

斜め入射を考慮した音響反射特性の評価

池上 雅之 平野 滋

Study on Estimation of Reflection Characteristics Considering Oblique Incidence

Masayuki Ikegami Shigeru Hirano

Abstract

In hall acoustics, the forecasting of the quality of early reflections, which are sound waves incident upon walls obliquely, is important for estimation of sound field impression. Geometrical acoustical analysis and P.E.I.M. (HARP) that are practical methods for forecasting use reverberant sound absorption coefficients as characteristics of reflection materials. However, the quality of forecast is degraded by a difference of characteristics between a diffusive incidence fields and a oblique incidence fields. This report investigates the use of sound reflection coefficients in place of reverberant sound absorption coefficients. Sound reflection coefficients improved the forecast quality in case of grazing angle incidence. The method was applied to estimation of the random reflection effect of sound diffusers, revealing a frequency range where diffusers have an effect and result in the forecasted trace propagation.

概 要

ホール音場において音波が斜め入射する状態の初期反射音予測精度は、音場の拡がり感などの評価に重要である。実用的な予測方法である幾何音響解析手法や波面積分法(HARP)では材料の反射特性として残響室法吸音率を用いているが、拡散入射下における特性であるため斜め入射下との差異が大きい材料の反射面で予測精度が低下する。本研究では、これらの予測精度向上を目的に斜め入射下の反射特性評価をとりあげ、実験的に得られる音圧反射係数をこれまでの残響室法吸音率に代わる反射特性データとすることを検討した。音圧反射係数の測定方法を検討し代表的な材料としてグラスウールについて測定、比較を行った結果、擦過入射に近い状態で残響室法吸音率との差異が大きくなり、これらの条件では音圧反射係数の導入が精度向上へ寄与することが分かった。またこの音圧反射係数による反射特性評価を拡張し拡散板の散乱効果の評価を試みたが、干渉波形に着目した評価により散乱効果の周波数域を特定できることが判明したため、音場予測における伝搬追跡続行の目安が得られた。

1. はじめに

コンサートホールにおける音の響きすなわちホール音場は、その善し悪しで空間の質が大きく左右されるため計画段階に正確な予測が求められる。特にホール内が拡散状態となる以前の初期反射音(音波が特定の方向から反射面へ入射(斜め入射)する状態)の予測精度は、音場の拡がり感などホールの評価に影響を及ぼすため重要である。

実用的な予測方法として多用される幾何音響解析手法や波面積分法(HARP)¹⁾などでは、ホール構成部材の反射特性データとして、数多くの材料を網羅した唯一のデータである残響室法吸音率を用いている。しかしこれは音波の拡散入射下における反射特性データであるため、斜め入射下の反射特性と差異が大きい材料(多孔質材など)の反射面や座席面に、音源からの直接音が入射する

ようなホール音場では予測精度が低下するという問題があった。

予測精度向上として波動音響解析の試みもあるが計算量等の点でまだ実用的な手法となりにくい。

そこで今回、斜め入射下の反射特性の導入による予測精度向上を目的に、実験的に得られる音圧反射係数をこれまでの残響室法吸音率に代わる反射特性データとすることを検討した。またこの音圧反射係数による斜め入射下の反射特性評価を拡張し、拡散板の散乱効果の評価を試みた。

2. 音圧反射係数による反射特性の評価

2.1 音圧反射係数による斜め入射下の反射特性評価

ホール音場予測では基本的にインパルス応答を求める。ここには残響時間を始め音源・受音点間の全周波数域の響きに関する多くの情報が含まれている。

十分大きな反射面 F が特性 R_ω を持つ場合、受音点 P での応答 $\varphi_{(P)}$ は、Helmholtz-Kirchhoffの積分公式より

$$\varphi_{(P)} = \frac{1}{4\pi} \iint_F \left\{ R_\omega \cdot \varphi_{\omega \ln(Q)} \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{-ikl}}{l} \right) - \frac{\partial}{\partial n} (R_\omega \cdot \varphi_{\omega \ln(Q)}) \frac{e^{-ikl}}{l} \right\} dF \quad \dots\dots\dots (1)$$

と表すことができる²⁾。

ただし、面上反射点 Q の速度ポテンシャルを入射波の速度ポテンシャルと反射係数の積 $\varphi_{\omega \ln(Q)} \cdot R_\omega$ として公式に代入した。またKirchhoffの境界条件を適用し、反射面裏側のポテンシャルを0とした。

