

2010 年度 修士論文

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

杉原 慎一郎
Sugihara, Shinichiro

2010 年 1 月 24 日

東京大学大学院新領域創成科学研究科
社会文化環境学専攻

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	乱反射率	2
1.2.1	乱反射率について	2
1.2.2	算出方法	3
1.3	既往関連研究	5
1.4	研究の目的	5
1.5	論文の構成	6
第 2 章	幾何音響解析アルゴリズム	7
2.1	はじめに	7
2.2	幾何音響解析手法について	7
2.3	音線法	8
2.3.1	音波の表現	8
2.3.2	境界面における音波の扱い	9
2.4	音線法の留意点	10
2.4.1	音線数・受音球の大きさ・室容積の関係	11
2.5	音線法の計算方法	13
2.5.1	計算条件の入力	14
2.5.2	音線追跡計算前の準備	16
2.5.3	音線追跡計算	18
2.5.4	計算結果の出力	21
2.6	室内音響指標について	21
2.6.1	各種室内音響指標	22
2.6.2	各指標の推奨範囲	23
2.7	まとめ	24

第 3 章	数値解析アルゴリズムに関する考察	25
3.1	はじめに	25
3.1.1	ランベルトの余弦法則について	25
3.2	反射ベクトルの生成方法について	26
3.3	壁面で反射する音線のエネルギー方向分布	28
3.3.1	音線数と到来音線のエネルギー方向分布の関係	28
3.3.2	壁面寸法と到来音線のエネルギー方向分布の関係	32
3.3.3	受信点位置と到来音線のエネルギー方向分布の関係	36
3.4	まとめ	39
第 4 章	斜入射乱反射率の方向平均化	41
4.1	はじめに	41
4.2	斜入射乱反射率のブロック平均	42
4.2.1	検討方法	42
4.3	結果と考察	46
4.4	まとめ	49
第 5 章	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	51
5.1	はじめに	51
5.2	斜入射乱反射率の導入が室内音響指標の計算値に与える影響	52
5.2.1	計算条件の設定	52
5.2.2	解析モデル	54
5.2.3	結果と考察	58
5.2.4	まとめ	65
5.3	ブロック平均による室内音響指標の計算誤差に関する検討	66
5.3.1	計算条件の設定	66
5.3.2	解析モデル	66
5.3.3	結果と考察	69
5.3.4	まとめ	71
5.4	リブ設置方向による室内音響指標の計算値の差異に関する検討	72
5.4.1	計算条件の設定	72
5.4.2	解析モデル	72
5.4.3	結果と考察	75
5.4.4	まとめ	85
5.5	実測値との比較による手法の妥当性の検証	86

5.5.1	測定結果について	86
5.5.2	計算条件の設定	86
5.5.3	解析モデル	87
5.5.4	結果と考察	90
5.5.5	まとめ	95
5.6	まとめ	96
第 6 章	総括	99
参考文献		101
謝辞		105

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

コンサートホールや劇場などの大空間からスタジオやオーディオルームといった小空間に至るまで、室内音響空間の壁面には多種多様な形状が用いられている。平滑な壁面に囲まれた直方体室で音を聞くと、平滑な平行壁面間で音が多重反射を繰り返すフラッターエコーなどの音響障害が生じる。それに対し、壁面に凹凸がある場合、初期反射音は幾何学的な反射点からではなく、壁面の広い範囲から到達する。音波がこの壁面の凹凸により反射する度に散乱されるため、室内で多数回反射を繰り返した後に、音響エネルギーの空間分布が均一になる。すなわち、初期反射音が支配的ではなく、後期残響音が側方、頭上、前方、後方などあらゆる方向から到来するよう感じられる。このように、壁面の凹凸は室形状、吸音率に並び、室内音響特性に大きく影響を及ぼすため、室内音響設計において重要な検討項目の一つである。このような壁面の凹凸による拡散現象は室の音響性能を左右する重要な要素であるだけに、音場予測に関して拡散現象の影響を考慮することが望まれる。

音場予測手法は実験的手法と数値解析手法に大きく二分される。状況に応じて使い分けが必要があるが、前者のメリットとしては容易にデータが得られることであるが、実験設備の手間がかかるなどデメリットもある。後者のデメリットは数値による誤差要因の把握が難しいなどであるが、メリットとしては、大掛かりな実験設備が不要、設計変更への対応が容易、理想的な条件での検討が可能、などが挙げられ、これらの理由から数値シミュレーションによる検討は非常に有効であると考えられる。

数値解析手法は波動音響解析手法と幾何音響解析手法に大別される。波動音響解析手法は、有限差分法 (Finite Difference Method : FDM) , 有限要素法 (Finite Element Method : FEM) , 境界要素法 (Boundary Element Method : BEM) 等に代表されるものである。これらはいずれも波動方程式の近似的 (数値的) 解法であり、理論的に波動性を考慮したものであることから、空間領域・時間 (周波数) 領域における高精度の予測が原理的に保証

される。しかし、解析対象となる建築空間は3次元空間であり、また、人間の可聴領域も広範なことから計算機の必要記憶容量や計算時間が膨大となるという大きな問題がある。近年は、大規模解析に関する検討も行われてはいるが[9, 10]、いずれも試行的段階であり、実用化の域には達していない。

一方、幾何音響解析手法は虚像法や音線法に代表されるもので、音の波動性を考慮せず、エネルギーの伝搬行程を幾何学的に取り扱う手法である。従って、波動音響解析手法に比べ厳密性に欠けることは否めないが、あまり多くの計算機資源を必要とせず、計算時間も非常に短いという大きな利点があり、大規模空間を扱う際の現実的手法として広く用いられている。詳細設計の段階など厳密な予測が必要となる場面では縮尺模型実験や波動音響解析手法に頼らざるを得ないが、基本計画段階における検討や初期反射音構造、各種音響物理指標の予測等には幾何音響的手法は大変有用であると考えられる。現在では、様々な商用ソフトウェアが売り出され、設計実務において広く用いられている。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パラメータとしていたが、近年、鏡面反射成分(幾何的な反射)に加え、散乱成分(壁面の凹凸による拡散反射)を幾何音響シミュレーションに導入することが可能になり壁面の拡散性の影響を検討可能になっている。

壁面による拡散反射を幾何音響シミュレーションに導入することを主たる目的として、指向拡散度(Diffusion coefficient)及び乱反射率(Scattering coefficient)が提案されている。前者は反射指向特性の均一性を表し、後者は非鏡面反射成分の割合を表す指標でAES(Audio Engineering Society)やISO(International Organization for Standardization)にて測定法が規定されつつある。特に、乱反射率は幾何音響シミュレーションに簡易に利用できるものとしてその役割が期待されている。

一方、一般的な拡散体である一次元周期構造壁面では、乱反射率の入射角依存性が強く、室内音響特性への影響も大きい。そのため、幾何音響解析に乱反射率の入射角依存性を反映させた解析を行えば、拡散体形状による散乱特性を考慮した音場解析が可能になると考えられる。

1.2 乱反射率

1.2.1 乱反射率について

乱反射率(Scattering coefficient)は壁面の音響拡散の程度を表す一物理指標であり、ISO17497-1[27]の中で壁面の全反射エネルギーに対する鏡面反射成分以外の割合

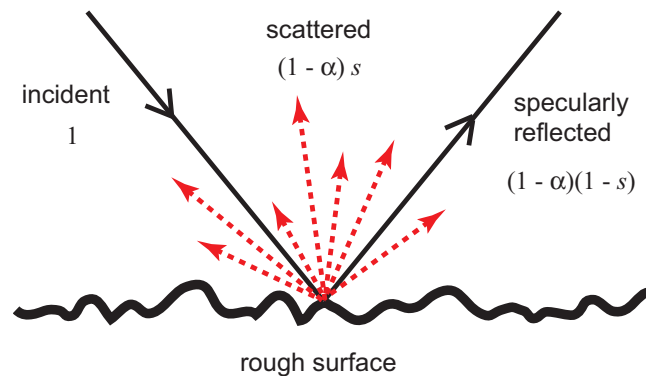


Fig. 1.1 Scattering from rough surface. α is absorption coefficient and s is scattering coefficient.

として定義されているもので、次式で表される。

$$s(\theta, \varphi) = 1 - \frac{E_{\text{spec}}}{E_{\text{total}}} \quad (1.1)$$

但し、 (θ, φ) : 入射角, E_{total} : 全反射エネルギー, E_{spec} : 鏡面反射エネルギー。

概念図は Fig.1.1 のように示されるが、実際には試料の有限性による端部回折効果の影響のため鏡面反射成分の厳密な抽出は困難であり、この定義式通りに値を算出することは不可能となる。鏡面反射成分の抽出に関しては、後述するように試料回転によるものと、反射波の指向特性から求めるものの2種類に分けることができる。また、上式の斜入射乱反射率 $s(\theta, \varphi)$ の統計入射平均値としてランダム入射時の値（ランダム入射乱反射率）を算出することができる。斜入射乱反射率の内、特に、壁面への垂直入射時のものを垂直入射乱反射率という。

1.2.2 算出方法

測定法

円形の試料を回転させながら多数のインパルス応答を測定し、それらを同期加算することにより鏡面反射成分のみを抽出する試料回転法が、残響室内と自由音場を想定した2通りで提案されている。現在残響室法については ISO[27] で規格化されている。測定は、鏡面反射成分は円形試料を回転させても干渉性が完全に保たれるが、散乱成分は非干渉性となるという仮定に基づいている。以下に各測定法の概要を述べる。

- 残響室法

試料による散乱成分がインパルス応答の同期加算により相殺され、試料が設置されていない状態（試料を乗せる回転盤のみが回っている状態）と比較して残響時間が短くなるこ

とに着目し、それぞれの状態の残響時間の差から乱反射率を算出する方法である。この方法ではランダム入射乱反射率 (Random-incident scattering coefficient) が直接求められる。

- 自由音場法

鏡面反射成分抽出の原理は残響室法と同一である。ただし、こちらの方法では入射角を垂直に固定した上で試料を回転させ、複素反射係数の加算平均により鏡面反射成分のみの複素反射係数を取り出すことで、まず垂直入射乱反射率が得られる。さらに、その平均としてランダム入射乱反射率が求められる。

指向相関法

以上の測定を想定した試料回転法とは別に、自由空間中における試料と基準平板の反射指向特性の相関から算出する指向相関法が提案されている。

$$s(\theta) = 1 - \frac{\left| \sum_{i=1}^n p_{1i} \cdot p_{0i}^* \right|^2}{\sum_{i=1}^n |p_{1i}|^2 \cdot \sum_{i=1}^n |p_{0i}|^2} \quad (1.2)$$

但し、 p_{1i} : 試料設置時の各方向における複素反射音圧、 p_{0i} : 試料と同サイズの剛平板設置時の各方向における複素反射音圧、* : 複素共役、 n : 総反射方向数。

試料と同サイズの剛平板 (以下、基準平板) の反射特性を鏡面反射成分とみなし、試料設置時の指向特性との相関を取ることにより拡散係数を算出する方法であり、端部回折による影響を考慮した定式化となっている。上式で表される斜入射乱反射率を平均することによりランダム入射乱反射率の算出が可能である。指向特性を求める必要があるため実測は簡便ではないが、定式化は明解であり、波動数値解析に馴染む方法と言える。

幾何音響シミュレーションへ乱反射率の入射角依存性を反映させれば更なる予測精度向上が可能であると考えられるが、現状では、幾何音響シミュレーションへのランダム入射乱反射率の導入にとどまっている。なぜなら、斜入射乱反射率を実測するのは大掛かりになるうえ、測定点も膨大となることから現実的ではないからである。また、実測できないために斜入射乱反射率のデータベースも存在しないからである。

一方で、斜入射乱反射率は、上記の指向相関法を用いた境界要素法 (BEM) による算出方法が有効であり、現在では様々なタイプの拡散体・拡散壁についてのデータが容易に得られるようになった [11]。乱反射率の波動数値解析による予測は、

- 波動数値解析時の形状作成が容易で、実測に比べ手間が少ない
- 規定の試料寸法が小さく、計算機資源の観点から実用性が高い

など利点も多く、斜入射乱反射率が容易に算出可能である。

これらの現状を踏まえ、幾何音響シミュレーションへ乱反射率の入射角依存性を反映させることは意義が大きいと考える。しかし、波動数値解析によって求める斜入射乱反射率は波動数値解析上の精度を保証するための離散化幅で算出される。それらのデータ全てを幾何音響シミュレーションへ導入するべきかどうかは不明である。上述したように、幾何音響シミュレーションの精度は粗く、波動数値解析と同様の精度が必要ではないと考えられる。

1.3 既往関連研究

乱反射率に関する研究では、測定法に関して、李, 土屋らは ISO[27] で規格化された測定原理に基づき、測定条件、試料寸法等の適用条件に関し検討を行っている [29][30] [31]。拡散体の形状、寸法の違いによる音波散乱性の差異について詳細に検討している [32]。一方、数値解析に関しては、小坂らは計算パラメータ、試料条件、算出法の違いによる差異を詳細に検討し、境界要素法を用いた乱反射率の数値予測の有用性を示した [12]。

幾何音響シミュレーションにおける拡散音の取り扱いに関する研究としては、Heinz[18] は音線法による後期残響音のシミュレーションにおいて、鏡面反射と Lambert 則に基づく拡散反射とを確率的に採用するモンテカルロ法により壁面の拡散性を考慮することを試みている。藤原ら [9] は一次元的周期構造の反射特性の波動音響的解析結果をモンテカルロ法に基づく幾何音響シミュレーションの境界条件として適用し、その有効性を検証している。また、中川ら [19] は Fraunhofer の光回折理論から導かれた剛平板の音圧反射率を実効的な幾何反射係数として、音線法において壁面の散乱を扱っており、C 値、D 値、RR、LE といった室内音響物理指標に対し、従来の音線法よりも精度よく測定値を説明することを報告している。

1.4 研究の目的

以上のような研究背景、既往関連研究の動向を踏まえ、波動数値解析により算出した斜入射乱反射率を用いて幾何音響シミュレーションに乱反射率の入射角依存性を反映させることにより予測精度を向上できると考えられる。本研究の目的を以下のように設定する。幾何音響シミュレーションに乱反射率の入射角依存性を反映し、

- 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値の誤差を把握すること
- 室内音響指標に及ぼす影響を考察すること

とする

第一の目的は、数値的検討のための準備というだけでなく、実測のために必要な斜入射乱反射率の入射条件数を把握する意味もあり、本論文で示す数値解析手法を適用して計算例の比較検討、および考察を行うことにより得られた知見から、測定方法等に関してフィードバックを行う。

1.5 論文の構成

以上を研究の目的とした本論文の構成を述べる。

第1章では、研究の背景、乱反射率の定義・算出法等について述べた後に既往関連研究について概観し、本研究の目的および位置づけについて述べる。また、本論文の構成について示す。

第2章では、斜入射乱反射率を導入するための幾何音響解析アルゴリズムを説明する。

第3章では、前章で構築した数値解析アルゴリズムの計算精度に関する検討を行う。特に、幾何音響シミュレーションにおけるランベルトの余弦法則について基礎的知見を得る。

第4章では、斜入射乱反射率の方向平均化手法を提案し、導入精度としての知見を得る。

第5章では、斜入射乱反射率の方向平均による室内音響指標の計算誤差について検討する。加えて、幾何音響シミュレーションへの斜入射乱反射率の反映が室内音響指標に与える影響を考察する。

第6章は総括であり、本論文の成果、および今後の課題について述べる。

第2章

幾何音響解析アルゴリズム

2.1 はじめに

本章では、幾何音響解析アルゴリズムについて概説する。本研究では、従来の幾何音響学に基づく手法である音線法に乱反射率の取り扱い及び乱反射率の入射角依存性の扱いを付加した解析手法を用いる。まず、幾何音響解析の概念及び計算上の留意点について述べる。次に、幾何音響解析の計算法について述べ、その後、幾何音響解析から算出する室内音響指標について概説する。

2.2 幾何音響解析手法について

幾何音響学とは、音の波動性を無視して、そのエネルギーの伝播を幾何学的に扱う手法のことである。そのため、本来波動現象である音の回折や干渉は考慮されず、精度の保証はなく曖昧な部分が多い。しかし、初期反射音の到来方向や時刻を近似的に求めるには有効な方法である。幾何音響学に基づく数値解析手法には虚像法(鏡像法)や音線法がある。虚像法では、閉空間音場に対して離散的に分布する実音源及び虚音源群のそれぞれの寄与が各反射音の強さになり、それらの総和を算出することにより、受音点での音の強さが求められる。直接音を含む全ての反射について距離減衰が与えられ、さらに、反射する境界面の吸音率を α とすると、反射一回ごとに $(1-\alpha)$ のエネルギー反射率が考慮される。この手法では、後述する音線法に比べ、方向、相対的なインテンシティ、到来時刻が正確に求まるため、初期反射音構造の検討やエコー障害のチェック、反射音の指向性分布の検討に有効である。しかし、反射次数の増加とともに虚音源数が指数関数的に増加するため、高次の反射音まで求めることが困難である。また、解析の上限は、反射音レベルや観測時間ではなく、反射次数により決定されるため、上限反射次数で直接音から最も遅れて到来する反射音より、さらに高次で伝播距離が比較的短い反射音が、時間的に早く到来することがあり、任意の時刻に

において全ての反射音が含まれない場合が生じるという問題がある。一方の音線法は、音源位置に無指向性の点音源を設定し、全空間に等立体角になるように多数の音線を放射し、その反射履歴を時間とエネルギー、入射方向のデータとして順次追跡していく計算方法である。距離減衰は時間経過に伴う音線間隔の広がり、すなわち密度の減少により考慮される。反射については前述の鏡像法と同様である。この方法では、大きさを持たない受音点に対して、音線が入射することは難しく、受音位置にある特定の大きさを持つ受音球を設定することが一般的である。このことが音線の入射数及び、反射経路において誤差を生じる要因となっている。この誤差を解決するために、音線法で抽出された反射経路を虚像法により逆追跡する手法である backtracing(combined ray tracing and image source method : Lehnert[21], Sekiguchi[22], Naylor[23], Vorlander[24]) や音線の先端に円の有限領域を持たせる cone tracing method (Vian and D. Maercke[25]) などが提案されている。

2.3 音線法

鏡像法に比べて複雑な設定が不要で、高次の反射回数まで計算可能であることから解析手法には一般的に広く使われている音線法を用いるものとする。音線法では、音の波動性を無視し、均一な媒質中を直進する音線を追跡する計算手法である。本研究では、従来の音線法のアルゴリズムを使用し、境界条件にて鏡面反射成分以外に散乱成分を考慮できるように改良する。従来の音線法にはオープンソースである Open Acoustics[34] を参照した。なお、音線法の説明の一部を Open Acoustics[34] から引用する。

2.3.1 音波の表現

音線法では、あるポテンシャルを持って空間内を進行する仮想的な物体を音粒子と呼び、また音粒子の属性として進む方向ベクトル伴ったもの、もしくは音粒子が通過した軌跡を音線と呼ぶ。音粒子と音線は同意で表現されることも多い。以上から音線法では進行波を模擬することを意味する。また進行波は空間的に幅を持つが、音線は概念的なもので空間的大小さを持たない。ポテンシャルの移動は Fermat の法則に則る。すなわち、音線は進むのにかかる時間が最小となる経路を通る。そのため、温度、密度が均一な媒質中を進行するのであれば音線は直進する (Fig.2.1)。

次に、球面波と平面波について述べる。無指向性の点音源からインパルスが発せられると音波は球面状に拡がり、進行とともにエネルギーは距離減衰する。これを音線で表すと、Fig.2.2 のように、音線が進むに従い音線の間隔が拡がり、単位面積に通過する音線数が減少する。この減少は距離減衰を意味する。一方平面波は、Fig.2.3 のように音線は平行を保ったまま進み、間隔は拡がらない。すなわち平面波は距離減衰しない。建築音響の分野

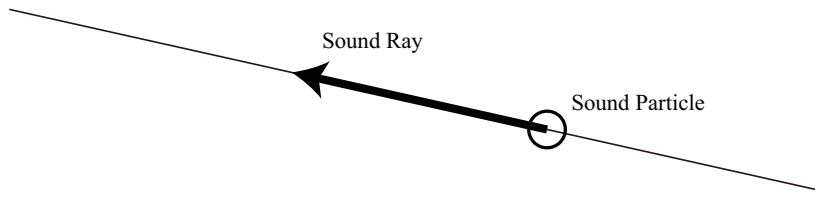


Fig. 2.1 Sound particle and sound ray.

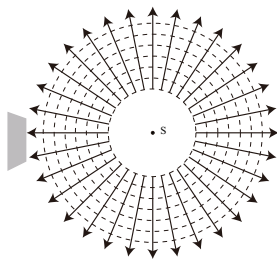


Fig. 2.2 Spherical sound wave.

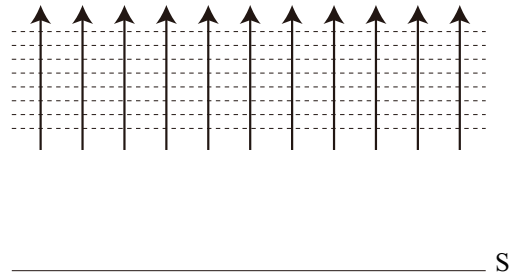


Fig. 2.3 Collimated sound wave.

で用いられるシミュレーションでは、無指向性の点音源を利用することが多い。一方、電気音響などの分野では、スピーカなどを模擬するために指向性を持った音源を利用することが多い。本研究では、無指向性音源を生成し利用する。音源の生成法については後述する。

2.3.2 境界面における音波の扱い

エネルギー

境界面に入射するエネルギー E_i は、反射するエネルギー E_r と、屈折しながら境界内部に侵入し欠損するエネルギー E_l 、もしくは透過するエネルギー E_t に分けられる (Fig.2.4)。数式で表せば以下の通りになる。

$$E_i = E_r + E_l + E_t \quad (2.1)$$

このとき入射エネルギー E_i に対する反射エネルギー E_r の割合を反射率 (reflection coefficient) とよび、

$$(\text{reflection coefficient}) = \frac{E_r}{E_i} \quad (2.2)$$

Eq.2.2 で表される。またここでは、反射しないエネルギーは全て吸音されると仮定し、吸音率 (absorption coefficient: α) は

$$\alpha = 1 - \frac{E_r}{E_i} \quad (2.3)$$

Eq.2.3 と表すことができる。音線法において、境界面におけるエネルギーの損失は、境界面に設定した反射率 $(1-\alpha)$ を乗じることにより算出する (Fig.2.5)。

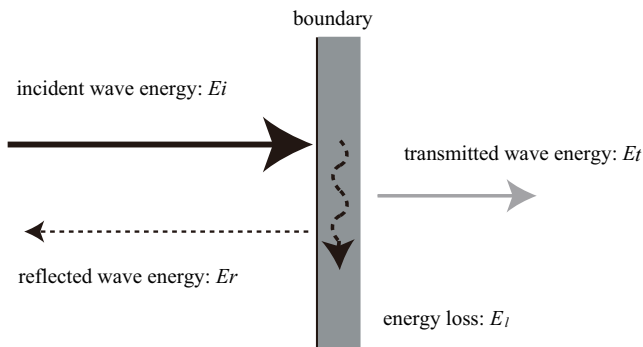


Fig. 2.4 Sound energy on boundary.

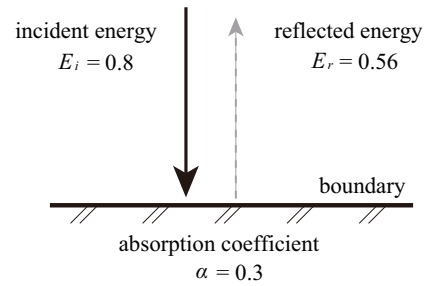


Fig. 2.5 Treatment of sound energy on boundary.

方向

反射する音線の方向は、鏡面反射する成分と拡散反射する成分に分かれる。鏡面反射成分は Snell の法則に則り、入射角と同じ角度で反射する。一方、拡散反射する成分は、ランダムな方向に単一音線として反射する方法をとる。詳細は後述する。

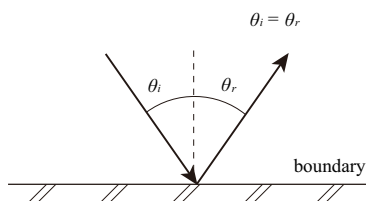
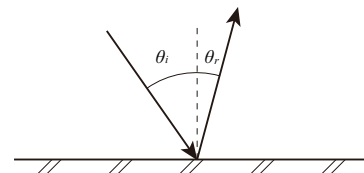


Fig. 2.6 Direction of specular reflected sound.

あるときは



あるときは

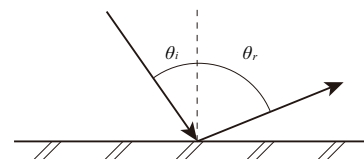


Fig. 2.7 Direction of scattered sound.

2.4 音線法の留意点

音線法は実際の物理現象を詳細にシミュレートするものではない。そのため音線法特有の計算条件の設定が重要になる。そこで、以下に、音線法で解析する際の留意点について述べる。

2.4.1 音線数・受音球の大きさ・室容積の関係

音線法は音源から音線を放射し、受音点に設けられた受音球を音線が通過するときに受音したと判定する。そのため、音線数が解析結果に影響する。以下に、音線数の必要条件を述べる。音線数を N 本、受音球の半径を r m、設定した室の体積を V m³ とする。

SN 比

まず、SN 比から音粒子の個数を導く考え方がある。数値計算のためノイズは 0 dB であるので音粒子の数が直接 SN 比となる。音粒子が多いほどダイナミックレンジが広いことになる。音線 1 本を基準とすると SN 比を x dB 確保するために必要な音粒子の数は次式から

$$x = 10 \log_{10} \frac{N}{1} \quad (2.4)$$

10¹⁰ 個必要であることが導ける。受音球で受音する場合、直接音として受音する数は、音源から放った音粒子の一部であるため、減衰曲線などで SN 比を確保するにはさらに 10 から 100 倍の音粒子が必要となると言われている。

定常状態

二つ目の考え方は定常状態を表現できる音粒子の最低個数から導く考え方である。放ったエネルギーが空間内に満遍なく行き渡った状態では、受音球を空間内のどこに設定しても等しい音粒子の数が受音されるはずである。このような状態を模擬するためには、受音球を任意の位置に設置したときに音粒子が少なくとも 1 つ存在することが必要条件となり、次式を満たす必要がある。

$$N \geq \frac{V}{\frac{4}{3}\pi r^3} \quad (2.5)$$

伝播距離

音源が点音源である場合、音線の間隔の拡がりが増える。しかし、音波が受音点を通過することを模擬するためには、音線の間隔が拡がりすぎて受音球に入らない状況を避けなければならない。受音球に音粒子が少なくとも一つ入ることが必要条件となる。Fig.2.8 に示すように、音速を c 、音線追跡時間を t_{max} としたとき、伝播距離は ct_{max} であり、音波は半径 ct_{max} の球状に拡がる。音線数が N であれば、音線 1 本あたりが占める立体角は

$$\frac{4\pi}{N} \quad (2.6)$$

となる。音波が ct_{max} 伝搬したとき、波頭面の球殻が音線を軸とする円錐を仮定すると、その円錐によって切り取られる面積は、

$$\frac{4\pi}{N} ct_{max} \quad (2.7)$$

となる。音粒子の数 N が十分大きい場合には、式 (5.4) はほぼ平面の円と見なすことができる。この円の半径は

$$2\sqrt{\frac{ct_{max}}{N}} \quad (2.8)$$

となる。この円の半径より受信球の半径 r が大きければ、少なくとも音線は一本受信球と交差するので、

$$r \geq 2\sqrt{\frac{ct_{max}}{N}} \quad (2.9)$$

を満たせば必要条件となる。

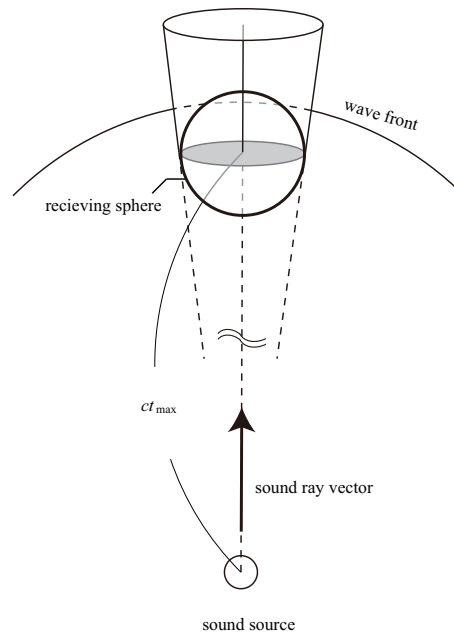


Fig. 2.8 Relation between solid receiving sphere and angle obtained by a sound ray.

受信球と室容積の関係

計算負荷の関係から音線数を減らすことはありえるが、Eq.5.3, Eq.5.4 を満たすために受信球半径 r を増大させることは望ましくない。上述の3点を満たすように音粒子の数と受信球の大きさを設定することが理想的であり、室容積を十分に考えて受信球の大きさを決めるべきである。一般的に、受信球の大きさは、頭の大きさ、もしくはそれより少し大きいサイズ、大きくとも直径1 m から2 m に設定されることが多い。

2.5 音線法の計算方法

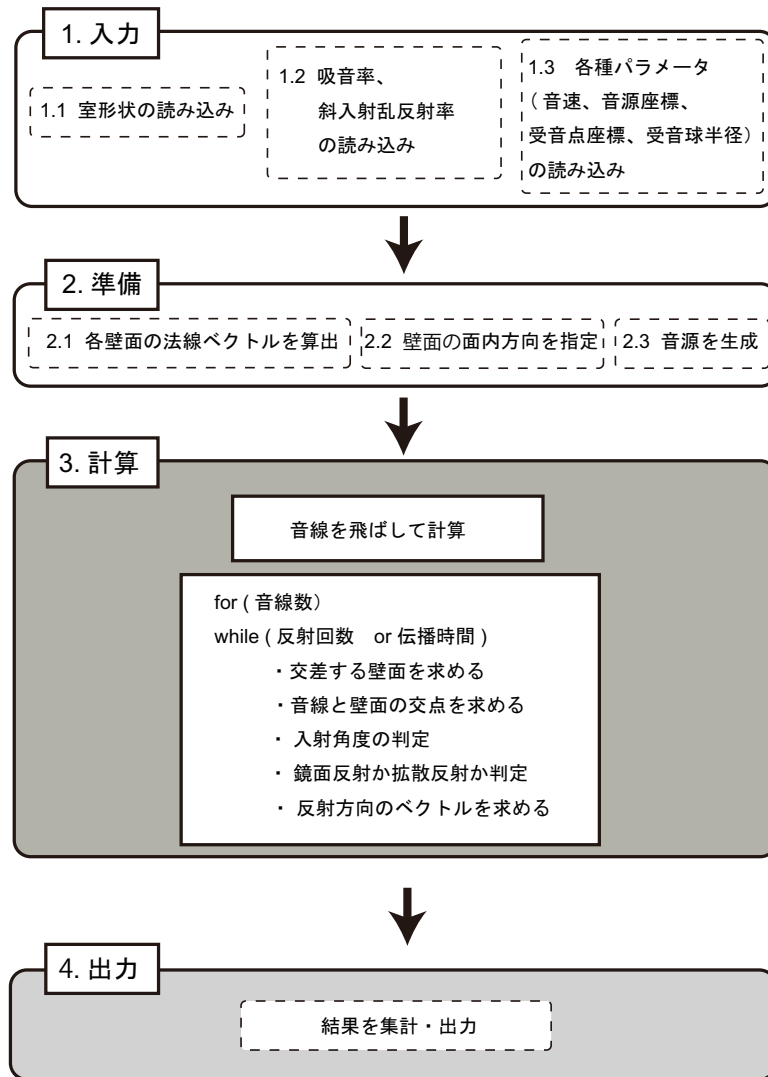


Fig. 2.9 Flow chart of ray tracing program.

Fig2.9 に音線法による計算方法のフローを示す。音線法による計算方法の主な構成は、入力、計算、出力である。まず、室形状を定義するために、室の座標及び壁面を定義し、読み込み、各壁面の物性値 (吸音率、斜入射乱反射率) 及びパラメータ (音速度、音源座標、受音点座標、受音球半径) を読み込む。そして、計算に必要な壁面の法線ベクトル、壁面の面内方向、音源の設定を行い、計算の根幹となる音線を追跡する計算を実行する。その後、計算結果を整理、出力する。特に、インパルス応答に関しては、計算中に随時出力する形式をとる。

2.5.1 計算条件の入力

音線追跡計算に入る前に、まず、計算条件を設定する。室情報、吸音率、乱反射率のデータを読み込む形式にする。

室情報

室情報とは室の頂点の番号と座標、壁面を構成する頂点番号、及び、その部材の物性値を示す壁面番号を記したものである。この壁面番号とは、吸音率データベース及び乱反射率データベースと連携するための通し番号である。本研究では、室形状は平面で囲まれていると定義する。壁面の頂点番号の記し方に関し、面の表裏を定義する必要があり、本研究では、頂点番号を反時計回りに指定された面を室の内部に向けた面と定義する (Fig.2.10)。

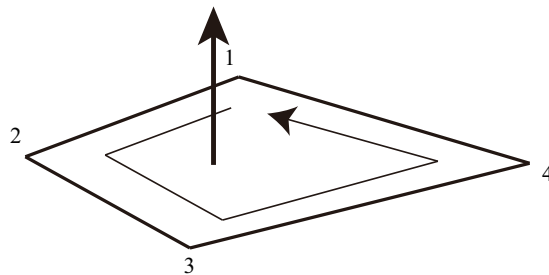


Fig. 2.10 Specify vertex numbers.

