

ハイブリッド音場解析に基づく

バイノーラル合成技術の開発

関西大学大学院 理工学研究科

環境都市工学専攻 建築学分野

21M6430 西村 洸志郎

指導教員 豊田政弘

論文要旨

建築音響における音場解析手法は波動音響理論と幾何音響理論の二種類に大別されるが、これらの解析手法にはそれぞれメリットとデメリットがある。

波動音響理論では、音の波動性が考慮された波動方程式に基づき計算を行うため精度の高い計算が可能であるが、特に高音域では計算量が膨大になり計算を行うのにかなりの時間が必要になる。一方で、幾何音響理論では、音を幾何学的に扱って計算を行うため計算は容易であるが、音の干渉や回折などの波動性が現れやすい低音域では誤差が生じる可能性が高い。両方法のデメリットを解消するために、波動音響理論と幾何音響理論を組み合わせたハイブリッド音場解析手法を用い、大規模空間でも計算量を抑えつつ可聴域全体で正確な予測を行う。さらにハイブリッド解析結果を音環境が立体的に再現可能となるバイノーラル合成し、立体的に提示する手法を提案する。また、その再現性の評価を行うことが本研究の目的である。

本研究では、頭部伝達関数 (HRTF: Head Related Transfer Function) を用いてバイノーラル合成を行った。HRTFは自由空間における音源と受聴者の鼓膜近傍あるいは外耳導入口に置いた受音点の間の音響伝達関数で、音場解析によって得られた結果にHRTFを畳み込むことで立体音響の再現が可能となる。

FDTD法で得られる結果は受音点の音圧波形であり、そこに音波の到来方向の情報は含まれない。従って、バックトレース法のようにHRTFを用いて直接的にバイノーラル合成をすることが不可能である。そのため、本研究ではFDTD法の結果はモノラルで提示することとする。

ハイブリッド解析はバックトレース法とFDTD法によって得られる結果をクロスオーバー周波数を境に結合する。片岡の研究から低周波数域であれば、モノラルであっても聴感的に大きな影響はないものと判断し、本研究ではクロスオーバー周波数を125 Hz帯域の上限周波数である177 Hzとした。

本研究におけるハイブリッド音場解析を用いる目的の一つである、音環境が重要視される建築物の音響特性を聴覚的に確認することを満たすため、比較的小規模なコンサートホールを対象に検討を行い、専門家にその評価を依頼した。

評価の結果、バイノーラル合成を施すことによる音像の頭外定位は再現したといえるが、空間を認識する反射音や響きが無かったことから音環境の再現性を計るには不十分だった。空間を認識する反射音や響きを感じられない原因としてバックトレース法の精度不足が考えられる。また、聴取対象にスピーチを用いたことからFDTD法を使用した177 Hz以下の帯域における評価材料が少なく、ハイブリッド解析による高音質な音場解析の聴覚的な再現性を計るには十分といえる結果を得ることができなかったことから、低音が多く含まれる音楽を試聴対象に選定し再度評価を行う必要がある。バイノーラル合成における頭外定位は可能と判断できることから、ハイブリッド解析に基づくバイノーラル合成の実用化に向けての課題は前述の空間を認識させるための手段となる。解析対象の建築物が複雑な形状であるほどバックトレース法で多くの計算量を要するため、計算量を抑え、高音質な音源の作成というハイブリッド解析の目的から逸脱しない範囲でバックトレース法の計算量をどの程度まで増加させるべきかの検討が今後必要とされる。

目次

1 序論	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 既往研究.....	2
1.3 研究目的.....	3
2 研究手法	4
2.1 波動音響理論.....	4
2.1.1 時間領域有限差分法(FDTD 法).....	4
2.2 幾何音響理論.....	9
2.2.1 音線法.....	9
2.2.2 虚像法.....	13
2.2.3 バックトレース法.....	15
2.3 モノラルハイブリッド.....	17
2.4 バイノーラル合成への拡張.....	19
2.4.1 頭部伝達関数.....	19
2.4.2 クロスオーバー周波数.....	20
2.4.3 バイノーラルハイブリッド.....	21
2.5 使用機器.....	23
3 研究対象	24
4 評価方法	26
5 結果	27
6 結論	32
参考文献.....	33
謝辞.....	34

1 序論

1.1 研究背景

建築空間を対象とした音場解析の手法は波動音響理論と幾何音響理論の二種類に大別される。波動音響理論とは音場を記述する波動方程式を基礎とした式を解くことにより音場を解析する手法であり、幾何音響理論は音の波動性を無視して扱うもので直進および幾何学的反射のみで音場を記述する理論である。これらの解析手法にはそれぞれメリットとデメリットがある。

波動音響理論では、音の波動性が考慮された波動方程式に基づき計算を行うため精度の高い計算が可能であるが、特に高音域では計算量が膨大になり計算を行うのにかなりの時間が必要になる。一方で、幾何音響理論では、音を幾何学的に扱って計算を行うため計算は容易であるが、音の干渉や回折などの波動性が現れやすい低音域では誤差が生じる可能性が高い。音場解析を行う場合、これらの特徴を考慮しながら解析対象の空間や物体に見合った計算方法を選ぶことが大切である。

コンサートホールなどの大規模空間の音場解析には、計算量の少ない幾何音響理論を用いられることが多い。しかし、この場合低音域における誤差が懸念される。一方で、波動音響理論を用いて正確な結果を得ようとしても、現在の計算機性能で可聴域全体を計算することは実質的に難しい。そのため、大規模空間の音場解析では、計算量を抑えつつ、可聴域全体で正確な解析ができる解析技術の開発が望まれている。

また、音環境が意識して設計される施設は建設前の設計段階で事前に室形状や残響時間などの音響的処置を検討しておく必要がある。その際に対象の空間における音場を立体的に再現することができれば、設計意図通りの音響空間が形成できているか、実際に人の耳で聴覚的に確認することが可能となる。

1.2 既往研究

Granier ら[1]は車室内の音場解析において、低音域での波動音響理論の解析結果と、中・高音域での幾何音響理論の解析結果を結合させた、ハイブリッド解析に関する検討を行った。また、文屋ら[2]により、開領域のための幾何音響理論と波動音響理論の結合解法が提案されている。ただし、対象空間が開領域であることに加えて、空間領域で幾何音響理論と波動音響理論を適用する範囲を分けている。幾何音響理論と波動音響理論を組み合わせるといふ考え方は古くからあるはずだが、これら以外にハイブリッド解析手法に関する報告は見られない。坂吉[3]はその理由として、幾何音響理論と波動音響理論の根本的な考え方が異なるため、単純に二つの手法を組み合わせることができないからだと考え、ある周波数を境に波動音響理論と幾何音響理論の計算結果を補正し合成するハイブリッド音場解析手法の開発に関する研究を行った。この研究では 1 m^3 四方の立方体という小さくて単純な形の空間を想定しその実現性が検討され、大幅に計算時間を短縮することができた。また、吉田[4]は坂吉の提案する手法で解析対象とする空間のスケールを実在するコンサートホールまで拡大してハイブリッド解析を行った。さらに藤原[5]はハイブリッド解析を用いることによって低音域における音質の向上が確認できる結果を得た。

1.3 研究目的

本研究では、波動音響理論と幾何音響理論によるハイブリッド音場解析手法を用い、大規模空間でも計算量を抑えつつ可聴域全体で正確な予測を行い、かつ、ハイブリッド解析結果をバイノーラル合成し、立体的に提示する手法を提案する。また、その再現性の評価を行うことを目的とする。

2 研究手法

2.1 波動音響理論

波動音響理論では、音波の振る舞いを

$$c^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

で示される波動方程式、あるいは、それを導出するための運動方程式と連続方程式で記述する。ここで、 c [m/s]は音速、 p [N/m²]は音圧である。この式を離散化し、数値的に解くことで、音場を解析することを波動音響数値解析と呼ぶ。波動方程式を解くため、音波の波動性を考慮した正確な予測ができる一方、計算量が膨大であるため、予測できる対象や範囲が限られる。音響分野での波動音響数値解析では一般的に、境界要素法 (BEM)、時間領域有限差分法 (FDTD 法)、有限要素法 (FEM) が用いられる。幾何音響理論では、一般的に時間領域の解を得ることができるため、本論文では、上記のうち、同じ時間領域の解を容易に得ることができる時間領域有限差分法を用いる。

2.1.1 時間領域有限差分法 (FDTD 法)

FDTD 法とは、音場を空間的にも時間的にも離散化し、支配式の微分項を差分商で近似することにより解を得る手法である。空間的に離散化された一つ一つのセルには、Fig. 2.1 に示すように、音圧と粒子速度を互い違いに配置する。この空間的な配置のみを表した図を、Yee セルと呼ぶ。また、Fig. 2.2 に示すスタガードグリッドと呼ばれる格子によって、空間的な配置と時間的な配置を表すこともできる。FDTD 法では、空間的にも時間的にも互い違いに配置された音圧と粒子速度を、互い違いに計算するリーブフロッグアルゴリズム (蛙跳び差分アルゴリズム) [6] と呼ばれる手法を用いることで、音波の挙動を時間発展的に求めることができる。

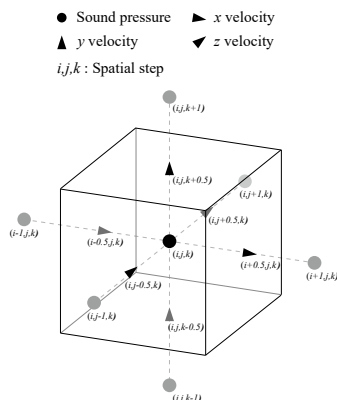


Fig. 2.1 Yee cell (three dimension)

