

# 拡散性制御に基づく室内音響設計に向けた音場解析に関する研究

## Study on sound field analysis for diffuseness control based room acoustic design

学籍番号 47-107635  
氏名 江田 和司 (Eda, Kazushi)  
指導教員 佐久間 哲哉 准教授

### 1. 序

**1.1 研究背景** 室内音響設計は室の用途に応じた所望の音環境を実現するために、室形状・壁面吸音・壁面拡散等によって響きを時間・空間・周波数の各領域で制御することである。残響時間や室形状に関する全体レベルの設計指針は概ね確立しているものの、壁面形状や内装材配置といった部位レベルの詳細設計に関しては曖昧な経験判断に依るところが大きい。また、室内音響の聴感印象を評価するための音響指標は多数提案されているが、部位音響性能との関係が整理されていないことから、設計時の予測が困難な状況にある。

最も基本的な室内音響指標である残響時間は比較的簡易な予測が可能であるが、その基礎となる残響理論は拡散音場（音響エネルギーの密度が一様かつ伝搬方向が等確率）を仮定して構築・発展してきたため、仮定が成立しない多くの室では残響時間の誤評価が生じる。従来の室内音響設計は残響制御の観点から、壁面の部位音響性能として吸音性を機軸として行われてきたが、近年、拡散性と呼ばれる性能が注目されている。壁面の拡散性能を表す乱反射率は、その測定法が整備されたことに伴ってデータベースが蓄積されつつあり、音響数値解析や、矩形室に限られるものの残響理論へ

の導入が実現され、非拡散音場に関する現象把握の機運が高まっている。

**1.2 研究目的** 壁面の部位音響性能として吸音性に加えて拡散性を新機軸に据えた二元的室内音響設計スキームの構築を見据え、設計の各段階に対して以下のように目的を設定した。

- **基本設計** 設計案の作成に資する予備的知見として、室条件が音場に及ぼす空間・時間・周波数の各領域に亘る多面的な影響を把握すること。
- **残響予測** 壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論の適用性を明らかにし、非拡散音場における室内残響の簡易予測精度を向上すること。
- **音場評価** 音場の拡散性及び音響障害（エコー）に関する効率的かつ定量的な分析評価手法を考案すること。

### 2. 室条件が音響特性に及ぼす基礎的影響の把握

室形状・吸音分布・壁面拡散を変化させた室条件（図1）を設定し、音響特性への影響を2次元FDTD法により把握した。垂直入射吸音率は反射面で0.1、吸音面で0.5である。拡散体は三角波形状（小：底辺0.20m/高さ0.06m、大：1.60m/0.48m）であり、乱反射率の周波数特性を図2に示す。以下、室形状と壁面拡散に関する結果を示す。

## 2.1 音響伝搬性状 室 A/B/K/O

について音源放射後 0.1 s 時の音圧分布を図 3 に示す. 正方形室では波面が空間内に比較的均一に伝搬しているが, 円形室では拡大と収縮を繰り返し, 局所的に波面が存在している. 拡散体の設置により波面が分割され空間を波面で均一に満たす効果が見られる. 特に円形室で顕著であり, 室条件の相互的な依存性が確認された.

## 2.2 室内音響指標

表す聴感印象や算出処理の異なる指標について, 値の周波数特性や空間分布を求め, 室条件の影響を調べた.

図 4 に, 室条件の変化に対する各指標の感度を弁別閾に対する変化量として表す. 全体的に残響感に関する残響時間  $T_{30}$  や明瞭性に関する時間重心  $T_s$  の感度は高く, 空間印象に関する  $J_{LFC}$  は低い. 室 A (正方形/拡散体なし) に対して室 B (円形/なし) は残響が顕著に長く, 明瞭性が低いが, 拡散体を設置 (室 N/O) することで大幅に改善する. 室 A に拡散体を全面に設置した場合 (室 J/K) では概ね同様に残響を抑制し, 明瞭性を高める効果が表れているが, 対向 2 面に設置した室 L では残響を助長している. これは拡散面での拡散反射成分が平滑面間の鏡面反射成分に転化したためであり, エコーの発生が懸念される.

