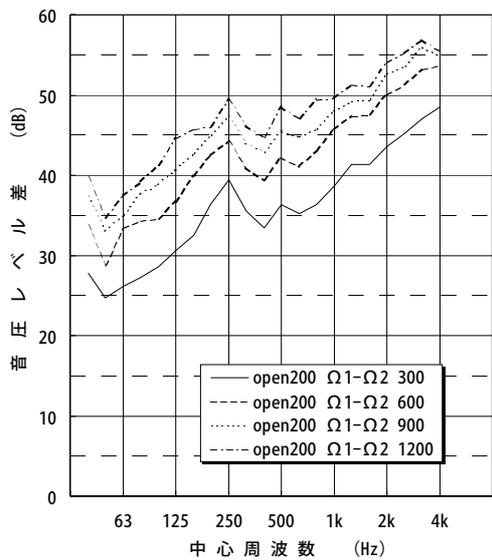


②音源開口→受音開口 (200 開口)

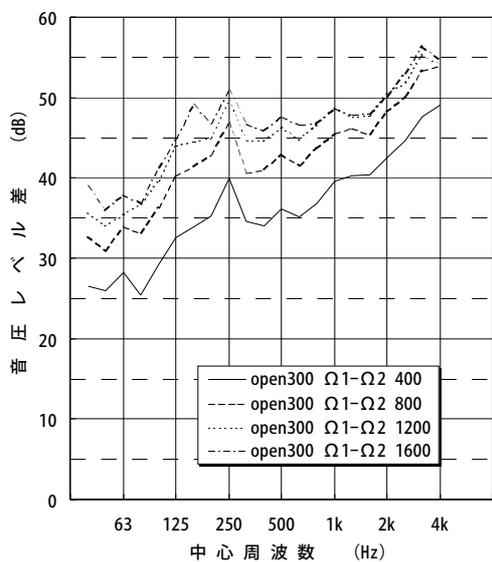


③受音開口→受音室内 (200 開口)

