

# リブ形状の仕上げ面による反射音の特性

縄岡 好 人 渡 辺 充 敏  
平 野 滋

## Characteristics of Reflected Sound from a Ribbed Wall

Yoshihito Nawaoka Mitsutoshi Watanabe  
Shigeru Hirano

### Abstract

In a hall with ribbed walls or ceilings, unusual sounds, somewhat like tweeting, often occur from handclapping or drumplaying, to disturb speech or music. Model tests and numerical estimations were carried out for rib spacings which were equal and which were a quadratic sequence of numbers, a form of quasi-random sequence of numbers. The conclusions are as follows: ① The acoustic problems arise under the condition that the reflected sounds successively reach the listening point more than 30 msec later than arrivals of direct sounds. ② The frequency response of these reflected sounds has marked components of 2 to 3 kHz. ③ The quasi-random periodic arrangement of ribs is effective for controlling the beforementioned acoustic problems and it can diffuse sounds more than with equal spacing. ④ The estimated values are very close to the experimental values.

### 概 要

壁や天井がリブ形状であるホールなどにおいては、例えば拍手やドラムスなどの音に対してヒュンヒュンといった異常音に加わって聞こえ、演奏やスピーチの妨げとなることがある。このような音響障害の原因となる反射音の特性を把握しその防止方法を得る目的で、リブ間隔が等しい場合と擬似ランダム数列の一つである平方剰余数列である場合について模型実験と数値解析を行なった。その結果、以下の結論が得られた。

① 聴感上異常音が認められる受音点の時系列パターンは、反射音が直接音に約 30 msec 以上遅れて次々と到着するパターンが観測され、② その周波数特性は、2~3 kHz 成分が顕著に卓越している。③ 剰余数列のリブ間隔は、その反射音性状が等間隔の場合に比べてより拡散的となり、異常音発生防止に有効である。④ 数値解析結果は実験結果と良く対応しており、擬似ランダム間隔のリブ形状面による反射音の特性予測に有効な手法であると思われる。

## 1. はじめに

リブによる内装仕上げは、体育館やスタジオなどで吸音材の表面処理方法としてよく用いられるばかりでなく、意匠上から、大宴会場やホールなどの壁、天井に用いられることもある。しかし、音響性能が重視されるホールなどにおいてリブ形状の仕上げ面を採用したために、例えば拍手などの音に対してヒュンヒュンといった異常音に加わって聞こえ、演奏やスピーチの妨げとなる音響障害が発生した例も報告されている<sup>1)</sup>。これは、波形やリブ状の仕上げ面のように凹凸が等間隔に並んでいる反射面は光学分野でよく用いられる回折格子と同じ働きをするので、音が斜めに入射した場合に特定の周波数の音が方向によって選択的に反射されるためであるといわれている。従って、凹凸の間隔をランダムとすれば、このような音響障害は防止できるはずであるが、どの程度のランダム度があれば良いのかは未だ明確にされていない。

この研究では、ホールの壁面に意匠上から音響的に剛なリブ形状面が採用された場合を想定し、等間隔リブ形状の

実大模型実験によって異常音の発生を確認し、その対策方法を得る目的で、リブ間隔を擬似ランダム数列の一つである平方剰余数列とした場合について模型実験を行なった。また、リブ形状面による反射音の特性を予測する目的で、数値解析を試みた。

この報告は、これらの実験から得られた音響障害となる反射音の特性およびリブ間隔を剰余数列とした場合の反射音の性状の変化について述べ、更に計算値と実験値を比較した結果について述べるものである。

## 2. 実験方法

図-1は、リブ形状面に音が入射し、反射する状況の模式図である。座標は左手座標系とし、入射および反射角度はY軸を0°とし時計回りを正方向とする。

実験は先ず、音響障害の原因となる反射音の特性を実大模型によって把握した。実大模型は、7.2 m×1.8 mの大きさで50 mm×32 mmのリブ材が12 cmピッチで等間隔に並んで取り付けられている。実験は屋外で実施し、音源スピーカーには、屋外騒音や測定対象以外からの不要な反射音

