建築音響と環境騒音制御における音場の可視化*

坂本 慎一**, 佐藤 史明***, 矢野 博夫****, 橘 秀樹****

Visualization of sound fields for architectural acoustics and environmental noise control

Shinichi SAKAMOTO, Fumiaki SATOH, Hiroo YANO and Hideki TACHIBANA

1. はじめに

音は情報や情緒を伝えるための最も有効な手段であり、その品質の良し悪しは実際に音を「聴(聞)く」、すなわち可聴化によって判断される。建築音響の分野では、室内外の音環境の評価のためには可聴化技術が不可欠である。一方、品質の高い音環境を創造する、いわゆる音響計画・音響設計の途中段階では、可聴化とともに可視化が大きな役割を果たす。すなわち、音場における音の挙動を可視化することによって、その発生や伝搬のメカニズムを直感的に把握でき、騒音対策の立案や音響設計にフィードバックすることができる。著者らは、音場の可視化技術を様々な音響設計や騒音対策を支援する有効な技術として捉えている。本稿では、我々がこれまでに行った音場の可視化の事例を紹介し、建築音響および騒音制御分野における応用例について述べる。

2. 音響インテンシティ法による可視化

音響インテンシティは、一般的な音の計測量である音圧とは異なり、音のエネルギーの流れを意味する。音響インテンシティは以下の(1)式のように定義されている。

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) u(t) dt \quad (1)$$

ただし、 $p(t)$ ：音圧、 $u(t)$ ：粒子速度。

(1)式に示されるように、音響インテンシティを測定するためには音圧と粒子速度を同時に計測する必要がある。粒子速度は直接測定することが難しいため、近接する2点の音圧の差分を基に近似的に求める方法がとられることが多い。音響インテンシティ計測では、音の強さと方向が同時に得られるため、多点で計測した結果をベクトル図として図示すれば空間的な音響エネルギーの流れを視覚的に確認することができる。

2.1 楽器からの音響放射特性の測定例

Fig.1は、チェロからの放射音(第2弦を加振)を音響インテンシティ計測法により計測した結果である¹⁾。基音(144 Hz)が含まれる160 Hz帯域ではf字孔を中心に様な放射となっているが、第2倍音が含まれる315 Hz帯域では音が吸い込まれる部分も見られる。このように、音響インテンシティ法によれば複雑な音の放射特性を非常に明解に表現できるので、音響放射・伝搬メカニズムを理解する際に有効である。

2.2 窓サッシからの透過音の可視化

建築音響における音響インテンシティ法の応用として、窓サッシからの音響透過を測定した例²⁾を示す。壁構造や建具などの遮音性能を示す音響透過損失の測定は、通常2つの残響室を用いる方法がとられるが、音響インテンシティ法を用いる場合は受音室を無響室とし(Fig.2

Fig.1 Visualization of sound radiation characteristics from a violoncello by sound intensity vector.

* 原稿受付 2006 年 10 月 30 日

** 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1, E-mail: sakamo@iis.u-tokyo.ac.jp)

*** 千葉工業大学工学部

**** 千葉工業大学情報科学部

参照), 試料を透過してくる音響パワーを直接測定する。この方法によれば, 部位ごとの音響透過の様子を詳細に把握することができるので, 特に壁構造や部材の開発段階での検討に有効である。Fig. 3 は, 試料となる窓サッシからの音響透過の様子を把握するために行った音響インテンシティの多点計測結果を図示したものである。計測では, 音源室で音源スピーカより広帯域ノイズを放射し, 受音室内の測定試料の前面部全体にわたって等間隔 (5 cm 間隔) に設定した 1,554 点の測定点における法

Fig. 2 Measurement set-up for sound transmission through a glass window by SI method.

Fig. 3 Measurement result of distribution of normal sound intensity from a glass window.

