

エビデンスに基づいた音環境設計のための心理評価とシミュレーション

Psychological Evaluation and Simulation Technology on Evidence Based Design for Acoustical Environment

矢入 幹 記 古賀 貴 士
竹林 健 一 田 中 彩

I. はじめに

世界に先駆けて超高齢社会を迎えた日本。少子高齢化、人口減少が進む成熟した我が国において、年齢、性別、身体能力、文化、言語などに関わらず、誰もが活躍できる社会が求められている。そのためには、できるだけ多くの人々が、その環境、空間、製品、サービスなどを利用できるように設計する、ユニバーサルデザインの考え方がますます重要となるであろう。高齢者や障害者、外国人など多様な利用者の行動や状況を具体的に想定し、その利用実態を理解した上で、できるだけ多くの人々が使いやすい豊かな環境、空間づくりをおこなう必要がある。2020年の東京オリンピック・パラリンピックの開催を機に、これまで以上に、高齢者、障害者、外国人との共生に対する意識も高まっていくと考えられる^{1) 2)}。

普段はあまり意識しないが、我々は視覚だけではなく、聴覚や触覚、気流の流れ、温熱感、場合によっては嗅覚なども使って空間を認識している。視覚情報を得ることが難しい人は、足音や車の音、店舗固有の音や匂い、縁石や路面の凹凸などの足裏感覚など、日頃ものが見えている人ならば意識しない視覚以外の情報を活用して空間を認識している^{3, 4)}。

近年、建築設計者の間でも、空間をよりわかりやすくするため、五感に訴えるデザインに関する取り組みがなされている。色彩、照明、サイン(視覚情報)、空間の大きさや材質の違いによる音の響きの変化、音サイン(聴覚情報)、踏み心地の違い、触知サイン(触覚情報)を効果的に提供できる豊かな環境・空間を、調査・研究によるエビデンス(科学的根拠)に基づきデザインすることで、多くの人にとって直観的でわかりやすい空間を実現しようというものである⁵⁾。

音環境の観点からは、従来、音楽ホールなど高度に音響を目的とする建物以外、音響設計が入り込む余地は少なかったが、近年、このような社会的背景の中、医療施設を中心に、顧客や建築設計者の間で音環境に関するエビデンスを求める機会が増加してきた。たとえば、医療施設を訪れる視覚障害をもった患者の多くは空間を把握する際に聴覚情報に依存しており、それらに配慮した建築計画が求められている。

本報告では、エビデンスに基づいた音環境設計を実現するために重要な、心理評価技術ならびにシミュレーション技術について概要を述べる。

II. 鹿島の技術

1. エビデンスに基づいた設計に必要な技術

公共の建築物は一般に不特定多数の人が利用する。その空間の音環境が少しうるさいとか、音声が聴き取りにくいといったことを感じる人の感度も様々である。特定のオーナーの意向に沿う必要があ

る場合を除いて、そのような空間の音環境を評価する場合に重要になるのが、平均値という考え方である。平均的な感度を持つ人がどのように感じる空間であるかが分かれば、正規分布を仮定することにより、何パーセントの人がどのように感じる空間であるかを評価できようになり(心理評価)、これを使って明確な設計目標を設定できる。

一方で、建築設計者を含め、人は自分が平均的な感度を有しているかどうか自信がない。したがって、設計に際しては、設計目標となる心理評価値を満たす空間が実際にどの程度のものなのかを事前に試聴して確かめたい(シミュレーション)という欲求が生まれる。

すなわち、エビデンスに基づいた音環境設計には、心理評価技術とシミュレーション技術の両方が必要といえる。

2. 心理評価技術⁶⁾

ここでは、音環境による空間認知(wayfinding)を例に、空間設計のためのエビデンスを構築する手法について説明する。空間認知とは、簡単にいえば、今自分がどこにいるかが分かるということである。

十分な視覚情報を得ることのできない視覚障害者は、自分自身の足音の聴こえ方(音色、響き、空間的な印象など)の変化を空間認知の手がかりとして意識的に利用している。音による空間認知のイメージをFig. 1に示す。期せずして、空間認知の手がかりを与える音響変化を実現している建築空間は存在すると思われるが、それを建築計画として意識的に実現するためには、空間認知の予測手法を構築する必要がある。