が測定データに及ぼす影響を小さくする目的で、大きな音響エネルギーを実験対象壁に集中できる定指向性ホーンスピーカを用いた。音源スピーカは、壁中心から8.5mの点に入射角度が $-60^\circ$ になるように設置した。この際、数種の音源を用いて障害の起る音源の種類、聴取位置を実際に耳で確認しながら、壁の中心から8m離れた円周上の受音点において $15^\circ$ おき計11点について時系列パターンを測定した。

つづいて、実大模型で確認された音響障害を防止する方法を得る目的で、リブの間隔を擬似ランダム数列の一つである剰余数列とした場合について、1/5縮尺相当の模型を製作し、無響室で実験を行なった。

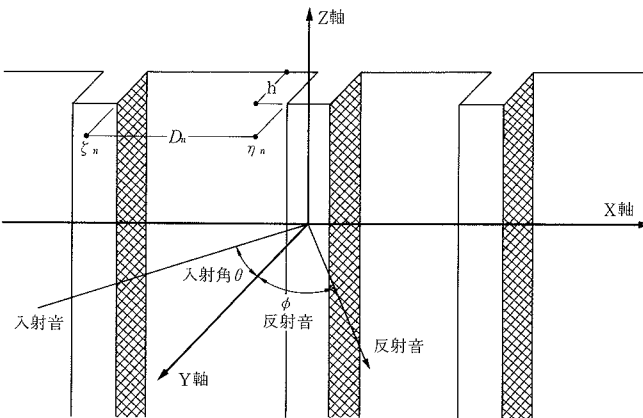


図-1 リブ形状面

模型は、 $2.4\text{m} \times 1.2\text{m}$ の大きさで、リブ材は $14\text{mm} \times 14\text{mm}$ とし、リブの間隔は剰余数列に基づいて決定した。実験したリブの間隔を表-1に示す。実験は、これらの6タイプのリブ形状壁およびリブのついていない平板について行なった。音源スピーカにはコーン型のツイータを用い、入射角度を $-30^\circ$ と $-60^\circ$ の2通りとし、壁中心から2m離して設置した。また、受音用マイクは壁中心から半径2mの円周上に設置し、 $5^\circ$ おきに計37点を各タイプについて測定した。

なお、剰余数列とは、奇数の素数をN、0およびNより小さい自然数をnとし、nの自乗の並びをNで割ったときの負でない最小の剰余を $S_n$ とすると、数列 $\{S_n\}$ を剰余数列という。例えば、 $N=5$ のとき、 $n=0, 1, 2, 3, 4, 5$ であるから、nの自乗の並びは $n^2=0, 1, 4, 9, 16, 25$ となり、 $n^2$ をNで割ったときの負でない最小の剰余として、 $S_n=0, 1, 4, 4, 1, 0$ が得られる。こ

表-1 製作した模型のリブ間隔

模型番号	剰余数列の周期	一周期内のリブ間隔	d=28mm
模型-1	N=3	d, d	
模型-2	N=5	d, 4d, 4d, d	
模型-3	N=7	d, 4d, 2d, 2d, 4d, d	
模型-4	N=11	d, 4d, 9d, 5d, 3d, 3d, 5d, 9d, 4d, d	
模型-5	N=13	d, 4d, 9d, 3d, 12d, 10d, 10d, 12d, 3d, 9d, 4d, 1d	
模型-6	N=17	d, 4d, 9d, 16d, 8d, 2d, 15d, 13d, 15d, 2d, 8d, 16d, 9d, 4d, d	

のとき、剰余数列は $\{0, 1, 4, 4, 1, 0\}$ であり、数列の周期は $N=5$ であるという。

時系列パターンの測定には、音源信号として $25\mu\text{sec.}$ のパルスを用いた。マイクロホンからの信号は、FFTアナライザで同期加算を加えることによって雑音成分を低減させた後、実大模型では、解析上限周波数10kHz、観測時間80msec.、1/5縮尺模型では、それぞれ50kHz、16msec.としてA/D変換し、デスクトップコンピュータに取り込んだ。取り込んだデータから直接音および不要な反射音を時系列上で切り取ることによって壁からの反射音のみを抽出し、これを同条件で別途測定した直接音で割り算を行ない伝達関数を求めた。図-2に測定ブロックダイアグラムを示す。