線方向音響インテンシティを測定した。図を見ると, 500 Hz 帯域(a)ではサッシ下部の隙間部分からの音の透過が明確に見られているのに対して, 1.6 kHz 帯域(b)はガラスのコインシデンス周波数を含むため, ガラス面全体からの音の透過が顕著である。このような実験によって音響透過性能を詳細に調べ, 得られた結果を遮音性能向上のための開発研究にフィードバックすることができる。

3. 数値解析を用いた室内音場の可視化

音響数値解析を用いた室内音場予測では, 設計図の段階で空間の幾何形状データと音響特性データを入力することによりその空間の音響特性を予測する。したがって, 内装材料や壁面形状の変更などは入力データの部分的な変更のみで実行できるので, 従来技術である縮尺模型実験等と比べて必要な労力が小さく, 試行錯誤を常とする設計行為にとっては非常に有効な手法となりうる。解析手法として, 近年, 音の波動性を考慮して精密に空間内の音の伝搬をシミュレートするいくつかの手法が研究されている。人間が感知できる周波数範囲は非常に広いので, 現時点では音響設計に必要な周波数帯域をすべて解析できるわけではないが, 精度が高く効率のよい手法として発展が期待されている。著者らは, 上に述べた音響波動数値解析手法のうち, 時間領域差分法 (FDTD 法) と呼ばれる解析方法の適用性について検討を行ってきた。ここではその手法の概要を述べ, 室内音響設計に応用した例を可視化結果とともに紹介する。

3.1 FDTD 法

[1] 基礎関係式

空気中における 3 次元波動伝搬は以下のオイラーの式, 連続の式で表される。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \kappa \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

ただし, p : 音圧, u, v, w : それぞれ x -, y -, z -方向粒子速度を表し, ρ : 空気密度, κ : 空気の体積弾性率である。

対象とする音場をスタッガードグリッド (Fig. 4 参照) に分割し, 式(2)~(5)式中の微分項を有限差分で近似する。時間, 空間ともに 2 点差分で近似すると, 以下の差分スキームが得られる。

$$u^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) = u^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) - \frac{\Delta t}{\rho \Delta h} \left\{ p^{n+\frac{1}{2}} \left(i + 1, j, k \right) - p^{n+\frac{1}{2}} \left(i, j, k \right) \right\} \quad (6)$$

Fig. 4 Staggered grid system for FDTD method.

$$v^{n+1}\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right)=v^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right) - \frac{\Delta t}{\rho \Delta h} \left\{ p^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j+1, k\right)-p^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j, k\right) \right\} \quad (7)$$

$$w^{n+1}\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right)=w^n\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right) - \frac{\Delta t}{\rho \Delta h} \left\{ p^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j, k+1\right)-p^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j, k\right) \right\} \quad (8)$$

$$p^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j, k\right)=p^{n-\frac{1}{2}}\left(i, j, k\right) - \frac{\kappa \Delta t}{\Delta h} \left[\left\{ u^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)-u^n\left(i-\frac{1}{2}, j, k\right) \right\} + \left\{ v^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right)-v^n\left(i, j-\frac{1}{2}, k\right) \right\} + \left\{ w^n\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right)-w^n\left(i, j, k-\frac{1}{2}\right) \right\} \right] \quad (9)$$

初期条件として音源点近傍に適切な初期音圧分布を与え、(6)~(9)式を逐次計算することによって音場の過渡応答を計算することができる。著者らの行う音響解析では、線形システムにおいて重要な物理量であるインパルス応答をシミュレートするために、音源の初期条件として次式で表されるようなパルス状の音圧分布 (Fig. 5 参照) を与えている。

$$p(x, y, z)=\exp \left\{-\frac{\left(x-x_s\right)^2+\left(y-y_s\right)^2+\left(z-z_s\right)^2}{d^2}\right\} \quad (10)$$

壁面における境界条件は、法線方向音響インピーダンスによって規定される。法線方向音響インピーダンス z_n は以下のように定義される。

Fig. 5 Spatial distribution of initial condition of sound pressure with Gaussian profile.