Fig. 1 音による空間認知のイメージ。診察エリアとエントランスホールに顕著な音響特性の差を設けることで、空間を移動したときに音の響きの変化から空間が変わったと認識できる

(Wayfinding of Low-Visions Using the Acoustical Changings Accompanied by the Spacial Changings)

現実の空間の条件を十分網羅するだけの刺激を用意し、足音によ

る空間認知の閾値を明らかにするための音響心理実験をおこなった。概要を Fig. 2 に示す。実験刺激は、小さい空間から大きい空間へ向かって人が歩く際に生じる足音の変化を、音響解析により合成した。被験者には、個々の刺激に対して、その聴こえ方（音色、響き、空間的な印象など）が「どの程度変化したと感じるか（変化を感じる程度）」を Table 1 に示す水準で判断させた。

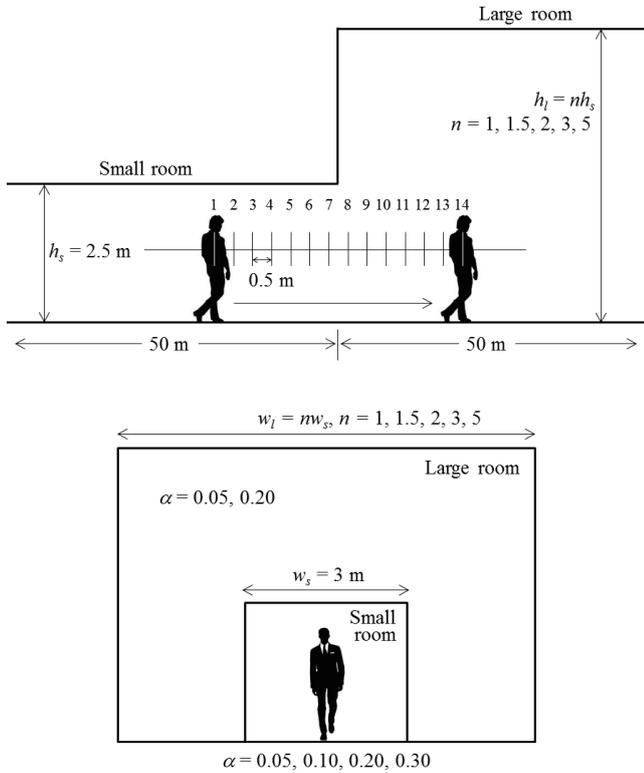


Fig. 2 空間認知エビデンス取得のための実験における刺激の概要：小空間に対する大空間の寸法および小空間と大空間の平均吸音率を様々に変化させ刺激を作成している α は平均吸音率 (Analytical Model to Calculate the Impulse Responses of a Coupled Room: Sideview (top) and Frontview (bottom))

Table 1 被験者に判断させたカテゴリ

(Physical Parameters to Calculate Room Impulse Responses in the Geometrical Acoustical Analysis)

カテゴリ	心理的距離*	
	代表値	境界値, C_b
非常に感じる	4	3.5
かなり感じる	3	
やや感じる	2	2.5
ほとんど感じない	1	1.5
感じない	0	0.5