- $\varphi_{(P)}$: 受音点 P における速度ポテンシャル
- $\varphi_{\omega \ln(Q)}$: 面上の反射点 Q に入射する速度ポテンシャル
- R_ω : 反射点 Q での反射係数
- n : 反射面 F の法線 l : 反射点 Q ・ 受音点 P 間距離
- l_0 : 幾何学反射点 ・ 受音点 P 間距離
- m_0 : 点音源 P_s ・ 幾何学反射点間距離 θ_{ln} : 入射角
- k : ω/c , c : 音速, ω : 角速度 i : $\sqrt{-1}$ K : 定数

さらに $\frac{\partial}{\partial n} (R_\omega \cdot \varphi_{\omega \ln(Q)}) = \frac{\partial R_\omega}{\partial n} \cdot \varphi_{\omega \ln(Q)} + R_\omega \cdot \frac{\partial}{\partial n} (\varphi_{\omega \ln(Q)})$ より、式(1)は

$$\varphi_{(P)} = \frac{1}{4\pi} \iint_F \left\{ \varphi_{\omega \ln(Q)} \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{-ikl}}{l} \right) - \frac{\partial}{\partial n} (\varphi_{\omega \ln(Q)}) \frac{e^{-ikl}}{l} \right\} R_\omega dF - \frac{1}{4\pi} \iint_F \left\{ \frac{\partial R_\omega}{\partial n} \varphi_{\omega \ln(Q)} \frac{e^{-ikl}}{l} \right\} dF = \varphi_{\omega 1(P)} - \varphi_{\omega 2(P)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。

このうち式(2)の第2項 $\varphi_{\omega 2(P)}$ の積分は、隣接する積分要素からの寄与が相殺して最終的に幾何学反射点での寄与を残すので、そこでの反射係数を $R_{\omega 0(\theta_{ln})}$ とすれば $\varphi_{\omega 2(P)} = K \cdot \frac{\partial R_{\omega 0(\theta_{ln})}}{\partial n} \cdot \frac{e^{-ik(m_0+l_0)}}{(m_0+l_0)}$ と近似できる。

さらに $\frac{\partial R_{\omega 0(\theta_{ln})}}{\partial n} = \frac{\partial R_{\omega 0(\theta_{ln})}}{\partial l_0} \cdot \frac{\partial l_0}{\partial n}$ より、受音点 P を幾何学反射点方向に移動しても $R_{\omega 0(\theta_{ln})}$ に変化がないと仮定すれば $\frac{\partial R_{\omega 0(\theta_{ln})}}{\partial l_0} = 0$ であり、 $\frac{\partial R_{\omega 0(\theta_{ln})}}{\partial n} = 0$ となるから第2項 $\varphi_{\omega 2(P)}$ 無視はできる。

また式(2)の第1項 $\varphi_{\omega 1(P)}$ は、有限の反射面の縁辺が発生する境界波の影響を受けるまで前述同様、幾何学反射点近くの寄与のみを残すこととなる。

よって斜め入射を考慮した幾何学反射点の音圧反射係数 $R_{\omega 0(\theta_{ln})}$ を以下の式(3)の形で実験的に測定することにより、残響室法吸音率に代わる反射特性を得ることができる。

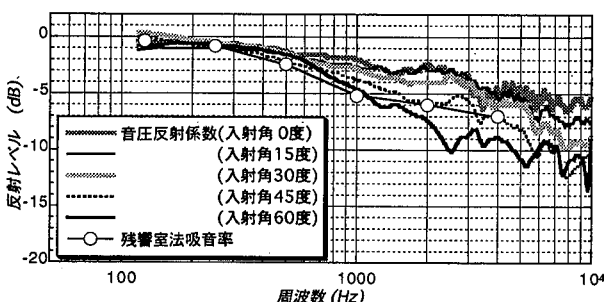


Fig. 1 グラスウールの特性 (反射レベル周波数特性)
Frequency Characteristics of Glass Wool

$$\varphi_{\omega 1(P)} = R_{\omega 0(\theta_{ln})} \cdot \frac{e^{-ik(m_0+l_0)}}{m_0+l_0} \quad \dots\dots\dots (3)$$

