散乱波を考慮した室内音場のインパルス応答予測計算法

NUMERICAL SIMULATION OF AN IMPULSE RESPONSE FOR ROOM ACOUSTIC DESIGN

坪井 政義*

Masayoshi TSUBOI

The purpose of this paper is to study and to propose an efficient method for calculating a long-time impulse response ranging over audio frequencies in a room. This method, based on the numerical integration of Kirchhoff's integral equation, carries out integration with technique both for tracing the potentials of the identical phase elements like the Fresnel zone of a propagating wave-front and for dividing into a spherical wave part and a dispersal wave part.

The effectiveness of this method is confirmed by comparison between calculated value and measured.

Keyword : Phase Element Integration Method, Kirchhoff's boundary condition, Fresnel zone

波面積分法、キルヒホッフの境界条件、フレネル輪帯

1. はじめに

最近のコンピュータのハード・ソフト両面での急速な発展により、ヴァーチャル・リアリティ (VR) 技術の応用分野の一つとして、計画段階において実際に設計した空間の音場を体験して評価できるように、コンピュータシミュレーションによる予測計算と予測音場の可視化や可聴化手法の研究が進められている。基本計画段階で室内形状や内装材等の音響特性が異なった様々な音響設計案に対して、入力データを変えるだけで迅速に音場を予測して比較検討ができるコンピュータシミュレーションが、有効な設計支援手法の一つになりつつある。

室内音響設計支援を目的として、筆者らも音場の予測計算法及び音場評価支援用に音場の視覚化技術の研究を進め、これらを統合した室内音響シミュレーションシステム¹⁾を開発してきた。

ここで、根幹となる音場の予測精度についてみると、一般に広く使われている幾何音響をベースにした虚像法や音線法では、回折等の音の波動性が無視されていることにより、波動性の影響が無視できない低音域では、特に誤差が大きくなってしまふ。これらの計算法は室内の基本形状における音響障害の有無のチェックや音響反射板の設置角度等の基礎的項目で、中高音域に限定した検討では利用できるものの、低音域を含む可聴帯域全体が対象となる音場評価には適さない。

コンピュータシミュレーションの迅速性等の利点を生かして、ニーズ

に合わせた室空間の音響設計に効果的に用いるためには、様々な設計空間の音場を比較検討できる予測精度の高い音場計算法が望まれている。

現在までに、波動方程式と等価なキルヒホッフの積分方程式をもとにして可能な限り正確に音場を計算する手法として、以下のものが発表されている。

音場の境界の速度ポテンシャル及び法線微分を未知関数として、寺井・河井²⁾によって積分方程式が定式化され厳密な解法が得られている。現在は、それらの境界面上の未知関数は数値的に解かなければならない。実際のオーディトリウムの音場計算をするためには、例えば可聴帯域の上限とされる周波数 20kHzまでを計算対象とすると、サンプリング定理より、20kHzの半波長(=8.5mm)以下のサイズで要素分割しなければならず、膨大な要素数になってしまう。したがって、現在のコンピュータの演算処理能力では、計算できる要素数が限られてしまい、実際のオーディトリウムの音場計算に適用して中高音域までにわたる可聴帯域全体を計算することは難しい。

オーディトリウムの音場予測のために、桜井³⁾はキルヒホッフの境界条件から導いた線積分公式を用いて、剛平板からの反射音の重ね合わせとしてレスポンスを扱い、高い周波数までの初期反射音の計算が可能なことを示している。しかしながら、高次の反射計算になるにしたがって急速に増える虚音源に比例して演算時間が増加するために、実際のオー

* 大林組技術研究所音響研究室 副主任研究員・工修

Deputy Chief Research Engineer, Acoustics Engineering Department, Technical Research Institute of Obayashi Corporation, M. Eng.

ディリクレの音場計算では反射次数の増加と共に計算が困難となる。

音響設計支援への実用化手法として、関口、他⁴⁾は音線追跡の手法をベースにした有限音線積分法を用いて、初期インパルス応答の計算を行なっている。しかし、常に球面波を仮定し波面を微小要素に分割して幾何学的音線により音の多次反射伝搬を追跡しているために、反射面の寸法より波長が大きいために回折伝搬の寄与が大きくなる低中音域や、球面波の仮定が成立しにくくなる反射次数が多い反射音では、原理的に誤差が大きくなってしまふ。また、残響成分までを含む長時間にわたるインパルス応答(以後、長時間インパルス応答と称する)の計算を行おうとすると、発音からの経過時間に伴い離れていく音線間隔を、計算対象の上限周波数の半波長以下に保つように、追跡音線本数を追跡時間の二乗に比例して増加させなくてはならず、演算時間が激増してしまふ。