Fig. 6 Definition of sound pressure and particle velocities on the boundary.

$$z_n=p / u_n \quad (11)$$

ただし、 u_n は壁面における法線方向粒子速度を表す。

計算に際しては、壁面が定義されたグリッド面上の各方向粒子速度を、式(11)に基づいて次式(12)、(13)により計算する (Fig. 6 参照)。

$$u^{n+1}\left(L+\frac{1}{2}, M, N\right)=\frac{p^{n+\frac{1}{2}}\left(L, M, N\right)}{z_n} n_x \quad (12)$$

$$v^{n+1}\left(L, M+\frac{1}{2}, N\right)=\frac{p^{n+\frac{1}{2}}\left(L, M, N\right)}{z_n} n_y \quad (13)$$

[2] 高次差分の適用

以上に述べたように、通常のFDTD法では微分方程式に現れる1階微分係数を2点差分で近似するが、空間差分の近似次数を上げて計算精度を高める方法も考えられる³⁾。微分の計算点を中心とした2M (M=1,2,...) 点を参照点とした高次差分を適用すると (Fig. 7 参照)、式(6)~(9)にかわって差分スキームは次のようになる。

$$u^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)=u^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) - \frac{\Delta t}{\rho \Delta h} \sum_{m=0}^M C_m \left\{ p^{n+\frac{1}{2}}\left(i+m+1, j, k\right)-p^{n+\frac{1}{2}}\left(i-m, j, k\right) \right\} \quad (14)$$

$$v^{n+1}\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right)=v^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right) - \frac{\Delta t}{\rho \Delta h} \sum_{m=0}^M C_m \left\{ p^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j+m+1, k\right)-p^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j-m, k\right) \right\} \quad (15)$$

$$w^{n+1}\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right)=w^n\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right) \quad (16)$$

Fig. 7 Reference points for calculating finite difference.

$$\begin{aligned}
& -\frac{\Delta t}{\rho \Delta h} \sum_{m=0}^M C_m \left\{ p^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k+m+1) - p^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k-m) \right\} \\
& p^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) = p^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) \\
& -\frac{\kappa \Delta t}{\Delta h} \left[\sum_{m=0}^M C_m \left\{ u^n \left(i+m+\frac{1}{2}, j, k \right) \right. \right. \\
& \left. \left. - u^n \left(i-m-\frac{1}{2}, j, k \right) \right\} \right. \\
& \left. + \sum_{m=0}^M C_m \left\{ v^n \left(i, j+m+\frac{1}{2}, k \right) - v^n \left(i, j-m-\frac{1}{2}, k \right) \right\} \right. \\
& \left. + \sum_{m=0}^M C_m \left\{ w^n \left(i, j, k+m+\frac{1}{2} \right) - w^n \left(i, j, k-m-\frac{1}{2} \right) \right\} \right] \\
& C_m = D_m / \sum_{l=0}^L (2l+1) D_l
\end{aligned} \quad (17)$$

$$D_m = (-1)^{m+1} \frac{(2M-1)^2 (2M+1)^2}{\{2(M-m)+1\}^2} \frac{(2M+1)!}{m!(2M-m+1)!} \quad (18)$$

3.2 室形の違いによる音波伝搬性状の差異

室内音響設計では、室形状の選定が基本的に最も重要である。ホールや劇場の室形状として典型的な「かたち」には、直方体（シューボックスタイプ）、扇形、楕円形などがあるが、室の基本形状が異なると室内の音波伝搬特性も大きく異なる。そこで、典型的な室の平面形として上記3形状を設定し、音源点からパルスを発生した後の過渡的な音波伝搬をFDTD法によりシミュレートし、室形の差異による音響特性の違いについて検討した例を示す⁴⁾。この検討では、平面形状の違いに特に着目しているため、2次元モデルに対する数値解析を行っている。実際のホール・劇場では、室内音場の拡散性を高めるために壁面形状に比較的細かな凹凸（音響拡散体）が設計されるのが通常である。そこで、Fig. 8に示す屏風折れ型の拡散体を周壁に設置した場合の音響効果の違いについても検討した。