吸音率

吸音率データは、壁面の吸音率を定義するために必要で、125 Hz から 4 kHz までの 6 オクターブバンドの中心周波数で指定する形式をとる。

乱反射率

乱反射率データは、壁面の乱反射率を定義するために必要となる。本研究では、入射角度情報をもつ乱反射率である斜入射乱反射率を用いる。既報 [12] の方法により波動数値解析 (BEM) を用いて算出する。

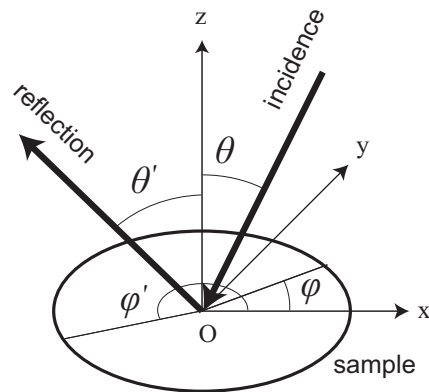


Fig. 2.11 Geometry of a sample, an incident plane wave and reflection angles.

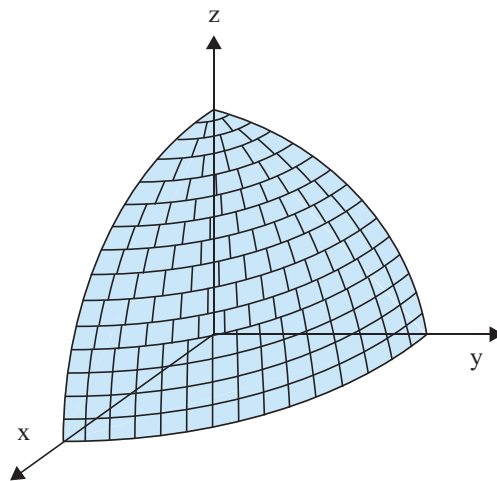


Fig. 2.12 Discretization of reflection angles.

斜入射乱反射率の算出について

まず、境界要素法により、試料及び、基準平板の試料中心から遠方一定距離の各反射方向に受音点を想定し、反射波の複素音圧振幅を全入射条件にわたり算出する。その際の入射角および反射角は Fig.2.11 のように定義されている。Fig.2.12 のような極座標における反射立体角の離散化し、 θ' 方向の分割数 $N_{\theta'}$ をパラメータとして、離散方位 $(\theta'_{ij}, \varphi'_{ij})$ 、方位幅 $\Delta\theta'_{ij}, \Delta\varphi'_{ij}$ は次式で表される。

$$\Delta\theta'_{ij} = \frac{\pi/2}{N_{\theta'}}, \quad \theta_{ij} = \left(i - \frac{1}{2}\right) \Delta\theta'_{ij}, \quad (i = 1, 2, \dots, N_{\theta'}) \quad (2.10)$$

$$\Delta\varphi'_{ij} = \frac{\pi/2}{N_{\varphi'}^i}, \quad \varphi'_{ij} = \left(j - \frac{1}{2}\right) \Delta\varphi'_{ij}, \quad (j = 1, 2, \dots, 4N_{\varphi'}^i) \quad (2.11)$$

$$N_{\varphi'}^i = \lceil N_{\theta'} \sin \theta'_{ij} \rceil \quad (2.12)$$

自由空間中の試料に単位振幅平面波が角度 (θ', φ') で入射するとき、反射波の指向特性から斜入射乱反射率が以下の式により求められる。

$$s(\theta, \varphi) = 1 - \frac{|R_{10}|^2}{R_{00} \cdot R_{11}} \quad (2.13)$$

$$R_{xy} = \sum_{i=1}^{N_{\theta'}} \sum_{j=1}^{4N_{\varphi'}^i} p_x(\theta'_{ij}, \varphi'_{ij}) p_y^*(\theta'_{ij}, \varphi'_{ij}) \sin \theta'_{ij} \Delta\theta'_{ij} \Delta\varphi'_{ij} \quad (2.14)$$

但し, p_0, p_1 : 基準平板時, および試料設置時の反射波による複素音圧振幅。

2.5.2 音線追跡計算前の準備

法線ベクトルの算出

平面の方程式は壁面を定義するために必要である。平面の方程式は以下の式で表され、

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (2.15)$$

3点の頂点座標から求める。また、方程式の係数は法線ベクトルの成分 $n(a, b, c)$ でもある。Fig.2.13 に示すように、 p_1, p_2, p_3 の3点から平面の方程式を求める。 v_1, v_2 を求め、この2つのベクトルの外積（クロス積）が平面の法線ベクトルとなるから、 $v_1 = (v_{1x}, v_{1y}, v_{1z})$, $v_2 = (v_{2x}, v_{2y}, v_{2z})$ とすれば、

$$v_1 \times v_2 = \begin{pmatrix} v_{1y}v_{2z} - v_{1z}v_{2y} \\ v_{1z}v_{2x} - v_{1x}v_{2z} \\ v_{1x}v_{2y} - v_{1y}v_{2x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

により a, b, c を求めることができる。また切片 d は、式 (2.15) に任意の頂点座標を代入すれば求められる。さらに、法線ベクトルが室の内側に向くようにするため、 v_1, v_2 の内積が正の場合には法線ベクトルに -1 を乗じ、向きを揃える。

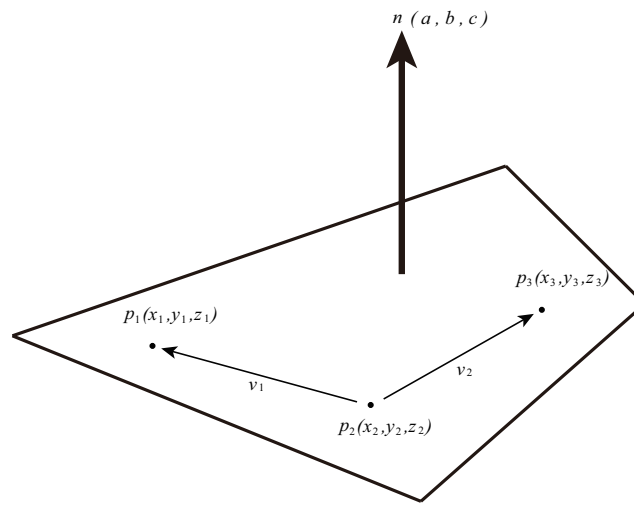


Fig. 2.13 Three points on a plane and a normal vector.

壁面の面内方向の指定

波動数値解析によって算出する斜入射乱反射率は入射角度が壁面部材の局所座標系にて得られる。壁面の物性値として用いる場合、解析する室の座標系に変換する必要がある。そのために、壁面面内に座標系を設定する。

音源の生成

音源は無指向性音源を仮定する。音線の放射立体角が極座標において等立体角に離散化された音源を想定し、 θ 方向の分割数 N_θ をパラメータとして導入して、離散方位 $(\theta_{ij}, \varphi_{ij})$ 、方位幅 $\Delta\theta_{ij}, \Delta\varphi_{ij}$ を次式により設定する。

$$\Delta\theta_{ij} = \frac{\pi/2}{N_\theta}, \quad \theta_{ij} = \left(i - \frac{1}{2}\right) \Delta\theta_{ij}, \quad (i = 1, 2, \dots, 2N_\theta) \quad (2.17)$$

$$\Delta\varphi_{ij} = \frac{\pi/2}{N_\varphi^i}, \quad \varphi_{ij} = \left(j - \frac{1}{2}\right) \Delta\varphi_{ij}, \quad (j = 1, 2, \dots, 4N_\varphi^i) \quad (2.18)$$

$$N_\varphi^i = \lceil N_\theta \sin \theta_{ij} \rceil \quad (2.19)$$

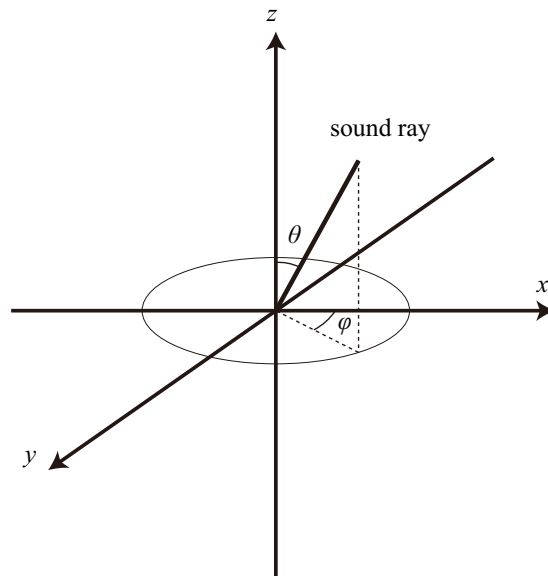


Fig. 2.14 An angle of a sound ray vector.

2.5.3 音線追跡計算

音線が交差する壁面を求める

まず、音線が壁面に当たるか判定する。判定は、音線の方法線ベクトルと壁面の法線ベクトルの内積を求め、値が負であればよい。

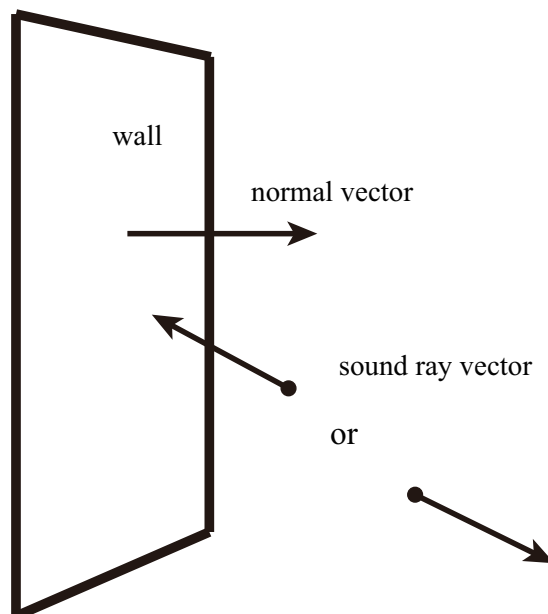
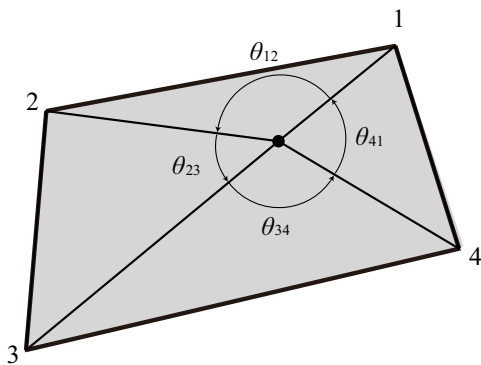


Fig. 2.15 Judgment of ray vector's direction.

次に、音線と平面の交点が壁面内にあるか判定する。交点から壁面の頂点2つで出来る角度を考える。頂点の選び方は時計回りもしくは反時計回りどちらでもよい。ただし、角度は π 以下とし、回転方向から角度の正負を考慮する。Fig.2.16 に示すように、交点が内部にあるときは角度の和が 2π 、外部にあるときには 0 となる。

INSIDE

$$\theta_{12} + \theta_{23} + \theta_{34} + \theta_{41} = 2\pi$$



OUTSIDE

$$\theta_{12} + \theta_{23} + \theta_{34} + \theta_{41} = 0$$

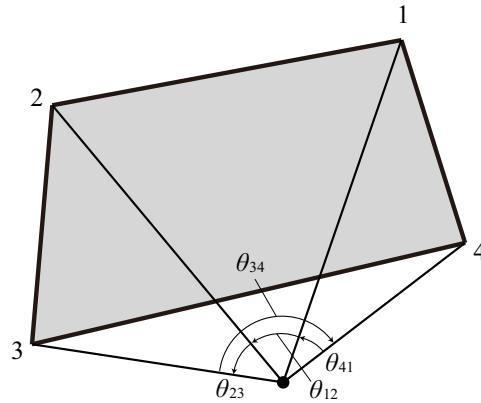


Fig. 2.16 Judgment of intersection of sound ray and a plane.

最後に、交差する壁面を決める。Fig.2.17 に示すように、複数の壁面と交差する場合があるので、音線と交差する壁面の中で、一番距離が近い壁面を選択する。

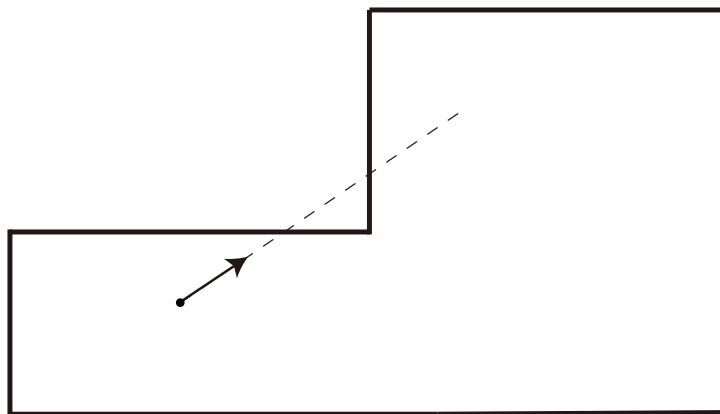


Fig. 2.17 Judgment of intersection of sound ray and a plane.

音線と壁面の交点を求める

直線の方程式は方向ベクトル $v = (v_x, v_y, v_z)$, と位置ベクトル $p = (x_0, y_0, z_0)$, 媒介変数 t を用いて座標 $y = (x_t, y_t, z_t)$ を表す。次式のように,

$$y = tv + p \quad (2.20)$$

と表すことができる。壁面と交わるときの変数 t は次式によって求めることができる。

$$t = -\frac{ax + by + cz + d}{av_x + bv_y + cv_z} \quad (2.21)$$

入射角度の判定

Fig.2.18 のように局所座標系を設定し, 入射角度の天頂角 θ と方位角 ϕ を求める。天頂角 θ は壁面の法線ベクトルと入射音線の内積の値を π から引くことにより求める。次に, 方位角 ϕ は音線の壁面内への射影ベクトルと壁面内の方向ベクトルとの内積から求める。まず, 射影ベクトルが第何象限かを求める。そして, 壁面内の方向ベクトルと音線の壁面内への射影ベクトルとの内積から求まる角度を第 1, 2 象限の場合 π から引き, 第 3, 4 象限の場合 π を加える。

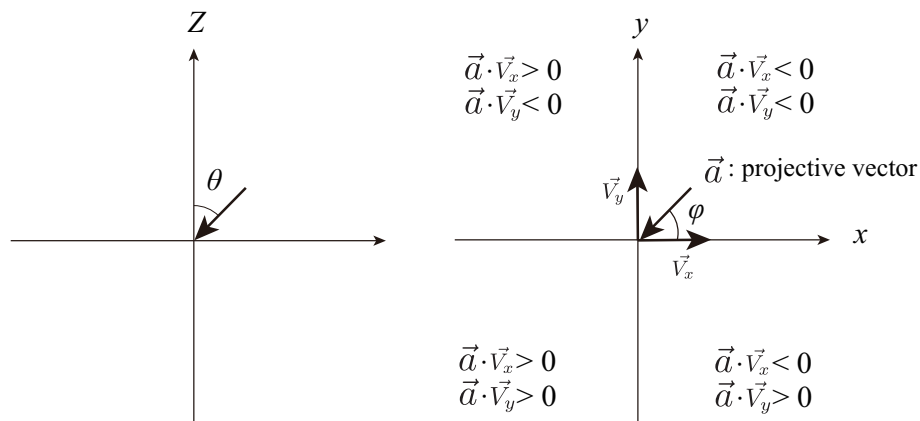


Fig. 2.18 Judgment of incident angle: θ and ϕ .

鏡面反射と拡散反射の判定

一様乱数を用いて鏡面反射か拡散反射の判定を行う。一様乱数 $n(0 < n < 1)$ を発生させ, 乱反射率 s とすると $n < s$ のとき鏡面反射, $n > s$ のとき拡散反射と判定する。

反射ベクトルを求める

反射ベクトルは鏡面反射の場合と拡散反射の場合で異なる。まず、鏡面反射の場合、入射ベクトル v_i と壁面の法線ベクトル v_n の両方が単位ベクトルであるとき、反射ベクトル v_r は以下の式によって求める。

$$v_r = v_i - 2(v_n \cdot v_i)v_n \quad (2.22)$$

なお、算出したベクトルが単位ベクトルとなるよう正規化している。一方拡散反射の場合、音線は単一音線の挙動のみを扱うものとし、次式により算出する。 m, n を一様乱数 ($0 < m < 1, 0 < n < 1$) として

$$\begin{aligned} \phi &= 2\pi m \\ \theta &= \frac{1}{2} \arccos(1 - n) \\ v_x &= \cos\phi \sin\theta \\ v_y &= \sin\phi \sin\theta \\ v_z &= \cos\theta \end{aligned} \quad (2.23)$$

により反射ベクトル $v = (v_x, v_y, v_z)$ を算出する。なお、この反射ベクトルは壁面の面内方向の座標系で算出する。

2.5.4 計算結果の出力

音線法の計算結果としてインパルス応答を算出する。まず、音線が受信球と交差するかを判定する。直線から離れた点から直線に降ろした垂線との交点を求め、直線から離れた点と交点との距離を求める。直線から離れた点を $p_2 = (x_2, y_2, z_2)$ 、直線を前節と同様、式 (2.20) で表されるとすると、交点 $h(x_h, y_h, z_h)$ を決める変数 t は、

$$t = \frac{v \cdot (p_2 - p)}{v \cdot v} \quad (2.24)$$

とすれば求めることが出来る。さらに、インパルスを求めるためには、音線が音源から受信球に到達するまでの経路を算出し、音速で割ることで到達時間を計算する。

2.6 室内音響指標について

室内音響設計を、経験だけに頼るのではなく、科学的裏付けによって進めるために室内音響指標が用いられる。室内音響指標は音場の特性を数値で表した物理量である。上述の音線法の計算により算出されるインパルス応答から室内音響指標を算出する。ここでは本研究に関連する室内音響指標について述べる。

2.6.1 各種室内音響指標

残響時間 (T_{30} , T_{20})

室内の平均エネルギー密度が定常の値から 60 dB 減衰するのに要する時間である。測定された残響減衰波形の初期レベル（定常状態のレベル）に対して、-5 ~ -35 dB を回帰区間とした場合の回帰直線の減衰率から求める場合を $T_{30,-5}$ ~ -25 dB を回帰区間とした場合を T_{20} と呼ぶ。

初期残響時間 (EDT)

残響減衰波形の初期レベル（定常状態のレベル）に対して、0 ~ -10 dB を回帰区間とした場合の回帰直線の減衰率から求める残響時間を初期残響時間（early decay time: EDT ）と呼ぶ。

Sound Strength G

ほとんどの指標が直接音に対する反射音の相対レベルを用いて定義されている。しかし、受聴レベルが様々な心理量に影響を及ぼすため絶対レベルが見直されてきた。受聴レベルは音源によって変化するが、Sound Strength G は音源の出力レベルに依存しない音場の特性である。自由空間において音源から 10 m の距離で測定した応答で基準化され、次式で定義される。

$$G = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10m}^2(t) dt} \quad [\text{dB}] \quad (2.25)$$

但し、 p : 音圧、 t : 時間、 $p_{10m}(t)$: 室内測定と同一の測定系（音源出力も同じ）を用い自由空間において音源から 10 m の距離で測定した応答。

Clarity (C_{80})

音楽に対する透明感（明瞭度）を表す指標で、次式で定義される。

$$C_{80} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad [\text{dB}] \quad (2.26)$$

但し、 p : 音圧、 t : 時間。

初期側方エネルギー率 LF

初期側方反射音を定量化する指標には LE などもあるが、ISO [26] では LF （Lateral energy Fraction）が取り上げられている。初期反射音エネルギー全体に対する側方エネルギーの比率を示しており、側方から到来する反射音ほど空間印象（spatial impression: SI ）

に対する寄与が大きいという Barron の心理実験結果 [8] が根拠となっている。次式で定義される。

$$LF = \frac{\int_5^{80\text{ms}} p_L^2(t) dt}{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt} \quad [\text{dB}] \quad (2.27)$$

ここで、 p : 音圧、 t : 時間、 $p_L(t)$: ゼロ感度方向を音源方向に向けた双指向性マイクロホンで測定した応答。

2.6.2 各指標の推奨範囲

Table 2.1 Room acoustical parameters [7][26].

Acoustic quantity	Single number freq. ave. [Hz]	Just noticeable difference (JND)	Typical range
T_{30} or T_{20} [s]	500 to 1k	Rel. 5%	–
EDT [s]	500 to 1k	Rel. 5%	1.0; 3.0
C_{80} [dB]	500 to 1k	1	–5; +5
G [dB]	500 to 1k	1	–2; +10
LF	125 to 1k	0.05	0.05; 0.35

2.7 まとめ

本章では, 従来の幾何音響シミュレーションのひとつである音線法に乱反射率の入射角依存性を反映した数値解析アルゴリズムを構築した。はじめに, 幾何音響解析の概念及び計算上の留意点について述べた。次に, 幾何音響解析の計算法について述べ, 散乱成分の取り扱いについて説明した。その後, 幾何音響シミュレーションから算出する室内音響指標について概説した。

第3章

数値解析アルゴリズムに関する考察

3.1 はじめに

前章では、音線法を用いた数値解析アルゴリズムを提示し、従来の音線法に拡散成分の取り扱いを説明した。本章では、拡散成分の取り扱いの中で、ランベルトの余弦法則の導入に関し、本研究で用いる計算手法の妥当性を検証する。

3.1.1 ランベルトの余弦法則について

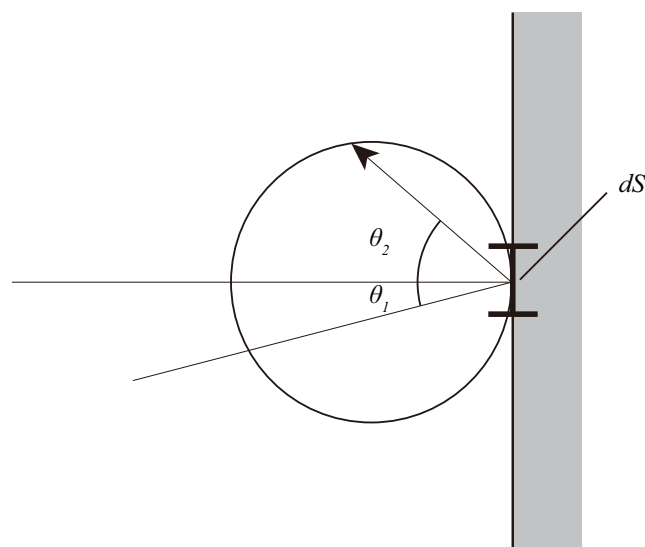


Fig. 3.1 Illustration of Lambert cosine law[1].

反射音エネルギーの方向分布が入射音の方向に依存しないとき、壁面の表面による反射は完全拡散に従う。室内音響学の分野では、不完全な拡散反射だけが実現される。しかし、一

回の反射ではなく、様々な壁の様々な部分による多数回の連続した反射を扱う場合には、壁を鏡面反射として扱うよりも、完全拡散反射として扱う方が適切である [1]。

完全反射する壁による音波の散乱はランベルトの余弦法則に従う。平行な音線の束面積要素 dS に入射するとし、壁の法線と音線がなす角度を θ_1 、その強さを I_0 とすると、角度 θ_2 の方向へ散乱する音の強さは、 dS からの距離が r の位置で次式で表される。

$$I(r) = I_0 dS \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} = B_0 dS \frac{\cos\theta_2}{\pi r^2} \quad (3.1)$$

B_0 は「放射強度 (irradiation strength)」と呼ばれ、単位面積当たりに入射するエネルギーを表す。この公式は壁による吸収がなく、入射したエネルギーが全て完全に再放射されるときに成立する。吸音される場合は $I(r, \theta_2)$ に $1 - \alpha$ を乗じる必要がある (吸音率 α)。Fig. に示す円弧は壁の面積要素 dS による散乱音の方向分布を表している。このとき、円周上の点に向いた矢印の長さが $\cos\theta_2$ に比例する [1]。

3.2 反射ベクトルの生成方法について

本研究では、3次元空間を想定して、反射ベクトルの方向を一様乱数で与え、ランダムな方向に単一音線のみを放射する。従って、反射波の指向特性は考慮していない。以下の式に従い算出するものとする。 m, n を一様乱数 ($0 < m < 1, 0 < n < 1$) として

$$\begin{aligned} \phi &= 2\pi m \\ \theta &= \frac{1}{2} \arccos(1 - n) \\ v_x &= \cos\phi \sin\theta \\ v_y &= \sin\phi \sin\theta \\ v_z &= \cos\theta \end{aligned} \quad (3.2)$$

により反射ベクトル $v = (v_x, v_y, v_z)$ を算出する。なお、この反射ベクトルは壁面の面内方向の座標系で算出する。この計算方法にランベルトの余弦法則の性質が反映されているかを検証する。

検証方法

この計算方法を用いて、反射ベクトルの角度発生頻度を確認する。試行回数を 1 万回として、Eq.3.2 にて生成される天頂角 θ の発生頻度を算出する。

結果と考察

計算結果を Fig.3.2 に示す。乱数によるばらつきはあるが、 45° 付近で最大となる。3次元空間における反射波の方向分布は 3.1 の方向分布を中心を通る軸を対称として回転させた球状となる。この場合、方位角方向の立体角は 45° のときが最大となり、天頂角 θ ($0^\circ < \theta < 90^\circ$) は 45° を対称に折り返す分布となるはずである。Fig.3.2 にてその傾向を確認することができる。

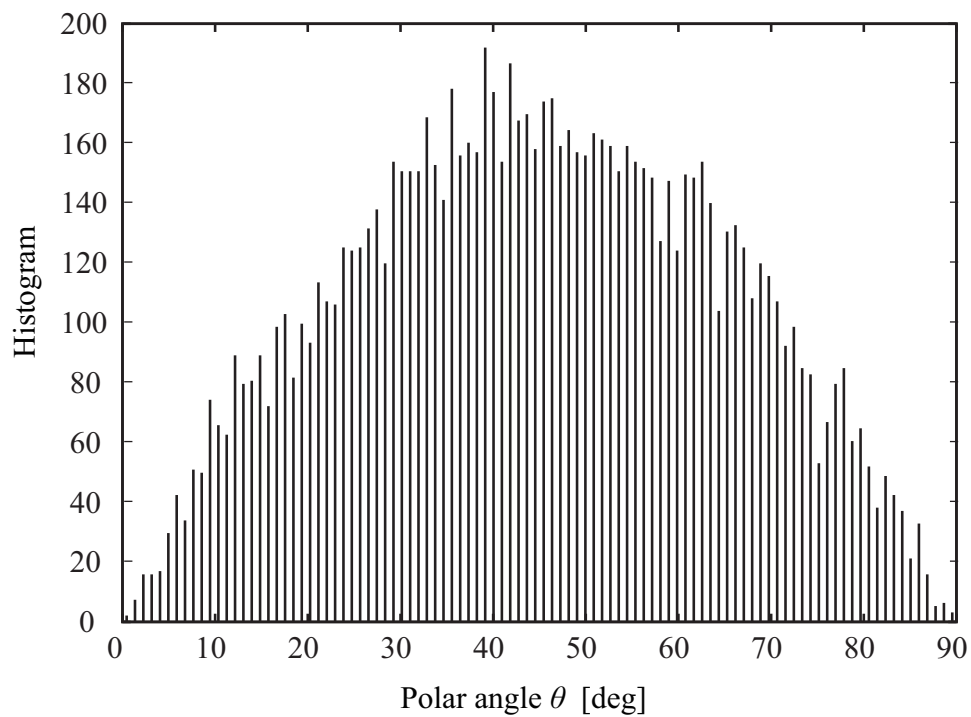


Fig. 3.2 Histogram of reflection angles.

3.3 壁面で反射する音線のエネルギー方向分布

3.3.1 音線数と到来音線のエネルギー方向分布の関係

受信点位置, 壁面寸法を一定にして壁面へ平面波を入射させる。入射音線数を変化させ, 壁面から反射して受信点に到来する音線のエネルギー方向分布の変化を確認する。尚, 音線1本のエネルギーを1で与え, 壁面での吸音率は0に設定し, 図中のエネルギーは音線数を示す。

計算条件の設定

乱反射率を1として, TypeNR-1, TypeNR-2, TypeNR-3, TypeNR-4の音線数はそれぞれ, 9万本, 36万本, 144万本, 900万本とした。受信点位置は壁面中心から5mとした。受信球は半径0.5mとした。計算に用いた壁面と受信点の位置関係を Fig.3.3 に示す。

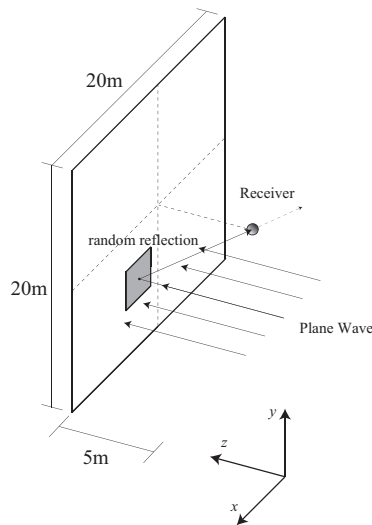


Fig. 3.3 Geometry of a wall and a receiver (TypeNR-1, TypeNR-2, TypeNR-3, TypeNR-4).

結果と考察

受信点への到来音線の方法ベクトルを XY 方向に 3, 10 度間隔で離散化した角度内に入射する音線のエネルギーを加算して Fig.3.4 から Fig.3.7 に示す。受信点への到来音線の方法ベクトルを Z 軸とのなす角度 θ に対し, エネルギーに $1/\sin \theta$ の重み付けを行い, YZ 方向に 3°, 10° 間隔で離散化した角度内に入射する音線のエネルギーを加算して Fig.3.8 から Fig.3.10 に示す。但し, 縦軸と横軸は両図ともエネルギーの対数尺度 dB で表示している。

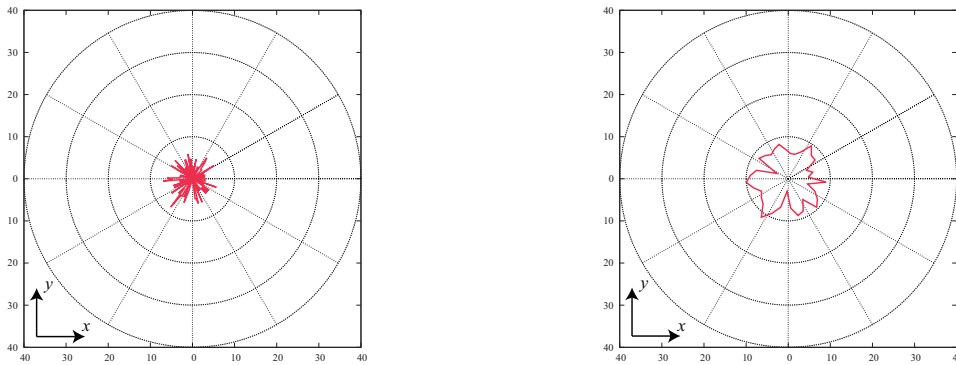


Fig. 3.4 Energy distribution (XY) (TypeNR-1): left; 3°, right; 10°.

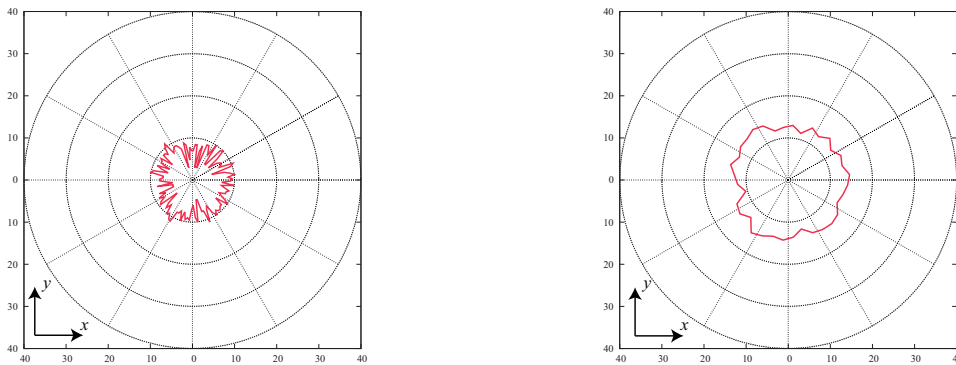


Fig. 3.5 Energy distribution (XY) (TypeNR-2): left; 3°, right; 10°.