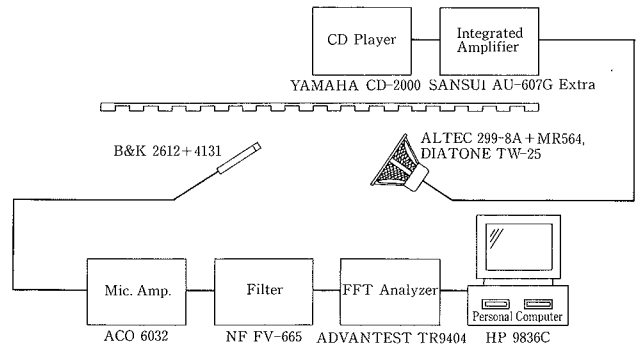


図-2 測定ブロックダイアグラム

### 3. 数値解析方法

矩形の凹凸が周期的に並んでいる面に平面波が入射した場合の解析は、bruijnによって既になされている<sup>2)</sup>。

ここでは、この解析方法を参考として、今回実験した等巾で間隔が剰余数列であるリブ形状面について解析を行なう。

リブ形状の面はZ方向に無限であるとして、X-Y平面の二次元問題として考える。

空間を音が伝搬する空間(空間1)と面内の凹部空間(空間2)の二つに分け、音響的に剛なリブ形状の面に入射角 $\theta$ で単位振幅の平面波が入射したと仮定する。空間1, 2における速度ポテンシャルをそれぞれ $\Phi_1, \Phi_2$ とすると、次の波動方程式が成り立つ。

$$\partial^2\Phi_1/\partial x^2 + \partial^2\Phi_1/\partial y^2 = (1/C^2)(\partial^2\Phi_1/\partial t^2)$$

$$\partial^2\Phi_2/\partial x^2 + \partial^2\Phi_2/\partial y^2 = (1/C^2)(\partial^2\Phi_2/\partial t^2)$$

満足すべき境界条件は、 $\nu$ を整数、Lを一周期の長さ、 $\xi_n, \eta_n$ を一周期内の任意凹部の座標として、以下の5条件である。

- (1)  $x = \nu L + \xi_n$  or  $x = \nu L + \eta_n$  &  $-h < y < 0$  :  $\partial\Phi_2/\partial x = 0$
- (2)  $\nu L + \xi_n < x < \nu L + \eta_n$  &  $y = -h$  :  $\partial\Phi_2/\partial y = 0$
- (3)  $\nu L + \xi_n < x < \nu L + \eta_n$  &  $y = 0$  :  $\Phi_1 = \Phi_2$
- (4)  $\nu L + \xi_n < x < \nu L + \eta_n$  &  $y = 0$  :  
 $\partial\Phi_1/\partial y = \partial\Phi_2/\partial y$
- (5)  $(\nu L - 1) + \eta_n < x < \nu L + \xi_n$  or  $\nu L + \eta_n < x < (\nu L + 1) + \xi_n$  &  $y = 0$  :  $\partial\Phi_1/\partial y = 0$

反射音の特性は、これらの境界条件を満足するような波動方程式の解として  $\Phi_1$  を求め、反射音の振幅を  $R_{rn}$  で表わすと、伝達関数  $H$  として次式で与えられる。

$$H = \sum_n \sum_r R_{rn} e^{j(\omega \Delta t + \alpha_r x - \beta_r y)} / e^{j(\alpha_0 x - \beta_0 y)}$$

但し、

$$R_{rn} = \begin{cases} 1 - \sum_p \chi_p A_p (1 - e^{-2j\chi_p h}) U_{p0} / (L\beta_0) & (r=0) \\ \sum_p \chi_p A_p (1 - e^{-2j\chi_p h}) U_{pr} / (L\beta_r) & (r \neq 0) \end{cases}$$

$$U_{pr} = i\alpha_r \{ e^{-j\alpha_r \xi_n} - (-1)^p e^{-j\alpha_r \zeta_n} \} / \{ \alpha_r^2 - (p\pi/D_n)^2 \}$$

$\omega$  : 角振動数 (Hz)

$\Delta t$  : 反射音の直接音に対する遅延時間 (秒)

$C$  : 音速 (m/sec.)