室内における音圧分布の時間変化を計算した結果をFig. 9に示す。これらの室は面積を同一（518.4 m²）とし、周壁の吸音率をすべて0.2として条件を合わせている。それぞれの室において図中の●位置を音源とし、パルス放射後35 ms, 90 ms, 145 ms, 200 ms後の瞬時音圧分布を示している。室形状が左右対称であるので、各図の左半分に拡散体なしの室内音圧分布を、右半分に拡散体（Fig. 8参照）を周壁に設置した場合の室内音圧分布を表示した。拡散体を設置しない室では強い反射音が離散的な波頭面として明瞭に現れているが、拡散体を設置した室では拡散壁の効果によって細かな反射波が多数発生し、室内音圧分布が急速に均一化される様子が分かる。

Fig. 8 Sound diffusers attached to the wall under investigation.

壁面拡散の聴感的な効果は、受音点における音の響きの情報によって確認される。そこで、図中○位置のインパルス応答を計算した。計算結果をFig. 10に示す。拡散体を設置した室では、拡散体なしの場合に見られる離散的な強い反射音群がなくなり、応答のエンベロープが滑らかになっている様子が観察される。これらの計算結果を可聴化することによって、壁面拡散の効果を耳で確認することも可能である。

以上に示したように、FDTD法を用いた数値解析によれば、室内の過渡的な音波伝搬を詳細に調べることができる。また、インパルス応答を全時間積分すれば、定常状態における音圧分布特性についても検討することができるので、室内音響分野における応用範囲は広い。

3.3 3次元音場における適用例

3次元音場にFDTD法を適用した例として、小ホールの音響特性を解析⁵⁾し、過渡音圧分布を可視化した結果をFig. 11に示す。このホールは座席数300席弱の小規模ホールであるが、現在の計算機（WS）性能で上限周波数1 kHz帯域（1 Oct. band）までの解析が可能である。図は、●位置に設置した音源からパルスを放射した後の音圧分布の時間変化を表示したもので、壁面の拡散処理と後壁の吸音処理によって急速に音場が拡散される様子が示されている。このホールは曲面を多用した平面計画であるため、設計当初より音の集中に起因するエコー障害の発生が懸念された。そのため、基本設計の段階で2次元波動数値解析による検討を行い、音響的な検討がなされた事例である。

波動数値解析が実際のホール音場に適用された例はまだ少ない。そのため、この種の解析手法の実空間への適用性についてはまだ検討の余地が多く残されている。最も検討を要すべき課題は、実音場における境界条件の同定とシミュレーションへの導入手法である。現実の建築空間の境界条件は吸収、共鳴、振動系との連成等、さまざまなメカニズムが関与するため、その周波数特性は非常に複雑となる。このような境界条件を適切にモデル化し、結果として得られる空間特性の精度を高めるためには、多くの事例の蓄積が必要であろうと考えている。

4. 波動数値解析の環境騒音予測への応用

波動音響解析は室内音場だけでなく屋外環境騒音に対しても適用可能である。著者らは、主に道路交通騒音予測に対するFDTD法の適用可能性を検討している^{6,7)}。道路交通騒音は音源を線音源としてモデル化できるため、道路断面を対象とした2次元解析が有効に利用できる。近年では、高架・平面併設道路や半地下構造道路等の複雑な道路構造がしばしば建設されるようになったため、複雑な場の解析に有効な波動数値解析への期待が高まっている。ここでは、音の可視化例として遮音壁による回折音場を解析した事例について述べる。

Fig. 12は、種類の典型的な遮音壁形状（直壁(a)、頂

(a) Rectangular

(b) Fan-shaped

(c) Elliptic

Fig. 9 Sound propagation in a rectangular (a), fan-shaped (b) and elliptic (c) rooms without diffusing treatment (left hand side) and with that (right hand side).

