

Walls and ceilings with quasi-periodic unevenness have often been designed to provide diffuse reflections. As for the shape and the size of this unevenness, with the help of some statistic treatment, it is possible to design effective diffusers with intended directional pattern. In addition to this spatial property of diffusion, reflection from the surface should not have particular response characteristics that may have a serious effect on our subjective experience. A well-known problem is ‘coloration’ caused by interference between direct and reflected waves, which might create an odd tonal distortion in the case of a surface with periodic unevenness. This may be the reason that creating a periodic series of reflections at the receiver is generally avoided. Two issues need to be addressed: (1) is a periodic structure of reflection a major obstacle in practical use? and (2) to what degree is structural repetition acceptable? Clarification of these matters is necessary in order to design effective diffusers for practical applications. This study examines the physical properties of, and the subjective effects of tonal response to, sound fields caused by scattering from periodic-type diffusers.

## 1. はじめに

一般の住宅から大規模な公共建築まで、その建築空間に一歩足を踏み入れた時、我々はその空間の音場の評価を何らかのレベルで下している。騒音の程度、会話のしやすさ、各種オーディオ機器の聴取状況、そして音を売り物とする音楽ホールの音響状態などがその例である。そして、外部からの侵入騒音を除くほとんどの評価指標に関連する要因の一つが「拡散」である。特に音が重視される音場ではこの「拡散」がその音場の質を決定する大きな要因となっている。拡散性反射面は音響障害の回避のみならず、より積極的に音場の質向上をめざす目的としても使われてきた。音を拡散させることを目的とした処置は現在多くの現場で見受けられる。しかしながら、その形状の決定に際しては対象とする波長との関連のみが考慮され、それ以外はほとんど経験的になされているにすぎない。また大規模空間のみならず小規模な会議室、講義室、教室などでも、特に音源近くの反射面に拡散性を導入することによる音場への影響は正しく把握しておく必要がある。

拡散性反射には二つの側面がある。一つは音の空間的な拡散であり、今一つは音の時間情報(周波数特性)における変化である。前者に関しては多くの研究がなされ、拡散性の指標も数多く提案されてきた[1-3]。後者に関連して、直接音とそれに続く一連の反射音系列からなる音場ではスペクトルの変化が起こり、その音色の変化が知覚されるときカラーレーションと呼ばれる聴覚上の現象が生じる。このような音色の変化はHuygensの時代から観察、研究されてきた[4]。1951年のHaas[5]による単発の反射音による音声明瞭度への影響に関する研究以後、建築音響、心理音響の分野でこのカラーレーションの問題が数多く取り上げられてきた。関連する聴感実験のほとんどは、レベル差と時間遅れをもったスピーカーを無響室内に配置して行われてきた。これらスピーカーは必然的に大きな反射面による鏡像としての性格を持ち、拡散性反射面による音場とは異なっている。Barron[6]はカラーレーションを避け、かつ、天井からの有効な反射音を得るために、そこに拡散性反射面を使用することを提案している。しかしながら、反射面に拡散性を導入する際、多くの音響デザイナーは反射面構造として周期的な繰り返しの使用を躊躇する[7,8]。周期的反射面には、このカラーレーションに相当する何らかの音響障害を引き起こすのではないかとの危惧があるためである。周期的凹凸の反射面には多くのメリットがある。例えば、その反射・拡散性を容易に評価できること、そのため目的の拡散性を得ることが容易であること、設計が簡単かつ実務での広範な適用性を持つことなどである。

以上のことから、本研究では次の2点 (i)周期性に起因する、聴感上の影響を持つような特異な現象は本当に生じているのか? (ii)生じているとすれば、どの程度までの周期性であれば許容できるのか? を明らかにすることが主な目的となる。拡散性反射による音場の聴感上の影響に関連す

る研究として、Cox 等[9]は拡散性反射の空間及び時間特性に関し、簡単な無響室内でのスピーカ配置による方法で調べ、ほとんど影響がないことを報告している。また、Torres 等[10]はホールを想定して計算されたインパルス応答(拡散性反射はランベルト則によって近似)と音楽ソースとの畳み込みによる刺激音を使った聴感実験を行い、音色と空間印象の両者に関し、拡散面によって有意な差が生じることを報告している。しかしながら、両報告とも拡散性反射の再現性に問題があり、(i),(ii)に関し、はっきりとした答えは得られていない。