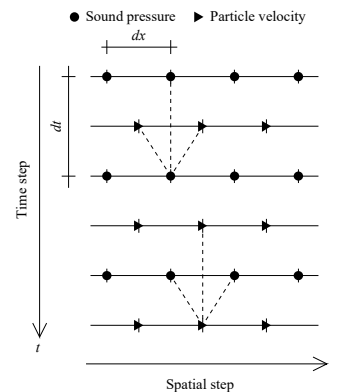


Fig. 2.2 Staggered grid (one dimension)

(1) 支配式

ここに、寸法が $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ [m] で密度が ρ_0 [kg/m³] の空気粒子があり、各面に音圧 p [N/m²] が加わっている状態を考える。この空気粒子の x, y, z 方向の変位を u_x, u_y, u_z [m] とする。この時、 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ が微小量であることを考慮すれば、 x, y, z 方向の運動方程式は、

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (2.2)$$

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (2.3)$$

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} + \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2.4)$$

となる。また、空気粒子の各面の変位を考え、 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ が微小量であることを考慮すれば、空気粒子の体積の増分 ΔV [m³] は、

$$\Delta V = \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.5)$$

と表される。一方、音圧と体積変化率の関係は体積弾性率 κ [N/m²] を介して、

$$p = -\kappa \frac{\Delta V}{V} \quad (2.6)$$

と表される。なお、体積弾性率と密度、及び、音速 c [m/s] には

$$\kappa = \rho_0 c^2 \quad (2.7)$$

の関係がある。ここで、式(2.5)を式(2.6)に代入すれば、

$$p = -\kappa \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \quad (2.8)$$

となり、これを音圧に関する連続方程式と呼ぶ。また、すべての支配式を1階の偏微分方程式とするために、変位の時間微分を粒子速度に置き換える。ここで、 x, y, z 方向の粒子速度を v_x, v_y, v_z [m/s] とする。さらに、式(2.8)の両辺を時間微分すれば、式(2.2)~(2.4), (2.8)は、

$$\rho_0 \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (2.9)$$

$$\rho_0 \frac{\partial v_y}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (2.10)$$

$$\rho_0 \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \kappa \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.12)$$

と変形することができる。

FDTD 法では、式(2.9)~(2.12)を用いて音波の解析を行う。しかし、音圧や粒子速度は空間や時間に関して連続的に変化するため、これらの式をそのまま扱うことができない。そこで、空間や時間を離散化し、連続な関数を近似することで、計算を可能にする。FDTD 法における離散化は、Fig. 2.1 や Fig. 2.2 のように、空間的にも時間的にも、音圧と粒子速度を離散化幅の半ステップずつ互い違いに配置する。ここで、空間ステップを i, j, k 、時間ステップを n と置き、空間ステップが i, j, k で時間ステップが n の時の音圧を $p^n(i, j, k)$ [N/m^2]、空間ステップが $i+0.5, j, k$ で時間ステップが $n+0.5$ の時の x 方向の粒子速度を $v_x^{n+0.5}(i+0.5, j, k)$ [m/s] と表記する。この離散化によって、

$$f'(x) \cong \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} \quad (2.13)$$

のように中心差分近似と呼ばれる方法を用いて近似することができる。よって、式(2.9)~(2.12)は、

$$\rho_0 \frac{v_x^{n+0.5}(i+0.5, j, k) - v_x^{n-0.5}(i+0.5, j, k)}{\Delta t} = - \frac{p^n(i+1, j, k) - p^n(i, j, k)}{\Delta x} \quad (2.14)$$

$$\rho_0 \frac{v_y^{n+0.5}(i, j+0.5, k) - v_y^{n-0.5}(i, j+0.5, k)}{\Delta t} = - \frac{p^n(i, j+1, k) - p^n(i, j, k)}{\Delta y} \quad (2.15)$$

$$\rho_0 \frac{v_z^{n+0.5}(i, j, k+0.5) - v_z^{n-0.5}(i, j, k+0.5)}{\Delta t} = - \frac{p^n(i, j, k+1) - p^n(i, j, k)}{\Delta z} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \frac{p^{n+1}(i, j, k) - p^n(i, j, k)}{\Delta t} &= -\kappa \frac{v_x^{n+0.5}(i+0.5, j, k) - v_x^{n-0.5}(i-0.5, j, k)}{\Delta x} \\ &\quad -\kappa \frac{v_y^{n+0.5}(i, j+0.5, k) - v_y^{n-0.5}(i, j-0.5, k)}{\Delta y} \\ &\quad -\kappa \frac{v_z^{n+0.5}(i, j, k+0.5) - v_z^{n-0.5}(i, j, k-0.5)}{\Delta z} \end{aligned} \quad (2.17)$$

と近似できる。この式(2.14)~(2.17)において、最も時間ステップが大きい項のみを左辺に残し変形すると、

$$v_x^{n+0.5}(i+0.5, j, k) = v_x^{n-0.5}(i+0.5, j, k) - \frac{\Delta t}{\rho_0 \Delta x} \{p^n(i+1, j, k) - p^n(i, j, k)\} \quad (2.18)$$

$$v_y^{n+0.5}(i, j+0.5, k) = v_y^{n-0.5}(i, j+0.5, k) - \frac{\Delta t}{\rho_0 \Delta y} \{p^n(i, j+1, k) - p^n(i, j, k)\} \quad (2.19)$$

$$v_z^{n+0.5}(i, j, k+0.5) = v_z^{n-0.5}(i, j, k+0.5) - \frac{\Delta t}{\rho_0 \Delta z} \{p^n(i, j, k+1) - p^n(i, j, k)\} \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} p^{n+1}(i, j, k) &= p^n(i, j, k) - \kappa \frac{\Delta t}{\Delta x} \{v_x^{n+0.5}(i+0.5, j, k) - v_x^{n+0.5}(i-0.5, j, k)\} \\ &\quad - \kappa \frac{\Delta t}{\Delta y} \{v_y^{n+0.5}(i, j+0.5, k) - v_y^{n+0.5}(i, j-0.5, k)\} \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$-\kappa \frac{\Delta t}{\Delta z} \{v_z^{n+0.5}(i, j, k + 0.5) - v_z^{n+0.5}(i, j, k - 0.5)\}$$

と変形できる。式(2.18)~(2.20)により、任意の空間、及び、時間ステップの粒子速度は、同じ空間ステップの 1 時間ステップ前の粒子速度と、隣接する空間ステップの半時間ステップ前の音圧によって求めることができる。同様に、式(2.21)により、任意の空間、及び、時間ステップの音圧は、同じ空間ステップの 1 時間ステップ前の音圧と、隣接する空間ステップの半時間ステップ前の粒子速度によって求めることができる。Fig. 2.2 に、音圧、ないしは、粒子速度を求めるためには、どの空間ステップ、及び、時間ステップの粒子速度、ないしは、音圧を参照する必要があるのかを示しているので参照されたい。以上より、初期条件さえわかれば、式(2.18)~(2.20)と式(2.21)を全空間ステップについて交互に計算することで、音圧分布、及び、粒子速度分布を時間発展的に求めることができる。

(2) 音源 [7]

ここまでは、音源からの出力がない状態での支配式の計算方法について述べた。しかし、実際には励振条件として音源を与えなければならない。音源を FDTD 法に導入する方法として、初期条件として粒子速度分布も音圧分布も 0 とみなせる場のある 1 点に時間波形を与える方法を用いる。音源位置を i_d, j_d, k_d 、体積速度信号を $Q(t)$ [m^3/s] とすると、式(2.21)の右辺に音源項を追加して、

$$\begin{aligned} p^{n+1}(i_d, j_d, k_d) = & p^n(i_d, j_d, k_d) \\ & -\kappa \frac{\Delta t}{\Delta x} \{v_x^{n+0.5}(i_d + 0.5, j_d, k_d) - v_x^{n+0.5}(i_d - 0.5, j_d, k_d)\} \\ & -\kappa \frac{\Delta t}{\Delta y} \{v_y^{n+0.5}(i_d, j_d + 0.5, k_d) - v_y^{n+0.5}(i_d, j_d - 0.5, k_d)\} \\ & -\kappa \frac{\Delta t}{\Delta z} \{v_z^{n+0.5}(i_d, j_d, k_d + 0.5) - v_z^{n+0.5}(i_d, j_d, k_d - 0.5)\} \\ & + \frac{\kappa \Delta t}{\Delta x \Delta y \Delta z} Q^n \end{aligned} \quad (2.22)$$

とすればよい。ここで、 $Q^n = Q((n - 0.5)\Delta t)$ である。本論文では、

$$Q(t) = M \exp[-A(t - t_0)^2] \quad (2.23)$$

で表されるガウシアンパルスを用いる。ここで、 M は体積速度のピーク値、 A は急峻さに関する係数、 t_0 はピーク時刻である。しかし、ガウシアンパルスを音源として与えると、受音点で音圧を観測しても、インパルス応答を得ることができない。そのため、インパルス応答を得るためには、逆フィルタをかける必要がある。この逆フィルタに関しては 2.3 節で詳しく説明する。

(3)PML (Perfectly matched layer : 完全吸収層) [8]

FDTD 法では空間を離散化して計算を行うため、閉領域しか計算することができない。そのため、開領域を計算するためには、境界以降の領域を模擬するための無反射境界を導入する必要がある。FDTD 法に無反射境界を導入する一番簡単な方法は垂直入射インピーダンス境界で吸音率を 1 とすることだが、斜めに入射する音波に対しては、吸音率が 1 でなくなるため、完全な無反射境界とはならない。現在、あらゆる方向からの入射に対して最も無反射境界を表現できる方法が Berenger[8]が提案した PML である。PML は、すべての軸方向について、隣接する媒質と特性インピーダンスが等しく、かつ、伝搬中に波が減衰するような非物理媒質で構成されている。Berenger が提案したのは電磁波用の PML であるが、弾性波用の PML も Chew ら[9]により定式化されている。PML を用いることで、自由空間などの開領域の計算が可能になるが、多くのメモリと計算時間が必要となる。

