

博士論文

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

江田 和司

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻

2014 年 12 月

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

江田 和司

目次

第 1 章	序	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	5
1.3	論文構成	5
第 2 章	室内音響特性の評価理論	9
2.1	緒言	9
2.2	室内音響に関する基礎事項	10
2.2.1	音場の基礎方程式	10
2.2.2	閉空間内における音響伝搬	12
2.2.3	室内インパルス応答	13
2.3	室内音響指標	16
2.3.1	時間的観点	16
2.3.2	エネルギー的観点	19
2.3.3	空間的観点	24
2.3.4	周波数的観点	26
2.3.5	小結	28
2.4	残響理論	31
2.4.1	任意形状室の残響理論	32
2.4.2	矩形室の残響理論	37
2.5	音場の拡散性	48
2.5.1	空間的観点	50
2.5.2	周波数的観点	54
2.5.3	時間的観点	55
2.5.4	領域横断的観点	58
2.6	結言	60
第 3 章	音響解析手法	61
3.1	緒言	61
3.2	幾何音響解析	62
3.2.1	鏡像法	62
3.2.2	音線法	63

3.3	波動音響解析	65
3.3.1	時間領域有限差分法	65
3.4	結言	75
第 4 章	室条件が音響特性に及ぼす基礎的影響の把握	77
4.1	緒言	77
4.2	音響伝搬性状への影響	78
4.2.1	室内インパルス応答	78
4.2.2	空間分布	80
4.2.3	方向分布	83
4.3	室内音響指標への影響	84
4.3.1	時間的観点	85
4.3.2	エネルギー的観点	87
4.3.3	空間的観点	94
4.3.4	指標間の比較	96
4.4	音場の拡散性への影響	97
4.4.1	空間的観点	97
4.4.2	周波数的観点	100
4.4.3	時間的観点	101
4.5	結言	102
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	105
5.1	緒言	105
5.2	理論的考察	106
5.2.1	ケーススタディ	106
5.2.2	鏡面反射場における平均自由行路の近似	110
5.2.3	垂直・擦過入射吸音率の推定	111
5.3	幾何音響解析による壁面拡散のない室内の残響に関する検討	113
5.3.1	検討方法	113
5.3.2	結果と考察	115
5.4	幾何音響解析による壁面拡散のある室内の残響に関する検討	124
5.4.1	検討方法	124
5.4.2	結果と考察	124
5.5	波動音響解析による 2 次元平行壁間残響に関する検討	130
5.5.1	検討方法	130
5.5.2	結果と考察	133
5.6	波動音響解析による 2 次元矩形室内残響に関する検討	137
5.6.1	検討方法	137
5.6.2	結果と考察	140
5.7	波動音響解析による 3 次元矩形室内残響に関する検討	156
5.7.1	検討方法	156
5.7.2	結果と考察	157
5.8	結言	161

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	163
6.1	緒言	163
6.2	理論的考察	164
6.2.1	室内インパルス応答の減衰除去	164
6.2.2	鏡像法に基づく減衰率比の定式化	170
6.3	幾何音響解析による検討	174
6.3.1	室容積と周波数帯域分析の影響	174
6.3.2	壁面拡散の影響	176
6.3.3	残響減衰曲線の湾曲の影響	178
6.4	波動音響解析による検討	180
6.4.1	室形状の影響	180
6.4.2	壁面拡散の影響	180
6.5	音場の拡散性及びエコーに関する評価	181
6.5.1	減衰率比に基づく指標	181
6.5.2	室条件が及ぼす影響	187
6.5.3	室内音響に関する既往指標との関係	189
6.6	室内音響測定への適用例	192
6.6.1	会議室における検討	192
6.6.2	執務室における検討	196
6.6.3	ホールにおける検討	198
6.6.4	指標値による比較	200
6.7	結言	201
第 7 章	総括	203
7.1	研究の成果	203
7.2	今後の展望・課題	205
付録 A	壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論: 2 次元音場における定式化	207
参考文献		215
図目次		231
表目次		235
業績		237
謝辞		239

第 1 章

序

1.1 研究背景

音環境とその設計 音環境は人間の暮らしを取り巻く環境要素の 1 つである．従って，その適切な設計は人間が快適な生活を営むための重要な前提とも言える．音は情報伝達や音楽文化として有効に利用される一方，道路・鉄道・航空機・工場などに由来する音は人間の住環境を害している．即ち，音には我々の生活に必要な音と不要な音，また快い音と不快な音，そして安全性・機能性・快適性等の面で良し悪しがある．音環境に対する要求は空間の用途により異なるため，その設計に際しては音が有するこれらの特性を考慮し，最適に行うことが必要である．

音響設計は騒音防止設計と室内音響設計とに大別することができる^[330]．騒音防止設計は，1) 騒音源対策（騒音源の抽出・定量化），2) 伝搬系対策（伝搬経路の判定，建築・室・部材等の配置計画，遮音・吸音計画），3) 受音系対策（受音点での評価）といった各段階がある．一方，室内音響設計は直接音・反射音を室形状・吸音・壁面拡散によって空間的・時間的・周波数的に制御することであり，その目標として，1) 音響障害の防止，2) 用途に適した響きの確保，3) 滑らかな残響曲線，4) 平坦な周波数特性，5) 音場の一様な分布，等が挙げられる．騒音防止設計はその目標や達成の程度を騒音レベル等の客観的な数値に依ることができるが，室内音響設計は個々人の聴感による判断が伴う．

音響に特別の配慮が必要な室には多様な種類がある．演奏を行うコンサートホールやオペラハウスをはじめ，練習を行うリハーサル室や楽器練習室，録音及び編集を行うスタジオ等が存在する．今日の我が国ではコンサートホールやオペラハウスの普及は飽和しつつあるが，ホームシアターやオーディオ・リスニングルームといった家庭における室への関心は高まっている．楽音に関する室の他には，話声の伝達を目的とする講堂や教室，会議室等が挙げられる．多様な室の用途・規模及び利用者の立場（演奏者・聴取者）に依存する望ましい音環境を実現するためには，聴感印象と対応する室内音響指標の考案及びそれ

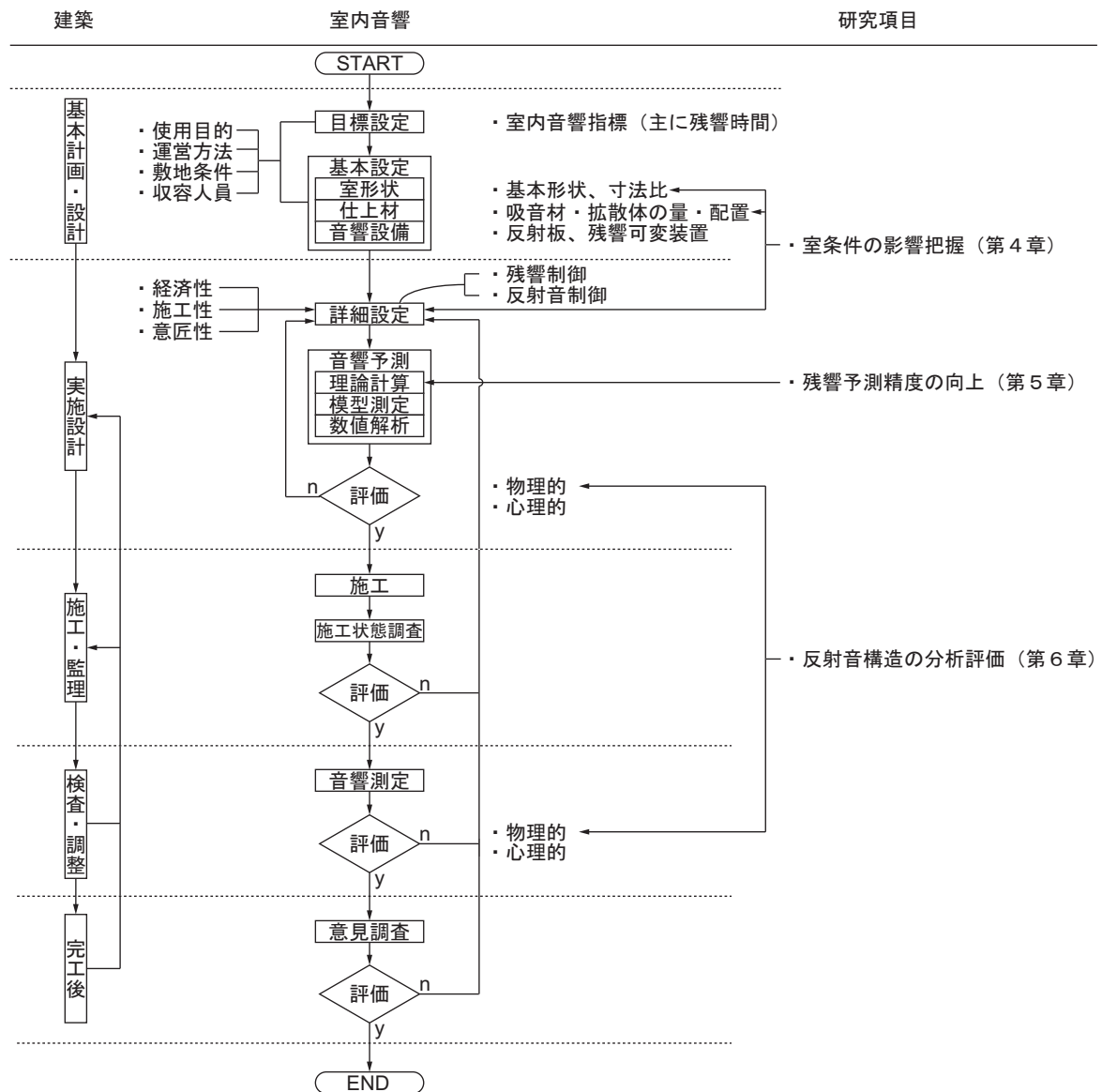


Figure 1.1 The relation between architectural and acoustic design processes.

を制御するための室内音響設計スキームを確立することが重要である。

室内音響設計は建築設計の各段階で連携して行われる(図 1.1)。その基本手順は、諸条件や既往の知見に基づいて設計案を作成し、音響性能の予測と評価を行い、設計案へのフィードバックを繰り返しながら適切な空間形状や材料を選択する。一般に、設計者や所有者は審美面や機能面で独創性を求めるため、最適な音環境を実現できる普遍的な設計手法は存在しない。また、経済的負担や技術的制約が大きく施工後の改修は困難であるため、室条件が音場に及ぼす影響に関する知見の蓄積や音響性能の予測・分析の高精度化等により、設計段階での確実性を向上することが重要である。

室内音響設計と拡散音場 室内音響学の歴史は 19 世紀末に W. C. Sabine が見出した残響理論^[227] に始まり、その後学術と実務の大いなる展開を経て、特にホール音響設計に関しては多岐にわたる知識の総体を「コンサートホール音響学」^[25] と称するまでに至っている。昨今建設されるコンサートホールに目立った失敗を見つけるのが難しいことはその一つの到達点と言えよう。しかしながら設計スキームとして俯瞰した場合、残響時間や室形に関する全体レベルの設計指針は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く、効果的・効率的な設計が行われているとは言い難い。

また、室内音響に関する多面的な聴感印象（明瞭性、音量感、拡がり感等）を評価するため、多数の音響指標（ C_{80} 、 G 、 J_{LF} 等）が提案され、測定法の整備^[132] とともに実務現場への普及^[326] も進んでいる。しかしながら、室内音響指標と部位音響性能との関係性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潔な予測ができるが、その基礎となる残響理論は拡散音場という理想的な仮定に基づいて構築^[227]・発展^{例えば[85]}してきた。拡散音場とは、音響エネルギーの 1) 密度が一樣、かつ 2) 伝搬方向が等確率である状態として定義^[227,243]され、現実にはこの仮定を厳密に満たす室は存在せず、古典的な残響理論の適用性は限定的である。例えば、吸音が偏在した矩形室では古典的残響式を用いた場合、特に中高音域で誤評価が生じることが知られている^[286]。一般に、音場の拡散性の低下は速やかな残響減衰を妨げ、また音響的な障害であるフラッターエコーの発生を促す等、室内音響設計時の基本的な目標の達成を妨げる。さらに、各種音響性能の測定は拡散音場を前提とするため、音響試験室（残響室）内の拡散性は測定精度を大きく左右する。

従来の室内音響設計では、残響制御の観点から、壁面の部位音響性能として吸音率のみを機軸として行われてきたが、近年、新たな手掛かりとして壁面の拡散性と呼ばれる性能が注目されている。壁面拡散は音場の拡散性を高め、残響時間を低下する側に働き、またフラッターエコーを抑制するが、室形や吸音分布に大きく依存する^[64,165,281]。不均等吸音の矩形室では壁面拡散の影響が大きくなりやすいのに対して、均等吸音の不整形室では影響が小さいことが知られている。壁面の拡散性は室内音響設計の自由度を高め（図 1.2）、所望の音環境の実現に資するものと期待される。

壁面の拡散性能を表す種々の指標が考案されているが、反射指向特性の均一性の程度を表すものと全反射エネルギーに対する拡散反射成分の割合を表すものの 2 つに大別される^[308]。後者に含まれる乱反射率^[188,280]は、その数値を幾何音響解析に反映させることにより壁面拡散が音場に及ぼす影響に関する簡易な検討を可能とした^[59]。幾何音響解析は設計実務において不可欠なツールであり、大半の商用プログラムでは乱反射率の入力を採用するようになっている^[2,49,53]。乱反射率の測定法については、既に ISO 17497-1^[130]

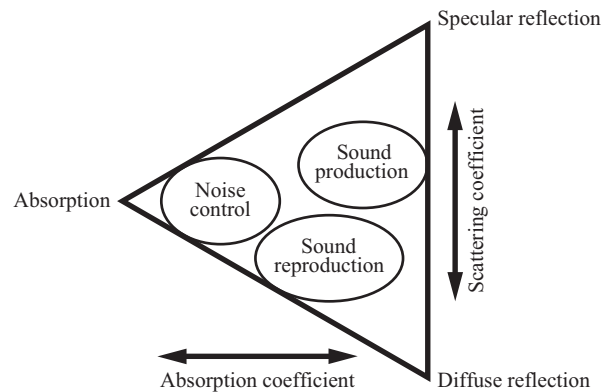


Figure 1.2 The relative importance of three acoustic treatments for sound production, sound reproduction and noise control (modified from the reference^[59]).

での規格化，数値解析による予測の実現化^[81,152,168]がなされ，乱反射率の測定データベースも蓄積^[294,317]されつつある．さらに，近年，矩形室に限られるものの，壁面の拡散性として乱反射率を考慮できる新たな残響理論が提案^[230]されるなど，非拡散音場の現象把握の機運が高まっている．

室内音響予測手法 室内の響きを予測する方法は，1) 理論計算，2) 数値解析，3) 縮尺模型測定に大別できる．従来，音響設計時には簡易な残響式等の統計音響理論を用いて吸音材の必要量等を見積り，1/10 から 1/50 程度の縮尺模型の測定を行うことで響きの質が検討されてきた．しかし，模型測定には不確定な誤差が混入する恐れがあり，また時間的・経済的なコストが大きいため，細かな設計変更を反映することが難しい．

これに対して，CAE (computer aided engineering) である音響数値解析の利点としては，1) 大掛かりな実験設備が不要，2) 任意形状，任意条件が扱える，3) 設計変更への対応が容易，といったことが挙げられる．音響数値解析は幾何音響的手法と波動音響的手法に大別される(図 1.3)．鏡像法と音線法に代表される幾何音響的手法は，音の波動性を考慮しないため厳密性に欠ける反面，多くの計算機資源を必要としないため現在でも大規模な空間を扱う際の現実的な手法として用いられている．一方，波動音響的手法は有限要素法 (finite element method, FEM)，境界要素法 (boundary element method, BEM)，有限差分法 (finite difference method, FDM) などに代表される．いずれも基本的に微分方程式あるいはそれと等価な積分方程式の近似解法であり，理論的に音の波動性を考慮したものであるため，周波数領域，時間領域ともに高精度な予測が可能である．波動音響解析は，幾何音響解析に比べて高精度な手法でありながらも，計算機コストの高さから主に研究レベルでの利用に留まっていたが，近年では計算機能力の向上に伴って設計実務における検討事例も増えてきている^[320]．

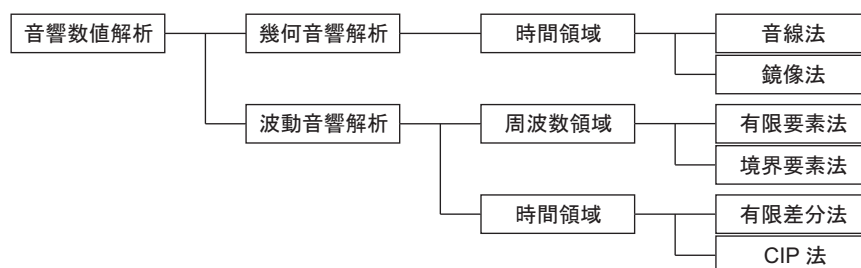


Figure 1.3 A classification of acoustic simulation methods.

1.2 研究目的

以上のような背景から，壁面の部位音響性能として壁面の拡散性に基づく音場制御は現状の吸音性に依存する室内音響設計の自由度を高め，所望の音環境の実現に資すると期待できる．しかしながら，壁面拡散が音場に及ぼす影響に関する定量的な知見が不足しているために，曖昧な経験判断に依存する設計が行われ，結果として設計の確実性の低下を招いていると考えられる．このような状況を踏まえ，本研究では，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（図 1.1）に対して以下のように目的を設定する．

- 基本設計 壁面拡散が音場に及ぼす影響に関して，他の室条件との相互作用を含めて時間・空間・周波数の各領域に亘る多面的な知見を取得し，設計案の作成に資する予備的知見を付与すること（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^[230]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（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）．

1.3 論文構成

本論文の構成を図 1.4 に示す．

第 1 章では，研究の背景の概観を行った上で，本研究の目的について述べる．また，本論文の構成について示す．

第 2 章では，室内音響に関する基礎事項を述べた上で，本研究に関連する既往研究として室内音響特性の評価理論を室内音響指標，残響理論，音場の拡散性に整理して概観す

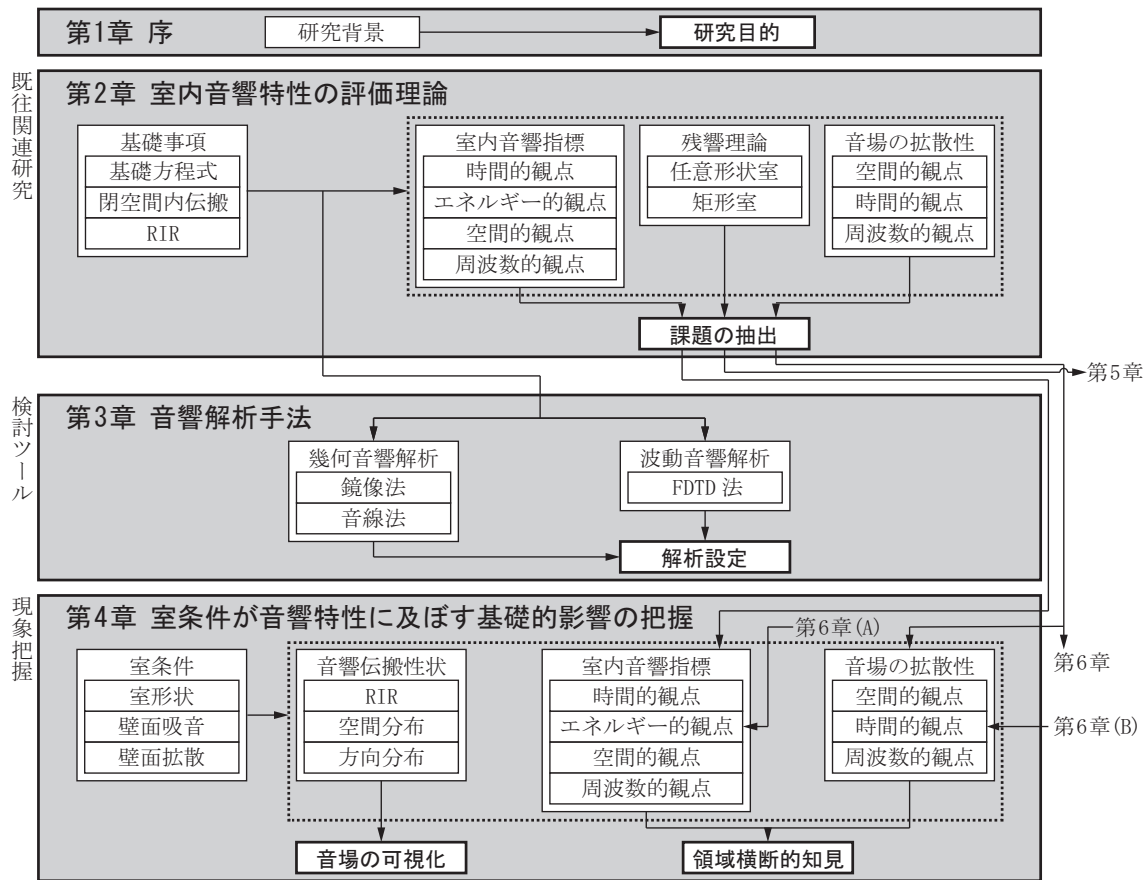


Figure 1.4 The flow chart of this thesis.

る．室内音響指標及び音場の拡散性に関しては，それぞれ時間・空間・周波数等の物理領域で分類し，各領域に亘る横断的な議論を行う．残響理論に関しては，Sabine 式を端緒とする古典的理論を紹介した後，壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論の定式化を行い，その適用性に係る課題を挙げる．

第3章では，本研究で使用する音場解析手法の基礎理論について述べる．幾何音響的手法として鏡像法及び音線法を，波動音響的手法として FDTD 法を取り上げ，解析設定に関する基礎検討を行う．

第4章では，室内音響設計時の基本設計段階における設計案の作成・修正に資する知見を得るため，室条件が音響特性に及ぼす基礎的影響を把握する．共通の室条件を設定した2次元 FDTD 法解析を行い，音響伝搬性状，室内音響指標，音場の拡散性に着目した分析を通じて，各々に関して時間・空間・周波数の各領域に亘る横断的な知見を取得する．

第5章では，基本設計において最も基礎的な情報の一つである残響に関する簡易予測精度を向上するため，壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論の適用性を検証する．理論的な考察及び音響数値解析との対応の検討を行い，理論上の近似精度の確認，必要パラ

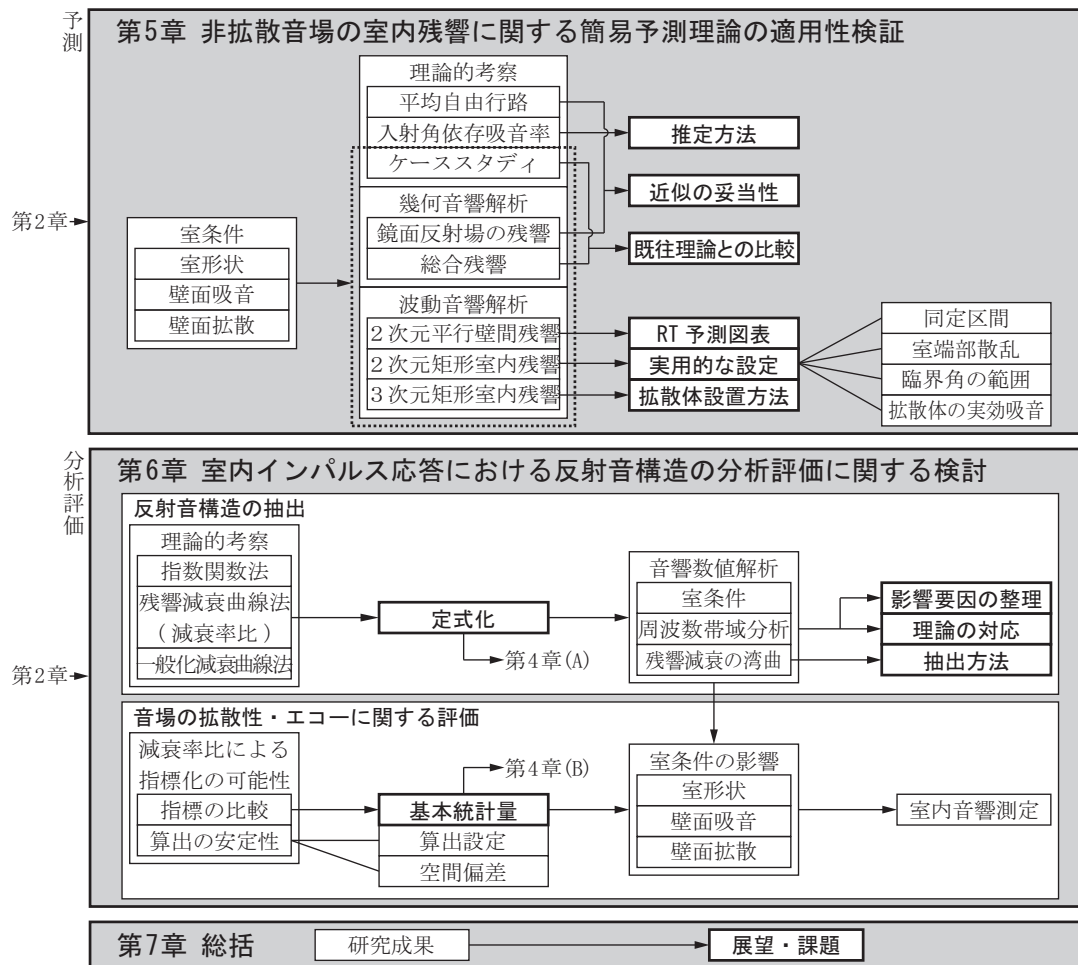


Figure 1.4 continued.