このような現状を踏まえた上で、ここでは周期性の凹凸を持った拡散性反射面を対象とし、スケールモデルによる音場再現及び厳密な波動散乱理論の採用による反射音場再現手法を用いて、音色の変化における弁別限に関する聴感実験を行った。拡散性反射面としては、拡散の程度と音色の歪がある程度対応するという仮定のもとに、垂直入射時 $f_{min}$ 以上の周波数で最大の拡散性が得られる反射面が選ばれた。その限界周波数 $f_{min}$ は拡散を引き起こす最低の周波数として定義され、周期性凹凸面の周期と入射角に依存し、波動散乱理論から容易に算定できる[14]。

## 2. 反射・散乱音場再現による聴感実験

### 2-1. 周期的凹凸面による波動散乱

周期 $L$ を持つ凹凸面に平面波が入射したときの反射音場を求める(Fig.1)。入射波を単位振幅の平面波として速度ポテンシャルを

$$\psi_i(x, y, z) = e^{i(\alpha_0 x + \beta_0 y - \gamma_0 z)}$$

としたとき、凹凸の最高点以上の領域では、反射波のポテンシャルは面の周期性に起因する応答の周期性を考慮して次のように表現することができる[11,12]。

$$\psi_r(x, y, z) = e^{i\beta_0 y} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \Psi_n e^{i(\alpha_n x + \gamma_n z)}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに} \quad \alpha_n &= \alpha_0 + 2n\pi / L, \\ \gamma_n &= \left[ (k^2 - \beta_0^2) - \alpha_n^2 \right]^{1/2}, \end{aligned} \quad (2)$$

であり、 $\text{Re}\{\gamma_n\} \geq 0$ ,  $\text{Im}\{\gamma_n\} \geq 0$  の条件が付く。

また、 $k$  を波数として  $\alpha_0 = k \sin \phi \sin \theta$ ,  $\beta_0 = k \cos \phi \sin \theta$ ,  $\gamma_0 = k \cos \theta$

である。未知係数  $\Psi_n$  は周期境界面を持つ半空間の境界面上に関する積分方程式を解くことで求めることができる。(2)式から分かるように、 $\gamma_n$  が純虚数の場合には関連の項は放射エネルギーとして寄与しないことから、(1)式は次式となる。

$$\psi_r(x, y, z) = e^{i\beta_0 y} \sum_N \Psi_n e^{i(\alpha_n x + \gamma_n z)}, \quad (3)$$

ここに  $N$  は  $\gamma_n$  が実数となる  $n$  の総数である。結局、周期面からの反射・散乱波は、 $\alpha_n$ ・ $\gamma_n$  という2つの要因によって決定される方向に伝搬する平面波の足し合わせで求めることができる。反射面の拡散性を評価する一つの指標として  $DNSD$  が次のように定義されている。

$$DNSD = \frac{\sigma}{\sigma_{max}}. \quad (4)$$

$\sigma$  は、各要素平面波の持つ基準化されたエネルギー  $I_n = |\Psi_n|^2 / \sum_N |\Psi_n|^2$  の標準偏差であり、 $\sigma_{max}$  はその最大値である。このことから反射面の拡散性の程度に応じて、 $DNSD$  は0から1までの範囲で変化する。 $DNSD=0$  は均一な拡散反射、 $DNSD=1$  は鏡面反射となる。ある特定の方

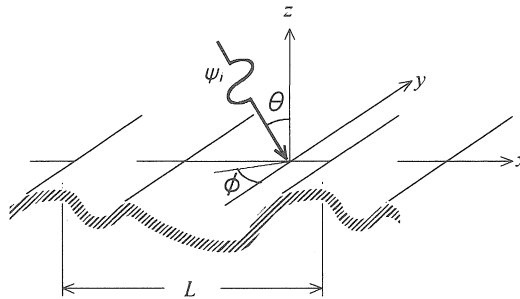


Fig.1 Geometrical configuration and co-ordinate system of a wave scattering model.

