

# 壁面の拡散性を考慮した幾何音響シミュレーション

—乱反射率の入射角依存性の反映—

Geometrical acoustic analysis taking into account incident angle dependence of scattering coefficient

学籍番号 096754

氏名 杉原 慎一郎 (Sugihara, Shinichiro)

指導教員 佐久間 哲哉 准教授

## 1. はじめに

音場の解析手法には波動方程式を数値的に解く波動数値解析と音線追跡により、幾何的に解く幾何音響解析がある。幾何音響解析は波動数値解析に比べ厳密性に欠けるが、計算資源、計算時間の観点から大規模空間を扱う際の現実的手法である。この手法を用いた従来の幾何音響シミュレーションでは、壁面の音響特性として吸音率のみを扱っていたが、近年では、鏡面反射と乱反射を区別して後者のエネルギーの割合を乱反射率と定義し、その数値を反映させ、壁面の拡散性の影響を検討可能になっている。市販の幾何音響シミュレーションで導入が進む壁面の乱反射率は、吸音率と同様、測定法も整備されたランダム入射時の値が用いられる。しかし、一般的な拡散体であるリブ構造などの乱反射率は入射角依存性が強く、室内音響特性への影響も大きいことから、その入射角依存性を反映した幾何音響シミュレーションが望まれる。一方、斜入射乱反射率は実測が困難であるのに対し、波動数値解析により比較的容易に求められる<sup>[1]</sup>。本研究では、斜入射乱反射率を導入した幾何音響シミュレーションを試み、室内音響指標に及ぼす影響を考察する。まず、導入精度として、斜入射乱反射率の方向平

均化による室内音響指標の計算誤差を検討する。次に、斜入射乱反射率の反映結果として、リブ設置方向による室内音響指標の計算値の差異を検討する。最後に、実測値との比較を通して手法の妥当性を検証する。

## 2. 数値解析手法

斜入射乱反射率は BEM により算出されるデータを用いた (Fig. 1)。幾何音響シミュレーション手法は音線法を用いた。音線法への乱反射率の導入は、各音線の壁面反射時に入射角に応じて確率的に鏡面反射か乱反射を与え、一度乱反射した音線は以降乱反射を続けるものとした。乱反射はランベルトの余弦法則に従うものとした。

## 3. 斜入射乱反射率のブロック平均

**検討方法** 既報<sup>[2]</sup>で算出されている矩形波・正弦波断面の一次元周期構造壁面 (Fig. 2) の斜入射乱反射率データ (2,344 方向、1, 2, 4 kHz) を元に、入射方向によるブロック平均を施し、幾何音響シミュレーションへの導入を試みる。ブロック平均は、天頂角  $\theta$ 、方位角  $\varphi$  を各々  $N_\theta, N_\varphi$  分割し、ブロック内の平均値を算出した (Fig. 3)。このブロック平均による入射角依存性の分布劣化を定量化するため、元データに対するブロック平均値の統計入射平均二乗誤差を算出する。なお、誤差はブロックメッシュの

方位にも依存するため、メッシュを回転して方位角度毎に算出した。

**結果と考察** Fig. 4 にメッシュ方位を変えた場合の最大・最小・平均誤差を示す (灰色線はランダム入射値の誤差)。全体として、天頂角分割数 ( $N_\theta$ ) より方位角分割数 ( $N_\phi$ ) の方が誤差への影響が大きく、ランダム入射値の誤差が大きい (入射角依存性が強い) 場合にその傾向が顕著である。全ケースで、メッシュ方位の影響は  $(N_\theta, N_\phi) = (4, 16)$  程度で微小となり、誤差は 0.15 以下に収束している。従って、以降の幾何音響シミュレーションによる検討では、粗いブロックとして  $(N_\theta, N_\phi) = (2, 4)$ 、細かなブロックとして  $(N_\theta, N_\phi) = (4, 16)$  を用いることとする。