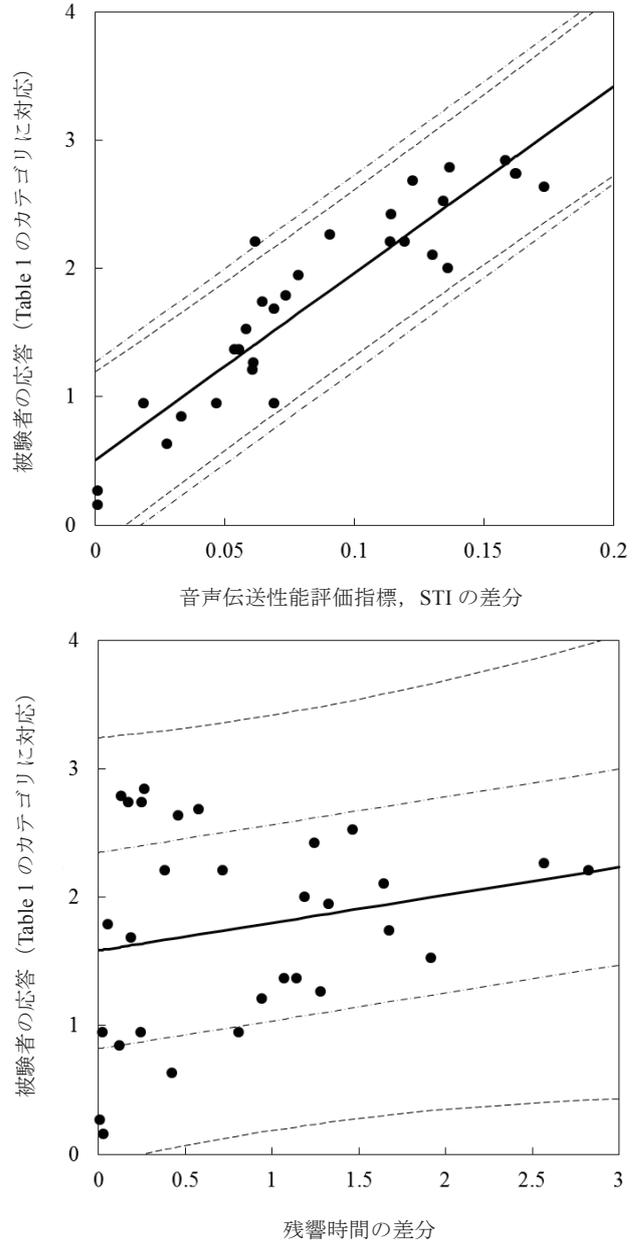


Fig. 3 物理量と心理量の関係。STI (上図)、残響時間 (下図)：被験者の応答 (●), 回帰直線 (実線) Tukey' の HSD (一点鎖線), 95% 予測区間 (破線)

(Relationship between M_c and Monaural Responses. The solid linear regression line estimates the responses. Tukey's $HSD_{\alpha=0.32}$ (dashed broken line) and 95% prediction interval (broken line) are also shown)

得られた被験者の応答から系列範疇法を用いて距離尺度を構成し、各カテゴリに落ちた判断の相対度数から刺激ごとに重心を求めらることで、各刺激の「変化を感じる程度」の心理尺度値 R_i が得られる。

あとは、この「変化を感じる程度」を空間の物理特性から推定する手法を確立すればよい。この多くの音響指標を検討した結果、音声伝送性能評価指標 (Speech Transmission Index: STI) の差分を用いることで、最も高く十分な精度で空間認知のしやすさを予測可

能であることが明らかとなった。最終的な空間認知の設計チャートは Fig. 5 を参照されたいが、これを構築するまでの過程を以下に示す。

設計チャート物理量と「変化を感じる程度」の関係を Fig. 3 に示す。図中の実線は回帰直線、破線はその 95 % 予測区間を表す。一点鎖線は、回帰直線を中心に Tukey の HSD = 0.32 の範囲を示したものである。STI の場合は相関係数も高く、予測区間が HSD の範囲を下回っており、十分な予測精度があるとみなせる。

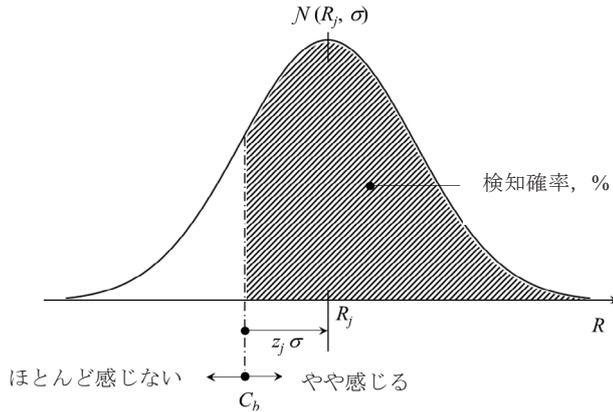


Fig. 4 刺激判断に関する精神物理学モデル：正規分布を仮定することで、カテゴリの境界とそこに含まれる確率が定義される (Assumption of the Normal Distribution on Detection of the Acoustical Changings)