$U_{pq}^*$  :  $U_{pq}$  の共役複素数

$k = \omega/C$

$\alpha_0 = k \sin \theta$

$\beta_0 = k \cos \theta$

$\alpha_r = \alpha_0 + (2\pi r/L)$  ( $r=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ )

$\beta_r^2 = k^2 - \alpha_r^2$

$D_n = \eta_n - \zeta_n$

$\chi_p^2 = k^2 - (p\pi/D_n)^2$  ( $p=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ )

変数  $A_p$  は理論的には、マトリックス表示を用いて、 $[M_{pq}][A_p] = [Q_p]$  で表わされる無限連立 1 次方程式の解として与えられる。実際に計算を行なうにあたっては、無限連立 1 次方程式を有限連立 1 次方程式で近似する必要があり、今回は 10 元連立 1 次方程式の解として  $A_p$  を求めることとした。

$$M_{pq} = \begin{cases} D_n(1 + e^{-2j\chi_0 h}) + \chi_0(1 - e^{-2j\chi_0 h}) \cdot \sum_s U_{os} U_{os}^* / (L\beta_0) & (p=q=0) \\ D_n(1 + e^{-2j\chi_p h}) + 2\chi_p(1 - e^{-2j\chi_p h}) \cdot \sum_s U_{qs} U_{qs}^* / (L\beta_s) & (p=q) \\ 2\chi_p(1 - e^{-2j\chi_p h}) \sum_s U_{qs} U_{ps}^* / (L\beta_s) & (p \neq q) \end{cases}$$

$$Q_0 = 2U_{00}^* \quad (p=0)$$

$$Q_p = 4U_{p0}^* \quad (p \neq 0)$$

#### 4. 結果

音響障害の発生を聴感上で確認する目的で行なった実大模型実験から、以下のことがわかった。

パルス音源に対して、「ヒュンヒュン」という異常音は、反射角度  $0^\circ$  付近から聞こえ始め音源スピーカ側に行く程

強くなり、反射角度  $-45^\circ$  で最も強く聞こえる。また、この異常音は、拍手、バスドラムなどの継続時間の短い音源信号で発生し、弾楽器、ティンパニなどの比較的継続時間の長い音源信号ではそのような異常音は聞こえない。

図-3-1, 3-2 は、実大模型実験から得られた反射音時系列データの例であり、聴感上異常音が認められた受音点 (反射角度  $-45^\circ$ ) と認められなかった受音点 (反射角度  $+45^\circ$ ) のデータを示したものである。音響障害の起らない受音点の反射音は短音として到達しているのにたいして、障害の起る受音点の反射音は直接音に 30 msec 以上遅れて次々と到達しており、尾ひれがついたような時系列となっている。

図-4 は、同じ受音点での周波数特性を示したものである。障害が生じている受音点では、2~3 kHz 成分が顕著に卓越しており、障害を起こす反射音は、この帯域に集中しているものと思われる。

図-3, 4 には、数値解析結果も示している。時系列データにおける反射音の到達パターン、周波数特性において反射角度  $+45^\circ$  ではなかった 2~3 kHz 前後の周波数が  $-45^\circ$  では生じていることなど、計算値は実験結果の性状と良く対応している。