以下の検討では、同様の表示方法をとる。Fig.3.8 から Fig.3.10 において音線数の増加に伴い、XY 方向のエネルギー方向分布が全方向に一樣となるのが確認できる。特に、離散化幅 10° の図で顕著に確認できる。次に、Fig.3.8 から Fig.3.11 の YZ 平面において、受音点と壁面との距離が 5 m で一定のため、壁面寸法の増加に伴い到来音線の方向分布が広がるのが確認できる。壁面寸法と壁面からの距離による見込み角を点線で示す。いずれの Type でも見込み角度以内に音線が到来するのが確認できる。離散化幅 10° では YZ 方向において見込み角度以内の音線が一樣に分布するのが確認できる。

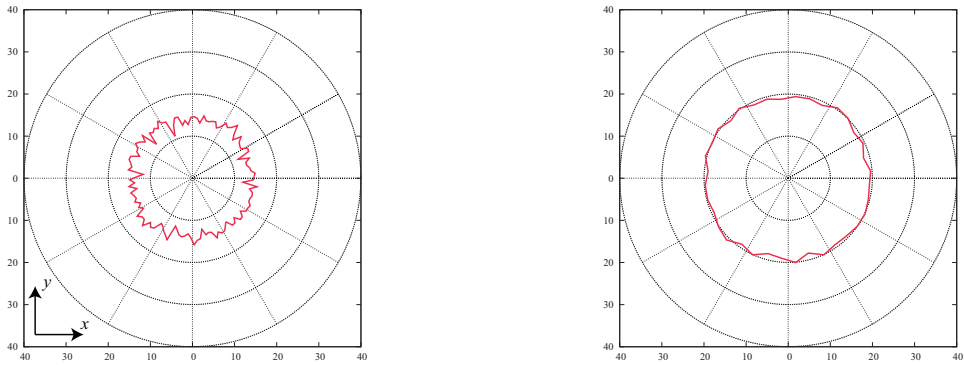


Fig. 3.6 Energy distribution (XY) (TypeNR-3): left; 3° , right; 10° .

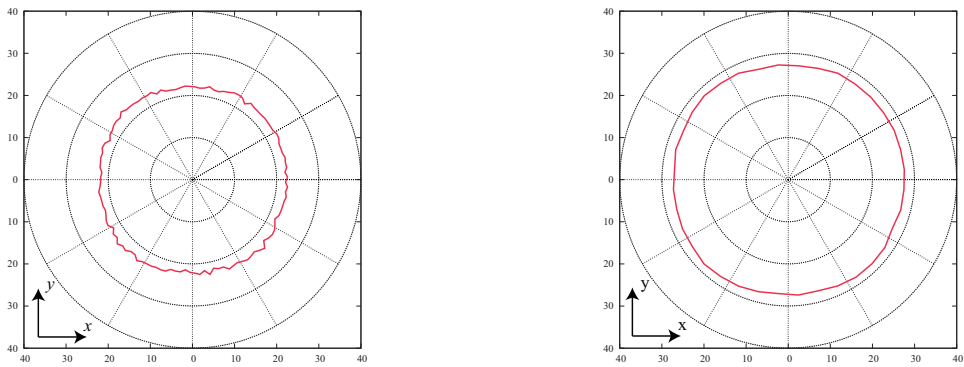


Fig. 3.7 Energy distribution (XY) (TypeNR-4): left; 3° , right; 10° .

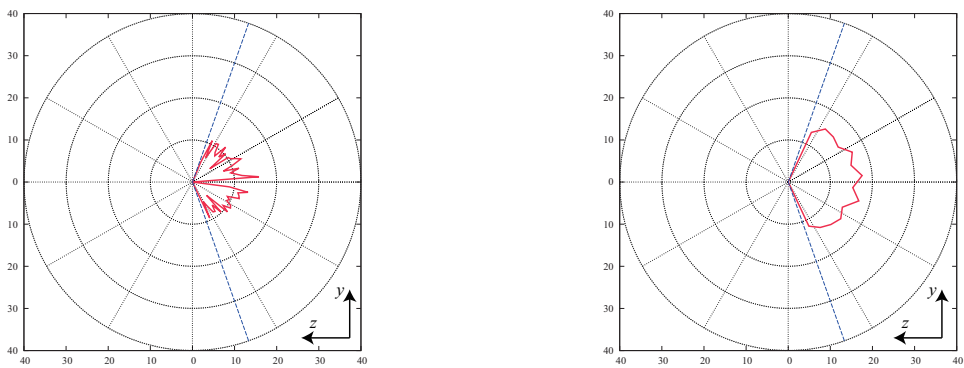


Fig. 3.8 Energy distribution (YZ) (TypeNR-1): left; 3° , right; 10° .

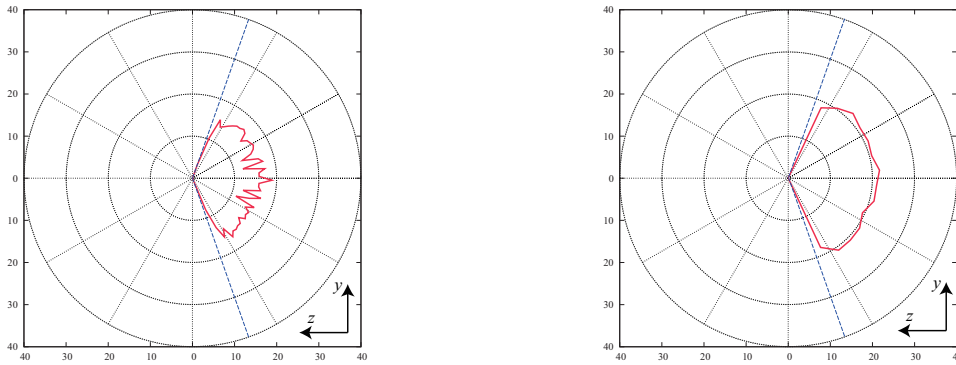


Fig. 3.9 Energy distribution (YZ) (TypeNR-2): left; 3°, right; 10°.

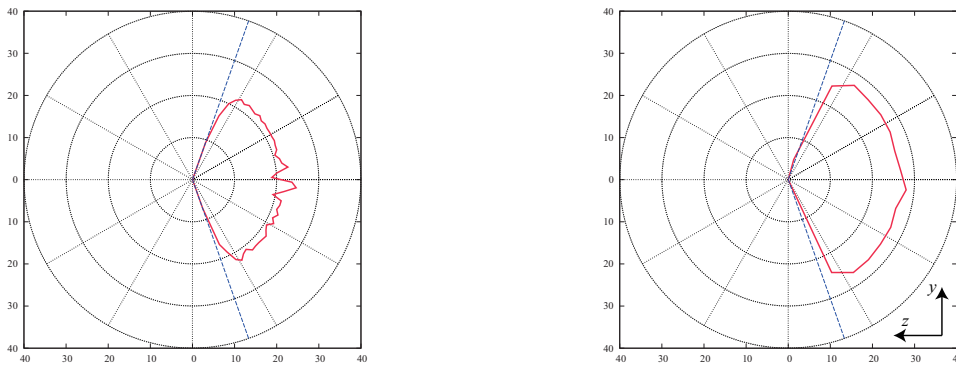


Fig. 3.10 Energy distribution (YZ) (TypeNR-3): left; 3°, right; 10°.

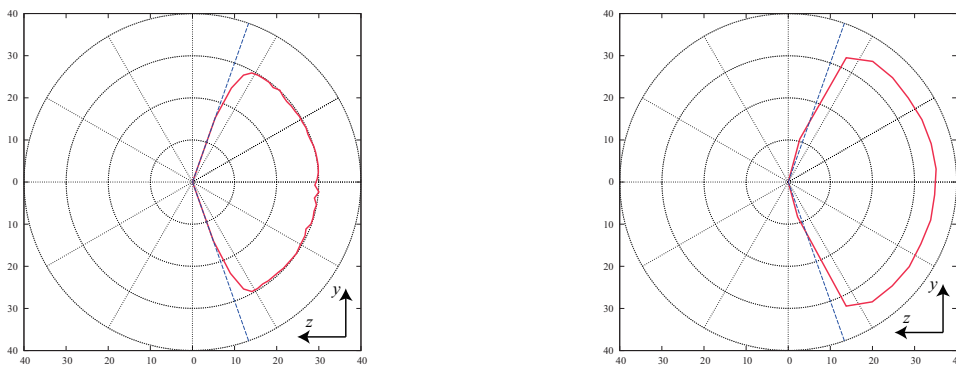


Fig. 3.11 Energy distribution (YZ) (TypeNR-4): left; 3°, right; 10°.

3.3.2 壁面寸法と到来音線のエネルギー方向分布の関係

受信点位置を一定にして壁面へ平面波を入射させる。壁面に入射する音線の密度を一定の下、壁面寸法を変化させ、壁面から反射して受信点に到来するエネルギー方向分布を比較する。尚、音線1本のエネルギーを1で与え、壁面での吸音率は0に設定し、図中のエネルギーは音線数を示す。

計算条件の設定

計算に用いた壁面と受信点の位置関係を Fig.3.12 に示す。乱反射率を1として、TypeL20, TypeL40, TypeL100 の3条件で各々の壁面寸法 $L = 20, 40, 100$ m で比較する。受信点位置は壁面中心から5mとした。受信球は半径0.5mとした。

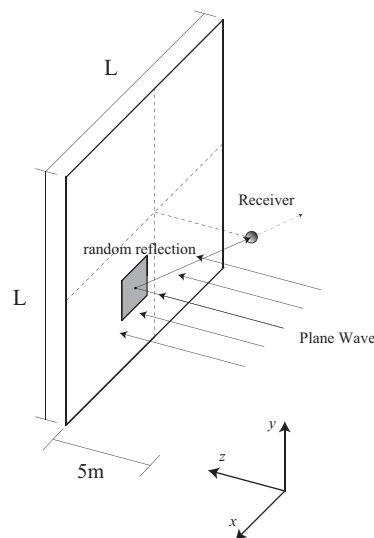


Fig. 3.12 Geometry of a wall and a receiver (TypeL20, TypeL40, TypeL100).

結果と考察

XY方向のエネルギー方向分布を Fig.3.13 から Fig.3.15 に示す。YZ方向のエネルギー方向分布を Fig.3.16 から Fig.3.18 に示す。XY平面の離散化幅 10° のグラフを見ると、全方向に一様に音線のエネルギーが分布するのを確認できる。次に、YZ平面において、受信点の壁面からの距離が5mで一定のため、壁面寸法の増加に伴い、到来音線のエネルギー方向分布が広がるのを確認できる。壁面寸法と壁面からの距離による見込み角を点線で示す。いずれのTypeでも見込み角度以内に音線が到来しているのを確認できる。離散化幅 10° では

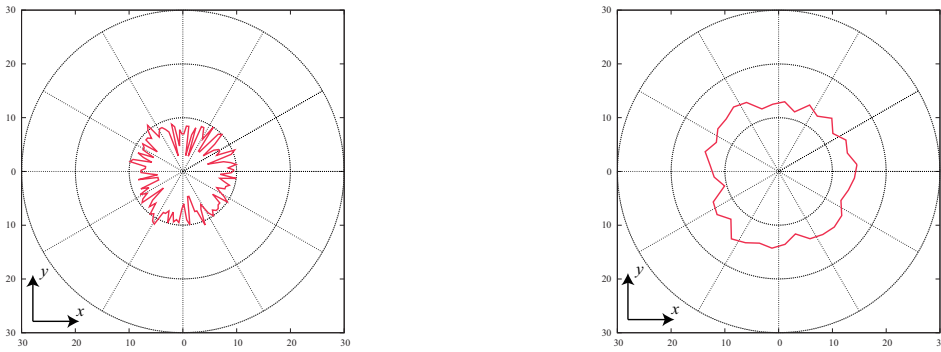


Fig. 3.13 Energy distribution (XY) (TypeL20): left; 3°, right; 10°.

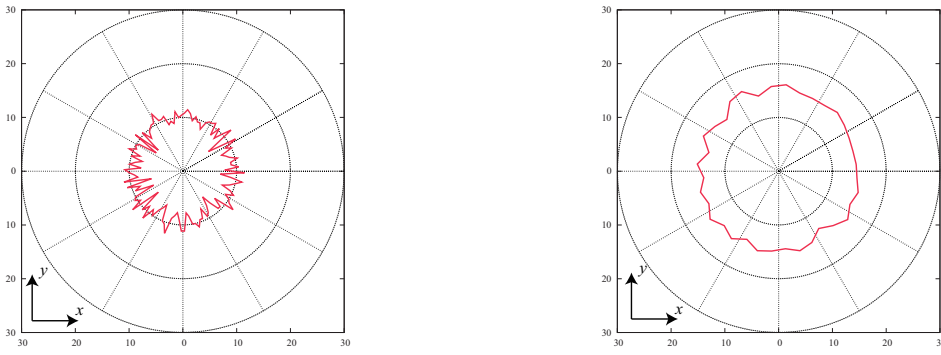


Fig. 3.14 Energy distribution (XY) (TypeL40): left; 3°, right; 10°.

YZ 平面上において到来音線のエネルギー方向分布が一様となるのが確認できる。

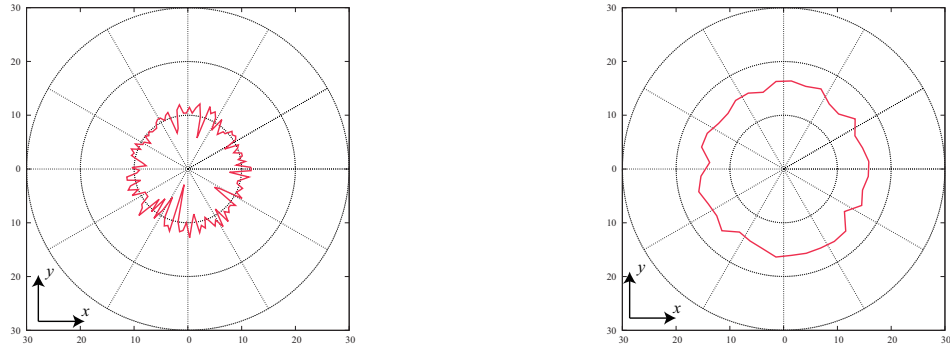


Fig. 3.15 Energy distribution (XY) (TypeL100): left; 3° , right; 10° .

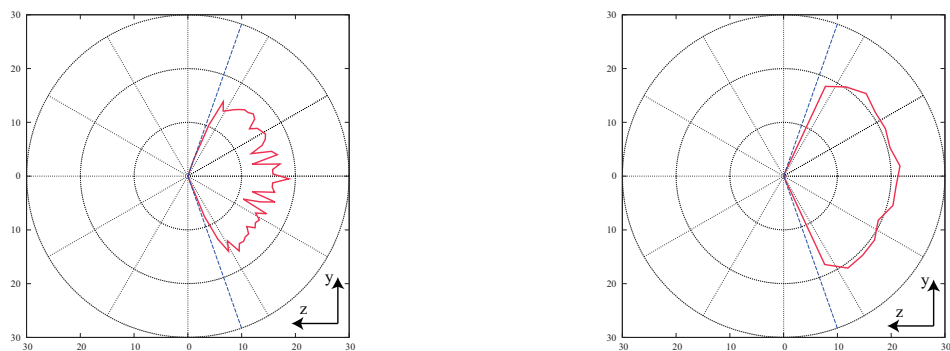


Fig. 3.16 Energy distribution (YZ) (TypeL20): left; 3° , right; 10° .

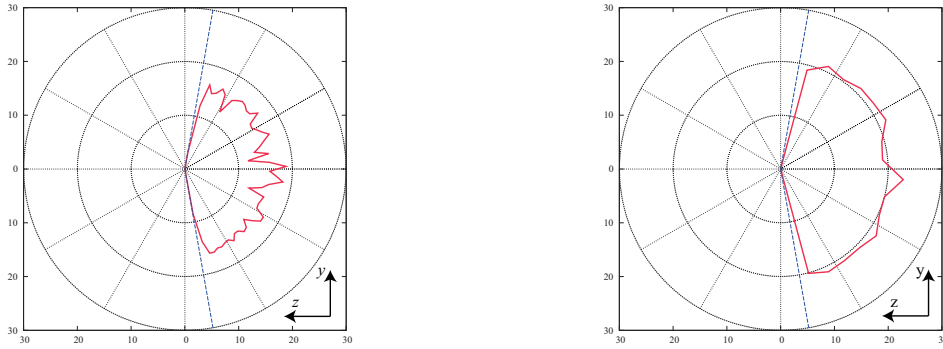


Fig. 3.17 Energy distribution (YZ) (TypeL40): left; 3° , right; 10° .

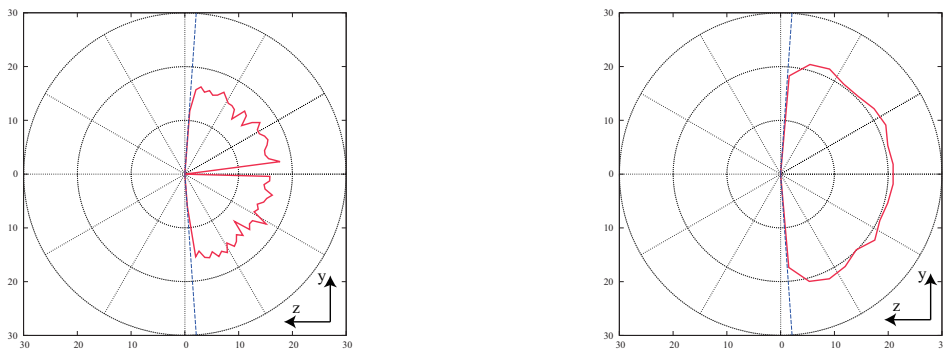


Fig. 3.18 Energy distribution (YZ) (TypeL100): left; 3° , right; 10° .

3.3.3 受信点位置と到来音線のエネルギー方向分布の関係

壁面寸法と壁面に入射する音線数を一定にして受信点と壁面の距離を変化させ、壁面から反射して受信点に到来する音線のエネルギー方向分布を確認する。

計算条件の設定

計算に用いた壁面と受信点の位置関係を Fig.3.19 に示す。乱反射率を 1 として、音線数は 900 万本とした。TypeD5, TypeD10, TypeD15 の受信点位置は壁面中心から 5 m, 10 m, 15 m とした。受信球は半径 0.5 m とした。

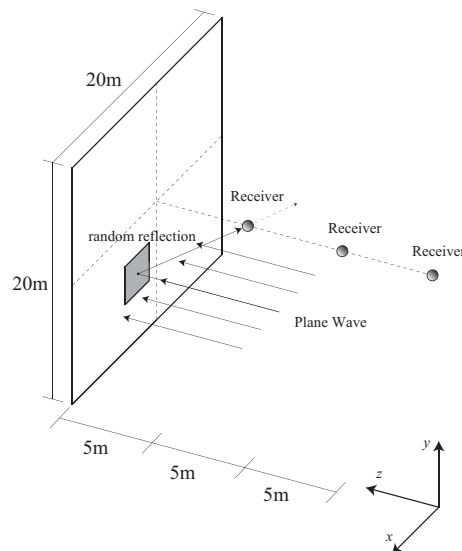


Fig. 3.19 Geometry of a wall and a receiver (TypeD5, TypeD10, TypeD15).

結果と考察

XY 方向のエネルギー方向分布を Fig.3.20 から Fig.3.22 に示す。YZ 方向のエネルギー方向分布を Fig.3.23 から Fig.3.25 に示す。XY 平面では全方向一様に音線が到来するのを確認できる。反射壁面が正方形であるので、正方形の四隅から受信点に到来する音線により分布が正方形になるのが確認できる。YZ 平面では、壁面と受信点の距離による見込み角を点線で示す。壁面からの距離が遠ざかるにつれて、壁面と受信点の距離による見込み角が狭くなるため、到来する音線のエネルギー方向分布の範囲が狭まるのが確認できる。離散化幅 10° では離散化幅と見込み角度の関係で見込み角度付近でずれが生じるが、いずれの Type でも見込み角度以内に音線が到来するのが確認できる。

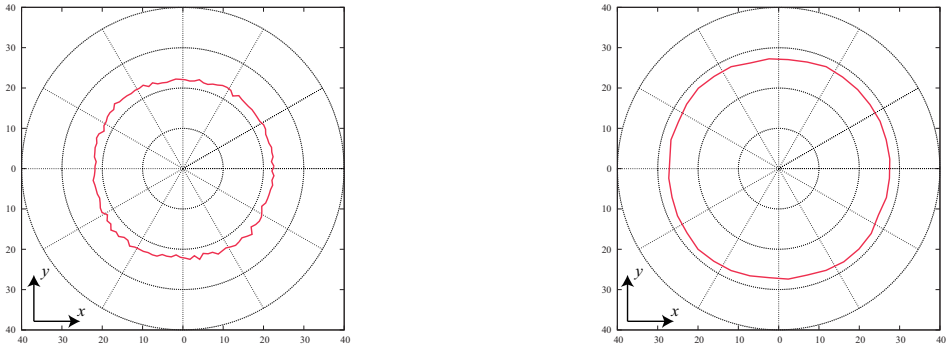


Fig. 3.20 Energy distribution (XY) (TypeD5): left; 3° , right; 10° .

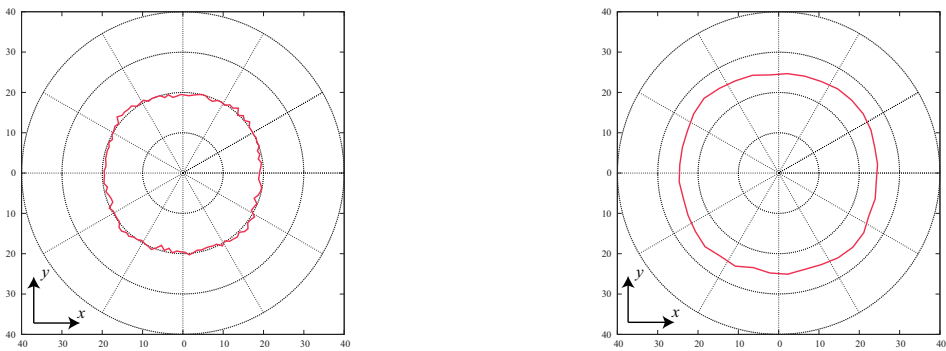


Fig. 3.21 Energy distribution (XY) (TypeD10): left; 3° , right; 10° .

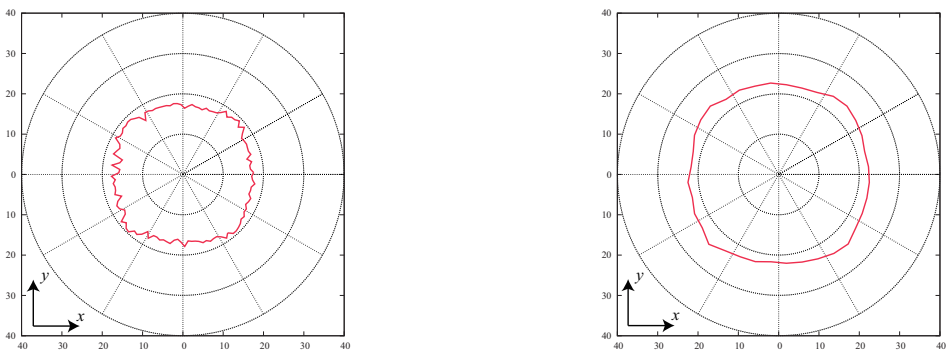


Fig. 3.22 Energy distribution (XY) (TypeD15): left; 3° , right; 10° .

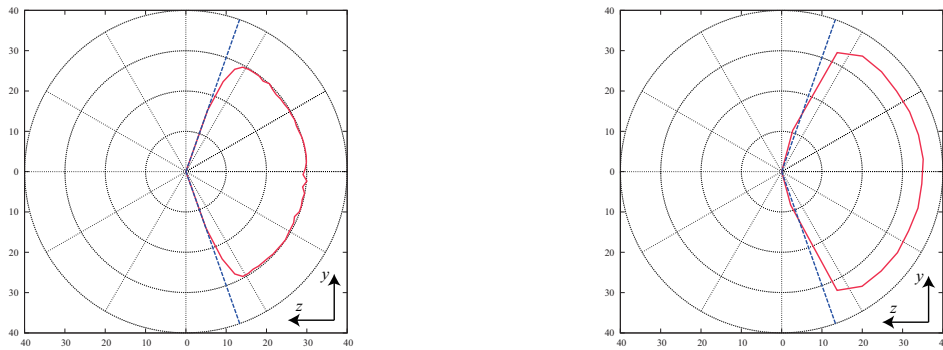


Fig. 3.23 Energy distribution (YZ) (TypeD5): left; 3° , right; 10° .

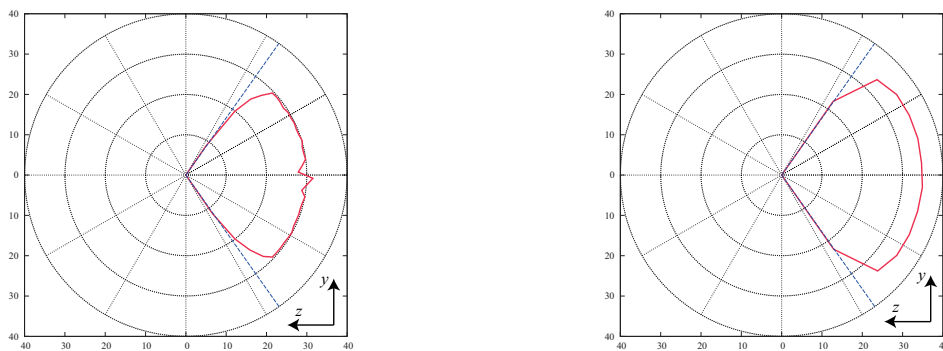


Fig. 3.24 Energy distribution (YZ) (TypeD10): left; 3° , right; 10° .

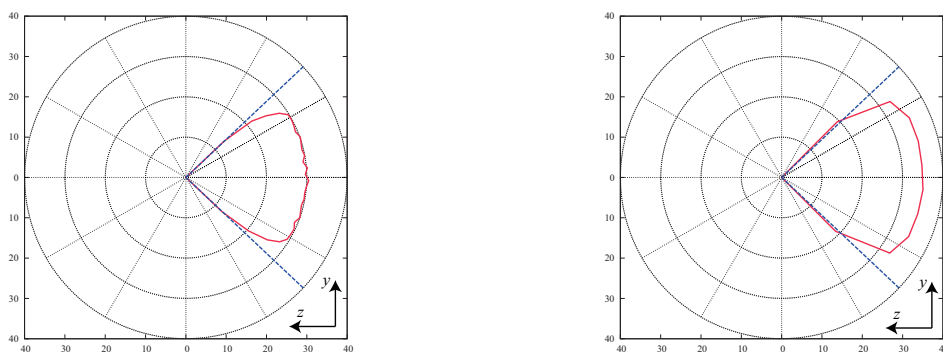


Fig. 3.25 Energy distribution (YZ) (TypeD15): left; 3° , right; 10° .

3.4 まとめ

本章では、拡散成分の取り扱いの中で、反射波の指向特性として、ランベルトの余弦法則の導入に関し、本研究に用いる計算方法の妥当性を検証した。反射ベクトルの生成について角度発生頻度を算出し、球状の分布になることを確認した。次に、空間内での音線のエネルギー方向分布が一様になることを確認した。

第4章

斜入射乱反射率の方向平均化

4.1 はじめに

幾何音響シミュレーションは壁面への入射角と反射角が同一となる鏡面反射を仮定し、音の回折現象、干渉現象など音の波動性を無視する。本研究で用いる解析手法では鏡面反射成分と乱反射成分を取り扱うが、鏡面反射を仮定した場合と同様に音の波動性を無視する。つまり、幾何音響シミュレーションは解析手法自体に誤差要因を含んでいる。さらに、受音点が領域であるために起きる誤差や室形状の分割面数が解析者により異なることなど、幾何音響シミュレーションには様々な誤差要因が存在する [20]。以上から、波動数値解析により算出する詳細な斜入射乱反射率の分布精度が幾何音響シミュレーションに必要であるとは考えにくい。むしろ、ある程度以上詳細な分布精度では、分布精度の反映度合いが幾何音響シミュレーションの計算結果に影響しない可能性があると考えられる。

ところで、本解析手法では、斜入射乱反射率の方向別データを参照して、反射する音線が鏡面反射成分か乱反射成分かを判定する。この斜入射乱反射率の方向別データは計算機に記憶させて用いる。当然のことながら、斜入射乱反射率の方向別データ量が少なければ計算負荷は低い。計算負荷の観点から、斜入射乱反射率の分布精度を下げても幾何音響シミュレーションへ導入するのが望ましい。

また、波動数値解析により算出する詳細な斜入射乱反射率の分布精度上必要なデータ量を実測で求めるには、膨大な手間と時間が掛かり、現実的ではない。将来的に斜入射乱反射率の測定が可能になり斜入射乱反射率の実測値を用いることを想定すると、斜入射乱反射率の分布精度を下げても幾何音響シミュレーションへ導入するのが望ましい。

そこで、本章では波動数値解析により算出される斜入射乱反射率を幾何音響シミュレーションへ導入する方法として、斜入射乱反射率の方向平均化を用いる。方向平均化による入射角依存性の分布劣化を定量的に把握することを目的とする。

4.2 斜入射乱反射率のブロック平均

斜入射乱反射率の方向平均化の方法として、入射角度分割数をパラメータとして斜入射乱反射率の分布精度をパラメトリックにスタディできるブロック平均を用いる。ブロックとは、後述する方法により分割される入射方向の集合を指す。ブロック内の入射方向の斜入射乱反射率から平均値を求め、ブロック内の乱反射率とする。ブロック内の全ての入射方向に対して、この平均値を用いる。幾何音響シミュレーションに導入するときには、この平均値をブロック内に入射する音線に対する乱反射率として用いることを意図する。

ブロック平均による入射角依存性の分布劣化を把握するため、波動数値解析により算出する詳細な斜入射乱反射率(以下、元データ)を元に、ブロック平均を施し、元データに対するブロック平均値の誤差を検討する。

4.2.1 検討方法

建築空間で一般的に用いられる拡散体として一次元周期構造壁面(リブ構造)がある。対象面の多い二次元周期構造に比べ、一次元周期構造壁面は乱反射率の入射角依存性が強く現れる壁面形状である。ブロック平均による入射角依存性の分布劣化を把握するにあたり、斜入射乱反射率の分布として、入射角依存性が強く、方向性があるものが望ましい。

そこで、本検討では正弦波・矩形波断面の1次元周期構造壁面を対象とする。正弦波、矩形波の周期、高さは20 cm, 6 cmである(Fig.4.1)。周波数は1 kHz, 2 kHz, 4 kHzとした。この周波数で、上記寸法の正弦波、矩形波断面のランダム入射乱反射率を(Table4.1)に示す。この形状の拡散体の斜入射乱反射率は、境界要素法(BEM)を用いた波動数値解析により、既報[12]で算出されている。1 kHz, 2 kHz, 4 kHzの元データをFig.4.2に示す。この元データのデータ量は波動数値解析精度上の入射角度の離散化条件から決定される。天頂角、方位角を離散化幅 3° で等立体角に離散化した入射方向の方向別データである。入射方向は2,344方向である[12]。この斜入射乱反射率データを元に、入射方向によるブロック平均を施す。

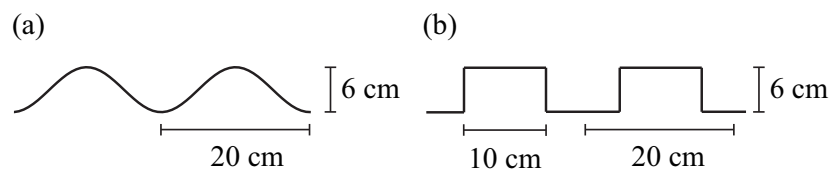


Fig. 4.1 Two types of samples with periodical surfaces: (a) sinusoid (b) rectangles.

Table 4.1 Two types of samples. Random-incidence scattering coefficient(s_r).