#### 4. 幾何音響シミュレーションへの乱反射率入射角依存性の反映

##### 4.1 ブロック平均による室内音響指標の計算誤差

**検討方法** 解析モデルは  $20\text{ m} \times 40\text{ m} \times 20\text{ m}$  (h) の直方体室、天井・床のみ吸音性、周壁は反射性とし、前節の周期構造壁をリブが水平となる向きで想定した (Fig. 5)。乱反射率は元データ、ブロック平均値、ランダム入射値の各々を用い、受音点 6 点のインパルス応答から室内音響指標を算出した。

**結果と考察** 各指標について、乱反射率の元データを用いた計算結果に対するブロック平均値、ランダム入射値を用いた場合の絶対誤差 (受音点平均) を Table. 1 に示す。表中、灰色は弁別閾以上の誤差を表し、 $G$ ,  $C_{80}$ ,  $LF$  では概ね弁別閾以下であるのに対し、 $T_{20}$ ,  $EDT$  では弁別閾を上回るケースが多い。特に、ランダム入射値、粗いブロック平均値を用いた場合、 $T_{20}$  の誤差が著しく大きくなるケースもみられる。Fig. 6 に誤

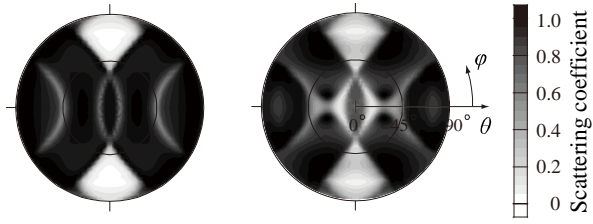


Fig. 1 Examples of directional scattering coefficients.

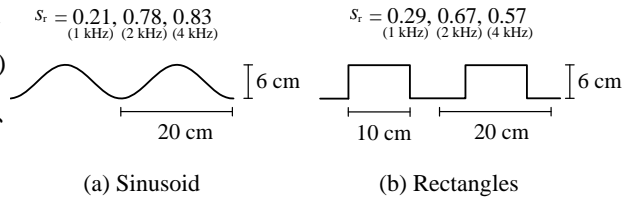


Fig. 2 Two types of samples with periodical surfaces.

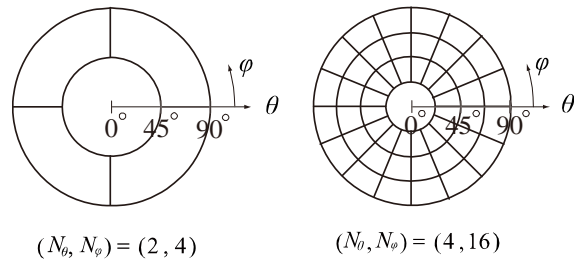


Fig. 3 Examples of directional blocks for averaging scattering coefficients.

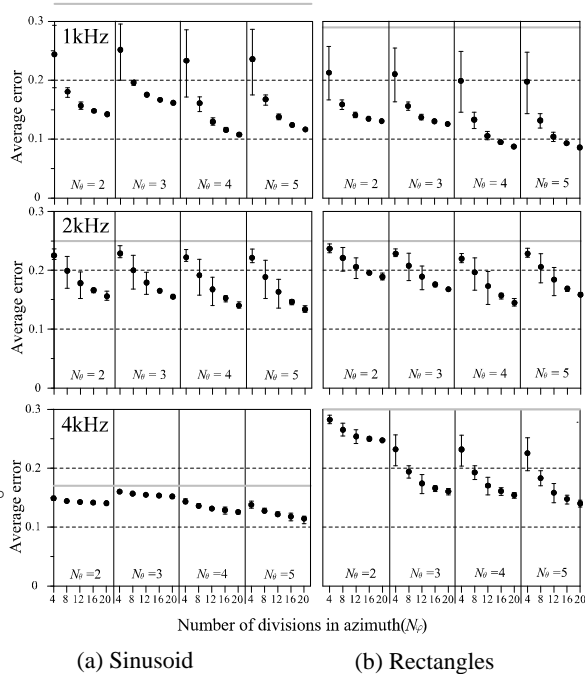


Fig. 4 Average errors of block average scattering coefficients to original directional values. Gray lines represent errors of random-incidence values.