2.2 幾何音響理論

幾何音響理論では、音の波動性を無視し、音の伝搬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計算法が提案された[10]。本論文では、このバックトレース法を採用する。バックトレース法の基本は音線法と虚像法であるため、本節では、まず音線法と虚像法を説明した後、バックトレース法について説明する。

2.2.1 音線法

音線法とは、音線と呼ばれる単位エネルギーの進行経路を用いて、その反射履歴を追跡する計算手法である。音線は、最短経路を通るという Fermat の法則に則るため、温度および密度が均一な媒質中を進行する場合、音線は直進する。また、音線は壁面にぶつくと鏡面反射する (Fig. 2.3)。

(1) 音源

建築音響で用いられる場合の音線法では、無指向性の音源を与える場合が多い。無指向性の音源を与えるには、音線数を決定した後、等立体角[11]になるように単位エネルギーを持った音線を音源位置から放射する (Fig. 2.4)。無指向性音源の場合、距離が離れていくにつれて音線の間隔が広がるため、単位面積当たりに入射する音線の数が減る。この音線数の減少が音線法における距離減衰の考え方である。

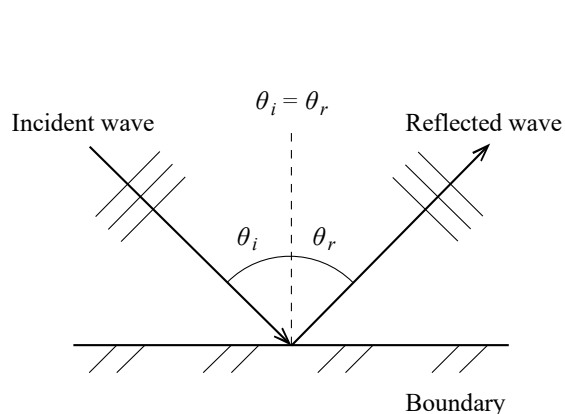


Fig. 2.3 Specular reflection

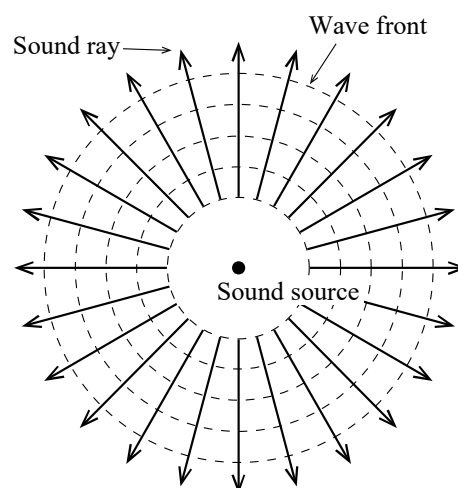


Fig. 2.4 Omni-directional sound source

(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. 2.5)。このとき、エネルギー保存則から、

$$E_i = E_r + E_l + E_t \quad (2.24)$$

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、

$$r = \frac{E_r}{E_i} \quad (2.25)$$

と表される。また、このとき、吸音率 α は、

$$\alpha = 1 - \frac{E_r}{E_i} \quad (2.26)$$

と表される (Fig. 2.6)。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、

$$E_r = E_i(1 - \alpha) \quad (2.27)$$

となる。

また、斜入射を考慮する場合は、小林[12]の研究より

$$E_r = E_i \left| \frac{(1 + \sqrt{1 - \alpha}) \cos \theta - (1 - \sqrt{1 - \alpha})}{(1 + \sqrt{1 - \alpha}) \cos \theta + (1 - \sqrt{1 - \alpha})} \right|^2 \quad (2.28)$$

とする (Fig. 2.7)。

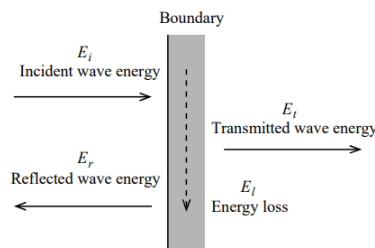


Fig. 2.5 Sound wave energy on boundary

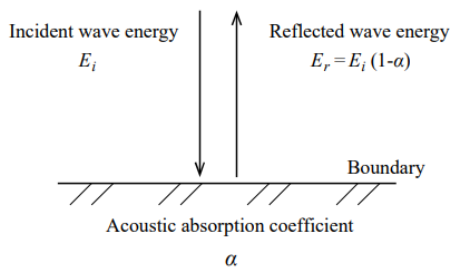


Fig. 2.6 Treatment of sound wave energy on boundary

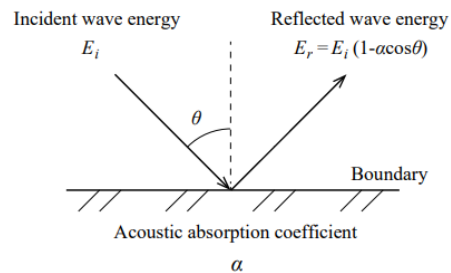


Fig. 2.7 Oblique incidence

(3) 判定

音線経路を追跡するために、音線がどの壁面でぶつか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、閉空間であれば、法線ベクトルが内向きになるように設定することとする。法線ベクトルの向きは、頂点の順番と Fig. 2.8 のように対応させる。次に、法線ベクトルと音線の内積を求める。内積が負のとき、音線はその壁面に向かってっていると判定できる (Fig. 2.9)。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. 2.10 に示す。頂点と交点の座標の間には

$$\begin{aligned} ax_1 + bx_2 + cx_3 &= x_n \\ ay_1 + by_2 + cy_3 &= y_n \\ az_1 + bz_2 + cz_3 &= z_n \end{aligned} \quad (2.29)$$

の関係がある。このとき $0 \leq a, b, c \leq 1$ 、かつ、 $a + b + c = 1$ のとき、壁面内に交点があると判定することができる。しかし、室形状によっては Fig. 2.11 に示すように、交点が2つ現れる可能性がある。その場合、近いほうの交点を真の交点と判定する。

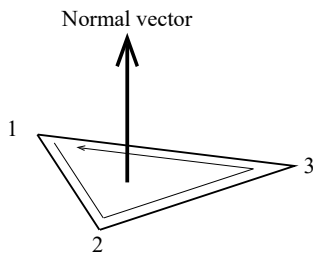


Fig. 2.8 Normal vector

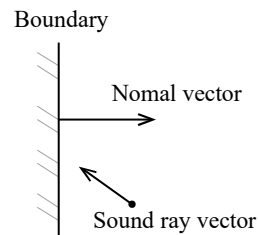


Fig. 2.9 Judgment of ray vector
which heads for wall

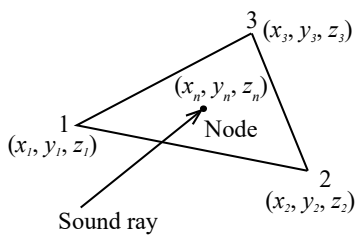


Fig. 2.10 Judgment of node in wall

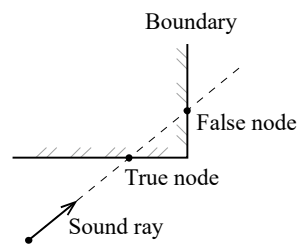


Fig. 2.11 Judgment of true node

(4) 受音判定

音線が壁面から壁面に向かっていく間に受音点を通過しているかを判定する。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、受音したときの時刻とエネルギーを記録する。

(5) 計算手順

Fig. 2.12 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共に、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、結果を出力する。

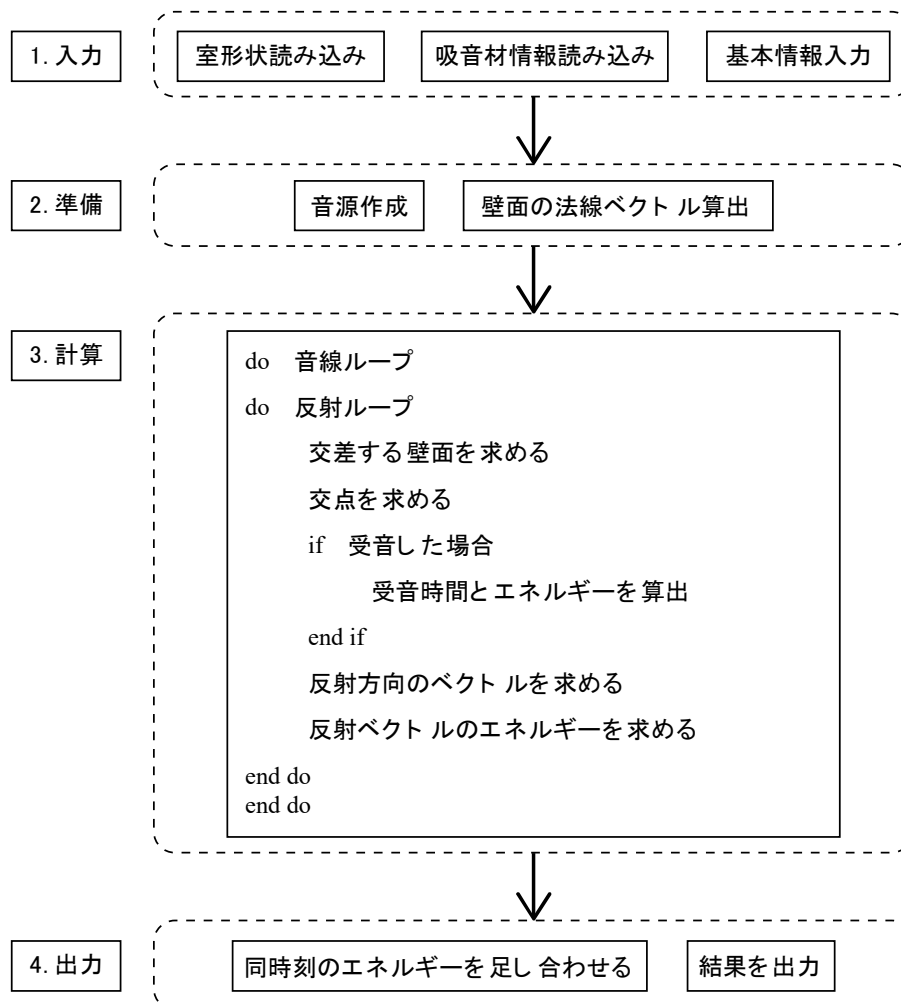


Fig. 2.12 Flow chart of ray tracing method

(6)特徴

音線法は計算や可視化が容易であるという利点がある一方、音線数や受音半径の設定によってさまざまな誤差が生じてしまう。Fig. 2.13 は音線数が少ない、もしくは、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. 2.14 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。