## 2.3 音場の拡散性

狭義の定義による空間的評価だけでなく, 周波数・時間の各領域に亘る解釈に基づく評価を行った. 図 5 に累積音響ポテンシャルエネルギーの相対分散  $NV$  の時間変化を残響減衰曲線とともに示す. 円形室に比べて正方形室の値が小

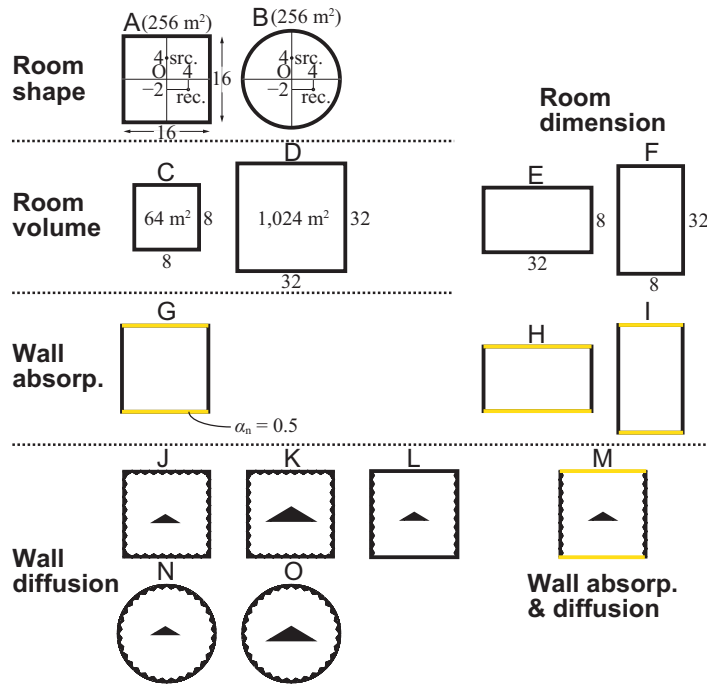


Figure 1: Room conditions.

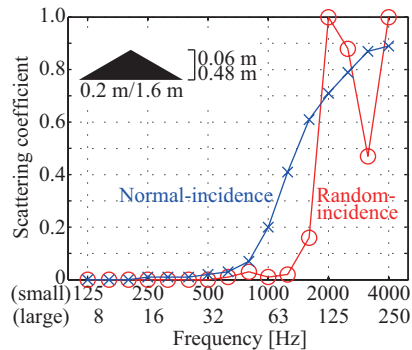


Figure 2: Scattering coefficients of diffusers.

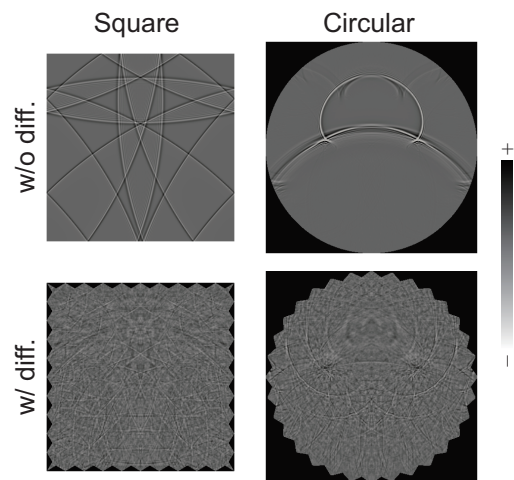


Figure 3: Sound pressure distributions.

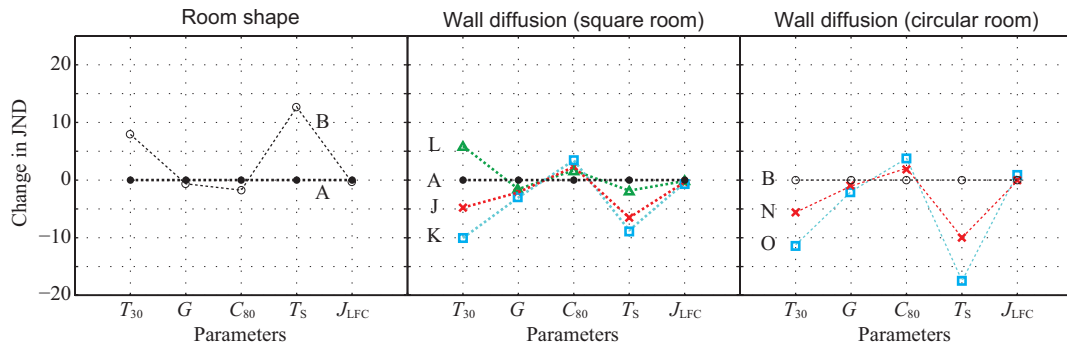


Figure 4: Change in room acoustic parameters across different room conditions.