メーターの推定方法の考察，波動場への適用に際する実用的な計算方法の提案等を行う。

第6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分析評価手法について検討する．音場の拡散性については原則的に多点計測が必要であるため現象の把握が困難であるという課題があり，エコーについては多くの評価手法が定性的である懸念がある．本章で考案する分析評価手法は音場の拡散性の少数点計測及びエコーの定量的把握を目指すものである．検討は第一に，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する．その内の減衰率比と称する量に以後着目し，幾何，波動音響解析によるケーススタディを通じて影響要因を明らかにするとともに，減衰率比の新たな算出方法の提案を行う．第二に，基本統計量により減衰率比の基本的性質を把握し，音場評価指標としての可能性を検討する．その際に，波動音響解析を用いて指標の安定性，既往指標との比較，室条件による影響を検討し，室内音響測定への適用例を示す．

第7章は総括であり，本論文の成果とともに今後の展望及び課題について述べる．

第 2 章

室内音響特性の評価理論

2.1 緒言

音に関する研究は，音律や機械的な振動に着目して実験を行った Pythagóras of Sámios (前 570 年頃–前 495 年頃)，Aristotélēs (前 384 年–前 322 年) 等が端緒として挙げられる．Vincenzo Galilei (1520 年頃–1591 年) と Galileo Galilei (1564 年–1642 年) の父子は物理現象を数学的に記述する手法を発展させ，Marin Mersenne (1588 年–1648 年) の Mersenne 則，Robert Hooke (1635 年–1703 年) の Hooke 則，Leonhard Euler (1707 年–1783 年) の流体における運動方程式，Jean Le Rond d’Alembert (1717 年–1783 年) の d’Alembert の原理，Daniel Bernoulli (1700 年–1782 年) や Joseph Fourier (1768 年–1830 年) 等による重ね合わせの原理等，振動に関する定量的な知見が得られた．Ernst Florens Friedrich Cladni (1756 年–1827 年) は弦，棒，板，膜を対象とした振動に関する研究を行い，Mersenne とともに音響学の父と称される．音響学 (acoustics) という言葉は 1701 年に Joseph Sauveur (1653 年–1716 年) が初めて用いた^[223]．Mersenne や Pierre Gassendi (1592 年–1655 年) は音速を実験的に求め，理論的には Robert Boyle (1627 年–1691 年) の Boyle 則から Isaac Newton (1642 年–1727 年) は *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (1687 年) で空気の等温変化を仮定し，Pierre-Simon Laplace (1749 年–1827 年) は空気の断熱変化を仮定して求めている．19 世紀には，Alexander Graham Bell (1847 年–1922 年) が電話を，Thomas Alva Edison (1847 年–1931 年) が蓄音機を発明した．Ernst Heinrich Weber (1795 年–1878 年) や Gustav Theodor Fechner (1801 年–1887 年) は刺激強度と感覚の関係を定式化し，Johann Christian Doppler (1803 年–1853 年) は Doppler 効果を発見した．Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821 年–1894 年) は生理学的に，Joseph Henry (1797 年–1878 年) や Georg Simon Ohm (1789 年–1854 年) は電磁気学の知見を用いて音響学を発展させた．同時期に，Lord Rayleigh (1842 年–1919 年) は *The Theory of Sound* (1877 年) を著している．20 世紀初頭に，Wallace Clement Sabine (1868 年–1919

年)が残響理論を提案して室内音響学が萌芽した。その後, Philip McCord Morse (1903年–1985年), Richard Henry Bolt (1911年–2002年), Karl Uno Ingard (1921年–2014年)等は閉空間内の波動伝搬に関する知見を残している。

音を聴くための建築は, 音の研究史を超えて遡り, 古代ギリシアや古代ローマの野外劇場が起源とされ, 西洋では教会建築や音楽の様式とともに発展した。音楽専用ホールとしては, 西洋では1748年に Holywell Music Room が, 日本では1890年に東京音楽学校奏楽堂が初めて建設された。音に対する建築上の配慮については古代の野外劇場において既に, 客席を傾斜させ, 舞台の床を反射性とし, 周辺に壁を設置するなど, 直接音や初期反射音を伝達する重要性が経験的に知られていたと思われる。現存する最古の建築に関する文献である Marcus Vitruvius Pollio (前80年頃–前15年頃) の *De architectura* (前15年頃) には, 音響に配慮して野外劇場に壺を設置する旨が記されているが, 壺の存在は認められていない^[78, 173]。日本の能舞台においても床下に壺が置かれることがあり, これらは共鳴吸音が意図されていると思われる。17世紀には既に, Athanasius Kircher (1602年–1680年) が *Phonurgia Nova* (1673年) で, 室形状と音の反射の関係を幾何学的に検討しているものの, Palais Garnier を設計した Charles Garnier (1825年–1898年) は, 「私はどんな原理も用いていないし, 私の計画はどんな理論にも基づいていない。成功するかどうかは, ただ運に任せるしかない」(前川純一訳^[78])と述べており, 19世紀においても尚, 室内音響設計は経験則に大きく依存していたことがわかる。室内音響学の発生以降では, 建築と音響の物理的な関係に留まらず, 人間心理の多様性に根ざした評価手法に関する検討が続けられており, 音響設計の確実性や自由度が向上していると思われる。

本章では, 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 Sabine 以降の評価理論を, 室内音響指標, 残響理論, 音場の拡散性の各観点から整理する。

2.2 室内音響に関する基礎事項

2.2.1 音場の基礎方程式

3次元空間内の均質かつ粘性がない空気を伝搬する音波を想定する。時刻 t [s], 点 \mathbf{r} [m] における, 音圧 p [Pa] の空間微分と粒子速度ベクトル $\mathbf{v} = (u, v, w)$ [m/s] の時間微分の関係は, 運動の第2法則により運動方程式として次式で表される。

$$-\nabla p(\mathbf{r}, t) = \rho \frac{\partial \mathbf{v}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}, \quad (2.1)$$

但し, $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$, ρ は平衡状態における空気密度 [kg/m³]。また, 音圧の時間微分と粒子速度ベクトルの空間微分の関係は, 質量保存の法則により連続の式として次

式で表される．

$$-\nabla \cdot \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\kappa} \frac{\partial p(\mathbf{r}, t)}{\partial t}, \quad (2.2)$$

但し， $\kappa = \rho c^2$ は空気の体積弾性率 $[\text{N/m}^2]$ ， c は音速 $[\text{m/s}]$ ．式 (2.1) と式 (2.2) から粒子速度ベクトルを消去すると，音圧に関する波動方程式が得られる．

$$\nabla^2 p(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (2.3)$$

ここで，音圧 p 及び粒子速度ベクトル \mathbf{v} が，

$$p(\mathbf{r}, t) = \rho \frac{\partial \phi(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad [\text{Pa}], \quad (2.4)$$

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}, t) = -\nabla \phi(\mathbf{r}, t) \quad [\text{m/s}], \quad (2.5)$$

の関係となる速度ポテンシャル ϕ を導入すると，式 (2.3) は次式のように書き換えられる．

$$\nabla^2 \phi(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = 0. \quad (2.6)$$

ここで，時間因子を $\exp(-j\omega t)$ とした調和振動を仮定すると， $\phi(\mathbf{r}, t) = \Phi(\mathbf{r})e^{-j\omega t}$ において，次の Helmholtz 方程式が得られる．但し，角周波数 $\omega = 2\pi f$ $[\text{rad/s}]$ ， f は周波数 $[\text{Hz}]$ ．

$$\nabla^2 \Phi(\mathbf{r}) + k^2 \Phi(\mathbf{r}) = 0. \quad (2.7)$$

同様に， $p(\mathbf{r}, t) = P(\mathbf{r})e^{-j\omega t}$ ， $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{V}(\mathbf{r})e^{-j\omega t}$ とおくと，式 (2.4)，(2.5) から次式が得られる．

$$P(\mathbf{r}) = -j\omega\rho\Phi(\mathbf{r}) \quad [\text{Pa}], \quad (2.8)$$

$$\mathbf{V}(\mathbf{r}) = -\nabla\Phi(\mathbf{r}) \quad [\text{m/s}]. \quad (2.9)$$

従って， P と \mathbf{V} の関係は次式で表される．

$$\nabla P(\mathbf{r}) = j\omega\rho\mathbf{V}(\mathbf{r}). \quad (2.10)$$

球面波 境界の影響のない空間（自由音場）内の点 \mathbf{r}_q にある点音源から球面波が放射されることを想定する．

周波数領域については，Helmholtz 方程式（式 (2.7)）を満足する Φ として，音源と任意の観測点 \mathbf{r}_p に関する基本解 G を与える．

$$\nabla^2 G(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_q) + k^2 G(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_q) = -\delta(r_{pq}), \quad (2.11)$$

但し，波数 $k = \omega/c$ [1/m]， $r_{pq} = |\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_q|$ [m]， δ は Dirac のデルタ関数であり，3次元空間の基本解は次式で表される．

$$G(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_q) = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-jkr_{pq}}}{r_{pq}}. \quad (2.12)$$

同様に時間領域については，

$$G(\mathbf{r}_p, \mathbf{r}_q, t) = \frac{1}{4\pi} \frac{\delta(t - r_{pq}/c)}{r_{pq}}, \quad (2.13)$$

と表され，波動方程式（式 (2.6)）を満たす．式 (2.13) より，音波は速度 c で伝搬し，その振幅は距離に反比例することがわかる．

2.2.2 閉空間内における音響伝搬

室内のような閉空間では，音源から放射された音波は境界で反射しながら空間を波面で満たし，複雑な状態を作り出す．実際には，境界に入射したエネルギーの全ては反射せずにある割合で吸収される．この割合を吸音率 α と呼び，境界の材料によって周波数や入射角度に関する依存性がある．吸音率は境界の吸音性能を示す値であるが，空間全体の性能として等価吸音面積（吸音力） A が次式で定義されており，吸音率とともに第 2.4 節で述べる残響理論等に導入されている．

$$A = \sum_i S_i \alpha_i \quad [\text{m}^2], \quad (2.14)$$

但し， S_i ， α_i はそれぞれ境界 i の表面積 [m^2] と吸音率．

反射性状に関しては，音波が入射した面が平滑であれば Snell 則に従って鏡面反射するが，凹凸がある場合には拡散反射する．境界の拡散性能を示す指標が主に 2 種の観点から提案されている．

1. **Diffusion coefficient**（指向拡散度）^[108]：反射指向特性の均一性の程度を表す．具体的には，ある方向の入射波に対する方向別拡散エネルギーの自己相関係数を平均化した次式により表される．

$$d_\theta = \frac{\left(\sum_{i=1}^n J_i \right)^2 - \sum_{i=1}^n J_i^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n J_i^2}, \quad (2.15)$$

但し， J_i は i 方向の拡散エネルギー， n は方向分割数であり，完全鏡面反射では $d_\theta = 0$ ，完全拡散反射では $d_\theta = 1$ となる．ランダム入射指向拡散度 d は上記値の統

計入射平均値として定義される．尚，測定法は ISO 17497-2^[133] で規格化されている．指向拡散度は均一性評価という観点で藤原と増田^[328] による D , Takahashi^[261] による DNSD , 横田^[336] による CV と同類と見なせるが , D 及び DNSD は周期構造壁面の離散的な指向特性を前提とした指標であり , CV は変動係数を直接指標としたものである．

2. **Scattering coefficient** (乱反射率)^[188,280] : 全反射エネルギーに対する鏡面反射成分以外のエネルギーの割合を表す．従って , 反射指向特性の均一性は考慮されず , 全反射エネルギーを J_{total} , 鏡面反射エネルギーを J_{spec} として次式により表される．

$$s_{\theta} = \frac{\alpha_{\text{spec}} - \alpha}{1 - \alpha} = 1 - \frac{J_{\text{spec}}}{J_{\text{total}}}, \quad (2.16)$$

但し , α は試料表面の吸音率 , α_{spec} は鏡面反射成分以外は全て吸音されたとした場合の見かけの吸音率である．完全鏡面反射では指向拡散度と同様に $s_{\theta} = 0$ となるが , 鏡面反射成分さえ存在しなければ $s_{\theta} = 1$ となるので , 必ずしも完全拡散反射を示すことにはならない．また , 指向拡散度と同様に , ランダム入射乱反射率 s は上記値の統計入射平均値として定義される．尚 , 測定法は ISO 17497-1^[130] で規格化されており , 波動音響解析による算出法も提案されている^[168] . 乱反射率に関する近年の議論は Sakuma and Lee^[231] に詳しい．

全く異なる観点として , Haan and Fricke^[102] は室表面全体の拡散性の程度を目視により評価する指標 SDI (surface diffusivity index , 表面拡散指数) を提案している．

2.2.3 室内インパルス応答

線形時不変 (linear time-invariant, LTI) の系は , 時間領域についてはステップ関数やインパルス応答等 , 周波数領域については周波数応答関数等の関数によって特徴づけられる．室内音響の分析・評価を行う際には , 系を LTI と仮定して室内インパルス応答を測定し , 室内音響指標等を算出することが基本となる．

室内インパルス応答 (room impulse response, RIR) は , 室内にある音源からインパルスを放射して受音点で得られる応答である (図 2.1) . 音源信号 $s(t)$ が放射された時 , 観測点における音圧 $p(t)$ は , 次式の通り 2 点間の室内インパルス応答 $h(t)$ と音源信号の重畳積分により表される．

$$p(t) = h(t) * s(t). \quad (2.17)$$

尚 , 周波数領域では次式で表される．

$$P(\omega) = H(\omega)S(\omega). \quad (2.18)$$

室内音響では , 室内インパルス応答を 3 つの部分に分けて議論することが多い．

1. 直接音：直接音は音源信号や音源距離によって強度や到来時刻等の性質が決定され，聴感として主に方向定位や明瞭性に関わる部分である．直接音に続く 50 ms 程度までの最初期の反射音は，人間の聴覚特性により直接音を補強する作用があり，Haas 効果^[103]と呼ばれる．
2. 初期反射音：直接音到来後，20 ms から 100 ms 程度の部分を初期反射音と呼び，主に明瞭性や空間印象に関わる．反射音が離散的に到来するため，決定論的に扱うことが望ましい．
3. 後期残響音：約 100 ms 以降では室内が波面で満たされ，多くの室では反射音の分離が困難となるが，音響障害となる突発的な反射音（エコー）が現れることがある．この部分を後期残響音と呼び，簡単のために統計論的に扱われることが多い．

測定法 室内インパルス応答は，次式の通り，Dirac のデルタ関数 $\delta(t)$ を入力信号として用いることで得られる．式 (2.17) において $s(t) = \delta(t)$ とすると，

$$p(t) = h(t) * \delta(t) = h(t). \quad (2.19)$$

しかしながら，現実には Dirac のデルタ関数に基づく無限に短い信号を生成することはできない．古くは空気銃の発砲音や風船の破裂音を利用していたが，音源の放射パワーや周波数特性，測定の再現性等に懸念があった．その後，信号処理技術の進歩に伴い，雑音信号を用いる相互相関法^[315]，クロススペクトル法^[327]の他に M 系列（maximum-length sequence, MLS）信号^[239]等の擬似雑音，TSP（time-stretched pulse）信号^[11,259]等の掃引正弦波（swept-sine, sweep sine）等を用いる多数の測定方法^[124,299,309]が提案されている．

以下に，本研究で用いる TSP 信号について述べる．TSP 信号^[259]は，音源の放射パワーを増大させるためにインパルスを時間軸上で伸張した信号であり，以下のようにイン

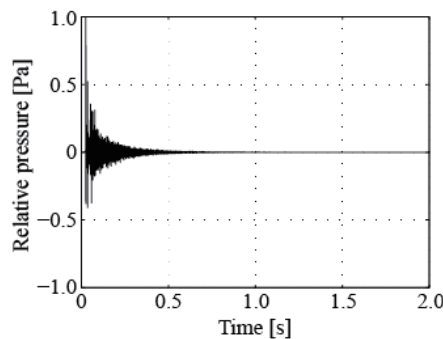


Figure 2.1 An example of a room impulse response, measured in the concert hall described in the section 6.6.3.

パルスの位相が周波数の二乗に比例して変化するように周波数領域で設計される．

$$H_{\text{up}}(f_n) = \begin{cases} \exp(-j4m\pi f_n^2/N^2) & (0 \leq f_n \leq N/2) \\ H_{\text{up}}(N - f_n) & (N/2 < f_n < N), \end{cases} \quad (2.20)$$

但し， f_n は離散周波数番号， N は信号長， m は信号の整数パラメータであり，信号の実効長は $2m$ となる．測定は， H_{up} を逆 Fourier 変換した時間信号 h_{up} を放射し，得られた応答に逆関数を重畳することで室内インパルス応答を求める．周波数領域における逆関数は，

$$H_{\text{up}}^{-1}(f_n) = \begin{cases} \exp(j4m\pi f_n^2/N^2) & (0 \leq f_n \leq N/2) \\ H_{\text{up}}^{-1}(N - f_n) & (N/2 < f_n < N), \end{cases} \quad (2.21)$$

と表され，式 (2.20) と複素共役の関係にある． H_{up} は時間の経過に応じて周波数が上昇するが，下降する信号 H_{dn} も設計可能である．但し，測定系の非線形性による影響（高調波歪）が H_{up} と H_{dn} で異なり， H_{up} では信号到来以前に現れるため非因果な応答に見えるが，室の応答は分離できる．一方， H_{dn} では信号到来以降に分離できない誤差が生じるため，本研究では H_{up} を用いることとする．

2.3 室内音響指標

室内音場の特徴を把握・評価するためには，拡散音場であれば時定数のみで必要十分であるが，非拡散音場である現実空間ではより多くの指標が求められる．1950 年代から主に室内インパルス応答から心理量と対応する物理量を抽出する試みが続けられ，それらは必ずしも互いに直交しないが，多くの指標が提案されている．室内音響指標の一部は，その定義と測定法が ISO 3382-1^[132] として規格化されるまでに至っているが，算出にはノウハウが必要な点が多く，ベンチマーク問題が作成^[120,323] されるなど議論^[41] は尽きていない．本節では，室内インパルス応答に基づく既往の室内音響指標を時間・エネルギー・空間・周波数の各観点で整理する．ここで取り上げる物理量と関係のある心理量は，残響感，暖かさ，輝かしさ，親密感，明瞭性，エコー，カラーレーション，音量感，拡がり感，等である．

2.3.1 時間的観点

残響時間と初期減衰時間

第 2.2.2 節で述べたように，室内で音源を定常的に駆動すると，音波が壁面等の境界で反射を繰り返しながら空間を波面で満たす．音源を停止すると，音響エネルギーは室の寸法や境界の吸音率等の物性に依存して減衰する．この現象は残響と呼ばれ，楽音の豊かさをもたらす一方，話声の明瞭性を低下させる．1895 年，米国 Harvard 大学の物理学者であった Sabine は，Fogg 講堂の音響改修のための知見を得ることを目的として，クッションやカーペット，学生の数を変化させ，オルガンの 500 Hz のパイプを励振して様々な室の残響の長さをストップウォッチを用いて測定した．その結果，残響の長さは受音点に依存せず，室容積に比例し，吸音材料の量に反比例することを見出した．その後，Sabine は定常状態で音源出力を停止してから音圧レベルが 60 dB 減衰（即ち，エネルギーが 1/1,000,000）するのに要する時間を残響時間（ T_{60} ， T ， RT ， R ）として定義し，以下の Sabine 式を導いた．

$$T = K \frac{V}{S\bar{\alpha}} \quad [\text{s}], \quad (2.22)$$

但し， V は室容積 [m^3]， S は表面積 [m^2]， $\bar{\alpha}$ は平均吸音率， $K = 24 \ln 10 / c$ は音速に依存する定数 [s/m]．Sabine は，Fogg 講堂の音響改修を成功に導いただけでなく，Amsterdam の Concertgebouw（1888 年）や Vienna の Grosser Musikvereinssaal（1870 年）と並んで世界 3 大ホールと称される Boston の Symphony Hall（1900 年）の音響設計を行った^[26]．彼の研究成果は *Collected Papers on Acoustics*^[227] としてまとめられている．

残響時間は室内音響特性を示す最初の物理指標でありながら，現在でも室内音響設計に

において重用されている．残響時間の算出には，ノイズ断続法，または室内インパルス応答 $h(t)$ に対してインパルス応答積分（逆二乗積分，Schroeder 積分）^[235] を行って得た残響減衰曲線（energy decay curve，EDC） $L(t)$ ，

$$L(t) = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau} \right) = 10 \log_{10} \left(1 - \frac{\int_0^t h^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau} \right) \quad [\text{dB}], \quad (2.23)$$

が用いられる．インパルス応答積分は，理論的には一度の測定で無限回の集合平均を得ることができる方法であり，帯域雑音の不規則変動の影響を除去することができる．上式の最右辺は時間発展として定式化されており，数値解析において効率的に計算できる．また，上式は室内インパルス応答の全エネルギーで基準化しており，残響減衰曲線は定常状態の音響エネルギー密度レベルを 0 dB として単調減少する．

減衰率 δ [1/s] で振幅が指数減衰する理想的な拡散音場における残響減衰曲線は次式で表される．

$$L(t)_d = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_t^{\infty} \{\exp(-\delta\tau)\}^2 d\tau}{\int_0^{\infty} \{\exp(-\delta\tau)\}^2 d\tau} \right) = -\frac{10}{\ln 10} 2\delta t = -\frac{60}{T} t \quad [\text{dB}]. \quad (2.24)$$

このことから，残響時間は残響減衰曲線の傾きである減衰率 $D (= -10/\ln 10 \cdot 2\delta)$ [dB/s] から $T = -60/D$ として得られる．しかしながら，非拡散音場である現実の音場の残響減衰曲線は変動しているため，評価区間内での回帰直線から残響時間を算出する^[132]．評価区間については，始端は直接音や最初期の反射音による不安定性を除外するため −5 dB，終端は暗騒音や減衰の湾曲を考慮して −35 (or −25) dB と設定されることが多く，この評価区間で算出した残響時間は T_{30} (T_{20}) と表記される（図 2.2）．尚，ISO 3382-2^[131] では残響時間の補助的な情報として残響減衰性状の非線形性と湾曲性に関する指標が規定さ

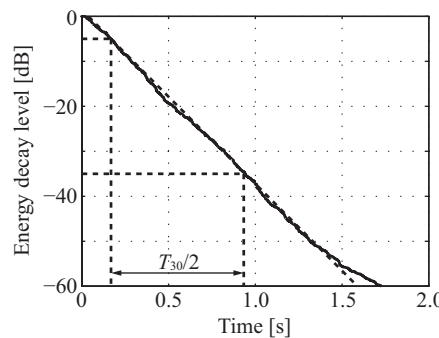


Figure 2.2 The reverberation time can be obtained from a room impulse response by estimating the slope of the backward integrated curve. Here, the slope is estimated by a regression line through the part of the decay between −5 dB and −35 dB for the 500 Hz 1/1 octave band, measured in the concert hall described in the section 6.6.3.

れている．非線形性に関する指標は以下のように表される．

$$\xi = 1000(1 - r^2) \text{ } [\text{‰}], \quad (2.25)$$

但し，

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{L}(i) - \bar{L})^2}{\sum_{i=1}^n (L(i) - \bar{L})^2}, \quad (2.26)$$

であり， $L(i)$ は離散時刻 i における音圧レベル [dB]， \bar{L} は $L(i)$ の平均値， $\hat{L}(i)$ は $L(i)$ の線形回帰曲線． ξ は拡散音場では 0 を示し，10 ‰を超えると湾曲のため残響時間の信頼性が疑われる．一方，湾曲性に関する指標は以下のように表される．

$$C = 100 \left(\frac{T_{30}}{T_{20}} - 1 \right) \text{ } [\%]. \quad (2.27)$$

C の典型値は 0 % から 5 % であり，10 % を超えると湾曲のため残響時間の信頼性が疑われる．

残響時間は，主に 500 Hz の 1/1 オクターブバンド値を対象として，室の用途と容積に応じた最適値が提唱 [24, 48, 78, 144, 151, 173, 177, 260] されている．最適残響時間の典型値を表 2.1 に示す．その周波数特性に関しても様々な推奨値が提案 [25, 151, 177] されており，等ラウドネス曲線 [163, 330] に類似して低音域が中高音域に比べて大きくなる傾向である．残響時間を単一値として取り扱う場合，500 Hz 帯域から 1 kHz 帯域の平均値を用いることが多いが，室の用途に応じて異なる帯域の平均値を用いることがある [3, 16, 25, 163]．その典型値を表 2.2 に示す．

Table 2.1 Typical values for the reverberation time for different types of rooms[25, 163, 271].

Room type	Reverb. time [s]
Living room	to 0.5
Cinema	0.7 to 1.0
Theater	0.9 to 1.3
Chamber music hall	1.2 to 1.5
Opera house	1.2 to 1.6
Concert hall (classical music)	1.7 to 2.3
Church	1.5 to 2.5

Table 2.2 Typical mean reverberation time frequencies[124].

Room type	f_{\min} [Hz]	f_{\max} [Hz]
Concert hall	500	1000
Popular music space	63	2000
General purpose space	250	2000

現実には，楽音や話声は連続しているため，60 dB 幅の減衰を聞くことは少ない．従って，残響に関する聴感印象である残響感 (reverberance) は初期の減衰と関係が深いとされ，残響時間による残響感である stopped reverberance に対して running reverberance と特に区別されることがある [101, 166]．残響感に関連する指標はいずれも残響時間と評価区

間が異なるのみであり，Anfangsnachhallzeit (beginning reverberation time) ^[157] は 0 dB から −20 dB 区間， T_1 ^[235] は 0 dB から −10 dB 区間，initial reverberation time は 0 dB から −15 dB 区間 ^[13,276] である．近年，特に用いられるものは，初期減衰時間 (early decay time, EDT) ^[143] であり，0 dB から −10 dB 区間で算出される．ISO 3382-1 ^[132] では，EDT の単一値は 500 Hz 帯域から 1 kHz 帯域の平均値とし，弁別閾 (just noticeable difference, JND) は 5 % とされている．

残響時間の周波数帯域値を用いて，Beranek ^[25] は暖かさ (warmth) や輝かしさ (brilliance) を表す指標を提案している．低音残響比 (bass ratio, BR) は中音域に対する低音域の残響時間の比であり，暖かさを表す．

$$BR = \frac{T_{125\text{Hz}} + T_{250\text{Hz}}}{T_{500\text{Hz}} + T_{1000\text{Hz}}}, \quad (2.28)$$

但し， T_{Hz} は添字に示す周波数を中心とする帯域の残響時間．高音残響比 (treble ratio, TR) は中音域に対する高音域の残響時間の比であり，輝かしさを表す．

$$TR = \frac{T_{2000\text{Hz}} + T_{4000\text{Hz}}}{T_{500\text{Hz}} + T_{1000\text{Hz}}}. \quad (2.29)$$

BR 及び TR に関して，近年，Beranek ^[28] は残響時間の代わりに EDT や G (第 2.3.2 節) を用いることで聴感印象との対応がより良くなると報告している．

第一反射音の遅延時間

室内インパルス応答における直接音に対する第一反射音の遅延時間 (initial time-delay gap, ITDG) ,

$$ITDG = |T_{\text{direct}} - T_{1\text{st}}| \text{ [s]}, \quad (2.30)$$

はコンサートホールの親密感 (intimacy) と呼ばれる心理量を表す ^[25] . 親密感とは，大きな部屋で演奏されたにも関わらず，小さな部屋であるかのように感じることであり，ITDG が 45 ms を超えると親密感は希薄となり，多くの優れたホールでは 25 ms 以下を示す ^[25] .

2.3.2 エネルギー的観点

明瞭性に関する指標

Clarity (Klarheitsmass) C_{te} ^[220,222] は明瞭性に関する指標であり，室内インパルス応答の後期のエネルギーに対する初期のエネルギーの比として定義されている．

$$C_{te} = 10 \log_{10} \left(\frac{J_{\text{early}}}{J_{\text{late}}} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_0^{t_e} h^2(t) dt}{\int_{t_e}^{\infty} h^2(t) dt} \right) \text{ [dB]}, \quad (2.31)$$

但し, t_e は室内インパルス応答の初期と後期を分離する時刻 (臨界時刻) であり, 話声には 50 ms, 楽音には 80 ms が用いられる^[132]. ここで, $t = 0$ は直接音到来時刻であり, 音源距離に依存する伝搬の遅延の影響は除かれるが, 直接音は含まれる. 減衰率 δ [1/s] で振幅が指数減衰する理想的な拡散音場における C_{t_e} は以下のように表される.

$$C_{t_e,d} = 10 \log_{10}(e^{2\delta t_e} - 1) \text{ [dB]}. \quad (2.32)$$

ISO 3382-1^[132] では, C_{80} の単一値は 500 Hz 帯域から 1 kHz 帯域の平均値とされている. C_{80} の弁別閾は, ISO 3382-1^[132] では 1 dB と示されているが, 1.5 dB 以上であるとの報告もある^[179]. また, Marshall^[178] は C_{t_e} を t_e の関数として表示した ELR (early-to-late sound energy ratios) 曲線から臨界時刻に関する検討を行っている. 異なる t_e を用いた指標として, 直接音レベルを表す C_5 ^[90], C_7 ^[251], 小空間音場の明瞭性を表す C_{15} ^[224] が提案されている.