2.2 測定例

ここで斜め入射を考慮した場合に適した材料のうちグラスウール (25mm厚24kg/m³, 剛板密着) を対象に音圧反射係数を測定し、既存の残響室法吸音率データ³⁾と比較した。測定では、時間分離による境界波の取り除きと直接音消去法⁴⁾による測定系の特性の排除を行った。

得られた音圧反射係数は複素量である。ここでは剛反射面に対する反射レベルの形に変換し比較している (式(4)参照)。

$$r_p = \sqrt{r_{p \text{ real}}^2 + r_{p \text{ img}}^2} \quad |r_p|^2 = 1 - \alpha \quad L_p = 20 \log_{10} r_p \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし r_p : 音圧反射係数 (複素量) L_p : 反射レベル

$r_{p \text{ real}}, r_{p \text{ img}}$: r_p の実数部と虚数部 α : 吸音率

結果をFig. 1に示す。これを見ると音圧反射係数の測定結果に、入射角度が大きく (擦過入射に近く) なるにつれ高音域の反射レベルが下がる傾向が見られる。残響室法吸音率は概ねグラスウールの反射特性を代表しているものの条件により音圧反射係数との差異が広がる。

当然これらのデータを用いた予測計算結果にも同様な差異が現れるため、音圧反射係数の導入は入射条件による反射特性の差異の大きい材料において、予測精度向上に寄与することとなる。

他に空気層付きの孔あき板の音圧反射係数を測定したが、同様に入射条件による差異が確認できた。今後機会を見て他の材料、構造などの測定を行いたい。

3. 拡散板の散乱効果の評価

つぎに音圧反射係数による反射特性評価の拡張として、拡散板を対象に形状や斜め入射などの条件の違いによる散乱効果の評価を試みた。

3.1 拡散板

拡散板はコンサートホール等の音場コントロールを目的に散乱反射を求められる部位に設置される。形状は幾何学反射以外の方向に反射成分を得るため、散乱対象の下限周波数を基にした寸法の連続凸凹面とすることが多く、非吸音性材料の折板やポリシリンダー形で構成される (Fig. 2参照)。

また反射特性は、対象周波数域では鋭いピークとディップや大きなうねり状の変動が周波数特性に現れ、それ以下の周波数域では拡散板の凸凹を無視した平板と同様な振る舞いを示す。

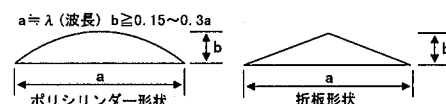


Fig. 2 拡散板の寸法
Proportion of Diffusers

3.2 散乱効果の評価

これまで拡散板効果の実験的な評価は、入射エネルギーをどの程度均一に多方向の平面進行波に散乱できるか、レーダーチャートに代表される反射波の放射指向特性測定結果から判断していたが、どの周波数域から効果が得られるのかの評価は、数値モデルを対象とした例⁵⁾があるものの実験的なデータに対して適用したものがなかった。そのため音場予測における伝搬追跡では、このような拡散板の反射を全周波数域において一律に散乱反射するものとして扱っていた。

ここではどの周波数域から散乱反射の効果が得られるのかを実験的に把握するため、あるモデルに対する音圧反射係数の測定結果から、条件の違いによる音圧反射係数の特性の変化を観察し、拡散領域となる周波数の評価を試みた。

3.3 音圧反射係数による評価

入射エネルギーを散乱する要素が反射面上に分布する場合、要素の散乱効果が高いほど面近傍の受音点では時間遅れを伴った反射波が多方向から到来する。拡散板を反射面とした場合、面上の凸凹からの離散的反射波の干渉が受音点にて観測され、その結果として受音点応答の周波数特性に急峻なディップや大きなうねり状の変動が現れるものと考えられる。

この点に着目し、音圧反射係数による拡散板の散乱効果の評価を試みる。拡散板の音圧反射係数測定データの周波数特性に干渉の結果として現れる急峻なディップを以下に示す式で整理し、標準偏差として散乱効果を評価する(式4参照)。

$$\sigma_{1/3oct} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{f=f_x}^{f_x+n} (r_p(f) - \bar{r}_p)^2} \dots\dots\dots \text{式4}$$