	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Sinusoid	0.21	0.78	0.83
Rectangles	0.29	0.67	0.57

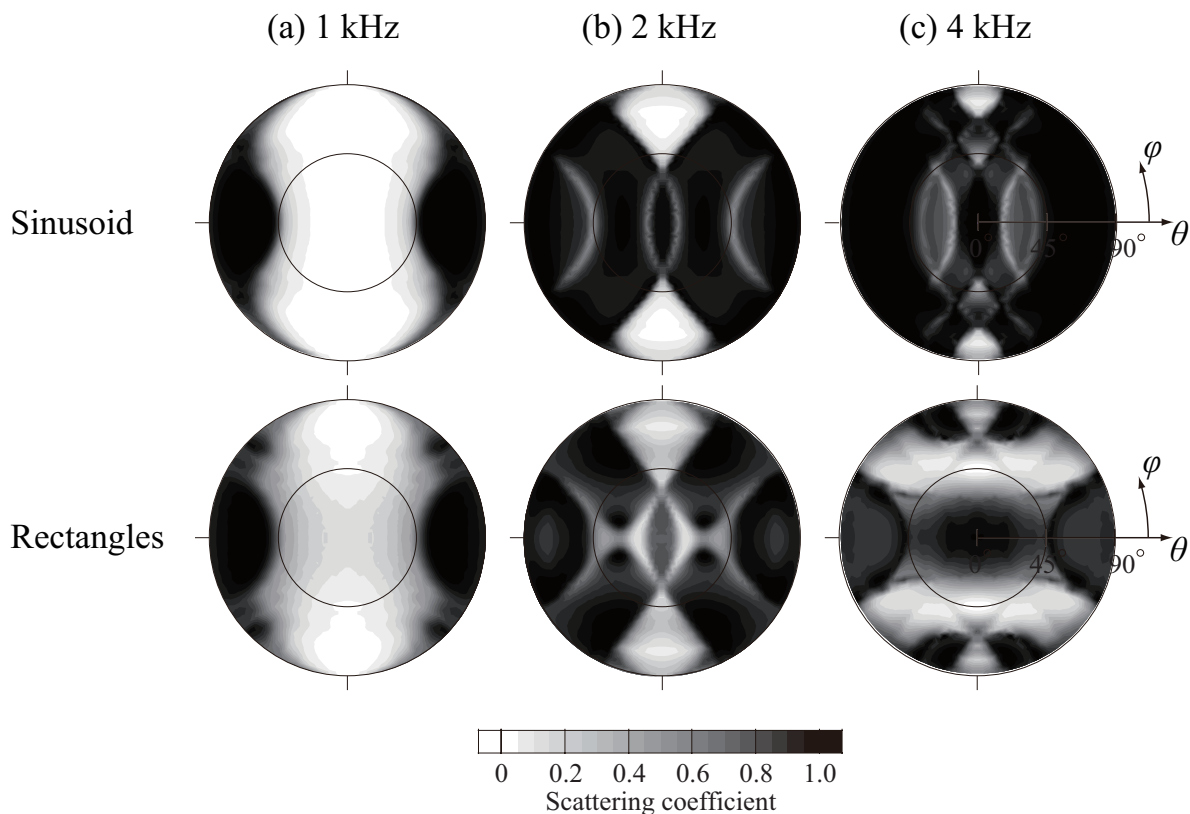


Fig. 4.2 Distribution of the directional scattering coefficients for sinusoid and rectangles : (a) 1 kHz, (b) 2 kHz and (c) 4 kHz.

入射角は Fig.4.3 に示すように極座標において定義する。この極座標は、音線が入射する壁面の面内方向で定義される。ブロックメッシュの分割は、この入射角の天頂角 θ 、方位角 ϕ を各々整数 N_θ, N_ϕ で分割することにより求める。 N_θ を 2, 3, 4, 5 に、 N_ϕ を 4, 8, 12, 16, 20 に変化させた場合のブロックメッシュを Fig.4.4 に示す。本検討では、Fig.4.4 に示す全ケースを用いる。ブロック平均はブロック内の斜入射乱反射率の値から、平均値を算出することにより求める。これを全ブロックに対して行う。Fig.4.5 に元データから $(N_\theta, N_\phi) = (2, 4)$ にブロック平均を施す例を示す。なお、平均値はブロック内の斜入射乱反射率を算術平均により求める。

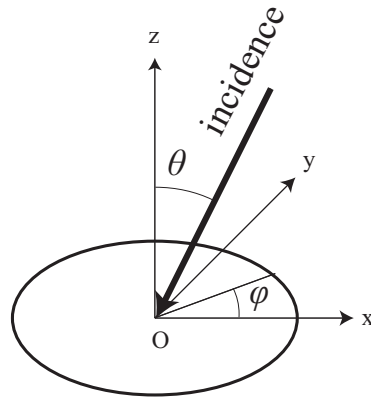


Fig. 4.3 Illustration of an incident angle

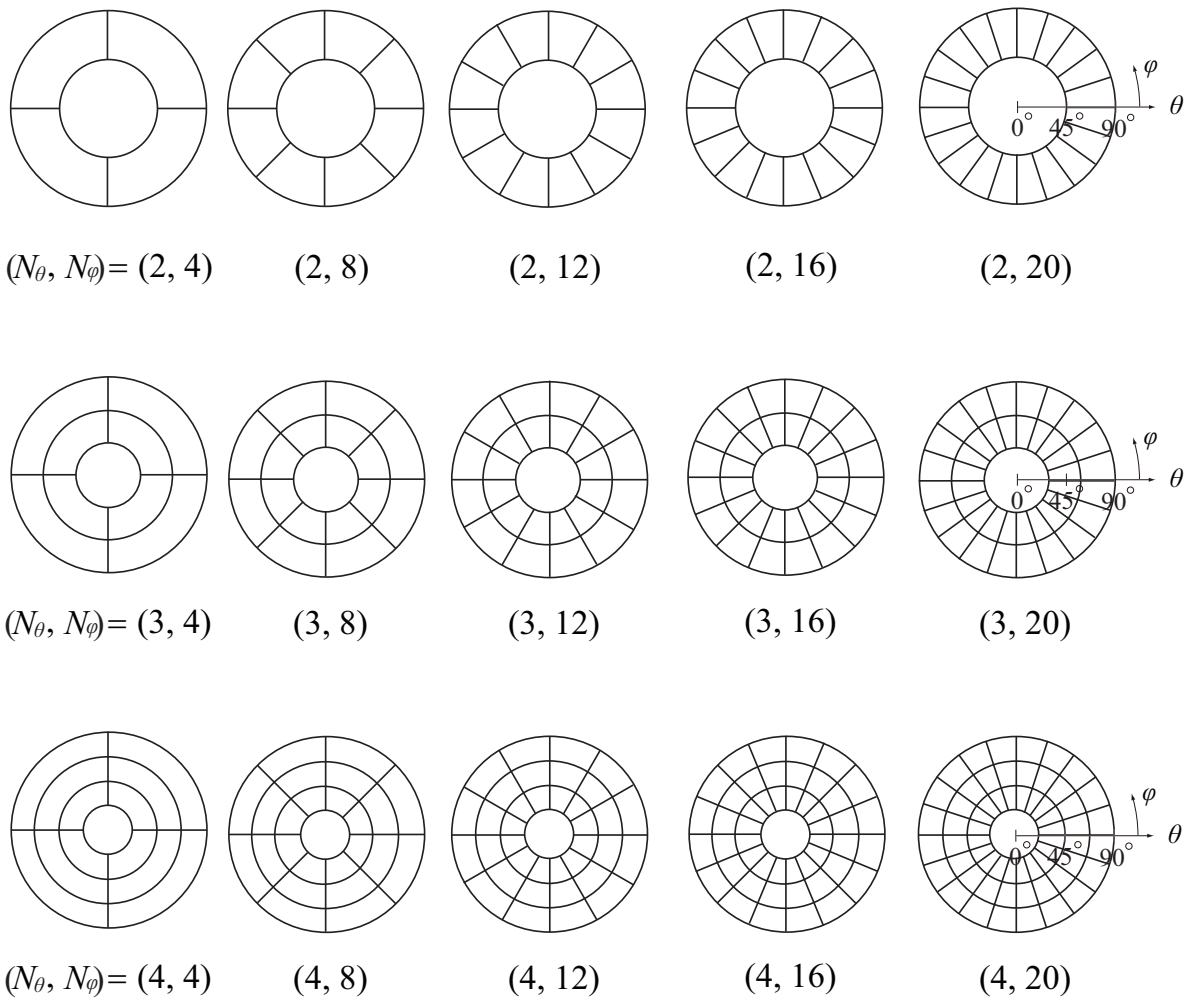


Fig. 4.4 Example of directional blocks for averaging scattering coefficients.

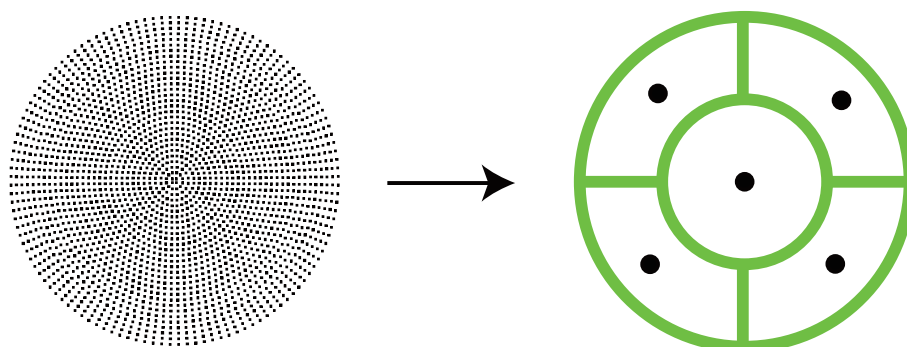


Fig. 4.5 Example of averaging scattering coefficients: $(N_\theta, N_\phi) = (2, 4)$.

ブロック平均を用いてブロック平均値を求めることで、元データに対し斜入射乱反射率の方向別データ量は減少する。従って、ブロック平均により、斜入射乱反射率の分布精度は下がり、ブロックメッシュが粗いほど斜入射乱反射率の分布精度は下がる。 $(N_\theta, N_\phi) = (2, 4)$, $(N_\theta, N_\phi) = (4, 16)$ を用いた場合のブロック平均値の分布を Fig.4.6 に例示する。

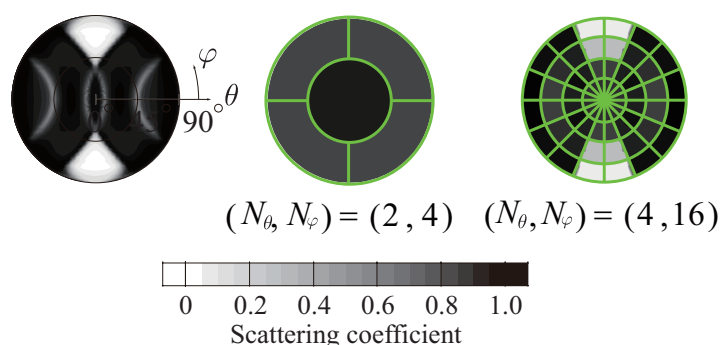


Fig. 4.6 Distribution of average scattering coefficients for sinusoid with w/o averaging, $(N_\theta, N_\phi) = (2, 4)$ and $(N_\theta, N_\phi) = (4, 16)$.

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。次式により算出する。

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \cos \theta_i}{\sum_{i=1}^n \cos \theta_i}} \quad (4.1)$$

但し、 e : 誤差、 n : 入射数、 x_i : 元データの入射方向に対して、ブロック内の乱反射率にブロック平均値を用いた値、 y_i : 元データ、 θ_i : 入射角の天頂角

Eq.(4.1) を用いて誤差の評価を行う。室内音場を解析する上で、擦過角で入射する音のエネルギーは小さいので、擦過角付近の値の誤差を擦過角以外の値より小さく評価する必要がある。Eq.(4.1) ではランダム入射乱反射率算出時と同様に入射角度に対して重み付けを行い、擦過角付近で入射する斜入射乱反射率の誤差は小さく評価する。

一方、ブロック平均を用いた場合、ブロック平均値はブロックメッシュの方位に依存して値が変わる (Fig.4.7)。よって、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する。

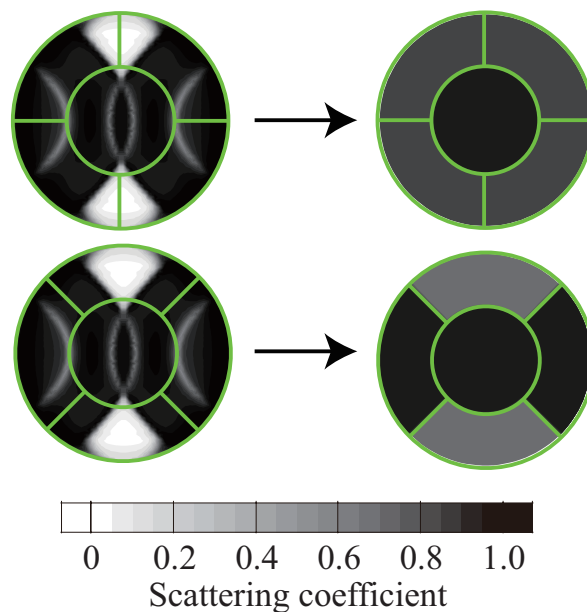


Fig. 4.7 Distribution of averaging scattering coefficients calculated by different block mesh directions for sinusoid with w/o averaging and $(N_\theta, N_\phi) = (2, 4)$.

4.3 結果と考察

Fig.4.8 から Fig.4.10 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。赤線はランダム入射値の誤差を示す。ランダム入射値は、斜入射乱反射率を統計入射平均した値である。この誤差はランダム入射値と元データとの誤差であり、ランダム入射値を用いている従来の幾何音響シミュレーションに含まれる誤差を表している。

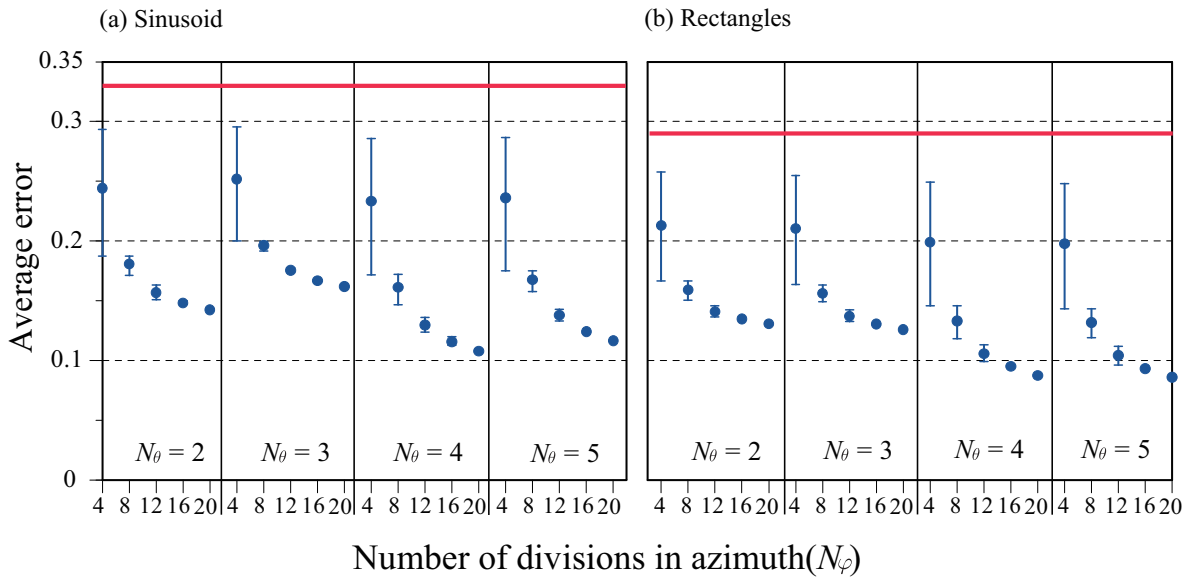


Fig. 4.8 Average errors of block average scattering coefficients to original directional values at 1 kHz. Red lines represent errors of random-incidence values.

1 kHz の正弦波, 矩形波について, メッシュ方位を変えた場合の最大・最小・平均誤差を Fig.4.8 に示す。正弦波, 矩形波断面とも, 天頂角分割数 (N_θ) より方位角分割数 (N_ϕ) の方が誤差への影響が大きい。1 kHz では, $N_\phi = 4$ にてメッシュ方位による誤差の変動が大きい。これは, Fig.4.2 に示すように, 元データの方位角 ϕ 方向の分布が位置により大きく異なるためと考えられる。メッシュ方位の影響は両断面形状とも $N_\theta = 4$ 程度で微小となり, 誤差は $N_\phi = 16$ 程度で 0.15 以下に収束する。

2 kHz の正弦波, 矩形波について, メッシュ方位を変えた場合の最大・最小・平均誤差を Fig.4.9 に示す。正弦波, 矩形波断面とも, 天頂角分割数 (N_θ) より方位角分割数 (N_ϕ) の方が誤差への影響が大きい。1 kHz に比べ, ランダム入射値の誤差が小さいことから, 方位角分割数 (N_ϕ) の増加に伴う誤差の減少の程度が 1 kHz より小さい。メッシュ方位の影響は両断面形状とも $N_\theta = 4$ 程度で微小となり, 誤差は $N_\phi = 16$ 程度で 0.15 以下に収束する。

4 kHz の正弦波, 矩形波について, メッシュ方位を変えた場合の最大・最小・平均誤差を Fig.4.10 に示す。正弦波, 矩形波断面とも, 天頂角分割数 (N_θ) より方位角分割数 (N_ϕ) の方が誤差への影響が大きい。特に, 正弦波形状は, ランダム入射値の誤差が小さく, 天頂角分割数 (N_θ), 方位角分割数 (N_ϕ) の増加に伴う誤差の減少の程度は小さい。メッシュ方位の影響は両断面形状とも $N_\theta = 4$ 程度で微小となり, 誤差は $N_\phi = 16$ 程度で 0.15 以下に収束する。

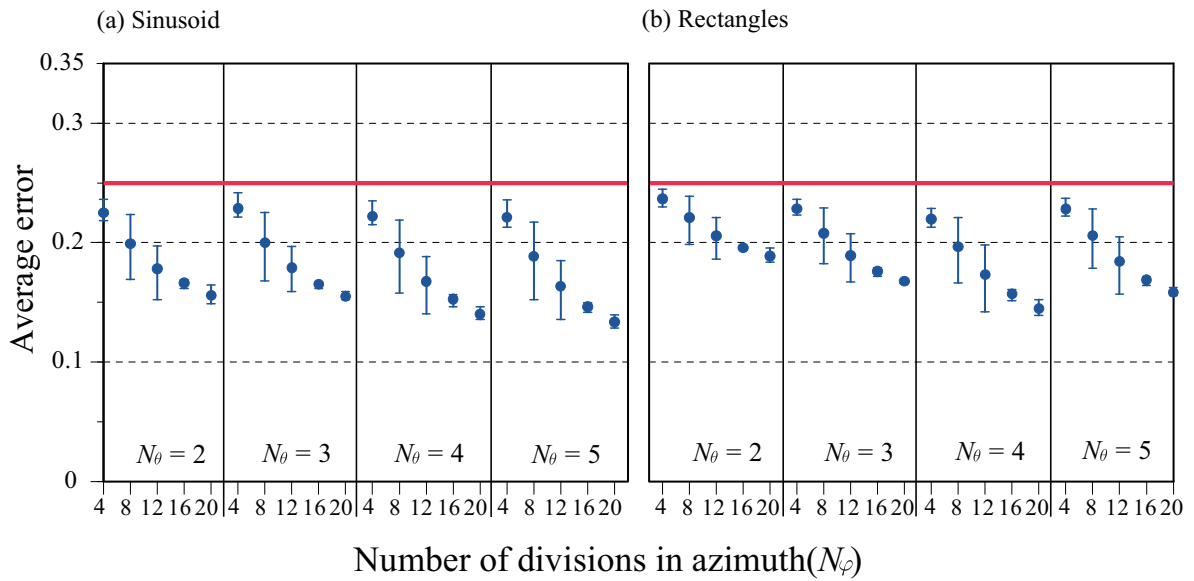


Fig. 4.9 Average errors of block average scattering coefficients to original directional values at 2 kHz. Red lines represent errors of random-incidence values.

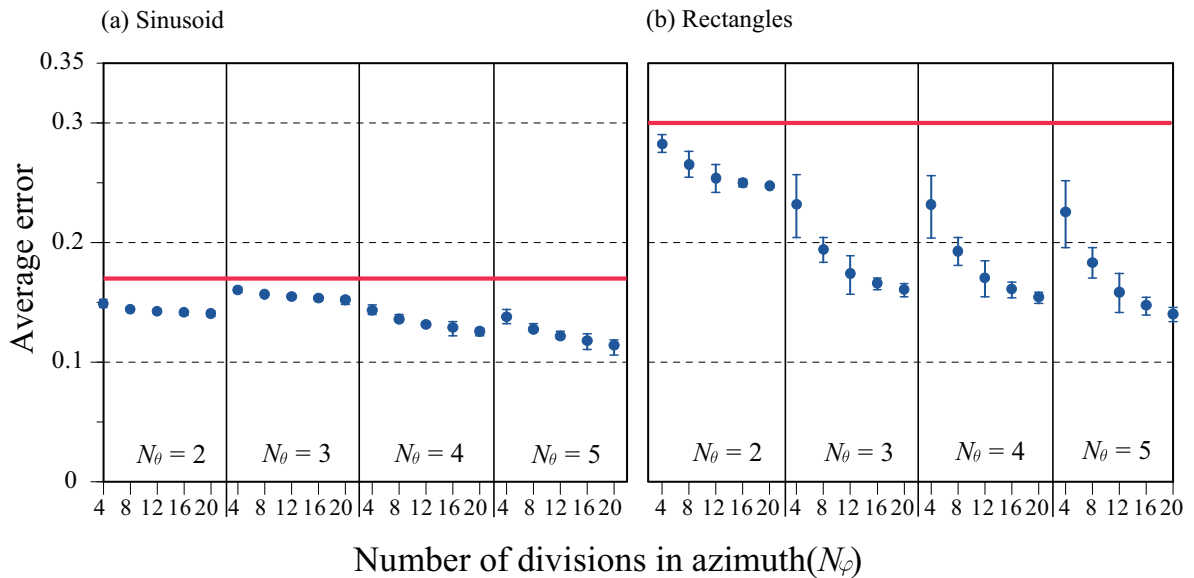


Fig. 4.10 Average errors of block average scattering coefficients to original directional values at 4 kHz. Red lines represent errors of random-incidence values.

以上を踏まえると全体として、天頂角分割数 (N_θ) より方位角分割数 (N_ϕ) 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。

4.4 まとめ

本章では、幾何音響シミュレーションへ斜入射乱反射率を導入する前段階として、斜入射乱反射率の方向平均化による入射角依存性の分布劣化を定量的に把握した。斜入射乱反射率の方向平均化の方法としてブロック平均を提案し、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した。

この検討により、誤差は、周波数、拡散体形状により異なるが、ブロックメッシュの方位による誤差の変動と、ブロックメッシュの細かさによる誤差の減少の傾向は本検討で用いた一次元周期構造において、全ケース共通することが分かった。天頂角分割数 (N_θ) より方位角分割数 (N_ϕ) 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、即ち入射角依存性が強い場合にその傾向が顕著となる。結果として、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 以下に収束することが分かった。

従って、第 5 章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。なお、幾何音響シミュレーションにブロック平均値を用いる場合、Fig.4.4 に示すような方位角方向に回転していないブロックメッシュを用いる。

第 5 章

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

5.1 はじめに

第 4 章では, 斜入射乱反射率の方向平均化手法としてブロック平均を提案し, ブロック平均による入射角依存性の分布劣化を定量的に把握した。本章では, 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ことを目的とする。

まず, 斜入射乱反射率を導入した場合と従来の幾何音響シミュレーションで用いられているランダム入射値 (ランダム入射乱反射率) を用いた場合とで室内音響指標の計算値に差異が現れるかを把握する必要がある。そこで, 吸音面配置, リブの設置方向をパラメータとして, ランダム入射値を用いた場合と斜入射乱反射率を導入した場合の室内音響指標の計算値を比較する。それらの比較を通して, 斜入射乱反射率の導入が室内音響指標の計算値に与える影響を把握する。

次に, 斜入射乱反射率の導入精度に関する検討を行う。第 4 章では, ブロック平均による入射角依存性の分布劣化を定量的に把握した。ブロック平均値を幾何音響シミュレーションに導入し, 入射角依存性の分布劣化が室内音響指標の計算誤差へ与える影響を考察する。検討は, 上記の検討により室内音響指標の計算値への影響が顕著な吸音面配置及びリブ設置方向にて行う。

さらに, リブの設置方向に着目して, 斜入射乱反射率を導入した場合の室内音響指標の計算値に与える差異について検討する。リブ設置方向をパラメータとして計算値の比較を行い, 計算結果に差異が生じる要因について考察する。検討は, 上記の検討により室内音響指標の計算値への影響が顕著な吸音面配置を用いて行う。

最後に, 実測値との比較を通して斜入射乱反射率の導入による室内音響指標の計算値の

差異の妥当性を検証すると共に、計算結果の差異が生じる要因及び実測値との対応関係について考察する。

5.2 斜入射乱反射率の導入が室内音響指標の計算値に与える影響

現在、幾何音響シミュレーションでは、一般的にランダム入射乱反射率が用いられている。それに対し、斜入射乱反射率を導入した場合、計算値に差異が現れる室内音響指標、また、その差異の程度については不明確である。そこで、これらの差異及び差異の程度を把握することを本検討の目的とする。本検討では、吸音面配置、リブ設置方向の違いが室内音響指標の計算値に与える影響に着目する。吸音面配置について、吸音面が偏在するような非拡散音場において壁面へのリブ設置方向が室内音響特性に影響を及ぼすことが報告されている [33]。すなわち、斜入射乱反射率を幾何音響シミュレーションに導入し、非拡散音場で室内音響指標を算出した場合に、差異が顕著に現れると考えられる。そこで、非拡散音場を想定した解析モデルを用いてケーススタディを行う。

5.2.1 計算条件の設定

音線法を用い、室条件、乱反射率をパラメータとしてケーススタディを行う。音源から音線を放射し、受音点で得られるインパルス応答から室内音響指標を算出した。室内音響指標は、 T_{20} 、 EDT 、 G 、 C_{80} 、 LF を算出した。以下に解析方法の詳細を述べる。

まず、本研究で用いた音線追跡の方法について述べる。音線法では、室の稜に音線が入射した場合、反射方向が室の外側に向いてしまい、次の音線と面の交点を決めることができない場合がある。商用幾何音響解析ソフトである CATT-Acoustic v8.0 [14] では、音線数に対して、室の稜に入射する音線が 10 % 未満の場合は解析結果は妥当であるとしている。本研究では、室の稜に音線が入射した場合、その時点でその音線の追跡は終了するアルゴリズムを用いている。

次に、音線追跡時間については、後述する室寸法、平均吸音率 0.3 を用いて Eyring の残響式より計算される残響時間は 1.8 秒であることから、吸音面偏在による残響時間の変動を考慮して 4.0 秒まで追跡するものとする。なお、音線追跡は、反射回数ではなく追跡時間で打ち切るものとし、4.0 秒以降の音線はインパルス応答に含まれない。受音球半径については、2.4 節の設定に従い、受音球半径は 0.5 m とした。

最後に、音線数は 2.4 節に従い設定した。一つ目の条件として、SN 比から音線数を求める。しかし、受音球で受音する場合、直接音として受音する数は音源から放った音線の一部であり、2.4 節の SN 比の条件は、各受音点の SN 比を確保する条件としては不十分である。

そこで、減衰曲線を求め、室内音響指標の算出に必要なエネルギー減衰が確保できる音線数を決定した。二つ目の条件として、定常状態を表現できる音粒子の最低個数を求める。音源から放ったエネルギーが空間内に満遍なく行き渡った状態では、受音球を空間内のどこに設定しても等しい音粒子数が検出される。受音球を任意の位置に設置したときに音粒子が少なくとも一つ存在することが必要条件となる。よって次式を満たすこととなる。

$$N \geq \frac{V}{\frac{4}{3}\pi r^3} \quad (5.1)$$

但し、 N : 音線数, V : 室体積, r : 受音球半径とする。本検討で解析する室寸法 (Table5.1) 及び、受音球半径を代入し、 $V = 20 \times 20 \times 40$, $r = 0.5$ より $N \geq 30558$ が必要条件となる。三つ目の条件として、伝播距離から音線数を求める。音線の間隔が拡がりすぎて受音球に入らない状況を避けるため、受音球に音粒子が一つ入ることが必要条件になる。よって次式を満たすこととなる。

$$r \geq 2\sqrt{\frac{ct_{max}}{N}} \quad (5.2)$$

但し、 N : 音線数, c : 音速, t_{max} : 音線追跡時間, r : 受音球半径とする。受音球半径, 音線追跡時間を代入し、 $c = 340$, $t_{max} = 4.0$, $r = 0.5$ より $N \geq 21760$ が必要条件となる。以上より本検討では必要条件の桁数を1つ上げて音線数を20万本に設定する。

5.2.2 解析モデル

一般的に幾何音響シミュレーションは設計実務にてホールなどの大規模音場の解析に用いられる。そこで、本検討において、ホール規模の直方体室を解析の対象とする (Fig.5.1)。室寸法は $20\text{ m} \times 40\text{ m} \times 20\text{ m}$ (h) の直方体室である (Table 5.1)。リブは周壁4面に設置し、周期方向が床面に対し水平となる向きと垂直になる向きの2方向設定する。解析モデルを Fig.5.2 に示す。

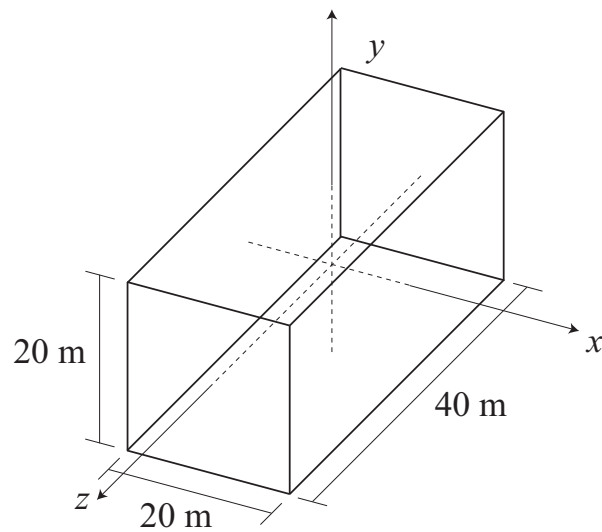


Fig. 5.1 Test model of a hall : $20\text{ m} \times 40\text{ m} \times 20\text{ m}$ (h).

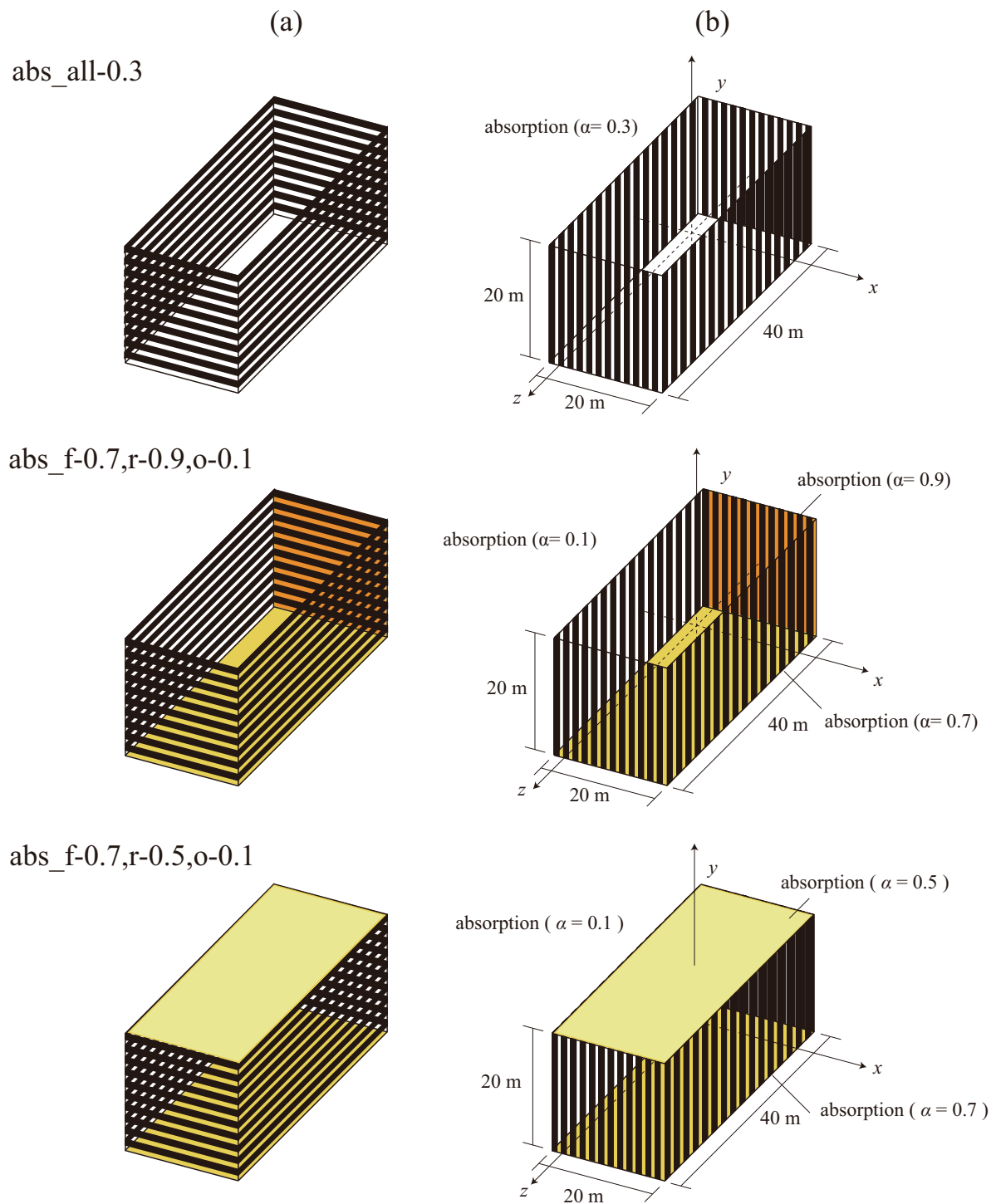


Fig. 5.2 Test models of a hall with diffuse walls for abs_all- 0.3, abs_f-0.7,r-0.9,o-0.1, abs_f-0.7,c-0.5,o-0.1: (a)horizontal, (b) vertical.