類似して, Definition (Deutlichkeit) D_{50} ^[264] は話声の明瞭性を表す指標であり, 全エネルギーに対する初期 50 ms 以内のエネルギーの比として定義されている.

$$D_{50} = \frac{J_{\text{early}}}{J_{\text{total}}} = \frac{\int_0^{0.050} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt}. \quad (2.33)$$

尚, 百分率で表されることもある. ISO 3382-1^[132] では, D_{50} の単一値は 500 Hz 帯域から 1000 Hz 帯域の平均値とし, 弁別閾は 0.05 とされている. C_{50} は D_{50} と以下の関係にある.

$$C_{50} = 10 \log_{10} \left(\frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \right) \text{ [dB]}. \quad (2.34)$$

Hallmass (echo index, reverberation index) R ^[23] は running liveness に関する指標であり, 初期 50 ms 以内に対する後期 50 ms 以降のエネルギーの比として定義されている.

$$R = 10 \log_{10} \left(\frac{J_{\text{late}}}{J_{\text{early}}} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_{0.05}^{\infty} h^2(t) dt}{\int_0^{0.05} h^2(t) dt} \right) \text{ [dB]}, \quad (2.35)$$

従って, R は C_{50} 及び D_{50} と以下の関係にある.

$$R = -C_{50} = 10 \log_{10} \left(\frac{1 - D_{50}}{D_{50}} \right) \text{ [dB]}. \quad (2.36)$$

以上の指標は, 臨界時刻に依存する懸念がある. 臨界時刻に依存せずに明瞭性を表す指標として Schwerpunktzeit (center time, 時間重心) T_S ^[156] が挙げられる.

$$T_S = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \text{ [s]}. \quad (2.37)$$

尚, 実際には ms で表されることが多い. T_S は室内インパルス応答の二乗波形の一次モーメントであり, 値が小さいほど明瞭性が高いことを表す. ISO 3382-1^[132] では, T_S の単一

値は 500 Hz 帯域から 1 kHz 帯域の平均値とされている． T_S の弁別閾は，ISO 3382-1^[132] では 10 ms とされているが，残響時間の 8.5 % が適切であるとの報告^[179] もある．

減衰率 δ [1/s] で振幅が指数減衰する理想的な拡散音場における時間重心は，

$$T_{S,d} = \frac{\int_0^\infty t \cdot \{A \exp(-\delta t)\}^2 dt}{\int_0^\infty \{A \exp(-\delta t)\}^2 dt} = \frac{1}{2\delta} = \frac{T}{6 \ln 10} \quad [\text{s}], \quad (2.38)$$

となり，定数を除いて残響時間 T と一致する．この関係を利用して，回帰を必要としない残響時間の推定方法が提案されている^[124]．

エコーに関する指標

エコーとは分離して聞こえる反射音のことであり，室内音響では 2 種に大別される．一方は，ホール等の大空間で生じる直接音からの遅延時間の大きな低次の反射音のことであり，ロングパスエコーと呼ばれる．他方は，後期残響音の中で周期的に突出する反射音のことであり，フラッターエコー（鳴き竜）と呼ばれる．エコーは，直接音または直前の反射音からの遅延時間だけでなく，相対レベルやマスカーとして作用する他の反射音に依存して知覚される．また，反射音間隔が数 ms から 25 ms 程度^[163] の場合には分離して聞こえることはないが，位相干渉によってカラーレーションと呼ばれる音色の変化が生じる．エコーの評価は室内インパルス応答あるいはその包絡線^[163] を目視することによる定性的な方法の他に，指標として，エコー率（Echograd） ε ^[197] や echo criterion（EC）^[77] が提案されている．

ε は，室内インパルス応答の初期 30 ms 以内のエネルギー J_{early} と 30 ms 以降における理想的な指数関数を超過するエネルギー J_{excess} を用いて，以下のように表される．

$$\varepsilon = \frac{J_{\text{excess}}}{J_{\text{early}} + J_{\text{excess}}}. \quad (2.39)$$

ε は，反射音の突発性の程度に関する情報は埋もれてしまう上， J_{excess} の算出において仮定する指数関数に依存する懸念がある．

EC は時間重心に類似して，重み付けした音響エネルギーの前進積分値における瞬時勾配の最大値を指標としたもので，重み関数等のパラメーターが聴感実験に基づいて設定されている．

$$\text{EC} = \max \left(\frac{\Delta t_S(\tau)}{\Delta \tau} \right), \quad (2.40)$$

但し，

$$t_S = \frac{\int_0^\infty t \cdot |h(t)|^n dt}{\int_0^\infty |h(t)|^n dt} \quad [\text{s}], \quad (2.41)$$

であり，楽音については， $\Delta \tau = 14 \text{ ms}$ ， $n = 1$ ，周波数帯域は 700 Hz から 2.8 kHz として算出し，EC が閾値 $\text{EC}_c = 1.8$ を超えるときにエコーが生じていることが推定される．話声については， $\Delta \tau = 9 \text{ ms}$ ， $n = 2/3$ ，周波数帯域は 700 Hz から 1.4 kHz， $\text{EC}_c = 1.0$ である．

他方，室内インパルス応答の自己相関関数を用いてカラーレーションを評価する方法が提案されている．室内インパルス応答の自己相関関数は，反射音が不規則に到来する場合には遅延時間 $\tau = 0$ [s] 以外にピークが現れないが，反射音が規則的に到来する場合には副次的なピークが現れると考えられる．Bilsen^[31] は室内インパルス応答の自己相関関数 $\Phi(\tau)$ ，

$$\Phi(\tau) = \int_0^\infty h(\tau)h(t+\tau)dt, \quad (2.42)$$

に対して，実験的に得られた重み関数 $w(\tau)$ を掛けた重み付け自己相関関数 Φ' を算出した．

$$\Phi'(\tau) = w(\tau)\Phi(\tau). \quad (2.43)$$

ここで， Φ' の第一ピーク ($\tau = 0$) と第二ピークに関する次の条件が成立するとき，カラーレーションの発生が予測される．

$$\max\{\Phi'(\tau \neq 0)\} > 0.063\Phi'(0). \quad (2.44)$$

音量因子

音量感 (loudness) は音響信号の知覚されるレベルであり，音源出力を一定とした場合でも自由音場に比べて残響のある室内の方が音量感が大きいように，室条件に依存する．このことを表す指標として音量因子 (gain, G) ^[169, 223] が提案されている．

$$G = 10\log_{10} \frac{\int_0^\infty h^2(t)dt}{\int_0^\infty h_{10m}^2(t)dt} \text{ [dB]}, \quad (2.45)$$

但し， $h_{10m}(t)$ は自由音場で音源距離 10 m 点で測定した室内インパルス応答．実用的には， $h_{10m}(t)$ は $h(t)$ に置き換えられ，分母の無限時間の積分を直接音の終端で打ち切ることとて G 値は算出される．ISO 3382-1^[132] では， G の単一値は 500 Hz 帯域から 1 kHz 帯域の平均値とし，弁別閾は 1 dB とされている．

拡散音場における音量因子は，音源出力を W [W] とすると音響エネルギー密度が，拡散音場においては $E_d = 4W/cA$ [J/m³] (第 2.4.1 節で導出)，自由音場の音源距離 10 m 点においては $E_f = W/4\pi c10^2$ [J/m³] と与えられることから，

$$G_d = 10\log_{10} \left(\frac{E_d}{E_f} \right) \approx 10\log_{10} \left(\frac{T}{V} \right) + 45 \text{ [dB]}, \quad (2.46)$$

となる．但し， $A = KV/T$ の関係を用い， $K = 0.161$ とした．

初期反射音の音量因子は明瞭性や残響感と，後期残響音の音量因子は音に包まれた感じとの関係がそれぞれ示されている^[43]．初期音量因子 (early-arriving relative sound level) は次式で定義される．

$$G_{80} = 10\log_{10} \left(\frac{\int_0^{0.08} h^2(t)dt}{\int_0^\infty h_{10m}^2(t)dt} \right) \text{ [dB]}. \quad (2.47)$$

また，後期音量因子（late-arriving relative sound level）は次式で定義される．

$$G_L = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_{0.08}^{\infty} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h_{10m}^2(t) dt} \right) \quad [\text{dB}]. \quad (2.48)$$

Berane^[28] は暖かさ（warmth）を表す物理指標として帯域制限された音量因子を用いて Bass Index（BI）を定義している．

$$\text{BI} = G_{\text{low}} - G_{\text{mid}} \quad [\text{dB}], \quad (2.49)$$

但し， G_{low} は G の 125 Hz 帯域値であり， G_{mid} は 500 Hz 帯域と 1 kHz 帯域の平均値である．また，Bradley^[41] は帯域制限した G の真数値を重み付け加算した値 G_w を bass strength を表す指標として提案している．

$$G_w = \{E_{80,125\text{Hz}} + 3E_{L,125\text{Hz}} + 0.5(E_{80,250\text{Hz}} + 3E_{L,250\text{Hz}})\} \quad [\text{dB}], \quad (2.50)$$

但し， $E_{(\cdot, \text{Hz})} = 10^{G_{(\cdot, \text{Hz})}/10}$ であり，添字に示す周波数帯域値を用いる．

舞台上の指標

音楽演奏時には，他者の演奏の聞き取りやすさ（ensemble）や室の応答（reverberance）が重要である．これらを示す物理量としてそれぞれ early support ST_{Early} と late support ST_{Late} が ISO 3382-1^[132] で規格化されている． ST_{Early} は，直接音に対する 20 ms から 100 ms のエネルギーの比として定義される．

$$\text{ST}_{\text{Early}} = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_{0.02}^{0.1} h_{1m}^2(t) dt}{\int_0^{0.01} h_{1m}^2(t) dt} \right) \quad [\text{dB}], \quad (2.51)$$

但し， $h_{1m}(t)$ は，音源を舞台上の演奏者の位置に設置し，音源距離 1 m の点で得られた室内インパルス応答． ST_{Late} についても概ね同様であり， ST_{Early} の分子の積分区間が 100 ms から 1 s となる．

$$\text{ST}_{\text{Late}} = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_{0.1}^1 h_{1m}^2(t) dt}{\int_0^{0.01} h_{1m}^2(t) dt} \right) \quad [\text{dB}]. \quad (2.52)$$

ISO 3382-1^[132] では， ST_{Early} 及び ST_{Late} の単一値は 250 Hz 帯域から 2 kHz 帯域の平均値とし，弁別閾は示されていない．

以上の指標の基礎として，Gade^[98,99] が提案した ST_1 ， ST_2 及び EEL（early ensemble level）がある．いずれも，分子は直接音エネルギーとし，分母は積分区間が異なり， ST_1 ， ST_2 については 20 ms からそれぞれ 100 ms，200 ms，EEL については 0 ms から 80 ms として定義されている．

2.3.3 空間的観点

音場の空間印象である拡がり感 (spaciousness) はみかけの音源の幅 (apparent source width, ASW) と音に包まれた感じ (listener envelopment, LEV) の 2 つの感覚 [331] からなる。室内インパルス応答の初期反射音は ASW に、後期残響音は LEV に関係 [42, 44, 189] するとされ、いくつかの指標が提案されている。これら空間的観点に基づく指標は主に側方に向けた双指向性マイクロフォンで測定した室内インパルス応答を用いて算出される。

みかけの音源の幅に関する指標

初期側方エネルギー率 初期側方エネルギー率 (J_{LF} , LF, LEF, LF_{early}) [18, 19] は、無指向性マイクロフォンで得られた初期のエネルギーに対する、直接音を除く初期の側方反射音エネルギーの比として定義される。

$$J_{LF} = \frac{\int_{0.05}^{0.08} h_{\infty}^2(t) dt}{\int_0^{0.08} h^2(t) dt}, \quad (2.53)$$

但し、 $h_{\infty}(t)$ は双指向性マイクロフォンで得られた室内インパルス応答。拡散音場では、 J_{LF} は 0.33 を示す [223]。ダミーヘッドを用いて測定した室内インパルス応答から J_{LF} を算出する方法も提案されている [251]。Jordan [144] は、 J_{LF} に類似した指標として LE (lateral efficiency) を提案しているが、これは J_{LF} の分子の積分区間を 25 ms から 80 ms としたものである。

Barron and Marshal [18] の実験結果によれば、両耳軸への反射音エネルギーの到来角度 θ に関する ASW の変化は、 $\cos \theta$ と対応するが、 J_{LF} は $\cos^2 \theta$ のより急峻な特性となっている。この影響を補正するために J_{LFC} (lateral fraction cosine, LFC) が提案 [149] されている。

$$J_{LFC} = \frac{\int_{0.05}^{0.08} |h_{\infty} \cdot h(t)| dt}{\int_0^{0.08} h^2(t) dt}. \quad (2.54)$$

ISO 3382-1 [132] では、 J_{LF} 及び J_{LFC} の単一値は 125 Hz 帯域から 1 kHz 帯域の平均値とし、弁別閾は 0.05 とされている。

類似して、Reichardt [222] は無指向性と単一指向性マイクロフォンを用いて測定した室内インパルス応答から算出する指標 R を定義している。

両耳間相互相関度 人間は両耳に到来する信号の差異を捉え、両耳効果によって音像の方向定位や空間の拡がり感を得る [148]。この差異は、両耳で得られた室内インパルス応答の相互相関関数 (両耳間相互相関関数, interaural cross correlation function, IACF) として定量化され、その最大値を両耳間相互相関度 (interaural cross correlation, IACC) と呼ぶ。

Damaske^[65] は複数のチャンネルで再生した信号の相関が低い場合に主観的拡散 (subjective diffusion) が得られることを示している。IACC はダミーヘッドを用いてバイノーラル録音された室内インパルス応答 (h_L , h_R) を用いて以下のように算出される^[223]。

$$\text{IACC}_{t_1, t_2} = \max\{\Phi_{t_1, t_2}(\tau)\} = \max \left| \frac{\int_{t_1}^{t_2} h_L(t) h_R(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} h_L(t) dt \int_{t_1}^{t_2} h_R(t + \tau) dt}} \right|. \quad (2.55)$$

但し, $\Phi_{t_1, t_2}(\tau)$ は t_1 から t_2 までの時間内の両耳間相互相関関数であり, 両耳間の行路差を考慮して $|\tau| \leq 1$ ms として算出される。IACC の算出は主に表 2.3 に示す 3 種類が用いられる。ISO 3382-1^[132] では, 弁別閾は 0.075 とされている。

IACC は 2 つの室内インパルス応答のエネルギーで正規化されているため, 0 から 1 の値を取り, 値が小さいほど ASW が大きいことを意味するが, $1 - \text{IACC}$ の形^[111] で用いられることが多い。 $1 - \text{IACC}_E$ は両耳品質指数 (binaural quality index, BQI)^[25, 27] と呼ばれる。

Table 2.3 Commonly used IACC measures and their calculation.

IACC type	Frequency bands [Hz]	Time intervals [ms]
$\text{IACC}_{A(\text{II})}$	100 to 8000	0-500 or 0-2000
$\text{IACC}_{E(\text{arly})}$	500 to 2000	0-80
$\text{IACC}_{L(\text{ate})}$	500 to 2000	80-500 or 80-2000

$1 - \text{IACC}$ は J_{LF} と概念的に異なる^[41] が, 中心周波数 250 Hz から 1 kHz の帯域値では相関^[40] する。また, ASW は初期側方エネルギー率や両耳間相互相関度だけでなく音圧レベルにも依存し, 比例する^[18]。Okano *et al.*^[201] は低音域ほど ASW に寄与することを示し, 125 Hz 帯域と 250 Hz 帯域の G 値の平均値 G_{low} を指標として提案している。尚, 低音域における ASW は IACC と傾向を異にする結果^[298] も示されている。

音に包まれた感じに関する指標

LEV は後期側方反射音の音量因子 (late lateral strength, L_J , GLL, LG)^[42] で表される。

$$L_J = \frac{\int_{0.08}^{\infty} h_{\infty}^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h_{10m}^2(t) dt} \quad [\text{dB}]. \quad (2.56)$$

ISO 3382-1^[132] では, L_J の単一値は 125 Hz 帯域から 1 kHz 帯域の平均値とし, 弁別閾は示されていない。

類似して, 初期側方反射音の音量因子 (early lateral strength, GEL) も定義されている。Soulodre *et al.*^[252] は音量因子と両耳間相互相関度を用いて LEV を表し, Beranek^[28] が以下のように修正した。

$$\text{LEV}_{\text{calc}} = 0.5G_{L, \text{mid}} + 10 \log_{10}(1 - \text{IACC}_{L, \text{mid}}) \quad [\text{dB}], \quad (2.57)$$

但し，

$$G_{L,mid} = G_{total} - 10 \log_{10} \left\{ 1 + \log_{10}^{-1} \left(\frac{C_{80}}{10} \right) \right\} \text{ [dB]}, \quad (2.58)$$

であり，添字 mid は 500 Hz と 1 kHz の 1/1 オクターブバンドの平均値を示す．Beranek^[28]によれば，相関が高いため $1 - IACC_{L,mid}$ は LF_{late} に置換可能である．

他方，Hanyu and Kimura^[107] は各方向の時間重心値を用いた指標 SBT_s を提案している．また，上方や後方からの反射音が LEV に寄与することも示されている^[97,252]．

2.3.4 周波数的観点

室内音響指標の周波数帯域分析を行うことや，帯域値を用いて新たな指標が定義されることは多いが，直接的に音場の周波数に関する側面を表すために考案された指標は少ない．ここでは，周波数帯域が限定的である音声に関する室内の伝送性能を表す指標を取り上げる他，室内音響指標の周波数帯域分析を行う際の注意事項について述べる．

了解度に関する指標

了解度は音声品質を表す尺度であり，通信だけでなく室内音響においても重要なものである．了解度は有意味な単語や文章を単位として構成された試験音声を受音者に了解された割合を百分率で表したもので，単語を単位とした場合は単語了解度，文章の場合は文章了解度と呼ぶ．これに類似する明瞭度は単音や無意味な音節を試験音とするものであり，それぞれ単音明瞭度，音節明瞭度と呼ぶ．了解度と明瞭度の評価は聴感実験によるが，心理量を推定する物理指標も提案されている．単語了解度の主観評価方法に関しては，ANSI s3.2^[6] で規格化されている modified rhyme test (MRT) 及び diagnostic rhyme test (DRT)，2010 年まで ISO/TR 4870^[128] に記されていた phonetically balanced word scores (PB)，規格化はされていないが $\%Al_{cons}$ (articulation loss of consonants)^[210] 等がある．物理指標に関しては，明瞭度指数 (articulation index, AI)，speech intelligibility index (SII)，音声伝達指標 (speech transmission index, STI) 等がある．これらの指標は了解度と明瞭度の両者に対して特に区別せずに用いられる．

AI は周波数に依存する明瞭度貢献度と SN 比が考慮された指標であり，基本となる指標を French and Steinberg^[93] が提案し，後に Fletcher *et al.*^[92] が改良し，ANSI S3.5^[5] として規格化されている．SII は，AI に対して残響や歪みの影響が考慮に加えられたものであり，ANSI S3.5^[5] として規格化されている．STI^[121,253] は，音声は情報を伝送するための変調された信号であるとの考え方に基づいている．伝送経路における信号のパワーの変調の保存性を表す modulation transfer function (MTF) をもとに，人間の実効感覚を考慮した重み付けをすることで STI が得られる．rapid speech transmission index (RASTI)

[122] は STI を簡略化したものであり，STI とともに IEC 60268-16^[126] で規格化されている．以上の指標はいずれも 0 から 1 の値をとり，値が大きいほど明瞭性が高いことを表す．また，IEC 60849^[125] では，異なる指標間の比較をするために common intelligibility scale (CIS) を用いて指標値を表す方法が示されている．STI を例にとると，CIS は以下のように表される．

$$\text{CIS} = 1 + \log_{10} \text{STI}. \quad (2.59)$$

D_{50} も音声の明瞭性を表す指標であるが，類似した指標として雑音の影響の考慮がされた useful-to-detrimental ratio U_{50} ^[38] が提案されている．

また，STI を用いたオープンプランオフィスの音環境に関する指標として，distraction distance r_D (STI < 0.5 となる距離) と privacy distance r_P (STI < 0.2 となる距離) が ISO 3382-3^[134] で定義されている．

室内音響指標の周波数帯域分析

フィルター処理 室内音響指標は通常 1/1 オクターブバンド値または 1/3 オクターブバンド値として算出する．周波数帯域分析を行う際には，用いるフィルターの特性が値に影響^[124]を及ぼすことがあるため，時間・周波数特性を考慮してフィルターを適切に設計すべきである．特に，短い残響の室や低音域での影響が顕著であり，ISO 3382-1^[132] では，信頼できる結果を得るためには以下の条件^[136]を満たす必要があるとしている．

$$BT > 16, \quad (2.60)$$

但し， B は周波数帯域幅 [Hz]．また，IEC 61260-1^[127] ではバンドパスフィルターの周波数特性が規定されており，ANSI S1.11^[7] では周波数特性に応じて IIR (infinite impulse response) フィルターを 3 段階の class に分類している．

フィルター処理によって生じる信号の時間遅延の影響に関して ISO 3382-1^[132] は，室内インパルス応答に時間窓を掛けてからフィルター処理を行うことで対応することが最善であるとしている．このとき，室内インパルス応答の開始時刻は，直接音に対応するピークから遡って，ピークに対して -20 dB 以下かつ暗騒音より十分に大きい点とし，終了時刻は，残響減衰曲線における -30 dB 以下の点とする．また，室内インパルス応答を前後期に分離する C_{te} 等の算出に関しても同様に，時間窓を掛けた後にフィルター処理を行う．

帯域幅 人間の聴覚は 500 Hz から 5 kHz の感度が高く，可聴周波数域は 20 Hz から 20 kHz の約 10 オクターブに及ぶ^[163]．しかしながら，室内音響において全ての可聴域を検討の対象とすることは少なく，1/1 オクターブバンドの中心周波数で 125 Hz から 4 kHz までの 6 帯域を取り扱うことが多い．この理由は，音源出力や計算機性能等に関する技術上の制約によるものだけでない．現実の音源の周波数帯域は，話声では 100 Hz から 300

Hz 程度であり，楽音の基本周波数（基音）ではパイプオルガンや一部の打楽器を除くと 4 kHz 程度以下である．また，音波の伝搬性状として，空気吸収による減衰率が大い高音域は室条件の影響が現れにくいため検討の優先度が低い．さらに，人間の可聴域に関して，上限周波数は加齢に伴って低下し，下限周波数付近の感度は著しく低い．

2.3.5 小結

要約

表 2.4 に ISO 3382-1^[132] で規格化されている室内音響指標を要約する．

Table 2.4 Acoustic quantities grouped according to listener aspects.

Subjective listener aspect	Acoustic quantity	Single number freq. avg. [Hz] ^a	JND	Typical range ^b
Subjective level of sound	G	500 to 1000	1 dB	−2 to 10 dB
Perceived reverberance	EDT	500 to 1000	5 %	1 to 3 s
Perceived clarity of sound	C_{80}	500 to 1000	1 dB	−5 to 5 dB
	D_{50}	500 to 1000	0.05	0.3 to 0.7
	T_s	500 to 1000	10 ms	60 to 260 ms
ASW	J_{LF} or J_{LFC}	125 to 1000	0.05	0.05 to 0.35
LEV	L_J	125 to 1000	Not known	−14 to 1 dB
Ensemble conditions	ST_{Early}	250 to 2000	Not known	−24 to −8 dB
Perceived reverberance	ST_{Late}	250 to 2000	Not known	−24 to −10 dB

^a The single number frequency averaging denotes the arithmetical average for the octave bands, except for L_J which shall be energy averaged.

^b Frequency-averaged values in single positions in non-occupied concert and multi-purpose halls up to 25,000 m³.

課題

室内音響指標は多くの研究者が長い時間をかけて考案してきたが，以下に示すように様々な観点からの課題が残されており，現在でも指標の選択と淘汰が働いている．

測定環境

対象空間 室内音響指標は基本的にコンサートホールを想定して考案されている．しかしながら，音響に特別の配慮が必要な空間は多岐に亘る．特に，スタジオやホームシアター，会議室等の比較的に小規模な空間では，反射音密度は密であり，固有周波数密度は疎である等，音場の性状が大空間と異なる．そのため，室内音響指標の小規模空間への適用性に関する検討が散見^[32,150,292]されるが系統性は不十分であるように見える．

空室測定 室内音響指標は観客等の利用者がいない空室時に測定されることが多い．実際の室利用を想定した測定は経済的コストが大きい上，大音量の測定信号を人間が暴露する

ことは好ましくない．これらの理由から空室時の測定が現実的であるが，人間が音響に及ぼす影響は小さくない^[24]．人間は 0.25 から 0.40 の吸音率を有しているため^[330]，残響時間は過大評価側に，明瞭性は過小評価側に見積もられる．残響時間に関する聴衆の影響の補正方法は Bradley^[39]，Hidaka *et al.*^[113] が提案している．主なホールでは跳ね上げ式の座面の裏を吸音性としているため，聴衆の影響が軽減されている^[20] が，他の多くの室では空室時の測定結果に対して実際の利用状況を想定した解釈が必要となる．

音源信号 室内インパルス応答は音源として単一の無指向性スピーカーを用いて測定されるが，実際の音源は指向性があり，複数の場合もある．より現実の利用状況を模擬した測定を行うために，Pätynen *et al.*^[207,208] はオーケストラの典型的な構成を想定した個数及び周波数特性，指向特性の音源による測定を行っており，この音源を *loudspeaker orchestra* と称している．

独立性 人間の心理は多様であり，上述の指標はその一面を表すに過ぎない．これまで，より多くの心理的側面を表すために数多くの指標が提案されてきたが，それら全てを用いて音場の評価を行うことは現実的ではない．情報量の増大は，極限的には室内インパルス応答波形そのもので音場を評価することに帰結することからも明らかである．指標間に相関が見られる場合^[209] があることから，室の目的に応じて適切な指標を選択することが重要である．室内音響指標の独立性に関しては，以下のようにホールやオペラハウスを対象とした多くの検討がなされているが^[50]，定まった見解は得られていない．

Schroeder *et al.*^[240] は T ，ITDG， D_{50} ，IACC を重要な指標とした．山本と鈴木^[335] は無響室で心理実験を行い，明瞭性に関する指標，音量因子，両耳間相関度，にそれぞれ類する指標で心理評価空間を表した．Barron and Marshall^[18] は IACC や側方エネルギー率で表される空間印象の重要性を示した．Ando^[8,9] は聴取レベル (listening level, LL)，ITDG，IACC， T または EDT の 4 種の指標によって好ましさ (preference) が表せることを示した．Beranek^[24,27,110] は，指揮者，批評家，愛好者を対象とした調査を基に，世界の著名なホールを序列化し，指標との対応を検討した．その結果，IACC (BQI)， EDT_{mid} ， G_{125Hz} (125 Hz 帯域の G 値)，SDI (第 2.2.2 節)，ITDG，BR の 7 種の指標が重要であると結論した．Hidaka and Nishihara^[112] は室内楽用のホールでは T ， G ，BQI，ITDG が直交した指標であることを示した．Cerdá *et al.*^[51] はコンサートホールを対象とした因子分析を行った結果，3 種の直交した軸を示した．第一に，了解度や明瞭性に関係する T_{mid} ，第二に，ASW に関係する J_{LFE4} ， J_{LFC4} ， $IACC_{E3}$ の 3 指標の線形結合または BQI，第三に，LEV または音量感に関係する G_{mid} と BR の線形結合である．

空間偏差 指標値は測定位置のわずかな違いによって JND を超えて大きく変化することがある^[119,209]．Nielsen *et al.*^[196] はホールを測定した結果，隣席間で C_{80} が最大で 3.2 dB の変化があったことを報告している．Rossing^[223] は T に比べて EDT の変動性が大き

いことを言及している．De Vries *et al.*^[74] は Amsterdam の Concertgebouw で 5 cm 間隔のマイクロフォンアレイを用いて T_{20} , EDT, C_{80} , J_{LF} , $1 - IACC_{E(L)}$ を算出した結果，隣接する受音点であっても JND を超えて変化する場合があり，特に初期反射音に関する指標で顕著であることを示している．ISO 3382-1^[132] では，音源点は 2 箇所以上とし，受音点は空間全体に設置することとしている．特に残響時間に関しては，値のばらつきに関する統計的な考察^[72, 73] に基づいて，要求精度に応じた音源・受音点の数が ISO 3382-2^[131] に示されている．

聴覚特性 音波は人間の耳に到達し，外耳（耳介・外耳道・鼓膜），中耳（耳小骨），内耳（蝸牛）を経て，音として知覚されるまでに様々な信号処理が施される．聴覚は非線形性，臨界帯域，マスキング，位相同期，両耳効果等の多岐にわたる特性を持つことが知られているが，室内音響の評価への反映は限定的である．

聴覚の周波数分析機能に関しては，聴覚フィルターと呼ばれるバンドパスフィルターによる模擬がなされている．Patterson^[206] による gammatone フィルターが提案されて以降，入野^[295] による gammachirp フィルターや Irino and Patterson^[135] による動的圧縮型 gammachirp フィルター等に展開されており，室内音響の評価としてエコー検出への応用^[180] が検討されている．また，Yamada *et al.*^[284] は経時マスキングを RC 回路を用いてモデル化し，エコー検出に関する指標である echo index (EI) を提案している．さらに，聴覚全体を模擬する試みとして，Dau *et al.*^[70, 71] が単耳を対象とした信号処理モデルを考案し，Breebaart^[45-47] は両耳へと拡張した．Van Dorp Schuitman^[271] は Breebaart のモデルを利用して残響感，明瞭性，拡がり感に関する指標を定義している．

2.4 残響理論

室内の残響理論は拡散音場の仮定に基づく Sabine の式^[227]を起源として, Eyring-Norris^[85,200], Millington-Sette^[186,247], Kuttruff^[160,161]の残響式が有名である. 特に最初の二つの古典的残響式は, 室形や吸音分布は考慮できないものの^[100], 現在の室内音響設計でも幅広く使われている. しかしながら, 大抵の室は矩形や不均等な吸音分布であり, 残響時間の誤評価が生じやすい.

矩形室に関しては Fitzroy^[91]の経験式に始まり, Pujolle^[213], Hirata^[115], Arau-Puchades^[12], Nilsson^[198,199], Neubauer^[195]らが修正式を提案している. Fitzroy 式は直交 3 方向の残響時間の算術平均を経験的に仮定しているのに対して, Arau-Puchades 式は理論的に幾何平均を仮定している. 両式とも明快ながら, 様々な条件で成立しない. Nilsson 式は周波数依存性を考慮したものであり, 欧州規格 EN 12354-6^[83]の Annex D (informative) に不均等吸音の場合の残響式として記述されている. 一方, Hirata は鏡像法に基づき, 1 次元・2 次元・3 次元音場への分解を通して残響理論を導いている. その理論は波動モード理論への整合が意図されているが, 理論構築の際の誤解が不整合を招いているようにみえる.

一般に, 壁面散乱は音場の拡散性を高め, 残響時間を低下する側に働くが, 室形や吸音分布に大きく依存する^[64,165,281]. 不均等吸音の矩形室では壁面散乱の影響が大きくなりやすいのに対して, 均等吸音の不整形室では影響は小さい. 近年, 壁面の拡散性指標として, 乱反射率が幾何音響シミュレーションに導入されている^[280]. その測定法は既に ISO 17497-1^[130]で規格化され, 数値解析による予測も実現化している^[81,152,168]. 壁面散乱と室内残響との関連についての研究が進められており^[105,145,162], Sakuma^[230]により乱反射率を導入した非拡散音場の残響理論が構築された.

本節では, 拡散音場の仮定に基づく残響理論の起源である Sabine 式及び Eyring 式を導出し, それらの式から発展した主な残響式を概観する. その上で, 壁面拡散を考慮した矩形室の残響理論を定式化する. 尚, 空気吸収の影響は考慮しないこととする.

2.4.1 任意形状室の残響理論

Sabine の残響理論

室容積 V [m^3] , 室表面積 S [m^2] , 音響エネルギー密度 E [J/m^3] の拡散音場を想定する . 図 2.3 に示すように , 音場内の微小容積 dV 内に含まれる音響エネルギー $E dV$ [J] から , 角度 θ [rad] , 距離 r [m] にある室境界の微小面積 dS に入射するエネルギー J_θ は実効面積を考慮すると次式で表される .

$$J_\theta = \frac{dS \cos \theta}{4\pi r^2} E dV \quad [\text{J}]. \quad (2.61)$$

従って , 全方向から単位面積 , 単位時間あたりに入射する音響エネルギー I は , 極座標系で上式を積分することで得られる . 極座標系では , $dV = r^2 \sin \theta dr d\theta d\phi$ と表されることから ,

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{dS} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^c \frac{dS \cos \theta}{4\pi r^2} E r^2 \sin \theta dr d\theta d\phi \\ &= \frac{cE}{2} \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta \\ &= \frac{cE}{4} \quad [\text{W}/\text{m}^2], \end{aligned} \quad (2.62)$$

となる . 但し , c は音速 [m/s] .

ここで , 出力 W [W] の音源が定常駆動されるとき , 時刻 t [s] における音響パワーの収

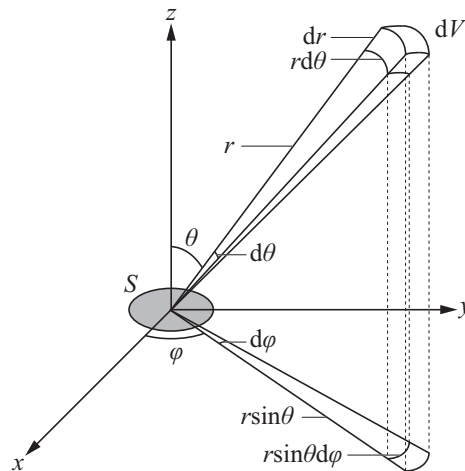


Figure 2.3 Incidence to wall in diffuse sound field.