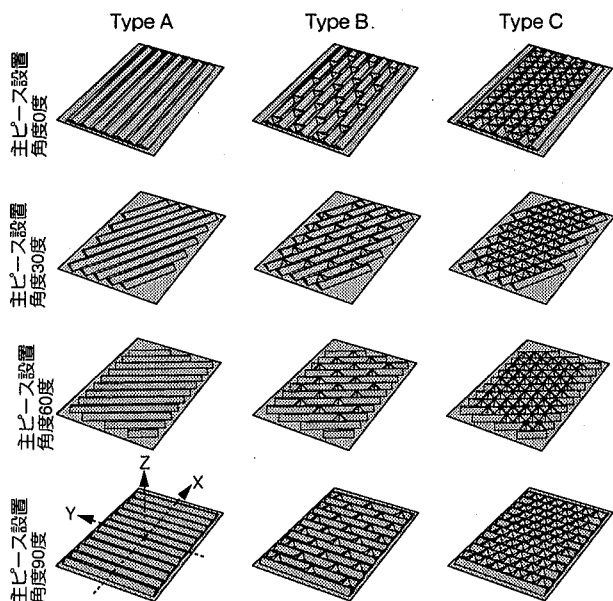


Fig. 3 測定対象とした拡散板のタイプ
Type of Diffusers

ただし f_x : オクターブ下限周波数

$r_p(f)$: 音圧反射係数 n : スペクトル数

f_x+n : オクターブ上限周波数

\bar{r}_p : 音圧反射係数平均値

評価対象は、折板の凸形状の異なる拡散板3種 (Fig. 3参照) とし、設置状態の変化 (図中: 主ビーム設置角度で示す) 4種と音波の入射角4種を変化パラメータとして与えている。凸凹形状は2kHz以上の周波数域で散乱反射を意図した $a=170\text{mm}$, $b=51\text{mm}$ の寸法 (Fig. 2参照) である。測定は音源、幾何学反射点、受音点間距離をそれぞれ2mとし、入射角=反射角で行っている。

3.4 評価結果

凸形状の異なる拡散板3種、設置状態の変化4種、入射角の変化4種それぞれの音圧反射係数測定結果をまとめ、反射レベル周波数特性と標準偏差周波数特性としてFig. 4に示す。反射レベルは剛壁の反射音に対するレベル差である。これらを見ると反射レベル周波数特性には散乱反射を意図した周波数域で、多方向から到来する反射波の干渉の結果と見られる急峻なディップや大きなうねりが観察できる。1/3オクターブ幅でこれらの標準偏差を求め相互比較すると、拡散板の設置状態や入射角に依存性のある形状かどうかによって、これらの条件の違いによるバラツキが見られた。

受音点から見た拡散板形状が同等となる入射角0度 (垂直入射) を基準とし、散乱反射を意図した周波数域 (2kHz以上) での偏差の変動を観察すると、拡散板の散乱効果は、音圧反射係数測定結果から得られる偏差が概ね1以上の周波数域で得られるものと推定できた。

また入射角60度 (擦過入射) の場合はType C, B, Aの順に偏差間のバラツキが大きくなっていることから、設置状況や入射角度に依存性の少ない形状の方が意図した周波数域に安定した効果を得られるものと考えられる。

これらの偏差の傾向は、拡散板の寸法 a を変化させても反射特性に相似則が成り立つため同様である。

4. まとめ

以上、実用的なホール音場予測方法である幾何音響解析手法を対象に、実験的に得られる音圧反射係数を用いた斜め入射下の予測精度向上について検討した。

斜め入射下で拡散入射下と差異のある材料では、これまでの残響室法吸音率を用いた予測に比べ音圧反射係数を導入した予測は精度が向上する。ホール内で音源からの直接音が入射する位置にこのような材料がある場合、あらかじめその音圧反射係数を得て予測を行うことは、初期反射音予測精度向上への寄与が大きいものと考えられる。

また音圧反射係数による斜め入射下の反射特性評価を拡張した拡散板散乱効果の評価により、効果のある周波数域を特定できるため、音場予測における拡散板入射音の幾何学反射伝搬追跡続行有無の判断に目安が得られた。