残響成分は、ホールの中央とバルコニー下や後壁などの吸音壁近傍とでは明らかに差が出るが、これらの計算手法では、音場の視覚化や可聴化による音場評価に用いるための基盤データとなる可聴帯域の全周波数情報を含み、かつ残響部分までの長時間のインパルス応答を予測計算するには、膨大な要素数と演算時間が必要であり、実用上困難である。

そこで、これらの研究を踏まえつつ、音響設計の支援を目的とした可視化や可聴化による音場評価に用いるための基盤データとなる長時間インパルス応答の実用的な予測計算手法を検討することにした。

まず初めに、ある受音点に到達した長時間インパルス応答波形を成分別に見ると、比較的音圧振幅が大きく幾何学的に位相追跡が容易に可能な直接音、一次回折等の低次回折音、鏡面反射音のグループ(以後は幾何学波成分と称する)と、これ以外の位相追跡が比較的複雑で困難となる多次的回折音や散乱音などから成るグループ(以後は散乱波成分と称する)とに、大きく分けることができる。

インパルス応答 ⇒ 幾何学波成分 + 散乱波成分

次に、長時間インパルス応答波形を時間で区切って、直接音や初期反射音成分からなる初期応答と、それ以降の残響に相当する中後期応答との二つに分けてみる。発音から一次反射までは球面波からの幾何学波成分だけであったのが、反射を重ねるにしたがって徐々に境界波等の発生により散乱波成分が多くなることから、初期応答では幾何学波成分が多く、中後期応答では散乱波成分が多く占め、後期応答の残響部分ではほとんどが散乱波成分になってしまう。これらに着目し、幾何学波成分を精度良く計算できる計算モデルと、散乱波成分を効率的に精度良く計算できる計算モデルとを開発し、これら二つを合成することで、飛躍的な演算時間の増加なしに長時間インパルス応答の計算を可能とした。

幾何学波成分での m 次の多次反射音の計算は、 m 次反射面への入射音の特性が解れば、この面への一次反射音と同様に計算できる。この入射音の特性は、 $m-1$ 次反射して伝搬する際の境界波で決定され、この境界波がフレネル輪帯要素の伝搬欠損により生じることに着目して、入射音特性を輪帯要素を伝搬追跡して求めている。3次元空間にて球面波面の第 j フレネル輪帯エリアを $m-1$ 次反射まで伝搬追跡すると、その軌跡は $m-1$ 次虚音源と受音点を通る線分を含む断面では楕円形状となり、この線分と垂直な断面では正円形状となる円筒型楕円曲面を描く。この輪帯要素は、音源や受音点の近くでは小さくて細かく、遠く離れると大きくなるため、この要素で境界面を離散化することで、入力データとして事前に細かく要素分割するものに比べて、応答への寄与の大きさを反映した計算効率のよいものとなる。また、従来から音響設計支援に利用してきた幾何学手法での音響計算用の入力データ構造を踏襲できる。以下に、これらの計算モデルと、実測値との比較を通して有効性を示す。

2. 計算モデルについて

2.1. 閉空間の音場を示す基礎式

図1 閉空間の音場

図1に示すならかな閉曲面 B に囲まれた閉空間の内部において、無指向性点音源 P_s で角速度 ω で駆動する定常音源がある場合に、受音点 P での速度ポテンシャル Φ は、Helmholtz-Kirchhoffの積分方程式により、次の式で表現される。ただし、時間因子を表す $e^{-i\omega t}$ は省略している。

$$\Phi(P, \omega) = \Phi_0(P, \omega) + 1/(4\pi) \cdot \int_B \{ \Phi(q, \omega) \partial(e^{-ikr}/r) / \partial n_q - \partial \Phi(q, \omega) / \partial n_q \cdot e^{-ikr}/r \} dS_q \quad \dots\dots(1)$$

ただし、 Φ_0 : 音源からの直接音

n_q : B 上の点 q での内向き法線

r : 受音点 P から面上 q までの距離

k : $(= \omega/c)$ は波数、 c : 音速

i : $i^2 = -1$ (虚数符号)

過渡音場に対しては、(1)式を逆フーリエ変換することにより、Kirchhoffの積分方程式として、次式が得られる。

$$\begin{aligned} \phi(P, t) = & \phi_0(P, t) \\ & + 1/(4\pi) \cdot \int_B \{ \phi(q, t-r/c) \cdot \partial(1/r) / \partial n_q - \partial \phi(q, t-r/c) / \partial n_q \cdot 1/r \\ & - \partial \phi(q, t-r/c) / \partial t \cdot 1/(cr) \cdot \partial r / \partial n_q \} dS_q \quad \dots\dots(2) \end{aligned}$$