一方、室内音響の物理量として従来から最も広く活用されている残響時間の場合は相関係数も低く、予測区間が HSD の範囲より著しく広いため、予測精度があるとはいえないことが分かる。

さて、本実験で用いた評定尺度法は、そのカテゴリが持つ意味によって、段階的な絶対評価が可能であるが、カテゴリ自体が幅を持つため、設計目標に掲げたカテゴリのどの辺りに目標値を定めればよいかという判断が難しい。そこで、以下に示す手法を考案し提案している。変化を感じる程度に対応する心理的連続体 R 上の反応分布を Fig. 4 に示す。本実験で設定したカテゴリの境界は、R 上の不変の位置にあるとし、被験者の感度や反応の揺らぎが等分散の正規分布にしたがうと仮定すると、各カテゴリの境界値 C_b と母平均 R_j の間の標準化距離 z_j は次式で定義される。

$$z_j = \frac{R_j - C_b}{\sigma} \quad (1)$$

ただし、 σ は母集団の標準偏差である。 z_j 値を累積確率に変換すれば、その境界値より上のカテゴリに属する確率が推定できる。ここでは、カテゴリ境界 C_b (Table 1) を、“1 やや変化を感じる”と“2 ほとんど変化を感じない”の間に設定した場合の確率をあらたに、「変化を感じる確率」と定義する。

このような音響心理実験の結果を、設計チャートとして活用できるように、縦軸を空間認知できる確率（何パーセントの人が空間の違いを認知できるか）で表したものが Fig. 5 である。横軸は、空間認知の予測指標として提案する STI の差分であり、空間形状および内装材の吸音率が分かれば音響解析により算出が可能である。単なる残響の長さ（時間的性質）だけでなく、音の空間的な広がり（空間的性質）が空間認知に寄与する結果となっている。

3. 音環境のシミュレーション

(1) 立体音響再生技術⁷⁾

ヒトは空間に存在する様々な音に対して、その到来方向や距離、空間的な音像の広がりや立体的に感じとる能力があり、それをヒトが知覚する音の空間印象という。したがって、音環境をシミュレートする装置の核となるのは、この空間印象を忠実に再現する立体音響再生技術である。

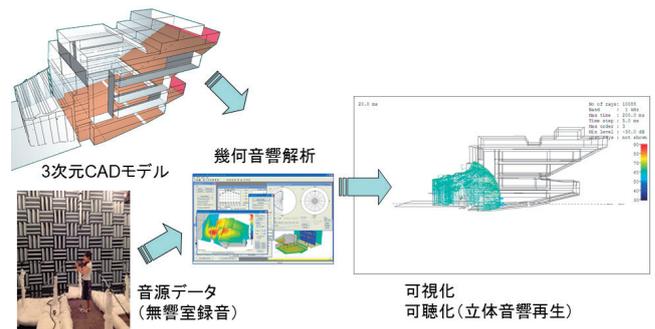


Fig. 6 立体音響再生技術のイメージ：3次元 CAD モデルから幾何音響解析により空間の両耳インパルス応答を推定し、それに音源信号（無響室録音の音楽など）を畳み込み、立体音響再生することで実現

(Schematic Diagram of 3D Sound Reproduction System Using Room Impulse Responses and the Head Related Transfer Functions to Calculate the Binaural Impulse Responses in the Geometrical Acoustical Analysis)

