

幾何音響理論によるインパルス応答の
ノイズに関する研究

関西大学環境都市工学部建築学科

建築環境工学第 I 研究室

建 22-78 早田 光希

指導教員 豊田 政弘

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	1
第2章 研究手法	2
2.1 幾何音響理論	2
2.1.1 音線法	2
2.1.2 虚像法	7
2.1.3 バックトレース法	10
2.2 研究の主な流れ	12
第3章 聴感実験	13
3.1 虚像法による検討	13
3.1.1 実験方法	13
3.1.2 実験結果	14
3.1.3 考察	15
3.1.4 反射音符号ランダマイズ	15
3.2 バックトレース法による検討	16
3.2.1 実験方法	16
3.2.2 実験結果	17
3.2.3 考察	22
第4章 総合考察	23
第5章 結論	24
参考文献	25

第1章 序論

1.1 研究背景

建築音響分野で頻繁に用いられるインパルス応答は、音源に対して瞬間的に大きな音（デルタ関数）を入力した際の受音点での応答を記録したものであり、音場特性を表現する重要な指標である。しかし、数値解析により予測されたインパルス応答には、実際の音響環境では本来生じないはずのノイズが確認された。このノイズは、現実の音響現象を正確に反映していないだけでなく、再生時に違和感や不快感を生じさせる要因となる。したがって、インパルス応答に含まれるノイズの発生要因を明らかにし、その除去手法を検討することは、音場再現の音質向上において重要な課題である。

1.2 研究目的

本研究の第一の目的は、数値解析によって得られるインパルス応答に含まれるノイズ成分を低減することである。さらに、そのノイズが発生する要因を明らかにすることを目的とする。具体的には、音場予測手法として用いられる幾何音響理論に着目し、虚像法やバックトレース法など複数の手法について、インパルス応答中のノイズ発生への影響を比較・検討することで、ノイズ発生 の 主要 因 を 特 定 す る。

第2章 研究手法

2.1 幾何音響理論

幾何音響理論では、音の波動性を無視し、音を幾何学的に扱うことで音場を記述する。計算や可視化が容易である一方、音の波動性を無視しているため、波動現象が起こりやすい低音域において特に真値と誤差が生じる可能性が高い。幾何音響理論に基づく代表的な解析手法として音線法と虚像法が挙げられる。しかし、両手法ともに欠点がある。それを補うために、音線法と虚像法を組み合わせたバックトレース法とよばれるものが提案されている。

2.1.1 音線法[1][2]

音線法とは、音源から単位エネルギーを持つ多数の音粒子(sound particle)を放出して、反射・伝搬経路を追跡する手法である。音粒子の辿る経路を音線(sound ray)と呼ぶ。音粒子の移動は、最速経路を辿るという Fermat の原理に則るため、温度および密度が均一な媒質中を進行する場合、音粒子は直進する。したがって、音線は直線となる。また、音粒子は壁面にぶつくと鏡面反射するものと仮定する(Fig. 2.1)。

(1) 音源

建築音響で用いられる場合の音線法では、無指向性の点音源を考える場合が多い。音線法で無指向性の音源を与えるには、等立体角ごとに音粒子を音源位置から放射すればよい(Fig. 2.2)。このような無指向性の音源の場合、音源からの距離が離れていくにつれて音線どうしの間隔が広がるため、単位面積当たりに入射する音粒子の数が減る。この音粒子密度の減少が音線法における距離減衰を表すものとなる。

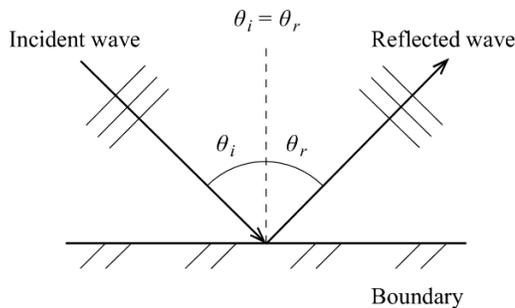


Fig. 2.1 Specular reflection

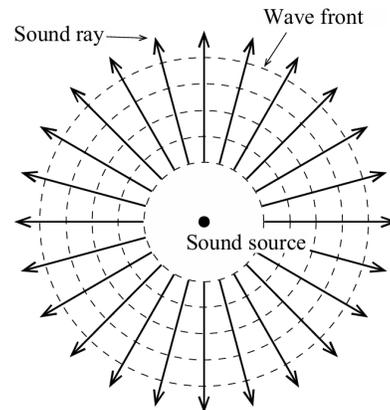


Fig. 2.2 Omni-directional sound source

(2) 境界面の扱い

境界面に入射した音波のエネルギー E_i は反射するエネルギー E_r 、境界内部で欠損するエネルギー E_l 、及び、透過するエネルギー E_t に分けられる (Fig. 2.3)。このとき、エネルギー保存則から、

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

が成り立つ。このとき、入射するエネルギーと反射するエネルギーの比を反射率 r といい、

$$r = \frac{E_r}{E_i} \quad (2.2)$$

と表される。また、このとき、吸音率 α は、

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

と表される (Fig. 2.4)。音線法において、音線が境界面にぶつかったとき、反射する音線のエネルギーは、境界面の吸音率を α とすると、反射率は $1 - \alpha$ となるので、

$$E_r = E_i(1 - \alpha) \quad (2.4)$$

となる。また、斜入射を考慮する場合、入射角度を θ とすると、反射する音線のエネルギーは、

$$E_r = E_i \left| \frac{(1+\sqrt{1-\alpha}) \cos \theta - (1-\sqrt{1-\alpha})}{(1+\sqrt{1-\alpha}) \cos \theta + (1-\sqrt{1-\alpha})} \right|^2 \quad (2.5)$$

となる (Fig. 2.5)。

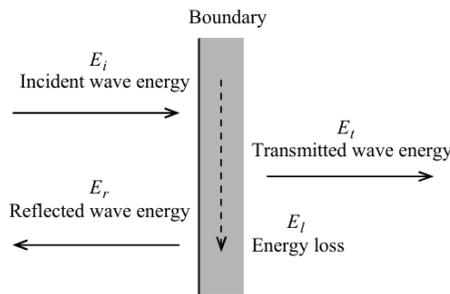


Fig. 2.3 Sound wave energy on boundary

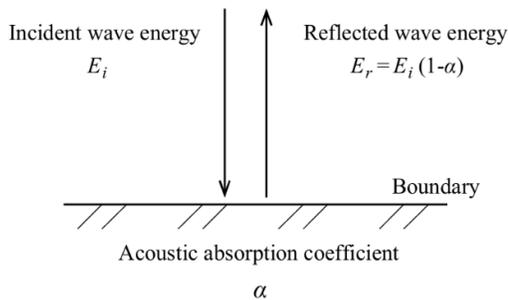


Fig. 2.4 Treatment of sound wave energy on boundary

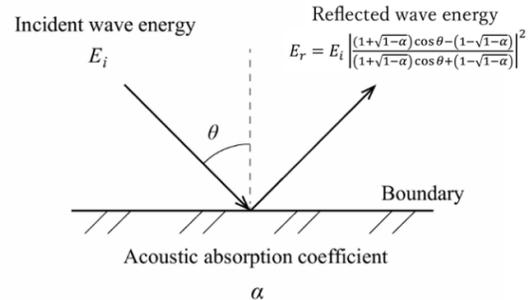


Fig. 2.5 Oblique incidence

(3) 判定

音線経路を追跡するために、音線がどの壁面に衝突するかを判定する必要がある。そのためにまず壁面の法線ベクトルを求める。ここでは、閉空間を考え、法線ベクトルが音場に対して内向きになるように設定する。法線ベクトルの向きは、頂点の順番と Fig. 2.6 のように対応させる。次に、壁面の法線ベクトルと音粒子の進行方向ベクトルと内積を求める。求めた内積が負の場合、音粒子はその壁面に向かってしていると判定できる (Fig. 2.7)。壁面に向かってしていると判定できた後、音線と壁面の交点が壁面内にあるかどうか判定する。壁面の頂点と交点の座標を Fig. 2.8 に示す。頂点と交点の座標の間には、未知数 a, b, c を用い

$$a \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + b \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} + c \begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix} \leftrightarrow \begin{cases} ax_1 + bx_2 + cx_3 = x_n \\ ay_1 + by_2 + cy_3 = y_n \\ az_1 + bz_2 + cz_3 = z_n \end{cases} \quad (2.6)$$