ϕ_0 : 音源からの直接音

(ϕ_0 の逆フーリエ変換)

(1)式の境界面上の $\Phi(q, \omega)$ 及び $\Phi(q, \omega)/n_q$ 、または(2)式の $\phi(q, t-r/c)$ 、 $\partial \phi(q, t-r/c) / \partial n_q$ 及び $\partial \phi(q, t-r/c) / \partial t$ の未知関数が求められれば計算できる。(1)式の直接音 Φ_0 及び ϕ_0 は、点音源： $\Phi(s, \omega) = U(s)$ 、 $\phi(s, t) = u(s)$ とすると、球面波放射となり、それぞれ次の式で表される。

$$\Phi_D(P, \omega) = U(s) \cdot e^{-i\omega(R/c)} / (4\pi R), \quad \phi_D(P, t) = u(s) / (4\pi R) \quad \dots\dots(3)$$

ただし、 R は P_s ・ P 間の距離を表す。

ここで、境界面上のポテンシャルから受音点 P への寄与は、境界面に音源からの音波が入射して反射する毎に生じるので、これらの応答が有限長と仮定して(1)式を適用すると、過渡応答を捉えることができる⁵⁾。

まず、境界面上の点 q への直接音 $\phi_D(q, \omega)$ が空間内に再放射されることにより、周囲の境界からの最初の寄与 Φ_1 が生じる。(1)式より、受音点 P への1次反射音 Φ_1 は、

$$\begin{aligned} \Phi_1(P, \omega) = & 1/(4\pi) \cdot \int_B \{ \Phi_D(q, \omega) \cdot \partial(e^{-ikr}/r) / \partial n_q \\ & - \partial \Phi_D(q, \omega) / \partial n_q \cdot e^{-ikr}/r \} dS_q \quad \dots\dots(4) \end{aligned}$$

次に得られた1次反射成分から同様に2次反射成分が計算される。
受音点Pへの2次反射音 Φ_2 は、

$$\Phi_2(p, \omega) = 1/(4\pi) \cdot \int_B \{ \Phi_1(q, \omega) \cdot \partial(e^{-ikr}/r) / \partial n_q - \partial \Phi_1(q, \omega) / \partial n_q \cdot e^{-ikr}/r \} dS_q \quad \dots(5)$$

したがってこの関係を一般化すると、m次反射成分は(m-1)次反射成分から同様に計算されることから、受音点Pへのm次反射音 Φ_m は、

$$\Phi_m(p, \omega) = 1/(4\pi) \cdot \int_B \{ \Phi_{m-1}(q, \omega) \cdot \partial(e^{-ikr}/r) / \partial n_q - \partial \Phi_{m-1}(q, \omega) / \partial n_q \cdot e^{-ikr}/r \} dS_q \quad \dots(6)$$

過渡音場に対しては、(6)式を逆フーリエ変換することにより、受音点Pへのm次反射音 ϕ_m は、

$$\phi_m(p, t) = 1/(4\pi) \cdot \int_B \{ \phi_{m-1}(q, t-r/c) \cdot \partial(1/r) / \partial n_q - \partial \phi_{m-1}(q, t-r/c) / \partial n_q \cdot 1/r - \partial \phi_{m-1}(q, t-r/c) / \partial t \cdot 1/(cr) \cdot \partial r / \partial n_q \} dS_q \quad \dots(7)$$

ただし、 ϕ_{m-1} : (m-1)次反射音

最終的に、受音点Pのポテンシャル ϕ は直接音と全ての反射成分の和として次式で表せる。

$$\Phi(P, \omega) = \Phi_D(P, \omega) + \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m(P, \omega) \quad \dots(8)$$

過渡音場に対しては、

$$\phi(P, t) = \phi_D(P, t) + \sum_{m=1}^{\infty} \phi_m(P, t) \quad \dots(9)$$

このように受音点での応答は、室内を構成する面要素からの音場への寄与を音波が境界面に伝搬する毎に逐次求めて、それらを重ね合わせるにより、計算できることが分かった。ただし、実際の数値計算では、音波の反射次数毎に、境界面上の離散化要素全てに対して、離散化要素全てからの寄与を積分しなければならず、このままでは50回以上の反射経路の計算となる長時間インパルス応答計算への適用は困難である。

そこで、計算精度を低下させずに計算の効率化を図る必要がある。

2.2. 境界面上の要素Aからの反射応答基礎式

図2に示す閉空間Bの境界面上の要素Aからの反射応答を考える。

(4)式での閉空間内の音源から面上q点への直接音 Φ_0 は、

$$\Phi_D(q, \omega) = U(s) \cdot e^{-i\omega(r_0/c)} / (2\pi r_0) \quad \dots(10)$$