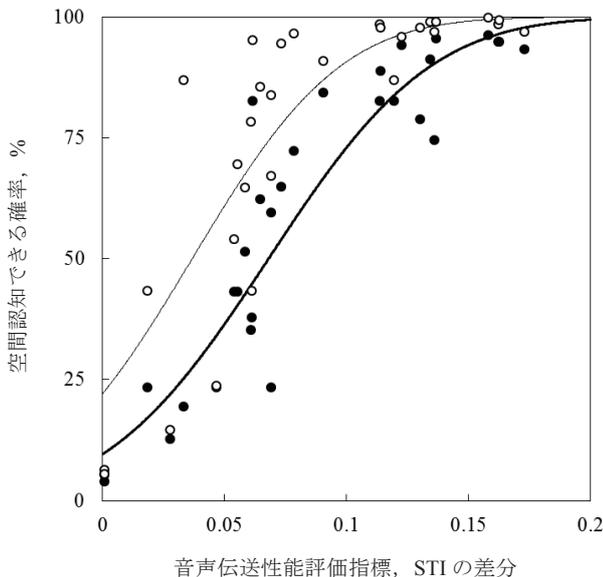


Fig. 5 空間認知の予測チャート：リアルタイム立体音響シミュレータを使い、空間的性質を再現した場合 (○)、普通のスピーカを使い、残響の長さだけを再現した場合 (●) (Relationship between M_c of STI and the Detection Rating of the Acoustical Changings: Monaural responses (●), $r = 0.92$, and binaural responses (○), $r = 0.86$)

この技術は、音楽ホールの位置による聞こえ方の違いなどを設計段階で試聴し設計に反映する、合意形成ツールとして活用されている。立体音響再生技術のイメージを Fig. 6 に示す。3次元 CAD モデルから得られる室形データを幾何音響解析に入力することで、空間をどのように音波が伝搬して受聴者の両耳に伝わるかという情報（両耳インパルス応答）が得られる。この情報をもとに音源信号（無響室録音の音楽など）を加工し、立体音響再生用の特殊なスピーカから再生することでこれを実現する。数ある立体音響再生技術の中で、我々は最も原理的に優れている Optimal Source Distribution (OSD) 原理に基づくバイノーラル方式を採用している（付録参照）。

(2) リアルタイム立体音響再生装置⁸⁾

これまでの立体音響再生装置は、あくまで事前に用意したコンテンツ（音楽など）を“受動的に聴く”装置であり、前述の空間認知のように、自分自身の発生する音が空間の中でどのように変化し聞こえるかを体感するには至らなかった。そこで開発したのが、リアルタイム立体音響再生装置である。概念を Fig. 7 に示す。自分自身の発生する音（足音など）が直接音として体験者の耳に届き、それに同期して、仮想空間の反射音が特殊なスピーカから立体的に再生され、それらが体験者の耳位置で融合する。これにより、体験者はあたかもその場所にいるように感じることができる。

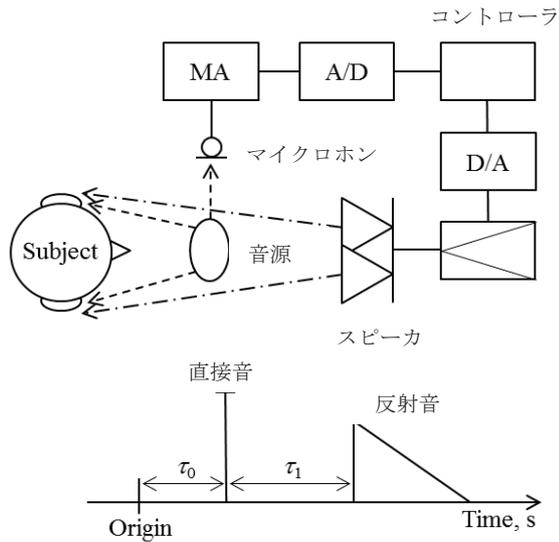


Fig. 7 リアルタイム立体音響再生装置の概念

(Concept of a Real Time 3D Sound Reproduction System)

立体音場再生をリアルタイムにおこなう場合の最大の問題はシステムに内在する遅延である。発生源から放射される直接音は受聴者の耳に到達するとともにマイクロホンで集音され、制御フィルタ **H**（付録参照）を通過したあと、スピーカから放射されて受聴者の耳に到達する。対象空間の音場を再現し、受聴者の耳位置で直接音と融合させるためには、システムが有する遅延 τ_s が次式の条件を満たさなければならない。

$$\tau_s < \tau_0 + \tau_1 \quad (2)$$

ここで、 τ_0 は発生源から直接音が受聴者の耳に到達するまでの時間、 τ_1 は再生する空間の第一反射音の遅れ時間である。図からわかるとおり、 τ_s に影響する遅延要素は随所にあるが、全体への寄与が最も大きいのは、制御フィルタ **H** による遅延である。直接音と反射音がともに制御対象となる通常の立体音場再生では、この遅延は問題にならないが、リアルタイム制御をおこなう上では、見過ごすことはできない。