の関係が成り立つ。この連立方程式を a, b, c について解き、 $0 \leq a, b, c \leq 1$ であれば、交点が壁面内にあると判定される。しかし、室形状によっては Fig. 2.9 に示すように、複数の交点が検出される可能性があるが、その場合、音線の始点に近いほうの交点を真の交点と判定すればよい。

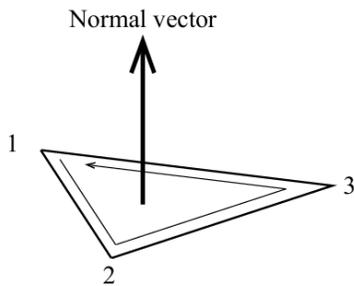


Fig. 2.6 Normal vector

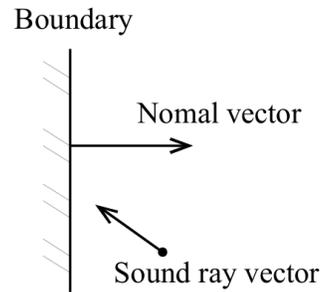


Fig. 2.7 Judgment of ray vector which heads for wall

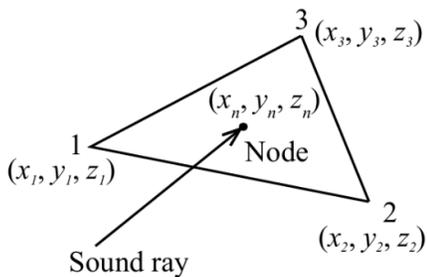


Fig. 2.8 Judgment of node in wall

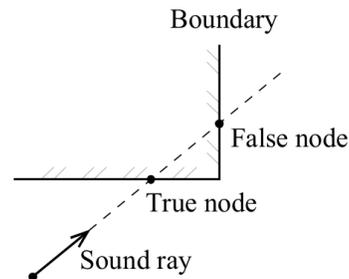


Fig. 2.9 Judgment of true node

(4) 受音

音粒子が始点からある壁面に向かって進行している間に受音点を通過するかを判定する。しかしながら、幅を持たない「音線」が、大きさを持たない「点」を通過することは数値解析上ほぼありえない。したがって受音点から一定の距離離れたところを通過した音粒子も受音したものとみなす。この範囲を受音球(receiving sphere)と呼び、この一定距離を受音半径(receiving radius)と呼ぶ。判定方法として、受音点と音線の最短距離を求め、その距離が設定した受音球の半径以内であれば受音したと判定する。受音したと判定した場合には、受音した時の時刻とその音粒子のエネルギーを記録する。

(5) 計算手順

Fig. 2.10 に音線法のフローチャートを示す（プログラムの表記は Fortran に準ずる）。まず室形状や基本情報を入力し、壁面の法線ベクトルを算出するとともに、音源を作成する。次に音線を追跡しながら、受音判定を行う。最後に、同時刻に受音した音線のエネルギーを足し合わせて結果を出力する。

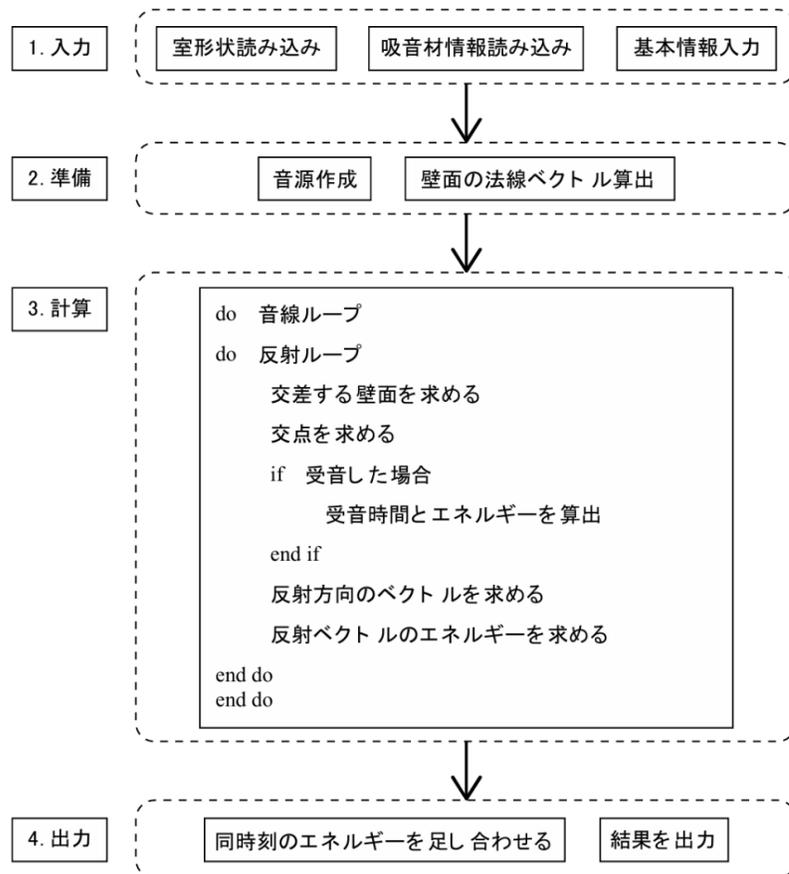


Fig. 2.10 Flow chart of ray tracing

(6)特徴

音線法は計算や音粒子の移動の可視化(visualization)が容易であるという利点がある一方、放出する音粒子数や受音半径の設定次第でさまざまな誤差が生じてしまう。Fig. 2.11 は音粒子数が少ない、または、受音半径が小さいために、受音されるべき経路が受音されたと判定されない場合を示したものである。また Fig. 2.12 は受音半径が大きすぎるために、受音しないはずの経路が受音したと判定される場合を示したものである。

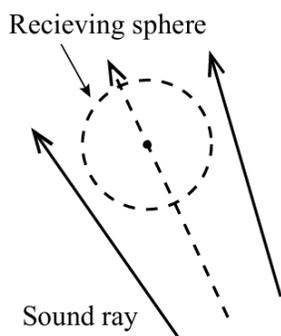


Fig. 2.11 Fault of ray tracing

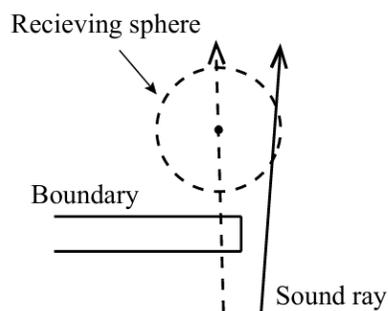


Fig. 2.12 Fault of ray tracing

2.1.2 虚像法[2][3]