支は次式で表される．

$$W - \frac{cE(t)}{4}A = V \frac{dE(t)}{dt} \quad [\text{W}], \quad (2.63)$$

但し， $A = S\bar{\alpha} \text{ [m}^2\text{]}$ は等価吸音面積であり，左辺第一項は音源から音場に供給されるパワー，左辺第二項は壁面に吸音されるパワー，右辺はパワーの変化量を表す．上式を基礎式として，音響エネルギー密度の定常状態，成長過程，減衰過程を定式化する．

定常状態 定常状態は，音響パワーの発生と消滅が釣り合っている時間非依存の状態である．従って，定常状態の音響エネルギー密度 E_d は，基礎式の右辺を $dE(t)/dt = 0$ とすることで得られる．

$$W - \frac{cE_d}{4}A = 0, \quad (2.64)$$

$$\therefore E_d = \frac{4W}{cA} \quad [\text{J/m}^3]. \quad (2.65)$$

成長過程 成長過程は， $t = 0$ で音源を駆動してから， $t \rightarrow \infty$ で定常状態 ($E(\infty) = E_d$) になるまでの過程である．定常状態に達する以前の時刻では， $E(t)$ が E_∞ より $\Delta E(t)$ だけ小さいと考えて， $E(t) = E_\infty - \Delta E(t)$ と置く．これを基礎式に代入して解くと，

$$\begin{aligned} W - \frac{c\{E_d - \Delta E(t)\}}{4}A &= V \frac{d\{E_d - \Delta E(t)\}}{dt}, \\ \therefore W - \frac{cE_d}{4}A + \frac{c\Delta E(t)}{4}A &= V \frac{dE_d}{dt} - V \frac{d\Delta E(t)}{dt}, \\ \therefore \frac{c\Delta E(t)}{4}A &= -V \frac{d\Delta E(t)}{dt}. \end{aligned} \quad (2.66)$$

ここで， $d\Delta E(t)/\Delta E(t) = (cA/4V)dt$ と変形し，両辺に対して時間積分を行うと，

$$\begin{aligned} \ln \Delta E(t) + C_1 &= -\frac{cA}{4V}t + C_2, \\ \therefore \ln\{E_d - E(t)\} + C_1 &= -\frac{cA}{4V}t + C_2, \end{aligned} \quad (2.67)$$

但し， C_1, C_2 は積分定数であり， $t = 0$ のとき $E(0) = 0$ より， $C_2 - C_1 = \ln E_\infty$ となる．従って，成長過程における音響エネルギー密度は次式で表される．

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{E_d - E(t)}{E_d}\right) &= -\frac{cA}{4V}t, \\ \therefore E(t) &= E_d e^{-(cA/4V)t} = \frac{4W}{cA} e^{-(cA/4V)t} \quad [\text{J/m}^3]. \end{aligned} \quad (2.68)$$

減衰過程 減衰過程は，定常状態 $t = 0$ で音源を停止してからエネルギーが減衰する過程である．従って，基礎式に $W = 0$ を代入すると，

$$-\frac{cE(t)}{4}A = V \frac{dE(t)}{dt}, \quad (2.69)$$

となる．ここで， $dE(t)/E(t) = -(cA/4V)dt$ と変形し，両辺に対して時間積分を行うと，

$$\ln E(t) + C_3 = -\frac{cA}{4V}t + C_4, \quad (2.70)$$

但し， C_3, C_4 は積分定数であり， $t = 0$ のとき $E(0) = E_d$ より， $C_4 - C_3 = \ln E_d$ となる．従って，減衰過程における音響エネルギー密度は次式で表される．

$$\ln \left(\frac{E(t)}{E_d} \right) = -\frac{cA}{4V}t, \quad (2.71)$$

$$\therefore E(t) = E_d e^{-(cA/4V)t} \text{ [J/m}^3\text{]}. \quad (2.72)$$

上式は音響エネルギー密度が減衰率 $\delta = cA/4V$ [1/s] で指数減衰することを表している．ここで，エネルギー密度が定常状態から $1/1,000,000$ ，即ち， $E(t)/E_d = 10^{-6}$ となるまでの時間を残響時間 T として定義すると，式 (2.72) より Sabine の残響式が導かれる．

$$E(T) = E_d e^{-(cA/4V)T} = E_d \times 10^{-6} \text{ [J/m}^3\text{]}, \quad (2.73)$$

$$\therefore T = 6 \ln 10 \frac{4V}{cA} = K \frac{V}{S\bar{\alpha}} \text{ [s]}, \quad (2.74)$$

但し， $K = 24 \ln 10 / c$ は音速に依存する定数 [s/m] であり， $K = 0.161$ (気温約 20) がよく用いられる．

Eyring の残響理論

完全吸音条件 ($\bar{\alpha} = 1$) では，残響時間 $T = 0$ となるべきであるが，Sabine 式では $S\bar{\alpha} = S$ となって T はある値を示すことから，Eyring は平均自由行路の概念を導入した修正式を提案した．

Sabine は音響エネルギーの連続的な減衰を仮定したのに対して，Eyring は鏡像法 (第 3.2.1 節) に基づき，鏡像音源から放射された音の離散的な到来によって段階的に減衰することを想定した．放射された音は受音点に到来するまでに境界面での反射を繰り返すが，各反射間の伝搬距離を平均的に捉え，これを平均自由行路 l [m] とした．従って，各反射までの平均伝搬時間は l/c [s] であり，この間に出力 W [W] の定常音源から発生するエネルギーは $W \cdot l/c$ [J] であるから， k 次反射までの反射音を含む音響エネルギー密度は次式で表される．

$$E_k = \frac{1}{V} \left\{ W \frac{l}{c} + \sum_{i=1}^k W \frac{l}{c} (1 - \bar{\alpha})^i \right\} = \frac{W}{V} \frac{l}{c\bar{\alpha}} \{ 1 - (1 - \bar{\alpha})^k \} \text{ [J/m}^3\text{]}. \quad (2.75)$$

従って、定常状態のエネルギー密度 E_d は、 $k \rightarrow \infty$ のとき $(1 - \bar{\alpha})^k \rightarrow 0$ より、次式で表される。

$$E_d = \frac{W}{V} \frac{l}{c\bar{\alpha}} \quad [\text{J/m}^3]. \quad (2.76)$$

上式は式 (2.65) と等価であるため、平均自由行路は次式で表される。

$$l = \frac{4V}{S} \quad [\text{m}]. \quad (2.77)$$

時刻 t までに境界面で反射する平均的な回数は $ct/l = (cS/4V)t$ であることから、減衰過程の音響エネルギー密度は次式で表される。

$$E(t) = E_d(1 - \bar{\alpha})^{(cS/4V)t} = E_0 e^{(cS/4V)\ln(1-\bar{\alpha})t} \quad [\text{J/m}^3]. \quad (2.78)$$

従って、式 (2.73), (2.74) と同様に、Eyring の残響式が導かれる。

$$T = \frac{KV}{-S\ln(1 - \bar{\alpha})} \quad [\text{s}]. \quad (2.79)$$

ここで、

$$-\ln(1 - \bar{\alpha}) = \bar{\alpha} + \frac{\bar{\alpha}^2}{2} + \frac{\bar{\alpha}^3}{3} + \cdots, \quad (2.80)$$

であることから、 $\bar{\alpha} \ll 1$ のときに第二項以下を無視すると分母は次のように近似され、Sabine 式と一致する。

$$-S\ln(1 - \bar{\alpha}) \approx S\bar{\alpha} \quad [\text{m}^2]. \quad (2.81)$$

また、 $\bar{\alpha} \rightarrow 1.0$ のとき $-\ln(1 - \bar{\alpha}) \rightarrow \infty$ 、従って $T \rightarrow 0$ となり、Sabine 式が修正されている。

その他の残響理論

Millington-Sette の残響理論 Eyring 式では，平均吸音率 $\bar{\alpha}$ に対して $\bar{\alpha}_E = -\ln(1 - \bar{\alpha})$ として高吸音率への適用性を高めた形として最も汎用的と言える．一方，Millington-Sette の残響理論^[186,247]では吸音面の偏在を考慮して，Eyring 式を基礎とする反射率の面積加重幾何平均を行った吸音率を導入している．

$$\bar{\alpha}_M = -\frac{1}{S} \sum_i S_i \ln(1 - \alpha_i), \quad (2.82)$$

但し， S_i ， α_i はそれぞれ境界 i の表面積 [m^2] と吸音率．従って，残響時間は次式で得られる．

$$T = \frac{KV}{S\bar{\alpha}_M} = \frac{KV}{-\sum_i S_i(1 - \alpha_i)} \quad [\text{s}]. \quad (2.83)$$

上式では，吸音面の偏在により残響時間が低下するが，一部の高吸音面による吸音効果を過大評価しやすい．この点を補正するため，Dance and Shield^[66,67] は Millington 式の実務適用のために吸音率を換算する図表を提案している．

Kuttruff の残響理論 Kuttruff^[161,163] は Lambert 則に従う壁面拡散と不均等吸音を考慮するために，壁面衝突距離の相対分散 γ^2 を導入して Eyring 式を補正した．

$$\bar{\alpha}_K = \bar{\alpha}_E \left(1 - \frac{\gamma^2}{2} \bar{\alpha}_E \right) + \frac{\sum_i S_i^2 (1 - \alpha_i) (\bar{\alpha} - \alpha_i)}{S^2 (1 - \bar{\alpha})^2}, \quad (2.84)$$

右辺第一項は扁平室のように壁面衝突距離の分散が大きくなると，平均吸音率が見かけ上低下することを意味し， $\gamma^2 = 0$ のとき Eyring 式と一致する．尚， γ^2 は数値シミュレーションにより算出する必要があるが，通常の矩形室では $\gamma^2 \approx 0.4$ となる．また，第二項は吸音分布が不均等な場合に正の値となり，見かけ上平均吸音率が上昇することになる．但し，この上昇は壁面において完全拡散反射を仮定しているためであり，吸音面が著しく偏在した矩形室などの非拡散音場には必ずしも当てはまらない．

2.4.2 矩形室の残響理論

壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論 [230]

前半では，鏡像法に基づく Hirata 理論 [115] を修正し，鏡面反射場として矩形室の残響理論を近似的に定式化する．後半では，壁面の拡散性を考慮して乱反射率を導入し，鏡面反射場と拡散反射場からなる非拡散音場を想定した残響理論を定式化する．尚，第 A 章では 2 次元音場における定式化を行う．

矩形室の鏡面反射場の残響

鏡像音源による鏡面反射場 図 2.4 の通り，矩形室内の点音源に対して鏡像音源配列が定まる．以降，室中央の受音点に対して鏡像音源の連続的分布を想定し，反射場の平均エネルギー密度に着目する．受音点から等距離にある微小区間の音源個数，距離減衰，壁面吸音を算定すると，定常状態 $t = 0$ [s] で音源出力 W [W] を停止した場合，鏡面反射場の音響エネルギー密度は次式で表される．

$$E^S(t) = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_{ct}^\infty \frac{W}{4\pi cr^2} \frac{r^2 \sin \theta dr d\theta d\phi}{L_x L_y L_z} \times (1 - \tilde{\alpha}_x)^{\frac{r \sin \theta \cos \phi}{L_x}} (1 - \tilde{\alpha}_y)^{\frac{r \sin \theta \sin \phi}{L_y}} (1 - \tilde{\alpha}_z)^{\frac{r \cos \theta}{L_z}} \quad [\text{J/m}^3], \quad (2.85)$$

但し，音速 c [m/s]，室寸法 $L_{x(y,z)}$ [m]，平均吸音率 $\tilde{\alpha}_{x(y,z)}$ であり，平行壁間の交互反射を考慮して，

$$\tilde{\alpha}_{x(y,z)} = 1 - \sqrt{(1 - \alpha_{x(y,z)}^+)(1 - \alpha_{x(y,z)}^-)}, \quad (2.86)$$

但し， $\alpha_{x(y,z)}^\pm$ は各方向対向 2 面の吸音率である．一般に，式 (2.85) は方向依存の多数の指数減衰からなり，厳密には数値積分が必要となる [100] ．

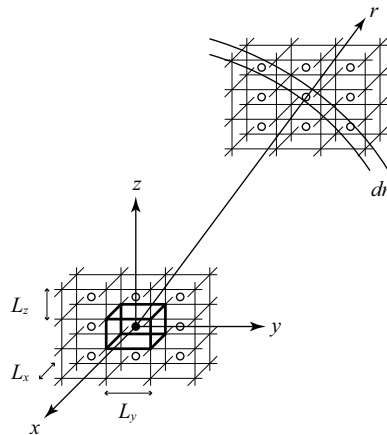


Figure 2.4 Image sources of a rectangular room.

古典的残響理論と同様，斜方向音源群の平均自由行路 l_{ob} [m] を 3 次元完全拡散音場の理論値 $l_r = 4V/S^{[153]}$ [m] ($V = L_x L_y L_z$ [m³] , $S = 2(L_x L_y + L_y L_z + L_z L_x)$ [m²]) と概ね等しいものとし，単一指数減衰を仮定する．さらに，式 (2.86) による各方向の幾何平均乱入射吸音率 $\tilde{\alpha}_{x(y,z)}^r$ に対して，3 方向の面積加重平均を仮定する．

$$\alpha_{\text{ob}} = \frac{L_y L_z \tilde{\alpha}_x^r + L_z L_x \tilde{\alpha}_y^r + L_x L_y \tilde{\alpha}_z^r}{L_y L_z + L_z L_x + L_x L_y}. \quad (2.87)$$

その結果，式 (2.85) は次式のように近似される．

$$\begin{aligned} E_{\text{ob}}^S(t) &= \int_{ct}^{\infty} \frac{W}{4\pi cr^2} (1 - \alpha_{\text{ob}})^{\frac{r}{l_{\text{ob}}}} \frac{4\pi r^2 dr}{V} \\ &= \frac{W}{c\hat{A}_{\text{ob}}} \exp(-\hat{A}_{\text{ob}} ct/V) \text{ [J/m}^3\text{]}, \end{aligned} \quad (2.88)$$

但し，吸音に関して， $\hat{A}_{\text{ob}} = A_{\text{ob}}/4$ [m²] , $A_{\text{ob}} = S\alpha_{\text{Eob}}$ [m²] , $\alpha_{\text{Eob}} = -\ln(1 - \alpha_{\text{ob}})$ である．(以降， \hat{A} はエネルギー密度に対する入射インテンシティの比を考慮した室吸音面積を表し， $\hat{A}/V = \alpha_{\text{E}}/l$ の関係が成り立つ．) 式 (2.88) は斜方向音源群の鏡面反射場の第 1 近似であり，Eyring 式と同形ながら平行壁間では Millington の平均吸音率を用いている．但し，この式は平均的な減衰から逸脱しやすい軸近傍・面近傍音源群の寄与も含まれている．以降では，鏡像音源を波動モードと関連づけて軸近傍・面近傍，斜方向音源群に区分し，1 次元・2 次元・3 次元鏡面反射場として取り扱う．

軸近傍音源群の鏡面反射場 x 軸近傍音源として正負方向から角度 $\pm\theta_y$ [rad] , $\pm\theta_z$ [rad] 以内の音源群を想定する (図 2.5) . この音源群は x 方向壁面に垂直入射，y, z 方向壁面に擦過入射する．室内 y, z 方向に対する鏡像音源からの行路差が 1/4 波長 (位相差 $\pi/2$) 以下の場合，波動論的には主に x 軸モードに寄与すると考えられる．音源が遠方かつ角度 $\theta_{y(z)}$ が小さい場合，最大行路差は $\Delta_{y(z)} \approx L_{y(z)} \sin \theta_{y(z)} \approx L_{y(z)} \theta_{y(z)}$ [m] となり，従って臨界角は次式で表される．

$$\theta_{x(y,z)} = \frac{\pi c}{2\omega L_{x(y,z)}} \text{ [rad]}. \quad (2.89)$$

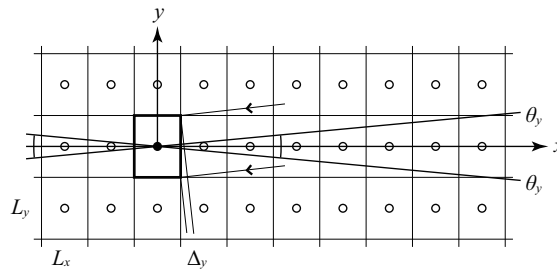


Figure 2.5 Axial Image sources for the x-axis in xy-plane.

臨界角 $\theta_{y(z)}$ における x 方向壁面の反射頻度は $n_{ax} \approx c/L_x$ [1/s], y, z 方向壁面の反射頻度は $n_{axy(z)} \approx c \sin \theta_{y(z)}/L_{y(z)} \approx c \theta_{y(z)}/L_{y(z)}$ [1/s] で表され, 音源群の平均としては $\bar{n}_{ax} \approx n_{ax}$, $\bar{n}_{axy(z)} \approx n_{axy(z)}/2$ となる. 式 (2.85) の角度に関する積分区間を限定することにより, x 軸近傍音源群による 1 次元鏡面反射場のエネルギー密度は次式で表される.

$$\begin{aligned} E_{ax}^S(t) &= \frac{4W}{c} \int_{ct}^{\infty} \frac{2(2\theta_y)(2\theta_z)dr}{4\pi V} (1 - \tilde{\alpha}_x^n)^{\frac{r}{L_x}} (1 - \tilde{\alpha}_y^g)^{\frac{\theta_y r}{2L_y}} (1 - \tilde{\alpha}_z^g)^{\frac{\theta_z r}{2L_z}} \\ &= \frac{4W}{c} \frac{\pi c^2 L_x}{2\omega^2 V^2} \int_{ct}^{\infty} (1 - \alpha_{ax})^{\frac{r}{L_x}} dr \\ &= \frac{4W}{c} \frac{\pi c^2 L_x}{2\omega^2 V \hat{A}_{ax}} \exp(-\hat{A}_{ax} ct/V) \text{ [J/m}^3\text{]}, \end{aligned} \quad (2.90)$$

但し, 1 次元平均自由行路 $l_x = L_x$ [m], 軸近傍音源の 1 次元反射場への寄与は他の 2 方向で同相のため 3 次元反射音場への寄与の 4 倍となる (モード理論における規準化係数の比に相当する). 吸音に関しては, $\hat{A}_{ax} = A_{ax}/2$ [m²], $A_{ax} = 2L_y L_z \alpha_{Eax}$ [m²], $\alpha_{Eax} = -\ln(1 - \alpha_{ax})$,

$$\alpha_{ax} = 1 - (1 - \tilde{\alpha}_x^n)(1 - \tilde{\alpha}_y^g)^{\varepsilon_{axy}}(1 - \tilde{\alpha}_z^g)^{\varepsilon_{axz}}, \quad (2.91)$$

$$\varepsilon_{axy(z)} = \frac{\bar{n}_{axy(z)}}{\bar{n}_{ax}} \approx \frac{\pi c L_x}{4\omega L_{y(z)}^2}, \quad (2.92)$$

但し, x 方向壁面の垂直入射吸音率 $\tilde{\alpha}_x^n$, y, z 方向壁面の擦過入射吸音率 $\tilde{\alpha}_{y(z)}^g$ であり, これらは式 (2.86) の平行壁間の幾何平均に基づく. 厳密には, 上記の垂直・擦過入射は軸近傍音源群の角度範囲からの入射に相当し, その範囲は周波数に依存する. 従って斜入射吸音率のデータベースが必要となるが, 実用的には局所作用の仮定に基づき概算が可能である (第 5.2.3 節). 1 次元反射場としての全平均吸音率 α_{ax} は, x 方向に対する y, z 方向の平均反射頻度の比 $\varepsilon_{axy(z)}$ を通して, 各方向の反射頻度が反映される.

軸近傍音源の各方向の反射頻度はほぼ独立であるため, 式 (2.91) では平均反射頻度の重み付け幾何平均としている. 但し, 何れかの壁面の擦過入射吸音率が $\alpha_{y(z)}^g = 1$ (完全吸音) の場合は $\alpha_{ax} = 1$ となり, 式 (2.90) の x 軸近傍音源群の寄与は完全に消失する. この場合は明らかに不自然であり, 理論の適用外となる.

面近傍音源群の鏡面反射場 軸近傍音源と同様に, xy 面近傍鏡像音源として面から角度 $\pm\theta_z$ [rad] 以内の音源群を想定する. この音源群は x, y 方向壁面に乱入射, z 方向壁面に擦過入射する. 室内 z 方向に対する鏡像音源からの行路差が 1/4 波長 (位相差 $\pi/2$) 以下の場合, 主に xy 接線モードに寄与し, 臨界角は軸近傍音源と同様に式 (2.89) で表される.

臨界角における x, y 方向壁面の平均反射頻度は 2 次元平均自由行路を $l_{xy} = \pi L_x L_y / 2(L_x + L_y)$ [m] として $\bar{n}_{txy} \approx c/l_{xy}$ [1/s], z 方向壁面の平均反射頻度は $\bar{n}_{tz} \approx n_{tz}/2 \approx c\theta_z/2L_z$ [1/s] で表される. 従って式 (2.90) と同様, xy 面近傍音源群による

2次元鏡面反射場のエネルギー密度は次式で表される．

$$\begin{aligned}
 E_{\text{txy}}^S(t) &= \frac{2W}{c} \int_{ct}^{\infty} (1 - \tilde{\alpha}_{\text{xy}}^r) \frac{r}{L_{\text{xy}}} (1 - \tilde{\alpha}_z^g)^{\frac{\theta_z r}{2L_z}} \frac{2\pi(2\theta_z)dr}{4\pi V} \\
 &= \frac{2W}{c} \frac{\pi c L_x L_y}{2\omega V^2} \int_{ct}^{\infty} (1 - \alpha_{\text{txy}})^{\frac{r}{L_{\text{xy}}}} dr \\
 &= \frac{2W}{c} \frac{\pi c L_x L_y}{2\omega V \hat{A}_{\text{txy}}} \exp(-\hat{A}_{\text{txy}} ct/V) \quad [\text{J/m}^3],
 \end{aligned} \tag{2.93}$$

但し，面近傍音源の2次元反射場への寄与は他の1方向で同相のため3次元反射場への寄与の2倍となる．吸音に関しては， $\hat{A}_{\text{txy}} = A_{\text{txy}}/\pi$ [m^2]， $A_{\text{txy}} = 2(L_x + L_y)L_z \alpha_{\text{Etxy}}$ [m^2]， $\alpha_{\text{Etxy}} = -\ln(1 - \alpha_{\text{txy}})$ ，

$$\alpha_{\text{txy}} = 1 - (1 - \tilde{\alpha}_{\text{xy}}^r)(1 - \tilde{\alpha}_z^g)^{\epsilon_{\text{tz}}}, \tag{2.94}$$

$$\tilde{\alpha}_{\text{xy}}^r = \frac{L_y \tilde{\alpha}_x^r + L_x \tilde{\alpha}_y^r}{L_y + L_x}, \tag{2.95}$$

$$\epsilon_{\text{tz}} = \frac{\bar{n}_{\text{tz}}}{\bar{n}_{\text{txy}}} \approx \frac{\pi^2 c L_x L_y}{8\omega(L_x + L_y)L_z^2}, \tag{2.96}$$

但し， $\tilde{\alpha}_{\text{xy}}^r$ は x, y 方向壁面の面積加重平均乱入射吸音率であり，各方向については式(2.86)の平行壁間の幾何平均に基づく．2次元反射場としての全平均吸音率 α_{txy} は， x, y 方向に対する z 方向の平均反射頻度の比 ϵ_{tz} を通して反射頻度が反映される．但しここでも，擦過入射吸音率が $\alpha_z^g = 1$ (完全吸音) の場合は $\alpha_{\text{txy}} = 1$ となり，式(2.93)の xy 面近傍音源群の寄与は完全に消失するため，理論の適用外となる．

全鏡面反射場の残響 式(2.88)は軸・面近傍音源群の寄与を含み，式(2.93)も軸近傍音源群の寄与を含むことから，寄与の重複を除いて式(2.88)，(2.90)，(2.93)を合計すると，全鏡面反射場のエネルギー密度は次式で表される．

$$\begin{aligned}
 E^S(t) &= \frac{W}{c} \left[\frac{\gamma_{\text{ob}}}{\hat{A}_{\text{ob}}} \exp(-\hat{A}_{\text{ob}} ct/V) \right. \\
 &\quad + \sum_{\text{xy}} \frac{2\gamma_{\text{txy}}}{\hat{A}_{\text{txy}}} \exp(-\hat{A}_{\text{txy}} ct/V) \\
 &\quad \left. + \sum_x \frac{4\gamma_{\text{ax}}}{\hat{A}_{\text{ax}}} \exp(-\hat{A}_{\text{ax}} ct/V) \right] \quad [\text{J/m}^3],
 \end{aligned} \tag{2.97}$$

但し，各音源群の音源個数の割合を次式で表す．

$$\begin{aligned}
 \gamma_{\text{ob}} &= 1 - \left(\frac{\pi c S}{4\omega V} + \frac{\pi c^2 L}{8\omega^2 V} \right), \quad (L = 4(L_x + L_y + L_z) \text{ [m]}), \\
 \gamma_{\text{txy}} &= \frac{\pi c L_x L_y}{2\omega V} \left[1 - \frac{c(L_x + L_y)}{\omega L_x L_y} \right], \quad \gamma_{\text{ax}} = \frac{\pi c^2 L_x}{2\omega^2 V}.
 \end{aligned}$$

従って、鏡面反射場の残響は斜方向 1 種、面近傍 3 種、軸近傍 3 種、計 7 種の指数減衰により構成され、各減衰率は次式で表される。

$$D_{\text{ob}(\text{txy},\text{ax})}^S = 10 \log_{10} e \cdot c \hat{A}_{\text{ob}(\text{txy},\text{ax})} / V \quad [\text{dB/s}]. \quad (2.98)$$

尚、各減衰率に関しては以下の関係が成り立つ。

$$\min(D_{\text{ax}}^S, D_{\text{ay}}^S, D_{\text{az}}^S) < \min(D_{\text{txy}}^S, D_{\text{tyz}}^S, D_{\text{tzy}}^S) < D_{\text{ob}}^S. \quad (2.99)$$

式 (2.97) は、波動音響のモード理論から導出される近似表現 [190, 267] と完全に一致する。軸（面）近傍音源の範囲を図 2.6 の波数空間の固有モード分布から解釈できる。軸（接線）モードの支配領域を隣接する斜めモードの格子点との中間までとみなすと、波数によって上限角度が次式で定まる。

$$\frac{\pi}{2L_{y(z)}} = k \sin \theta_{y(z)} \approx k \theta_{y(z)} \quad [1/\text{m}]. \quad (2.100)$$

上式は式 (2.89) と一致し、波数空間の軸（接線）モード領域が鏡像空間の軸（面）近傍音源群に対応すると言える。

以上の理論では Hirata 理論 [115] に対して 3 つの修正点、即ち臨界角の定義、吸音率の平均方法、エネルギーの規準化係数の導入が含まれる。元の理論では臨界角の導出が曖昧で本論と異なるため、モード理論と完全には整合していない。吸音率に関しては、平行壁間の交互反射を考慮せず、1 次元・2 次元音場についても反射頻度の加重算術平均となっているため、最終的に残響減衰が異なってくる [116]。

修正理論では、各方向の反射頻度の独立性を考慮して幾何平均を導入した。しかし、完全吸音面を含む極端な条件では、全ての 1 次元音場と吸音面に接する 2 次元音場が完全に消失する矛盾が生じ、具体的には擦過入射の完全吸音条件は適用外となる。一方、元の理論では上記条件で 1 次元・2 次元音場が消失することなく、完全吸音面に垂直入射す

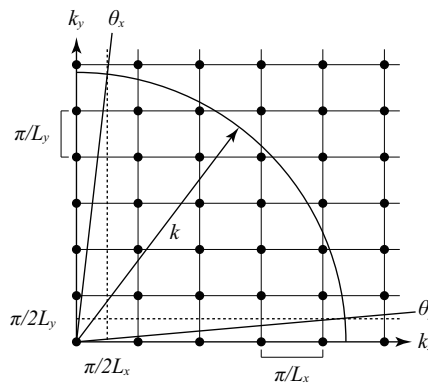


Figure 2.6 Axial modes in the xy-plane in wavenumber space.