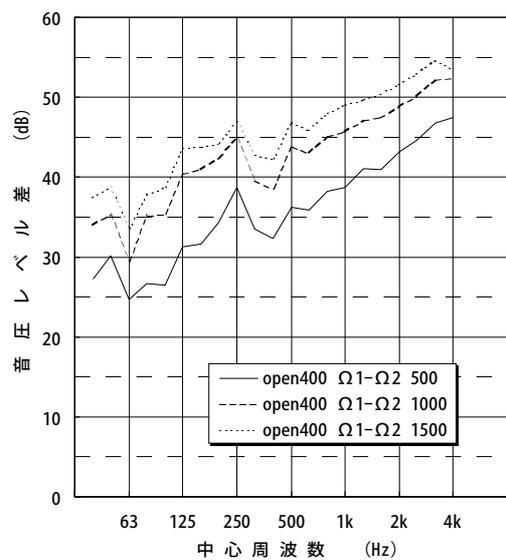
図 - 11 各経路における音圧レベル差 <実物換算>



① 200 開口

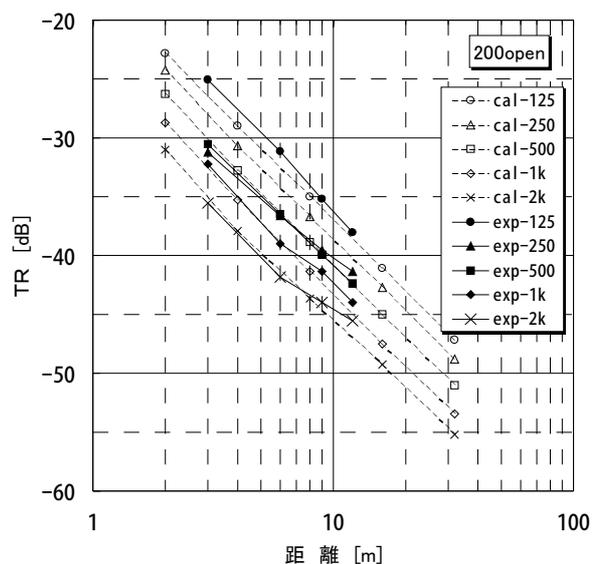


② 300 開口

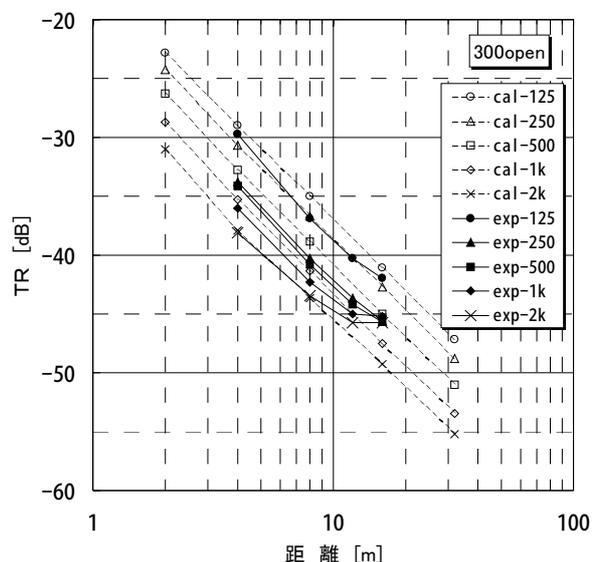


③ 400 開口

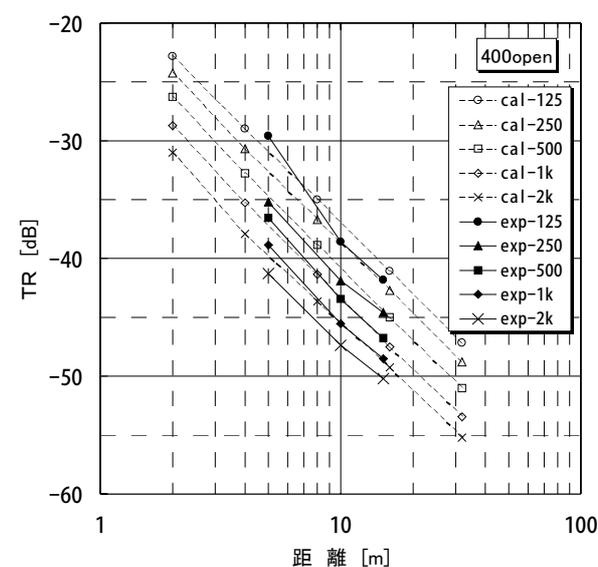
図 - 12 開口条件別室間平均音圧レベル差
<実物換算>



① 200 開口



② 300 開口



③ 400 開口

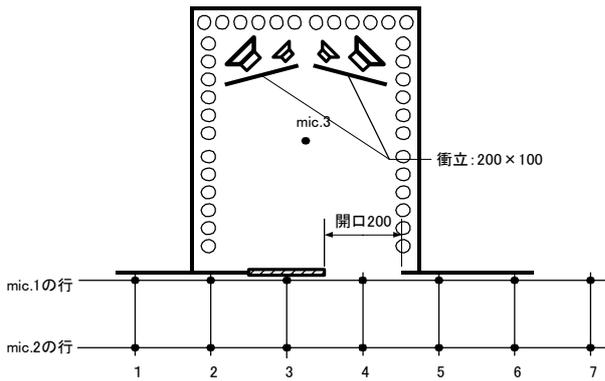
図 - 13 減衰予測図表と実験値
<実物換算>

4) 拡散条件による比較

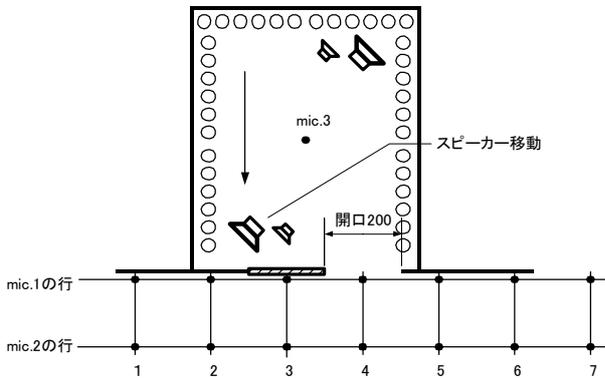
前3)項で示したように、各開口条件共、250Hzで予測図表と差が生じたので、拡散条件を変化させて放射指向特性を調べた。図-9を基本条件とし、図-14のようにツイータ、拡散柱、開放窓の位置を変化させて、250Hzにおける音圧の拡散状態を比較した。その結果の拡散状態音圧レベルコンターマップを図-15に示すが、基本条件では、受音側(図中右)への音圧レベルの減衰が大きく、対象に拡散するという解析モデルの条件から外れていることがわかった。解析モデルに比較的近い特性となったのは、条件

3, 6, 7であったが、条件6, 7では、音源室と受音室との開口の中心間が大きく、実験上距離の制約があるので、条件3を基本条件との比較対照とした。1kHzにおける放射指向特性を比較して図-16に示すが、条件3の250Hzでは、解析モデルに近く比較的左右にバランスのとれた特性であることに対し、1kHzでは、逆に解析モデルから外れて受音側への減衰が大きくなった。これらの条件におけるTRを図-17に示すが、図-16の特性同様、250Hzでは、基本条件で予測値より2~4dB離れていたが、条件3で0.5~2dBとかなり近づいた。一方、1kHzでは、基本条