虚像法とは、壁面に対する音源の虚像（虚音源(image source)）を作成し、その虚音源群、および、実音源からのそれぞれの寄与を各反射音、および、直接音の強さとし、それらの総和を算出することで、受信点の応答を求める手法である。虚像法では音線法と同様に、音は直進し、鏡面反射すると仮定する。しかし、距離減衰の考え方は音線法と異なり、音源ごとに受信点との距離を考慮する必要がある。

(1) 音源

虚像法では、各音源（虚音源群と実音源）と受信点を直線で結び、それらが各音源から受信点までの経路であると考え、その経路が実際に到達可能な経路かどうかを判定し、その経路が到達可能な経路であれば、虚音源ごとの距離減衰を計算するとともに、その距離からの到達時間を算出する。なお、総壁面数を m 、最大反射回数を k とすると、虚音源の総数 N は

$$N = \sum_{i=1}^k m(m-1)^{i-1} \quad (2.7)$$

と表せる。

(2) 境界面の扱い

境界面の扱いは音線法と同様であるため、2.1.1 項の(2)を参照されたい。

(3) 判定

作成された虚音源が有効なものかどうか、すなわち、受信点 R まで到達可能な経路を持つかどうかを判定する必要がある。矩形の室であれば、経路としては全虚音源が有効でとなる。しかし、遠くにある虚音源は距離減衰や壁面による吸音によって、受信点に到達するころには、ほぼ 0 となり、実質的には無効な虚音源となる場合がある。一方、不整形な室の場合、経路として成立する虚音源を判定するには複雑なプロセスが必要である。

虚音源を作成する際、例えば Fig. 2.13 のように、実音源の壁 1 に対する虚音源を S_1 、壁 2 に対する虚音源を S_2 とする。また、 S_1 の壁 2 に対する虚音源を S_{12} 、 S_2 の壁 1 に対する虚音源を S_{21} とする。 S_{12} から受信点への直線を引いた際、受信点から S_{12} に戻る経路で最初に交わった壁面が壁 2、その交点から S_1 に戻る経路で最初に交わった壁面が壁 1、さらにその交点から実音源に戻る経路ではどの壁面にも交わらない。このように、 S_{12} の添え字の番号を逆順した通りに壁面と交わっていれば、これは有効な虚音源とみなせる。しかし、 S_{21} から受信点への直線を引いた際には、受信点から S_{21} に戻る経路で最初に交わる壁面は壁 2 であり、 S_{21} の添え字の番号の逆順とは異なる。この場合、そのような経路は現実には存在しないことを意味する。したがって、虚像法では各虚音源がどの壁面に対して作成された虚像であるかを記憶しておき、受信点から虚音源へ戻る経路で最初にその壁面と交わるかどうかを調べることで有効な虚音源かどうかを判断せねばならない。どの壁面と最初に交わるかは音線法で紹介した判定方法と同様の手法が利用できる。

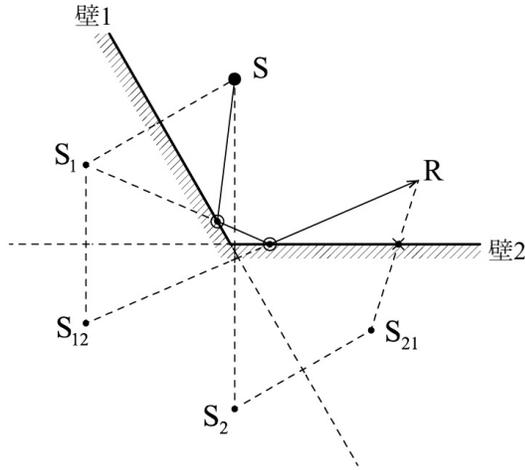


Fig. 2.13 Image Source and Reflection Paths

(4) 受音

各音源から受音点までの距離を算出する。次に周波数領域でこれらを足し合わせる。受音する速度ポテンシャルを ϕ [m²/s]、波数を k [1/m]、音源の総数を N [-]、 n 番目の音源のエネルギーを E_n [J]、 n 番目の音源から受音点までの距離 r_n [m] とすれば、

$$\phi \propto \sum_{n=1}^N \sqrt{E_n} \frac{e^{ikr_n}}{r_n} \quad (2.8)$$

と表される。これにより周波数ごとの速度ポテンシャルを算出し、Fourier 逆変換することによりインパルス応答を求めることができる。

(5) 計算手順

Fig. 2.14 に虚像法のフローチャートを示す (プログラムの表記は Fortran に準ずる)。まず、室形状や基本情報を入力し、虚音源を作成する。次に、各音源から受音点までに到達するまでに通過する壁面を検出し、エネルギーの減衰量を算出する。最後に、式(2.8)により受音点での速度ポテンシャルを求め、Fourier 逆変換を行い、インパルス応答を出力する。

(6) 特徴

虚像法では、音線法と違い、受音点をその名の通り「点」として扱うことができるため、受音方向、到達時間、インパルス応答などを音線法よりも正確に求めることができる。しかしながら、式(2.7)に示した数の虚音源を作成しなければいけないことや室形状が不整形の際に虚音源の有効性の判断が困難なことが問題として挙げられ、また、壁面数や最大反射回数が多い場合には、一般的にその多くは有効でない虚音源であることが多く、計算効率が悪いという欠点がある。

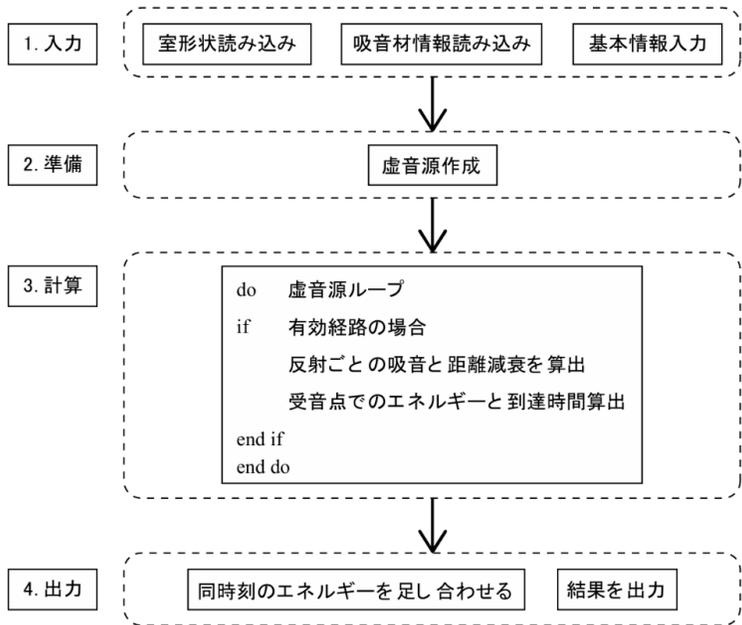


Fig. 2.14 Flow chart of image source

2.1.3 バックトレース法[4]

バックトレース法とは、音線法と虚像法を組み合わせることにより、音線法の誤差を少なくし、かつ、虚像法の計算効率の悪さを補う手法である。

(1) 計算手順

Fig. 2.15 にバックトレース法のフローチャートを示す(プログラムの表記は Fortran に準ずる)。まず、音線法によって反射経路のみを抽出し、その反射経路に基づいて虚音源を作成する。その虚音源が有効なものかを判定した後、有効虚音源のみを対象に虚像法により計算を行う。