る1次元音場すら消失しない．従って，元の理論は垂直入射の完全吸音条件に適用不能となる．

壁面散乱を伴う矩形室の残響

鏡面反射場と拡散反射場 壁面の乱反射率は全反射エネルギーに対する非鏡面反射エネルギーの比として定義される^[280]．この乱反射率の導入により，鏡像音源からのエネルギーを反射毎に鏡面・拡散エネルギーの分配が可能となる．鏡面エネルギーは反射行程で一度も散乱されない成分と仮定すると，鏡面反射場のエネルギー密度は式(2.97)の吸音率を全て鏡面反射吸音率 $\beta = \alpha + (1 - \alpha)s$ (乱反射率 s) に置換することで単純に導出される．即ち，各種係数 $\tilde{\alpha}$, α_E , A , \hat{A} を $\tilde{\beta}$, β_E , B , \hat{B} に置換し，次式で表される．

$$E^S(t) = \frac{W}{c} \left[\frac{\gamma_{ob}}{\hat{B}_{ob}} \exp(-\hat{B}_{ob}ct/V) + \sum_{xy} \frac{2\gamma_{xy}}{\hat{B}_{xy}} \exp(-\hat{B}_{xy}ct/V) + \sum_x \frac{4\gamma_{ax}}{\hat{B}_{ax}} \exp(-\hat{B}_{ax}ct/V) \right] \text{ [J/m}^3\text{]}. \quad (2.101)$$

ここで，各減衰率は次式に修正される．

$$D_{ob(xy,ax)}^S = 10 \log_{10} e \cdot c \hat{B}_{ob(xy,ax)} / V \text{ [dB/s]}. \quad (2.102)$$

図2.7の通り，鏡面エネルギーの一部が各反射で拡散エネルギーに遷移し，遷移後は完全拡散反射により減衰し，受音点に乱入射として到来するものと仮定する．鏡像音源から距離 r' [m] の微小区間で散乱するエネルギーの割合は次式で表される．

$$\lim_{dr' \rightarrow 0} 1 - (1 - s_{ob})^{\frac{dr'}{l_{ob}}} = \lim_{dr' \rightarrow 0} 1 - \exp[-(s_{Eob}/l_{ob})dr'] \rightarrow (s_{Eob}/l_{ob})dr' = (\hat{S}_{ob}/V)dr', \quad (2.103)$$

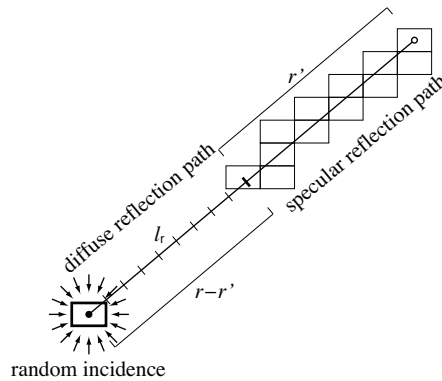


Figure 2.7 Transition from specular to diffuse reflections.

但し, $\hat{S}_{\text{ob}} = S_{\text{ob}}/4 \text{ [m}^2\text{]}$, $S_{\text{ob}} = S s_{\text{Eob}} \text{ [m}^2\text{]}$, $s_{\text{Eob}} = -\ln(1 - s_{\text{ob}})$, 3次元音場の平均乱反射率は次式で与えられる.

$$s_{\text{ob}} = \frac{L_y L_z (1 - \tilde{\alpha}_x^r) \tilde{s}_x^r + L_z L_x (1 - \tilde{\alpha}_y^r) \tilde{s}_y^r + L_x L_y (1 - \tilde{\alpha}_z^r) \tilde{s}_z^r}{L_y L_z (1 - \tilde{\alpha}_x^r) + L_z L_x (1 - \tilde{\alpha}_y^r) + L_x L_y (1 - \tilde{\alpha}_z^r)}, \quad (2.104)$$

但し, $\tilde{s}_{x(y,z)}^r$ は式 (2.86) の平行壁間の幾何平均に基づく乱入射乱反射率であり, s_{ob} は各方向の面積加重算術平均を仮定している. 距離 r' で遷移する拡散成分を算定し, 音源から受音点の全行路で積分すると, 斜方向音源群の拡散反射場のエネルギー密度が次式で表される.

$$\begin{aligned} E_{\text{ob}}^D(t) &= \frac{W}{c} \int_{ct}^{\infty} \int_0^r (1 - \beta_{\text{ob}})^{\frac{r'}{l_{\text{ob}}}} (1 - \alpha_r)^{\frac{r-r'}{l_r}} \frac{s_{\text{Eob}} dr'}{l_{\text{ob}}} \frac{dr}{V} \\ &= \frac{W}{c} \mu_{\text{ob}} \int_{ct}^{\infty} \left[(1 - \alpha_r)^{\frac{r}{l_r}} - (1 - \beta_{\text{ob}})^{\frac{r}{l_{\text{ob}}}} \right] \frac{dr}{V} \\ &= \frac{W}{c} \mu_{\text{ob}} \left[\frac{\exp(-\hat{A}_r ct/V)}{\hat{A}_r} - \frac{\exp(-\hat{B}_{\text{ob}} ct/V)}{\hat{B}_{\text{ob}}} \right] \text{ [J/m}^3\text{]}, \end{aligned} \quad (2.105)$$

但し, $\mu_{\text{ob}} = \hat{S}_{\text{ob}}/(\hat{B}_{\text{ob}} - \hat{A}_r)$, 拡散反射場の平均自由行路は $l_r \text{ [m]}$ である. 遷移前の鏡面反射行程では, 鏡面吸音率により減衰する ($\hat{B}_{\text{ob}} = B_{\text{ob}}/4 \text{ [m}^2\text{]}$, $B_{\text{ob}} = S \beta_{\text{Eob}} \text{ [m}^2\text{]}$, $\beta_{\text{Eob}} = -\ln(1 - \beta_{\text{ob}}) = \alpha_{\text{Eob}} + s_{\text{Eob}}$). 一方, 遷移後の拡散反射行程では, 古典的残響理論に基づき面積加重算術平均の乱入射吸音率により減衰する ($\hat{A}_r = A_r/4 \text{ [m}^2\text{]}$, $A_r = S \alpha_{\text{Er}} \text{ [m}^2\text{]}$, $\alpha_{\text{Er}} = -\ln(1 - \alpha_r)$). ここで, $l_{\text{ob}} \approx l_r$ と $\alpha_{\text{ob}} \geq \alpha_r$ の関係により, $\hat{B}_{\text{ob}} \geq \hat{A}_r$ と $0 \leq \mu_{\text{ob}} \leq 1$ が常に成り立つ.

軸・面近傍音源群の拡散反射場 軸近傍音源に関して式 (2.90), (2.105) と同様に考えると, x 軸近傍音源群の拡散反射場のエネルギー密度は次式で表される.

$$\begin{aligned} E_{\text{ax}}^D(t) &= \frac{W}{c} \int_{ct}^{\infty} \int_0^r (1 - \tilde{\beta}_x^n)^{\frac{r'}{l_x}} (1 - \tilde{\beta}_y^g)^{\frac{\theta_y r'}{2L_y}} (1 - \tilde{\beta}_z^g)^{\frac{\theta_z r'}{2L_z}} (1 - \alpha_r)^{\frac{r-r'}{l_r}} \frac{s_{\text{Eax}} dr'}{l_x} \frac{2(2\theta_y)(2\theta_z) dr}{4\pi V} \\ &= \frac{W}{c} \frac{\pi c^2 L_x}{2\omega^2 V} \int_{ct}^{\infty} \int_0^r (1 - \beta_{\text{Eax}})^{\frac{r'}{l_x}} (1 - \alpha_r)^{\frac{r-r'}{l_r}} \frac{\hat{S}_{\text{ax}} dr'}{l_x} \frac{dr}{V} \\ &= \frac{W}{c} \frac{\pi c^2 L_x}{2\omega^2 V} \mu_{\text{ax}} \left[\frac{\exp(-\hat{A}_r ct/V)}{\hat{A}_r} - \frac{\exp(-\hat{B}_{\text{ax}} ct/V)}{\hat{B}_{\text{ax}}} \right] \text{ [J/m}^3\text{]}, \end{aligned} \quad (2.106)$$

但し, $\mu_{\text{ax}} = \hat{S}_{\text{ax}}/(\hat{B}_{\text{ax}} - \hat{A}_r)$, 軸近傍音源の拡散反射場への寄与は斜方向音源と同等である. 吸音に関して, $\hat{S}_{\text{ax}} = S_{\text{ax}}/2 \text{ [m}^2\text{]}$, $S_{\text{ax}} = 2L_y L_z s_{\text{Eax}} \text{ [m}^2\text{]}$, $s_{\text{Eax}} = -\ln(1 - s_{\text{ax}})$ であり, 式 (2.91) と同様,

$$s_{\text{ax}} = 1 - (1 - \tilde{s}_x^n)(1 - \tilde{s}_y^g)^{\epsilon_{axy}}(1 - \tilde{s}_z^g)^{\epsilon_{axz}}, \quad (2.107)$$

但し, x 方向壁面の垂直入射乱反射率 \tilde{s}_x^n , y, z 方向壁面の擦過入射乱反射率 $\tilde{s}_{y(z)}^g$ であり, これらは式 (2.86) の平行壁間の幾何平均に基づく. 上記の垂直・擦過入射は周波数に依存

する角度範囲からの入射に相当するため，自由音場法測定^[280] または数値計算^[152] による斜入射乱反射率のデータベースが必要となる．1次元反射場としての全平均吸音率 α_{ax} は， x 方向に対する y, z 方向の平均反射頻度の比 $\varepsilon_{axy(z)}$ を通して，各方向の反射頻度が反映される．1次元鏡面反射場が拡散反射場より速く減衰する場合 ($\hat{B}_{ax} > \hat{A}_r$) は $\mu_{ax} \geq 0$ ，遅い場合は不等号が反転し，拡散反射場は1次元鏡面反射場の減衰に追従し，フラッターエコーが生じやすくなる．尚，両者の減衰が等しい特異な場合 ($\hat{B}_{ax} = \hat{A}_r$)，式 (2.106) は次式となる．

$$E_{ax}^D(t) = \frac{W}{c} \frac{\pi c^2 L_x}{2\omega^2 V} \frac{s_{Eax}}{\beta_{Eax}} \frac{1 + \hat{A}_r ct/V}{\hat{A}_r} \exp(-\hat{A}_r ct/V) \quad [\text{J/m}^3]. \quad (2.108)$$

吸音率の場合と同様，何れかの壁面の擦過入射乱反射率が $s_{y(z)}^g = 1$ (完全拡散) の場合は $\beta_{ax} = 1$ となり，式 (2.101) の x 軸近傍音源群の寄与は完全に消失するため，理論の適用外となる．

面近傍音源も同様にして， xy 面近傍音源群の拡散反射場のエネルギー密度は次式で表される．

$$\begin{aligned} E_{txy}^D(t) &= \frac{W}{c} \int_{ct}^{\infty} \int_0^r (1 - \tilde{\beta}_{xy}^r)^{\frac{r'}{l_{xy}}} (1 - \tilde{\beta}_z^g)^{\frac{\theta_z r'}{2L_z}} (1 - \alpha_r)^{\frac{r-r'}{l_r}} \frac{s_{Etxy} dr'}{l_{txy}} \frac{2\pi(2\theta_z) dr}{4\pi V} \\ &= \frac{W}{c} \frac{\pi c L_x L_y}{2\omega V} \int_{ct}^{\infty} \int_0^r (1 - \beta_{txy})^{\frac{r'}{l_{xy}}} (1 - \alpha_r)^{\frac{r-r'}{l_r}} \frac{\hat{S}_{txy} dr'}{V} \frac{dr}{V} \\ &= \frac{W}{c} \frac{\pi c L_x L_y}{2\omega V} \mu_{txy} \left[\frac{\exp(-\hat{A}_r ct/V)}{\hat{A}_r} - \frac{\exp(-\hat{B}_{txy} ct/V)}{\hat{B}_{txy}} \right] \quad [\text{J/m}^3], \end{aligned} \quad (2.109)$$

但し， $\mu_{txy} = \hat{S}_{txy}/(\hat{B}_{txy} - \hat{A}_r)$ ， $\hat{S}_{txy} = S_{txy}/\pi \text{ [m}^2\text{]}$ ， $S_{txy} = 2(L_x + L_y)L_z s_{Etxy} \text{ [m}^2\text{]}$ ， $s_{Etxy} = -\ln(1 - s_{txy})$ であり，式 (2.94)，(2.95) と同様，

$$s_{txy} = 1 - (1 - \tilde{s}_{xy}^r)(1 - \tilde{s}_z^g)^{\varepsilon_{tz}}, \quad (2.110)$$

$$\tilde{s}_{xy}^r = \frac{L_y(1 - \tilde{\alpha}_x^r)\tilde{s}_x^r + L_x(1 - \tilde{\alpha}_y^r)\tilde{s}_y^r}{L_y(1 - \tilde{\alpha}_x^r) + L_x(1 - \tilde{\alpha}_y^r)}, \quad (2.111)$$

但し，面積および反射率の加重算術平均を仮定する．1次元音場と同様，2次元鏡面反射場が拡散反射場より早く減衰する場合 ($\hat{B}_{txy} > \hat{A}_r$) は $\mu_{txy} \geq 0$ ，遅い場合は不等号が反転し，等しい場合は次式となる．

$$E_{txy}^D(t) = \frac{W}{c} \frac{\pi c L_x L_y}{2\omega V} \frac{s_{Etxy}}{\beta_{Etxy}} \frac{1 + \hat{A}_r ct/V}{\hat{A}_r} \exp(-\hat{A}_r ct/V) \quad [\text{J/m}^3]. \quad (2.112)$$

ここでも，擦過入射乱反射率が $s_z^g = 1$ (完全拡散) の場合は $\beta_{txy} = 1$ となり，式 (2.101) の xy 面近傍音源群の寄与は完全に消失するため，理論の適用外となる．

全拡散反射場の残響 鏡面反射場と同様，軸・面近傍音源群の寄与の重複を除いて式 (2.105)，(2.106)，(2.109) を合計すると，全鏡面反射場のエネルギー密度は次式で表される．

$$E^D(t) = \frac{W}{c} \left\{ \gamma_{ob} \mu_{ob} \left[\frac{\exp(-\hat{A}_r ct/V)}{\hat{A}_r} - \frac{\exp(-\hat{B}_{ob} ct/V)}{\hat{B}_{ob}} \right] + \sum_{xy} \gamma_{txy} \mu_{txy} \left[\frac{\exp(-\hat{A}_r ct/V)}{\hat{A}_r} - \frac{\exp(-\hat{B}_{txy} ct/V)}{\hat{B}_{txy}} \right] + \sum_x \gamma_{ax} \mu_{ax} \left[\frac{\exp(-\hat{A}_r ct/V)}{\hat{A}_r} - \frac{\exp(-\hat{B}_{ax} ct/V)}{\hat{B}_{ax}} \right] \right\} \quad [\text{J/m}^3]. \quad (2.113)$$

定常状態 ($t = 0$) では，

$$E^D(0) = \frac{W}{c\hat{A}_r} \left(\gamma_{ob} \frac{s_{Eob}}{\beta_{Eob}} + \sum_{xy} \gamma_{txy} \frac{s_{Etxy}}{\beta_{Etxy}} + \sum_x \gamma_{ax} \frac{s_{Eax}}{\beta_{Eax}} \right) \quad [\text{J/m}^3]. \quad (2.114)$$

従って，全壁面が完全拡散の場合 ($s_E/\beta_E \rightarrow 1$)， $E^D(0) \rightarrow W/c\hat{A}_r$ となることが確認できる．

拡散反射場の残響は見かけ上 7 種の二重指数減衰から構成され，各減衰率は次式で表される．

$$D_{(\cdot)}^D = D_r^D \frac{1 - \exp[-(\hat{B}_{(\cdot)} - \hat{A}_r)ct/V]}{1 - (\hat{A}_r/\hat{B}_{(\cdot)}) \exp[-(\hat{B}_{(\cdot)} - \hat{A}_r)ct/V]} \quad [\text{dB/s}], \quad (2.115)$$

但し， $D_r^D = 10 \log_{10} e \cdot c\hat{A}_r/V$ は 3 次元拡散音場の減衰率 [dB/s] である．音源停止直後 ($t \rightarrow 0$)，全音源群とも減衰は緩やかに開始され ($D_{ob(tx,ax)}^D(t) \rightarrow 0$)，後期減衰では ($t \rightarrow \infty$)，斜方向音源群は完全拡散音場の減衰に従う ($D_{ob}^D(t) \rightarrow D_r^D \leq D_{ob}^S$) のに対して，軸・面近傍音源群では $D_{tx(ax)}^D(t) \rightarrow \min(D_r^D, D_{tx(ax)}^S)$ ，即ち対応する鏡面反射場と完全拡散音場のうち減衰が遅い方に追従することがわかる．

矩形室の総合残響 現実の室の残響は，鏡面反射場と拡散反射場が重ね合わされて観測される．式 (2.101)，(2.113) より両方の反射場を合計すると，次式が得られる．

$$E(t) = \frac{W}{c} \left[\frac{\mu_r}{\hat{A}_r} \exp(-\hat{A}_r ct/V) + \gamma_{ob} \frac{1 - \mu_{ob}}{\hat{B}_{ob}} \exp(-\hat{B}_{ob} ct/V) + \sum_{xy} \gamma_{txy} \frac{2 - \mu_{txy}}{\hat{B}_{txy}} \exp(-\hat{B}_{txy} ct/V) + \sum_x \gamma_{ax} \frac{4 - \mu_{ax}}{\hat{B}_{ax}} \exp(-\hat{B}_{ax} ct/V) \right] \quad [\text{J/m}^3], \quad (2.116)$$

但し， $\mu_r = \gamma_{ob} \mu_{ob} + \sum \gamma_{txy} \mu_{txy} + \sum \gamma_{ax} \mu_{ax}$ である．従って，室全体の残響は見かけ上 8 種の指数減衰から構成され，鏡面反射場の 7 種の減衰率 $D_{ob(tx,ax)}^S$ と完全拡散音場の減衰率

D_r^D に対応する．式 (2.99) の関係より，後期減衰において全体として 1 次元鏡面反射場または完全拡散音場のうち最も遅い減衰に収束する．

定常状態の全エネルギー密度は次式で表される．

$$E(0) = \frac{W}{c\hat{A}_r} \left[\gamma_{ob} \frac{\hat{A}_r + \hat{S}_{ob}}{\hat{B}_{ob}} + \sum_{xy} \gamma_{txy} \frac{2\hat{A}_r + \hat{S}_{txy}}{\hat{B}_{txy}} + \sum_x \gamma_{ax} \frac{4\hat{A}_r + \hat{S}_{ax}}{\hat{B}_{ax}} \right] [\text{J}/\text{m}^3]. \quad (2.117)$$

実際の室の中高音域では定常状態で斜方向音源群が支配的となるため，上式は次式で近似されよう．

$$E(0) \approx \frac{W}{c\hat{A}_r} \frac{\alpha_{Er} + s_{Eob}}{\beta_{Eob}} \leq \frac{W}{c\hat{A}_r} [\text{J}/\text{m}^3]. \quad (2.118)$$

このとき，鏡面エネルギーと拡散エネルギーの割合は α_{Er}/s_{Eob} となる．従って，拡散エネルギーの全体比は次式で表され，従来の平均吸音率と斜方向音源群の平均乱反射率により定まる．

$$R^D(0) \approx -10 \log_{10} \left(1 + \frac{\alpha_{Er}}{s_{Eob}} \right) [\text{dB}/\text{s}]. \quad (2.119)$$

後期減衰において， D_r^D が最小の場合 ($\hat{A}_r \leq \hat{B}_{ax(y,z)}$)，鏡面反射成分は拡散反射成分より速く消失する ($R^D(t) \rightarrow 0$)．最小でない場合，特定の 1 次元鏡面反射成分が拡散反射成分とともに残存し，そのエネルギー比は次式の通り均衡することになる．

$$R^D(t) \rightarrow -10 \log_{10} \left(1 + 4 \frac{\hat{A}_r - \hat{B}_{ax(y,z)}}{\hat{S}_{ax(y,z)}} \right) [\text{dB}/\text{s}]. \quad (2.120)$$

即ち，その比は従来の平均吸音率と軸近傍音源群の平均吸音率・乱反射率によって定まる．

その他の残響理論

Fitzroy の残響理論 Fitzroy^[91] は直感的な予想から、矩形室の直交 3 方向の残響時間の算術平均として以下の残響式を提案した。

$$T = \frac{S_x}{S} T_x + \frac{S_y}{S} T_y + \frac{S_z}{S} T_z = \frac{KV}{S^2} \left[\frac{S_x}{\bar{\alpha}_{Ex}} + \frac{S_y}{\bar{\alpha}_{Ey}} + \frac{S_z}{\bar{\alpha}_{Ez}} \right] \quad [\text{s}], \quad (2.121)$$

但し、 $T_{x(y,z)} = KV/S\bar{\alpha}_{Ex(y,z)}$ [s]、 $S_{x(y,z)}$ は各軸方向の境界の面積の和 [m²]、 $\bar{\alpha}_{Ex(y,z)}$ は各軸方向の境界の平均吸音率であり、Eyring 式と同様に次式を適用する。

$$\bar{\alpha}_{Ex(y,z)} = -\ln(1 - \bar{\alpha}_{x(y,z)}). \quad (2.122)$$

尚、上式は対向する境界の吸音率が比較的に近い場合を想定している。これに対して Neubauer^[195] は対向境界の吸音率が不均等の場合を考慮し、Kuttruff 式の修正式の第二項に基づく以下の式を提案している。

$$T = \frac{KV}{S^2} \left[\frac{S_x}{\bar{\alpha}_{Kx}} + \frac{S_y}{\bar{\alpha}_{Ky}} + \frac{S_z}{\bar{\alpha}_{Kz}} \right] \quad [\text{s}], \quad (2.123)$$

但し、

$$\bar{\alpha}_{Kx(y,z)} = \bar{\alpha}_{Ex(y,z)} + \frac{S_{x(y,z)}^2 (1 - \bar{\alpha}_{Ex(y,z)}) (\bar{\alpha} - \bar{\alpha}_{Ex(y,z)})}{S^2 (1 - \bar{\alpha})^2}. \quad (2.124)$$

Arau-Puchades の残響理論 Arau-Puchades^[12] は対向境界間の往復反射による減衰が各方向で独立かつ同時に生じるものと仮定し、直交 3 方向の残響時間の幾何平均として次式を導いている。

$$T = T_x^{S_x/S} T_y^{S_y/S} T_z^{S_z/S} = K \frac{V}{S \bar{\alpha}_{Ex}^{S_x/S} \bar{\alpha}_{Ey}^{S_y/S} \bar{\alpha}_{Ez}^{S_z/S}} \quad [\text{s}]. \quad (2.125)$$

各方向で吸音率が異なる場合、Fitzroy 式と Arau 式では減衰の小さい方向の残響時間に引きずられ、拡散音場の Eyring 式より残響時間は長くなるが、Fitzroy 式はその増長が過剰になりやすい。いずれにしても、不均等吸音の矩形室において残響時間は壁面の拡散性にも大きく依存するため、両式ともに適用条件が不明確であり、実用的とは言い難い。

Pujolle の残響理論 残響式は以下のように平均自由行路 $l = 4V/S$ を用いて書き表すことができる。

$$T = \frac{Kl}{4\bar{\alpha}_{(\cdot)}} \quad [\text{s}]. \quad (2.126)$$

Pujolle^[213] は矩形室の平均自由行路を次式で表すことで、矩形室の残響理論を提案した。

$$l_p = \frac{1}{6} \left(\sqrt{L_x^2 + L_y^2} + \sqrt{L_y^2 + L_z^2} + \sqrt{L_z^2 + L_x^2} \right) \quad [\text{m}], \quad (2.127)$$

但し、 $L_{x(y,z)}$ は室寸法 [m]。

2.5 音場の拡散性

物理学における拡散とは物質が移動する過渡的な現象を指すことが多いが、音場においては基本的に定常的な状態を意味し、室の残響時間や材料の吸音特性、音源の音響出力等を推定する際の前提条件となる。拡散音場は Sabine^[227] によって音響エネルギーの 1) 密度が一樣、かつ 2) 伝搬方向が等確率である状態として定義されている。この音響伝搬のエネルギー的性質に着眼した確率・統計的な定義を基礎として、一部には波動的性質を考慮してエルゴード性^[318]、エントロピー^[303]、mixing^[212]等の解釈が加えられ、空間だけでなく時間や周波数の各領域に亘る概念として展開されている^[163,176,243]。

拡散音場の実現は、伝搬方向及び位相関係がランダムである無数の平面波が存在する場合^[15,301]や、音源が空間内に一樣に配置された場合^[302]、また、波動論的^[191]には無数の固有周波数が一樣に分布し、固有モードが等しい寄与で励起された場合、等に達せられる。しかしながら、現実には拡散音場の厳密な実現は不可能であり、近似的にはホール等の残響が長い室において音源近傍を除いて成り立つ。拡散音場の仮定を実現するための残響室においても壁面近傍では音響エネルギーが大きくなるため、室の等価吸音面積の推定の際にはその影響に対する補正 (Waterhouse 補正^[282]) が施される。また、残響室法による材料の吸音率測定の際には、試料の設置に伴う拡散性の低下に起因して吸音率の過小評価が生じる。この影響に対して初期減衰の性状から測定する方法^[266]や PLD (power law decay) 補正^[146]と呼ばれる補正方法が提案されている。

音場の拡散性に関する研究は各種音響性能の測定精度を向上することを動機として、音響試験室 (残響室) を主たる対象として行われてきた。一方、室内音響設計においても、音場の拡散性の低下に起因して、エコーやブーミング等の音響障害、残響減衰曲線の湾曲、周波数応答関数の凹凸、等が生じるため高い拡散性が求められる。

一般的な知見として、音場の拡散性を向上させるためには、室形状については不整形とし、吸音分布については一樣とすることが重要である。矩形とする場合には室寸法は簡単な整数比を避けるか壁面を傾斜させることが望ましい。また、境界面で音波の拡散反射が生じれば音場の拡散性が向上すると考えられ、1930 年代以降、Sabine^[226] による残響室内に円柱を配置すると低音域の拡散性が向上する知見を端緒として、拡散体や反射板の開発が続けられている^[59]。

拡散体 Sabine^[226] に続く基礎的な検討としては、Tichy and Baade^[265] による回転拡散翼や Chu^[54] による回転拡散体の作成、Benedetto *et al.*^[22] による静止した拡散体の効果に関する検証が挙げられる。また、基本的な形状として Pan and Bies^[204] は半円状の拡散体を、Duanqi *et al.*^[79] は球殻状の拡散体を、それぞれ検討している。

反射指向性の均一化を目指した検討としては、Schroeder は M 系列を用いた拡散体^[237] や平方剰余系列を用いた拡散体^[238] を提案し、後者は Schroeder 拡散体や QRD (quadratic residue diffuser) と呼ばれる。Schroeder 拡散体の原理は回折格子を基礎としているが、後に理論的に補強^[217,255,256] される一方で、拡散反射する周波数の限界^[262] や高い吸音性^[95,313] を有することが示されている。また、D'Antonio and Konnert は原子根系列 (primitive root sequence)^[69] やフラクタル^[58,59] を用いた拡散体を、Angus and McManmon^[10] や Dadiotis *et al.*^[63] は他の系列を用いた拡散体を提案している。

拡散体形状の最適化に関しては、Cox^[57]、D'Antonio^[68] が波動音響解析を用いた検討を行い、Takahashi^[261] は DNSD の垂直入射値が最大値となる形状を理論的に導いている。さらに、Uosukainen^[269] や Avis *et al.*^[14] は反射指向特性をアクティブに制御する拡散体を提案している。尚、拡散体の拡散反射性能の評価方法は第 2.2.2 節で述べた通りである。

拡散体が音場に及ぼす影響に関する検討手法に関する研究としては、1940 年代に Morse and Bolt^[190] は波動音響解析において拡散体を定量的に取り扱う方法を理論的に考案したが、その実現は計算機性能の向上を待ち、1980 年代から Miles^[185]、Kuttruff^[162]、Cianfrini *et al.*^[55] が境界積分方程式法に Lambert 則^[163] を導入した解析を行っている。Fujiwara^[94] は Lambert 則を応用して種々の反射指向特性をモデル化している。また、Rayleigh^[219] は正弦波の一次元周期構造拡散体の反射特性に関する理論解析を行ったが、藤原と増田^[329] はその反射特性を室内に導入したモンテカルロ法解析を実現化している。近年では、Vileau *et al.*^[270]、Jing and Xiang^[142] や Billon *et al.*^[30] が拡散方程式を用いた解析を行っている。幾何音響解析については、1990 年代に Hodgson^[117]、Naylor^[193]、Dalenbäck^[64] が音線法に Lambert 則を導入し、後者 2 件に関するコンピュータプログラムはそれぞれ ODEON、CATT Acoustic として商用化されている。Lam^[164] や Hodgson *et al.*^[118] は乱反射率の導入方法に関する比較検討を行い、CATT Acoustic^[49]、Zeng *et al.*^[293]、Farina^[89] は拡散体だけでなく室稜線で生じる見かけ上の拡散反射を音線法で考慮する方法を提案している。応用的に Wang and Rathsam^[281] は ODEON を用いて壁面拡散が室内音響指標に及ぼす影響を検討している。計算機性能の制約上、波動音響解析による研究例は少ないが、Seybert^[248] は BEM を、横田^[290,336] は FDTD 法を用いて拡散体形状を直接入力した検討を行っている。理論的には、Skarlatos and Kostakis^[250]、Hanyu^[105]、Omoto^[202]、Stephenson^[254]、Embrechts^[80] がエネルギー論的に鏡面反射成分と拡散反射成分を分離したモデル化を行い、Sakuma^[230] は乱反射率を導入した残響理論を提案している。聴感的には、横田^[336] や Toyoda *et al.*^[268] が拡散体のエコー低減に関する効果を実験的に示している。

評価 音場の拡散性に関しては様々な観点から評価手法が提案されている。エネルギー論的には空間分布、伝搬方向、残響減衰性状、波動論的には音圧の空間相関、固有モード

分布，等が評価の基礎となる．以下，これらの評価手法を空間・周波数・時間の各観点から整理する．

2.5.1 空間的観点

空間分布

出力 W [W] の音源を定常駆動したときの拡散音場における音響エネルギー密度 E_d は，次式で表される（式 (2.65) の再掲）．

$$E_d = \frac{4W}{cS\bar{\alpha}} \quad [\text{J/m}^3], \quad (2.128)$$

但し， S は室表面積 [m^2]， $\bar{\alpha}$ は平均吸音率， c は音速 [m/s]．現実的には，音源近傍では直接音の影響が支配的であると考えられることから，全音響エネルギー密度に対する直接音の寄与を分離することを想定する．直接音による音響エネルギー密度 E_{dir} は次式で与えられ，距離 r [m] の二乗に逆比例する．

$$E_{\text{dir}}(r) = \frac{W}{4\pi cr^2} \quad [\text{J/m}^3]. \quad (2.129)$$

直接音以外，即ち反射音の寄与は，一回反射したエネルギーが無限回の反射を経て室内に一樣に分布すると考えられる．音波が平均的に一回反射するまでに音源から放射されるエネルギーは $W \cdot l/c$ [J] と表される（但し， $l = 4V/S$ は平均自由行路 [m]， V は室容積 [m^3]）．従って，反射音による音響エネルギー密度 E_{ref} は次式で与えられる．

$$\begin{aligned} E_{\text{ref}} &= \frac{W}{V} \frac{l}{c} (1 - \bar{\alpha}) \sum_{n=0}^{\infty} (1 - \bar{\alpha}) \\ &= \frac{4W}{c} \frac{1 - \bar{\alpha}}{S\bar{\alpha}} = \frac{4W}{cR} \quad [\text{J/m}^3]. \end{aligned} \quad (2.130)$$

但し， $R = S\bar{\alpha}/(1 - \bar{\alpha})$ は室定数 [m^2] であり， $\bar{\alpha} = 0$ のとき $R = 0$ ， $\bar{\alpha} = 1$ のとき $R = \infty$ となる．以上より，全音響エネルギー密度 $E(r)$ は次式で表される．

$$E(r) = E_{\text{dir}} + E_{\text{ref}} = \frac{W}{c} \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad [\text{J/m}^3]. \quad (2.131)$$

ここで， $r_d = \arg\{E_{\text{dir}}(r) = E_{\text{ref}}\}$ を臨界距離と呼び，次式で得られる．

$$r_d = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{R}{\pi}} \approx 0.057 \sqrt{\frac{V}{T(1 - \bar{\alpha})}} \quad [\text{m}]. \quad (2.132)$$

より現実的には，反射音は直接音以前に到来しないことから，Barron^[17] は各受音点において直接音到来以降のエネルギーが反射音による音響エネルギー密度に寄与すると考

え，式 (2.130) を以下のように修正した (Barron の修正理論) ．

$$E'_{\text{ref}}(r) = \frac{W}{V} \int_{r/c}^{\infty} e^{-\delta t} dt = \frac{W}{V} \frac{e^{-\delta r/c}}{\delta} \quad [\text{J/m}^3]. \quad (2.133)$$

但し， δ は振幅の減衰率 $[1/\text{s}]$ ．

一様性 室内音場における音響エネルギーの偏在の程度は標準偏差や分散等によって表すことができる．ISO 3741^[129] では残響室の適性を試験するために，以下のように音圧レベルの標準偏差 σ_L を求めることが規定されている．

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \{L_p(\mathbf{r}_i) - \bar{L}_p\}^2} \quad [\text{dB}], \quad (2.134)$$

但し， $L_p(\mathbf{r}_i)$ は受音点 \mathbf{r}_i における音圧レベル $[\text{dB}]$ ， \bar{L}_p は L_p の平均値， N は受音点数（最小値は規定）であり，拡散音場では $\sigma_L = 0$ となる，表 2.5 に，ISO 3741^[129] に規定されている σ_L の許容値を示す．

Table 2.5 Maximum allowable standard deviation of L_p ^[129].