向に指向性を持つ反射パターンにしたいときは、その方向に適当な重み付けをした $I_n$ についてのDNSDから決定することができる[2]。(3)式から分かるように、 $n$ で示された要素平面波は $\text{Re}\{y_n\} \geq 0$ の条件のもとに(2)式によって決定される方向へ伝搬する。反射面が拡散性をもつためには $N$ が2以上となる必要がある。 $n=0$ に対応する反射波は常に存在し、これが鏡面反射成分である。もう一つの反射成分が存在するための条件は $n=1$ あるいは $n=-1$ であり、これが、反射面が拡散性となる最低周波数 $f_{\min}$ を決定する条件となる。このことから $f_{\min}$ は次式で表現できる。

$$f_{\min} = \frac{c}{L(|\sin\phi| \sin\theta + \sqrt{1 - \cos^2\phi \sin^2\theta})} \quad (5)$$

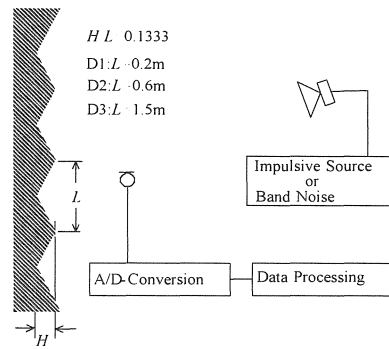


Fig.2 Configuration of the diffuser and the normalized wave-experimental set-up.

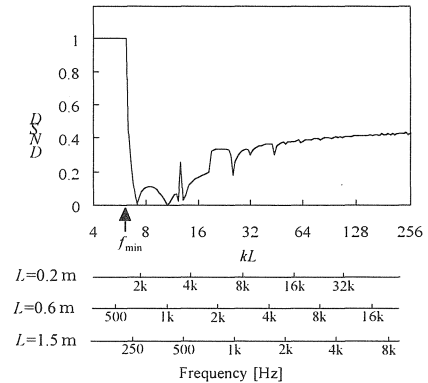


Fig.3 DNSD characteristics of the diffuser with a number  $kL$ , and the frequency corresponding to each surface period.

## 2-2. 聴感実験用の信号

ここでは三角波形状の周期面について、その凹凸比( $H/L=0.13333$ )を固定して、凹凸サイズ( $L$ )を変化させた拡散性反射面D1,D2,D3を用意した(Fig.2)。これらの反射面は式(5)による拡散最低周波数 $f_{\min}$ 以上の周波数域で、垂直入射に対し最も高い拡散性を有する面となっている。拡散性の評価指標としてのDNSD特性をFig.3に示す。なお、剛な平面をPと記し、これを参照面とする。

聴感実験用信号は次の二種類の方法によって作成された。一つは無響室内に1/3-スケールモデルの拡散面を設置し、実測されたインパルス応答をソース信号と畳み込む方法。もう一つは完全周期面の波動散乱理論により、インパルス応答を計算しソース信号と畳み込む方法である。測定の対象となった反射面(ベニヤ合板 $1.8 \times 3.0\text{m}$ )は、当然ある限られた凹凸の繰り返しであり、擬似周期面の性質を持つ。いずれも平面波の垂直入射を想定した条件で行われ、受音点は中立面(凹凸の中央となる面)から0.9mに設定した。スケールモデルを使用する場合の実験の概要をFig.2に示す。

## 2-3. 聴感実験

白色雑音系の音は音色の変化に対する敏感な反応が期待できる信号として知られている。ここでは3種類の帯域ピンクノイズがソース信号として使われた。それらは、67Hz-8kHzの広帯域ノイズ、67Hz-2kHzの低・中域バンドノイズ、2kHz-8kHzの高域バンドノイズである。各タイプによるインパルス応答と畳み込まれた、継続時間5秒の聴感実験用信号は、例えばP-P, P-D1, D1-P, P-D2, などのように対として配置され、計10セット(P-Pの場合は20セット)の一对比較用の試験音が作成された。聴感実験は正常な聴覚を持つ被験者5名に対して行われ、実測データによる試験音の場合には無響室内に単一のスピーカーを設置して、また、理論計算による試験音の場合にはヘッドホンを使って行われた。なお、試験音レベルは各対で同一となるように調節された。

