

論文の内容の要旨

論文題目：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

氏名：江田 和司

第1章 序

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基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。

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音響設計スキームの構築を見据え、室内音響設計の各段階に対して以下のように目的を設定する。**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時間・空間・周波数の各領域に亘る多面的な影響を把握すること（第4章）。**残響予測**：壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論 [1]の適用性を明らかにし、室内残響の簡易予測精度を向上すること（第5章）。**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（第6章）。

第2章 室内音響特性の評価理論

室内音響に関する基礎事項を述べた上で、室内音響特性に関する評価理論を、室内音響指標、残響理論、音場の拡散性の各観点から整理し、本研究の既往関連研究を概観した。

第3章 音響解析手法

本研究で用いる音響解析手法である鏡像法・音線法及び FDTD 法に関する基礎理論を概説し、解析に関する設定方法に関する基本的な検討を行った。

第4章 室条件が音響特性に及ぼす基礎的影響の把握

音響伝搬性状 音場の様々な可視化を行い、室条件と壁面拡散の影響を観察した。正方形室に比べて円形室は、室内インパルス応答に突発的な反射音が表れ、音圧等の空間分布では波面が周期的に拡大と収縮を繰り返すことわかり、壁面拡散の影響が大きいことが示された。仮想音源分布や音波の到来方向分布からも関連する傾向が確認され、現象の理解を深めた。

室内音響指標及び音場の拡散性 室形状、壁面分布、壁面拡散を様々に変化させ、表す聴感的特徴や算出処理の異なる室内音響指標及び音場の拡散性の程度を示す指標を算出し、時間・空間・周波数の各観点から室条件の影響を検討した。壁面拡散の影響に関しては、室形状や壁面吸音に強く依存することが示され、室内音響指標への影響は残響時間 (T_{30}) 及び時間重心 (T_S) の変化が顕著に見られた (図2)。音場の拡散性への影響は必ずしも向上する側に働かなかったが既往の評価手法を再考する必要性が示唆された。

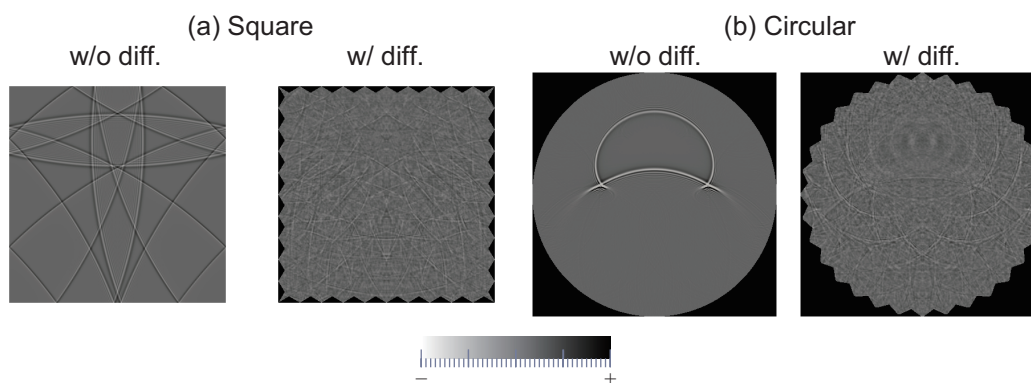


Figure 1. Visualization of sound pressure propagation in different room shapes: (a) square, (b) circular, without and with triangular diffusers.

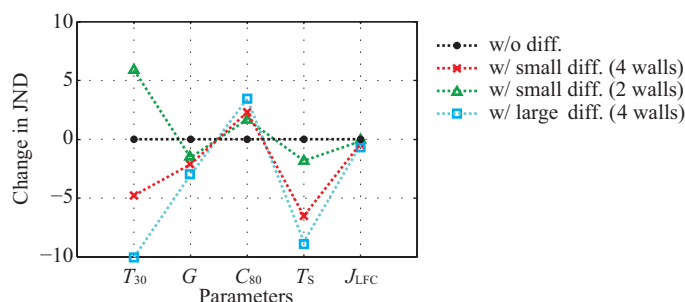


Figure 2. Change in room acoustic parameters across different wall conditions in a square room, expressed as number of just noticeable difference

第5章 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は幾何音響理論に基づく近似理論であるが、乱反射率及び周波数特性を有するパラメータ (臨界角 θ) が導入されている。本章では、近似の妥当性を理論的考察及び幾何音響解析との対応に関する検討により明らかにした。また、データ