音源の位置はホールのステージ位置を想定して Fig.5.5 に示す。音源高さは、1.2 m とした (Fig.5.4)。音源は、2.5 節の設定に従い、音線の放射立体角が等立体角に離散化された音源を用いる。受信点は、室平面上で中央に 3 点と側壁近傍に 3 点の計 6 点を設定する (Fig.5.5)。高さは音源と同様 1.2 m とした (Fig.5.4)。

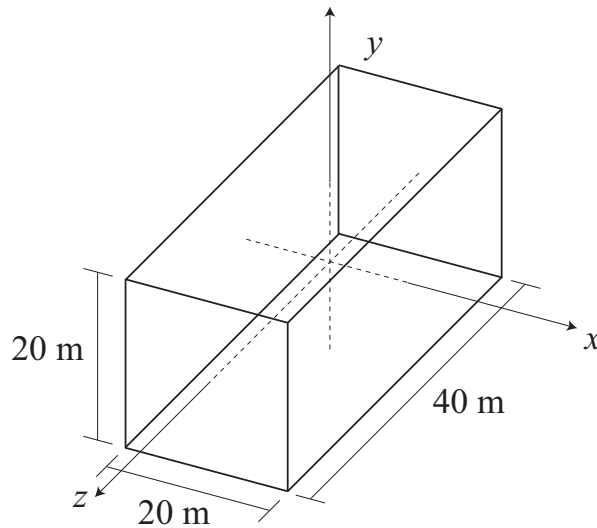


Fig. 5.3 Test model of a hall.

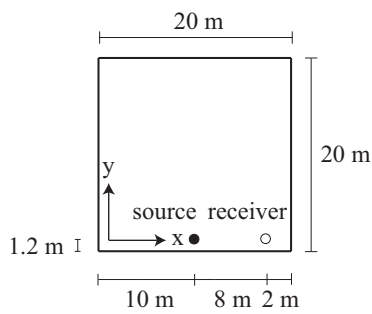


Fig. 5.4 Elevation of a test model.

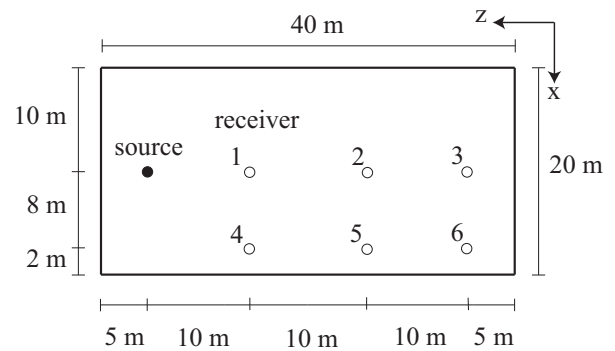


Fig. 5.5 Plan of a test model.

各解析モデルにおける壁面の吸音率を Table 5.1 に示す。全解析モデル共通で、平均吸音率 $\bar{\alpha} = 0.3$ に揃えて設定した。abs_all-0.3 は吸音率を偏在させず全壁面を吸音率 $\alpha = 0.3$ で与える。abs_f-0.7,r-0.9,o-0.1 では、床面と後壁のみ吸音性とし、天井、側壁、前壁を反射性とする。abs_f-0.7,c-0.5,o-0.1 では、床面と天井を吸音性とし、周壁4面を反射性とした。

Table 5.1 Three types of test models.

	directions of diffuser	room size	$\bar{\alpha}$	absorption coefficient (α)
abs_all-0.3	horizontal (h)	w = 20, d = 40, h = 20	0.3	walls and floor and ceiling : 0.3
	vertical (v)			
abs_f-0.7,r-0.9,o-0.1	horizontal (h)	w = 20, d = 40, h = 20	0.3	floor : 0.7 rear wall : 0.9 other walls and ceiling : 0.1
	vertical (v)			
abs_f-0.7,c-0.5,o-0.1	horizontal (h)	w = 20, d = 40, h = 20	0.3	floor : 0.7 ceiling : 0.5 other walls : 0.1
	vertical (v)			

乱反射率はランダム入射値 (ランダム入射乱反射率) と斜入射乱反射率の元データを用いる。解析に用いる斜入射乱反射率モデルは、Fig.5.6 に示す最も入射角依存性が大きくなると考えられるモデルを想定した。この斜入射乱反射率モデルのランダム入射乱反射率は0.5である。乱反射率は各解析モデルにおいて周壁4面において与え、天井、床面の乱反射率は0に設定した。

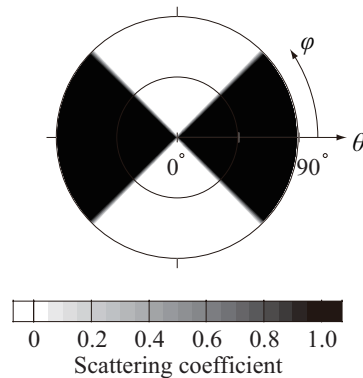


Fig. 5.6 Distribution of the directional scattering coefficients for a test model.

5.2.3 結果と考察

各解析モデルにおいて、音源から音線を放射し、受音点で得られる時系列エネルギーインパルス応答から室内音響指標として T_{20} , EDT , G , C_{80} , LF を算出した。Fig.5.7 から Fig.5.11 に計算結果を示す。各解析モデルにて、乱反射率のランダム入射値を用いた場合、斜入射乱反射率の元データを用いた場合 (リブの周期方向が床面に対し水平, 垂直) を比較した。

吸音面配置による影響

T_{20} の計算結果を Fig.5.7 に示す。abs_all-0.3 では大きな差は見られない。その他の解析モデルでは受音点によりばらつくが、元データを用いた場合に比べ、ランダム入射値を用いた場合は T_{20} を過小評価する傾向にある。ランダム入射値を用いた場合、完全拡散を仮定する Eyring の残響時間 1.8 秒に近い。本検討のランダム入射値は 0.5 であり、ランダム入射値を用いた場合、拡散性が過大に評価されていると考えられる。特に,abs_f-0.7,c-0.5,o-0.1 では差が顕著に現れている。他の解析モデルと比較すると,abs_f-0.7,r-0.5,o-0.1 は長手方向と短手方向の2方向に反射性の平行壁面が存在することから平行壁面間で反射を繰り返す音線により元データを用いた場合に T_{20} が増加すると考えられる。

EDT の計算結果を Fig.5.8 に示す。abs_all-0.3,abs_f-0.7,r-0.9,o-0.1 では大きな差は見られない。absf-0.7,c-0.5,o-0.1 では元データに対して、ランダム入射値を用いた場合の差が顕著に現れている。これは、ランダム入射値を用いた場合、拡散性が過大に評価されているためと考えられる。理由については T_{20} と同様と2方向の反射性の平行壁面間で反射を繰り返す音線が一因と考えられる。

G の計算結果を Fig.5.9 に示す。abs_all-0.3,abs_f-0.7,r-0.9,o-0.1 では元データに対するランダム入射値を用いた場合の差が弁別閾程度もしくは弁別閾以下となる。それに対し,absf-0.7,c-0.5,o-0.1 は弁別閾を上回る受音点が見受けられる。特に、音源からの距離が遠い受音点 3, 6 でその傾向が顕著である。

C_{80} の計算結果を Fig.5.10 に示す。abs_all-0.3,abs_f-0.7,r-0.9,o-0.1 では、弁別閾程度もしくは弁別閾以下となる。それに対し,absf-0.7,c-0.5,o-0.1 は弁別閾を上回る受音点が見受けられる。

LF の計算結果を Fig.5.11 に示す。全解析モデルとも、元データを用いた場合のランダム入射値に対する差が、弁別閾程度か弁別閾以上になる受音点が多い。abs_f-0.7,r-0.9,o-0.1 と absf-0.7,c-0.5,o-0.1 の差の程度が同程度であることから、両モデル吸音率が共通である反射性の長手方向の側壁間で反射を繰り返す音線が初期側方エネルギーに寄与すると考えられる。

リブの設置方向による影響

T_{20} については, $abs_all-0.3$ では差が見られない。 $abs_f-0.7,r-0.9,o-0.1$ では, リブ水平とリブ垂直の値は受音点によりばらつく。 $absf-0.7,c-0.5,o-0.1$ では, リブ垂直の方がリブ水平に対し T_{20} が短い。斜入射乱反射率の分布 (Fig.5.6) から, 側壁の平行壁面間で往復する音線はリブ垂直の場合, リブ水平の場合に対し, 散乱成分に変わる確率が高い。そのため, 吸音性の天井及び床に対する音線の到来確率が上がり, T_{20} が短くなったと考えられる。

EDT については, $abs_all-0.3,abs_f-0.7,r-0.9,o-0.1$ で, リブ水平とリブ垂直では, 受音点によりばらつく。 $absf-0.7,c-0.5,o-0.1$ では, リブ垂直の方がリブ水平に対し EDT が短い。この傾向は, T_{20} と同様の理由と考えられる。

G について, 全解析モデルの傾向として, リブ水平の方がリブ垂直より大きい。 $absf-0.7,c-0.5,o-0.1$ では, その傾向が顕著であり, 残響時間の増加に起因すると考えられる。 C_{80} について, $abs_all-0.3,abs_f-0.7,r-0.9,o-0.1$ では, リブ水平の方が, リブ垂直より大きい。一方 $absf-0.7,c-0.5,o-0.1$ では逆になる。 EDT の傾向と対応している。 $absf-0.7,c-0.5,o-0.1$ でリブ水平の C_{80} が低下する原因は, 残響時間の増加に起因すると考えられる。 LF については, 全解析モデルの傾向として, リブ水平の方がリブ垂直より大きい。床面と並行に移動する音線は斜入射乱反射率の分布 (Fig.5.6) から, リブ水平に比べ, リブ垂直の方が斜入射乱反射率が高い入射角度領域に入射する音線が多いと考えられる。そのため, 初期に鏡面反射する音線は, リブ垂直の場合はリブ水平に比べ, 少ないと考えられる。従って, 受音点に到来する初期側方エネルギーはリブ水平の方がリブ垂直より大きくなると考えられる。

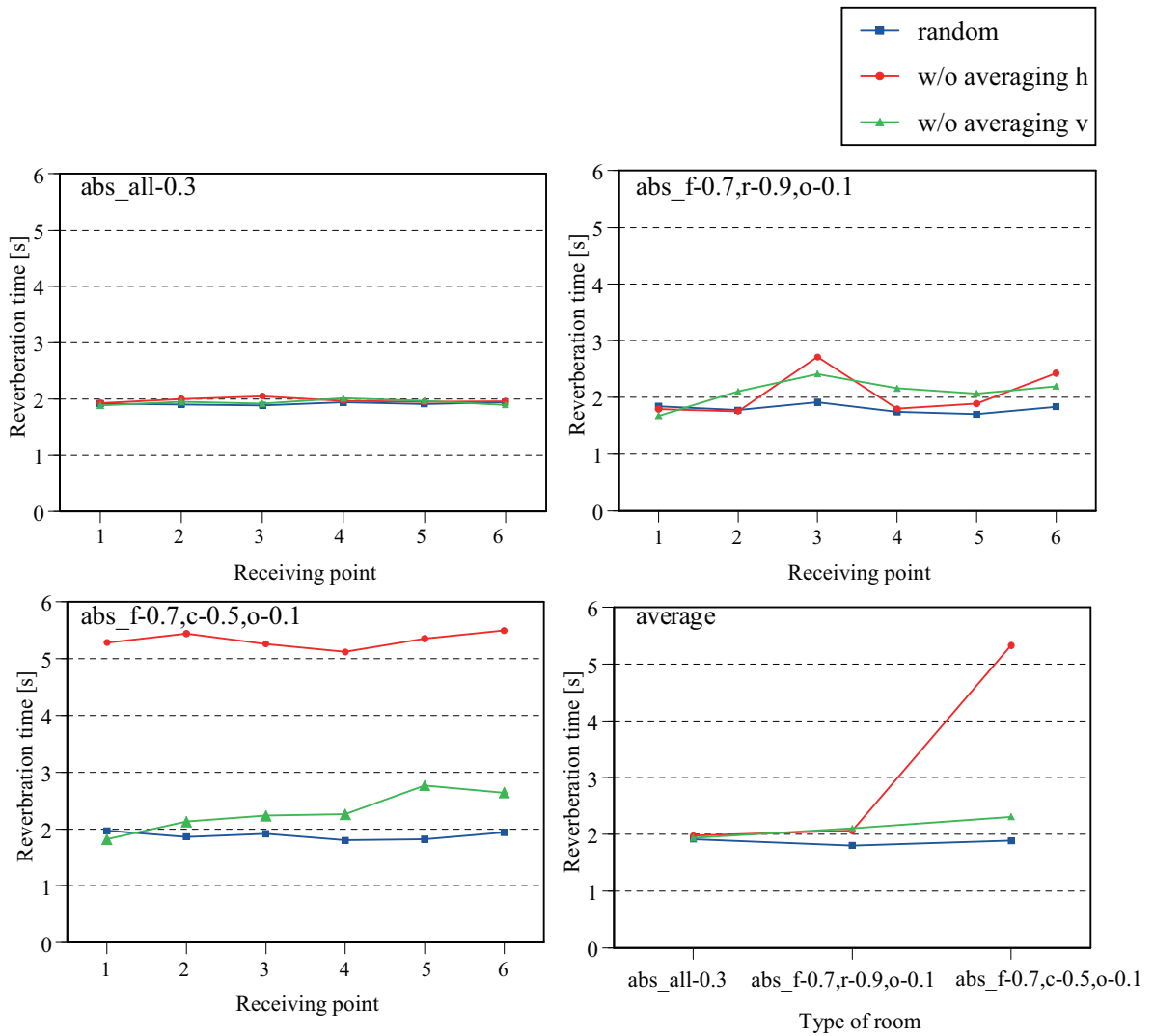


Fig. 5.7 T_{20} for abs_all- 0.3, abs_f-0.7,r-0.9,o-0.1, abs_f-0.7,c-0.5,o-0.1 calculated with different scattering coefficients (random incident value and original directional values: horizontal and vertical).

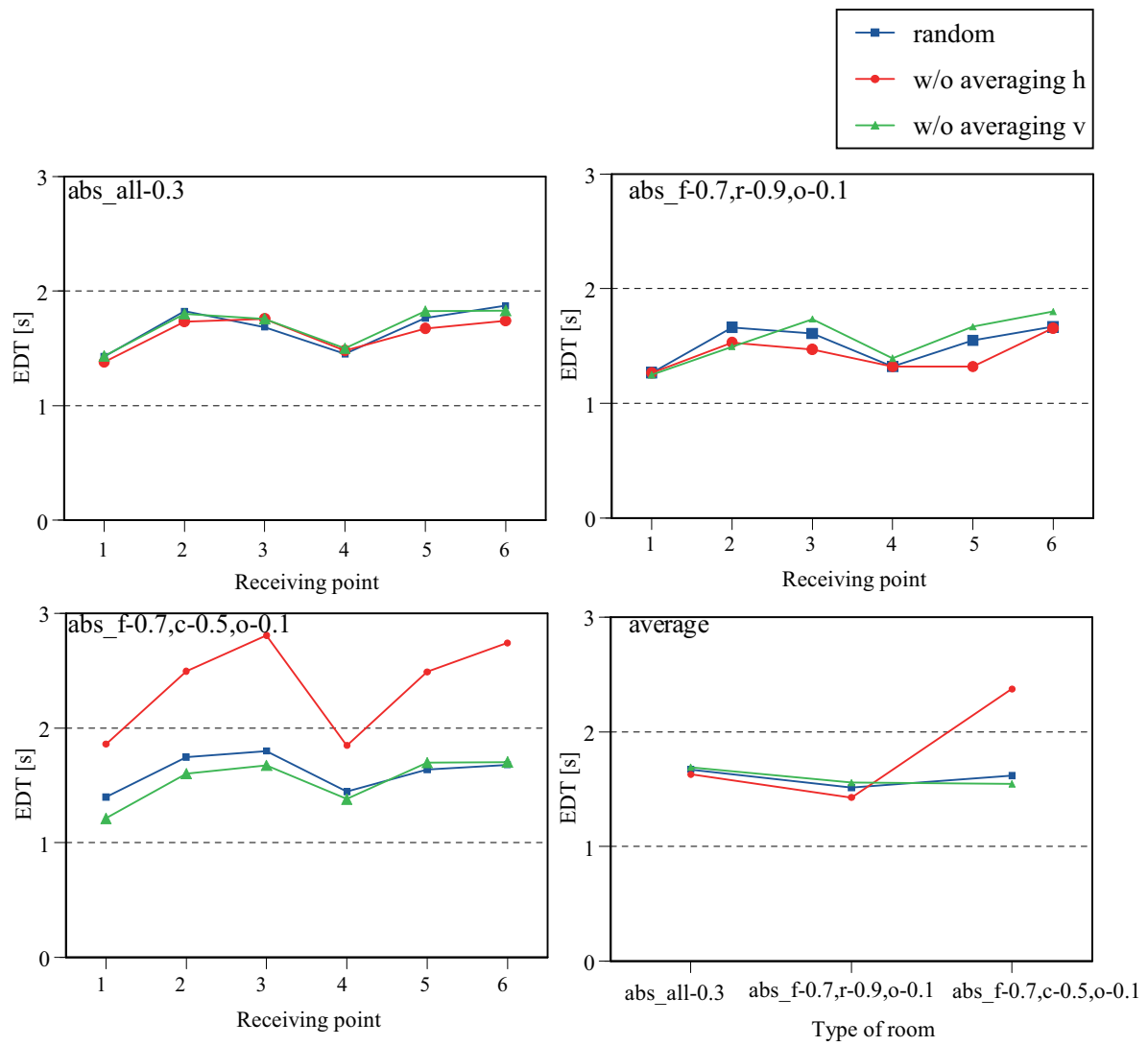


Fig. 5.8 EDT for abs_all- 0.3, abs_f-0.7,r-0.9,o-0.1, abs_f-0.7,c-0.5,o-0.1 calculated with different scattering coefficients (random incident value and original directional values: horizontal and vertical).

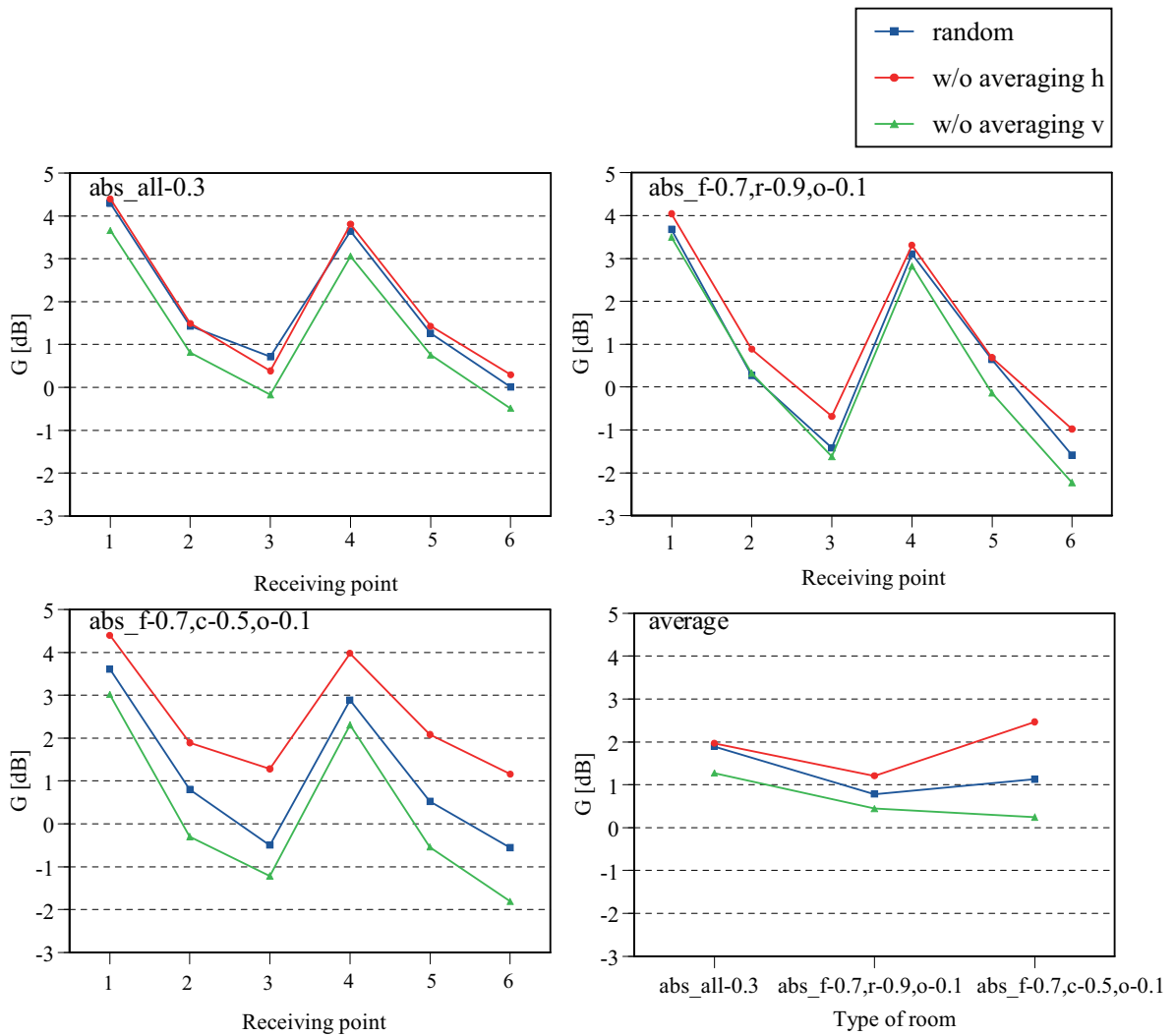


Fig. 5.9 G for abs_all-0.3, abs_f-0.7,r-0.9,o-0.1, abs_f-0.7,c-0.5,o-0.1 calculated with different scattering coefficients (random incident value and original directional values: horizontal and vertical).

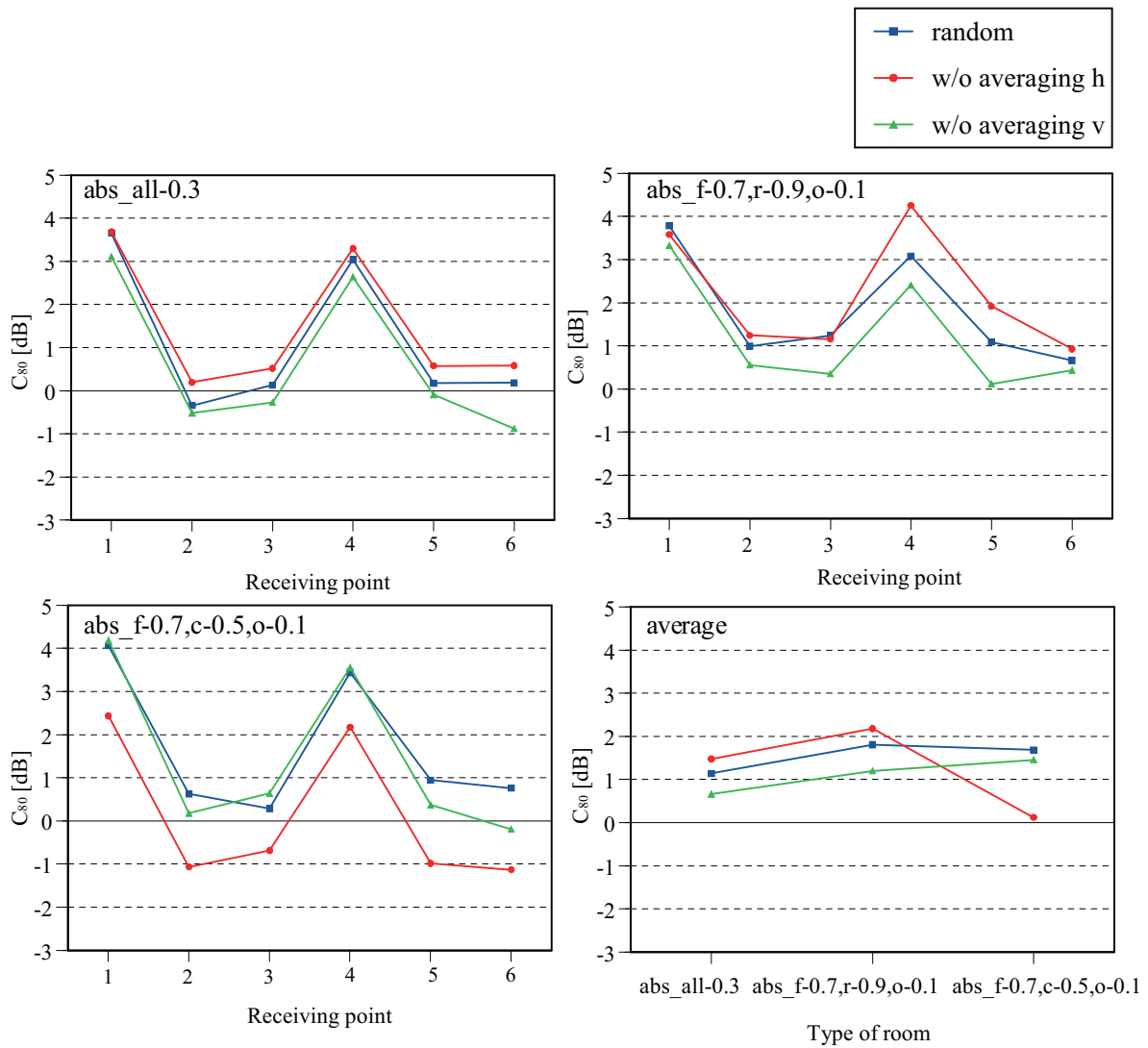


Fig. 5.10 C_{80} for abs_all- 0.3, abs_f-0.7,r-0.9,o-0.1, abs_f-0.7,c-0.5,o-0.1 calculated with different scattering coefficients (random incident value and original directional values: horizontal and vertical).

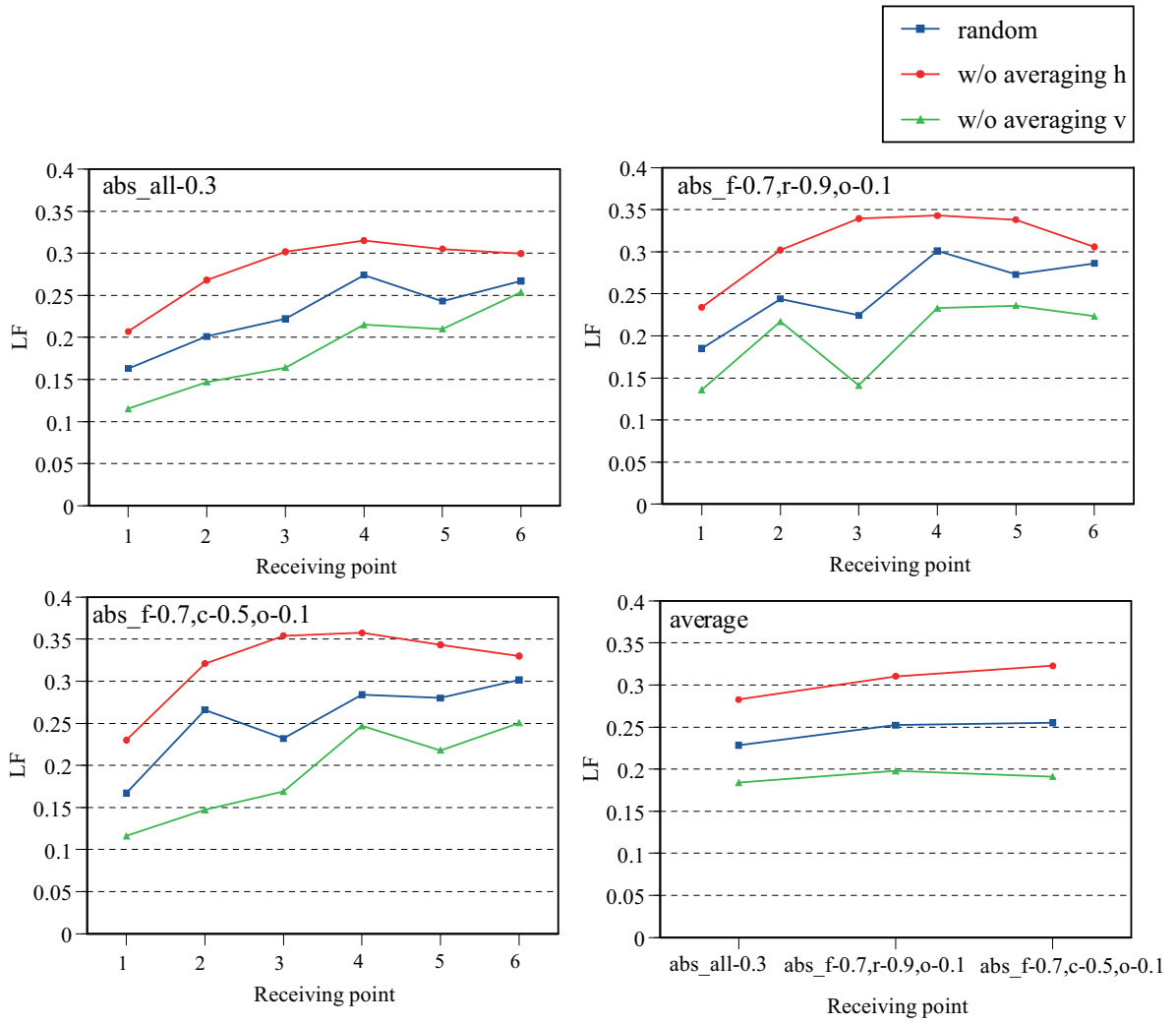


Fig. 5.11 LF for abs_all- 0.3, abs_f-0.7,r-0.9,o-0.1, abs_f-0.7,c-0.5,o-0.1 calculated with different scattering coefficients (random incident value and original directional values: horizontal and vertical).

5.2.4 まとめ

吸音面配置, リブ設置方向をパラメータとしてケーススタディを行い, 斜入射乱反射率の導入が室内音響指標の計算値に与える影響について検討した。吸音面配置は, 天井及び床面を吸音性として周壁を反射性とした abs f-0.7,c-0.5,o-0.1 で斜入射乱反射率の元データを用いた場合とランダム入射値を用いた場合で室内音響指標の計算値の差が顕著に現れた。室内音響指標の計算値では, T_{20} , EDT において差が顕著に現れた。3つの解析モデルを比較を通して, absf-0.7,c-0.5,o-0.1 では, 音線が反射性の側壁間と前壁と後壁間で往復反射することによる影響が大きいと考えられる。

以上の結果より 5.3, 5.4 節の検討は吸音面配置として abs f-0.7,c-0.5,o-0.1 の解析モデルを用いるものとする。

5.3 ブロック平均による室内音響指標の計算誤差に関する検討

第4章では波動数値解析により求めた斜入射乱反射率を幾何音響シミュレーションへ導入する方法として、斜入射乱反射率の方向平均化を用いた。その手法としてブロック平均を提案し、ブロック平均による入射角依存性の分布劣化について検討を行った。本検討では、斜入射乱反射率のブロック平均値を幾何音響シミュレーションへ導入し、室内音響指標の計算誤差を検討する。そして、ブロック平均の手法の有効性について考察することを目的とする。

5.3.1 計算条件の設定

音線法により、後述する解析モデル (Fig.5.12) について、壁面形状及び乱反射率をパラメータとしてスタディを行う。音源から音線を放射し、受音点で得られるインパルス応答から室内音響指標を算出した。室内音響指標は T_{20} , EDT , G , C_{80} , LF を求めた。

まず、音線追跡については、5.2節と同様に、室の稜に音線が入射した場合、その時点でその音線の追跡は終了するアルゴリズムを用いる。

次に、音線追跡時間も5.2節と同様に4.0秒まで追跡するものとする。なお、音線追跡は、反射回数ではなく追跡時間で打ち切るものとし、4.0秒以降の音線はインパルス応答に含まれない。受音球半径も5.2節と同様に、受音点半径は0.5mとした。

最後に、音線数 N についても、5.2節と同様に設定する。定常状態を表現するための必要条件として $N \geq 30558$ を満たす必要があり、伝播距離について必要条件として $N \geq 21760$ を満たす必要がある。以上より本検討では必要条件の桁数を1つ上げて音線数を20万本に設定する。

5.3.2 解析モデル

5.2節では、吸音面配置、リブ設置方向についてケーススタディを行い、斜入射乱反射率の導入が室内音響指標の計算値に与える差異について検討した。その結果、天井及び床面を吸音性として周壁4面を反射性とした解析モデルで斜入射乱反射率の元データを用いた場合とランダム入射値を用いた場合で室内音響指標の計算値の差が顕著に現れた。そこで、本検討では、5.2節で差の顕著となった解析モデルを用いることとする。

室寸法は 20 m × 40 m × 20 m (h) のホール規模の直方体室である (Fig.5.12)。リブは周壁 4 面に設置し, 周期方向が床面に対し水平となる向きに設定する。

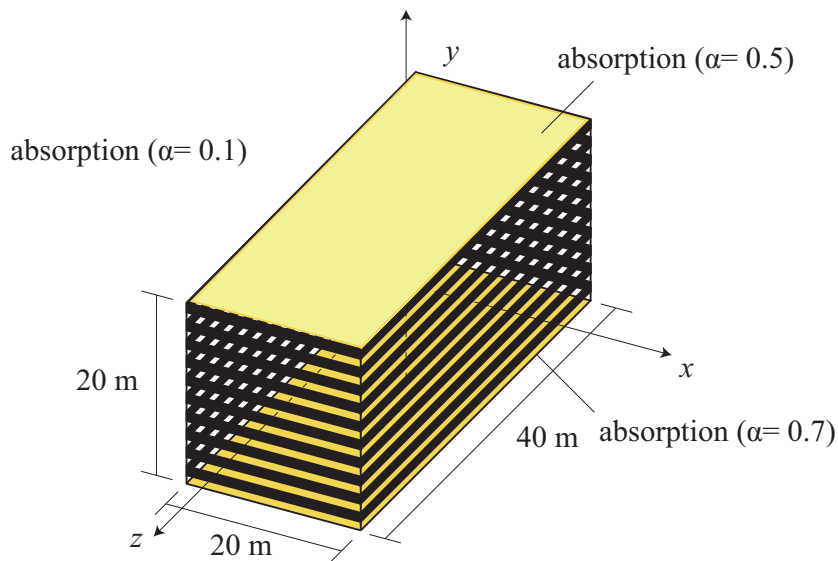


Fig. 5.12 Test model of a hall with diffuse walls (horizontal).