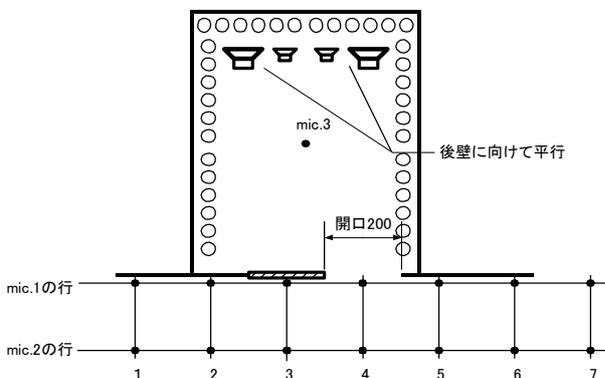
条件1：基本条件 (図9参照)



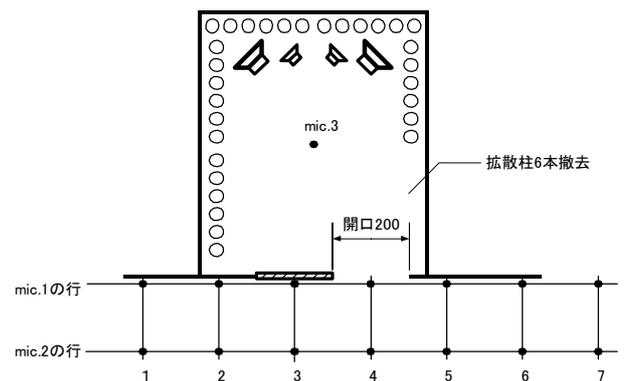
条件2：S P 背後に衝立設置



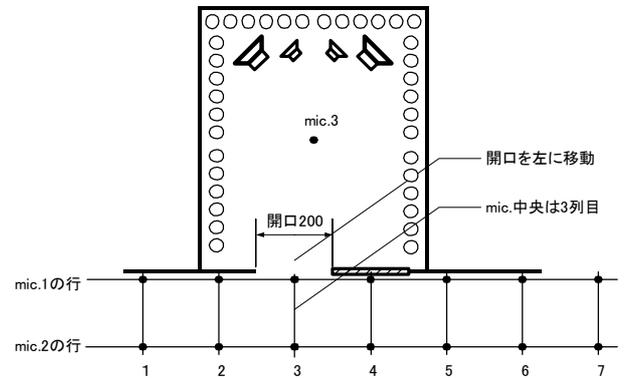
条件3：S P 対角線上に設置



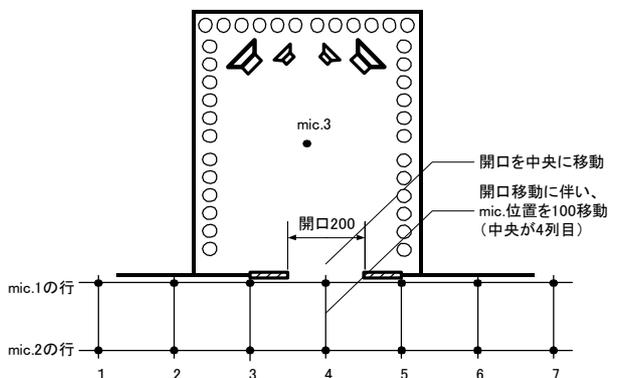
条件4：S P を後壁に向けて平行に設置



条件5：開口付近の拡散柱6本を撤去



条件6：開口位置変更 200開口を左に移動



条件7：開口位置変更 200開口を中央に移動

図-14 拡散条件の変更<平面図>

件で予測値とほぼ一致したが、条件3で2～3 dBの差が生じた。

4. まとめ

以上に示した通り、境界積分方程式を用いた解析から作成した図-3の予測図表は、模型実験ともかなり一致し、建物の開口間側路音の伝搬性状予測などに有効であることが確認された。一方、音源室の拡散状態等が解析モデルの条件と異なってくる場合、本予測図表と異なる伝搬性状になることもわかったので、予測図表の適用においては、予測モデルと実音場の条件との違いなどにも配慮すれば、より実際に近い予測が可能であろう。