∵ q点は面上にあり半空間受音：Q=2 → 2/(4πr₀)

境界面上の要素Aからの一次反射波を、相補的な開口Aを通過する虚音源Ps'からの回折波として、Kirchhoffの境界条件を適用すると、

$$\begin{aligned} \partial r / \partial n_q &= \cos \theta, \\ \partial(e^{-ikr}/r) / \partial n_q &= (-ik - 1/r) \cos \theta \cdot (e^{-ikr}/r) \\ \partial(1/r) / \partial n_q &= (-\cos \theta / r^2) \end{aligned}$$

となるので、これらを(4)式へ代入すると、Fresnel-Kirchhoffの回折公式が得られる。これが、面要素Aからの一次反射波による受音Pへの寄与となる。

$$\begin{aligned} \Phi_1(p, \omega) &= 1/(4\pi) \cdot \int_A \{ U(s) \cdot e^{-i\omega(r_0/c)} / (2\pi r_0) \cdot (-ik - 1/r) \cos \theta \cdot (e^{-ikr}/r) \\ &\quad - \partial(U(s) \cdot e^{-ikr_0} / (2\pi r_0)) / \partial n_q \cdot e^{-ikr}/r \} dS_q \\ &= 1/(4\pi) \cdot \int_A \{ \Phi_D(q, \omega) \cdot (-ik - 1/r) \cos \theta - (-ik - 1/r_0) \cos \theta_0 \} dS_q \quad \dots(11) \end{aligned}$$

図2 境界面上要素Aからの反射音場

図3 球面波からの応答

$$\Phi_1(p, \omega) = 1/(4\pi \cdot c) \cdot \int_A \{ [U \cdot \Phi_D(q, \omega) \cdot (e^{-ikr}/r) \cdot \{(-1 - 1/(ikr)) \cos \theta - (-1 - 1/(ikr_0)) \cos \theta_0\}] \} dS_q \quad \dots(12)$$

$$\Phi_1(p, \omega) = 1/(2\pi \cdot c) \cdot \int_A \{ [U \cdot \Phi_D(q, \omega) \cdot (e^{-ikr}/r) \cdot H_q(\theta, \omega)] \} dS_q \quad \dots(13)$$

ただし、傾斜因子： $H_q(\theta, \omega) = 1/2 \cdot \{ (-1 - 1/(ikr)) \cos \theta - (-1 - 1/(ikr_0)) \cos \theta_0 \}$

有限音線積分法⁴⁾では実務使用での演算の効率化を図るために、 $1/(ikr) = -i\lambda/(2\pi r)$ より、 $r \gg \lambda$, $r_0 \gg \lambda$ を仮定して、(13)式の傾斜因子 $H_q(\theta, \omega)$ の虚数項を無視した基礎式としているが、音響設計を要するホールでは、境界面要素から音源や受音点Pまでの距離が波長に比べて十二分に大きくない場合が多く、虚数項が無視できないので本計算では虚数項も考慮している。(13)式を逆フーリエ変換すると、 $\phi(P, t) = 1/(2\pi \cdot cr) \cdot \int_A \{ \partial \phi(q, t-r/c) / \partial t \} \cdot h_q(\theta, t) \} dS_q$ ただし、 $h_q(\theta, t)$ は傾斜因子 $H_q(\theta, \omega)$ を逆フーリエ変換したものを畳み込み演算することを示す。

これより、面要素Aからの寄与は境界面上q点での速度ポテンシャル ϕ の微分 $\partial \phi / \partial t$ を積分合成することで得られることが分かる。

2.3. 境界面要素Aを輪帯要素で離散化

ここで、効率的にサンプリグ周期 dt_0 毎のインパルス応答波形の値を求めるために、境界面要素Aを $dr (=c/dt_0)$ 毎のサンプリグ周波数の1/2の周波数に対応するフレネル輪帯要素に、更に離散化する。図3に示すように球面波上のある一つのフレネル輪帯iの面積を dS_i とすると、

図4 遮蔽面がある回折音場

$$\begin{aligned} r^2 &= r_0^2 + R^2 - 2r_0 R \cdot \cos \phi & [\text{三角形の関係}] \\ r dr &= r_0 R \cdot \sin \phi \cdot d\phi \\ \sin \phi \cdot d\phi &= r dr / (r_0 R) \\ dS_i &= 2\pi (r_0 \sin \phi) \cdot r_0 \cdot d\phi & [\text{円周長} \times \text{帯幅}] \\ &= 2\pi r_0 / R \cdot r dr \end{aligned}$$