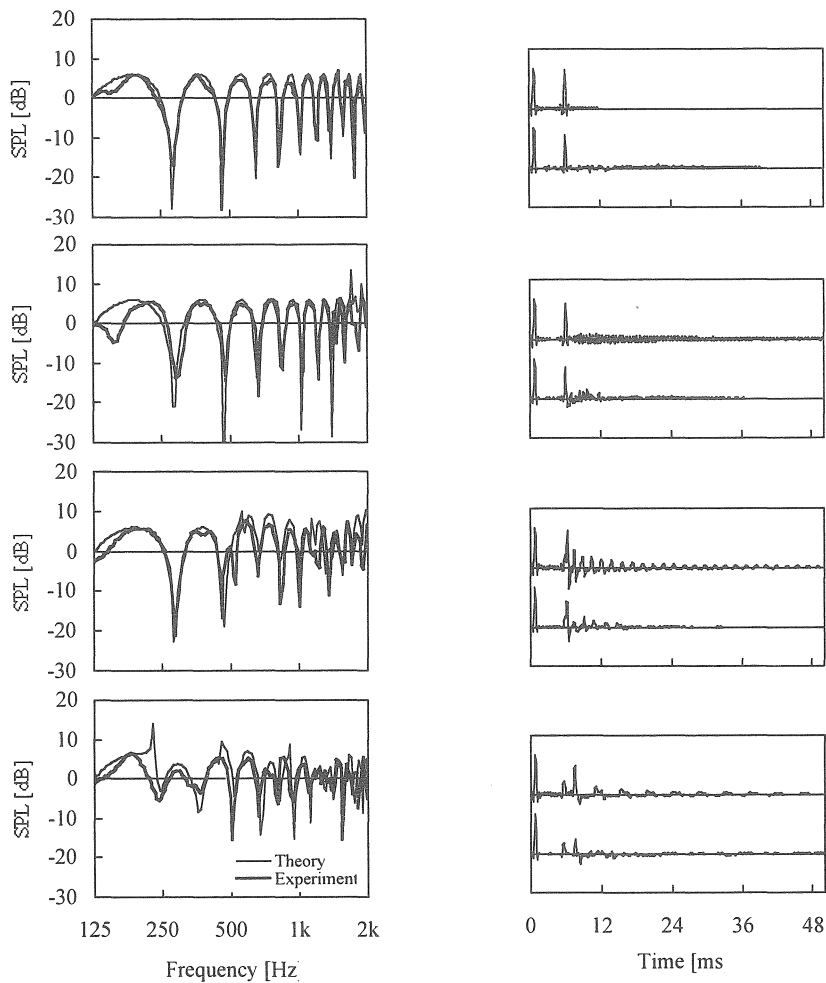


Fig.4 SPL characteristics and the impulse response of the reflected sound fields generated by each type of the diffuser. Critical frequency  $f_{min}$  is represented by a symbol ↓.

#### 2-4. 拡散性反射による音場と聴感実験の結果

拡散性反射による音場の周波数特性とインパルス応答の結果を Fig.4 に示す。1/3 スケールの模型実験と理論計算による比較として、両者ともローパスフィルターを掛け、2kHz までの結果として表示してある。物理現象としての拡散性反射の特徴は前報[14]とほぼ同様であり、次のように要約される。限界周波数  $f_{min}$  以上の周波数では周期的凹凸に起因する周波数特性上の不規則なピークとディップが見られ、これはインパルス応答のなかでは、多重反射の特徴に見られる周期的なパルス列に対応する。限界周波数  $f_{min}$  は式(5)から計算され、反射面が拡散性を有する最低周波数として定義されている。対象とする音波がこの周波数以下であれば、どのような凹凸であれ、Fig.4 の “P” で示されるような、平面からの反射としての規則的な SPL 特性を持つことになる。