差が顕著となった 1 kHz の  $T_{20}$ , EDT を示す。元データの場合に対してランダム入射値の場合に  $T_{20}$  は大幅に減少することから、乱反射率の入射角依存性を無視することで、音場の拡散性が過大に高められたものと推察される。ブロック平均値の場合でも同様に  $T_{20}$ , EDT は過小評価の傾向にあり、拡散性の低い室内音場では、より詳細なブロック平均値または元データの適用が必要と考えられる。

#### 4.2 リブ設置方向による室内音響指標の計算値の差異

**検討方法** 前節と同様の解析モデルで、前節の矩形波断面の周期構造壁をリブが床面に対し水平 (以下、リブ水平) とする向きと床面に対し垂直 (以下、リブ垂直) とする向きに想定した (Fig. 5)。乱反射率は前節と同様とし、受音点 6 点のインパルス応答を求め、室内音響指標を算出した。

**結果と考察** Fig. 7 に差が顕著となった 1 kHz の  $T_{20}$ , EDT を示す。 $T_{20}$ , EDT とも、元データと細かなブロック平均値の場合にリブ水平がリブ垂直より長い。斜入射乱反射率の入射角依存性からリブ水平では、リブ垂直より床面に対し水平な方向の音線

が残り、反射性の側壁間、前壁と後壁間で往復反射を繰り返し、エネルギー減衰が遅いことが原因と考えられる。

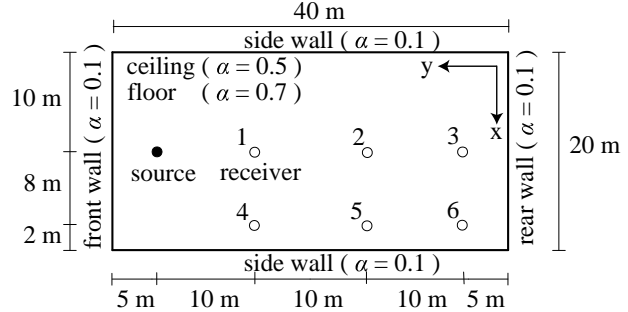


Fig. 5 Test model of a hall with diffuse walls.

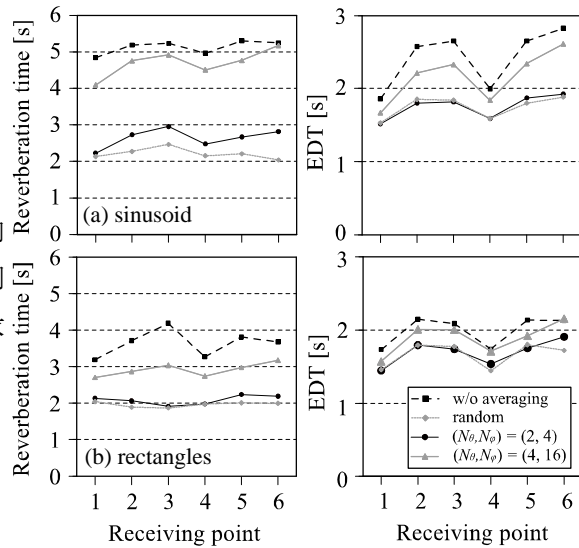


Fig. 6 Reverberation time and EDT at 1kHz calculated with different scattering coefficients (original directional, block averaging and random-incidence values).