部を円弧型(b)および逆L字型(c)に変形させた壁)について音波回折の様子を可視化した例である。音源Sからパルス発生後、波面が障壁の頂部に到達すると音波は回折し、エッジ点を中心とした同心円状に波面が広がる様子が明瞭に示される。図中、音の振幅を色の濃淡で表現しているが、障壁の裏側では回折角が深いほど音波の振幅が徐々に小さくなる様子が表現されている。円弧型(b)および逆L字型(c)では壁面と地面での多重反射に伴う波面の往来が見られ、音場が複雑になっている。このような可視化によれば、音源から受音点に至る音波の挙動を細かく観察することができるので、特に吸音部位の検討などの騒音対策を検討する際に役立つものと考えられる。

5. むすび

本稿では、建築音響および環境騒音予測の分野における音場の可視化について著者らの研究を紹介した。音は、空気の微小な振動の結果として生じる現象であり、その振幅は大気圧に対して非常に小さいので、物理的に直接これを可視化することは困難である。そこで、計測や音場解析の手法を用いて音場を可視化する手法が用いられる。これらの方法を用いれば、波動現象である音の複雑な挙動を明瞭に表現することができ、音響設計や騒音対策の支援技術として有効である。実務的な応用ばかりでなく、音場を可視化する方法は音響に関する教育用のツールとしても効果的であると考えられ、著者らのグループでもいくつかのツールの開発を行っている^{8,9)}。

Fig. 10 Calculation results of impulse responses at the receiving points shown in Fig. 9 .

Fig. 11 Sound field simulation on a 3-dimensional room.

参考文献

- 1) 橘 秀樹, 日高新人: チェロの音響放射特性の可視化, 日本音響学会誌, 46 巻 10 号 (1990) pp.864-866.
- 2) 須田直子, 佐藤史明, 矢野博夫, 須永明宏, 横田考俊, 坂本慎一, 橘 秀樹: 音響インテンシティ法によるサッシの部位別遮音性能の把握, 日本騒音制御工学会講演論文集, (2003. 9) pp.109-112.
- 3) 坂本慎一, 山本航介, 橘 秀樹: FDTD 法における多点差分スキームの安定性解析, 日本音響学会講演論文集, (2004. 9) pp.953-954.
- 4) Yokota, T., Sakamoto, S., Tachibana, H.: Visualization of sound propagation and scattering in rooms, Acoustical Science & Technology, Vol.23, No.1 (2002) pp.40-46.
- 5) Sakamoto, S., Ushiyama, A., Nagatomo, H.: The FDTD calculation of impulse responses of a hall and their correspondences with measurement results, Proceedings of WESPAC IX 2006 (2006. 6) CDROM No.550.

Fig. 12 Sound diffraction over various types of noise barriers.

- 6) Sakamoto, S., Hirano, J., Satoh, F., Tachibana, H., Funahashi, O., Mori, T. : Experiment and calculation of sound radiation characteristics from semi-underground road, Proceedings of Inter-Noise 2005 (2005.8) CDROM, No. 1815.
- 7) Sakamoto, S., Tachibana, H. : Numerical analysis on noise attenuation performance of embankment, Proceedings of

Inter-Noise 2003 (2003.8) CDROM N 918.

- 8) Sakamoto, S., Ueno, K., Tachibana, H. : Visualization of resonance phenomena for acoustic education, Proceedings of 18th ICA (2004.4) III-2311-2312.
- 9) Tachibana, H., Sakamoto, S., Ueno, K. : Visual and aural demonstration for architectural acoustics Proceedings of 18th ICA (2004.4) III-2317-2318.

口絵5 ホールにおける音響伝搬をFDTD法によって計算し、可視化した例。音源点（●）から発生したパルス音が時間とともに空間内に広がる様子が観察できる。このような計算結果をアニメーション表示することによってビジュアルに表現すると、室の音響伝搬特性を感覚的に捉えることができる。

口絵6 アルミサッシ窓からの音響透過を音響インテンシティ法（固定点法）で計測し、可視化した例。500Hz 帯域では、サッシの可動部分からの音の透過が顕著である。一方 1.6kHz 帯域はガラスのコインシデンス周波数を含むので、ガラス面全面からの音の透過が卓越している。このような可視化結果によれば遮音上の弱点を明瞭に把握することができる。

（東京大学生産技術研究所 坂本 慎一、千葉工業大学工学部 佐藤 史明、
千葉工業大学情報工学部 矢野 博夫、橘 秀樹）

（本文 19 頁参照）