次に、音源の種類と障害との関係を見るため、実大模型

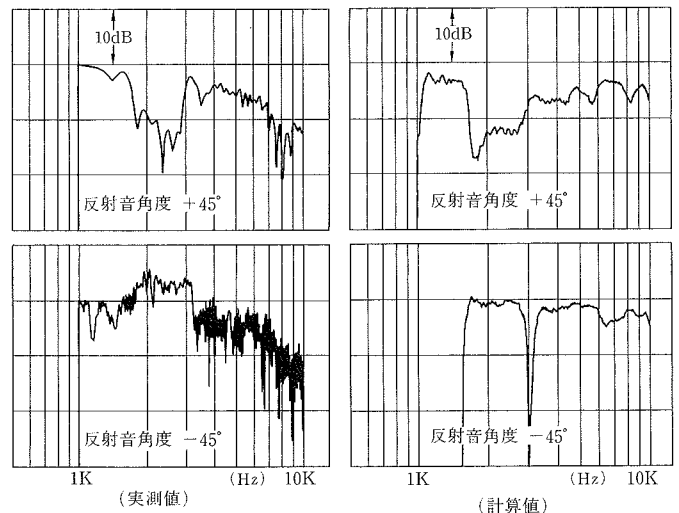


図-4 反射音の周波数特性

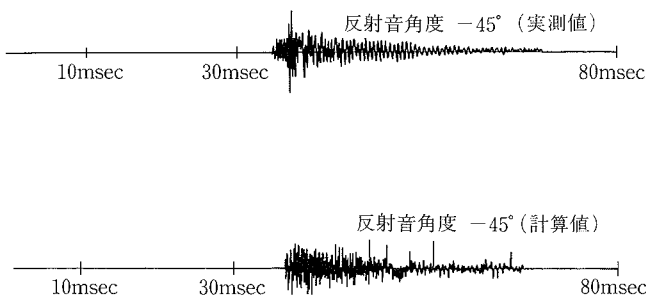


図-3-1 障害がある場合の反射音時系列

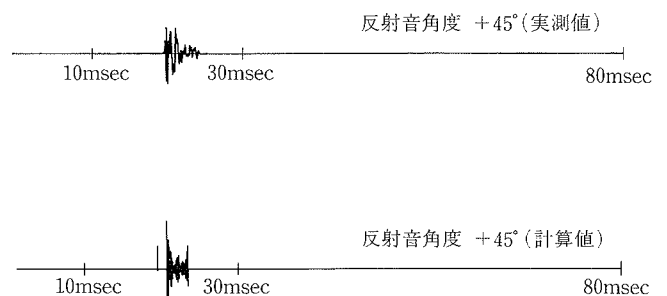
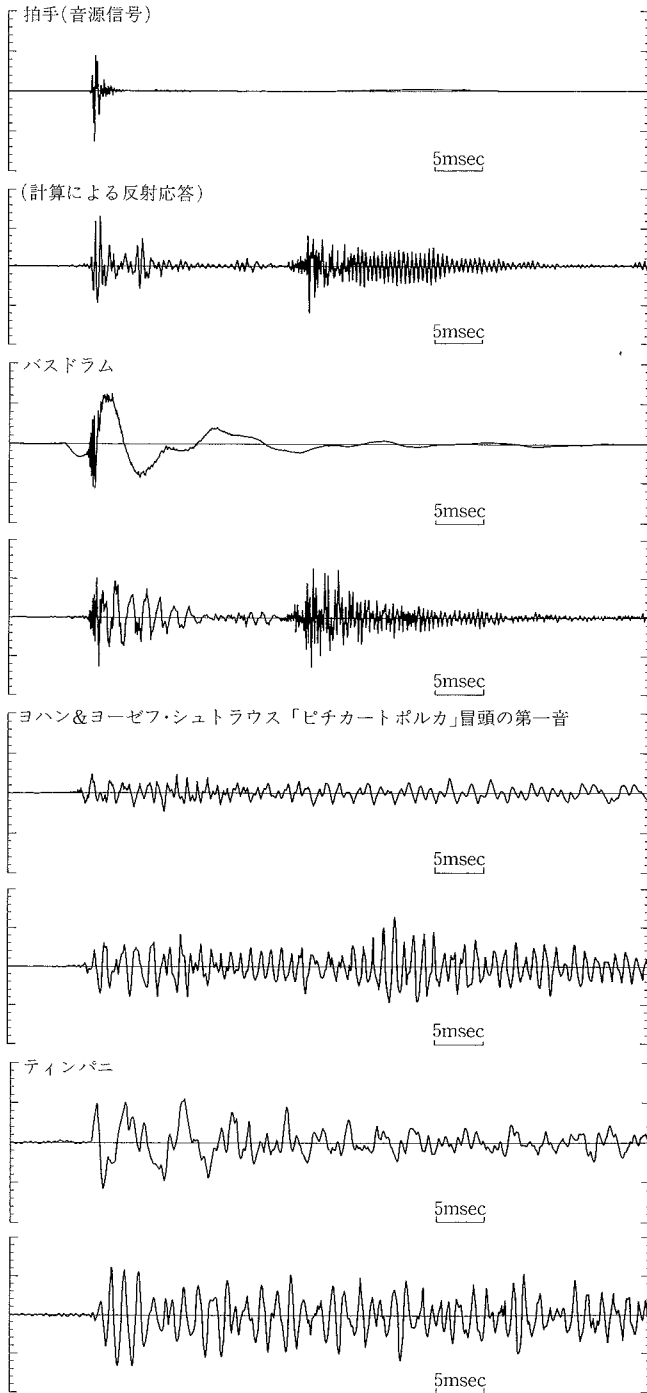
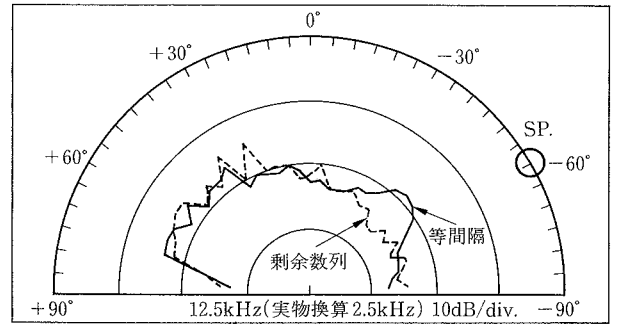