Table. 1 Average differences of room acoustic indices calculated with block averaging and random-incidence scattering coefficients against with original directional values.

| acoustic indices | parameters of averaging            | 1kHz     |            | 2kHz     |            | 4kHz     |            | jnd  |
|------------------|------------------------------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|------|
|                  |                                    | sinusoid | rectangles | sinusoid | rectangles | sinusoid | rectangles |      |
| $T_{20}$         | random                             | 56.8 %   | 45.5 %     | 2.5 %    | 5.6 %      | 7.6 %    | 9.7 %      | 5%   |
|                  | $(N_{\theta}, N_{\phi}) = (2, 4)$  | 48.4 %   | 42.2 %     | 2.6 %    | 6.6 %      | 5.0 %    | 9.4 %      |      |
|                  | $(N_{\theta}, N_{\phi}) = (4, 16)$ | 8.4 %    | 19.5 %     | 3.8 %    | 6.8 %      | 5.4 %    | 10.8%      |      |
| EDT              | random                             | 27.0%    | 16.5%      | 5.5%     | 5.8%       | 3.8%     | 3.7%       | 5%   |
|                  | $(N_{\theta}, N_{\phi}) = (2, 4)$  | 26.9%    | 15.0%      | 7.3%     | 4.1%       | 2.8%     | 5.7%       |      |
|                  | $(N_{\theta}, N_{\phi}) = (4, 16)$ | 10.6%    | 5.5 %      | 4.9%     | 5.0%       | 3.2%     | 4.2%       |      |
| G                | random                             | 0.8 dB   | 0.7 dB     | 0.6 dB   | 0.5 dB     | 0.2 dB   | 0.4 dB     | 1 dB |
|                  | $(N_{\theta}, N_{\phi}) = (2, 4)$  | 0.6 dB   | 0.6 dB     | 0.5 dB   | 0.5 dB     | 0.1 dB   | 0.4 dB     |      |
|                  | $(N_{\theta}, N_{\phi}) = (4, 16)$ | 0.1 dB   | 0.2 dB     | 0.3 dB   | 0.2 dB     | 0.2 dB   | 0.4 dB     |      |
| $C_{80}$         | random                             | 1.2 dB   | 0.8 dB     | 0.4 dB   | 0.3 dB     | 0.5 dB   | 0.3 dB     | 1 dB |
|                  | $(N_{\theta}, N_{\phi}) = (2, 4)$  | 0.7 dB   | 0.6 dB     | 0.6 dB   | 0.3 dB     | 0.4 dB   | 0.3 dB     |      |
|                  | $(N_{\theta}, N_{\phi}) = (4, 16)$ | 0.5 dB   | 0.5 dB     | 0.4 dB   | 0.2 dB     | 0.5 dB   | 0.4 dB     |      |
| LF               | random                             | 0.023    | 0.021      | 0.041    | 0.037      | 0.037    | 0.061      | 0.05 |
|                  | $(N_{\theta}, N_{\phi}) = (2, 4)$  | 0.019    | 0.028      | 0.034    | 0.037      | 0.034    | 0.051      |      |
|                  | $(N_{\theta}, N_{\phi}) = (4, 16)$ | 0.007    | 0.015      | 0.024    | 0.019      | 0.033    | 0.049      |      |

### 4.3 実測値との比較による手法の妥当性の検証

**検討方法** 既報<sup>[3]</sup>による実測値と比較するため、解析モデルは 6 m × 4.8 m × 3.6 m (h) の直方体室、天井のみ吸音性、周壁・床は反射性とし、側壁 2 面に矩形波断面の一次元周期構造壁 (Fig. 8) をリブ垂直、リブ水平の向きで想定した (Fig. 9)。乱反射率は前節と同様とし、受音点 9 点のインパルス応答を求め、室内音響指標を算出した。

**結果と考察** 1 kHz, 2 kHz の  $T_{20}$  を Fig. 10 に示す。1 kHz のリブ水平の場合、実測値と対応するが、その他のケースでは、元データ、ブロック平均値を用いた場合に実測値より  $T_{20}$  を過小評価する傾向にある。計算値は Eyring の残響式の結果に近づくことから、実測値より拡散性を過大評価する傾向にある。反射波の指向特性にランベルトの余弦法則を用いるため、現実の反射波の挙動と異なることが原因と考えられる。