球面波が前述の境界面要素Aへ入射する場合、フレネル輪帯iと交差する部分の境界面要素A上での面積dSは、輪帯iが境界面要素Aへ入射し交差する面積比率を $g(i)$ 、入射角 θ_0 とすると、

$$dS = dS_i \cdot g(i) / \cos \theta_0 = 2\pi r_0 / R \cdot r dr / \cos \theta_0 \cdot g(i)$$

フレネル輪帯i要素が境界面要素Aへ入射した場合の応答は(11)式に、これを代入し整理すると、

$$\begin{aligned} d\Phi_{ds_i}(\omega) &= 1/(2\pi R c) \cdot \{i\omega \cdot U(s) \cdot e^{-i\omega R/c} \cdot e^{-i\omega dr/c}\} dr \\ &\quad \cdot \{[-1-1/(ikr)] \cos \theta - [-1-1/(ikr_0)] \cos \theta_0\} / (2 \cos \theta_0) \cdot g(i) \end{aligned} \quad \dots (14)$$

$$\begin{aligned} \text{傾斜因子 } H'(\theta, \omega) &= 1/2 \cdot \{(-1-1/(ikr)) \cos \theta \\ &\quad - (-1-1/(ikr_0)) \cos \theta_0\} / \cos \theta_0 \text{ とすると、} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d\Phi_{ds_i}(\omega) &= 1/(2\pi) \cdot i\omega \cdot U(s) \cdot e^{-i\omega R/c} \cdot e^{-i\omega dr/c} / R \cdot H'(\theta, \omega) \cdot dr / c \cdot g(i) \\ &\quad \dots (15) \end{aligned}$$

ただし、 $dR = r_0 + r - R$

P点到達の $t' = t - R/c$ を時間の基準として逆フーリエ変換すると、

$$d\Phi_{ds_i}(\omega) = 2 \cdot \partial \phi(P, t' - dR/c) / \partial t \cdot dr / c \cdot h'(\theta, t) \cdot g(i) \quad \dots (16)$$

ここで dr/c は、サブリック周波数の周期に相当し、 $dR = (n-1) \cdot dr$ があるので、面要素Aへ入射した全てのフレネル輪帯要素からの応答は、 $dt_0 = dr/c$ として、
[n: フレネル波番号、dRはdrの整数倍]

$$d\Phi_{dsA}(t) = 2 \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \phi((P, t' - i \cdot dt_0) / \partial t \cdot dt_0 \cdot g(i) \cdot h'(\theta, t) \quad \dots (17)$$

境界面要素Aからの寄与は、サブリック周波数に対応する各フレネル輪帯要素から傾斜因子を考慮した微分波を合成することで得られる。

ここでインパルス応答を求めるために計算上で発生させる音源を、次式で示す $2 \cdot dt_0$ 幅の三角波とすると、

$$\begin{aligned} 2 \cdot dt_0 \text{ 幅の三角波: } \phi(s, t) &= 1 - |t/dt_0| & t < |dt_0| \\ \phi(s, t) &= 0 & t \geq |dt_0| \end{aligned} \quad \dots (18)$$

$$\begin{aligned} \text{三角波の微分波: } \partial \phi(s, t) / \partial t &= \lim_{dt \rightarrow 0} \{\phi(s, t) - \phi(s, t - dt)\} / dt \text{ なので、} \\ \partial \phi(s, t - dt_0) / \partial t &= 1.0 / dt_0, & \partial \phi(s, t) / \partial t &= -1.0 / dt_0 \quad [0 < t \leq dt_0], \\ \partial \phi(s, t) / \partial t &= 0.0 & [\text{Else}] \dots (19) \end{aligned}$$

三角波音源でのq点への入射応答波形例

図5 境界面へ入射する球面波面を構成する2次波面伝搬追跡

サブリック周波数の周期 dt_0 毎の微分波は(19)式より、隣り合ったフレネル輪帯要素の微分波どおしの位相が相殺されるのが分かる。これと(3)式を(17)式に代入し整理すると、

$$\begin{aligned} d\Phi_{dsA}(t) &= 1/(2\pi) \cdot [g(1)/(R) \cdot h'(\theta, t)] & [t = t' \text{ の場合}] \\ d\Phi_{dsA}(t) &= 1/(2\pi) \cdot \{g(i) - g(i-1)\} / (R) \cdot h'(\theta, t) \\ &\quad [\text{ただし、} i = (t - t') / dt_0, \quad t > t' \text{ の場合}] \\ d\Phi_{dsA}(t) &= 0.0 & [t < t' \text{ の場合}] \end{aligned} \quad \dots (20)$$