図-3-2 障害がない場合の反射音時系列



図—5 反射音時系列の音源信号による違い

の反射角度 $-45^\circ$ の時系列データに無響室で録音された楽器等の音源信号を畳み込み、その変化を観察した。図—5に音源信号と畳み込んだ結果の時系列データを示す。拍手、バスドラムなどの継続時間の短い音源信号では壁からの反射音が直接音と分離して、障害を起こす特徴的な波形を見ることができるが、弦楽器、ティンパニなどの継続時間の長い音源信号では、そのような波形は見られず、障害は生じないことが予想でき、聴感とも一致する結果となっている。また、同じく低域に主成分を持つ打楽器でありながら、バスドラムでは障害が生じ、ティンパニでは生じないこと



図—6 等間隔と剰余数列（周期5）間隔の反射性状比較から、音源信号の継続時間は障害発生に関する主要因の一つであるといえる。

また、音波が壁面に入射する角度も障害発生に関する主要因の一つと考えられるが、今回の実験結果では、入射角度 $-30^\circ$ の場合よりも、音波がより斜めに入射する $-60^\circ$ の方が異常音が明瞭に聞こえる受音点の範囲は広い。

異常音の発生を防止する方法については、リブ間隔を剰余数列とした場合の実験結果から、剰余数列のリブ間隔が障害防止に有効であり、実験したなかで最もランダム度の小さい周期5のリブ壁でも、等間隔で明瞭に聞こえた異常音はわずかに検知される程度まで改善されることがわかった。

図—6は、リブ間隔が等間隔である場合と剰余数列(N=5)である場合の反射性状であり、伝達関数から反射音の $1/3\text{oct}$ .レベルを各反射角ごとに求めて表示したものである。等間隔では音源スピーカー方向に境界反射以外の強い反射音が見られるが、剰余数列間隔では特異な反射音が消え、壁面での反射はより拡散されていることがうかがえる。

## 5. むすび

この研究によって、リブ形状による音響障害の発生条件が明らかとなり、剰余数列のリブ間隔が障害防止に有効であることがわかった。また、計算による予測結果は、実験結果の性状をよく表わしているもので、周期的ではあるが一周期内には任意の間隔のリブを有するような形状による反射音性状の予測が可能となった。

今後は、擬似ランダム間隔のリブ形状のうち意匠的に優れたものについて検討を加えていき、舞台からの音が斜めに入射することから音響障害の発生する可能性があるため採用がタブー視されていた側壁や天井にも、リブ形状が採用できるようにしていきたい。

## 参考文献

- 1) 永田 穂：等間隔リブ構造からの回折反射による異常音の発生について、音響技術，Vol. 14, No. 1, p. 7 (1985)
- 2) A. Bruijn: Anomalous Effects in the Sound Absorption of Periodically Uneven Surfaces, ACUSTICA, Vol. 24, No. 2 p. 75~84 (1971)