拡散性反射の特徴を捉えるとき、ここでは、通常の平面による反射とどのように違うのかに注目して考察を進める。このような観点から物理的な特徴として Fig.4 の結果を見たとき、理論計算と実験結果は比較的良好な一致を見せている。しかしながら、理論と実験にはいくつかの違いも見受けられる。これらの違いの大部分はその最も基本的なモデル設定の違いに起因しているものと考えられる。すなわち理論では凹凸の無限の繰り返し(真の意味での周期性)が仮定されており、実験では当然この周期性を実現することは不可能であり、 $1.8 \times 3.0\text{m}$  内での凹凸の繰り返し(疑似周期性)となっている。拡散性反射が通常の平面による反射とどのように異なり、それが聴感上どのような影響をもたらすかを探ることがここでの目的であり、そのための聴感実験に用いる試験音の作成には、理論的シミュレーションによる各種のパターンが任意に作り出せる手法の採用が望ましい。この意味から、まず理論計算と実験による音場の違いが聴感上どのような影響

として現れるかを検討する必要がある。

以上の観点も含め、理論と模型実験両者からの試験音を用いて、通常の平面による反射と拡散性反射が音色の違いとして弁別されるかどうかの対比較による聴感実験が行われた。被験者には「違いがある」「違いがない」のどちらであるかを答えてもらった。得られたデータは統計的に分析され、違くと判定した割合[%]に関し、各対における平均値をその95%信頼区間の結果とともに Fig.5 に示す。同一条件における対比較法を採用していることから、スケールモデルから得られたデータを使用したとき、その反射・拡散面周辺の回折効果に若干の違いが生じることを除けば、各比較対間の知覚における違いは反射・拡散面タイプの違いに依存するものと考えられる。これらの結果から次のことが分かる。理論データによる結果では対象とした全ての周波数帯域で P-D2, P-D3 間に 80% 以上の被験者が違いを認めており、その比率は凹凸のラフネスサイズとともに増大する。理論モデルによる試験音使用の方が模型実験によるよりも、明確にその違いが知覚される。また、P-P は全く同一の試験音ペアであるにもかかわらず若干の違いが認められており、この同一音の判定に対し、P-D1, D2, D3 における違いの判定が有意な差として出ることが問題であり、これに関する分散分析を行った。その結果全ての周波数帯域において、F 値が F 境界値（有意水準 5%）を大きく上回っており、違い識別における有意な差があると結論できる。さらに各比較対間に有意な差として違いが認められるどうかを調べるため Turkey の手法による多重比較が行われた。その結果 D2, D3 による反射音場は、今回対象とした周波数範囲内では平面によるそれとは聴感上明らかに違うこと、及び、Fig.5 で見られるような、拡散性の程度による違い識別変化の傾向についても統計的に有意な差として検出されることが確認された。

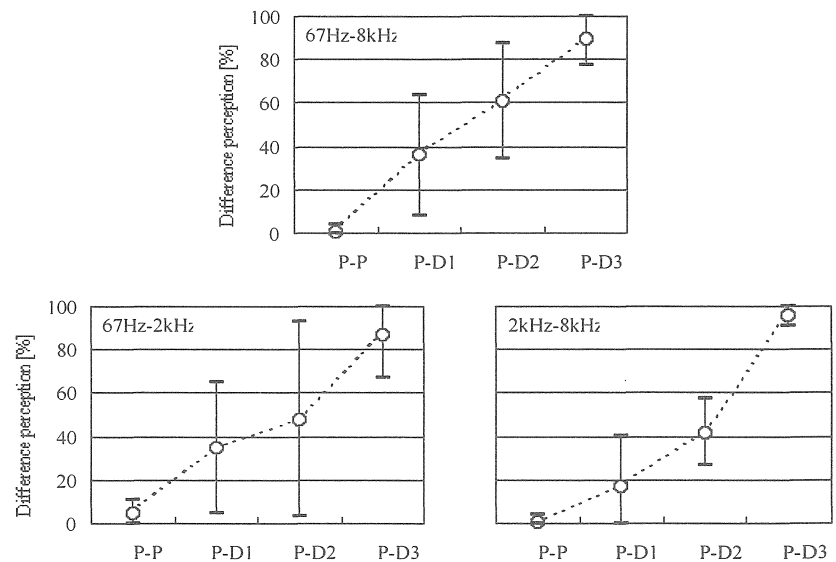


Fig.5 Difference perception for tonal effects of scattering: -○-, using scale models; -●-, theoretical models.