Center frequency of 1/1 octave band [Hz]	Center frequency of 1/3 octave band [Hz]	Maximum allowable standard deviation [dB]
125	100 to 160	1.5
250 and 500	200 to 630	1.0
1000 and 2000	800 to 2500	0.5
4000 and 8000	3150 to 10000	1.0

また，横田^[290,336] は，音響エネルギーの偏在の程度を表す指標として NV (normalized variance) を提案している． NV は，以下のように音響エネルギーの相対分散であり，変動係数の二乗に相当する．

$$NV = \frac{\sigma_J^2}{\bar{J}^2}, \quad (2.135)$$

但し，

$$\bar{J} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N J(\mathbf{r}_i) \quad [\text{J}], \quad (2.136)$$

$$\sigma_J^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \{J(\mathbf{r}_i) - \bar{J}\}^2 = \bar{J}^2 - \bar{J}^2 \quad [\text{J}^2], \quad (2.137)$$

であり， $J(\mathbf{r}_i)$ は受音点 \mathbf{r}_i における音響エネルギー $[\text{J}]$ ， \bar{J} は J の平均値， N は受音点数． NV は，拡散音場では 0，音圧分布が正規分布（即ち，音響エネルギーが自由度 1 の X^2 分布）に従う場合^[336] には 2，音圧の実部と虚部が互いに独立して正規分布（即ち，音響エネルギーが指数分布または自由度 2 の X^2 分布）に従う場合^[163,234] には 1 を示す．

音圧の空間相関 空間内の2点 $(\mathbf{r}, \mathbf{r} + \mathbf{r}')$ に対して平面波1波が入射することを想定すると、各点での音圧 p は以下のように表される。

$$p(\mathbf{r}) = A \exp(j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}), \quad (2.138)$$

$$p(\mathbf{r} + \mathbf{r}') = A \exp\{j\mathbf{k} \cdot (\mathbf{r} + \mathbf{r}')\}. \quad (2.139)$$

但し、 A は振幅、 $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$ [1/m] は波数ベクトルであり、 $k_{(\cdot)} = 2\pi f/c$ [1/m]、 f は周波数 [Hz]。ここで、調和振動を仮定すると、 $p(\mathbf{r})$ と $p(\mathbf{r} + \mathbf{r}')$ の相互相関関数 Φ は、

$$\Phi(kr) = \text{Re} \left(\frac{p(\mathbf{r}) + p^*(\mathbf{r} + \mathbf{r}')}{\sqrt{|p(\mathbf{r})|^2 |p(\mathbf{r} + \mathbf{r}')|^2}} \right) = \text{Re}(e^{-jkr \cos \theta}) = \cos(kr \cos \theta), \quad (2.140)$$

但し、 $r = |\mathbf{r}'|$ [m]、 θ は2受音点を通る直線と音波の伝搬方向からなる角度 [rad]、 $*$ は複素共役を表し、 Φ は -1 to 1 の値をとる。

拡散音場における音圧の空間相関係数は、音波の伝搬方向が等確率であるため、式 (2.140) を全ての方向 (θ, ϕ) に関する積分を行うことで以下のように与えられる^[56]。

$$\Phi_d(kr) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \cos(kr \cos \theta) \sin \theta d\theta d\phi = \text{sinc}(kr). \quad (2.141)$$

但し、 $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ 。尚、音源が $\Delta f = |f_2 - f_1|$ [Hz]、(但し、 $f_2 > f_1$) の周波数帯域幅を有する場合、拡散音場における音圧の空間相関関数は、

$$\Phi_{d,\Delta f}(k_c r) \approx \text{sinc} \left(\frac{\Delta k_c r}{2} \right) \frac{\sin(k_c r)}{k_c r}, \quad (2.142)$$

と近似的に表される^[194]。但し、 $k_c = 2\pi f_c/c$ [1/m]、 $f_c = (f_1 + f_2)/2$ [Hz]。さらに、Rafaely^[218] は様々な周波数特性を有する音源信号による音圧の空間相関係数を理論的に求めている。また、音圧の空間相関係数は音源・受音点間距離を変化させた多点計測が必要であることから、Jacobsen^[138] は計測の簡便性を向上するためにコヒーレンス関数を用いる方法を提案している。

Φ による音場の拡散性の評価に関しては、Kuttruff^[158] は、 $\Phi = 0.5$ となる kr の値を指標として提案しているが、常に $\Phi > 0.5$ の場合もあるため必ずしも適当な方法とは言えない。また、 Φ は測定方向に依存するため、単一方向での結果は拡散音場を示す必要十分条件ではない。子安^[304] は、 $\Phi_\pi = \Phi(kr = \pi)$ を代表値とし、多方向で得られた結果の表示方法を含めて提案している。 Φ_π は -1 から 1 の値をとり、拡散音場では全方向で 0 を示す。また、Bodlund^[34] や Jacobsen^[137] は統計理論的な考察を深め、前者は音圧の空間相関係数に関する各方向の標準偏差を音場の拡散性の指標として提案している。

方向分布

音波の伝搬方向を観察するために、1950 年代に Thiele^[264]、Meyer^[183]、Meyer and Thiele^[182] は単一指向性マイクロフォンを回転させて音圧を測定し、極座標に図示した。この図はハリネズミと呼ばれる。1980 年代以降、Yamasaki and Itow^[285] による近接 4 点法、Sekiguchi *et al.*^[244] による正四面体頂点法が提案され、音波到来の方向と時刻からハリネズミだけでなく鏡像音源分布の過渡的な性状の図示が可能となり、Abdou and Guy^[1] が室内音場への適用例を示している。Omoto *et al.*^[96,203] は、音響インテンシティ^[86] を用いて鏡像音源分布をパノラマ写真に描画して可視化する手法 VSV (virtual source visualizer) を提案している。近年では、方向情報に関する測定法として、SEACEN (simulation and evaluation of acoustical environments) プロジェクト^[249] が球形のマイクロフォンアレイを利用する方法^[279] を、Virtual Acoustics Team^[275] が B-format マイクロフォンを用いる SIRR (spatial impulse response rendering)^[181,215]、DirAC (directional audio coding)^[214]、より任意性の高いマイクロフォンアレイに展開した SDM (spatial decomposition method)^[263] を提案している。

音波の到来方向分布の均一性の程度を表す指標としては、Thiele^[264] が指向拡散度 (directional diffusion) d_θ を以下のように定義した。尚、第 2.2.2 節で述べた壁面の拡散性に関する指標と和名が同じであることに留意されたい。

$$d_\theta = 1 - \frac{\mu}{\mu_0}, \quad (2.143)$$

ここで、 μ は各方向の音響インテンシティ I_i [W/m^2] の平均偏差を平均値 \bar{I} で正規化した値であり、次式で表される。

$$\mu = \frac{1}{n\bar{I}} \sum_{i=1}^n |I_i - \bar{I}|. \quad (2.144)$$

但し、 n は方向分割数、 μ_0 は自由音場で測定した μ である。従って、自由音場では $d_\theta = 0$ 、完全拡散音場では $d_\theta = 1$ となる。

Merimaa and Pulkki^[181] は、拡散音場では音響インテンシティが 0 となることに着目して以下の指標を提案している。

$$\Psi = 1 - \frac{\|\langle \mathbf{I}(\mathbf{t})/\mathbf{c} \rangle\|}{\langle E(t) \rangle}, \quad (2.145)$$

但し、 $\mathbf{I}(\mathbf{t})$ は音響インテンシティベクトル [W/m^2]、 $E(t)$ は音響エネルギー密度 [J/m^3]、 $\langle \cdot \rangle$ は時間平均、 $\|\cdot\|$ はノルムであり、 Ψ は拡散音場では 1、自由音場では 0 を示す。尚、時間平均値により定義されているが、瞬時値への適用も可能である。

Omoto^[203] は、壁面における反射指向特性の均一性の程度を表す指向拡散度を応用し、音響インテンシティレベルの到来方向の均一性の程度を表す指標である UAD (uniformity

of arrival directions) を提案している．但し，UAD は音響インテンシティレベルが $-\infty$ となる方向がある場合の取り扱いに課題がある．

2.5.2 周波数的観点

拡散音場における周波数応答関数は平坦となるが，実音場では縮退や固有周波数に粗密が生じることに起因して周波数応答関数は変動する．容積 V [m^3] の矩形室内における周波数 f [Hz] 以下の固有周波数の数 N_f は，波数ベクトル空間において波数 $k = 2\pi f/c$ [$1/\text{m}$] (但し， c は音速 [m/s]) を半径とする球の容積に含まれる格子点数として表すことができる．1つの格子点が占める容積は π^3/V ，球の容積は $4\pi k^3/3$ であり，第一象限を考えると，

$$N_f(f) = \frac{\pi k^3/6}{\pi^3/V} = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{f}{c}\right)^3 V. \quad (2.146)$$

厳密には，上式では軸上，面上の格子点の個数が過小評価されているため，修正式が提案 [163, 190] されている．周波数 f における固有周波数の平均周波数密度は上式の周波数微分によって，

$$\frac{dN_f}{df} = \frac{4\pi f^2 V}{c^3} \quad [1/\text{Hz}], \quad (2.147)$$

と表され， f について書き改めると，

$$f = \sqrt{\frac{dN_f}{df} \frac{c^3}{4\pi V}} \quad [\text{Hz}], \quad (2.148)$$

となる．ここで，半値幅 δ/π [Hz] (δ は振幅の減衰率 [$1/\text{s}$]) 内に3個の固有周波数が含まれるときの周波数を Schroeder 周波数 f_s [211, 233, 241] と呼ぶ．即ち，式 (2.148) に $dN_f/df = 3(\pi/\delta)$ を代入すると，

$$f_s \approx 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \approx 800 \sqrt{\frac{1}{S\bar{\alpha}}} \quad [\text{Hz}], \quad (2.149)$$

但し， $A = S\bar{\alpha}$ [m^2] であり， $\delta = 3 \ln 10 / T$ ， $T = KV / S\bar{\alpha}$ の関係を用い， $K = 0.161$ とした．

また，Néllisse and Nicolas [194] は，空間内の音圧レベルの標準偏差が 2 dB 以下となる臨界周波数 f_c を実験的に求め，以下のように室容積との関係で定式化している．

$$f_c = \frac{1190}{\sqrt[3]{V}} \quad [\text{Hz}]. \quad (2.150)$$

上式における 1190 や Schroeder 周波数 f_s における3個の固有周波数という数字の客観性は低い， f_s と f_c は概ね対応する結果 [194] が示されている．

Schroeder 周波数等で表される拡散性の高い周波数帯域では、音圧の実部と虚部はそれぞれ正規分布に、音響エネルギーは指数分布に従う^[163,234]。この時、周波数応答関数の極大点の平均間隔 Δf_{peak} 、及び平均値に対する最大値のレベル差 ΔL_{max} は結果的に次のように与えられ、室形状や音源・受音点の位置に依存しないことがわかる。

$$\Delta f_{\text{peak}} \approx \frac{4}{T} \text{ [Hz]}, \quad (2.151)$$

$$\Delta L_{\text{max}} \approx \frac{10}{\ln 10} \ln\{\ln(BT)\} \text{ [dB]}, \quad (2.152)$$

但し、 B は周波数帯域幅 [Hz]。

また、Meynial and Vuichard^[184] は周波数応答関数の移動平均値に対する標準偏差を指標として提案している。その際、振幅値の出現頻度が Rayleigh 分布（即ち、指数分布または自由度 2 の X^2 分布）に従う状態^[163,234] を参照値として用いている。これは、カラーレシヨンの評価手法として提案された指標であるが、周波数応答関数の非平坦性を定量化するものであり、音場の拡散性の評価への適用が期待される。

平坦な周波数応答関数を得るために、Milner^[187] は室形状を設計変数、固有周波数分布の一様性を目的関数として波動音響解析を用いた最適設計を行っており、鯨島 *et al.*^[310] は室形状に加えて吸音分布を設計変数に導入した検討を行っている。室形状を矩形とする場合については、寸法比に関するいくつかの推奨値が提案されている。Bolt^[35] は $2:3:5$ 、 $1:\sqrt[3]{2}:\sqrt[3]{4}$ を推奨し、後者は ISO 3741^[129] に記載されている。Sepmeyer^[246] は $1.00:1.14:1.39$ 、 $1.00:1.28:1.54$ 、 $1.00:1.60:2.33$ を推奨している。Louden^[174] は 125 種類の寸法比の室を対象として固有周波数間隔の一様性に関して序列化した結果、 $1.0:1.4:1.9$ が最も優れていることを示した。室寸法比だけでなく、Cox^[60] は室容積の影響を、Błaszak^[33] は吸音の影響を加えた検討をしている。

2.5.3 時間的観点

音場の時間的側面における拡散性の表出は多岐にわたる。第一に残響時間に代表される平均的な残響減衰性状、第二に残響減衰曲線の湾曲性、第三に残響減衰曲線の不規則変動、第四に反射音の微細構造、等である。第三については、固有モードのうなりに起因する現象^[84,163] であることから、音場の拡散性分析への利用が期待できるが検討事例は見当たらない。

残響減衰性状

拡散音場では残響減衰曲線は対数軸上で直線を示すが、拡散性が低い場合には各固有振動姿態の減衰率が異なることにより湾曲する。Schroeder^[236] は室内の境界の一部にある

面積 S_a の吸音材上の音響エネルギーの平均的な減衰過程を次式で表した．

$$L(t) = -\frac{10}{\ln 10} N \ln(1 + 2\bar{\delta}t/N) \quad [\text{dB}], \quad (2.153)$$

但し， δ は振幅に関する平均減衰率 $[1/\text{s}]$ ， $N \approx S_a/(\lambda/2)^2$ は受音点数， λ は波長 $[\text{m}]$ ．上式は，極度に低い拡散性の音場には適用されず^[300]， $\lambda/2$ の間隔に受音点を設置することで，音圧の二乗値が指数分布に従うこと，即ち，減衰率が gamma 分布に従うことを想定している．川上^[300] は，音場の拡散性の指標として N を用いる可能性を示唆している．

残響減衰曲線の湾曲の程度を示す指標としては，ISO 3382-2^[131] に示されている C ， ξ （第 2.3.1 節）の他に，Kawakami^[147] は湾曲指標 CI (curvature index) を提案している．

$$CI \equiv Q_{30} = 10 \log_{10}(D_{0\text{dB}}/D_{30\text{dB}}), \quad (2.154)$$

但し， D_{dB} は，添字に示す減衰時の瞬時の減衰率 $[\text{dB/s}]$ ．

反射音構造

拡散音場では，反射音は連続的に到来するため分離できない．より現実的に，一つの音源があり平滑な境界で構成される室内を想定すると，反射音は決定的な時刻に離散的に到来し，室内インパルス応答に粗密が生じる．矩形等の平行壁がある室内では反射音が周期的に到来するため，室内インパルス応答は特に疎となる．一方，不整形室や後期残響音，または壁面に拡散体を設置した場合については，反射音の連続性が比較的に高まり，各反射音の到来時刻及び寄与は確率的な挙動を示すと考えられる．反射音構造分析に基づく音場の拡散性の評価は，反射音の突発性に着目するもの，室内インパルス応答の乱雑性に着目するもの，反射音の性質の変化に着目するものの 3 種に大別される．

突発性 反射音の突発性の分析は主にエコー検出を目的として室内インパルス応答を目視により評価したことに始まる．Kuttruff^[163] は Hilbert 変換を用いて室内インパルス応答の包絡線を求めることで反射音の視認性を向上させたが，定性的な評価に留まっている．Jeon^[139] は連続 wavelet 変換を用いて室内インパルス応答の局所ピークを検出し，その個数 N_p を音場の拡散性を表す指標として提案している．

室内インパルス応答から反射音構造を抽出するために残響減衰の影響を除去する手法として，1) 残響時間から推定した減衰率で表される指数関数で室内インパルス応答を除する方法^[141, 197]，2) 残響減衰曲線の真数値で二乗応答を除する方法^[106, 140, 141] が提案されている．前者はエコーに関する指標 ε （第 2.3.2 節）に利用されており，後者はその絶対値や統計量により音場の拡散性に関する指標が提案されている．しかしながら，反射音構造の抽出手法に関する物理的な意味は不明確であり，指標については影響関係の知見が少ない．これらの詳細は第 6 章で議論する．

乱雑性 高橋ら^[312]は室内インパルス応答の乱雑性を評価するために、二乗応答波形の、その線形回帰曲線に対する残差の標準偏差 $Tr\sigma$ を指標として提案している。

Kuttruff^[159]は室内インパルス応答の乱雑性または非周期性を表す指標、temporal diffusion (zeitliche Diffusität) Δ を提案している。 Δ は室内インパルス応答の自己相関関数 Φ (式 (2.42)) の第二ピークに対する第一ピーク ($\tau = 0$) の比によって表される。

$$\Delta = \frac{\Phi(0)}{\max\{\Phi(\tau \neq 0)\}}. \quad (2.155)$$

Δ が大きいほど、音場の拡散性が高いことを意味する。

臨界時刻 室内インパルス応答における初期反射音と後期残響音を分離する時刻の定義として様々なものが提案されている。これらは beginning time や mixing time, transition time, cross-over time 等と呼ばれるが、ここでは臨界時刻と総称する。

Cremer^[61]は反射音密度に着目して beginning time (Einsatzzeit) t_{st} を提案している。鏡像法 (第 3.2.1 節) に基づくと、容積 V [m^3] の室内にある音源からインパルスが発せられてから時刻 t [s] までに到来する鏡像音源個数、即ち反射音数 N_t は、次式で与えられる。

$$N_t(t) = \frac{4\pi(ct)^3}{3} \frac{1}{V}. \quad (2.156)$$

従って、時刻 t に到来する反射音の平均時間密度は上式の時間微分によって、

$$\frac{dN_t}{dt} = \frac{4\pi c^3 t^2}{V} \quad [1/s], \quad (2.157)$$

と表され、 t について書き改めると、

$$t = \sqrt{\frac{dN_t}{dt} \frac{V}{4\pi c^3}} \quad [s]. \quad (2.158)$$

となる。ここで、反射音密度の聴覚的な分離限界を、 $\Delta N_t / \Delta t = 20/0.01 = 2000$ [1/s] とすると、beginning time, t_{st} が次式で得られる。

$$t_{st} = 2\sqrt{V} \times 10^{-3} \quad [s]. \quad (2.159)$$

t_{st} が提案されてから、反射音の分離限界に関する検討が深められ、Schmidt and Ahnert^[232] は $\Delta N_t / \Delta t = 5/0.02 = 250$ [1/s] とした $t_{st} = \sqrt{V/2} \times 10^{-3}$ [s] を、Reichardt^[221] は $t_{st} = \sqrt{V} \times 10^{-3}$ [s] を、同様に Defrance *et al.* は mixing time として $t_m = \sqrt{V} \times 10^{-3}$ [s] を提案している。いずれの臨界時刻も値が小さいほど音場の拡散性が高いことを意味し、室容積の平方根に反比例して音場の拡散性が向上することを表している。Schmidt and Ahnert^[232] は、 t_{st} は時間的な拡散性 (zeitlicher Diffusität) を表すとしているが、周波数領

域（第2.5.2節）とは逆の傾向であり慎重に議論すべきである．尚，第6章では，周波数特性を考慮した臨界時刻を定義する．

Schroeder^[242] は，Schroeder 周波数の類推から，時間領域における反射音のオーバーラップに着目して，diffuse-field time interval を提案した．

$$t_c = \sqrt{\left(\frac{\ln 10^6 V}{4\pi c^3 T}\right)} \quad [\text{s}]. \quad (2.160)$$

また，Jeong *et al.*^[140] は，反射音が減衰の影響を受けて時間的に広がることに着目し，反射音の半値幅と反射音間隔が等しくなる時刻を transition time と定義した．但し，transition time の理論的な導出や直接的な測定は困難であるため，室内インパルス応答から抽出した反射音がある閾値を超える最後の時刻を間接的に用いることで測定可能としている．しかしながら，代替の適正性や閾値の設定に関する物理的な根拠は乏しい．測定可能な臨界時刻として，Hidaka *et al.*^[114] は室内インパルス応答の短時間 Fourier 変換を行い，最初期の周波数応答波形に対する相関係数に着目する方法を，また，Defrance *et al.*^[75] は時間窓の幅を変化させながら Fourier 変換を行い，位相に着目して cross-over time を算出する方法を提案している．

以上のように，多数の臨界時刻が定義されており，同じ室内インパルス応答でも異なる値が得られる．臨界時刻の適切な定義及び算出方法に関する合意を得るためには，音場の拡散性に関するより多くの領域横断的な知見が必要である．

2.5.4 領域横断的観点

周波数領域では固有周波数密度が，時間領域では反射音密度が大きいときに音場の拡散性が高いことを間接的に表す．音場の拡散性に影響を及ぼす建築要素としては，室容積，壁面吸音，壁面拡散が挙げられる．室容積に関しては，固有周波数密度（式(2.147)）は比例し，反射音密度（式(2.156)）は反比例するように，時間・周波数の各領域で逆の傾向を示す．但し，室容積が大きい場合には表面積も大きくなるため，臨界距離（式(2.132)）が大きくなり，音響エネルギーの空間偏差は大きくなると考えられる．壁面吸音が大きい場合にも，臨界距離（式(2.132)）が大きくなるため音響エネルギーの空間偏差は大きくなるが，時間・周波数の両領域における半値幅は大きくなり，応答の連続性・平坦性が見かけの上で向上する．従って，室容積と壁面吸音のみによって，各領域における拡散性を同時に制御することは不可能であるといえるが，壁面拡散に関しては，その伝搬可能な経路を増加させる働きによって各領域の拡散性に対して同一の方向に寄与すると考えられる．

また，音場の拡散性に関する空間・周波数・時間の領域横断的な評価も行われている．Lubman^[175] は Schroeder 周波数により周波数帯域を区分し，それぞれ空間内の音響エネルギーの分散を固有周波数の数を用いて定式化している^[274]．羽入^[325] は短時間 Fourier

変換を用いて音波到来方向の均一性の過渡的な性状を分析する短時間指向拡散度を提案し、実測例を示している。Yokota *et al.*^[290]、横田^[336]はFDTD法解析を用いてNVの時間変化を検討している。Pätynen *et al.*^[208]は音波の到来方向分布及び周波数応答関数の時間発展を測定・可視化する手法を提案している。

2.6 結言

本章では、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た。基礎事項に関しては、波動方程式に代表される音場の基礎方程式の導出や、閉空間における音響伝搬の表出である室内インパルス応答について述べた。室内音響指標については、時間的、エネルギー的・空間的・周波数的な観点で分類し、ISO 3382^[131, 132, 134]を中心として周辺の事項も含めてまとめた。残響理論に関しては、適用可能な室形状として任意形状室と矩形室に分類し、特に壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論の特徴及び適用性に係る課題を挙げた。音場の拡散性に関してはこれまでなされてきた様々な解釈に基づいて広義に捉え、空間だけでなく周波数や時間の各領域の評価方法をまとめた。

全般的に十分とはいえない、各評価指標に室条件が及ぼす影響に関する知見を拡充することで、室内音響設計の確実性の向上、ひいては音響現象の領域横断的な解釈の進展に寄与するものと考えられる。

第 3 章

音響解析手法

3.1 緒言

本章では，室内音響予測手法のうち本研究で用いる数値解析手法の基礎理論を概説するとともに，解析設定に関する基礎的検討を行う．

第 1 章で述べた通り，音響数値解析は幾何音響的手法と波動音響的手法に大別され，前者の解法は鏡像法と音線法に，後者の解法は周波数領域解法と時間領域解法にそれぞれ二分される．

幾何音響解析は，音の波動性（周波数・回折・干渉等）を無視した伝搬を幾何学的に追跡するエネルギー論上の手法であり，波動性が考慮される波動音響解析とは原理的に異なる．そのため，幾何音響解析は解析精度が保証されないものの，少ない計算機資源で大規模な室内音場の時間構造を得ることができるため，様々な手法改良を経て，今日でも設計実務の場で広く用いられている ^[320] ．

波動音響解析は，計算力学全般で適用される汎用的な離散化手法によって波動方程式やそれと等価な基礎方程式を離散化し，音の波動的な伝搬を予測する手法である．そのため，波動音響解析は高精度であるものの計算機コストが膨大であり，従来より高速化や低記憶容量化に関する研究が進められており，人間の可聴上限周波数 ^[321] やコンサートホール規模の大空間 ^[229,332] の解析が一部達成されている．今後も Moore 則に従って計算機能力が向上するならば，近い将来には波動音響解析が実務現場で活用可能な水準に達すると思われる．

3.2 幾何音響解析

3.2.1 鏡像法

鏡像法（虚像法）は，全ての反射音が室境界の外部にある仮想的な音源（鏡像音源，虚像音源）から到来するものと想定する．各鏡像音源は実音源と同時に同出力で放射され，距離減衰と壁面吸音を受け，各鏡像の位置に応じた遅延時間をもって受音点に到来する．鏡像音源は図 3.1 に示すように，Snell 則に従って室境界面を対称面とした位置に置かれる．従って， k 次反射までの鏡像音源個数 N は，室境界面の数を m として，

$$N_k = \sum_{i=1}^k m(m-1)^{i-1}, \quad (3.1)$$

と表され，壁面数と反射次数の増加とともに膨大な鏡像音源個数となることがわかる．但し，図 3.2 に示すように，伝搬経路が成立しない鏡像音源が生じることがあり，計算から除外する必要がある．矩形室において，時刻 t [s] までに到来する有効な鏡像音源個数 N_t は Cremer^[61] が次式（式 (2.156) の再掲）により推定したが，任意形状の室にも適用可能である^[163]．

$$N_t(t) = \frac{4\pi(ct)^3}{3} \frac{1}{V}, \quad (3.2)$$

但し， c は音速 [m/s]， V は室容積 [m³]．一般に，伝搬経路が有効であるためには，鏡像音源からそれを作った境界面を望む立体角内に受音点が含まれればよい．このことを応用して，田口ら^[314] は反射壁面を特定することで計算量を低減する方法を提案している．

このように，鏡像法は後述する音線法に比べ，音の伝搬経路や到来時刻，強度を正確に求めることができる利点がある一方，拡散反射の導入が困難であることや，反射次数の増加とともに鏡像音源数が指数関数により増加するため，高次の反射音まで計算することが

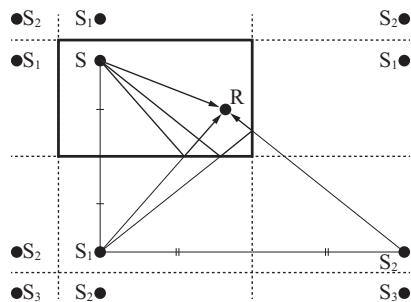


Figure 3.1 Distribution of image sources S_i (i : number of reflections).