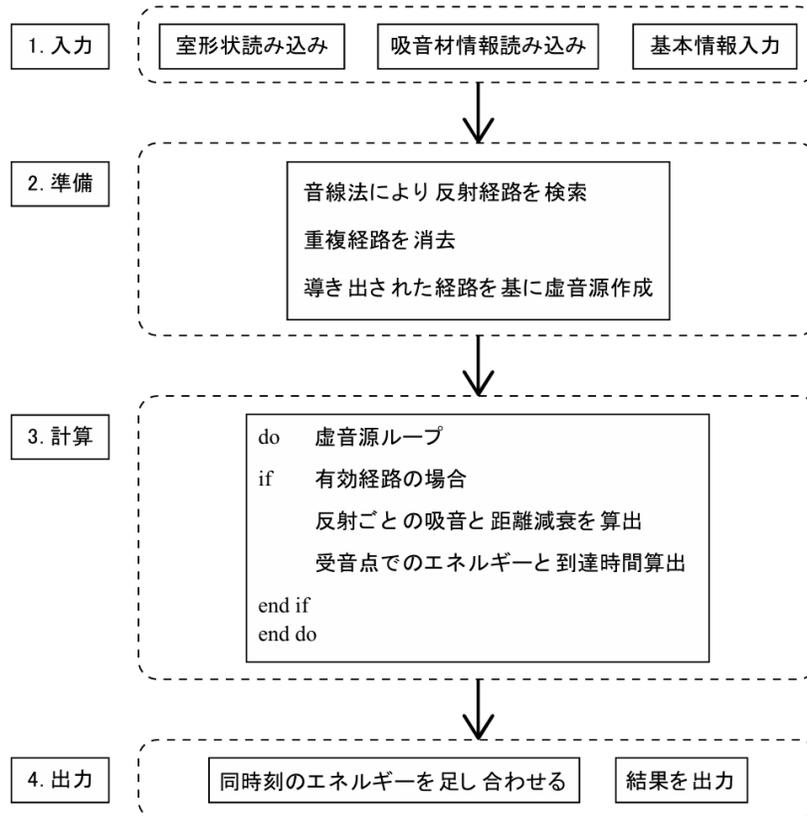


Fig. 2.15 Flow chart of backtracing method

(2) 判定

バックトレース法における有効虚音源の判定は、虚像法における有効虚音源の判定ほど複雑なものではなく、音線法によって導き出された反射経路どおりに、虚音源がその反射経路をたどれるかどうかで判定を行う。Fig. 2.16 は音線法によって 1→4 という反射経路を通して受信しており、それに基づいて虚音源を作成し、虚音源と受信点を結ぶと、同じように 1→4 と反射しているため、有効虚音源と判定できる場合を示したものである。Fig. 2.17 は音線法によって 1→8 という反射経路を通して受信しており、それに基づいて虚音源を作成し、虚音源と受信点を結ぶと、1→8 と反射した後に 5 にぶつかっており、音線法によって導かれた反射経路とは異なる反射経路を通っているため、無効虚音源と判定される場合を示したものである。

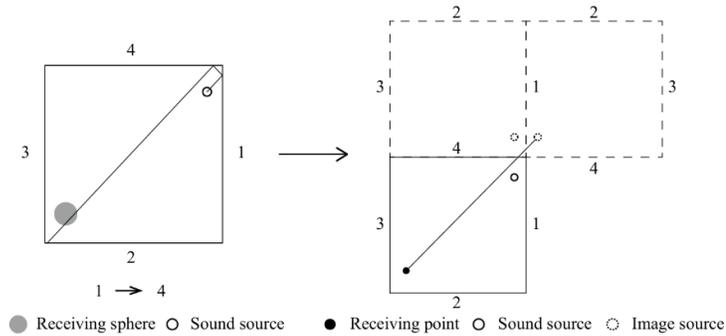


Fig. 2.16 Valid image source

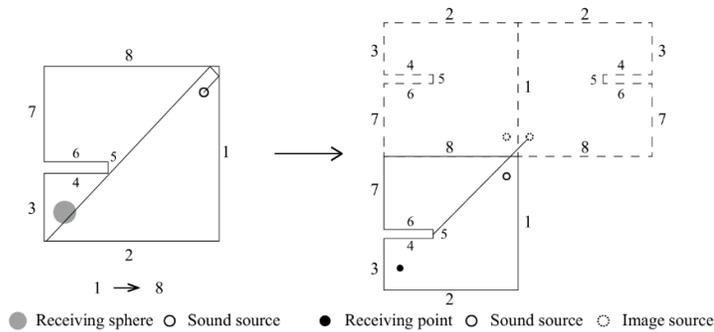


Fig. 2.17 Invalid image source

(3) 精度

Voländer[4]は、この手法を用いて計算することにより、音線法による受信領域を比較的大きく取り、かつ、音線数を減らしても、計算精度を保持することを示し、計算時間の大幅な短縮が可能になったと報告している。

2.2 研究の主な流れ

本研究では、虚像法およびバックトレース法を対象とし、両手法によって得られるインパルス応答の比較を行う。特に、直方体形状の室内空間を想定した場合、虚像法では反射回数に応じて、虚像が規則的に配置されるため、各反射経路に対応する到達距離および到達時間を幾何学的に算出することが可能である。

虚像法においては、一次反射、二次反射といった反射回数ごとに虚像が生成され、対象とするインパルス応答の時間長をあらかじめ設定することで、その時間内に音が到達し得る距離範囲に存在する虚像のみを考慮した解析が可能となる。これにより、有限時間内のインパルス応答に対して、音場挙動を良好に近似した結果が得られると考えられる。

以上の解析により得られた虚像法およびバックトレース法それぞれのインパルス応答を再生し、聴感実験による主観評価を実施する。聴感実験では、両手法による再生音を比較し、評価を行うことで、手法の違いが聴感上の印象に与える影響を明らかにする。

虚像法およびバックトレース法によって得られるインパルス応答の比較に加え、虚像法における反射音成分の符号がインパルス応答およびノイズ特性に与える影響について分析を行う。虚像法を用いた音場シミュレーションでは、反射音は壁面での反射を仮想音源として表現することで計算される。この際、反射音の振幅および符号は、理想的な反射条件を仮定して決定される場合が多い。しかし、実際の音響空間においては、壁面の微細な凹凸や表面特性の不均一性、さらには回折や散乱といった影響により、反射音の位相は一様にはならず、正負の成分が混在することが知られている。

一方、虚像法などの幾何音響に基づく解析手法では、反射音の符号が一貫して同一となる傾向が見られ、実測されるインパルス応答と比較して不自然な波形が生成される場合がある。このような符号の偏りが、インパルス応答中に観測されるノイズ成分の一因となっている可能性が考えられる。

そこで本研究では、反射音成分の符号に着目し、反射成分の正負をランダムに付与した場合と、従来どおり符号を固定した場合とを比較する。具体的には、各反射音成分に対してランダムに符号反転を行い、一部の反射成分の波形を反転させる処理を施すことで、符号分布の違いがインパルス応答の波形特性およびノイズ特性に与える影響を評価する。

第3章 聴感実験

3.1 虚像法による検討

3.1.1 実験方法

本実験では、虚像法を用いて生成した音を対象に聴感実験を行った。体積 ($\times 10^3 \text{ m}^3$) が 2, 17, 136, 1088, 3672 の 5 条件と、吸音率が 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 の 5 条件を組み合わせた計 25 条件について音を作成した。各条件の音は、評価のばらつきを考慮するため、同一内容の音を 2 回ずつ用意し、合計 50 音を実験刺激とした。これらの音をランダムな順序に並び替え、ヘッドホンを用いて 15 名の被験者に聴取させ聴感評価を実施した。