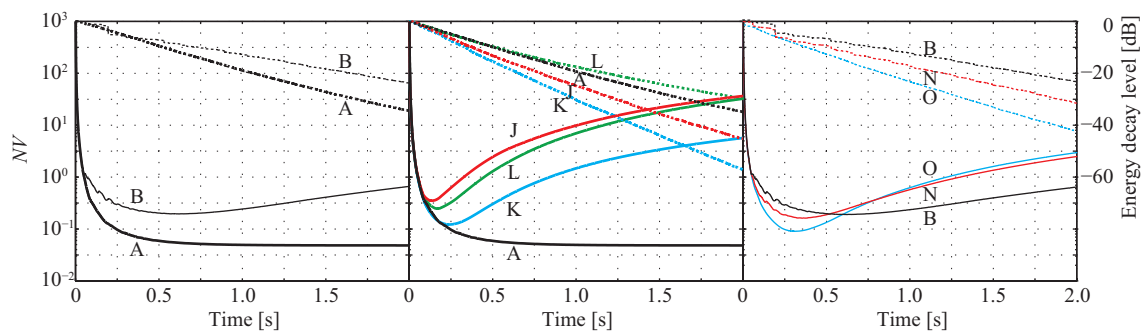


Figure 5: Normalized variance  $NV$  for cumulative acoustic energy and energy decay curves.

さく、拡散性が高いことは図3と対応するが、拡散体を設置した場合に時々刻々と拡散性が低下する傾向が見られる。これは拡散面の近傍で微小な干渉縞が生じるためであり、聴衆を想定した区域では拡散性が向上しているものと推察される。また、音波の到来方向分布や周波数応答関数、反射音の時間構造から音場の拡散性に関する指標を算出した結果、いずれも同様の傾向が表れたことから、必ずしも空間的観点に基づかない分析評価の可能性が示唆された。

### 3. 非拡散音場の室内残響に関する簡易予測理論の適用性検証

壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論 [1]の適用性を検証した。本理論は、音波の波動性を無視した幾何音響理論（鏡像法）に基づく近似理論であり、1) 周波数依存の臨界角を導入して鏡像音源を1次元・2次元・3次元成分に区分し、2) 乱反射率を

導入して鏡面反射場と拡散反射場に分解して導かれる。結果的に残響は、見かけ上、鏡面反射成分7種（斜め方向、各面近傍、各軸近傍）とそれらの一部が転化した拡散反射成分の計8種の指数減衰で構成される。計算には入射角依存（垂直・乱・擦過入射）の吸音率及び乱反射率が必要となる。

**3.1 理論的考察** 測定が困難であるためデータベースが希薄な入射角依存の物性値の推定について、吸音率はParis式に基づく理論的近似、乱反射率は境界要素法に基づく数値解析による方法を示した。

**3.2 幾何音響解析による検討** 近似精度を検討した。鏡像法により鏡面反射場の検討を行い、臨界角で区分された各成分の傾向が対応することを示し、鏡像音源の減衰率分布等により現象の理解を深めた。音線法により拡散反射場を含む総合残響の検討を行い、壁面拡散の影響傾向を捉えること

を示した。室アスペクト比と吸音分布が異なる室（容積  $1000 \text{ m}^3$ ，等価吸音面積  $210 \text{ m}^2$  で一定）で乱反射率を変化させたときの残響時間を図 6 に示すが，本理論は音線法に追従しており既往の理論に比べ優位である。

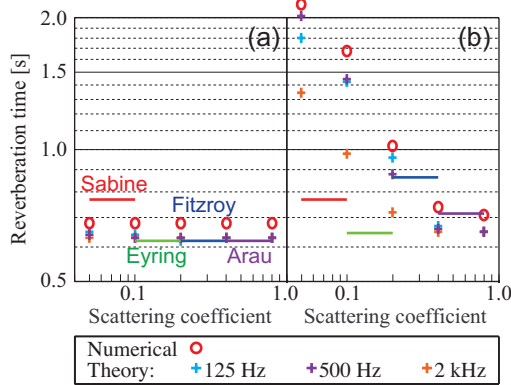


Figure 6: Reverberation times  $T_{30}$  (-5 to -35 dB): (a) cubic room with uniform absorption, (b) rectangular room with nonuniform absorption.