鼓膜に到達する前に、音波は頭部伝達関数 (HRTF) と呼ばれる、頭や耳介の影響を受ける。ヒトの HRTF は非常に激しい山谷のある周波数特性を持つことが知られている。我々は、この HRTF の山谷が制御フィルタ **H** の遅延を引き起こしていることを明らかにしており、それを解決するための手法として、新しい音源配置を提案した。OSD 原理を満たす条件はスピーカの開き角 Θ （方位角）と周波数の間に (A2) 式の関係が満たされることであり、仰角はこれに関係しない。すなわち、音源対がすべて水平面や横断面といった特定の 2次元平面に納まっている必要はなく、OSD 原理を保ちながら、音源配置を 3次元に拡張することが可能である。この着想により、OSD 原理を保ちながら HRTF の山谷を回避して平坦な制御フィルタを構成でき、その結果、制御フィルタの遅延を少なくしても、従来の 2次元的音源配置よりも制御効果が高くなることを実証している。Fig. 8 は、仰角 ϕ の関数として表した正中面の HRTF スペクトルに、3次元に拡張した OSD 音源配置の一例を重ねて表示したものである。これによれば、HRTF の山谷を回避して平坦な特性のプラント行列を構成できることが分かる。

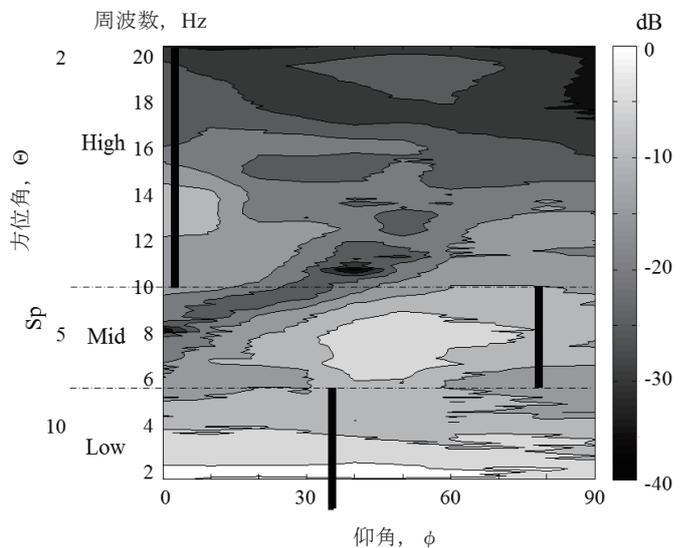


Fig. 8 OSD 原理を満たしながらスピーカの配置を 3次元に拡張する原理. OSD 曲線（図中の太実線）を正中面の HRTF スペクトルに重ねて表示したもの. HRTF の山谷（図中の淡 - 濃で示される）を回避して平坦な特性のプラント行列を構成できることが分かる (Extended Principle of the OSD System to Three -Dimensional Space. The OSD curves (thick lines) are superimposed on HRTF spectrums in the median plane)

リアルタイム立体音響再生装置として活用している実際の装置の様子を Fig. 9 に示す。原理上は、3次元空間の様々な方向に音源を配置することで、限りなく制御フィルタの周波数特性を平坦にすることが可能であるが、あまり実用的でない。ここでは、工学的な見地から、上方と前方およびサブウーファによる3軸制御音源配置を採用している。



Fig. 9 リアルタイム立体音響再生装置の実際：高音域用のスピーカーが前方に、中音域用のスピーカーが上方に、低音域用のサブウーファが側方に配置されている

(Real-Time 3D Sound Reproduction System: loud speakers for high frequencies are arranged in the front, for middle frequencies in the upper and subwoofers for low frequencies in the side)

4. 適用例

空間認知のエビデンスおよびリアルタイム立体音響再生技術を活用したものとして、西葛西井上眼科病院の例を示す^{9, 10)}。

医療施設は、外来・検査・診療・病棟など多様な機能が包含された建物であり、その利用者は、様々な疾病・疾患に罹っている患者や高齢者が多い。利用者にとって、安全、安心、誰にでもわかりやすく使いやすいというユニバーサルデザインの考え方で作られた空間、環境は非常に重要である。空間の認識は視覚だけでなく聴覚、触覚、嗅覚を複雑に組み合わせ、さらにそれを無意識に統合して認識していると考えられる。