評価は、インパルス応答中に含まれるノイズの知覚程度について、ノイズが 1：聞き取れない, 2：やや聞き取れる, 3：かなり聞き取れる, 4：非常に聞き取れる の 4 段階で行い、被験者には評価シート (Fig. 3.1) に記入させた。実験開始前には、被験者が本研究における「ノイズ」の内容を理解できるよう、確実にノイズを含む音と全くノイズを含まない音の両方を事前に聴取させた。また、各音刺激は 1 つにつき最大 2 回まで再生可能とした。

【評価シート】

- 1 聞き取れない (ノイズなし)
 - 2 やや聞き取れる
 - 3 かなり聞き取れる
 - 4 非常に聞き取れる
- } (ノイズあり)

①	1	2	3	4
②	1	2	3	4
③	1	2	3	4
④	1	2	3	4
⑤	1	2	3	4
⑥	1	2	3	4
⑦	1	2	3	4
⑧	1	2	3	4
⑨	1	2	3	4
⑩	1	2	3	4
⑪	1	2	3	4
⑫	1	2	3	4
⑬	1	2	3	4
⑭	1	2	3	4
⑮	1	2	3	4
⑯	1	2	3	4
⑰	1	2	3	4
⑱	1	2	3	4
⑲	1	2	3	4
⑳	1	2	3	4
㉑	1	2	3	4
㉒	1	2	3	4
㉓	1	2	3	4
㉔	1	2	3	4
㉕	1	2	3	4
㉖	1	2	3	4
㉗	1	2	3	4
㉘	1	2	3	4
㉙	1	2	3	4
㉚	1	2	3	4
㉛	1	2	3	4
㉜	1	2	3	4
㉝	1	2	3	4
㉞	1	2	3	4
㉟	1	2	3	4
㊱	1	2	3	4
㊲	1	2	3	4
㊳	1	2	3	4
㊴	1	2	3	4
㊵	1	2	3	4
㊶	1	2	3	4
㊷	1	2	3	4
㊸	1	2	3	4
㊹	1	2	3	4
㊺	1	2	3	4

Fig. 3.1 評価シート

3.1.2 実験結果

聴感実験の結果を基に、体積、吸音率、およびノイズを感じる程度の3つの指標を用いてグラフを作成した (Fig. 3.2)。本グラフでは、横軸に吸音率、縦軸に体積を配置している。ノイズを感じる程度については、4段階評価のうち「1：聞き取れない」以外の評価を選択した回答の割合を算出し、その割合をパーセンテージとして色の濃淡で表現した。これにより、ノイズが知覚される傾向を体積および吸音率の違いに対して視覚的に把握することが可能となる。

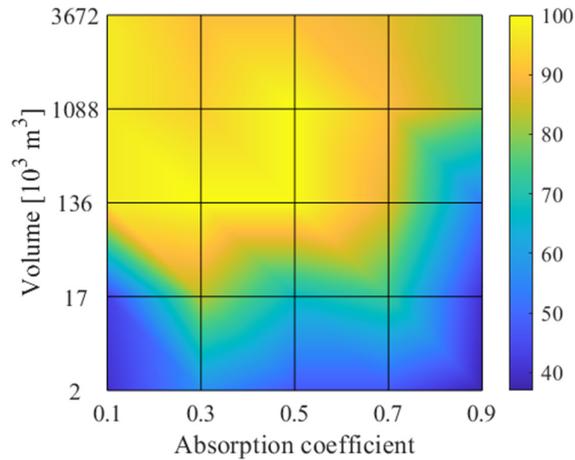


Fig. 3.2 体積・吸音率とノイズ知覚度の関係

Fig. 3.2 より、体積 ($\times 10^3 \text{ m}^3$) が小さい条件 (体積 2 および 17) では、吸音率によってノイズを感じる割合が大きく変化する傾向が見られた。一方、体積が大きい条件 (体積 136 以上) では、吸音率 0.1~0.7 において、ノイズを感じる割合が高く、概ね 90% 前後となった。

また、すべての体積条件において、吸音率 0.9 の場合は、他の吸音率条件と比較してノイズを感じる割合が低下する傾向が確認された。特に体積 2 および 17 の条件では、吸音率 0.9 においてノイズ知覚割合が 40% 前後まで低下した。

全体として、体積の増加に伴いノイズを感じる割合は増加し、体積が 136 以上の条件では高い割合でノイズが知覚される結果となった。

3.1.3 考察

本実験結果から、虚像法により生成されたインパルス応答中のノイズは、空間体積の増加に依存する可能性が考えられる。体積が大きくなるほど、反射音の到来時間間隔が広がり、反射音が連続的な残響としてではなく、時間的に離れた個々の音として知覚されやすくなる。その結果、反射音の時間的密度が低下することで、離散的な音がノイズとして知覚されたと考えられる。

また、全体積において吸音率が中程度 (0.3~0.7) の条件の場合にノイズ知覚割合が高くなる傾向が見られた点については、反射音が完全には減衰せず、かつ十分に拡散されない状態が生じている可能性が考えられる。一方、吸音率が 0.9 と高い条件では、反射音のエネルギーが大きく減衰するため、反射音の音量の低下とともにノイズの音量も低下し、ノイズが知覚されにくくなったと推察される。

これらの結果より、虚像法におけるノイズの主な発生は、体積および吸音率の設定に強く影響を受けることが示唆された。

3.1.4 反射音符号ランダム化

虚像法によって生成されたインパルス応答波形と、反射音の符号を正負ランダム化した波形を Fig. 3.3, Fig. 3.4 に示す。両者を比較した結果、波形の符号をランダム化しても、聴感上の音の印象に大きな変化は見られず、いずれの場合においてもノイズが知覚された。

このことから、本実験条件においては、反射音の符号をランダム化する処理は、ノイズの有無に対して顕著な影響を与えないことが確認された。

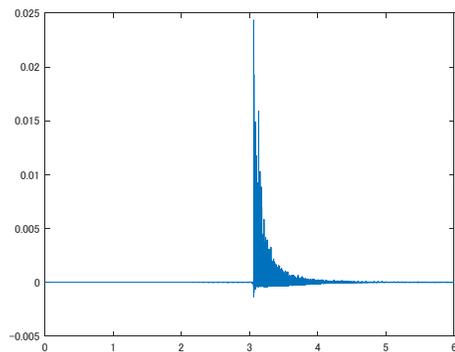


Fig. 3.3 ランダム化前の波形

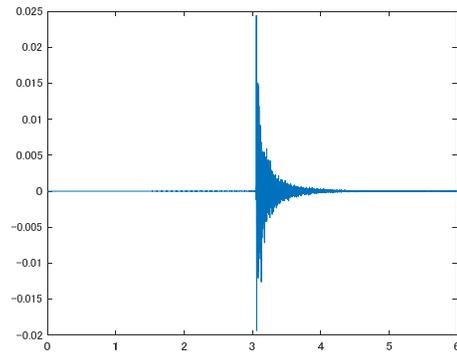


Fig. 3.4 ランダム化後の波形

3.2 バックトレース法による検討

3.2.1 実験方法

本実験では、バックトレース法を用いて生成した音を対象に聴感評価を行った。吸音率を 0.1 に固定し、体積 ($\times 10^3 \text{ m}^3$) を 2、136、3,672 の 3 条件、音線数を 1,000 本、10,000 本、100,000 本、1,000,000 本の 4 条件とした計 12 条件について音を作成した。各条件の音は同一内容の音を 4 回ずつ用意し、合計 48 音を実験刺激とし、これらの音をランダムな順序に並び替え、10 名の被験者に聴取して聴感評価を行った。評価方法は、虚像法による聴感実験と同一の、ノイズが 1：聞き取れない, 2：やや聞き取れる, 3：かなり聞き取れる, 4：非常に聞き取れるの 4 段階評価を用いた。