### 5. まとめ

拡散性の低い直方体室で斜入射乱反射率を導入した幾何音響シミュレーションを試み、室内音響指標に及ぼす影響を検討した。

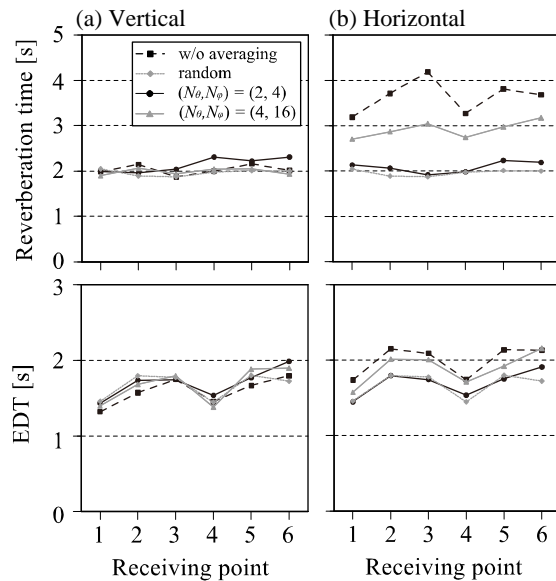


Fig. 7 Reverberation time and EDT at 1 kHz calculated with different directions of a diffuser.

乱反射率の入射角依存性を考慮することで残響時間・初期減衰時間は大きく変化し、斜入射乱反射率の導入には詳細な方向別データが必要であることが例示された。 $T_{20}$  は実測値と対応せず、反射波の指向特性を考慮した解析が望ましいと考えられる。

### 参考文献

- [1]Kosaka *et al.*, Acoust. Sci. Tech. 26, 136-144, 2005.
- [2]佐久間他, 建音研資, AA2005-39.
- [3]土屋他, 音講論(春), 2009.

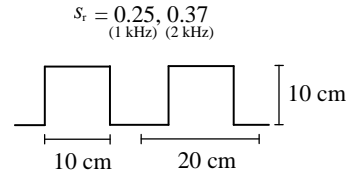


Fig. 8 Type of a sample with periodical surfaces.

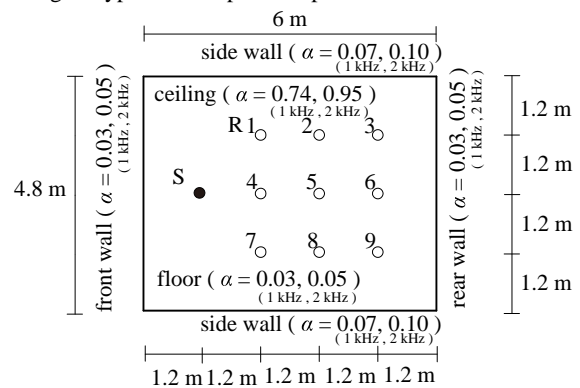


Fig. 9 Test model of a room with diffuse walls.

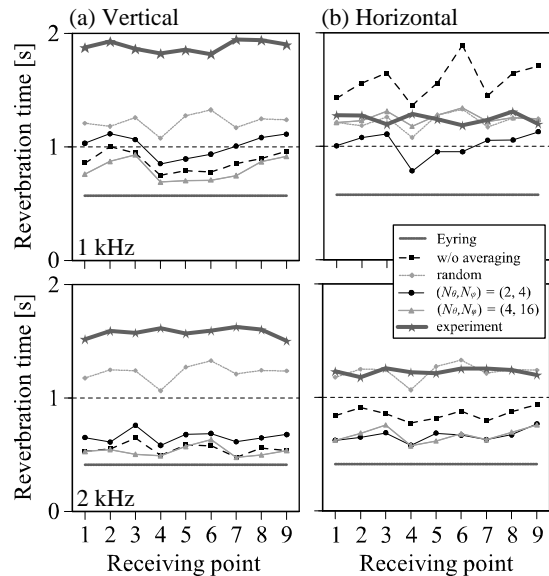


Fig. 10 Reverberation time at 1, 2 kHz calculated with different directions of a diffuser.