音源の位置はホールのステージ位置を想定して Fig.5.14 に示す。音源高さは, 1.2 m とした (Fig.5.13)。音源は, 2.5 節の設定に従い, 音線の放射立体角が等立体角に離散化された音源を用いる。受信点は, 室平面上で中央に 3 点と側壁近傍に 3 点の計 6 点を設定する (Fig.5.14)。高さは音源と同様 1.2 m とした (Fig.5.13)。

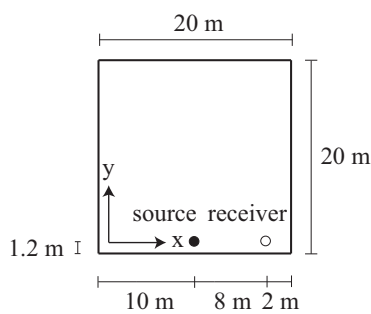


Fig. 5.13 Elevation of a test model.

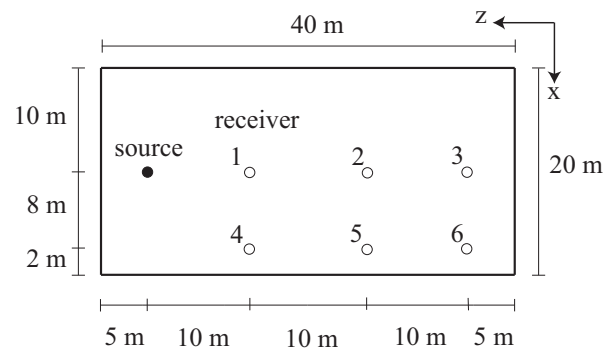


Fig. 5.14 Plan of a test model.

解析モデルの壁面の吸音率を Table 5.2 に示す。5.2 節と同様に平均吸音率 $\bar{\alpha} = 0.3$ である。解析モデルは、床面と天井を吸音性とし、周壁4面を反射性とした。

Table 5.2 Absorption coefficients (α) of a test model.

	absorption coefficient (α)
ceiling	0.5
floor	0.7
walls	0.1

乱反射率は元データ、ランダム入射値 (ランダム入射乱反射率) とブロック平均値を用いる。ブロック平均値による室内音響指標の計算値の誤差を比較するため第4章で検討した結果を用いる。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。なお、これらの乱反射率は周壁4面において与え、天井、床面の乱反射率は0に設定した。

斜入射乱反射率は、第4章と同様の矩形波・正弦波断面の一次元周期構造壁面を用いる。正弦波、矩形波の周期、高さは20 cm, 6 cm である (Fig.5.15)。周波数は1 kHz, 2 kHz, 4 kHz とした。この周波数、寸法の正弦波、矩形波断面のランダム入射乱反射率を (Table 5.3) に示す。斜入射乱反射率の元データを Fig.5.16 に示す。

Table 5.3 Two types of samples. Random-incidence scattering coefficients (S_r).

	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Sinusoid	0.21	0.78	0.83
Rectangles	0.29	0.67	0.57

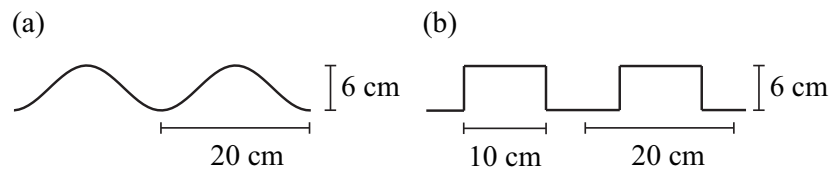


Fig. 5.15 Two types of samples with periodical surfaces: (a) sinusoid (b) rectangles.

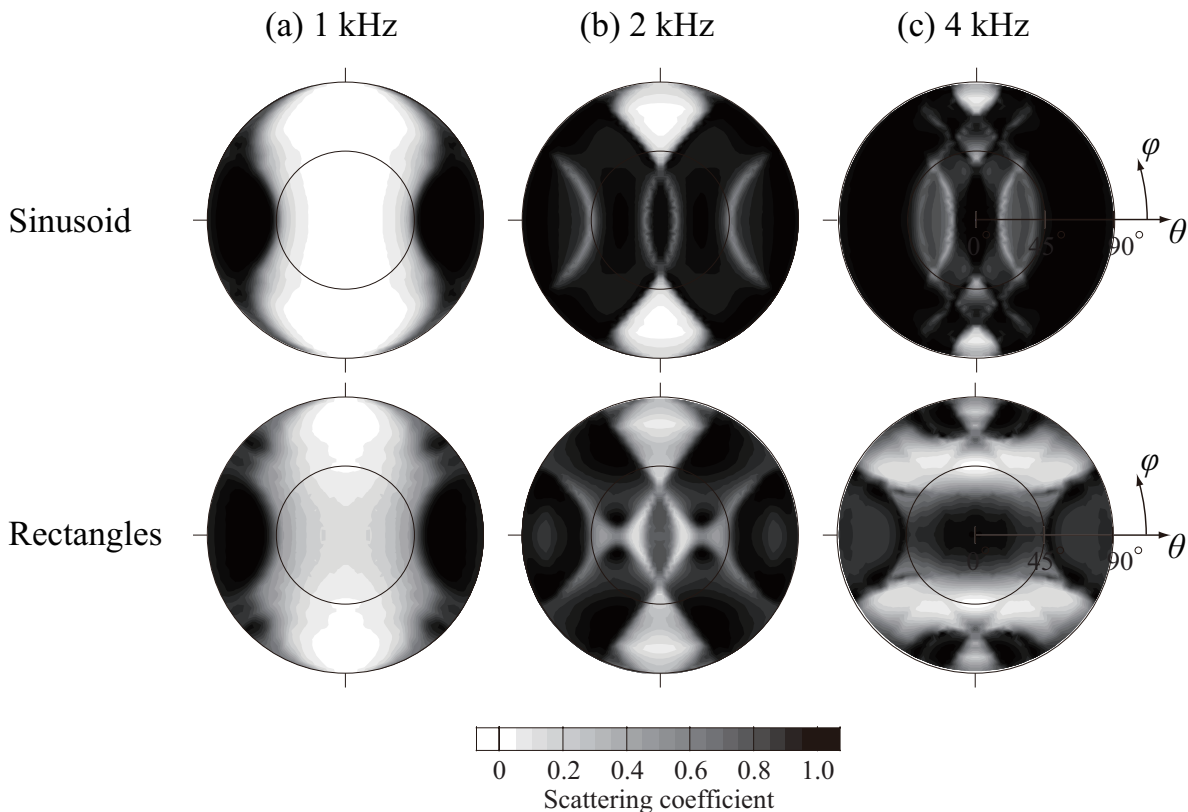


Fig. 5.16 Distribution of the directional scattering coefficients for sinusoid and rectangles : (a) 1 kHz, (b) 2 kHz and (c) 4 kHz.

評価方法については、各指標において、斜入射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を求める。それらを各受音点ごとに求め、受音点平均した値を算出する。

5.3.3 結果と考察

各指標について、斜入射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を算出し、各受音点毎に求め、受音点平均した値をTable 5.4に示す。表中、青色は弁別閾以上の誤差を表し、薄い青色は弁別閾以上で誤差が10%未満の値を示す。濃い青色は弁別閾以上で誤差が10%以上の値を示す。赤色は G 、 C_{80} 、 LF について弁別閾以上の値を示す。

G 、 C_{80} 、 LF では概ね弁別閾以下であり、細かなブロックとして $(N_{\theta}, N_{\phi}) = (4, 16)$ を用いることで、誤差を弁別閾以下に抑えることができる。これらの指標は細かいブロック $(N_{\theta}, N_{\phi}) = (4, 16)$ で十分予測可能であるといえる。

それに対し、 T_{20} 、 EDT では弁別閾を上回るケースが多い。2 kHz、4 kHzでは誤差が弁別

閾値に対し、10%未満のケースが多いが、1 kHzにおいて弁別閾の10%以上誤差が生じるケースがある。特に、弁別閾の10%以上誤差が生じるケースは、ランダム入射値、粗いブロック平均値を用いた場合に生じる。 T_{20} , EDT は細かいブロック $(N_{\theta}, N_{\phi}) = (4, 16)$ でも不十分である。これらの指標には、より詳細なブロック平均値もしくは、元データの適用が必要であると考えられる。

Table 5.4 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	1 kHz		2 kHz		4 kHz		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	

	弁別閾以上(10%未満)
	弁別閾以上(10%以上)
	弁別閾以上

Fig.5.17 に誤差が弁別閾を10%以上上回るケースが多い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} は大幅に減少していることから、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。

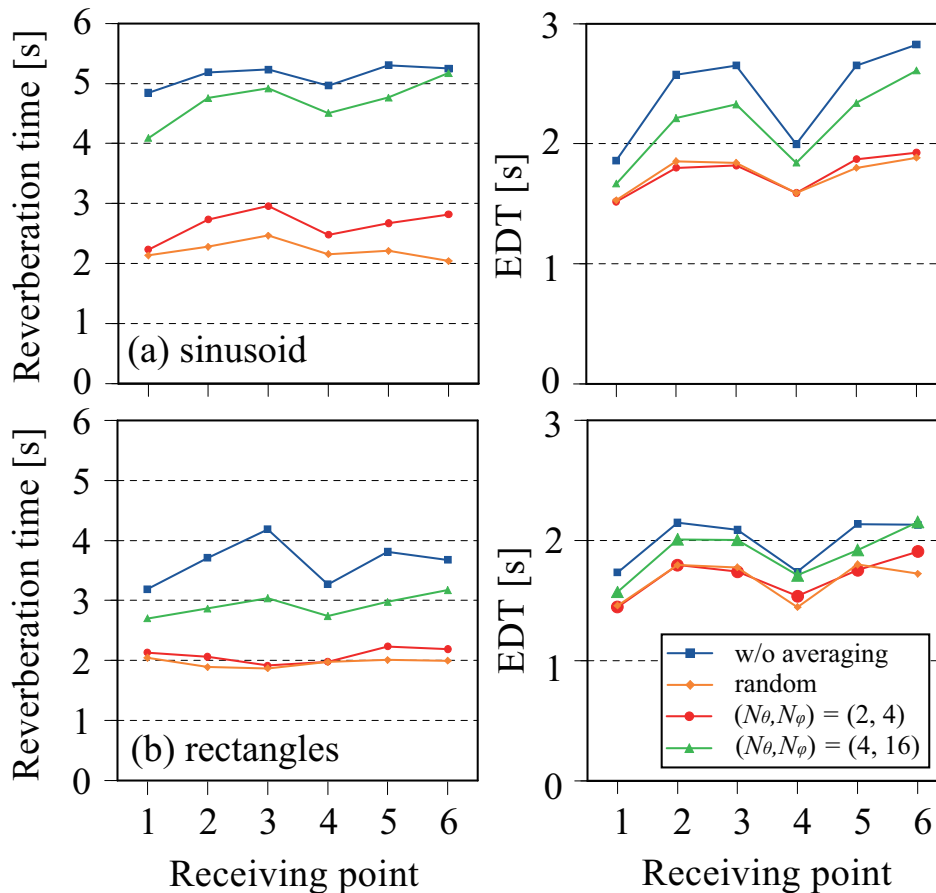


Fig. 5.17 T_{20} and EDT at 1 kHz calculated with different scattering coefficients (original directional, block averaging and random-incidence values).

5.3.4 まとめ

第4章では、ブロック平均による入射角依存性の分布劣化について検討を行った。本検討では、その結果から得られた斜入射乱反射率のブロック平均値を幾何音響シミュレーションへ導入し、室内音響指標の計算誤差を検討した。 G, C_{80}, LF では元データに対する誤差がランダム入射値を用いた場合でも概ね弁別閾以下であり、細かいブロックとして $(N_\theta, N_\phi) = (4, 16)$ を用いることで、誤差を弁別閾以下に抑えることができ、 G, C_{80}, LF は細かいブロック $(N_\theta, N_\phi) = (4, 16)$ で十分予測可能であるといえる。しかし、 T_{20}, EDT では元データに対する誤差が弁別閾を10%以上上回るケースもみられ、細かいブロック $(N_\theta, N_\phi) = (4, 16)$ より詳細なブロック平均値もしくは元データの適用が必要だと言える。

5.4 リブ設置方向による室内音響指標の計算値の差異に関する検討

リブの効果が室内音響特性に与える影響として、リブの設置方向、配置、リブ形状が室内音響特性に影響を与えると考えられる。本検討では、特にリブの設置方向に着目して、斜入射乱反射率を導入した場合の、室内音響指標の計算値の差異について検討する。リブ設置方向をパラメータとして計算値の比較を行い、計算結果に差異が生じる要因について考察することを目的とする。

5.4.1 計算条件の設定

音線法により解析する。後述する解析モデル (Fig.5.18) についてリブ設置方向と乱反射率をパラメータとしてスタディを行う。音源から音線を放射し、受音点で得られるインパルス応答から室内音響指標を算出した。室内音響指標は T_{20} , EDT , G , C_{80} , LF を求めた。

まず、音線追跡については、5.2 節と同様に、室の稜に音線が入射した場合、その時点でその音線の追跡は終了するアルゴリズムを用いる。

音線追跡時間も、5.2 節と同様に 4.0 秒まで追跡するものとする。なお、音線追跡は、反射回数ではなく追跡時間で打ち切るものとし、4.0 秒以降の音線はインパルス応答に含まれない。受音点半径も 5.2 節と同様に、受音点半径は 0.5 m とした。

音線数も 5.2 節と同様に設定した。定常状態を表現するための必要条件として $N \geq 30558$ を満たす必要があり、伝播距離について必要条件として $N \geq 21760$ を満たす必要がある。以上より本検討では必要条件の桁数を 1 つ上げて音線数を 20 万本に設定する。

5.4.2 解析モデル

5.2 節では、吸音面配置、リブ設置方向についてケーススタディを行い、斜入射乱反射率の導入が室内音響指標の計算値に与える差異について検討した。その結果、天井及び床面を吸音性として周壁を反射性とした解析モデルで斜入射乱反射率の元データを用いた場合とランダム入射値を用いた場合で室内音響指標の計算値の差が顕著に現れた。そこで、本検討では、5.2 節で差の顕著となった解析モデルを用いることとする。

解析モデルの室寸法は 20 m × 40 m × 20 m (h) のホール規模の直方体室である (Fig.5.18)。リブは周壁 4 面に設置し, 周期方向が床面に対し垂直, 水平となる向きに設定する。

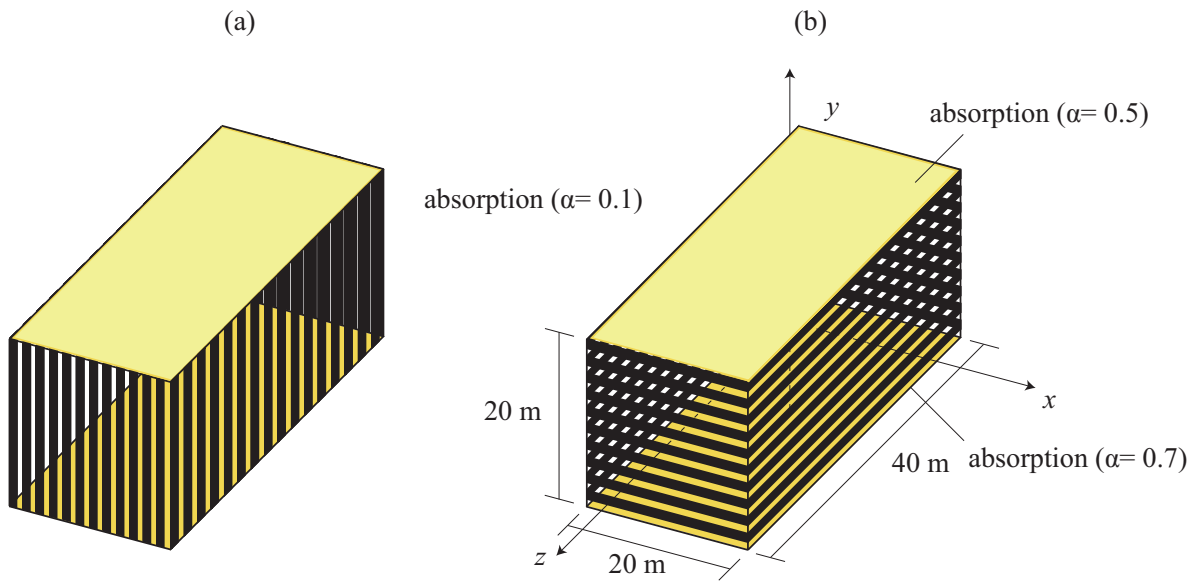


Fig. 5.18 Test models of a hall with diffuse walls: (a) vertical, (b) horizontal.

音源の位置はホールのステージ位置を想定して Fig.5.20 に示す。音源高さは, 1.2 m とした (Fig.5.19)。音源は, 2.5 節の設定に従い, 音線の放射立体角が等立体角に離散化された音源を用いる。受信点は, 室平面上で中央に 3 点と側壁近傍に 3 点の計 6 点を設定する (Fig.5.20)。高さは音源と同様 1.2 m とした (Fig.5.19)。

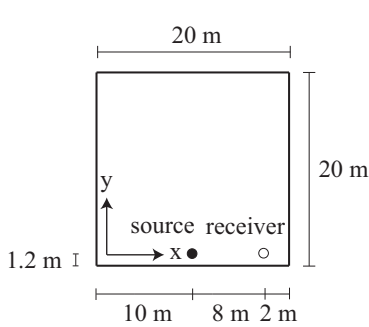


Fig. 5.19 Elevation of a test model.

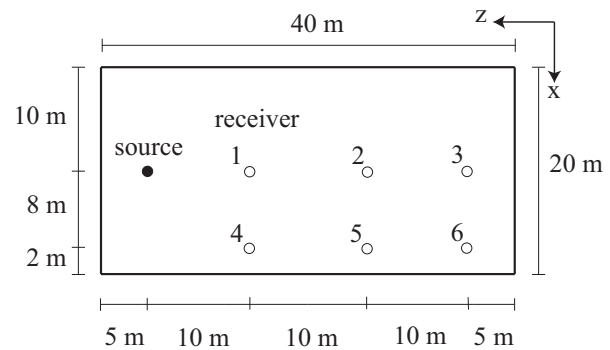


Fig. 5.20 Plan of a test model.

解析モデルの壁面の吸音率を Table 5.5 に示す。5.2 節と同様に平均吸音率 $\bar{\alpha} = 0.3$ である。本解析モデルは、床面と天井を吸音性とし、周壁4面を反射性とした。

Table 5.5 Absorption coefficients (α) of a test model.

	absorption coefficient (α)
ceiling	0.5
floor	0.7
walls	0.1

乱反射率は元データ、ランダム入射値 (ランダム入射乱反射率) とブロック平均値を用いる。ブロック平均値による室内音響指標の計算値の誤差を比較するため第4章で検討した結果を用いる。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。なお、これらの乱反射率は周壁4面において与え、天井、床面の乱反射率は0に設定した。

斜入射乱反射率は、矩形波断面の一次元周期構造壁面を用いる。矩形波の周期、高さはそれぞれ、20 cm, 6 cm である (Fig.5.15)。周波数は 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz とした。この周波数、寸法の矩形波断面のランダム入射乱反射率を (Table 5.6) に示す。斜入射乱反射率の元データを Fig.5.22 に示す。

Table 5.6 Random-incidence scattering coefficients (S_r) of a sample.

1 kHz	2 kHz	4 kHz
0.29	0.67	0.57

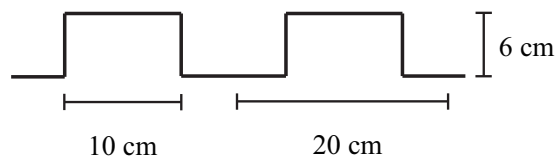


Fig. 5.21 A sample with periodical surfaces.

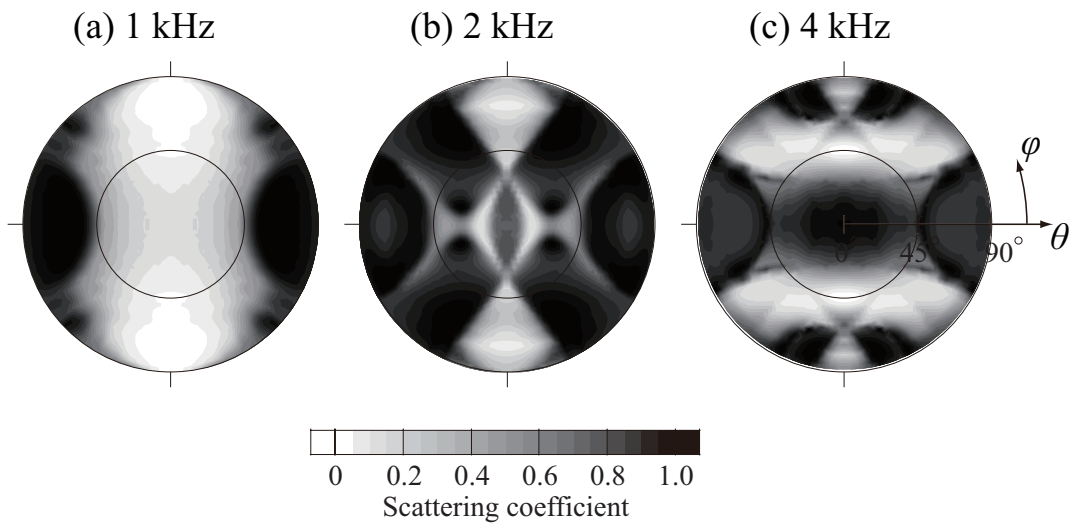


Fig. 5.22 Distribution of the directional scattering coefficients for rectangles :(a) 1 kHz, (b) 2 kHz and (c) 4 kHz.

5.4.3 結果と考察

音源から音線を放射し、受音点に到達したインパルス応答から室内音響指標を計算し、計算結果を Fig.5.23 から Fig.5.27 に示す。

T_{20} の 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz について、乱反射率として元データ、ランダム入射値、ブロック平均値を用いた場合の計算値を Fig.5.23 に示す。2 kHz, 4 kHz においては、元データ、ランダム入射値、ブロック平均値のいずれを用いた場合も室内音響指標の計算値に差は見られない。1 kHz において、リブ垂直とリブ水平を比較すると差が見られる。リブ垂直の場合に比べ、リブ水平の場合が T_{20} は増加する傾向にある。特に、元データ、細かいブロック平均値を用いた場合この傾向が顕著である。斜入射乱反射率の分布 (Fig.5.22) からリブ垂直の方がリブ水平より、床面に対し平行に移動する音線は乱反射される確率が高い。そのため、リブ水平の場合、反射性の側壁間で反射を繰り返す鏡面反射成分のエネルギー減衰が遅いことが一因として考えられる。残響減衰曲線についての考察は後述する。

EDT の 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz について、乱反射率として元データ、ランダム入射値、ブロック平均値を用いた場合の計算値を Fig.5.24 に示す。傾向は T_{20} と同様である。2 kHz, 4 kHz においては、元データ、ランダム入射値、ブロック平均値のいずれを用いた場合も室内音響指標の計算値に差は見られない。1 kHz において、リブ垂直とリブ水平を比較すると差が見られる。リブ垂直の場合に比べ、リブ水平の場合が EDT は増加する傾向にある。特に、元データ、細かいブロック平均値を用いた場合この傾向が顕著である。 T_{20} と同様の理由と考えられる。

G の 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz について, 乱反射率として元データ, ランダム入射値, ブロック平均値を用いた場合の計算値を Fig.5.25 に示す。全体の傾向として, リブ水平とリブ垂直を比較すると元データ, ランダム入射値, ブロック平均値のいずれの室内音響指標の計算値の差は弁別閾程度もしくはそれ以下となった。1 kHz において, 元データ, ランダム入射値を用いた場合, リブ垂直に比べ, リブ水平の方が増加する傾向にある。 T_{20} の増加に起因すると考えられる。また, 2 kHz, 4 kHz の T_{20} をみると Eyring の残響時間 1.8 秒に近い値となることから音場は拡散性が高いと考えられる。2 kHz, 4 kHz の G に差が見られない原因として, 拡散性の音場となり, 音線の吸音面への到来確率がリブの設置方向によらず同様になるためと考えられる。

C_{80} の 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz について, 乱反射率として元データ, ランダム入射値, ブロック平均値を用いた場合の計算値を Fig.5.26 に示す。一般的には壁面に近い受音点の方が, 壁面からの反射音と直接音との時間間隔が短いため C_{80} の値は大きくなるとされているが, 受音点 4,5,6 をみてもその傾向が見られない。全体の傾向として, リブ水平とリブ垂直を比較すると元データ, ランダム入射値, ブロック平均値のいずれの室内音響指標の計算値の差は弁別閾程度もしくはそれ以下となった。顕著な傾向は見られない。 C_{80} は, 初期対後期エネルギー比であるため, 拡散性の音場になっていると考えられる。2 kHz, 4 kHz では, 音線の吸音面への到来確率がリブの方向によらず同様になり, 差が見られないと考えられる。1 kHz では, リブ垂直とリブ水平で残響時間に差が見られるが, 単純な初期対後期エネルギー比とした場合には, 弁別閾以上の差として現れてこないと考えられる。

LF の 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz について, 乱反射率として元データ, ランダム入射値, ブロック平均値を用いた場合の計算値を Fig.5.27 に示す。元データを用いた場合 1 kHz と 4 kHz でリブ垂直に対し, リブ水平が増加する傾向にある。斜入射乱反射率 (Fig.5.22) の分布から床面に対し水平方向を移動する鏡面反射成分は, リブ水平の方がリブ垂直より多くなると考えられる。長手方向の側壁間で反射を繰り返す鏡面反射成分により, 初期側方エネルギーが増加すると考えられる。

T_{20} , EDT の差が顕著となった 1 kHz の残響減衰曲線を Fig.5.28 から Fig.5.29 に示す。乱反射率は元データを用い, 各受音点別に算出した。散乱成分, 鏡面反射成分ともリブ垂直に対し, リブ水平の方がエネルギーの減衰が遅いことが確認できる。

まず, 鏡面反射成分のエネルギー減衰がリブ垂直よりリブ水平が遅い理由について考察する。リブ水平の場合, 斜入射乱反射率 (Fig.5.22) の分布から床面に対し水平に移動する鏡面反射成分がリブ垂直より多いと考えられる。反射性の側壁間で反射を繰り返すため, 鏡面反射成分のエネルギー減衰が遅いと考えられる。

次に, 散乱成分のエネルギー減衰がリブ垂直よりリブ水平が遅い理由について考察する。短手方向に比べ, 長手方向では, 音線は擦過角で壁面に入射する確率が高くなると考えられる。従って, 斜入射乱反射率 (Fig.5.22) の分布からリブ垂直の場合, リブ水平より, 鏡面反

射成分が散乱成分になる確率が高いと考えられる。本研究では、時間の経過に伴い、鏡面反射成分が散乱成分に変わるアルゴリズムを用いている。早期に散乱成分に変わり、乱反射を繰り返す音線と、反射性の低い壁面で鏡面反射を繰り返した後に散乱成分に変わる音線とでは、早期に散乱成分に変わる音線の方が吸音性の天井面に入射する確率が高くなりエネルギーは減衰する。以上のことが一因となり、リブ垂直の方が散乱成分の減衰が早いと考えられる。

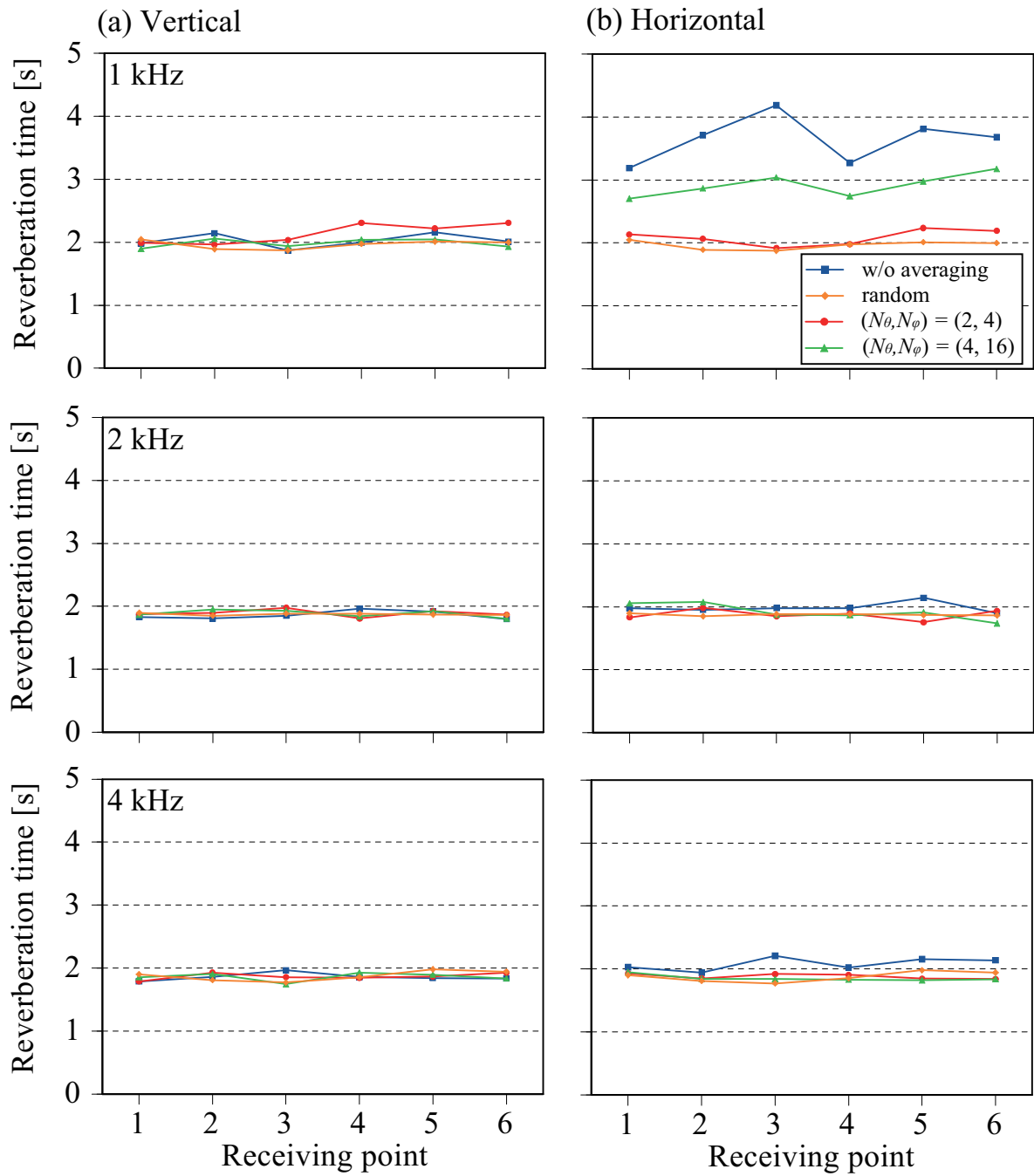


Fig. 5.23 T_{20} at 1, 2, 4 kHz calculated with different scattering coefficients (original directional, random-incidence, and block averaging values).