また、吸音率を 0.5 に固定した場合についても、吸音率 0.1 の条件と同様の設定で音を作成し、同様の聴感実験を実施した。

3.2.2 実験結果

吸音率を 0.1 に固定した条件において、音線数および体積がノイズ知覚に与える影響を検討するため、聴感実験結果を図に示す。横軸に音線数、縦軸に「1：聞き取れない」以外の評価を選択した回答の割合を取り、体積 2、136、3,672 の各条件についてそれぞれ個別に示した(Fig. 3.5)。

さらに、ノイズ知覚の程度をより連続的に評価するため、同一条件における 4 段階評価の平均値を縦軸とした結果を示す(Fig. 3.6)。次に、吸音率の違いが音線数および体積とノイズ知覚の関係に与える影響を比較するため、吸音率を 0.5 に固定した条件についても、吸音率 0.1 の場合と同様の手法で結果を整理した(Figs. 3.7, 3.8)。

吸音率を 0.1 に固定した条件においては、体積 ($\times 10^3 \text{ m}^3$) 2 の条件では、音線数の増加に伴いノイズを感じる割合は全体として減少する傾向が見られ、特に音線数 100,000 本以上では割合および平均値ともに低い値を示した。一方、体積 136 および 3,672 の条件では、音線数によらず高い割合でノイズが知覚されており、平均値も高い値を示した。特に体積 136 以上の条件では、音線数を増加させてもノイズ知覚の大きな低減は確認されなかった。これらの結果から、吸音率 0.1 の条件では、体積の増加に伴いノイズ知覚の割合および強度が増加する傾向が確認された。

吸音率を 0.5 に固定した条件においては、体積 ($\times 10^3 \text{ m}^3$) 2 の条件で、いずれの音線数においてもノイズを感じる割合は 30%未満と低く、平均値も 1.3 前後にとどまった。一方、体積 136 および 3,672 の条件では、音線数の増加に伴いノイズ知覚割合が増加し、特に音線数 10,000 本以上では 90%以上の高い割合を示した。平均値についても、音線数の増加に伴って上昇する傾向が見られ、最大で約 2.7 程度に達した。このことから、吸音率 0.5 の条件においても、体積および音線数がノイズ知覚に大きく影響することが確認された。

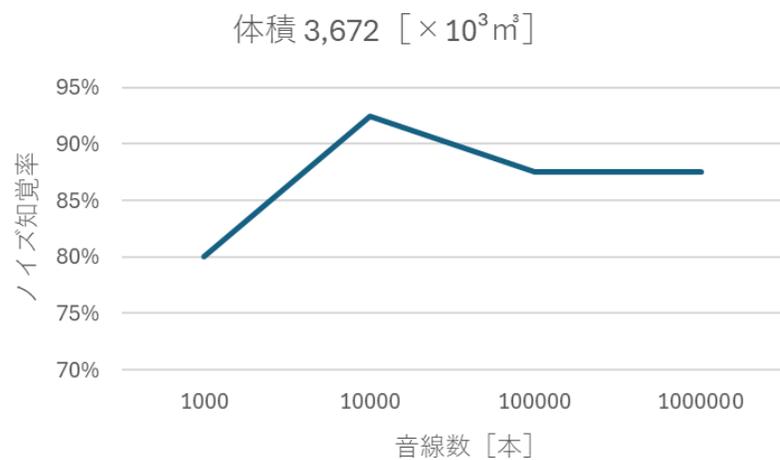
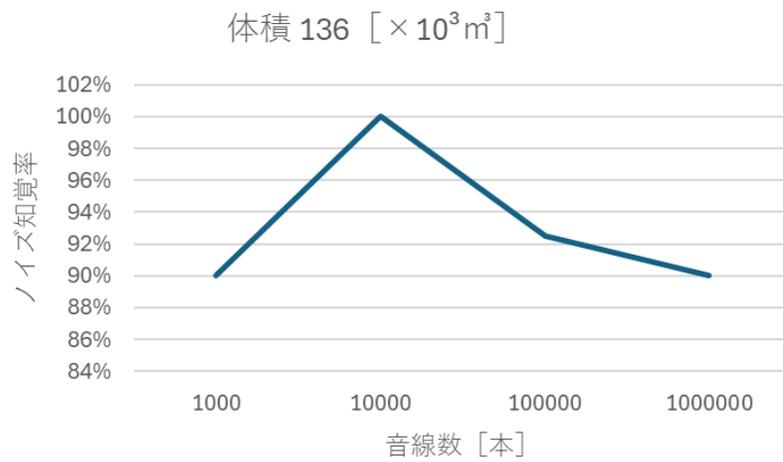
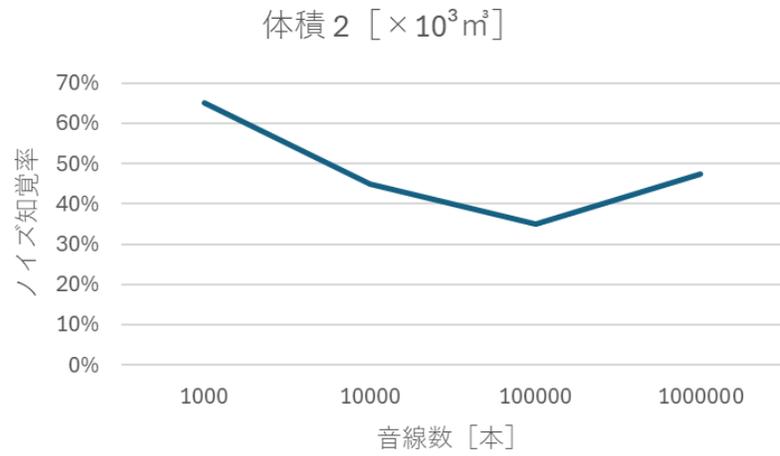