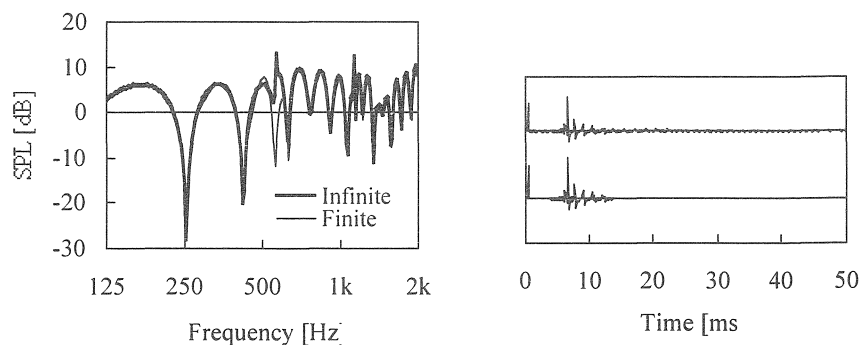


Fig.6 Comparison between infinite and finite case of the diffuser. SPL characteristics (a) and the impulse response (b).

### 3. 反射・拡散面が有限であることの影響

真の周期性（無限大）を想定した凹凸面により形成される反射・拡散音場の特徴は次のように要約される[14]。

- (a) 平面による反射音場に見られる周波数特性上の規則的なピーク・ディップは、拡散性反射では不規則となる。
- (b) 凹凸の中立面に想定された平面による反射波到達時間近辺で、拡散面による散発的なパルスが見られ、またそれに続く周期的なパルス列が見られる。
- (c) 周波数特性上に先鋭なピークが現れ、それはインパルス応答上の減衰するパルス列の周期に対応している。

特徴の(a),(b)は周期的拡散面の周期とラフネスサイズに密接に関連しており、面の凹凸が2,3の有限な繰り返し（擬似周期性）であっても見られる。特徴の(c)は平行2平面間の音場で生じるフラッターエコーと同様の現象であり、拡散面における凹凸の無限の繰り返し（真の周期性）に起因するものと考えられる。

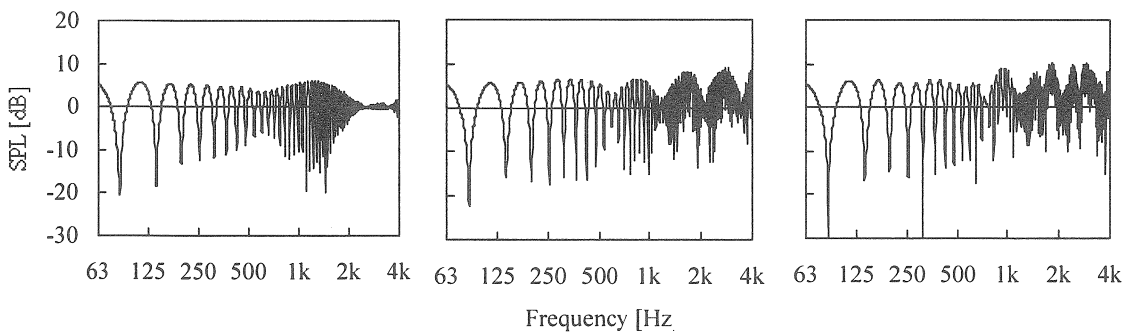


Fig.7 Variation of SPL characteristics with the number of repetitions of the corrugation: 3-repetitions (a); 7-repetitions (b); 11-repetitions (c).

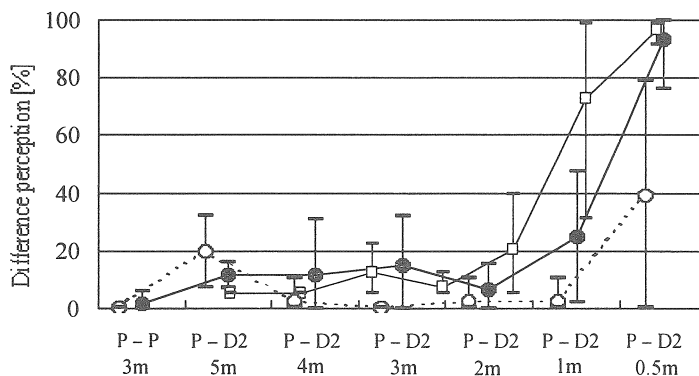


Fig.8 Difference perception for tonal effects of scattering obtained by paired comparison tests for D2-type diffusers in comparison with the specular reflection P. The source signals of the stimuli are band-limited pink noise: -○-, 53-500Hz; -●-, 500Hz-2kHz; -□-, 2-6.3kHz.