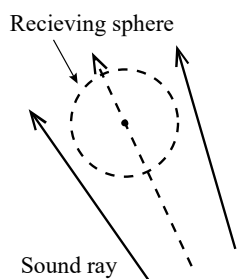


Fig. 2.13 Fault of ray tracing

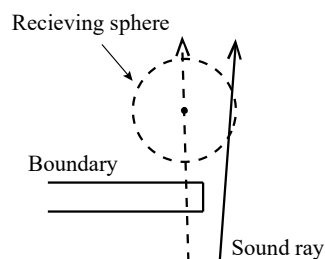


Fig. 2.14 Fault of ray tracing

2.2.2 虚像法

虚像法とは、壁面に対する虚音源を作成し、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によって、ある点の音の強さ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、虚音源ごとに距離の逆2乗則を考慮する必要がある。

(1) 音源

虚像法では、実音源と虚音源に単位エネルギーを与える。音線法では、音源から無数の音線を放射していたが、虚像法では、各音源と受信点を結び、各音源から受信点までの経路を考える。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と反射壁面による吸音を計算し、受信点でのエネルギーと到達時間を算出する。

また、室内の総壁面数 m 、最大反射次数 k とすると、虚音源の総数 N は

$$N = \sum_{i=1}^k m(m-1)^{i-1} \quad (2.30)$$

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、2.2.1 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。本論文では詳細は割愛するので、Borish[13]の文献などを参照されたい。

(4) 計算手順

Fig. 2.15 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、壁面に対する虚音源を、式(2.30)に基づく個数だけ作成し、有効な経路の虚音源を判定する。次に、有効な経路の虚音源のみ、音源と虚音源を結び、それぞれの距離減衰と壁面による吸音を算出し、受音点におけるエネルギーと到達時刻を算出する。最後に、同時刻のエネルギーを足し合わせ、結果を出力する。

(5) 特徴

虚像法では、方向、相対的なインテンシティ、及び、到達時間が音線法に比べて正確に求まる。したがって、初期反射音構造の検討やエコー障害のチェック、反射音の指向性の検討に有効である。しかし、式(2.30)に示した数の虚音源を作成が必要となるが、総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。

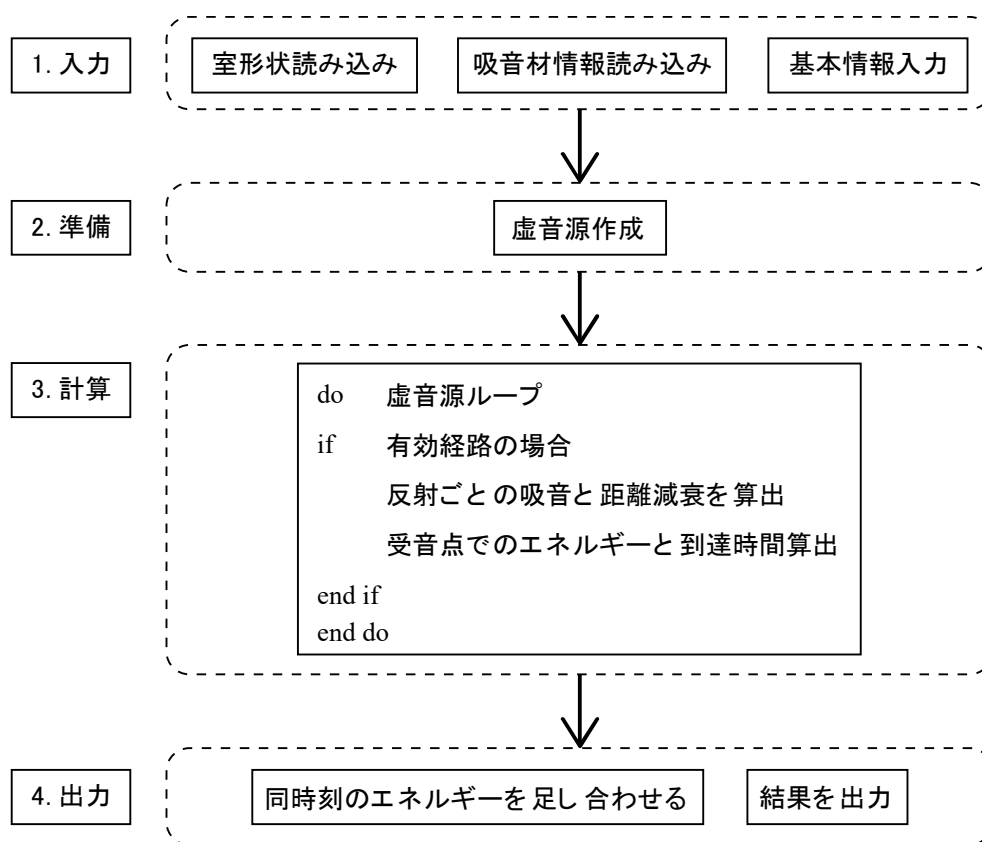


Fig. 2.15 Flow chart of image source method

2.2.3 バックトレース法

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. 2.16 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。

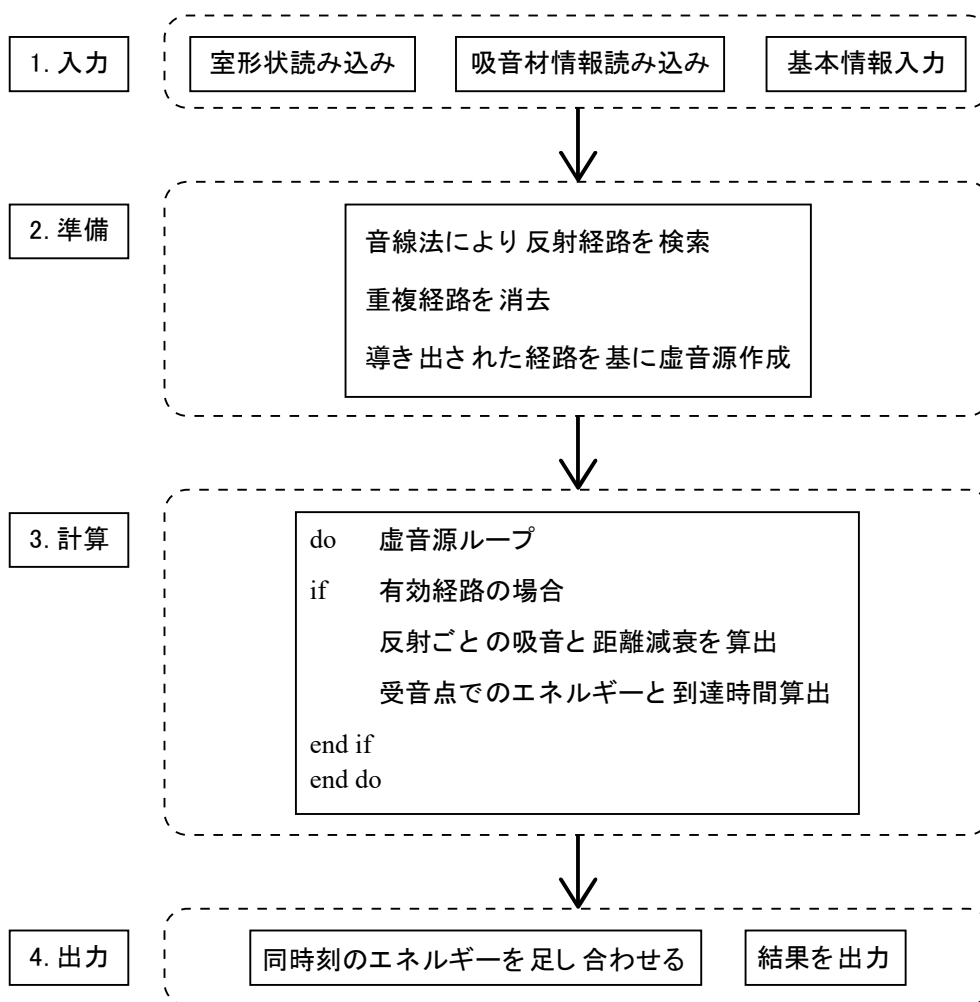


Fig. 2.16 Flow chart of backtracing method

(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. 2.17 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. 2.18 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。