ベースの少ない入射角度依存の吸音率及び乱反射率の推定方法を示した。さらに、波動音響解析を通じて理論の波動場への適用性を検討した結果、必ずしも良好な対応が示されなかったが、室稜線で生じる端部散乱の影響を乱反射率として付加することや臨界角の範囲を拡大することで予測精度が大幅に向上することを明らかとした(図3)。但し、理論では想定していない鏡面・拡散反射成分の可逆性を示す条件では予測が不可能であることを示した。その他、検討を通じて、平行壁間の残響時間予測図表の作成、拡散体の形状・設置方法に関する知見を取得した。

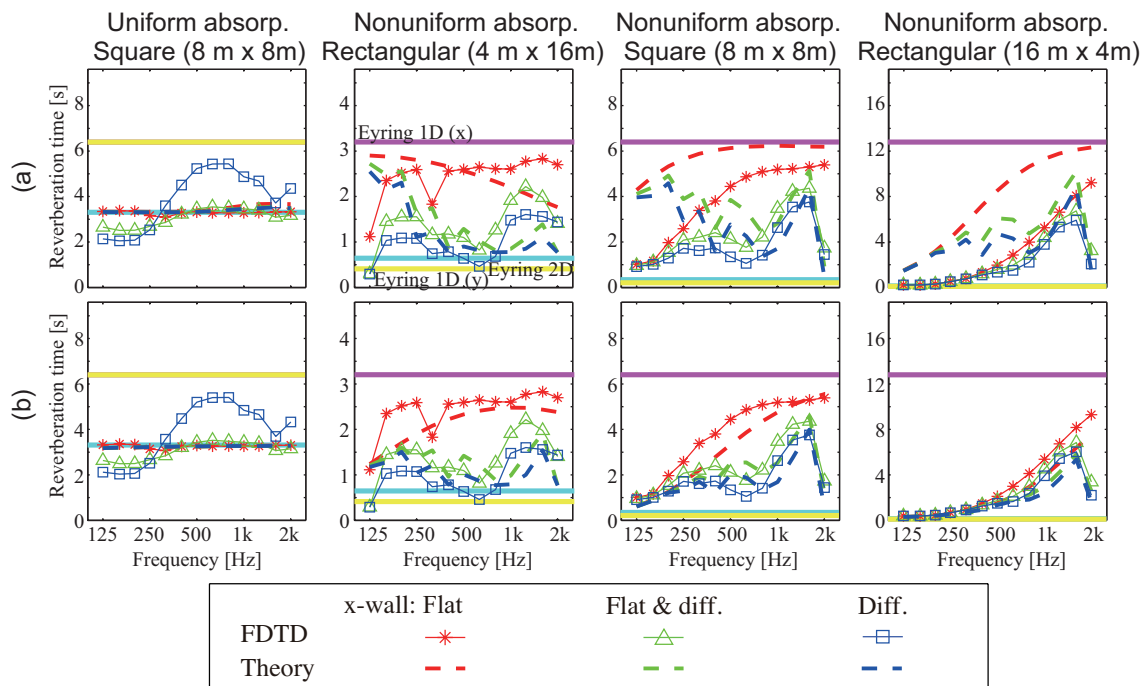


Figure 3. Reverberation times T_{30} (-5 to -35 dB) calculated by the FDTD method and by the approximation theory: (a) the original theory, (b) with 4θ and with edge scattering.

第6章 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

音場の拡散性に関しては多数点計測の必要から系統的な知見の取得が困難であり、エコーに関しては主に定性的な評価が行われている。本章では、室内インパルス応答の反射音構造に着目して音場の拡散性及びエコーに関する効率的かつ定量的な分析評価方法について検討した。第一に、室内インパルス応答から反射音構造を抽出する既往の手法を理論的に考察し、一部新たな手法を提案した。また、残響減衰曲線を用いる既往の2種類の手法 [2,3]が数学的に等価であることを示した。以降では残響減衰曲線を用いる手法で得られる減衰率と称する量に着目し、音響数値解析によるケーススタディ(図4)を通じて影響要因を明らかにするとともに、湾曲減衰時における減衰率比の新たな算出方法を提案した。第二に、減衰率比の基本的性質を把握するために基本統計量(変動係数 C_v 、尖度 β_2)を算出し、音場評価のための指標化の可能性を検討した。その際に波動音響解析を用いて指標の安定性、既往の指標との比較、室条件による