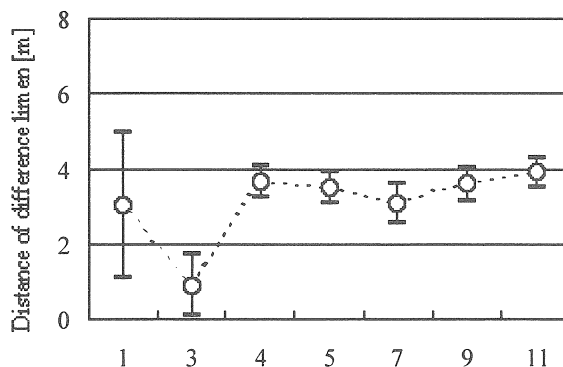


Fig.9 Distance of difference limen versus the number of repetitions of the corrugation.

これらの知見を確認するため、三角波形状( $L=0.6\text{m}$ , D2タイプ)の有限な繰り返しを持つ拡散面が平面上に置かれ、平面波が垂直に入射した場合について、Helmholtz- Kirchhoffの積分公式を使用して反射音場が計算された。結果の一例として、繰り返し数11、受音点が中立面から1mの場合について、無限大理論(周期理論)との比較としてFig.6に示す。さらに受音点を3mとした場合について、繰り返し数を3,7,11としたときの結果がFig.7に示されている。いずれの結果においても、(a),(b)の特徴は持っているが、(c)の特徴である先鋭なピークは見られない。また、500Hzを超えたあたりから(a)の特徴が顕著となる。このことから、無限大の周期面で適用される、拡散が生じる最低周波数 $f_{\min}$ の推定式(5)は、より現実的な有限な大きさの拡散面であっても適用可能であることが分かる。

拡散性反射面をより現実的に即した問題として考えたとき、このように、有限な凹凸の繰り返しを持つ拡散面による反射音場の聴感上の影響が重要な意味を持つことになる。これを調べるために、理論から計算されたインパルス応答を帯域ピンクノイズと畳み込んで作成した試験音を用いて、一対比較の聴感実験を行った。対象とした拡散面はD2タイプ( $L=0.6\text{m}$ ,  $f_{\min}=567\text{Hz}$ )であり、凹凸の繰り返しを3、受音点を凹凸の最上部を通る鉛直線上にとり、距離を中立面から0.5,1,2,3,4,5mと設定した。参照としてのP-P比較対では受音点距離を3mとした。結果をFig.8に示す。対象とした周波数帯域は、低域(63-500Hz)、中域(500-2kHz)、高域(2-6.3kHz)であり、いずれの帯域でも被験者が反射面に近づくとつれ、違いを識別することが容易になることがわかる。しかしながら、低域(63-500Hz)ではその傾向は僅かであり、拡散の限界となる周波数が567Hzであることから、この帯域では拡散の影響をほとんど受けないであろうとの推察と一致した結果となっている。また、受音点が3mを越えるあたりから、中・高域における拡散性反射の聴感上の影響は減少する。

以上の結果をもとに、他の繰り返し数も含め、受音点が拡散面に対しどの程度離れば、通常の平面による反射音場と区別できなくなるかを、中域(500-2kHz)を対象として調べた。このように、剛平面と拡散面による反射音場で、受音点距離を同一としてその距離を変化させたとき、両者の比較で弁別閾(ある刺激差をもった2つの刺激を提示したとき、その提示回数の50%だけ気づかれるような刺激差[15])となる受音点距離を、その拡散面の弁別距離と定義する。繰り返し数1-11、受音点距離をFig.8と同様に設定し、剛平面との一対比較の聴感実験により得られた違い判定率を正規確率紙上にプロットし、その補間曲線による、違い判定率50%での弁別距離を求めた。結果はFig.9のようになり、今回対象とした平面波の垂直入射のケースでは、凹凸の繰り返しが11程度までの拡散性反射面では、面から約4m以上離れば通常の平面による反射と、聴感上区別が付かなくなることがわかる。