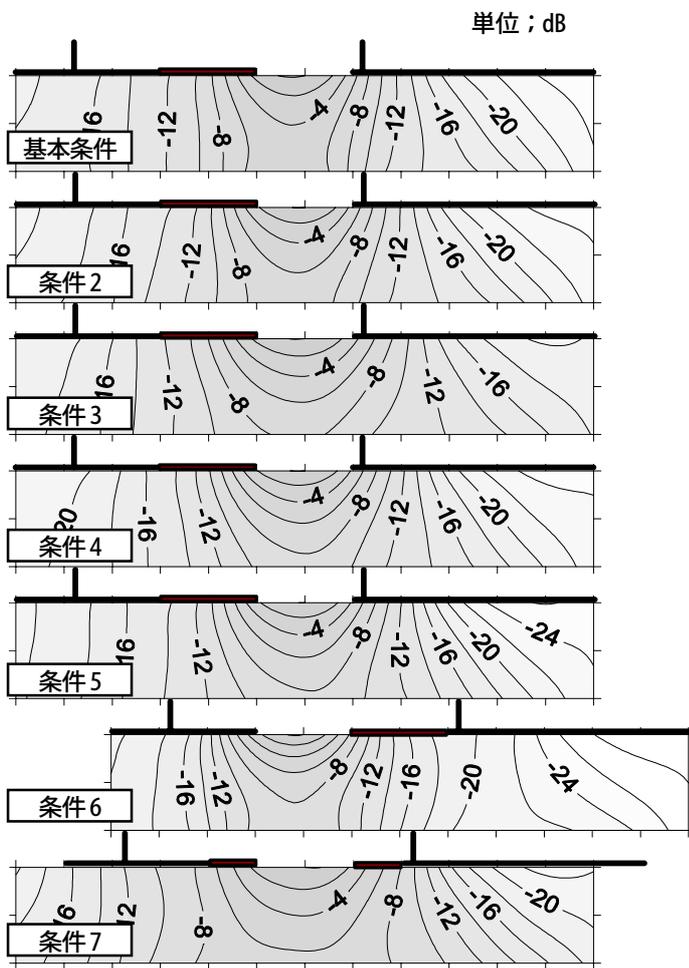


図 - 15 拡散状態 - 各条件の比較
200開口 < 250Hz >

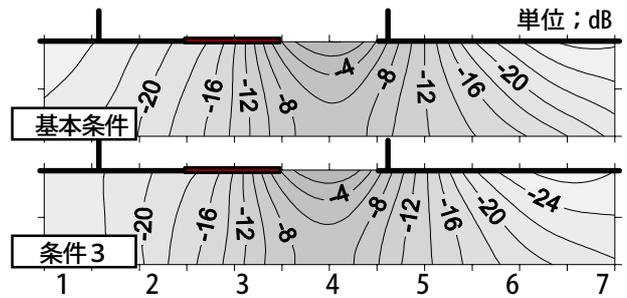


図 - 16 拡散状態 - 基本条件と条件3の比較
200開口 < 1kHz >

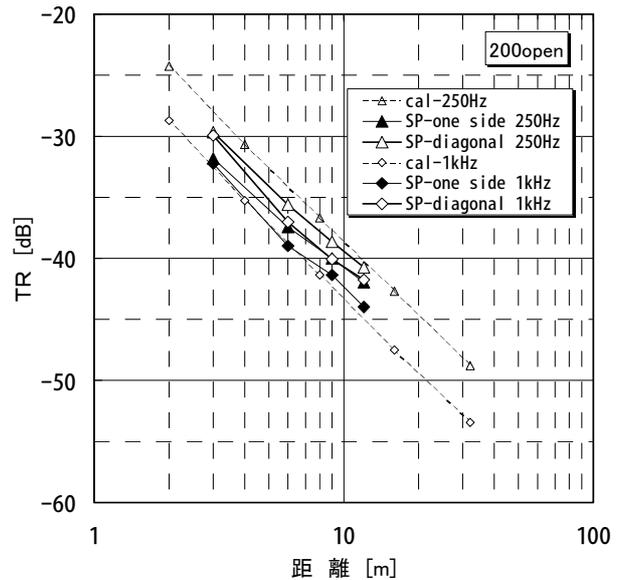


図 - 17 拡散条件の違いによる
減衰予測図表と実測の比較 - 200開口
<実物換算 250Hz, 1kHz >

<参考文献>

- 1) 河井康人「開放窓を経由する隣室間の側路伝搬音について」、日本音響学会誌、Vol. 57、No.2、139-143、2001
- 2) 河井康人「開放窓を経由する側路伝搬音の距離減衰図表について」、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）40086、2001
- 3) 寺井俊夫、古江嘉弘、堀之内吉成、池田雅弘「インテンシティー場の計算とその表現」、日本建築学会近畿支部研究報告集、第33号計画系、173-176、1993

<参照文献>

- ※木村翔、小堺裕司「室間遮音性能に与える窓からの迂回路伝搬音の影響」、音響技術、Vol.17、No.1、39-46、1988
- ※飛松幸彦、木村真也「側路伝搬音の遮音性能への影響」、建築音響研究会資料、AA97-2、1997