**3.3 波動音響解析による検討** 波動場への適用性を FDTD 法により検討した。

**2次元平行壁間残響** 本理論から平行壁間における残響時間の予測式を導出し，ケーススタディを行った。また，FDTD 法の結果から，平滑面間における周波数特性を有する残響時間の予測図表を作成した。

**2次元矩形室内残響** 表 1 に示す通り室寸法比と吸音分布を変化させ，壁面条件として拡散体なし (FF)，x 方向壁に 1 面設置 (DF)，2 面設置 (DD) の 3 種を設定した。

拡散体は矩形波形状 (0.1 m 角/0.2 m 周期) である。理論計算には，波動場の室端部で生じる散乱反射を乱反射率として付加する以下のモデルを適用した。付加乱反射率は壁の両端を考慮すると次式で表される。

$$s_{\text{edge}} = 0.5 \times 2l_{\text{edge}} / L_{x(y)}, \quad (1)$$

但し， $l_{\text{edge}} = \lambda/4$ ， $\lambda$  は波長。壁面の実効的な乱反射率は  $s_{\text{eff}} = s_{\text{surf}} + s_{\text{edge}}$ ，if  $s_{\text{eff}} < 1$  ; otherwise  $s_{\text{eff}} = 1$  とする。図 7 に拡散体及び

端部散乱の乱反射率を示す。図 8 に示す残響時間の結果から以下が明らかとなった。

- 全面反射性室に拡散体を対向 2 面に設置した場合 (Case O/Type DD) には，鏡面・拡散反射場の可逆性により，本理論の適用が不可能であること。
- その他の室条件では解析値と傾向は概ね類似するが，絶対値に乖離が見られ，特に低音域で顕著であること。
- 端部散乱の影響を考慮することで大幅に解析値に接近し，実用的なパラメータの設定方法として有効であること。

その他，同定区間，拡散体形状，拡散体の実効的な吸音の影響，臨界角の範囲に関する検討を行った。

**3次元矩形室内残響** 同一の拡散体の設置方法を変化させた結果，残響減衰は大きく依存することを示し，この変動内に本理論値が概ね含まれることが明らかとなった。

**4. 室内インパルス応答における反射音構造の分析評価に関する検討**

少数点計測による音場拡散評価及びエコー一定量化のための分析評価手法を考案した。

Table 1: Room conditions.

Case	$L_x$	$L_y$	$\alpha_x^n$	$\alpha_y^n$	Wall Type
O	8	8	0.05	0.05	FF/DF/DD
A	4	16	0.05	0.80	FF/DF/DD
B	8	8	0.05	0.80	FF/DF/DD
C	16	4	0.05	0.80	FF/DF/DD

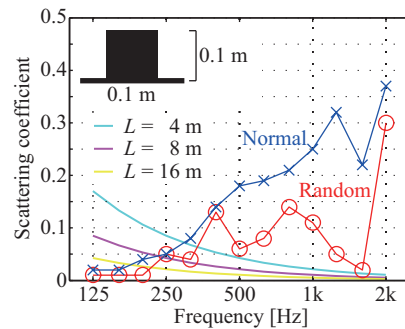


Figure 7: Scattering coefficients of diffusers and additional values for edge scattering.