影響（図5）を検討し、室内音響測定への適用例を示した。結果として、減衰率比に基づく音場評価指標として基本統計量を用いることで、少数点計測による音場の拡散性に関する評価及びエコーの定量的評価が可能であることが明らかとなった。

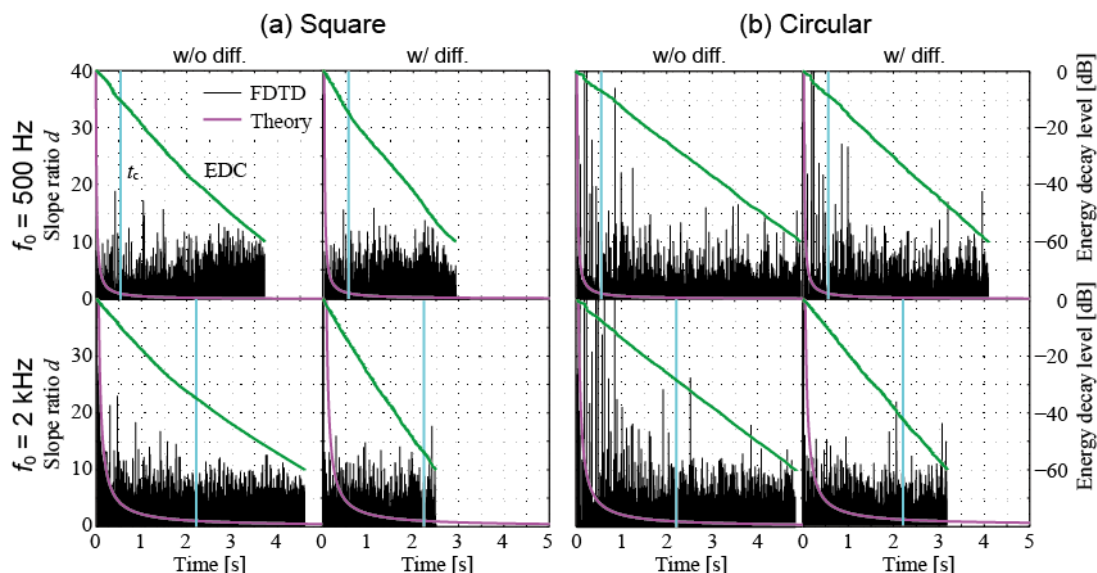


Figure 4. Energy decay curves and slope ratios calculated by the FDTD method at 500 Hz and 2 kHz in 1/1 octave bands: (a) square room, (b) circular room, without and with triangular diffuser.

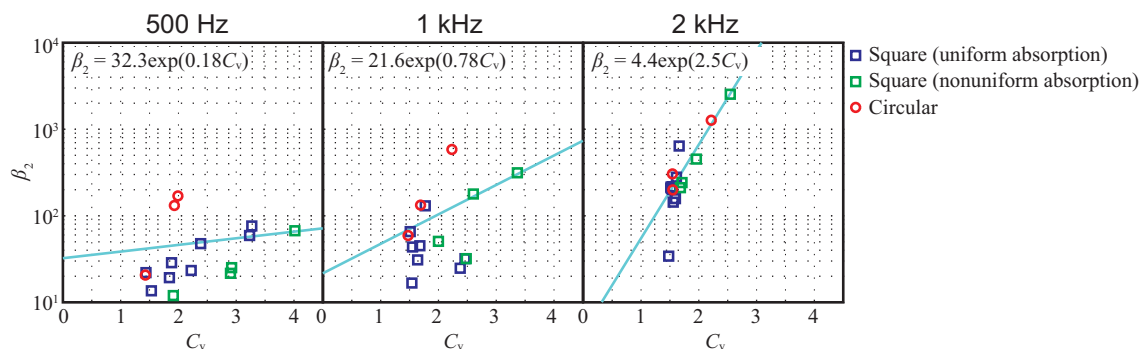


Figure 5. Coefficient of variation (C_v) and kurtosis (β_2) of slope ratios.

第7章 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でき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**, p. 2325 (2012). [2] C.-H. Jeong, *et al.*, *J. Acoust. Soc. Am.*, **132**, p. 1427 (2012). [3] T. Hanyu, *Build. Acoust.*, **21**, p. 125 (2014).