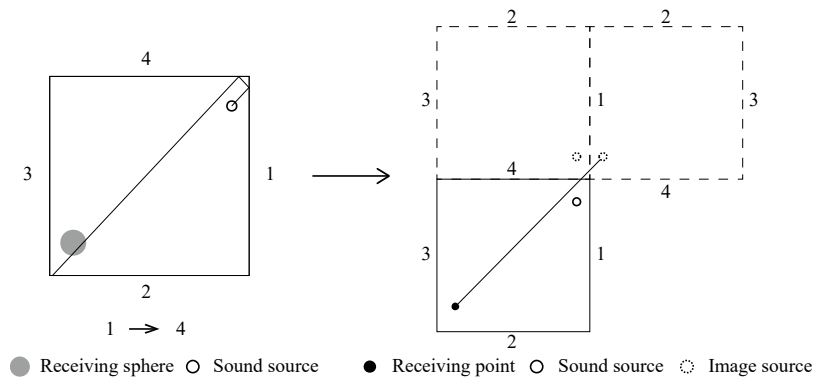


Fig. 2.17 Valid image source

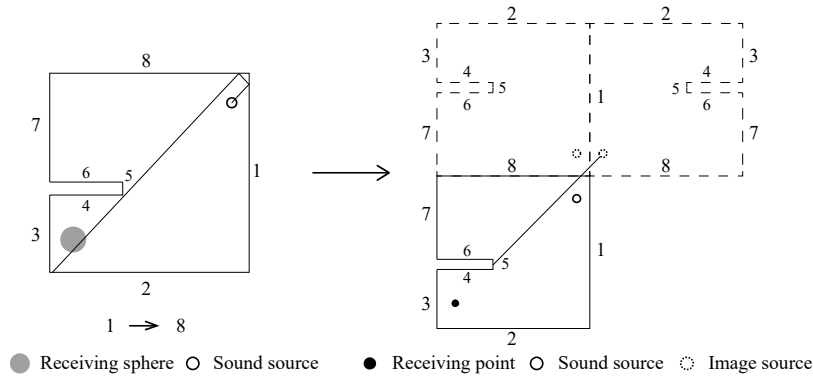


Fig. 2.18 Invalid image source

(3) 精度

Voländer[10]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。

2.3 モノラルハイブリッド

バックトレース法と FDTD 法によって得られる結果をクロスオーバー周波数 f_c を境に結合する。このとき、2つの結果はそれぞれ適切な処理をして結合しなければならない。

まず、FDTD 法では対象空間での結果、自由空間での結果をサンプリング周波数 f_s で再サンプリングする。ここで、受信点を音源位置に設定した自由空間の解析結果で得られた波形の逆特性を持った逆フィルタを作成する。安定な逆フィルタ作成をするために自由空間の逆特性にバンドパスフィルタをかけて f_{\min} から f_c の結果だけを通過させる。 f_{\min} は最終的に必要となるインパルス応答の最小周波数とする。その際、因果関係を考慮しつつ波形を崩さずにバックトレース法の結果と同じ時間遅れを与えることを考えるためフィルタには FIR フィルタを採用する。本論文では Hamming 窓を採用し、窓関数法により FIR フィルタを設計する。フィルタ長は時間領域、周波数領域の両方で妥当と思われる結果が得られる十分な長さを選択し、最終的に得るインパルス応答の時間長とする。逆フィルタが作成できれば、対象空間の結果にそれをかけ、帯域制限されたインパルス応答を算出する。

次に、バックトレース法では虚音源群からの足し合わせを、

$$p = \sum_{n=1}^N \sqrt{E_n} \frac{e^{ikr_n}}{r_n} \quad (2.31)$$

により周波数領域で行う。ここで、 p は音圧、 N は有効な虚音源数、 i は虚数単位、 k は波数、 E_n 、 E_r はそれぞれ n 番目の虚音源の強さ、虚音源と受信点との距離である。ここで、フーリエ逆変換を行うと同時に、 f_c から f_{\max} の帯域を通過させるバンドパスフィルタを作成する。 f_{\max} は、最終的に必要となるインパルス応答の最大周波数とする。ここでは、FDTD 法の処理に採用したフィルタ長、窓関数と同じものを選択する。このフィルタを周波数領域に変換し、バックトレース法で得られた周波数特性と畳み込む。結果として得られた帯域制限された周波数特性をフーリエ逆変換し、帯域制限されたインパルス応答を算出する。

最後に、それぞれの手法で得られたインパルス応答を補正して合成する。再度、受信点が音源位置以外である自由空間でも先ほど述べた FDTD 法と同様の方法で処理し、帯域制限されたインパルス応答算出する。得られたインパルス応答をフーリエ変換し、振幅の周波数特性を算出する。FDTD 法については f_{\min} から f_c 、バックトレース法については f_c から f_{\max} までの周波数について、振幅の算術平均値を求め、それらの比を得る。例えば、もし FDTD 法に対するバックトレース法の比を得たら、その値を FDTD 法から得たインパルス応答に掛け合わせ、バックトレース法のインパルス応答と時間領域で足し合わせることで、ハイブリッド解析のインパルス応答を算出することができる。この結合方法では、同じ時間遅れを持つ線形位相の FIR フィルタを用いるため、位相に関する補正は不要である。Fig. 2.19 にモノラルハイブリッド解析のフローチャートを示す。

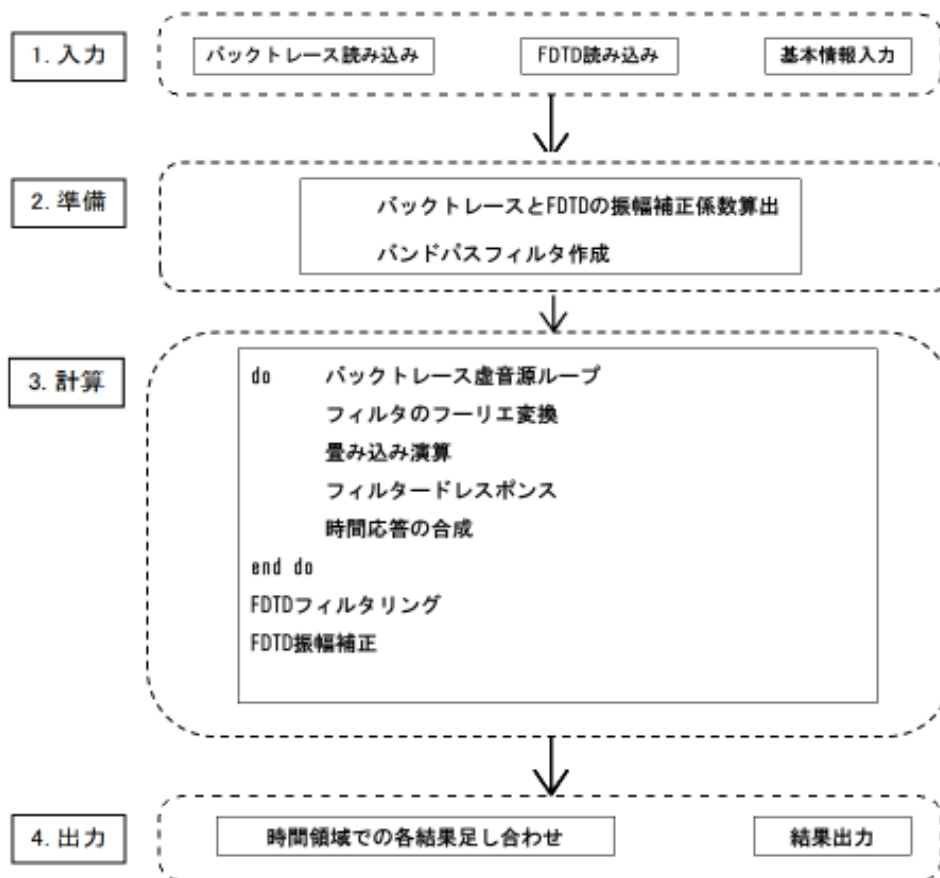


Fig. 2.19 Flow chart of hybrid analysis

2.4 バイノーラル合成への拡張

人間は自らを取り巻く音の大小や遠近を認識することが可能である。バイノーラル再生とは、人間の頭部や、その音響効果を再現するダミー・ヘッドやシミュレータなどを利用して、鼓膜に届く状態で音を記録し、ステレオ・ヘッドホンやステレオ・イヤホン等で聴取することで、実際の音と同様に立体的な音像を知覚することができるものである。

音をデジタル化する際に、モノラル、ステレオ、バイノーラルの3つに大別することができる。モノラルは音響シグナルがひとつのチャンネルのみであり、両耳でイヤホンやヘッドホンで音を聞いていても左右から同じ音が再生され、左右の中央方向から音が流れているように聞こえる。ステレオは音響シグナルが2つ以上のチャンネルであり、左右の耳で聞こえる音が異なる。両耳で音を聞くことにより2つ以上の音が融合して深みのある音を聞くことが可能となる。バイノーラルは右前から左後ろへ移動する音、頭の真後ろ耳元など身体と音の距離感までも提示できるが、イヤホンやヘッドホンを通じて聴く必要がある。通常ステレオ信号やモノラル信号をヘッドホンやイヤホン等で再生すると音像は頭内で定位するが、バイノーラル信号には頭部の音響的な影響が含まれているため、その影響が適切であれば音像は頭外に定位する。