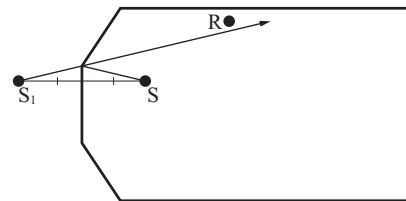


Figure 3.2 An example on image source (S_1) not being visible in receiving point R.

困難である欠点がある．従って，初期反射音構造や反射音の到来方向の検討に有効であるが，後期残響音の検討には適さない．また，後期残響音は回折波や拡散波による波動的な影響が大きくなるため，鏡像法に限らず幾何音響解析で得られる精度は原理的に期待できない．そのため，正規分布^[272]やPoisson分布^[109]を用いて統計的に扱う手法や反射の度に2次音源を設ける手法^[193]が提案されている．初期反射音と後期残響音の境界としては，反射次数で決定する方法^[193,272]やある時刻以降で振幅が0の点とする方法^[109]がある．

鏡像法は，電磁気学の分野で発展した手法であり，Allen and Berkley^[4]によって室内音響に応用された．その後，計算の効率化に関する研究が行われ，先に挙げた田口ら^[314]の他，Lee and Lee^[167]は座標変換により鏡像音源に関する必要記憶容量を低減し，Kristiansen *et al.*^[154]は低次反射音から高次反射音の性状を推定する手法を提案している．基本的な計算アルゴリズムに関してはBorish^[37]，Cremer^[62]に詳しい．

3.2.2 音線法

音線法は，音源点から音響ポテンシャルを持つ多数の音線を放射し，室内を伝搬して受音球を通過した応答を得る手法である．音線は放射指向特性を容易に与えられ，球面波として等立体角に放射された場合には，距離とともに音線の間隔が広がるため単位面積あたりの通過音線数は減少し，距離減衰が模擬される．室境界面に入射した音線は鏡像法と同様に吸音されるが，反射性状としてはSnell則に従う鏡面反射だけでなく乱反射率を用いてLambert則^[163]に従う拡散反射が導入可能^[59]である．受音に関しては，点ではなく音線が通過可能な球による(図3.3)．

音線法は光学の分野で発展した手法であり，Krokstad *et al.*^[155]によって室内音響に適用されたが，音線法は音線数の有限性や受音のために領域が必要であることから生じる精度上の問題が潜在しているため，実際に音線法解析を行う際には多くのノウハウが必要である．具体的には，類似した経路の音線を重複して受音する場合や，受音球がパー

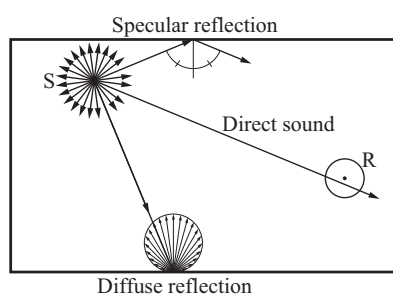


Figure 3.3 Propagation and reflection characteristics of sound rays.

ティションやバルコニーを跨ぐときに成立しない経路の音線を受音する場合がある．これらに対する精度改善のために，鏡像法を用いて有効な反射経路を特定する backtracing 法 [170, 193, 245, 277]，音線の先端に有限領域を与えて隣接する音線と連続させる cone tracing 法 [193]，beam tracing 法 [273]，Pyramid tracing 法 [87, 88, 172] 等の手法が提案されている．また，文献 [306] は音線法解析に必要な幾何学的なアルゴリズムが紹介されており，文献 [322] は音線数や受音球サイズの設定に関して詳しい他，コンピュータプログラムも例示されている．しかしながら，幾何音響的手法は音波の波動性が考慮されていないため，これらの手法は必ずしも音波の物理現象に根ざしているとは言えず，また，複雑なアルゴリズムの導入は分離できない誤差要因となる恐れがある．そのため，各手法やプログラムの妥当性を検証するために，実測結果との比較 [118, 192] やベンチマークを設定したラウンドロビンテスト [36, 278] 等が行われている．

本研究では，上に述べた改善手法に依らない古典的な音線法を用いる．尚，音源に関しては，音線が室稜線に入射することを忌避するため，等立体角ではなく確率的にランダムな方向に放射することにより無指向性音源を模擬する．また，室境界における音線の反射に関しては，音線が入射した境界の乱反射率に応じて確率的に反射性状を鏡面反射または拡散反射に決定し，拡散反射の場合には入射角度に依存せず，Lambert 則に従う確率で反射方向を決定する．即ち，複数の音線の多重反射により統計的に完全拡散反射を模擬する．拡散反射の具体的な計算アルゴリズムとしては，室境界面に対する天頂角 θ 及び方位角 ϕ を次式で算出する．

$$\theta = \frac{1}{2} \cos^{-1}(1 - m) \text{ [rad]}, \quad (3.3)$$

$$\phi = 2\pi n \text{ [rad]}, \quad (3.4)$$

但し， m, n は $[0, 1]$ の一様乱数．従って，反射方向ベクトル $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$ は次式で得られる．

$$v_x = \sin \theta \cos \phi, \quad (3.5)$$

$$v_y = \sin \theta \sin \phi, \quad (3.6)$$

$$v_z = \cos \theta. \quad (3.7)$$

3.3 波動音響解析

3.3.1 時間領域有限差分法

時間領域有限差分 (finite-difference time-domain, FDTD) 法とは、微分方程式で表される支配方程式に含まれている微分項を差分に置き換えて時間領域で近似計算する手法の総称である。FDTD 法では、はじめに対象とする空間領域を基本的には直交格子に分割し、格子点上に物理量を規定する。次に、各物理量に関する差分方程式を立て、これを解くことで特定の離散時刻における物理量を現在及び過去の物理量から求める。従って、ある特定の離散時刻における全格子点上の物理量を計算し、求められた物理量を使って次の時刻における物理量を計算することで、場の解を時間発展的に求めることができる。本論文で用いる手法は、staggered グリッドに基づく時間・空間 2 次精度の中心差分を用いた Yee^[287] の leapfrog アルゴリズムによる時間領域数値解析法であり、これを FDTD 法 (FDTD(2,2) 法) と称し、以下に概説^[321] する。

定式化

空気中の波動伝搬は、空気の粒子に関する運動方程式 (式 (3.8)–(3.10)) と連続の式 (式 (3.11)) により表される (式 (2.1) 及び式 (2.2) の再掲)。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad (3.8)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad (3.9)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} = 0, \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \kappa \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0, \quad (3.11)$$

但し、 p は音圧 [Pa]、 u, v, w は x, y, z 各方向の粒子速度 [m/s]、 $\kappa = \rho c^2$ は空気の体積弾性率 [N/m²]、 ρ は平衡状態における空気密度 [kg/m³]、 c は音速 [m/s]。

式 (3.8)–(3.11) の一階微分を中心差分で近似するために、図 3.4 に示されるように、音圧と各方向粒子速度の定義点を半格子ずつずらした点に定義する。このような格子のとり方を staggered グリッドと呼ぶ。空間に関する定義点が半格子ずれているのと同様に、図 3.5 に示すように、時間方向の離散軸も半格子ずらして定義する。

空間及び時間離散化幅をそれぞれ h [m]、 Δt [s] とし、空間位置 $(x, y, z) = (ih, jh, kh)$ 、時刻 $n\Delta t$ における物理量 q を $q_{i,j,k}^n$ と表現すると、音圧及び粒子速度は $p_{i,j,k}^{n+1/2}$ 、 $u_{i+1/2,j,k}^n$ 、

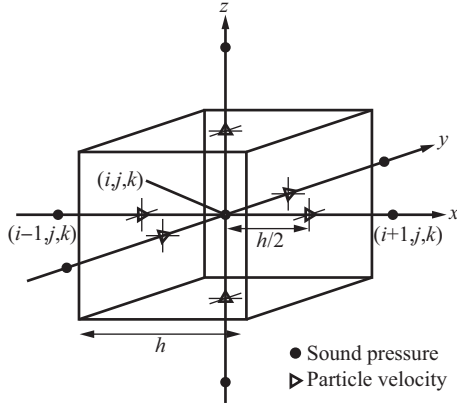


Figure 3.4 Definition points of sound pressure and particle velocity on staggered grid system in space domain.

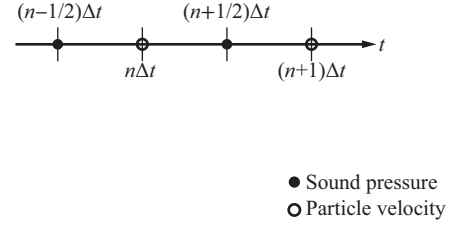


Figure 3.5 Definition points of sound pressure and particle velocity on staggered grid system in time domain.

$v_{i,j+1/2,k}^n, w_{i,j,k+1/2}^n$ のように表現される．式 (3.8)–(3.11) の時間，空間微分項は，

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} &= \frac{u_{i+1/2,j,k}^{n+1} - u_{i+1/2,j,k}^n}{\Delta t}, & \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{i,j,k}^n &= \frac{u_{i+1/2,j,k}^n - u_{i-1/2,j,k}^n}{h}, \\ \left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{i,j,k}^n &= \frac{p_{i,j,k}^n - p_{i,j,k}^{n-1/2}}{\Delta t}, & \left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} &= \frac{p_{i,j+1,k}^{n+1/2} - p_{i,j,k}^{n+1/2}}{h}, \end{aligned}$$

等ようになる．尚，仮に staggered グリッドを用いない場合には，音響量の存在しない計算点での値を推定することになってしまうため， $\left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{i,j,k}^{n+1/2} = \frac{p_{i,j+1,k}^{n+1/2} - p_{i,j-1,k}^{n+1/2}}{h}$ 等とすれば計算可能である．但し，両隣の2点の値を必要とするため，十分な計算精度を得るには staggered グリッドに比べて離散化幅を狭くする必要がある．このように，中心差分を空間的，時間的に簡潔な形で実装できるのが，staggered グリッドの利点である．これらを式 (3.8)–(3.11) に代入して整理すると，以下の差分方程式が得られる．

$$u_{i+1/2,j,k}^{n+1} = u_{i+1/2,j,k}^n - \frac{\Delta t}{\rho_0 h} \left(p_{i+1,j,k}^{n+1/2} - p_{i,j,k}^{n+1/2} \right) \quad [\text{m/s}], \quad (3.12)$$

$$v_{i,j+1/2,k}^{n+1} = v_{i,j+1/2,k}^n - \frac{\Delta t}{\rho_0 h} \left(p_{i,j+1,k}^{n+1/2} - p_{i,j,k}^{n+1/2} \right) \quad [\text{m/s}], \quad (3.13)$$

$$w_{i,j,k+1/2}^{n+1} = w_{i,j,k+1/2}^n - \frac{\Delta t}{\rho_0 h} \left(p_{i,j,k+1}^{n+1/2} - p_{i,j,k}^{n+1/2} \right) \quad [\text{m/s}], \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned}
p_{i,j,k}^{n+1/2} = p_{i,j,k}^{n-1/2} - \frac{\kappa \Delta t}{h} & \left[\left(u_{i+1/2,j,k}^n - u_{i-1/2,j,k}^n \right) \right. \\
& + \left(v_{i,j+1/2,k}^n - v_{i,j-1/2,k}^n \right) \\
& \left. + \left(w_{i,j,k+1/2}^n - w_{i,j,k-1/2}^n \right) \right].
\end{aligned} \tag{3.15}$$

式 (3.12)–(3.15) より，現在の粒子速度は過去の粒子速度と音圧から計算でき，現在の音圧は過去の時刻の音圧と粒子速度により計算されることがわかる．

Leapfrog アルゴリズムは，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，差分参照点を増やすことにより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，FDTD (2,4) 法等が提案 ^[76,104] されている．

安定性と分散性

時間領域有限差分法は定式化が簡便である反面，条件設定によって解が不安定となって発散したり（安定性），波形が乱れたり（分散性）する現象が生じる．安定性に関しては，Von Neumann^[52] の安定性解析によれば，時間離散化幅 Δt と空間離散化幅 h の間の関係で規定され，2 点差分による leapfrog アルゴリズムの場合，以下の条件（Courant 条件，CFL 条件）を満たす必要がある．

$$\Delta t \leq \frac{h}{\sqrt{N_{\text{dim}} c}} \quad [\text{s}], \tag{3.16}$$

但し， N_{dim} は次元の数（例えば，3 次元空間では $N_{\text{dim}} = 3$ ）．上の関係のように，空間離散化幅と時間離散化幅の条件は比例関係にあるため，空間離散化幅を小さくして分解能を上げた場合，その解像度に比例して時間分解能も上げなければならない．

分散性に関しては，その誤差を考慮し，正確な波動伝搬を得るために空間離散化幅は通常，波長の 1/10 から 1/20 とすることが多い．また，分散性の影響を軽減させるため，compact 差分^[171]，多段階積分法^[296]，symplectic 積分法^[225]等の手法が提案されている．

境界条件

インピーダンス境界条件 境界面の反射（吸音）特性は，次式の音響インピーダンスによって規定されることが多い．

$$Z_n = \frac{p}{u_n} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s/m}], \tag{3.17}$$

但し， u_n は法線方向粒子速度， Z_n は法線方向外向きの音響インピーダンスであり，一般的に複素数で $Z = R + jX$ （ R は音響抵抗 $[\text{Pa} \cdot \text{s/m}]$ ， X は音響リアクタンス $[\text{Pa} \cdot \text{s/m}]$ ）として表される．境界面が完全反射面のときは，音響インピーダンスは無限大であり，この条

件は境界面での粒子速度を 0 とすることによって容易に実現される．一方，完全に吸収されて反射しない条件は，平面波入射に対して $Z_n = \rho c$ であるが，通常表れる球面波（2次元では円筒波）入射の場合には完全な吸収条件とならず，ある程度の反射波が残るため，後述する吸収境界条件を用いることが望ましい．Leapfrog アルゴリズムでは，音圧 p と各方向の粒子速度 u, v, w が変数なので，壁面の音響インピーダンスが規定された場合，式 (3.17) によって表される境界条件は次のように近似することができる [288]．

$$u_{i+1/2,j,k}^{n+1} = \frac{p_{i,j,k}^{n+1/2}}{Z_n} n_x \quad [\text{m/s}], \quad (3.18)$$

$$v_{i,j+1/2,k}^{n+1} = \frac{p_{i,j,k}^{n+1/2}}{Z_n} n_y \quad [\text{m/s}], \quad (3.19)$$

$$w_{i,j,k+1/2}^{n+1} = \frac{p_{i,j,k}^{n+1/2}}{Z_n} n_z \quad [\text{m/s}], \quad (3.20)$$

但し， $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$ は境界面外向き方向法線ベクトルである．

垂直入射吸音率 α_n は垂直入射音響インピーダンスと以下のように関係付けられる [330]．

$$\alpha_n = 1 - \left| \frac{(Z_n/\rho_0 c) - 1}{(Z_n/\rho_0 c) + 1} \right|^2 = 1 - \left| \frac{z_n - 1}{z_n + 1} \right|^2. \quad (3.21)$$

ここで， $z_n = Z_n/\rho c$ は垂直入射音響インピーダンス比．従って，材料の仕様から垂直入射吸音率が推定された場合，その材料の垂直入射音響インピーダンス比は，

$$z_n = \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha_n}}{1 - \sqrt{1 - \alpha_n}}, \quad (3.22)$$

として設定することができる．垂直入射吸音率 α_n と垂直入射音響インピーダンス比 z_n の関係を図 3.6 に示す．

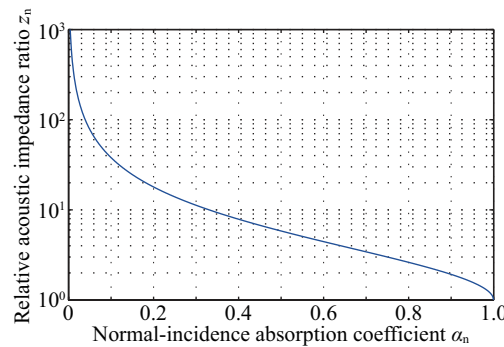


Figure 3.6 Relationships between absorption coefficient and acoustic impedance ratio.

ここで、局所作用を仮定した場合、斜入射吸音率 α_θ は垂直入射音響インピーダンス比より次式で表される。

$$\alpha_\theta = 1 - \left| \frac{z_n \cos \theta - 1}{z_n \cos \theta + 1} \right|^2 = \frac{4r_n \cos \theta}{(r_n \cos \theta + 1)^2 + (x_n \cos \theta)^2}. \quad (3.23)$$

垂直入射吸音率 α_n と斜入射吸音率の関係を図 3.7 に示す。垂直入射吸音率 $\alpha_n = 1$ を除いて入射角度が大きくなるに従って α_θ が大きくなり、 α_n に依存する角度で 1 を示し、 $\theta = \pi/2$ で $\alpha_\theta = 0$ となる。また、音響エネルギー密度 E [J/m³] の拡散音場について考えると、境界の微小面積 dS [m²] に単位時間あたりに入射するエネルギー I [W/m²] は式 (2.62) で与えられ、吸収されるエネルギー I_a は斜入射吸音率を用いて次式で表される。

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{1}{dS} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^c \frac{dS \cos \theta}{4\pi r^2} E \alpha_\theta r^2 \sin \theta dr d\theta d\phi \\ &= \frac{cE}{2} \int_0^{\pi/2} \alpha_\theta \cos \theta \sin \theta d\theta \quad [\text{W/m}^2]. \end{aligned} \quad (3.24)$$

従って、定義より統計入射吸音率 α_r が次式 (Paris の式 [205]) で得られる。

$$\begin{aligned} \alpha_r &= \frac{I_a}{I} = \frac{\int_0^{\pi/2} \alpha_\theta \cos \theta \sin \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta} \\ &= 2 \int_0^{\pi/2} \alpha_\theta \cos \theta \sin \theta d\theta \\ &= \frac{8r_n}{|x_n|^2} \left\{ 1 + \frac{r_n^2 - x_n^2}{x_n |z_n|^2} \tan^{-1} \left(\frac{x_n}{1 + r_n} \right) - \frac{r_n}{|z_n|^2} \ln [(1 + r_n)^2 + x_n^2] \right\}. \end{aligned} \quad (3.25)$$

垂直入射吸音率 α_n と統計入射吸音率 α_r の関係は、実インピーダンスを仮定した場合 ($x_n = 0$)、図 3.8 のようになり、 $\alpha_n = 1$ 付近を除いて $\alpha_r > \alpha_n$ である。上に述べた方法では、音響インピーダンス比として全ての周波数に対して一律の実数項のみが求められるが、周波数特性をもつ壁面境界条件を考慮するためには、別のモデル化が必要となる。材料表面の音響インピーダンス比を反映させるために、その反射特性を近似的に等価な電気回路に置き換える方法 [316]、機械系に置き換える方法 [229] が提案されている。また、より複雑な特性をシミュレートする方法として、壁面による反射をシステム論的に捉え、 z 変換を応用する方法 [257] や、アドミタンス特性を IIR あるいは FIR フィルターとして計算に反映させる方法がある [82]。また、多孔質吸音材のように、音響伝搬理論が確立している材料を取り扱う場合、材料自体を離散化し、内部の音響伝搬を FDTD 法によって計算する方法についても検討されている [258]。

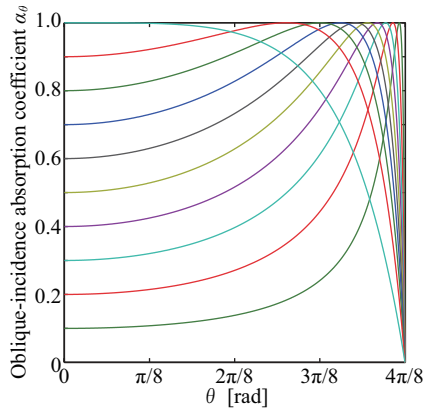


Figure 3.7 Relationships between normal- and oblique-incidence absorption coefficients.

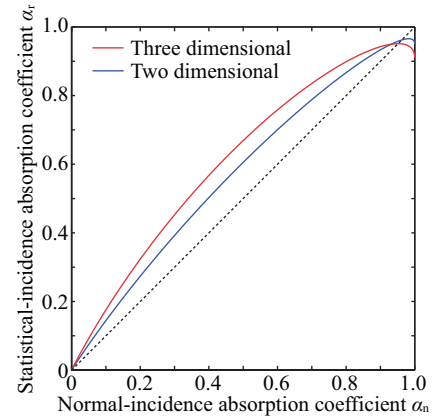


Figure 3.8 Relationships between normal-incidence and statistical absorption coefficients.

開領域問題のための吸収境界条件 差分法は領域型解法であるため，開領域を対象とする場合には境界面からの反射波を低減するために境界面を特別なモデルで近似する必要がある．このような吸音境界の考え方には微分型吸音条件（differential-based absorbing boundary condition, D-ABC）と境界層型吸音条件（material-based absorbing boundary condition, M-ABC）の2種類がある^[297]．前者は仮想境界において進行波の微分方程式を離散化する方法であり，後者は対象とする音場の周囲に仮想的な吸収層を設け，層内で音波のエネルギーを消散させる方法である．D-ABCによる手法は無反射の条件をある一面に限定して与えるのに対して，M-ABCによる手法では領域終端にエネルギーを吸収する層（吸音層）を設定することにより，音場領域内に戻る反射波を減衰させる．このため，M-ABCでは高度な吸音を実現することができる一方，原理的に吸収のための付加的な領域を設定する必要があるため，計算規模が大幅に増大するという短所がある．本研究で検討する開領域問題はM-ABCによる手法のうちPML（perfectly matched layer）無反射境界^[29]を実装する．

PML (perfectly matched layer) 無反射境界条件 PMLでは，空気領域と吸音層の特性インピーダンスがともに入力波の周波数及び入射角度に関わらず一致する仮想的な媒質を設定することにより，両領域の境で反射が発生しないようにしている．線形音波に対するPMLでは，吸音層内における音響伝搬の支配方程式に減衰定数 $R_{x(y,z)}$ [Pa·s/m²]を導入し

た以下の式を用いる [216] .

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + R_x u + \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial p_x}{\partial t} + \frac{R_x}{\rho_0} p_x + \kappa \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (3.26)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + R_y v + \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial p_y}{\partial t} + \frac{R_y}{\rho_0} p_y + \kappa \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (3.27)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + R_z w + \frac{\partial p}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial p_z}{\partial t} + \frac{R_z}{\rho_0} p_z + \kappa \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (3.28)$$

但し , $p = p_x + p_y + p_z$. $R_x = R_y = R_z = 0$ として整理すると , 空気中の音波伝搬を表す式 (3.8)–(3.11) と一致する .

減衰定数は空気領域と PML 層の境界で不連続であると数値的な反射波が生じ , 誤差の要因となる . 本研究では , 次式のように空気領域と PML 層の境界からの距離の関数として , R を空間的に滑らかに変化させて与える .

$$R(ih) = R_{\max} \left(\frac{ih}{Nh} \right)^m, \quad (3.29)$$

但し , N は PML 層の格子点数 . m は R の空間分布を与える定数 , R_{\max} は減衰定数の最大値であり , 文献 [291, 305] を参考にそれぞれ , $m = 2$, $R_{\max} = 2.71 \times 10^4$ とする .

音源条件

FDTD 法では離散化の影響により , 強く不連続な物理量がある場合に分散誤差を生じることから , 初期値を与える際には空間または時間領域で滑らかに連続するように設定する . 従って , FDTD 法により室内インパルス応答を得ようとするときに , Dirac のデルタ関数を用いることは適切ではない . 空間分布型の音源としては , cosine 関数や Gaussian 関数を用いて音圧 $p(r)$ [Pa] の初期値を与える手法等が提案されている .

1. Cosine 関数を用いる場合 [336]

$$p(r) = \begin{cases} 1 + \cos(\pi r/d) & (r \leq d) \\ 0 & (r > d), \end{cases} \quad (3.30)$$

2. Gaussian 関数を用いる場合 [229]

$$p(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{d^2}\right), \quad (3.31)$$

但し , r は音源からの距離 [m] , d は音源の幅 [m] .

音源に含まれる周波数成分は上式をフーリエ変換することで得られる . Cosine 関数は高周波数成分を多く含むため分散誤差が比較的に発生しやすいが , Gaussian 関数は Fourier 変換しても Gaussian 関数になる性質があるため高周波数成分が少なく , 安定性が

高いことが知られている^[334]。式(3.31)の場合，

$$p(r,t) = \frac{1}{2r}(r-ct) \exp\left(-\frac{(r-ct)^2}{d^2}\right) + \frac{1}{2r}(r+ct) \exp\left(-\frac{(r+ct)^2}{d^2}\right), \quad (3.32)$$

のように進行波と後退波に分離し，進行波成分についてのみフーリエ変換すると以下のスペクトルが得られる。^[307]

$$F[p(r,t)] = \frac{\omega\sqrt{\pi}d^3}{2rc^2} \exp\left(-i\omega\frac{r}{c} - \frac{(\omega d)^2}{4c^2}\right). \quad (3.33)$$

これは以下のような特徴を持つ。

1. 低周波数域では周波数に比例してスペクトル成分が緩やかに増加する。
2. スペクトルのピークは $\omega d/c = \sqrt{2}$ ，即ち， $f = c/(\sqrt{2}\pi d)$ で現れる。ピーク周波数以上の周波数では急激にスペクトル成分が低下するローパスフィルターの性状を示す。
3. ピーク周波数は音源の幅 d に反比例する。

本研究では，高周波数成分が急峻に抑制され，かつ広帯域の周波数成分を含む Gaussian 関数による音源を用いることとする。尚，式(3.33)を $\omega d/c$ をパラメータとして図示したものが図 3.9 である。ピーク値からの 3 dB 減衰点が $\omega d/c = e$ であり，この点を音源に含まれる周波数の上限値 f_{\max} と見なし，

$$d = \frac{ce}{\omega_{\max}} = \frac{ce}{2\pi f_{\max}} \quad [\text{m}], \quad (3.34)$$

を満たすように d を設定する。例えば，音速 $c = 340.5 \text{ [m/s]}$ のとき，1 kHz の 1/3 オクターブバンド上限周波数を f_{\max} とした場合， $d \approx 0.15$ である。この場合の周波数特性を図 3.9 の上軸に，音圧空間分布を図 3.10 に示す。

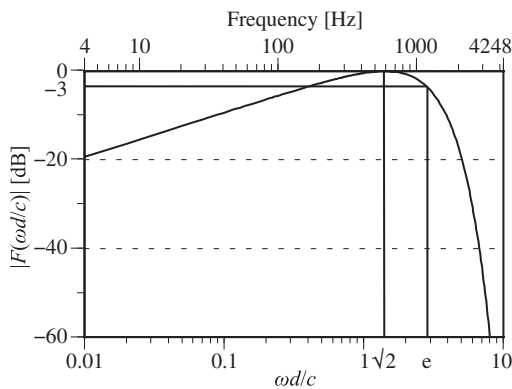


Figure 3.9 A spectrum of Gaussian source^[307].

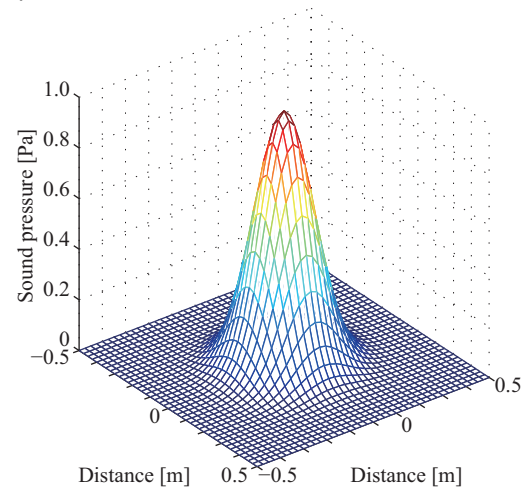


Figure 3.10 An example of initial distribution of sound pressure.