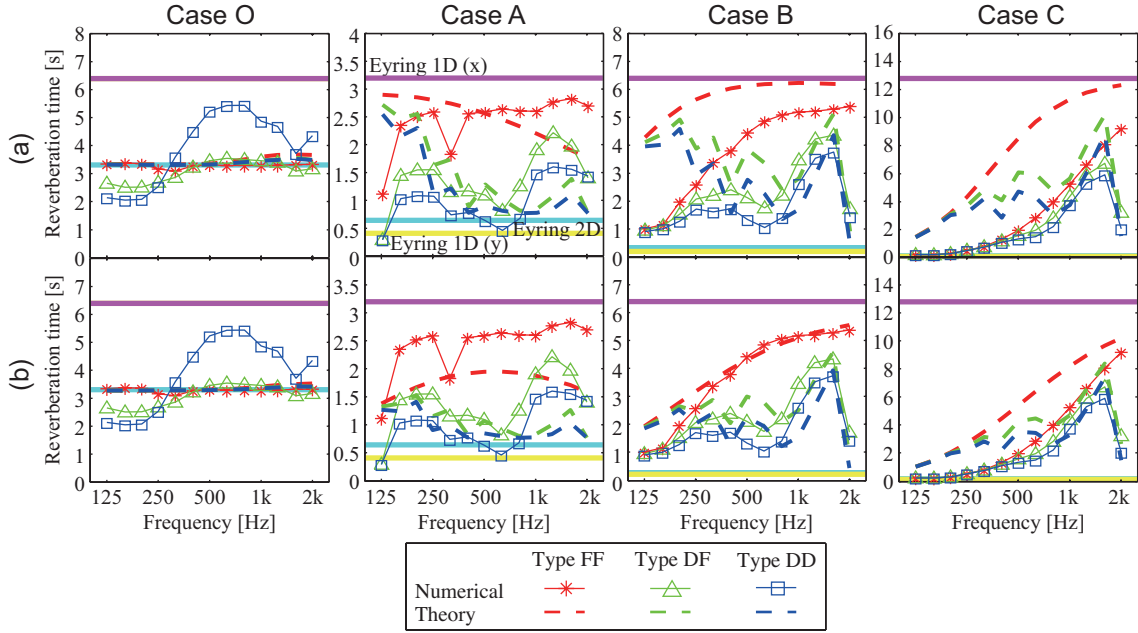


Figure 8: Reverberation times  $T_{30}$  (-5 to -35 dB): (a) without and (b) with edge scattering.

#### 4.1 理論的考察

**反射音構造の抽出** Jeong *et al.* [2]は残響減衰曲線の平均的な減衰率に対する瞬時の減衰率の比を減衰率比 ( $d(t) = D(t)/\bar{D}$ ) と定義した。瞬時減衰率は次式で与えられる。

$$D(t) = \{L(t + \Delta t_s) - L(t)\} / \Delta t_s, \quad (2)$$

但し,  $L(t) = 10 \log_{10} E(t)$ ,  $E(t) = \int_0^\infty I(\tau) d\tau$ ,  $I(t)$  はエネルギーインパルス応答,  $\Delta t_s = 1/f_s$ ,  $f_s$ : サンプル周波数.  $\Delta t_s \rightarrow 0$  のとき,

$$D(t) = \frac{dL(t)}{dt} = -\frac{10}{\ln 10} \frac{I(t)}{E(t)}, \quad (3)$$

となり, Hanyu [3]が提案する減衰除去インパルス応答と係数を除いて一致する。減衰率比の算出に際しては, 湾曲減衰時に  $\bar{D}$  は評価区間に依存する懸念がある。

**ピーク減衰率比の近似** 容積  $V$  の室内にある点音源から時刻  $t = 0$  に帯域制限されたパルス (単位エネルギー1, エネルギー対ピーク比  $\eta$  [1/s]) が発せられることを想定する。鏡像法に基づき, また反射音が同時刻に到

来しないことを仮定すると, 結果的に減衰率比は次式で表される。

$$d_{\text{peak}}(t) = \eta \frac{V}{4\pi c^3 t^2} = \eta \Delta t_r, \quad (4)$$

但し,  $c$  は音速,  $\Delta t_r$  は平均反射音間隔であり,  $d_{\text{peak}}$  は時間の逆二乗で単調減少する。尚, 臨界時刻  $t_c = \sqrt{\eta V / 4\pi c^3}$  以降では仮定が満たされないため不适当である。

**周波数帯域分析の影響** 帯域通過型 FIR フィルター (BPF) のエネルギー対ピーク比  $\eta$  は中心周波数  $f_0$  に比例すること, フィルター長, 帯域幅, 窓関数に依存すること, フィルターのオーバーラップの影響により  $d_{\text{peak}} = 10$  以下で変動が生じることを明らかにした。

**4.2 幾何音響解析による検討** 近似理論値と対応し, 減衰率比は室容積及び中心周波数に比例すること, 壁面拡散を施すと理論値に接近することを示した。また, 非線形回帰曲線を用いて残響減衰曲線の湾曲を考慮した算出手法を提案した。



### 4.3 波動音響解析による検討

**基本傾向** 図9に室A/B/J/N(図1)の減衰率比を示す。正方形室に比べ円形室では特に初期に突発的な反射音が到来しているが、拡散体の設置後は乱反射率の周波数特性に応じて抑制されることが表れている。

**音場評価** 減衰率比の基本的性質の把握と音場評価のため基本統計量(変動係数 $C_v$ , 尖度 $\beta_2$ )を求めた。 $C_v$ は反射音の不均一性

を、 $\beta_2$ は突発性を表し、音場の拡散性とエコーにそれぞれ関係すると考えられる。減衰率比に基づく音場拡散に関する既往の指標(transition time [2], 99パーセンタイル [3])に比べ感度が高いこと、閾値への依存性がないこと、空間分布の安定性が高いことを示した。図10は図1の条件に関する結果を2次元配置したものであり、室条件に関する知見に概ね則した傾向が得られた。