2.4.1 頭部伝達関数

本研究では、頭部伝達関数（HRTF: Head Related Transfer Function）を用いてバイノーラル合成を行う。聴取者の周囲で鳴った音は身体的形状により反射、回折が生じ、また音源位置に相当した時間差、音量差をもって耳に到達する。HRTFはこのような「周囲の音がどのようにして左右の耳に届くのか」を表したものである。HRTFは自由空間における音源と受聴者の鼓膜近傍あるいは外耳導入口に置いた受音点の間の音響伝達関数で、主として受聴者の体と頭部の三次元形状及びそれらの音響インピーダンスによって規定される。人間は音に含まれるHRTF情報を基に音源の位置を感じ取っているため、ヘッドホンやイヤホンであっても、適切なHRTF情報を付加すれば音像を任意の位置に定位させることが可能となる。

一般的にHRTFの測定は、無響室で小型マイクロフォンを両耳に装着して行われる。被験者周囲の様々な位置に音源を設置した際のインパルス応答を測定したものが頭部インパルス応答（HRIR: Head Related Impulse Response）であり、HRIRを周波数領域に変換したものがHRTFである。

位置Sにある音源から耳の受音点Eまでの頭部伝達関数は

$$HRTF_E(S, f) = \frac{H_E(S, f)}{H_o(S, f)} \quad (2.32)$$

と表される。ここで、 $H_o(S, f)$ は頭部が無いときのSから頭部中心Oまでの伝達関数、 $H_E(S, f)$

は頭部が在る時のSから耳の受音点Eまでの伝達関数, f は周波数である。添え字Eは左耳Lあるいは右耳Rを表す。

HRTFには、指紋や瞳孔のように個人差があり頭部、上半身などの身体的形状により異なる。両耳間の距離が異なれば音が到達するまでの時間差が変化し、頭部形状が異なれば反射、回折によって周波数特性が変化する。

本研究で用いるHRTFは東北大学電気通信研究所（Research Institute of Electrical Communication）によって開発されたRIEC HRTF[14]を扱う。RIEC HRTFは方位角を 5° 間隔、仰角を $-30^\circ \sim 90^\circ$ を 10° 間隔で105人の被験者から測定した頭部伝達関数であり、被験者として想定される日本人をベースとしたデータも存在するため日本人男性を被験者とする本研究に最適と考えた。

2.4.2 クロスオーバー周波数

FDTD法で得られる結果は受音点の音圧波形であり、そこに音波の到来方向の情報は含まれない。従って、バックトレース法のようにHRTFを用いて直接的にバイノーラル合成をすることが不可能である。そのため、本研究ではFDTD法の結果はモノラルで提示することとする。

片岡は周波数を変化させた場合の音像定位の精度について検討を行った[15]。62.5 Hz～2 kHzの刺激音について、周波数が低いほど定位精度が減少することを示した。従って、低周波数域であれば、モノラルであっても聴感的に大きな影響はないものと判断した。

上記を踏まえ、本研究ではクロスオーバー周波数を125 Hz帯域の上限周波数である177 Hzとした。

2.4.3 バイノーラルハイブリッド

音の定位性を感じられる高周波数帯に用いたバックトレース法による計算結果から虚音源の情報を得て、その虚音源からの音の到来方向と音の強さを算定する。ただし、RIEC HRTFは方位角5°間隔、仰角10°間隔のデータであるため、到来方向の角度はRIEC HRTFに存在する最も近い数値に丸める必要がある。その方向に対応するRIEC HRTFを読み込み、音の強さに応じて振幅を調整する。この処理を虚音源毎に行い、得られた結果を足し合わせることで、バックトレース法によるバイノーラルインパルス応答が完成する。

一方、FDTD法による音源は前述の通り、モノラルとするため、バックトレース法によるインパルス応答との合成には注意が必要である。バックトレース法とFDTD法の音圧には、それぞれの音源の考え方の違いによって差異が生じるため、得られた結果をそのまま足し合わせることはできず、補正を加える必要がある。本研究で作成した音源に補正を施さなかった場合の音量差をFig. 2.20に示す。クロスオーバー周波数である177 Hz近傍において音圧レベルに大きな差が生じていることが確認できる。この場合、FDTD法の音量が不適切に大きく、低周波数帯の音が卓越して聞こえてしまう。

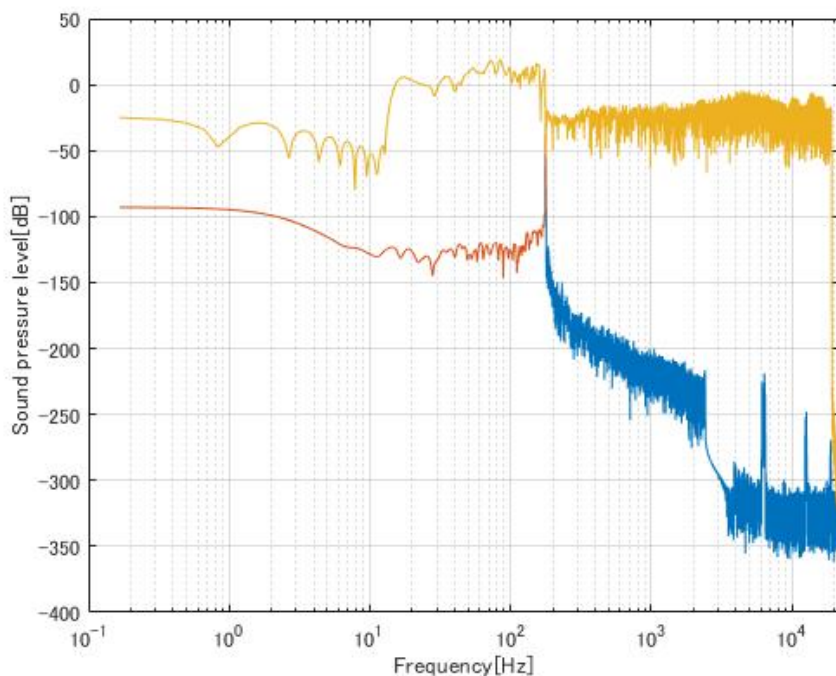


Fig. 2.20 Binaural hybrid without correction

このような音圧レベルの差異を補正する方法として、得られた結果に適切な振幅補正係数を掛けて足し合わせる方法を考える。まず、自由空間を考え、適当に音源と受音点を設定する。この場に対し、FDTD法で解析を行って得られたインパルス応答の結果をフーリエ変換し、周波数毎の複素音圧に変換する。この値を h とすると、音圧レベル L [dB]は

$$L=20 \log_{10}|h| \quad (2.33)$$

と表される。一方で、同じ場に対し、バックトレース法で解析を行って得られた音の強さに応じて正面方向の RIEC HRTF の振幅を調整する。その結果を FDTD 法と同様にフーリエ変換し、周波数領域の音圧レベルを算出する。クロスオーバー周波数として設定した 177 Hz 以下の周波数について、FDTD 法の音圧レベルの平均値、ならびに、バックトレース法の両耳の音圧レベルの平均値を算出し、FDTD 法の平均値からバックトレース法の平均値を引いた差 d [dB] を計算する。補正係数を c とすれば、

$$d = 20 \log_{10} c \quad (2.34)$$

の関係があるため、式(2.34)を変形すれば、

$$c = 10^{\frac{d}{20}} \quad (2.35)$$

で補正係数 c を求めることができる。

上記の計算により算出された補正係数 c を対象空間のバックトレース法のバイノーラルインパルス応答に掛け、対象空間の FDTD 法のインパルス応答と時間領域で足し合わせることで、適切なハイブリッドが可能となる。

2.5 使用機器

作成したバイノーラル音源の再生に使用機器について記述する。

聴取機器

SHURE SRH840



Fig. 2.21 SHURE SRH840

プロのオーディオエンジニアやミュージシャン用に開発された製品であり、クリティカルリスニングやスタジオモニタリングに最適化されている (Fig. 2.21)。緻密に作り上げられた周波数特性により豊かな低域、クリアな中域、伸びのある高域を再現可能。特徴を Table 2.1 に示す。

Table 2.1 Features of SHURE SRH840 [16]

形状	ダイナミック型
ドライバー口径	40mm
周波数帯域	5-25000Hz
感度(@1kHz)	102dB/mW
インピーダンス(@1kHz)	44Ω
Maximum input power	1000mW
質量	365g

3 研究対象

本研究におけるハイブリッド音場解析を用いる目的の一つである、音環境が重要視される建築物の音響特性を聴覚的に確認することを満たすため、比較的小規模なコンサートホールを対象に検討を行った。本論文で提案する手法の再現性を確認するため、大阪府池田市のマグノリアホールを研究対象として選定し、実際に設計に携わった専門家にその評価を依頼する。マグノリアホールの特徴をTable3.1、施設写真、使用した計算モデルをFigs. 3.1, 3.2に示す。

音源は日本人成人男性のスピーチのドライソースを用いた。このドライソースにバイノーラル合成を施すことで、スピーチがマグノリアホールで行われた場合の音環境を再現する。音源位置は演奏が行われるステージ上の一点、受信点とした座席は実音源位置から前方2.7 m、右方向0.8 mを想定し、計算を行った。頭部の方向は2.4.3項で述べた畳み込み処理を行う際にHRTFの方位角、仰角調整を行うことで変更が可能となる。

Table 3.1 Features of Magnolia Hall [17]

名称	逸翁美術館 マグノリアホール
開館	2009年
所在地	大阪府池田市栄本町12-27
施設規格	H5.4×W12.482×D7.94m
座席数	140席(演奏会使用仕様時108席)



Fig.