このような背景の中、西葛西井上眼科病院では、ユニバーサルデザイン研究会を定期的で開催し、色彩とピクトグラムによる直感的な認識、光による誘導、色彩と歩行感による誘導など様々な観点から五感に訴えるユニバーサルデザインを目指した。

音環境の観点からは、弱視の来院者に対しても、エントランスホールがランドマークとして空間認知しやすいように、「響きで感じとる吹抜け」を計画した。実際に実現した吹抜けの様子を Fig. 10 に示す。エントランスホールに接続する診察エリアや検査エリアには、天井吸音材やカーペットが設置され、響きが抑制されるとともに、暗騒音も抑制される。それらの空間とのコントラストにより、エントランスホールがランドマークとして音響的に際立つ設計となっている。これは、リアルタイム立体音響シミュレータを活用し、病院スタッフと設計者が合意形成して、空間の大きさや内装材の仕様を

決めた結果である。このとき活用したリアルタイム立体音響シミュレータ(プロトタイプ)による足音のシミュレーションの様子を Fig. 11 に示す。

竣工後、歩行者の足音の発生を模擬した足元の発生源から受聴位置(歩行者の耳位置)までの伝達関数を測定し、前節で述べた音声伝送性能評価指標(Speech Transmission Index: STI)を測定した。エントランスホールの領域へ入る直前のSTI値とエントランスホールへ入る直後STI値の差分の値が、おおむね0.12~0.15の範囲に納まった。これは、Fig. 5 に示す空間認知の予測チャートにおいて、85%以上の人が空間認知できる値であることが確認できる。



天井の高さと床材の違いによる音の違いで空間認知を助ける空間設

Fig. 10 西葛西井上眼科のエントランスホールの例：音の変化で空間認知をしやすい設計に反映

(Example of Entrance Hall at Nishikasai Inoue Eye Hospital: Wayfinding of low-vision using the acoustical changings accompanied by the spacial changings)



Fig. 11 西葛西井上眼科の音響設計に活用したリアルタイム立体音響シミュレータ(プロトタイプ)による足音のシミュレーションの様子

(Prototype of Real-Time 3D Sound Reproduction System Using for Acoustical Design of Nishikasai Inoue Eye Hospital: A simulation of footsteps)

III. まとめ

ユニバーサルデザインの考え方がますます重要となってきた近年の社会的背景の中、建築においても、空間をよりわかりやすくするため、五感に訴えたデザインに関する取り組みがなされている。色情報、聴覚情報、触覚情報を調査・研究によるエビデンスに基づき

デザインすることで、直観的でわかりやすい空間を実現しようというものである。音環境の観点からも、医療施設を中心に、顧客や建築設計者の間でエビデンスを求める機会が増加してきた。本報告では、エビデンスに基づいた音環境設計を実現するために必要な、心理評価技術ならびにシミュレーション技術について述べた。

心理評価技術については、明確な設計目標を設定できるように、何パーセントの人がどのように感じる空間であるかを評価する手法について、音による空間認知を題材に説明した。心理評価の裏付けとなるシミュレーション技術については、Optimal Source Distribution (OSD) 原理に基づくバイノーラル方式を3次元に拡張したリアルタイム立体音響再生技術について解説した。

これらの技術は、医療施設のみならず、オフィスや教育施設などの建物にも展開が可能である。また、リアルタイム立体音響再生技術については、音楽演奏者が実際のコンサートホールでの演奏を疑似体験できる装置としての展開も可能である。

謝 辞

リアルタイム立体音響再生技術の構築にご協力いただいた OPSODIS Limited, University of Southampton, ISVR の武内隆博士に感謝いたします。

付 録

OSD 原理の概要を説明する。逆システムを含む2チャンネル制御のブロックダイアグラムを Fig. A1 に示す。立体音響再生を可能にする制御フィルタ行列 \mathbf{H} は音源と受音点間の伝達行列の逆行列として一般に次式で表される。