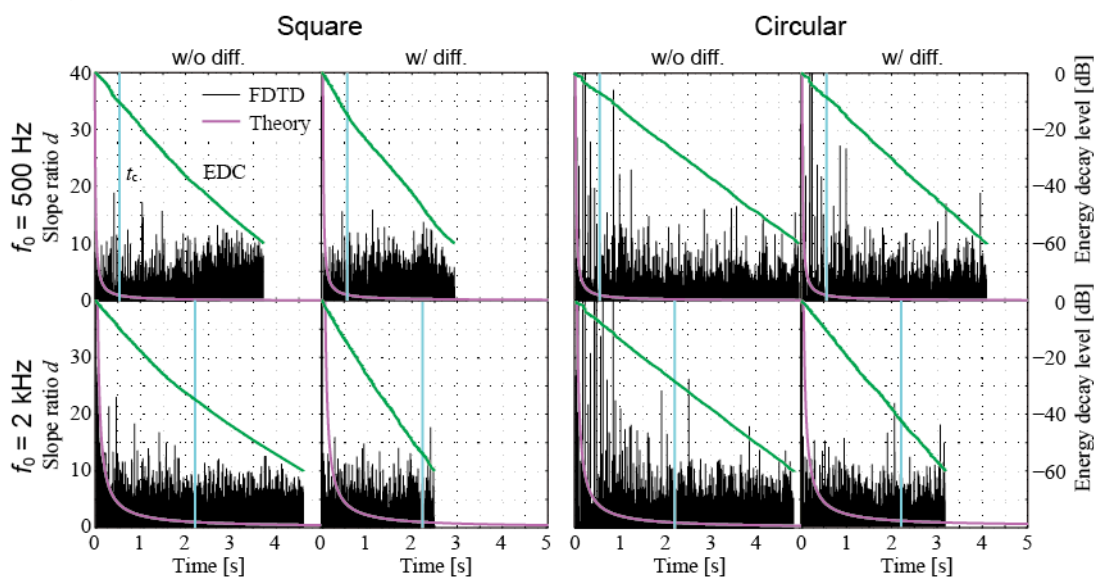


Figure 9: Slope ratios and energy decay curves.

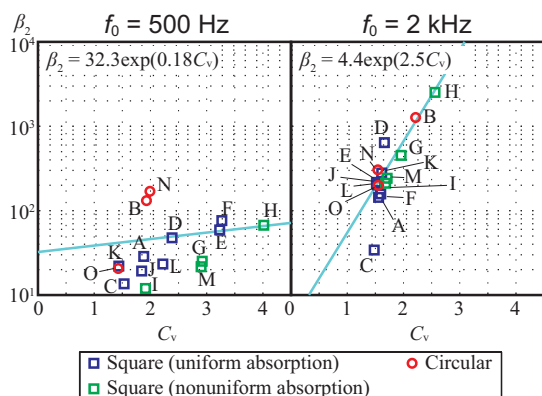


Figure 10: Coefficient of variation and kurtosis.

### 5. 総括

室内音響設計の確実性及び自由度を向上するためには、要素分解した室条件と音響特性の因果関係を明確にする必要がある。

本研究は壁面拡散に基づく定量的設計範囲を拡大し、その一部に貢献するものと考えている。音場の物理的側面の基礎となる音場の拡散性は様々な解釈に展開されており、一点に依らずとも収束が求められる。第6章で提案した分析評価手法は現象把握の促進に寄与し、他方では音響試験室性能の定量化等に展開するものと期待できる。但し、聴感との対応関係までは検討しておらず、さらには人間心理に基づく望ましい音環境の探求は大きな課題として残されている。

### 参考文献

- [1] T. Sakuma, *J. Acoust. Soc. Am.*, **132**, 2325 (2012).
- [2] C.-H. Jeong *et al.*, *J. Acoust. Soc. Am.*, **132**, 1427 (2012).
- [3] T. Hanyu, *Build. Acoust.*, **21**, 125 (2014).