3.1

Picture of Magnolia Hall

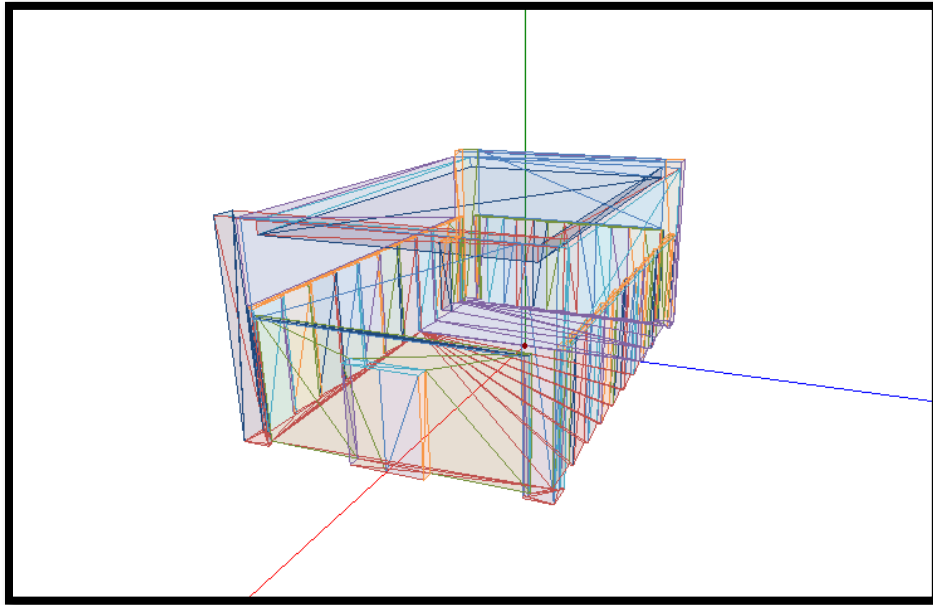


Fig. 3.2 Magnolia Hall calculation model

4 評価方法

ハイブリッド音場解析とバイノーラル合成によって作成した音源をマグノリアホールの音響設計に携わった2名の専門家に評価させた。

- ・バックトレース法のみを用いてバイノーラル合成を行った音源
- ・バックトレース法のみを用いてバイノーラル合成を行っていない音源
- ・ハイブリッド解析を用いてバイノーラル合成を行った音源
- ・ハイブリッド解析を用いてバイノーラル合成を行っていない音源

の4種類を聴取させ、バイノーラル合成による空間的な広がりを感じられるか、ハイブリッド解析による音源がバックトレース法のみの結果と比較し、高い再現性を持っているかについて自由記述させた。

本研究のハイブリッド解析、FDTD法、バックトレース法の各計算条件を Tables 4.1~4.3 に示す。

Table 4.1 Calculation condition of hybrid analysis

音速	340.0 m/s
最大計算時間	3s
サンプリング周波数	44,100 Hz
境界周波数	177 Hz

Table 4.2 Calculation condition of FDTD method

空間離散化幅	0.1 m
解析対象周波数	15.625~177 Hz
音源	ガウシアンパルス

Table 4.3 Calculation condition of backtracing method

音速	340.0 m/s
解析対象周波数	177~22,050 Hz
音線数	10,000,000 本
受音半径	0.5m
最大反射回数	100 回

5 結果

評価に用いた

- ・バックトレース法のみを用いてバイノーラル合成を行った音源 (Fig. 5.1)
- ・バックトレース法のみを用いてバイノーラル合成を行っていない音源 (Fig. 5.2)
- ・ハイブリッド解析を用いてバイノーラル合成を行った音源 (Fig. 5.3)
- ・ハイブリッド解析を用いてバイノーラル合成を行っていない音源 (Fig. 5.4)