Fig. 3.5 吸音率 0.1 における音線数とノイズ知覚割合の関係

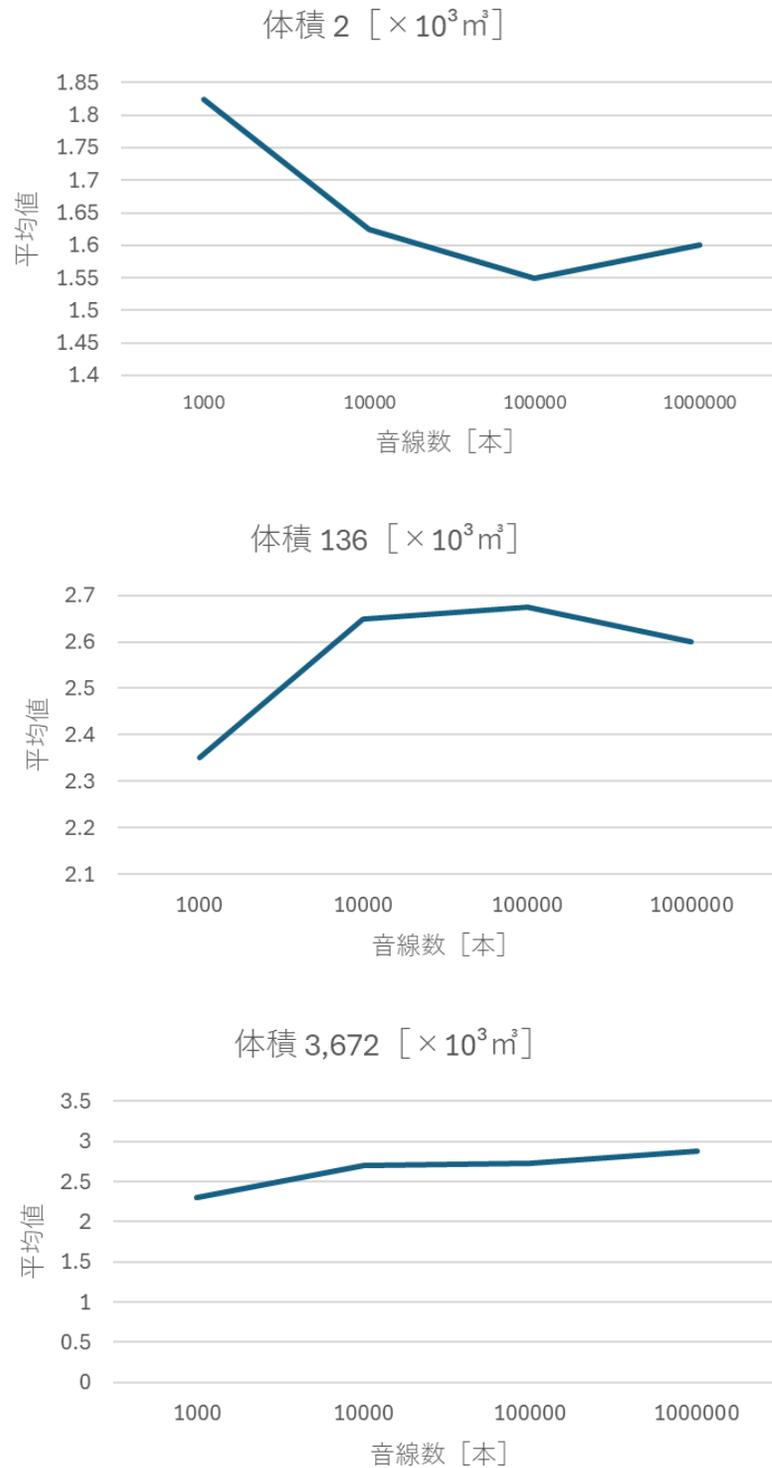


Fig. 3.6 吸音率 0.1 における音線数と 4 段階評価の平均値の関係

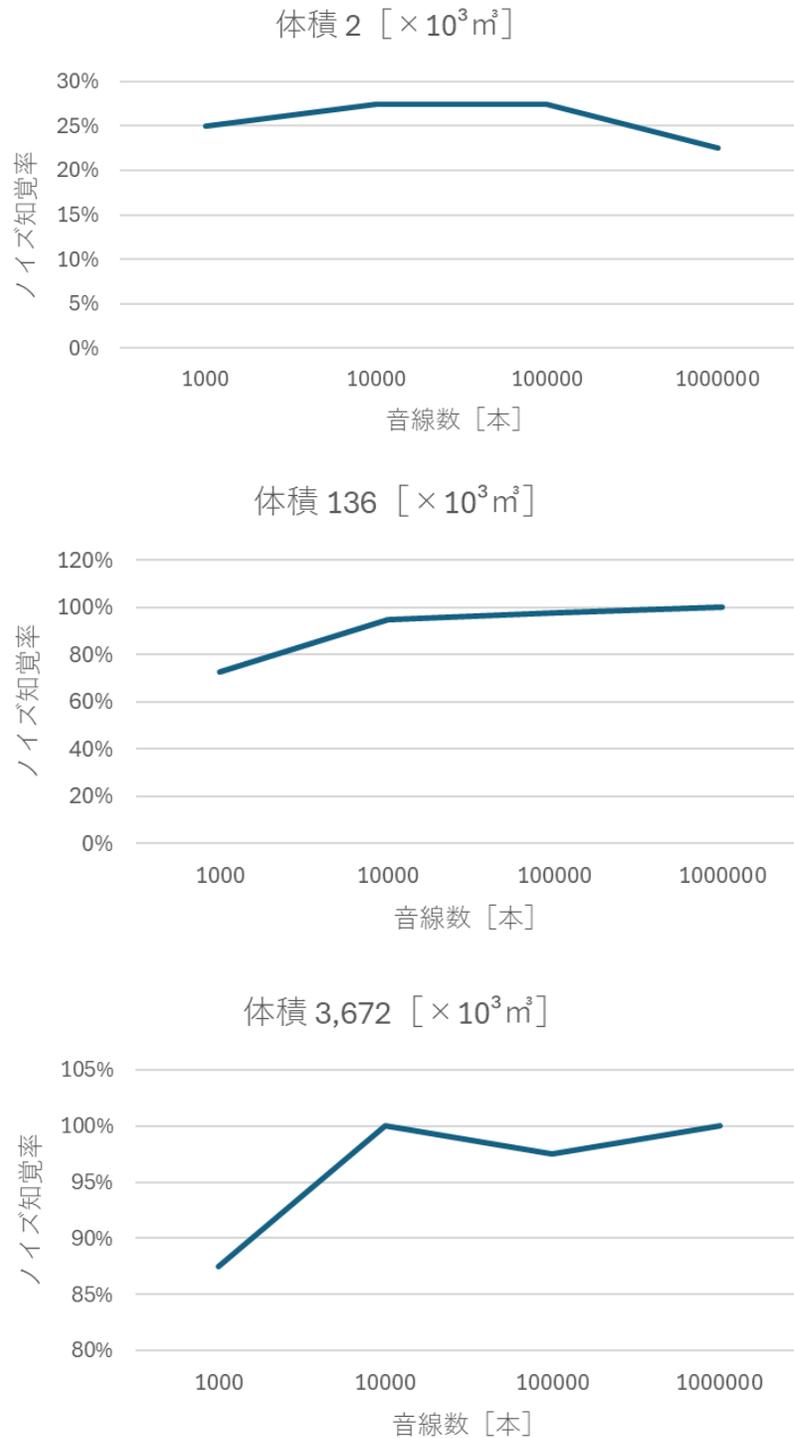


Fig. 3.7 吸音率 0.5 における音線数とノイズ知覚割合の関係

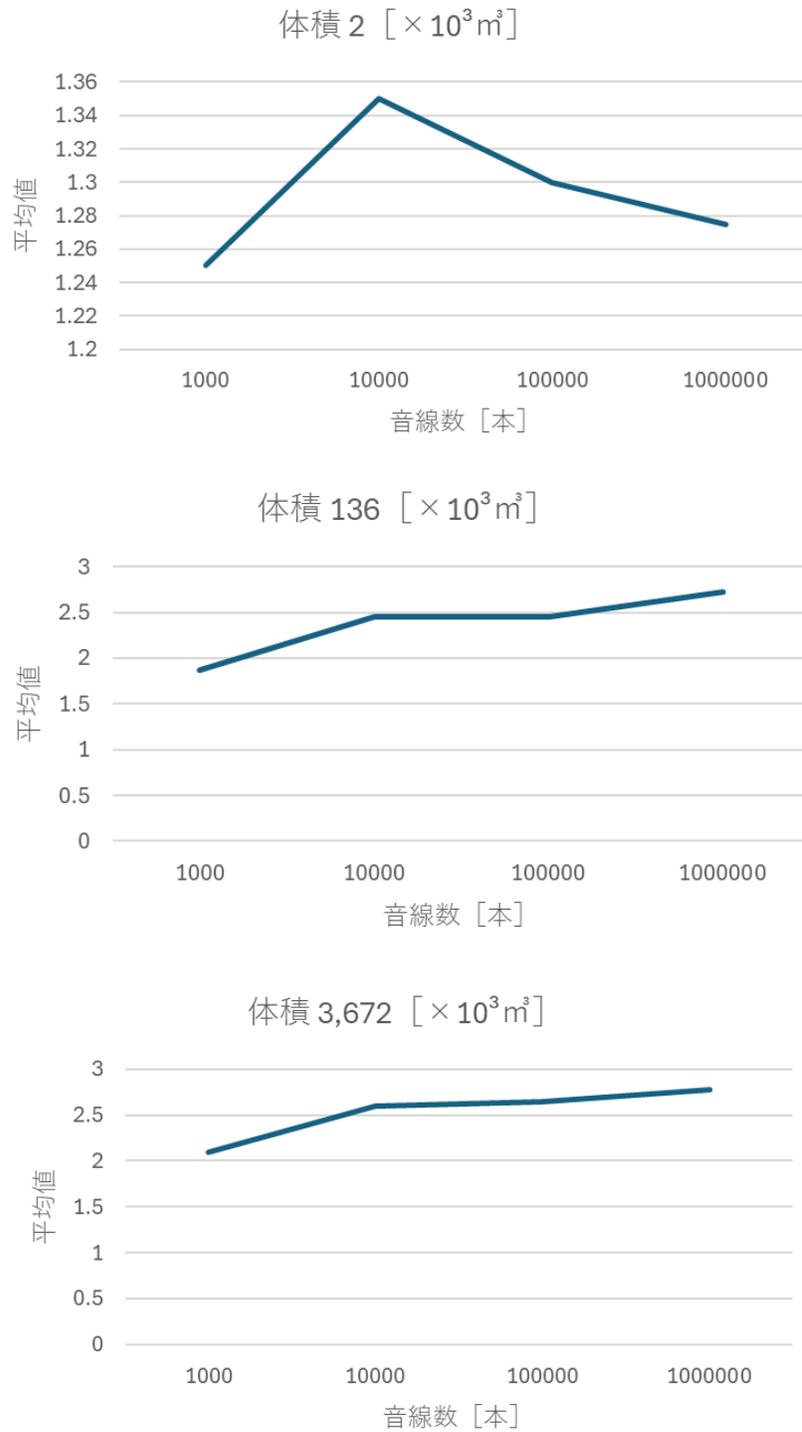


Fig. 3.8 吸音率 0.5 における音線数と 4 段階評価の平均値の関係

3.2.3 考察

バックトレース法におけるノイズの知覚は、空間体積、音線数、吸音率の組み合わせに依存する傾向が示された。吸音率 0.1 および 0.5 のいずれの条件においても、体積の増加に伴いノイズ知覚の割合および評価平均値が増加しており、インパルス応答中のノイズは空間体積の影響を強く受ける可能性がある。

体積 ($\times 10^3 \text{ m}^3$) が小さい条件 (体積 2) では、吸音率にかかわらず音線数の増加によりノイズ知覚が低減する傾向が確認された。これは、音線数の増加によりエネルギー分布のばらつきが抑制された可能性によるものと考えられる。特に吸音率 0.5 の条件では、反射音の減衰が早まることで、比較的安定した音場が形成され、ノイズが知覚されにくくなったと推察される。

一方、体積が大きい条件 (体積 136 および 3672) では、音線数を増加させた場合でもノイズ知覚の低減は限定的であった。これは、空間体積の増大に伴い反射経路が多様化し、反射音の到来時間やエネルギー分布のばらつきが増大した可能性によるものと考えられる。その結果、反射音の振幅が低下した場合でも、反射音の時間的離散性自体は解消されず、ノイズとして知覚されやすい状態が残存した可能性が示唆される。

また、吸音率 0.5 は体積が小さい条件では一定のノイズ低減効果を示したが、体積が大きい条件ではその効果が十分に確認されなかった。これは、吸音率の増加によって、各反射音の振幅を低下させることによるものであり、体積が大きい条件では反射音の時間的離散性がノイズ知覚の主要因となるため、吸音による振幅低下の効果が相対的に小さくなった可能性がある。

第4章 総合考察

虚像法およびバックトレース法による音場生成において生じるノイズについて聴感実験を行った結果、ノイズの知覚は計算手法そのものよりも、空間体積や反射音・音線の密度といった空間条件に強く依存する傾向が示された。

両手法に共通して、体積が大きくなるほどノイズ知覚の割合が高くなる傾向が確認された。この点については、空間体積の増大に伴い反射音の到来時間間隔が広がり、インパルス応答の反射音が連続的な残響としてではなく、時間的に分離した離散的な成分として知覚されやすくなることが要因として考えられる。