隣接した輪帯要素が境界面要素へ入射し交差する面積比率(= $g(i)$: 降形状関数と称する)の差に比例して発生する単純な式で表せる。

2.4. 長時間インパルス応答計算法

一般的に音圧振幅 $\phi(t)$ と速度ポテンシャル $\psi(t)$ との関係は、 $\phi(t)$ のフーリエ変換対を $\Psi(\omega)$ 、空気の密度(kg/m^3)を ρ_0 とすると、

$$\phi(t) = \rho_0 \cdot \partial \psi(t) / \partial t \text{ より、} \Psi(\omega) = i\omega \cdot \rho_0 \cdot \Phi(\omega)$$

これより、 $\Phi(\omega) = \Psi(\omega) / (i\omega \rho_0)$

これを(1)式に代入すると、速度ポテンシャル ψ を音圧 ψ と置き換えても同様な関係式が成立することが分かる。

1). 直接音応答計算

(3)式より、(18)式の三角波音源を音源と受音点との距離で除算することで応答計算する。

2). 一次反射応答計算

一次反射面を境界面としてフレネル輪帯要素で離散化して、(20)式を用いて計算する。この際の境界面への入射音特性は、境界面上の輪帯要素を更に分割して、これらの分割輪帯要素の入射波を構成する二次波面のフレネル輪帯要素を伝搬追跡することで求めている。入射音特性を境界面上の分割輪帯要素からの応答に畳込み演算することで、障壁面に入射波の一部を遮られる場合の一次反射音の応答が計算できる。

3). 一次回折音応答計算(図4参照)

伝搬を遮蔽する面Aの方向ベクトルが音源側に向いていることにより、(20)式での面Aからの反射音の傾斜因子が負となることから、1)の直接音応答計算の寄与から、面Aにより反射され遮蔽された寄与分が減算され、結果として回折による寄与分だけが残り計算される。

図6 1 m正方形板の3次・4次反射音の周波数特性での実測値と計算値との比較例

図7 1 m正方形板の3次反射音の周波数特性での計算値

4) 2次以上の多次反射音応答計算

(6), (7) 式に示したように m 次反射音は境界面への $m-1$ 次反射音の積分で計算できる。しかし、これでは原理的に多次反射の次数が一つ増える毎に境界面要素数倍の演算を必要とするために、反射次数の増大に伴って次第に困難となり長時間のインパルス応答計算には適さない。

そこで、境界面へ $m-1$ 次反射する音の効率的な計算法を考えてみることにする。境界面に、図5に示すような球面波の要素Aが入射する場合を考えてみる。要素Aの中心点 q での入射応答を観測した場合に、要素を構成する2次球面波が伝搬経路上で遮られていると、境界波が

発生して入射音の周波数特性が変わる。そこで有限寸法である要素A自身で発生する境界波は除き、 q 点に音源からの直接波到達に続いて最初に ΔT 時間遅れて境界波が到達した場合を考えてみる。

これは、サブリグ周波数 f_0 Hz、周期 dt_0 、 $j = \Delta T_j / dt_0$ とすると、要素の q 点を中心とした円の半径 $dx (= c \times dt_0)$ を半波長とする周波数 $[= f_0 / 2 \text{ (Hz)}]$ に対応する球面波面の第1から第 $(j-1)$ フレネル輪帯エリアの二次球面波面が、音源から境界面要素までの伝搬経路全てに渡り遮蔽されずに完全に伝搬され、かつ球面波面の第 j フレネル輪帯エリアの一部または全部が伝搬途上で遮られた場合である。

これより、二次球面波面のこのフレネル輪帯エリアを $m-1$ 次反射伝搬追跡して伝搬した形状関数 $g(i)$ を求めれば、(20) 式より球面波面の m 次反射境界面への入射波が把握できることが分かる。

この入射波を、(20) 式を適用した m 次反射境界面からの三角波応答に畳み込む(周波数領域では乗算) ことにより、 m 次反射波が計算できる。

図6に1 m正方形アクリル板(10mm厚補強有り)を用いた3次・4次反射実験で得られた反射音応答の周波数特性実測値と計算値との比較例を示す。実測値は無響室内に反射板を設置し、12cm7WJZ[®] スピーカからM系列音源を発生させて、インパルス応答を測定したものに、音源スピーカの軸方向における周波数特性の逆特性を畳込み、その応答波形の中から対

象となる反射音応答だけを到達時刻で切り取ったものである。なお、スピーカ出力特性での-20dBまで許容した周波数範囲は200Hzから12kHzである。

計算値は、 m 次反射面全体を一次要素Aとして捉え、 m 次反射面へ入射する音を面の中央一点 q での入射音特性を輪帯要素の伝搬追跡により計算し、この入射音特性が m 次反射面全体に入射するとして、この面で反射するインパルス応答を合成したものである。 m 次反射面全体を一次離散化要素として、同じ特性の入射音が入射するとして近似したが、この条件でも4kHz以下の周波数帯域では、ピーク周波数のレベルより20dB低下したレベルの周波数まで、よく対応しており、この計算モデルの有効性が分かる。