#### 4. まとめ

周期的拡散面によって生じる音場の特異性と、その聴感上の影響を調べるため、スケールモデルによる実測、無限大周期理論による拡散モデルと凹凸の有限な繰り返しをもつ拡散モデルを使用した反射・拡散音場の解析、及び、これらのモデルから得られたインパルス応答と実音源との畳み込みによる試験音を用いた聴感実験が行われた。得られた結果は以下のように要約される。

- ・擬似的な周期性を持つような面(今回のケースでは繰り返し数3以上)であれば、拡散が生じる最低周波数(拡散限界周波数)は、無限大周期理論から得られる簡単な予測式が適用できる。
- ・周波数軸上で有効な拡散となる領域が増える(拡散限界周波数が低域に移行する)につれ、拡散性反射による音場は通常の平面からの反射に比べて聴感上の違いが大きくなる。
- ・受音点が拡散性反射面に近づくとつれ、平面の場合と比較して、その音場の聴感上の違いはより明瞭になる。
- ・今回対象としたケース(567Hz以上の周波数域で最大の拡散性を有し、繰り返し数11までの拡散性反射面)に限れば、面から約4m以上離れば、通常の平面からの反射による音場との区別は付かなくなる。

この4mという距離は反射の遅れ時間では24msに相当し、それは直接音と単一の反射波によるカラーレーションの知覚閾値[16]よりも小さな値となる。このあたりに周期的拡散面による音場

のカラーレーションに関する知覚の特異性を探っていくキーがあるのかもしれない。周期的構造を持つ拡散性反射面を安心して使える条件を確定していたためには、今後、この視点も含め、繰り返し数を増やしていったとき、物理現象として、また聴感上、どの程度で真の周期との接点があるのかなどを探っていく必要がある。

#### 参考文献

1. D. Takahashi, Development of optimum acoustic diffusers, *J. Acoust. Soc. Jpn.(E)*, 16, 51-58(1995)
2. D. Takahashi, A design method for optimum acoustic diffusers in Music and Concert Hall Acoustics (London: Academic Press,1996), 181-190.
3. T. J. Hargreaves, T. J. Cox, Y. W. Lam and P. D'Antonio, Surface diffusion coefficients for room acoustics: Free-field measures *J. Acoust. Soc. Am.*, 108, 1710-1720(2000).
4. F. A. Bilsen, Repetition pitch and its implication for hearing theory, *Acustica*, 22, 63-73(1969/70)
5. H. Haas, Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache, *Acustica*, 1, 49-58(1951).
6. M. Barron, Bass sound in concert auditoria, *J. Acoust. Soc. Am.* 97, 1088-1098(1995).
7. L. L. Beranek, *Music, Acoustics & Architecture*. (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1962).
8. M. Barron, *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. (London: E & FN SPON, 1993).
9. T. J. Cox, W. J. Davies and Y.W.Lam, The sensitivity of listeners to early sound field changes in auditoria, *Acustica*, 79, 27-41(1993).
10. R. R. Torres and M. Cleiner, Audibility of diffusion in room acoustics auralization: An initial investigation, *Acustica-acta acustica*, 86, 919-927(2000).
11. Lord Rayleigh, On the dynamical theory of gratings, *Proc. of Royal Soc. London*, A79, 399-416 (1907).
12. A. Wirgin, Reflection from a corrugated surface, *J. Acoust. Soc. Am.*, 68, 692-699(1980).
13. Y. Matsumura and D. Takahashi, Subjective effects of sound fields due to periodic-type diffusers, *J. Acoust. Soc. Jpn.(E)*, 21, 229-231(2000).
14. D. Takahashi, Y. Kato and K. Sakamoto, Sound fields caused by diffuse-type reflectors with periodic profile, *J. Acoust. Soc. Jpn.(E)*, 21, 131-143(2000).
15. J. P. Guilford, *Psychometric Methods*, (New York: McGraw-Hill, 1954).
16. B. S. Atal, M. R. Schroeder and H. Kuttruff, Perception of coloration in filtered Gaussian noise, Short-time spectral analysis by the ear, *Proc. 4th ICA, Copenhagen*, Paper H31(1962).