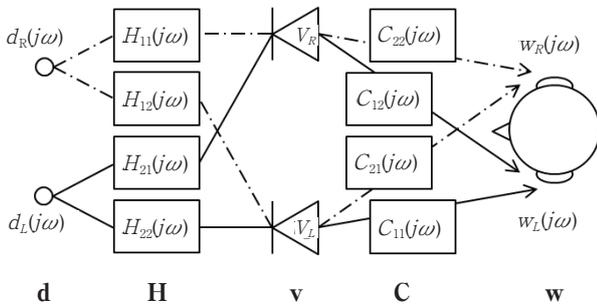


Fig. A1 2チャンネル制御のブロックダイアグラム (Block Diagram for 2-Channel Sound Control with System Inversion)

$$\mathbf{H} \approx \frac{1}{1 - e^{-2jk\Delta r \sin \theta}} \begin{bmatrix} 1 & -e^{-jk\Delta r \sin \theta} \\ -e^{-jk\Delta r \sin \theta} & 1 \end{bmatrix} \quad (A1)$$

ここで、 k は波数である。スピーカの開き角 $\Theta = 2\theta$ が次式の関係を満たすように、連続的に変化するモノポール音源を考える。

$$\Theta = 2\theta = 2 \arcsin \left(\frac{\pi}{2k\Delta r} \right) \quad (A2)$$

(A1)式にこの条件を課すと、制御フィルタ行列 \mathbf{H} は、

$$\mathbf{H} \approx \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{bmatrix}, \quad (A3)$$

となり、その周波数特性は全体域にわたって平坦となる。これが OSD 原理の特長である。OSD 原理を構成するスピーカ配置の概念を Fig. A2 に示す。これにより、自然な立体音響再生の阻害要因となるノイズの増大、音色の変質や歪、再生空間の反射音や個人差の影響といったバイノーラル方式の持つ問題点の多くが解決されている。

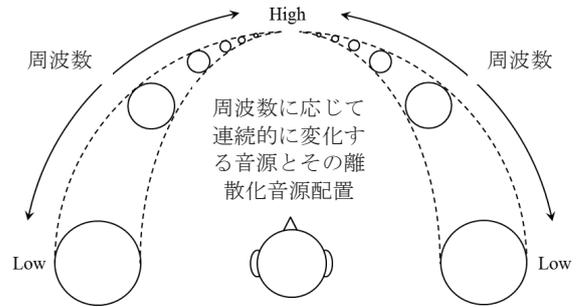


Fig. A2 OSD 原理を構成するスピーカ配置の概念 (Principle of Optimal Source Distribution (OSD) System)

参考文献

- 1) 建築管理本部；ひとと環境の未来を築く，鹿島の建築技術，SOLUTIONS，ユニバーサルデザイン，建築管理本部，2016.
- 2) 矢入幹記，北村達也；小特集"高齢者や視覚障害者に配慮した音環境"にあたって，日本音響学会誌 73 巻 5 号，2017.
- 3) 辻村壮平；高齢者に対応した鉄道駅の案内放送，日本音響学会誌，73 巻 5 号，2017.
- 4) 佐藤洋，佐藤逸人；加齢による聴覚特性の変化を考慮した音声案内，日本音響学会誌 73 巻 5 号，2017.
- 5) 日本福祉のまちづくり学会；視覚障害者のための音環境，日本音響学会誌 73 巻 5 号，2017.
- 6) 矢入幹記；空間変化にともなう音響変化によるロービジョンの空間認知，日本音響学会建築音響研究会，2016.
- 7) T. Takeuchi and P. A. Nelson, "Optimal source distribution for binaural synthesis over loudspeakers," J. Acoust. Soc. Am., 112, 2786-2797 (2002).
- 8) 矢入幹記，竹林健一，古賀貴士；バイノーラル方式によるリアルタイム立体音場再生の試み，日本音響学会建築音響研究会，2017.
- 9) 鮫島泰明，海野裕彦，原利明，三堀麻理子；西葛西・井上眼科病院，日本建築学会学術講演梗概集，14156，2016.
- 10) 井上順治，堀貞夫，黒田有里，荒井桂子，大音清香，太田篤史，武者圭，前田耕造，矢入幹記，原利明，鮫島泰明，井上賢治；眼科専門病院における音を用いたユニバーサルデザインの導入，第 16 回日本ロービジョン学会学術総会，2016.