このように、 m 次反射境界面への入射波に大きく寄与するのは、 $m-1$ 次幾何反射伝搬してくる音であるので、この入射波を効率的に捉えるために、音源から球面波を等分割して、この分割波面要素を音線に代表させて追跡する。境界面に分割波面要素が入射する毎に交差したエリアを境界面要素として、受音点に対する応答を計算する。これにより(20)式での入射波計算時の傾斜因子は1.0となり、更に単純な式となる。

この手法の有効性をみるために、50,000要素に等分割した分割波面要素を放射させて、図6にて実測値と計算値とで高音域でのディップ周波数のずれがあった3次反射応答を対象に計算した結果を図7に示す。3次反射面には17個の分割球面要素が入射するため、反射面が17個の一次要素に分割される。それぞれの一次要素毎の入射音特性が、これらの一次要素を構成する二次波面でのフレネル輪帯要素の伝搬追跡によって、求められている。図6における反射面を1つの要素として、入射音特性を同一とした場合に比べて、反射面を分割してそれぞれの入射音特性を考慮することで、高音域での特性が実測値に、より対応するようになっている。このように、球面波を等分割した分割波面要素の数が多ければ、境界面が細かな一次要素に分割されるために、より高音域まで精度よく計算できるが、この分割要素数と演算時間はほぼ比例しているので、精度を確保したい上限周波数とその演算時間を天秤にかけ、実用的な分割数を計算対象の物件毎に決める必要がある。

ここでは、 m 次反射境界面の入射波は音線経路上の面に対して輪帯要素の伝搬追跡により、形状関数 $g(i)$ を求め計算したが、三角波音源の球面波として入射しなかった成分は、全て次の散乱波成分とした。

5). 境界面要素Aからの散乱波成分の反射応答計算

m 次反射の境界面へ三角波音源の球面波として入射しなかった $m-1$ 次反射して伝搬した散乱波成分は、 $m-1$ 次幾何学反射して伝搬した際に発生した境界波の到達時刻以降に、境界面上に入射する球面波面を想定し、その面上に速度ポテンシャルがランダムで不均一に分布し、そこから進行方向と位相がランダムな微分波が発生していると想定した。これを計算モデル化し、 $\{g(i)-g(i-1)\} \times \text{RND}(x)$ として、(20)式を利用している。ただし、 $\text{RND}(x)$ は-1から+1までの乱数を発生する関数である。これに4)で入射しなかった(1-伝搬周波数特性)の重みを乗算して散乱波成分応答を求める。なお、散乱波成分モデルの受音点に対しての寄与をみると、進行方向が球面波の法線ベクトルに均一配置されている幾何学波成分に比べて、散乱波成分では球面波上にポテンシャルがランダム配置されて進行方向と位相とがランダムなので、球面波の法線ベクトル方向への寄与はエネルギーで $1/4$ で、かつ実効値振幅となる。

6). 吸音面の取り扱い

境界面での反射係数として、特に幾何学波成分の計算では、音の入射

角度別の位相と振幅情報を含んだ複素音響インピーダンスが理想だが、実際のホールでの初期反射音を発生させる面は、一般的に吸音の少ない反射性のコンクリートやボードであるために、入射音の方向が異なってもほとんど変わらないために、残響室法吸音率を用いても誤差が小さいと思われる。また、この計算手法での分割波面要素がある程度の大きさをもつために、局所作用(Locally Reactive)の仮定が成り立たないので、音響インピーダンスを吸音特性として利用しても誤差が生じる。

これに対して、残響室法吸音率は分割球面波要素によってある大きさの一次要素に離散化された境界面の吸音特性として、あらゆる方向からの入射音に対して適用できる。さらに、初期応答に続く中後期応答では散乱波成分が多くなるために、あらゆる方向からの入射音に対する吸音特性である残響室法吸音率が、散乱波成分の吸音特性に合っている。

そこで、残響室吸音率データからスプライン補完して位相ずれのない直線位相モデルと仮定した伝達関数を推定して、この値を波面要素が境界面で反射する毎に反射係数として用いている。

ここでは一般に公表されている1 oct. 毎の残響室法吸音率データから、内装材の伝達関数を、スプライン補完で48kHz サンプリングの位相が変化しない直線位相モデルと仮定して、周波数軸上の768データ(31.25Hzステップ)及び時間軸上の1536データ(32msec. 幅)のインパルス応答として近似している。