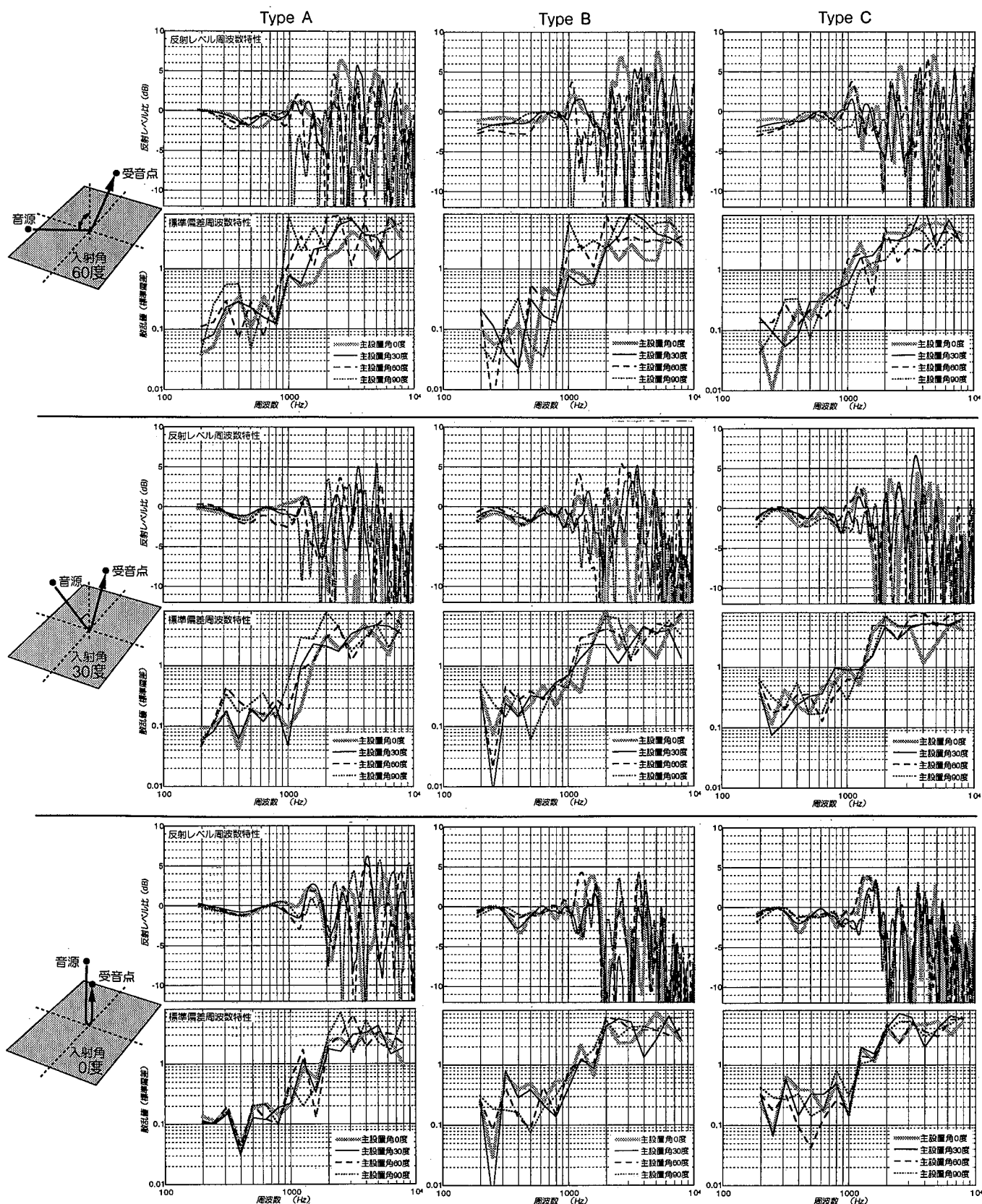


Fig. 4 拡散板の音圧反射係数測定結果とディップやうねりの様子の比較

Sound Refraction Coefficients of Diffuser

参考文献

- 1) 坪井: 散乱波を考慮した室内音場のインパルス応答予測計算法, 日本建築学会計画系論文集, 503, (1988)
- 2) 櫻井: オーディトリウムでの音場計算法に関する研究, 学位論文, (1982)

- 3) 木村: 建築音響と騒音防止計画, 彰国社刊
- 4) 橘, 矢野, 石井: 各種吸音構造の斜め入射吸音特性, 日本音響学会誌, vol. 34, No1, p. 111, (1978)
- 5) 加藤, 坂本, 高橋: 周期的形状をもつ拡散面による反射音場, 日本音響学会, 建築音響研究会資料, AA98-7, (1998)