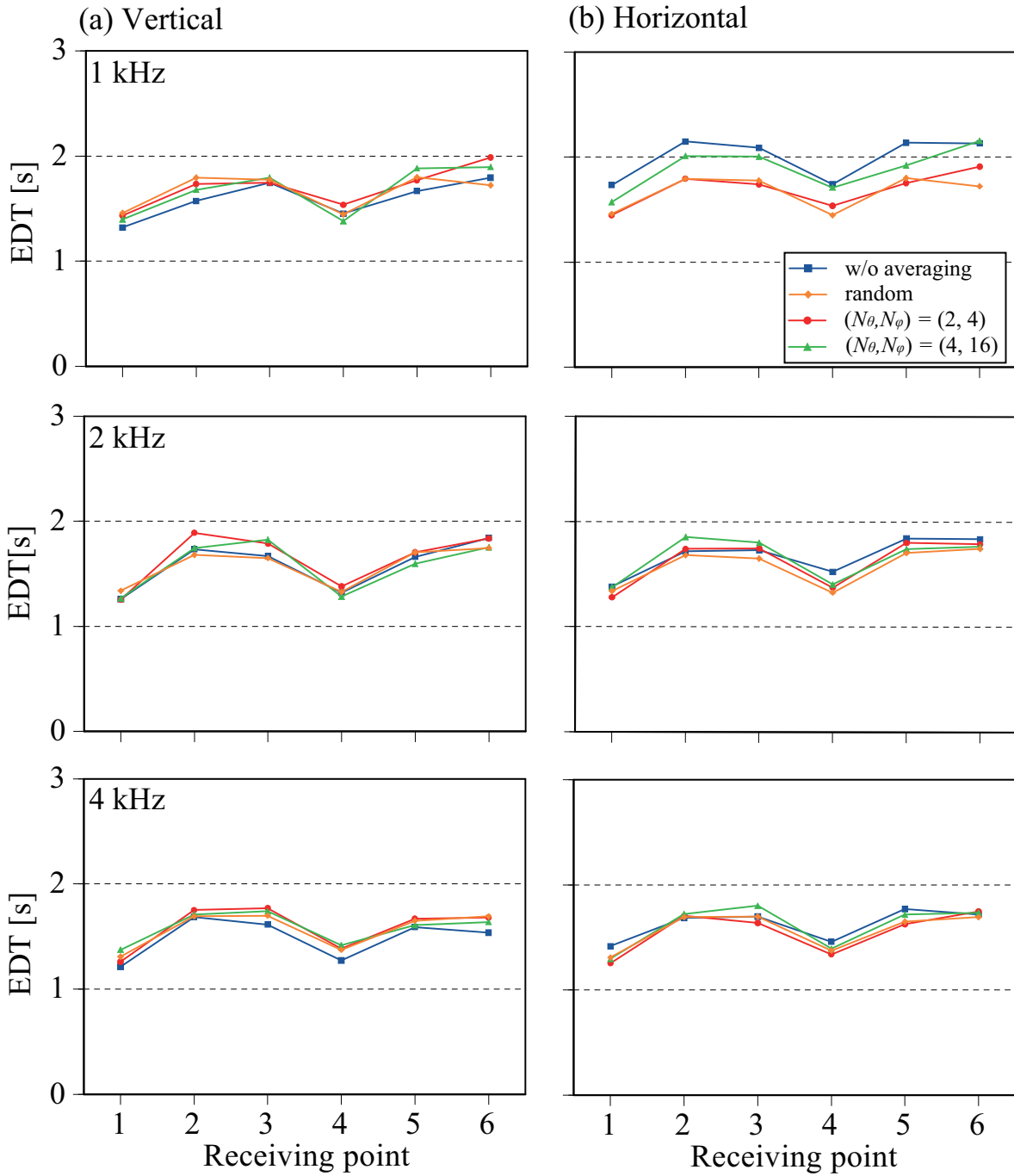


Fig. 5.24 *EDT* at 1, 2, 4 kHz calculated with different scattering coefficients (original directional, random-incidence, and block averaging values).

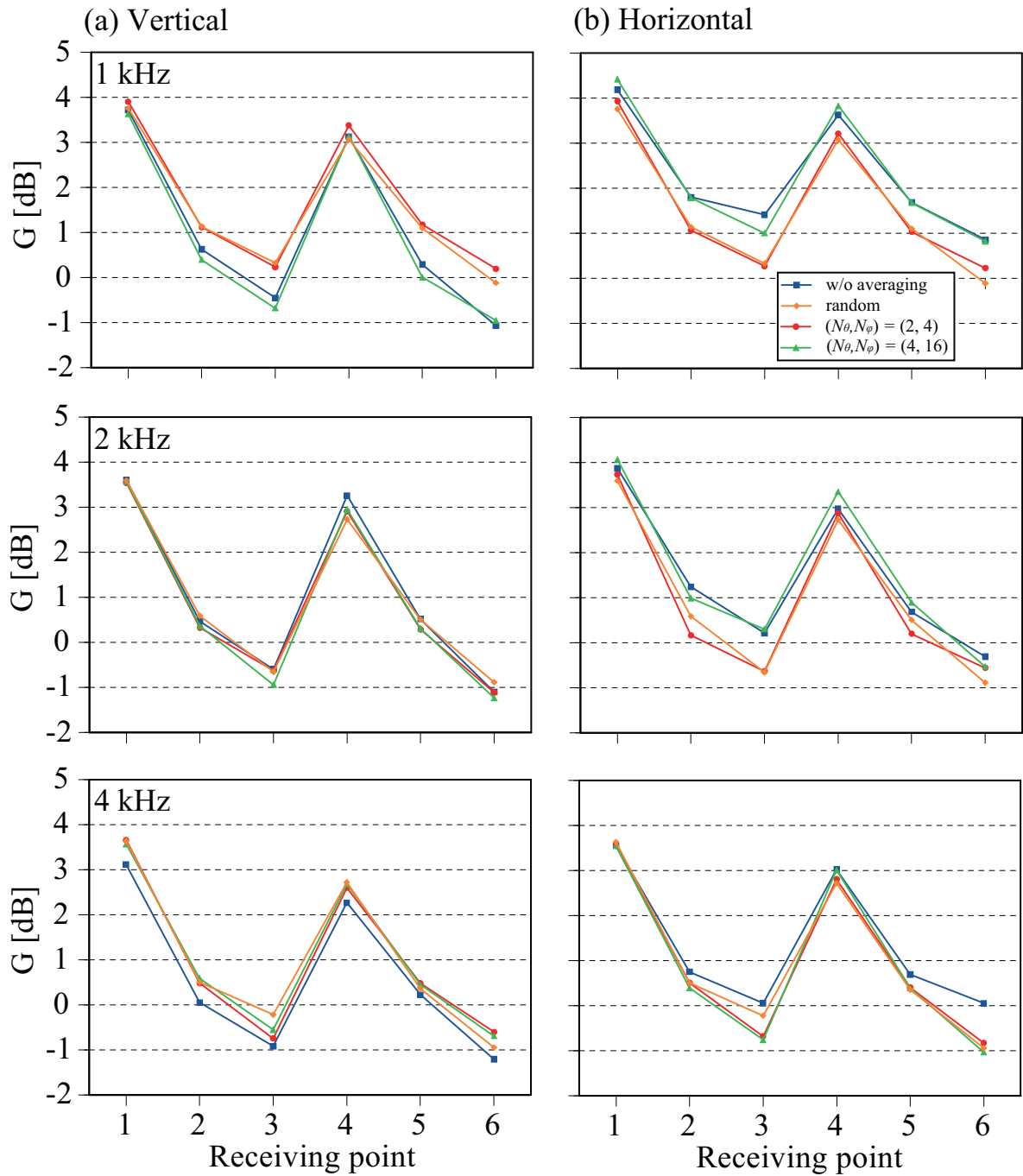


Fig. 5.25 G at 1, 2, 4 kHz calculated with different scattering coefficients (original directional, random-incidence, and block averaging values).

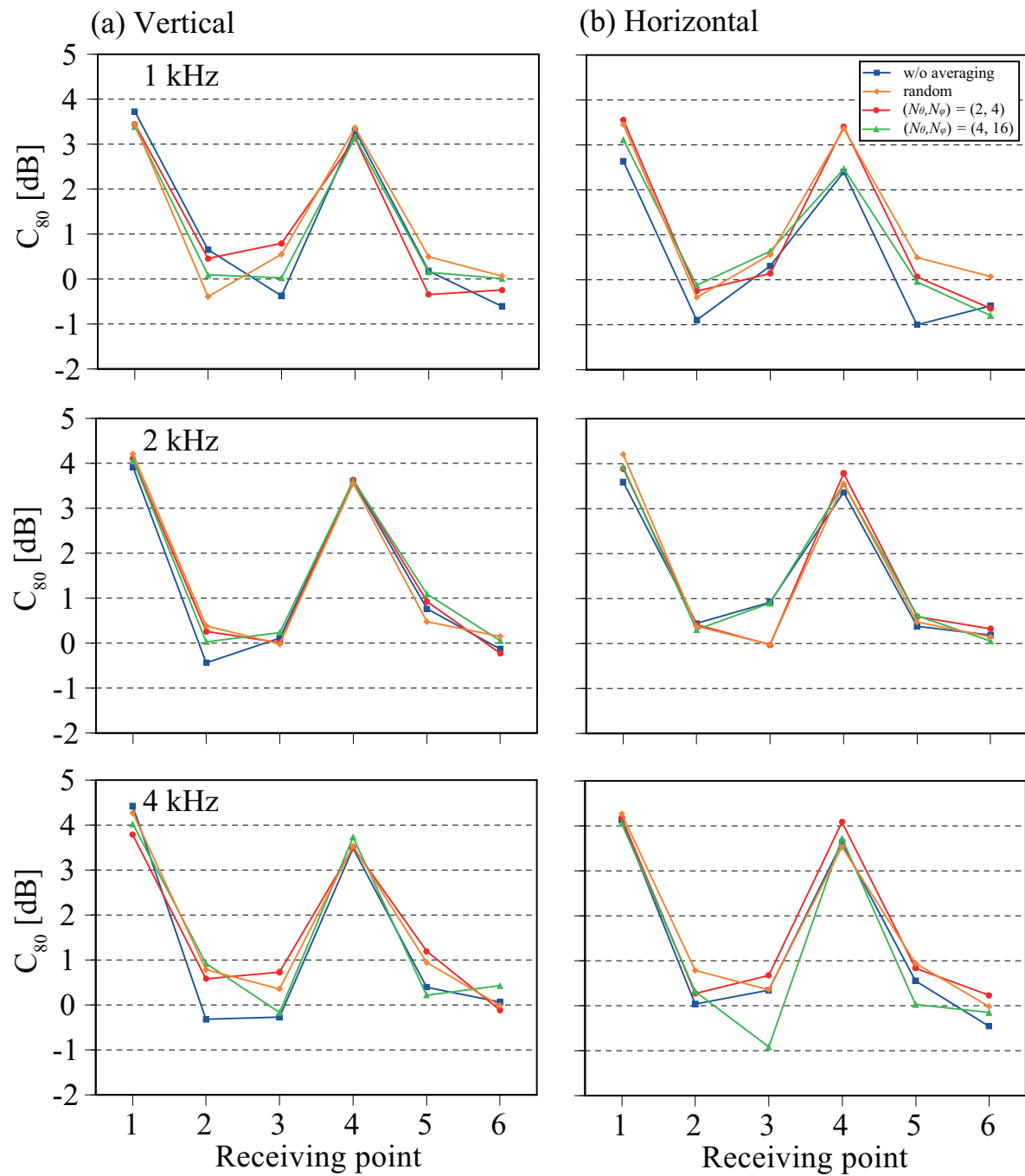


Fig. 5.26 C_{80} at 1, 2, 4 kHz calculated with different scattering coefficients (original directional, random-incidence, and block averaging values).

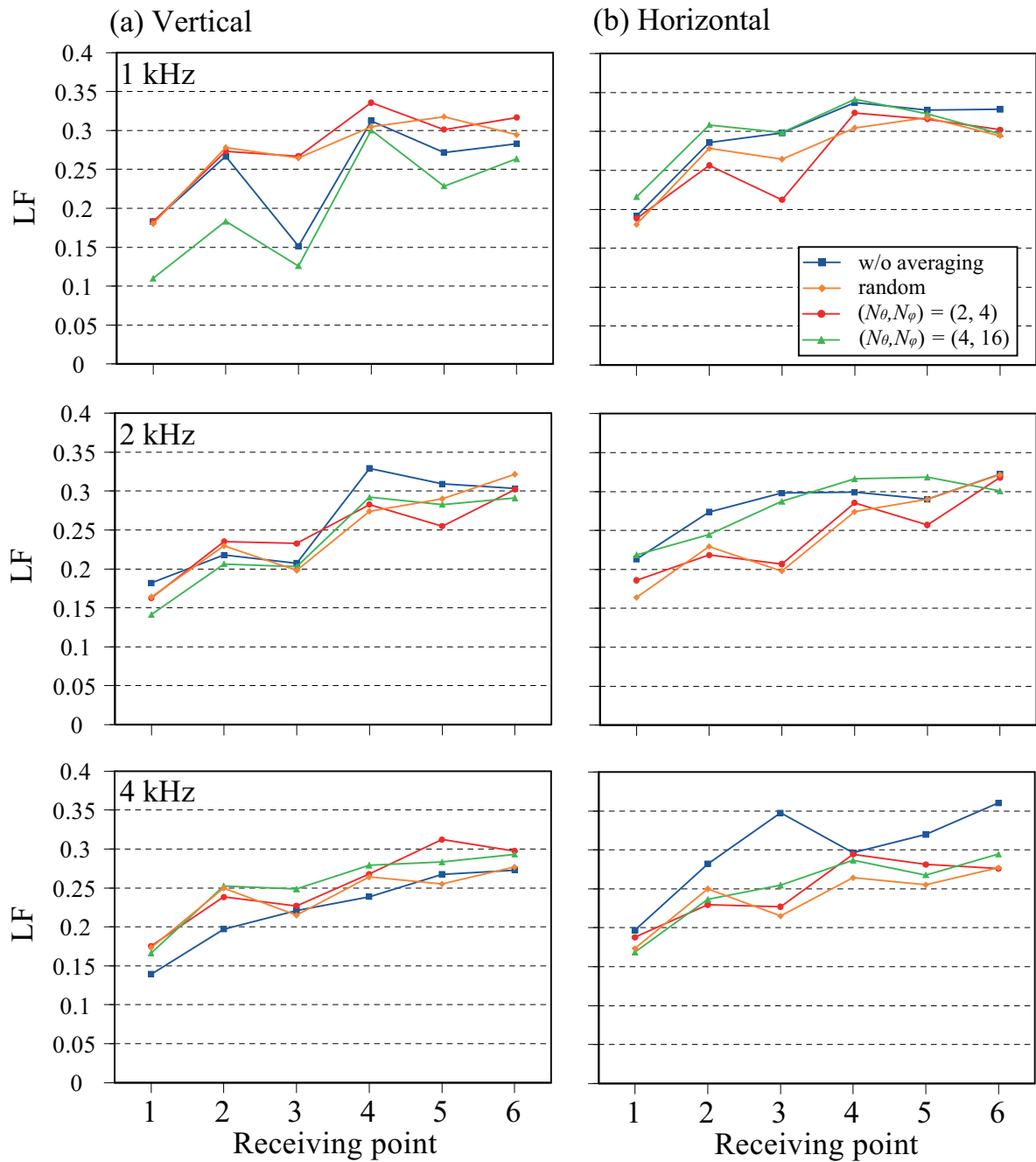


Fig. 5.27 LF at 1, 2, 4 kHz calculated with different scattering coefficients (original directional, random-incidence, and block averaging values).

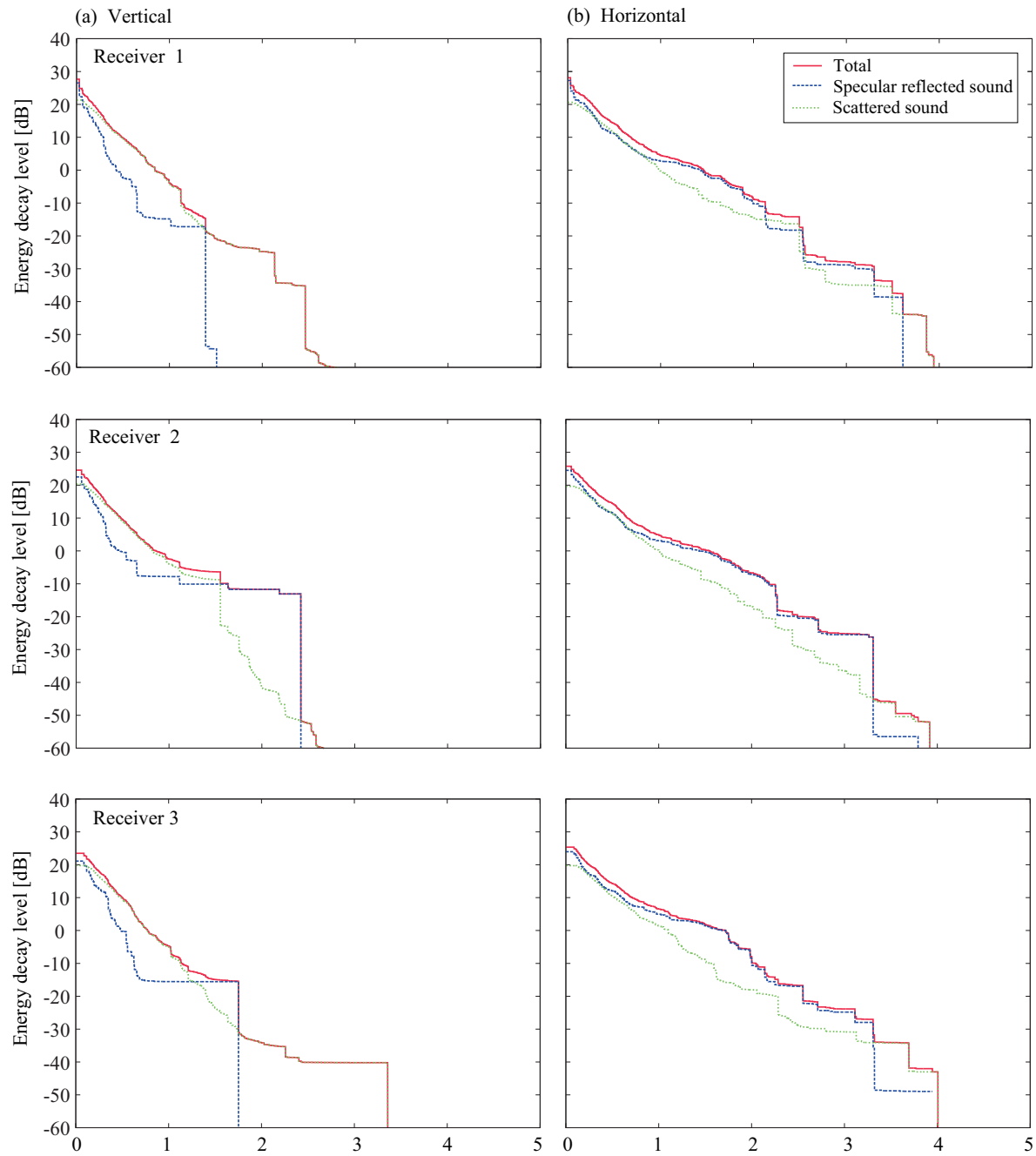


Fig. 5.28 Decay curves for different directions of diffuser: (a) vertical and (b) horizontal, calculated with original directional scattering coefficients (Receiver 1, 2, 3).

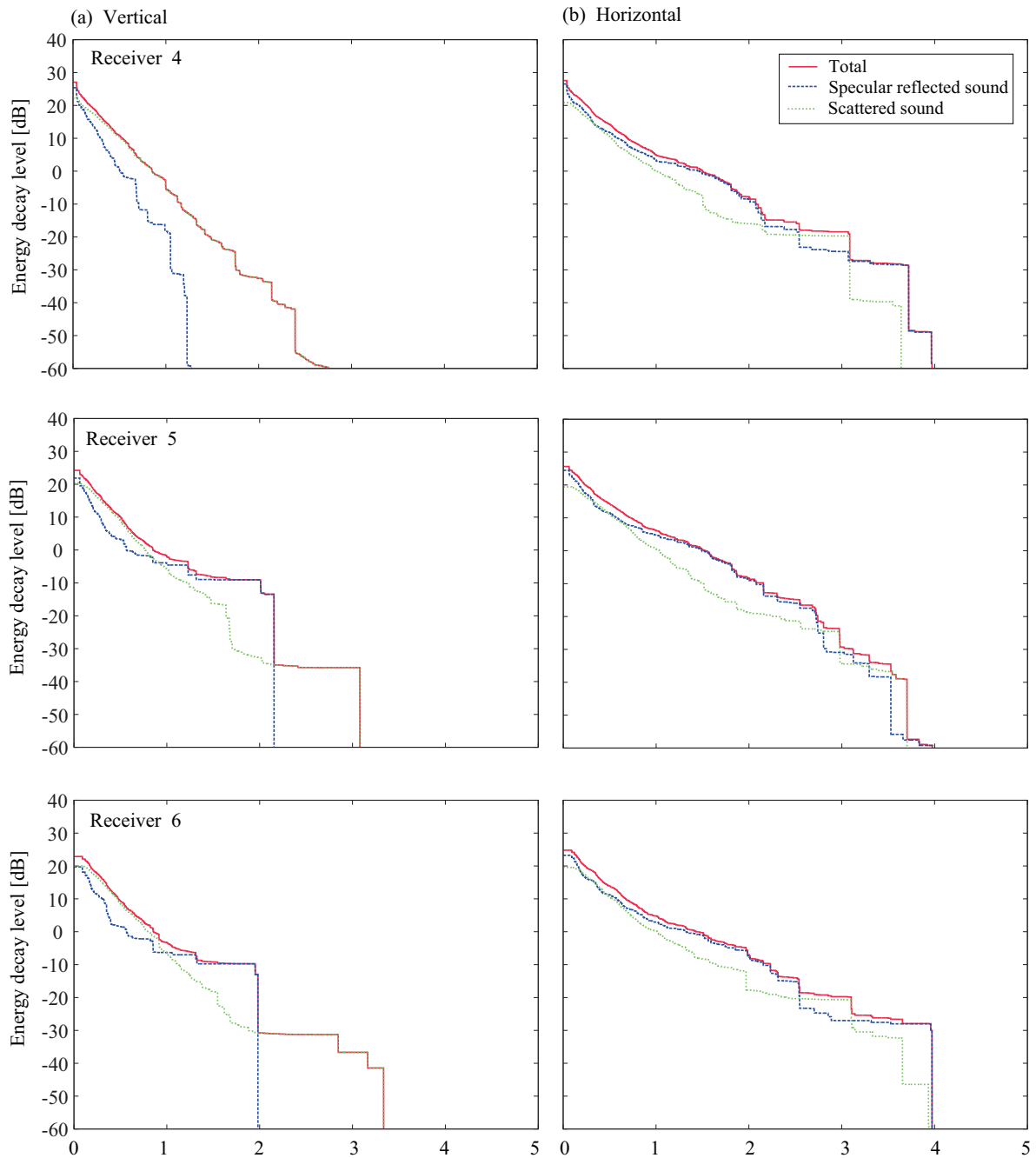


Fig. 5.29 Decay curves for different directions of diffuser: (a) vertical and (b) horizontal, calculated with original directional scattering coefficients (Receiver 4, 5, 6).

5.4.4 まとめ

本検討では設置するリブの周期方向の向きに着目し、斜入射乱反射率を導入した場合の、室内音響指標の計算値の差異について検討した。その結果、天井床面のみ吸音性として、周壁4面を反射性とした吸音面配置において、リブ垂直の場合に比べ、リブ水平の場合の方が、1 kHz の T_{20} 及び EDT は増加する傾向にあることが分かった。リブ水平の場合に比べ、リブ垂直の場合の方が T_{20} 及び EDT が短い原因は、床面に対して水平方向に移動する音線が散乱されやすく、吸音性の天井面、床面に音線が到来する確率が上がるためと考えられる。

5.5 実測値との比較による手法の妥当性の検証

5.4節では、設置するリブの周期方向の向きに着目し、斜入射乱反射率を導入した場合の、室内音響指標の計算値の差異について検討した。その結果、1 kHz の T_{20} 及び EDT において、リブ設置方向により、差が顕著に出ることを確認した。本検討では、実測値との比較を通して斜入射乱反射率の導入による室内音響指標の計算値の差異の妥当性を検証すると共に、計算結果の差異が生じる要因及び実測値との対応関係について考察することを目的とする。

5.5.1 測定結果について

本検討では既報 [33] による測定結果と計算結果を比較する。以下に、既報 [33] の測定概要を述べる。測定は模型残響室を用いて、壁面、天井にリブ構造・吸音材を設置してインパルス応答を測定した。実験は 1/4 縮尺模型を用いて、各室内音響指標をインパルス応答から実物換算で求めた。

本検討では、測定結果と計算結果を比較するため、実物換算した寸法の模型残響室を解析対象とした。吸音率、乱反射率、壁面の配置条件、音源、受音点は測定と同様の条件とした。詳細は後述する。

5.5.2 計算条件の設定

音線法を用い、リブの設置方向、乱反射率をパラメータとしてケーススタディを行う。音源から音線を放射し、受音点で得られるインパルス応答から室内音響指標を算出した。室内音響指標は T_{20} 、 EDT 、 C_{80} を算出した。

まず、音線追跡については、5.2節と同様に、室の稜に音線が入射した場合、その時点でその音線の追跡は終了するアルゴリズムを用いる。

次に、音線追跡時間については、後述する室寸法、吸音率を用いて Eyring の残響式より計算される残響時間は 1 kHz で 0.57 秒、2 kHz で 0.41 秒であることから吸音面偏在による残響時間の変動を考慮して 3.0 秒まで追跡するものとする。なお、音線追跡は、反射回数ではなく追跡時間で打ち切るものとし、3.0 秒以降の音線はインパルス応答に含まれない。受音球半径については、2.4節の設定に従い、受音球半径は 0.5 m とした。

最後に、音線数は 2.4節に従い設定する。一つ目の条件として SN 比から音線数を求める。5.2節と同様とした。二つ目の条件として定常状態を表現できる音粒子の最低個数を求める。音源から放ったエネルギーが空間内に満遍なく行き渡った状態では、受音球を空間内のどこに設定しても等しい音粒子数が検出される。受音球を任意の位置に設置したとき

に音粒子が少なくとも一つ存在することが必要条件となる。よって次式を満たすこととなる。

$$N \geq \frac{V}{\frac{4}{3}\pi r^3} \quad (5.3)$$

但し、 N : 音線数, V : 室体積, r : 受音球半径 である。本検討で解析する室寸法 (Fig.5.30) 及び、受音球半径を代入し、 $V = 6 \times 4.8 \times 3.6$, $r = 0.5$ より $N \geq 198$ が必要条件となる。

次に、伝播距離について必要条件を求める。音線の間隔が拡がりすぎて受音球に入らない状況を避けるため、受音球に音粒子が一つ入ることが必要条件になる。よって次式を満たすこととなる。

$$r \geq 2\sqrt{\frac{ct_{max}}{N}} \quad (5.4)$$

但し、 N : 音線数, c : 音速, t_{max} : 音線追跡時間, r : 受音球半径 である。受音球半径, 音線追跡時間を代入し、 $c = 340$, $t_{max} = 3.0$, $r = 0.5$ より $N \geq 16320$ が必要条件となる。音線数は以上の必要条件を満たす 7 万本に設定する。残響減衰曲線を求め、室内音響指標を算出に必要なエネルギー減衰が確保できる音線数として 7 万本に設定した。加えて、後述する解析モデルの室寸法では、3.0 秒まで追跡するにあたり、反射回数に伴う記憶容量の観点から 7 万本に設定した。

5.5.3 解析モデル

解析モデルは、測定結果と計算結果を比較するため、実物換算した寸法の模型残響室を解析対象とした。この室寸法は一般居室程度の寸法である。

室寸法は $6 \text{ m} \times 4.8 \text{ m} \times 3.6 \text{ m (h)}$ の一般居室程度の直方体室である。リブは側壁 2 面に設置し、周期方向が床面に対し水平となる向きと垂直になる向きの 2 方向設定する。解析モデルを Fig.5.30 に示す。

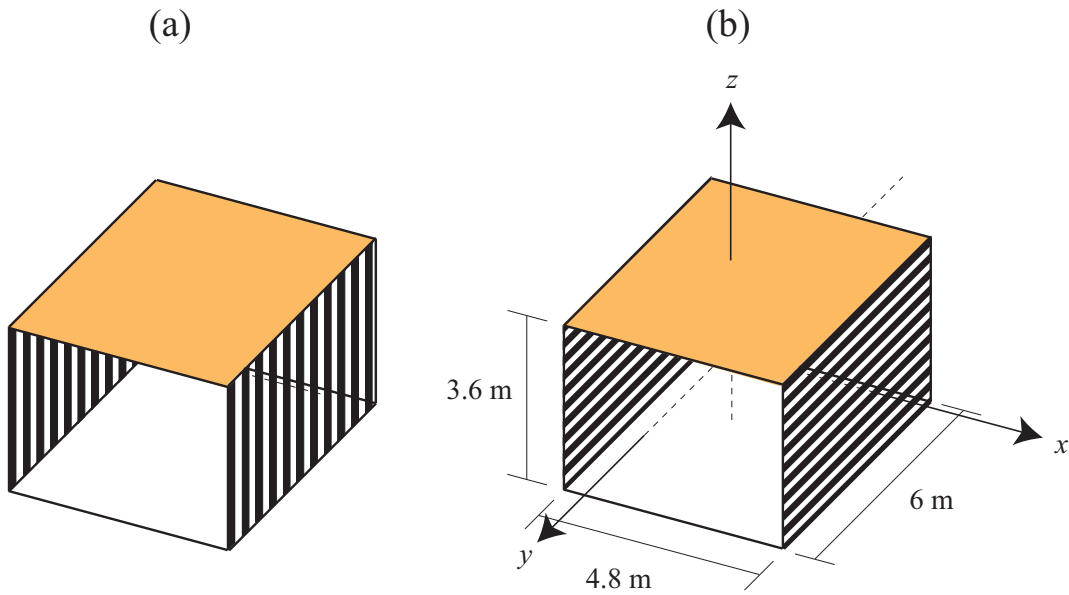


Fig. 5.30 Test models of a room with diffuse walls: (a) vertical (b) horizontal.

音源の位置は Fig.5.32 に示す。音源高さは、1.5 m とした (Fig.5.31)。音源は、2.5 節の設定に従い、音線の放射立体角が等立体角に離散化された音源を用いる。

受信点は、室平面上で中央に 3 点と側壁近傍に 6 点の計 9 点を設定する (Fig.5.32)。高さは 1.2 m とした (Fig.5.31)。

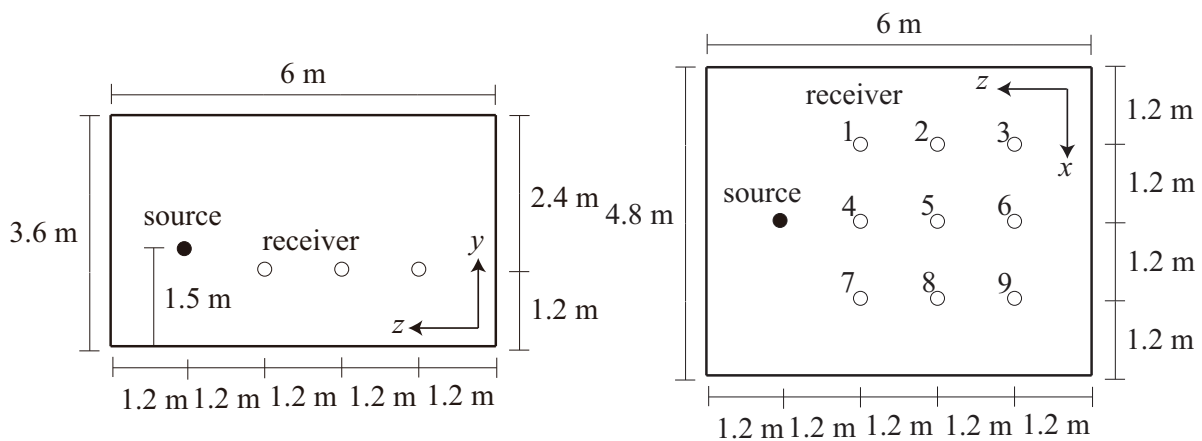


Fig. 5.31 Elevation of a test model.

Fig. 5.32 Plan of a test model.

各解析モデルにおける壁面の吸音率を Table 5.7 に示す。天井のみ吸音性とし、周壁及び床は反射性とする。

Table 5.7 Absorption coefficients (α) of a test model.