の各周波数特性をグラフに示す。

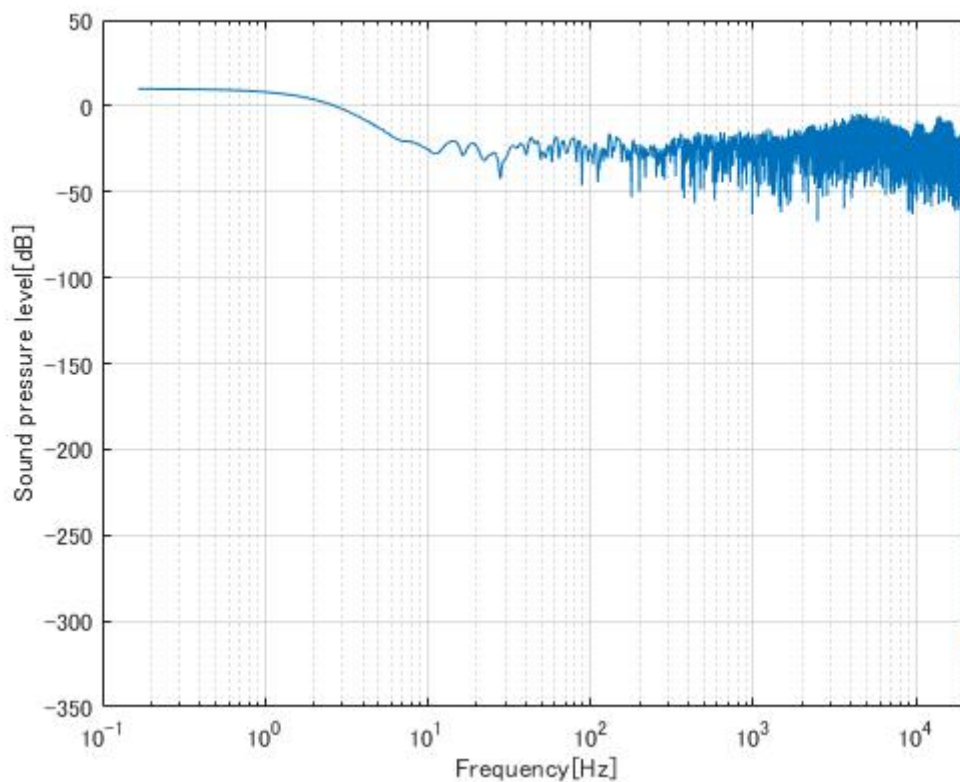


Fig. 5.1 Frequency characteristics of backtracing binaural sound source

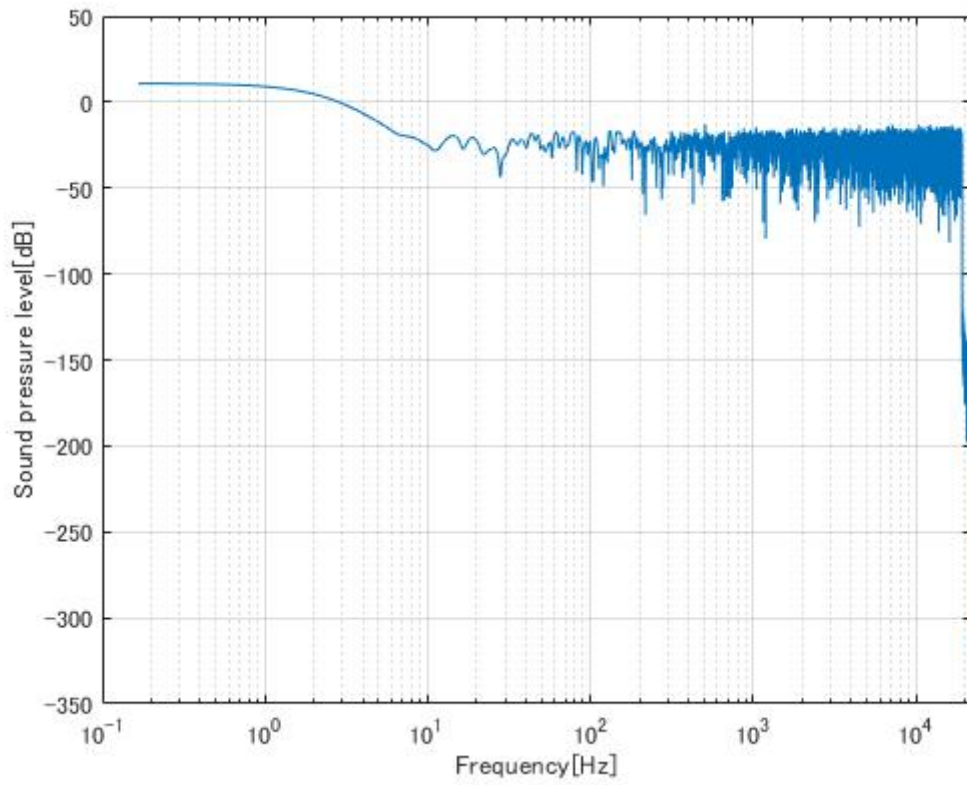


Fig. 5.2 Frequency characteristics of backtracing monaural sound source

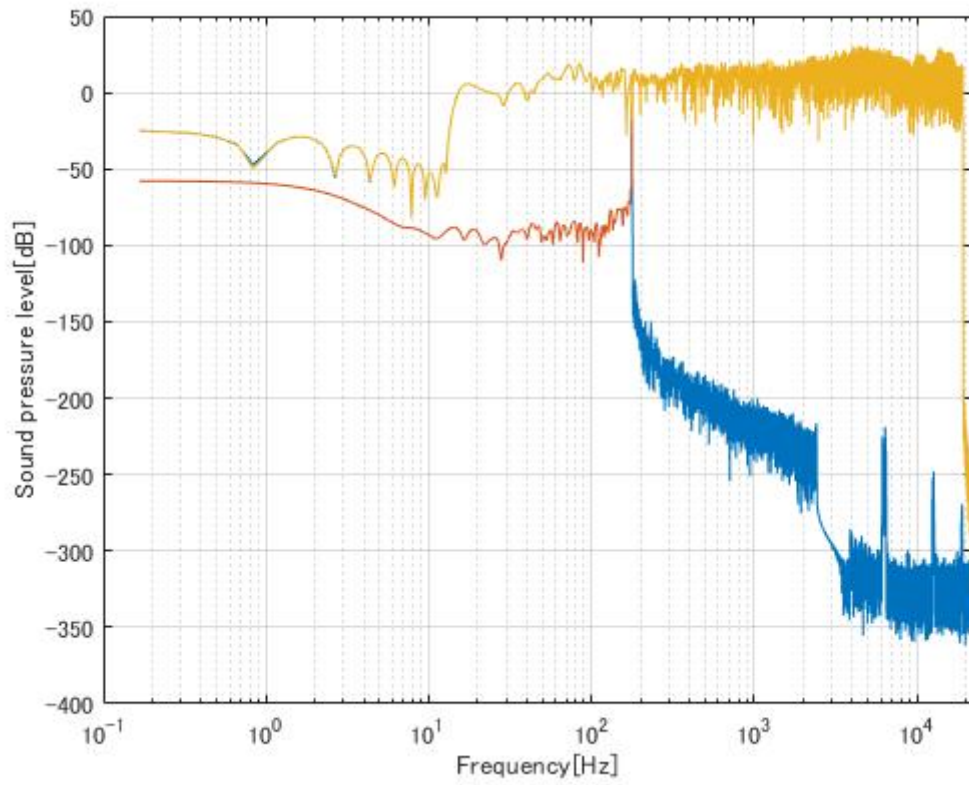


Fig. 5.3 Frequency characteristics of hybrid binaural sound source

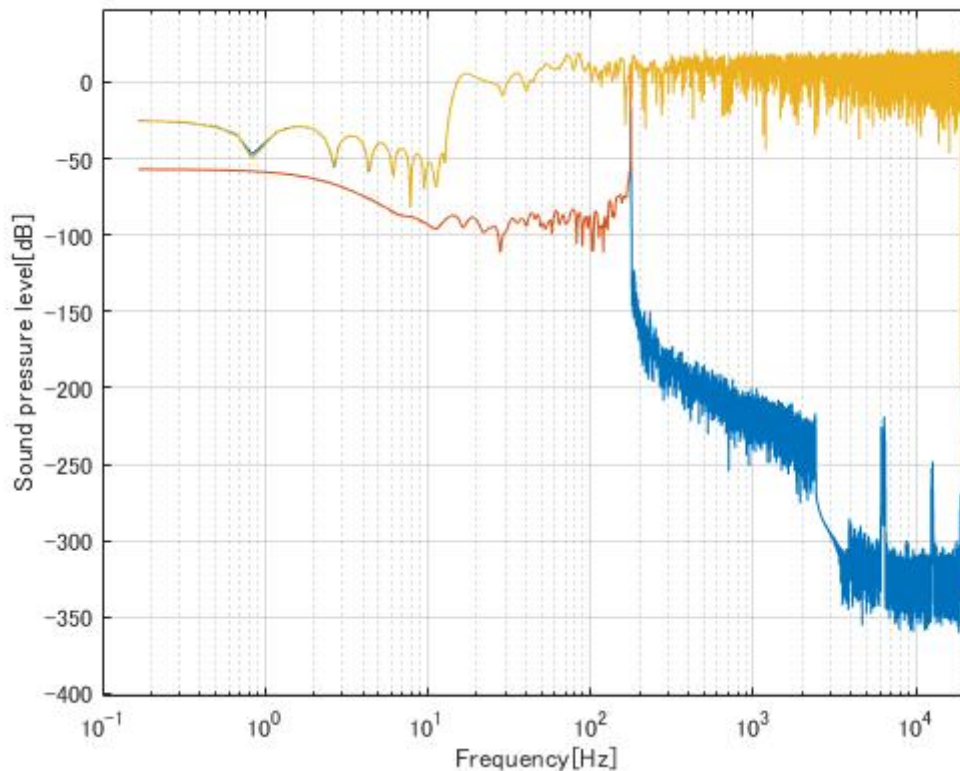


Fig. 5.4 Frequency characteristics of hybrid monaural sound source

ハイブリッド解析のグラフから177 Hz近傍における音圧レベルに大きな差異が生じていないことから、2.4.3項で算出した補正係数 c に誤りがないことが確認できる。また、バックトレース法だけの音源、ハイブリッド解析の音源共にバイノーラル合成を施すことにより4～5 kHz付近の振幅が大きくなっていることが確認できる。これはRIEC HRTFを畳み込んだことで、人間の耳への音の到達しやすさが周波数に依存して変化することを表現している。

聴取者の評価結果を以下に示す。

1 モノラルとバイノーラルについて（ハイブリッドなし）

モノラル音源について：

頭内で定位している。両耳に入ってくる信号がほぼ同時に聞こえているようですが、少しずれている感じがする。フラッターらしき響きは感じる。

バイノーラル音源について：

実際の音源位置で定位しているように聞こえる。バイノーラルの効果で、左右の耳

に入る音の聞こえ方に差があることがわかる。モノラルに比べて方向感がある。言葉の語尾に響きを感じる。空間を認識する反射音や響きはほとんど感じない。フラッターは感じる。

2 バイノーラルについて (ハイブリッドあり・なし)

- ハイブリッドにすると、中・高音域の成分が勝った音声になる。電気音響でローカットした音のようになる。音源位置が遠くなった印象。
- 声にメリハリがなくなり少しぼやけた感じに聞こえる。
- 方向感がわかりにくくなる。方向感を出すには、頭部を伝達する低域が必要と感じた。
- 音声の成分に125Hz以下が少ないので、ハイブリッドの影響を検討するには、音楽など低域が含まれている音源でもきき比べる必要があると思う。

6 結論

バイノーラル合成を施すことによる音像の頭外定位は再現したといえるが、空間を認識する反射音や響きが無かったことから研究目的のひとつである音環境が重要視される建設物の聴覚的事前確認は達成できていないといえる。空間を認識する反射音や響きを感じられない原因としてバックトレース法の精度不足が考えられる。バックトレース法の反射回数、音線数を増やし計算精度を向上させることで問題の解決を計ることが可能だが、膨大な計算を用いて音場解析を行う手段は本研究における計算量を抑えるという目的から逸脱する。

本研究では聴取対象にスピーチを用いたことからFDTD法を使用した177 Hz以下の帯域においての評価材料が少なく、ハイブリッド解析による高音質な音場解析の聴覚的な再現性を計るには十分といえる結果を得ることができなかった。音源試聴結果と同様、低音が多く含まれる音楽を試聴対象に選定し再度評価を行う必要がある。

バイノーラル合成における頭外定位は可能と判断できることから、ハイブリッド解析に基づくバイノーラル合成の実用化に向けての課題は前述の空間を認識させるための手段となる。解析対象の建築物が複雑な形状であるほどバックトレース法で多くの計算量を必要とする。計算量を抑え、高音質な音源の作成というハイブリッド解析の目的から逸脱しない範囲でバックトレース法の計算量をどの程度まで増加させるべきかの検討が今後必要とされる。

参考文献

- [1] E.Granier, et. al.: “Experimental acoustics of car audio installations,” J. Audio Eng. Soc., 44, 835-849, 1996.
- [2] 文屋信太郎, 吉村忍: “開領域伝搬音過渡解析のための幾何音響・波動音響結合解法”, 日本音響学会誌, 58(12), 737-744, 2002.
- [3] 坂吉佑太: “幾何音響理論と波動音響理論を用いた大規模空間のハイブリッド音場解析にかんする研究”, 関西大学卒業論文, 2016.
- [4] 吉田菜摘: “波動音響理論と幾何音響理論を用いたハイブリッド音場解析手法の大規模空間への適用”, 関西大学卒業論文, 2017.
- [5] 藤原優奈: “ハイブリッド音場解析の開発～有限大面の幾何音響理論精度検証～”, 関西大学卒業論文, 20.
- [6] 千葉修, 柏達也, 霜田英麿, 鏡慎, 深井一郎: “リープフロッグアルゴリズムに基づく時間依存差分法による音場解析”, 日本音響学会誌, 49(8), 551-562, 1993.
- [7] 鶴秀生, 岩津玲磨: “差分法によるインパルス応答の効率的計算手法”, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, 1055-1058, 2009.
- [8] J. -P. Berenger: “A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves”, J. Comput. Phys., 114(2), 185-200, 1994.
- [9] W. C. Chew and Q. H. Liu: “Perfectly matched layer for elastodynamics: a new absorbing boundary condition”, J. Comput. Acoust., 4(4), 341-359, 1996.
- [10] M. Voländer: “Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined raytracing/image-source algorithm”, J. Acoust. Soc. Am., 86, 172-178 (1989).
- [11] 鈴木広隆, 平手小太郎, 安岡正人: “軸対称等立体角 26 面体を用いた全方位の離散化-方向別に定義された物理量の可視化のための一提案-”, 図学研究, 36(1), 3-9, 2002.
- [12] 小林愛佳: “幾何音響理論の改善”, 関西大学卒業論文, 2020.
- [13] J. Borish: “Extension of the image model to arbitrary polyhedral”, J. Acoust. Soc. Am., 75(6), 1827-1836, 1984.
- [14] <https://www.riec.tohoku.ac.jp/pub/hrtf/index.html> 2022/1/30
- [15] 片岡祐貴: “周波数による定位精度の変化に関する研究”, 関西大学卒業論文, 2023.
- [16] <https://www.shure.com/ja-JP/products/headphones/srh840d> 2022/1/30
- [17] <https://www.hankyu-bunka.or.jp/magnolia-hall/rental/> 2022/1/30

謝辞

本論文の作成にあたり、音響デザイン研究所の荒木邦彦先生、安井千絵先生から豊富な知識と経験の下、多くの適切な助言を賜りご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。