7). 計算手順と計算の効率化への工夫

長時間インパルス応答計算の流れをまとめると、

Step 1. 直接音、一次回折、一・二次反射の初期応答は、虚像法の境界面組み合わせで、(3)、(4)、(5)式の逐次境界面上の輪帯要素の総当たりで、(20)式を適用して、入射音特性を考慮して応答計算する。

Step 2. 三次反射以降の応答は、音源から発生する球面波面を等立体角の球面波要素に分割して、音線法の要領で追跡、境界面に入射する毎に球面波要素を境界面分割要素と見なし、入射波を構成する二次波面上の輪帯要素の伝搬追跡によって境界波の発生を検知し、幾何学波成分である境界面への入射波伝搬特性を計算する。

Step 3. 境界面上での分割球面波要素内は幾何学波成分の境界面入射波伝搬特性は一樣であるとして、この境界面の球面波要素エリアを48kHzサンプリングの輪帯要素で再分割して、(20)式より、サンプリング輪帯要素からの微分波を積分してインパルス応答を計算し、入射波の伝搬周波数特性の重みを掛けて合成する。

Step 4. 境界波発生時刻以降に仮想した球面波面上に散乱波成分計算モデルを分布させ、(1-伝搬周波数特性)の重みを掛けて合成する。

Step 5. 詳細は別の機会に譲るとして、可聴化の準備のため、受音点から見た境界面要素の方向で分けた方向別のインパルス応答に各方向毎の頭部伝達関数(142方向のデーター)を畳み込み、両耳のインパルス応答を計算する。

8). 計算の効率化への工夫

球面波として境界面へ入射する音を的確に捉えるために、点音源から発生した球面波面を等立体角で分割した波面要素を境界面の一次離散化要素とする。その波面要素内のポテンシャルは反射面や空気吸収で吸音される以外は一定として、音線に伝搬経路を代表させ幾何学反射させて追跡する。反射伝搬追跡は、一次離散化した分割波面要素はサッカーボールの構成面のように6角形を基本として(一部は5角形の要素)いるので、波面要素エリアの頂点が室内を構成する境界面に対して一つも入射しなかった場合、または球面波成分伝搬率が0.0となった場合は、

図8 多目的ホールのインパルス応答での実測値と計算値との比較例

それ以降の波面要素エリアは全て散乱波成分とし反射伝搬は入射方向を考慮したランバートの方向余弦則の確率に従って波面要素をランダム反射させて追跡した。

計算は、時間の掛かる時系列データの畳み込み演算を避け、これと等価な周波数軸上のかけ算で行うようにした。

また、音場評価では初期反射応答と中後期の応答とが同程度の重みなので、これらを予測計算するための演算時間も同じ程度にして、演算時間配分を初期反射応答の予測精度向上に割くために工夫している。本報では初期応答を300msec. までとみなして、等立体角で分割した分割波面要素である境界面の一次離散化要素の数を音の発生から300msec. 経過毎に半減させ、長時間インパルス応答計算の演算時間の増大を、300msec. までの初期反射応答計算の2倍程度に抑えている。

9). ホール実測値との比較による計算法の検証

図8に1,300人収容の多目的ホールでの長時間インパルス応答波形の12面体スピーカ音源での実測値と分割球面波要素数10,000での計算値との比較例を示す。波形形状と音場評価の物理指標値が良く対応しており、この計算法の有効性が分かる。

3. まとめ

音場の視覚化や可聴化による音場評価に用いるための基盤データとな

る可聴帯域の全周波数情報を含み、かつ残響部分までの長時間のインパルス応答を計算するために開発した計算手法、並びに実測値との比較によりその有効性について述べてきた。 今後は更にたくさんの物件による実測値との物理データの検証と同時に、音場の視覚化による感覚的な類似性についても検証していきたい。

参考文献

- 1) 坪井, 渡辺, 平野 : 波動性を考慮した室内音場シミュレーションシステム 日本建築学会技術報告集, 第2号, pp.121~126, 1996年3月
- 2) T.Terai and Y.Kawai : The application of Kircchoff's formula to the numerical calculation of transient response in an enclosure, J. Acoust. Soc. Jpn(E) vol.11, no.1, pp.1-10, 1990
- 3) Y.Sakurai : The early reflection of the impulse response in an auditorium, J. Acoust. Soc. Jpn(E) vol.8, no.4, pp.127-138, 1987
- 4) K.Sekiguchi, S.Kimura and T.Sugiyama : Approximation of impulse response through computer simulation based on finite sound ray intergrarion, J. Acoust. Soc. Jpn(E) vol.6, pp.103-115
- 5) 忠平好生 : 境界積分方程式法による過渡音場の解析手法について 日本音響学会誌 51巻 3号 1995年

(1997年2月10日原稿受理, 1997年8月20日採用決定)