	1 kHz	2 kHz
ceiling	0.74	0.95
floor	0.03	0.05
side wall	0.07	0.10
rear wall and front wall	0.03	0.05

乱反射率は元データ、ランダム入射値 (ランダム入射乱反射率) とブロック平均値を用いる。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。なお、これらの乱反射率はリブを設置する周壁 2 面において与え、天井、床面及びリブを設置しない前壁及び後壁の乱反射率は 0 に設定した。

斜入射乱反射率は矩形波断面の一次元周期構造壁面を用いる。矩形波の周期、高さはそれぞれ、20 cm, 10 cm である (Fig.5.33)。周波数は 1 kHz, 2 kHz, とした。この周波数、寸法の矩形波断面のランダム入射乱反射率を Table 5.8 に示す。斜入射乱反射率の元データを Fig.5.34 に示す。

Table 5.8 Random-incidence scattering coefficients (S_r) of a sample.

1 kHz	2 kHz
0.25	0.37

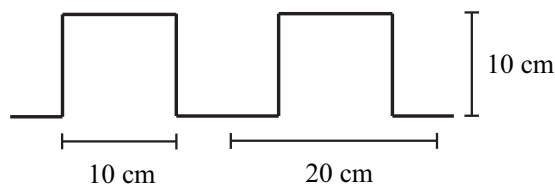


Fig. 5.33 A sample with periodical surfaces: rectangles.

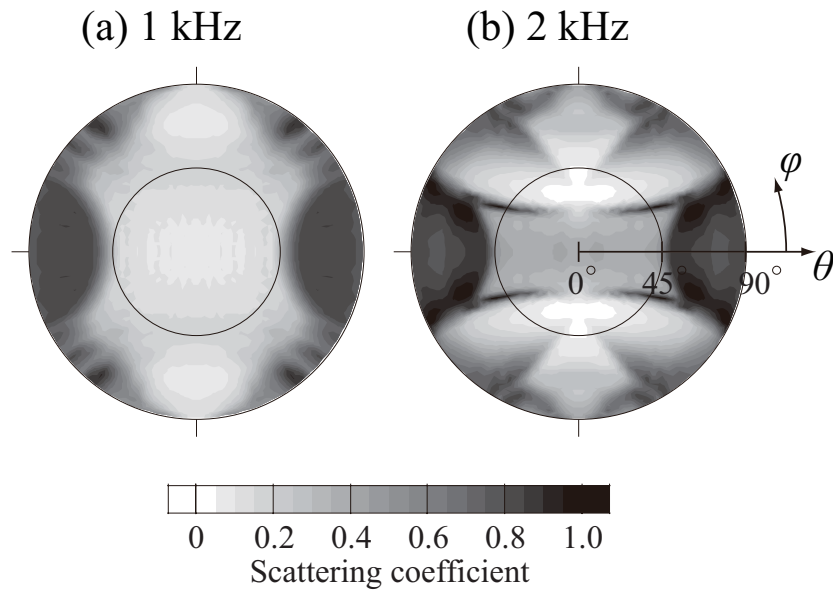


Fig. 5.34 Distribution of the directional scattering coefficients for rectangles: (a) 1 kHz and (b) 2 kHz.

5.5.4 結果と考察

T_{20} の 1 kHz, 2 kHz について, 乱反射率を元データ, ブロック平均値, ランダム入射値として用いた場合の計算値と実測値を Fig.5.35 に示す。図の灰色の線は, Eyring の残響式から計算される残響時間を示す。1 kHz では, リブ垂直の場合, 元データ, ブロック平均値, ランダム入射値は過小評価する傾向にある。リブ水平の場合, ランダム入射値を用いた場合対応するが, 元データ, ブロック平均値を用いた場合, 実測値と対応しない。2 kHz では, リブ垂直, リブ水平の場合とも, 元データ, ブロック平均値, ランダム入射値は過小評価する傾向にある。元データ, ブロック平均値, ランダム入射値を用いた場合, T_{20} を過小評価する原因について考察する。元データ, ブロック平均値, ランダム入射値を用いた場合, Eyring の残響式から計算される残響時間に値が近づくのが確認できる。従って, 元データ, ブロック平均値, ランダム入射値を用いた計算結果は, 実測値から考えられる現実の音場より, 拡散音場に近い状態になり, 拡散性を過大評価していると言える。その一因として, 反射波の指向特性をランベルトの余弦法則で与えていることが挙げられる。現実の音の挙動において, 壁面からの反射波にリブ方向に対して鋭い指向特性があるが, 本研究による解析手法では, 反射波の指向特性は全方向一様で与えている。このことが乖離の原因と考えられる。以上を踏まえると, ランベルトの余弦法則では, 現実より拡散性を過大評価してしまい, 非拡散音場を扱い難いと言える。

傾向を比較すると, 実測値ではリブ垂直の方がリブ水平より T_{20} が長い, 元データ, 細

かいブロック平均値を用いた場合は逆の傾向となる。元データ、細かいブロック平均値を用いた場合にリブ垂直の方がリブ水平より短い原因は、側壁の寸法から、リブ垂直の方がリブ水平に比べ擦過角への入射が多くなり、鏡面反射成分が散乱成分に変わる確率が高く、吸音性の天井へ音線が到達する確率が高くなるためと考えられる。

EDT の 1 kHz, 2 kHz について、乱反射率を元データ、ブロック平均値、ランダム入射値として用いた場合の計算値と実測値を Fig.5.36 に示す。元データ、ブロック平均値、ランダム入射値を用いた場合、いずれのケースでも過小評価する傾向にある。2 kHz では、リブ水平、垂直とも、ブロック平均値、元データを用いた場合はランダム入射値を用いた場合より実測と乖離した。元データ、ブロック平均値、ランダム入射値を用いた場合、いずれのケースでも過小評価する原因は、 T_{20} と同様であると考えられる。

C_{80} の 1 kHz, 2 kHz について、乱反射率を元データ、ブロック平均値、ランダム入射値として用いた場合の計算値と実測値を Fig.5.37 に示す。元データ、ブロック平均値、ランダム入射値を用いた場合はいずれも実測に対し、 C_{80} は増加する傾向にある。 T_{20} が減少したことに起因すると考えられる。

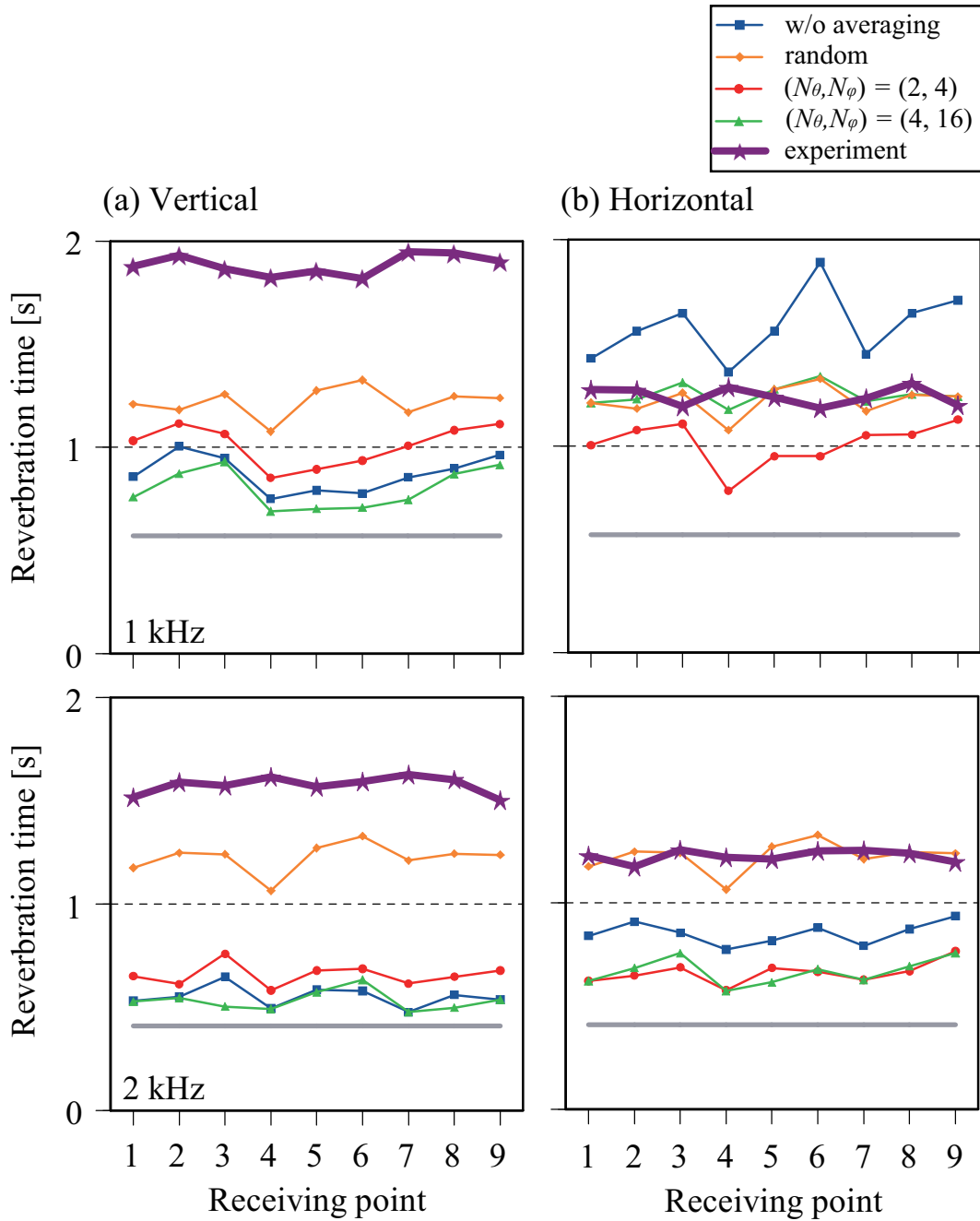


Fig. 5.35 T_{20} at 1, 2, 4 kHz calculated with different scattering coefficients (original directional, random-incidence, and block averaging values) and obtained by an experiment. Gray lines represent reverberation time obtained by the Eyring formula.

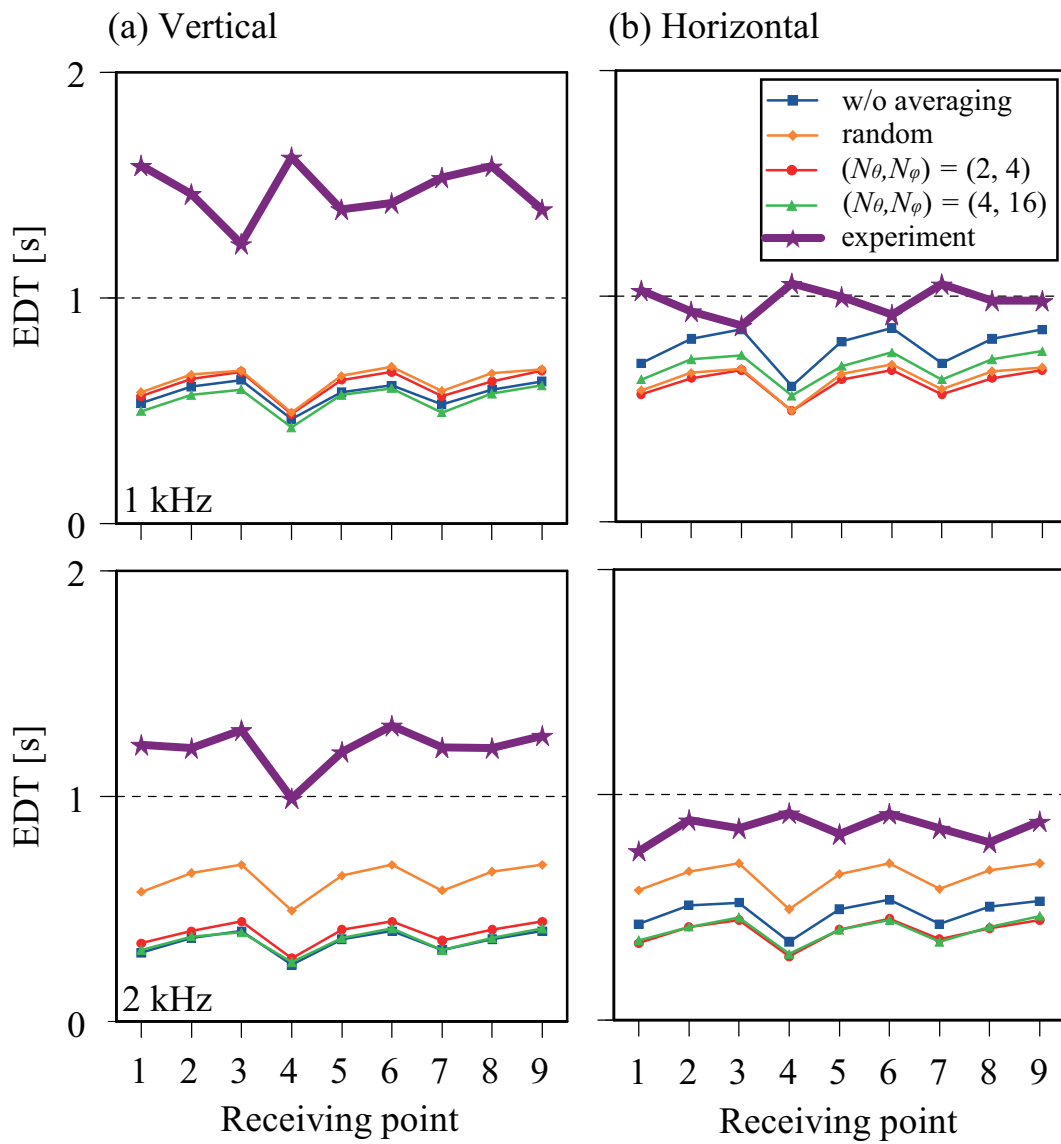


Fig. 5.36 EDT at 1, 2, 4 kHz calculated with different scattering coefficients (original directional, random-incidence, and block averaging values) and obtained by an experiment.

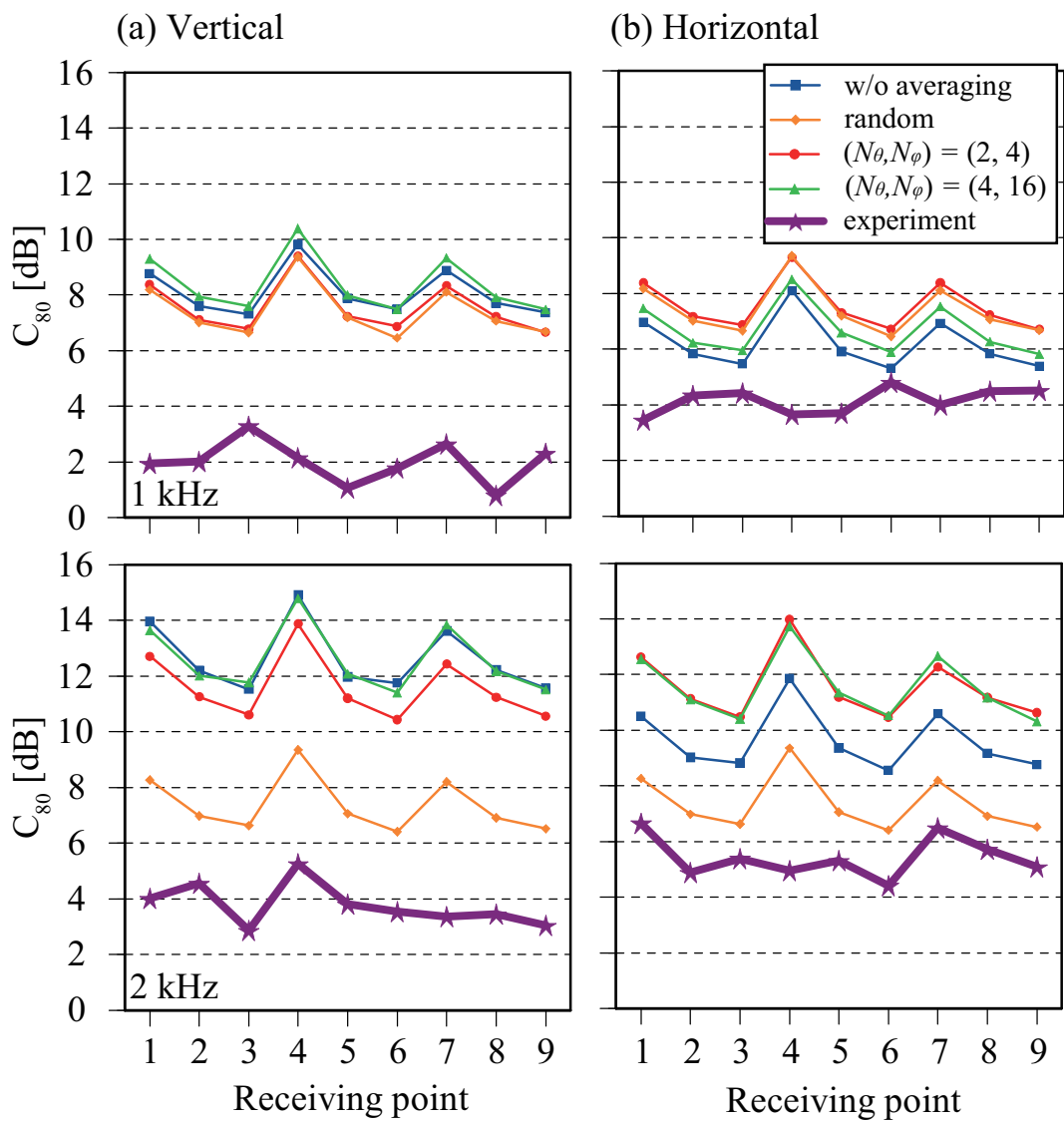


Fig. 5.37 C_{80} at 1, 2, 4 kHz calculated with different scattering coefficients (original directional, random-incidence, and block averaging values) and obtained by an experiment.

5.5.5 まとめ

本検討では、実測値との比較を通して斜入射乱反射率の導入による室内音響指標の計算値の差異の妥当性を検証すると共に、計算結果の差異が生じる要因及び実測値との対応関係について考察することを目的として検討を行った。その結果、元データ、ブロック平均値、ランダム入射値を用いた場合、 T_{20} を過小評価する傾向にあり、本計算手法では、現実に比べ音場の拡散性を過大評価する傾向にあることが分かった。その一因として、ランベルトの余弦法則により、反射波の指向特性を全方向一様として与え、反射波の指向特性を考慮していないこと挙げられる。さらに、実測結果とリブ設置方向による室内音響指標の計算値の差異の傾向は逆になることが分かった。計算値では、リブ垂直の方がリブ水平より T_{20} が短くなる。リブ垂直の方がリブ水平より、擦過角への入射が多くなり、鏡面反射成分が散乱成分に変わる確率が高く、吸音性の天井へ音線が到達する確率が高くなるためと考えられる。

5.6 まとめ

本章では、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ことを目的として検討を行った。

まず、斜入射乱反射率を導入した場合とランダム入射値を用いた場合とで、室内音響指標の計算値に差異が現れるかを把握するため、吸音面配置、リブの設置方向をパラメータとしてケーススタディを行った。その結果、吸音面配置は、天井及び床面を吸音性として周壁を反射性とした条件で斜入射乱反射率の元データを用いた場合とランダム入射値を用いた場合で室内音響指標の計算値の差が顕著に現れることが分かった。室内音響指標の計算値では、 T_{20} 、 EDT において差が顕著に現れることが分かった。これらの差が顕著に現れた原因として音線が反射性の側壁間と前壁と後壁間で往復反射することによる影響が大きいと考えられる。

次に、斜入射乱反射率の導入による室内音響指標の計算値の差異が顕著な吸音面配置の解析モデルにて、ブロック平均化による室内音響指標の計算誤差について検討を行った。 G 、 C_{80} 、 LF では元データに対する誤差がランダム入射値を用いた場合でも概ね弁別閾以下であり、細かなブロックとして $(N_{\theta}, N_{\phi}) = (4, 16)$ を用いることで、誤差を弁別閾以下に抑えることができ、 G 、 C_{80} 、 LF は細かいブロック $(N_{\theta}, N_{\phi}) = (4, 16)$ で十分予測可能であることが分かった。しかし、 T_{20} 、 EDT では元データに対する誤差が弁別閾を 10% 以上上回るケースもみられ、細かいブロック $(N_{\theta}, N_{\phi}) = (4, 16)$ より詳細なブロック平均値もしくは元データの適用が必要だと考えられる。

さらに、リブの設置方向に着目して、斜入射乱反射率を導入した場合の、室内音響指標の計算値の差異について検討を行った。その結果、天井床面のみ吸音性として、周壁4面を反射性とした室内音場条件において、リブ垂直の場合に比べ、リブ水平の場合が 1 kHz の T_{20} 及び EDT は増加する傾向にあることが分かった。リブ垂直の方が、床面に対して水平方向に移動する音線が散乱されやすく、天井面、床面に到来する確率が上がるためと考えられる。

最後に、実測値との比較を通して斜入射乱反射率の導入による室内音響指標の計算値の差異の妥当性を検証すると共に、計算結果の差異が生じる要因及び実測値との対応関係について考察することを目的として検討を行った。その結果、元データ、ブロック平均値、ランダム入射値を用いた場合、 T_{20} を過小評価する傾向にあり、本解析手法では、実測値に比べ音場の拡散性を過大評価する傾向にあることが分かった。その一因として、ランベルトの余弦法則により、反射波の指向特性を全方向一様として与え、反射波の指向特性を考慮していないこと挙げられる。さらに、実測値とリブ設置方向による室内音響指標の計算値の差異の傾向は逆になることが分かった。計算値では、リブ水平に比べ、リブ垂直の方が T_{20} は

短い。リブ垂直の方がリブ水平より、擦過角への入射が多くなり、鏡面反射成分が散乱成分に変わる確率が高く、吸音性の天井へ音線が到達する確率が高くなるためと考えられる。今後の課題として、解析手法の問題点を明らかにした。

第6章

総括

本研究は、斜入射乱反射率を幾何音響シミュレーションへ導入し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値の誤差を把握すること及び室内音響指標に及ぼす影響を考察することを目的として行われた。

第1章では、拡散現象の重要性、数値シミュレーションの重要性を述べ、幾何音響解析手法の実務における有用性について述べた後、現在の幾何音響解析に導入されている乱反射率に加え、斜入射乱反射率を導入することの意義を述べた。そして、乱反射率の測定法、計算法について述べ、既往研究関連から研究の目的を説明した。

第2章では、一般的な幾何音響解析手法を整理し、本研究で用いる音線法アルゴリズムを述べ、本研究手法における拡散成分の取り扱いについて説明した。

第3章では、幾何音響シミュレーションで拡散を取り扱う上で重要となるランベルトの余弦法則について計算方法の妥当性の確認を行い、反射角度の発生頻度が3次元上でのランベルトの余弦法則に従うことを確認した。その後、空間内でランベルトの余弦法則が成り立つことを確認するため、受音する音線のエネルギー方向分布を確認した。その結果、エネルギー方向分布が一様になることが確認できた。

第4章では、幾何音響解析への斜入射乱反射率の導入精度として、斜入射乱反射率の入射方向に対しブロック平均を施し、入射角依存性の分布劣化を定量的に把握するための検討を行った。一次元周期構造壁面において、ブロック平均は、天頂角方向分割数 (N_θ) より、方位角方向分割数 (N_ϕ) の方がブロック平均値と斜め入射乱反射率の元データとの誤差減少への影響が大きいことが分かった。 $(N_\theta, N_\phi) = (4, 16)$ 程度でブロックメッシュ方位の影響は微小となり、誤差は0.15以下に収束することが分かった。

第5章では、まず、斜入射乱反射率の導入が室内音響指標計算値に与える影響を把握することを目的として検討を行った。吸音面配置、リブの設置方向をパラメータとしてケーススタディを行った。その結果、天井・床を吸音性として、周壁が反射性の吸音面配置にて、斜入射乱反射率の元データを用いた場合とランダム入射値を用いた場合とで、室内音響

指標の計算値の差異が顕著に現れた。特に T_{20} , EDT に差が顕著に現れた。次に、第4章で求めたブロック平均値を幾何音響シミュレーションへ導入し、ブロック平均による室内音響指標の計算誤差について検討した。その結果、 T_{20} と EDT において弁別閾を10%以上上回る誤差が現れることが分かった。従って、幾何音響シミュレーションへの斜入射乱反射率導入には詳細なブロック平均値または、元データの適用が必要であることが示された。さらに、リブの設置方向が室内音響指標の計算値に与える差異について検討した。その結果、天井床面のみ吸音性として、周壁4面を反射性とした吸音面配置において、リブ垂直の場合に比べ、リブ水平の場合が1 kHzの T_{20} 及び EDT は増加する傾向にあることが分かった。リブ垂直の方が、床面に対して水平方向に移動する音線が散乱されやすく、天井面、床面に到来する確率が上がるためと考えられる。最後に、実測との比較を通して、リブ設置方向が室内音響指標に与える差異の妥当性を検討した。その結果、リブ設置方向が T_{20} , EDT に与える差異の傾向が実測と逆の傾向になり、対応しないことが分かった。

今後の課題として、実測との対応が挙げられる。リブ設置方向が T_{20} , EDT に与える差異の傾向が実測と逆になり、また、実測値よりも音場の拡散性を過大評価する理由として、吸音材への音線の到達確率が現実と異なることが挙げられる。本研究では、壁面の反射波の指向特性を考慮していないため音線の挙動が現実と異なると考えられる。今後、反射波の指向特性を考慮した解析手法を用いることで、実測の傾向に近づくと考えられる。加えて、本研究では、幾何音響シミュレーションに斜入射乱反射率を導入する基礎的検討と位置付け、幾何音響解析手法は音線法を用いた。今後は、虚像法や音線法改良手法など他手法への適用が考えられ、適用可能性について検証する必要があると考えられる。

参考文献

室内音響関連

- [1] ハイน์リッヒ・クットルフ著, 藤原恭司, 日高孝之訳. 室内音響学- 建築の響きとその理論-
- [2] 羽入敏樹. 室内音響指標値, 日本音響学会誌 Vol60, No.2, pp 72-77, 2004
- [3] 羽入敏樹. 壁面の拡散性と音場の拡散性の関係, 日本音響学会誌 Vol65, No.11, pp 579-583, 2009
- [4] 安岡正人. 室内音響と拡散性について, 日本音響学会誌 Vol65, No.11, pp 594-598, 2009
- [5] 小口恵司. 室内音響設計における拡散の取り扱い -ホールにおける拡散体形状-, 日本音響学会誌 Vol65, No.11, pp 589-593, 2009
- [6] 藤原恭司. 音場の拡散性と壁面の拡散反射性, 日本音響学会誌 Vol53, No.4, pp 301-305, 1997
- [7] Mike Barron. Using the standard on objective measures for concert auditoria ,ISO3382, to give reliable results, Acoust. Sci & Tech. 26, 2 ,2005
- [8] M. Barron, A.H. Marshall: Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: The derivation of a physical measure, Journal of Sound and Vibration, Vol. 77, pp. 211-232, 1981.

波動数値解析関連

- [9] T. Sakuma and Y. Yasuda. Fast Multipole Boundary Element Method for Large-Scale Steady-State Sound Field Analysis, Part1: Setup and Validation. Acta Acustica united with Acustica, 2002.
- [10] T. Sakuma and Y. Yasuda. Fast Multipole Boundary Element Method for Large-Scale Steady-State Sound Field Analysis, Part2: Examination of Numerical Items. Acta Acustica united with Acustica, 2003.
- [11] 安田洋介, 佐久間哲哉. 音響拡散性能の数値シミュレーション, 日本音響学会建築音響

研究会資料,AA2009-13

- [12] Yoshiyuki Kosaka and Tetsuya Sakuma, Numerical examination on scattering coefficient of architectural surfaces using the boundary element method, *Acoust. Sci. & Tech.* 26, 2, 2005
- [13] 佐久間哲哉, 小坂慶之, 周期構造壁面形状と音響拡散係数との関係について. 日本音響学会建築音響研究会資料, AA2005-39

幾何音響数値解析関連

- [14] User's Manual of CATT-Acoustic v8.0, Sweden, 2002.
- [15] 尾本章. 「簡単な」幾何音響理論, 日本音響学会誌 Vol62, No.10, pp 738-743, 2006
- [16] 尾本章. 幾何音響学の考え方, 特集: されど幾何音響シミュレーション, 音響技術 No. 129, pp. 2-7, 2005, 3.
- [17] 坂本慎一. 幾何音響の新しい流れ, 特集: されど幾何音響シミュレーション, 音響技術 No. 129, pp. 35-39, 2005, 3.
- [18] R. Heinz. Binaural room simulation based on an image source model with addition of statistical methods to include the diffuse sound scattering of walls and to predict the reverberant tail. *Appl. Acoust.*, Vol. 38, pp. 145-159, 1993.
- [19] 中川清. 散乱波を考慮した幾何音響計算法による室内音響物理量の予測, 日本音響学会誌 Vol45, No.12, 1989
- [20] 日本建築学会編: 室内音場予測手法-理論と応用-, 日本建築学会, 2001.
- [21] Hilmar Lehnert: Systematic errors of the ray-tracing algorithm, *Applied Acoustics*, Vol. 38, pp. 207-221, 1993.
- [22] Katsiaki Sekiguchi, Sho Kimura, and Tomoyuki Sugiyama: Approximation of impulse response through computer simulation based on finite sound ray integration, *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, Vol. 6 (2), 1985.
- [23] G.M. Naylor: ODEON-Another hybrid room acoustical model, *Applied Acoustics*, Vol. 38, pp. 131-143, 1993.
- [24] Michael Vorlander: Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm, *J. Acoust. Soc. Am.* 86 (1), 1989.
- [25] J. Vian and D. Maercke: Calculation of the room impulse response using a ray tracing method, ICA symposium at Vancouver, pp. 74-78, 1986.

測定関連

- [26] ISO 3382-1:2009, Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces, 2009.
- [27] ISO 17497-1:2004, Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces - Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room, 2004.
- [28] 佐久間哲哉. 壁面の拡散性の定義と測定法. 日本音響学会建築音響研究会資料, AA2009-24
- [29] 土屋祐造, 李孝振, 佐久間哲哉. 模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定 - 縮尺および測定システムに関する基礎的検討-. 日本音響学会講演論文集, pp.1137-1138, 2008
- [30] 土屋祐造, 李孝振, 佐久間哲哉. 乱反射率の残響室測定法に関する研究 その1 - 基準円盤への枠の設置に関して-. 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp309-310, 2009
- [31] 李孝振, 土屋祐造, 佐久間哲哉. 乱反射率の残響室測定法に関する研究 その2 - 測定条件および試料寸法に関して-. 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp311-312, 2009
- [32] 李孝振, 土屋祐造, 佐久間哲哉. 周期構造壁面のランダム入射乱反射率の測定 その3 - リブ構造の配置の影響-. 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学1), pp.307-308, 2010.
- [33] 李孝振, 土屋祐造, 佐久間哲哉. 壁面の音響拡散が室内に与える音響効果 - 縮尺模型実験による検討-. 日本音響学会講演論文集, pp1039-1094, 2009.

その他

- [34] <https://www.openacoustics.org/>

謝辞

本論文は、筆者が東京大学大学院新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻修士課程において同専攻准教授 佐久間哲哉先生のもとに行った研究をまとめたものであります。大学院から音響の基礎を学び、研究テーマの選定、修士論文の作成に至るまで、まだまだ未熟で知識・経験不足の筆者に対し大変熱心にご指導下さいましたこと、心より感謝申し上げます。副指導教員の神田順教授には、普段見落としがちな視点からアドバイスをいただき、その都度、問題を考えさせられ、刺激を受けました。ご指導下さいまして、誠に感謝申し上げます。神奈川大学 安田洋介准教授には、計算機関連の事柄について度々有益なアドバイスを頂きました。お忙しい中ご指導下さいまして、深く御礼申し上げます。同研究室博士後期課程 土屋裕造さん、李孝振さん、江田和司さんには、先輩として様々なことを教わりました。ここに、改めて御礼申し上げます。土屋さんには実測データを提供していただき、誠に御礼申し上げます。佐久間研究室 修士課程の安達光平さん、村田義明さん、三上雄一郎さんは同期の仲間として研究に対する様々な刺激を受けました。どうも有り難うございました。佐久間研究室 修士課程の井上尚久さんには、本研究プログラムを作成していただきました。井上尚久さんの協力なくして、筆者は研究を成し遂げられなかったと思います。心より感謝しております。佐久間研究室 修士課程の楠井尚貴さんには、計算機環境の整備、アプリケーションの使い方など筆者の研究環境を整備していただき、誠に感謝しております。佐久間研究室 修士課程の芥川俊輔さんには、論文のチェックなど、筆者に協力していただき誠に感謝しております。最後に、筆者の研究活動をあたたかく見守り、ときにはサポートして下さいました佐久間研究室ならびに社会文化環境学専攻の大学院生のみなさんに謝意を表します。

2010年1月24日

杉原 慎一郎