虚像法では、体積の増加に伴い虚像の配置が空間的・時間的に疎になることで、反射音の時間的離散性が顕在化し、ノイズ知覚が増加したと考えられる。また、反射音の符号をランダム化しても大きな変化が見られなかったことから、波形処理よりも反射音の数や配置が重要であることが示唆された。

一方、バックトレース法では、体積が小さい条件では音線数の増加によりノイズ知覚が低減する傾向が見られたが、体積が大きい条件では音線数や吸音率を変化させても、反射音の時間的離散性自体は解消されず、ノイズ低減効果は限定的であった。

以上より、幾何音響理論に基づく音場生成におけるノイズは、手法固有の問題というよりも、空間体積の増加に伴う反射音や音線の密集および分布特性に関連している可能性が示唆された。

第5章 結論

本研究では、数値解析によって得られるインパルス応答に含まれるノイズ成分の低減および、その発生要因の解明を目的として検討を行った。虚像法およびバックトレース法に基づく音場生成について聴感実験を実施し、各種条件がノイズの知覚に与える影響を評価した。その結果、本研究で検討した条件および手法においては、インパルス応答中のノイズを十分に低減するには至らず、ノイズ低減という目的は達成されなかった。

一方で、ノイズの知覚は計算手法そのものよりも、空間体積に依存することが明らかとなった。体積が小さい条件では、吸音率や音線数の設定によってノイズ知覚が大きく変化し、特に高吸音率条件ではノイズの低減が確認された。一方、体積が大きい条件では、吸音率や音線数を変化させた場合でも高い割合でノイズが知覚され、ノイズ低減効果は限定的であった。

また、虚像法において反射音の符号をランダム化してもノイズ知覚に大きな変化は見られず、ノイズは波形処理によるものではなく、反射音や音線の密集および分布の不均一性に起因する可能性が示唆された。

以上より、インパルス応答におけるノイズは、単純な波形処理や計算条件の調整のみでは抑制が困難であると考えられる。このことから、ノイズ低減のためには、計算手法の選択に加えて、空間条件に応じた吸音率や音線数などの音場生成パラメータを適切に設定することが重要である。

参考文献

- [1] 日本建築学会編: “はじめての音響数値シミュレーションプログラミングガイド”, コロナ社, 東京, 2012.
- [2] 豊田政弘: “建築音響物理学”, 関西大学出版部, 2023
- [3] J. Borish: “Extension of the image model to arbitrary polyhedral”, J. Acoust. Soc. Am. 75(6), 1827-1836, 1984.
- [4] Michael Vorländer: “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), 172-178, 1989.