解析精度検証

日本建築学会 環境工学本委員会 音環境運営委員会 音響数値解析小委員会では、音響数値解析に関するベンチマーク問題を提供しており、異なる解析手法間での精度検証や計算効率の比較が行われている [324]。実装した FDTD 法の精度検証のために、ベンチマーク問題のうち B0-1T を対象として理論解と比較する。

B0-1T は図 3.11 に示す通り、1 辺 1 m の立方体室であり、全面が剛壁で構成されている。音源は室中央にあり、R2、R3、R4 の 3 箇所に受音点が設定されている。

空間離散化幅 $h = 1/160$ m、時間離散化幅 $\Delta t = 0.01$ ms とし、FDTD 法解析では音源として $10h$ の大きさの Gaussian 関数を音圧空間分布として与えた。従って、音源には周波数成分として 5 kHz 程度までの成分が含まれている。

尚、剛壁（吸音率 0）で構成される 3 次元閉空間の理論解は以下の式より求まる [228]。

$$\begin{aligned}
 p(x, y, z, t) = & \sum_{l=0}^{N_{\max}} \sum_{m=0}^{N_{\max}} \sum_{n=0}^{N_{\max}} \frac{F(l, m, n)}{L_x L_y L_z} \sqrt{\pi}^3 d^3 \cos \frac{l\pi x_s}{L_x} \cos \frac{m\pi y_s}{L_y} \cos \frac{n\pi z_s}{L_z} \\
 & \times \exp \left(- \left\{ \left(\frac{l\pi d}{2L_x} \right)^2 + \left(\frac{m\pi d}{2L_y} \right)^2 + \left(\frac{n\pi d}{2L_z} \right)^2 \right\} \right) \\
 & \times \cos \frac{l\pi x}{L_x} \cos \frac{m\pi y}{L_y} \cos \frac{n\pi z}{L_z} \cos \left\{ c\pi t \sqrt{(l/L_x)^2 + (m/L_y)^2 + (n/L_z)^2} \right\},
 \end{aligned} \tag{3.35}$$

但し、 $F(l, m, n)$ は以下の性質を満たす関数である。

$$\begin{aligned}
 F(0, 0, 0) &= 1, \\
 F(l, 0, 0) &= F(0, m, 0) = F(0, 0, n) = 2, \\
 F(l, m, 0) &= F(l, 0, n) = F(0, m, n) = 4, \\
 F(l, m, n) &= 8, \\
 l \neq 0, \quad m \neq 0, \quad n \neq 0.
 \end{aligned} \tag{3.36}$$

但し、 x_s, y_s, z_s は音源座標。重ね合わせの原理により厳密には $N_{\max} = \infty$ であるが、数値的に計算する際には有限の値で打ち切る必要がある。打ち切り次数 N_{\max} については、文献 [228] に従って、 $N_{\max} = 120$ とした。

音圧応答波形を図 3.12 に示す。受音点によらず、0 ms から 20 ms に比べて 80 ms から 100 ms ではやや誤差が生じているが、全体的に概ね一致している。

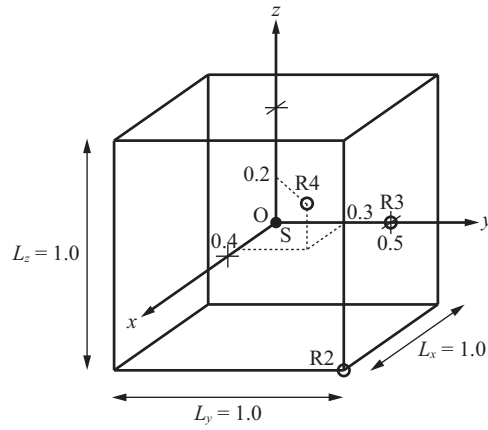


Figure 3.11 The geometry of cubic cavity (problem B0-1T).

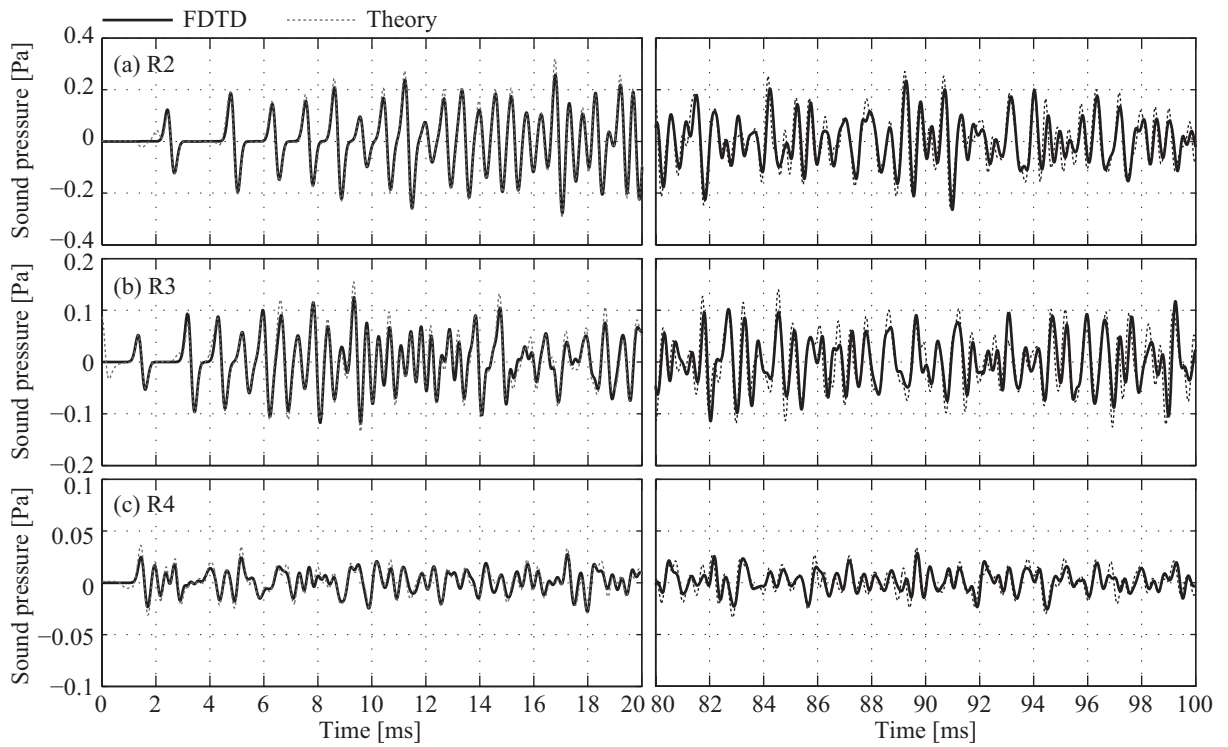


Figure 3.12 Transient sound pressure waveforms at the receiving point R2-R4.

3.4 結言

本章では、本研究で用いる音響解析手法の基礎理論を概説した。幾何音響的手法である鏡像法及び音線法に関しては原理的に波動性を無視している以上、各種付加的な改良アルゴリズムは時に分離できない誤差が生じる恐れがあるため、本研究では古典的な手法を用いることとする。詳細な設定パラメーターに関しては以後の各章で必要な検討を行う。波動音響的手法である FDTD 法に関しては Yee アルゴリズムに基づくこととし、境界条件として PML 無反射境界条件や音源条件として Gaussian 関数に関する設定方法について述べた。

第 4 章

室条件が音響特性に及ぼす 基礎的影響の把握

4.1 緒言

室条件が音響特性に及ぼす影響に関しては、数値解析技術及び計算機性能の向上により、近年では数値解析による定量的な検討が行われている。例えば、横田^[290,336]は矩形、楕円形、扇形の室を対象として、壁面拡散が音響伝搬性状及び音場の拡散性 (NV) に及ぼす影響を 2 次元 FDTD 法を用いて検討している。結果、焦点を有する室形状では音場の拡散性が低い、壁面拡散の設置により高まることが示されている。また、Yasuda *et al.*^[286]は矩形室を対象として吸音面の偏在及び壁面拡散の有無が残響に及ぼす影響を 3 次元 FDTD 法解析により検討している。結果、吸音面が偏在した場合には特定のモードの減衰が緩やかとなり残響が長くなるが、反射指向特性を考慮して拡散体を設置することで抑制できるとしている。さらに、Wang and Rathsam^[281]は吸音面の偏在時に壁面拡散の程度が室内音響指標に及ぼす影響を乱反射率を導入した 3 次元音線法解析により検討している。結果、壁面拡散の T_{30} に対する影響は大きい、EDT, C_{80} , J_{LF} への影響はほぼ認められなかった。

いずれの知見も設計実務に直接的に資するものと思われるが、検討条件や評価側面は限定的である。特に壁面拡散と室内音響指標に関する Wang and Rathsam の知見は幾何音響解析に基づくものであり、波動性や室形状を含めた検討が望まれる。本章では、室形状・壁面吸音・壁面拡散等の室条件が音響特性に及ぼす基礎的影響に関して、2 次元 FDTD 法解析により検討する。共通の室条件を設定して、音響伝搬性状、室内音響指標、音場の拡散性に着目した検討を行い、各々に関して時間・空間・周波数の各領域に亘る横断的な知見を得ることを目的とする。

4.2 音響伝搬性状への影響

本節では、主に壁面拡散に着目して室条件が音響伝搬に及ぼす影響について検討を行う。音響伝搬の表れとして、室内インパルス応答波形の算出、音圧等の空間分布の可視化、音波の到来方向分布の可視化を行い観察する。

正方形と円形の室（図 4.1、面積 256 m^2 、垂直入射吸音率 $\alpha_n = 0.1$ ）を対象として、2次元 FDTD 法による波動音響解析を行う。壁面条件として、三角形状の拡散体（ $\alpha_n = 0.1$ ）の有無（壁面全面）を設定する。拡散体の寸法は幅 20 cm、高さ 6 cm と、幅 160 cm、高さ 48 cm の 2 種類とする。図 4.2 に境界要素法で算出した拡散体（小）の乱反射率^[168]を示す。500 Hz ではほぼ乱反射しないが、2 kHz では値が顕著に大きいことがわかる。また、拡散体（大）の乱反射は拡散体（小）の値に対して 4 オクターブ下げた特性になると相似則から考えられる。音源として 2 kHz オクターブバンド上限周波数以下の成分が含まれるよう Gaussian 関数を音圧の空間分布として与える。サンプリング周波数は 48 kHz、空間離散化幅は 0.01 m とし、境界条件として吸音率相当の垂直入射音響インピーダンスを実数で与える。

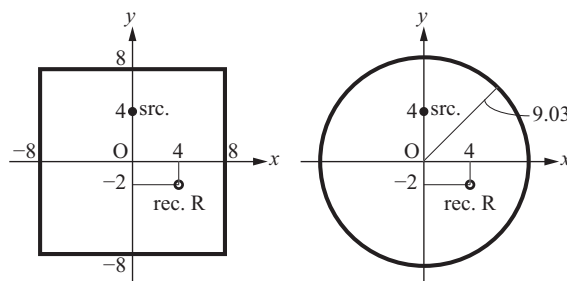


Figure 4.1 Geometries of square and circular rooms with an area of 256 m^2 .

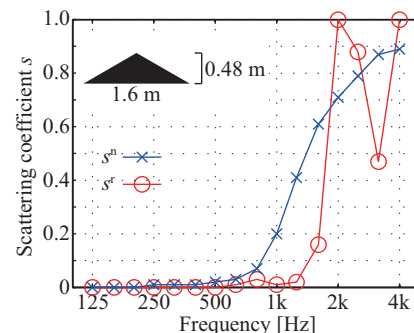


Figure 4.2 Random/normal-incidence scattering coefficients of the triangular diffusers, calculated by the numerical analysis.

4.2.1 室内インパルス応答

図 4.3 に室内インパルス応答（all pass）を示す。拡散体がない場合、正方形室では滑らかかつ密に減衰しているが、円形室では突発的な反射音が見られる。拡散体を設置した場合、正方形室では概形の変化は小さく、振幅がやや小さくなっている。これは拡散体を設置したことによる吸音の増加による影響と考えられる。円形室については、拡散体によって突発的な反射音が抑制され連続的に減衰している。

図 4.4 に円形室を対象として，拡散体の有無及び寸法が異なる 3 帯域 (125, 500, 2k Hz) の室内インパルス応答を示す．拡散体の乱反射率の周波数特性と対応して，125 Hz 帯域では拡散体の影響をほぼ受けず，500 Hz 帯域，2 kHz 帯域では拡散体の寸法に応じて波形が滑らかになっている．

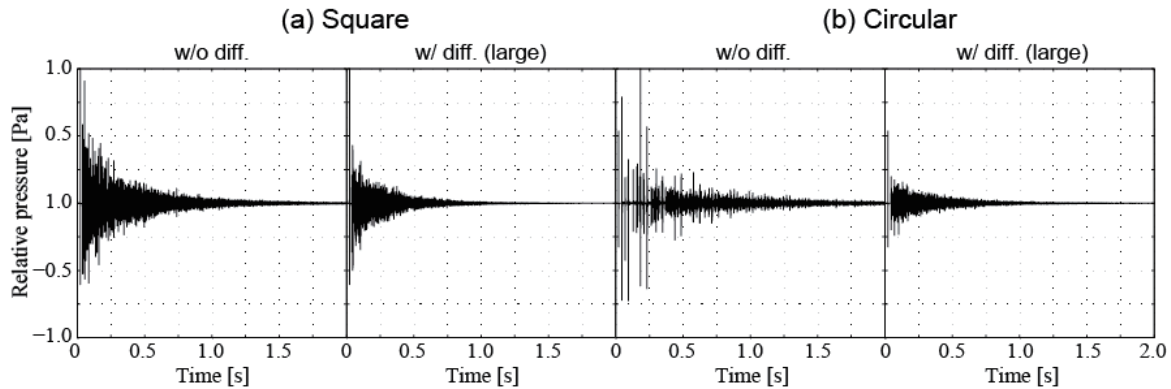


Figure 4.3 Room impulse responses: (a) square room, (b) circular room, without and with triangular diffusers.

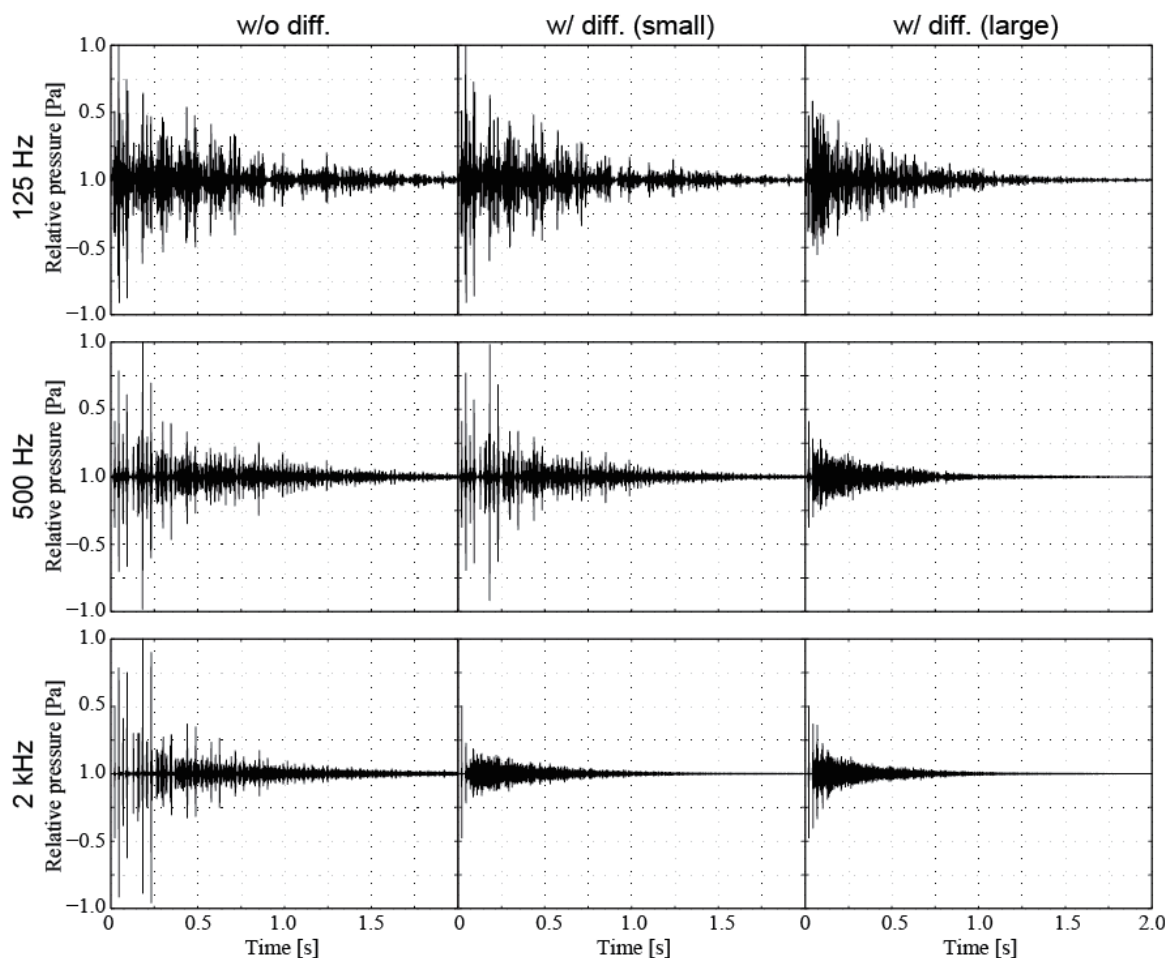


Figure 4.4 Room impulse responses of the circular room without and with triangular diffusers, calculated at 125, 500 and 2 kHz in 1/1 octave bands.

4.2.2 空間分布

図 4.5 に拡散体なしの正方形室を対象として，異なる表示方法による空間分布の経過を示す．音圧については，単色表示の場合には多色表示に比べてコントラストが強く，波面の伝搬の様子が明瞭に表れている．音圧レベルについては，聴感との対応関係が明解であるが，数値的な誤差を含む微小な値が増幅して表示されている．

図 4.6(a) に音圧の空間分布の経過を示す．拡散体がない場合，正方形室では時々刻々と空間が波面で満たされるが，円形室では波面が拡大と収縮を繰り返し，500 ms 時点でも波面が明確に表れている．拡散体を設置した場合，拡散体に入射した音波は指向性を帯びた 2 次音源から再放射されるように波面が分割されて反射しており，室形状に依らず経過とともに空間が波面で満たされている．

図 4.6(b) に累積音響エネルギーの空間分布 [336] をレベルとして示す．室条件に依存した軌跡が見られ，特に拡散体のない円形室では音源を通る同心円上の値が顕著に大きい．拡散体を設置することで緩和されているが，細かな干渉縞が生じている．

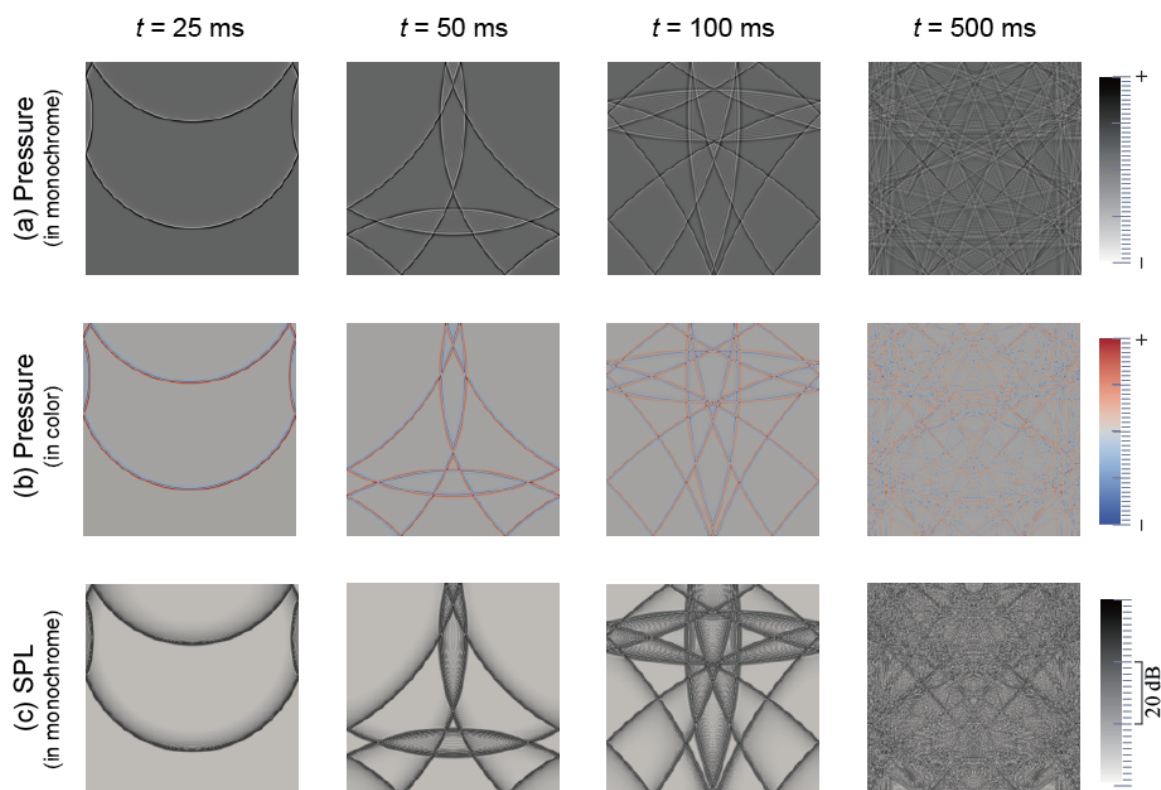
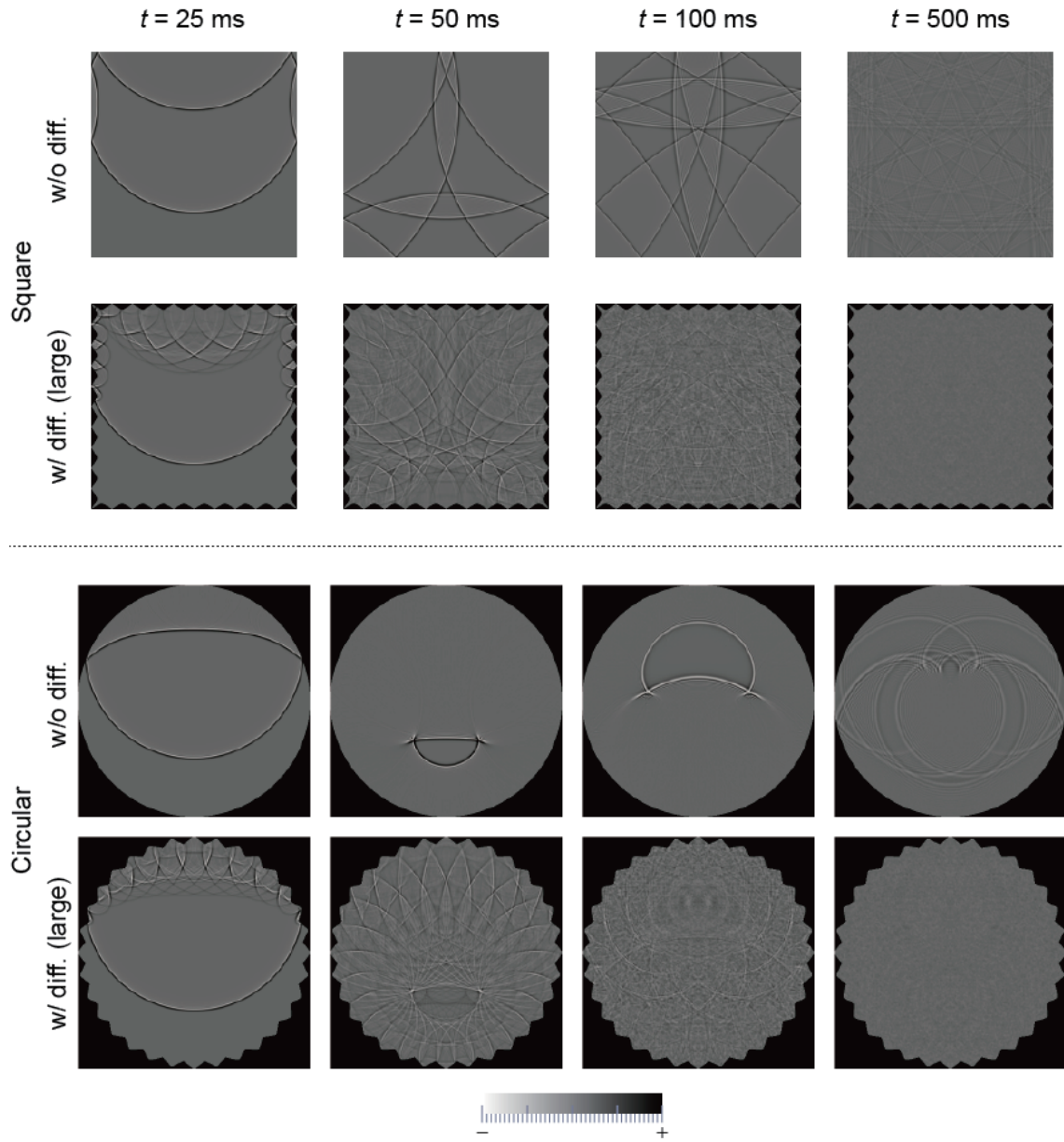
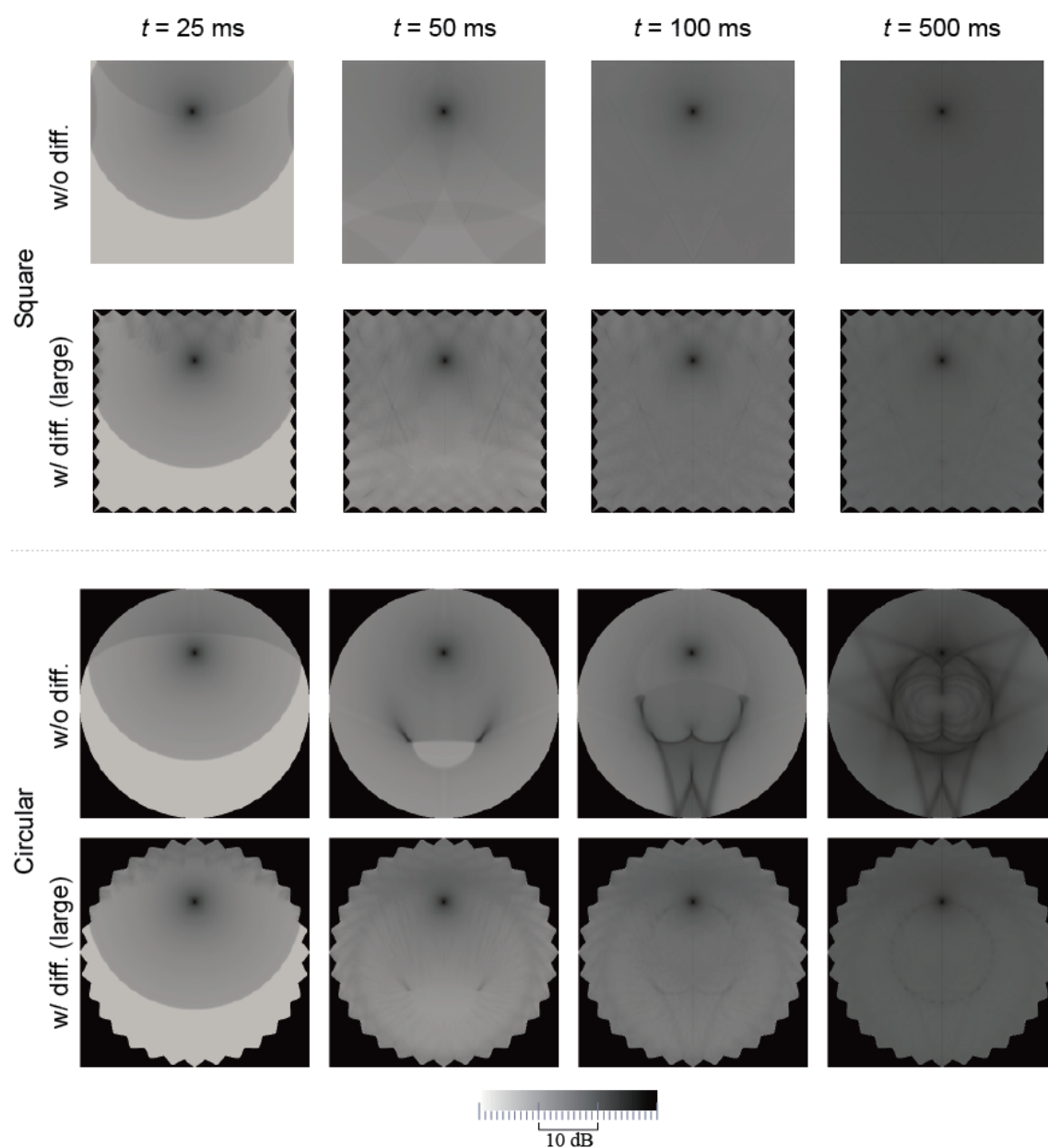


Figure 4.5 Comparison of visualization manner: (a) sound pressure in monochrome, (b) sound pressure in color and (c) sound pressure level in monochrome.



(a) Sound pressure.

Figure 4.6 Visualization of sound propagation and diffusion in square and circular rooms:
 (a) sound pressure, (b) accumulated sound energy level.



(b) Accumulated sound energy.

Figure 4.6 continued.

4.2.3 方向分布

図 4.7 に瞬時音響インテンシティ^[86] (第 5.7.2 節) から求めた仮想音源分布を示す。仮想音源の算出については、各軸方向の瞬時音響インテンシティ応答の包絡線から求める方法が提案^[96,203]されているが、ここでは Sekiguchi *et al.*^[244] を参考に各軸方向の瞬時音響インテンシティに 5 ms の時間窓 (オーバーラップなし) を施し、時間窓内の累積値から求めた。値はパワーレベル相当に換算し、直接音を 0 dB として -30 dB までの仮想音源のうち音源の出力後 2 s 以内に到来するものを表示した (図の中心は受音点)。拡散体がない場合、正方形室、円形室ともに仮想音源は概ね一様に分布しているが、円形室では仮想音源のパワーレベルにばらつきが見られる。拡散体を設置した場合、室形状に依らず値とそのばらつきが小さくなっている。

図 4.8 に時間窓内で累積した到来方向毎の瞬時音響インテンシティを示す。時間窓は直接音到来時刻を 0 ms として 25, 50, 100, 500, 2000 ms までの 5 種類、方向離散角は 5° とし、直接音レベルで基準化した。室形状に依らず拡散体を設置した場合に一様性が向上しており、特に円形室で顕著である。

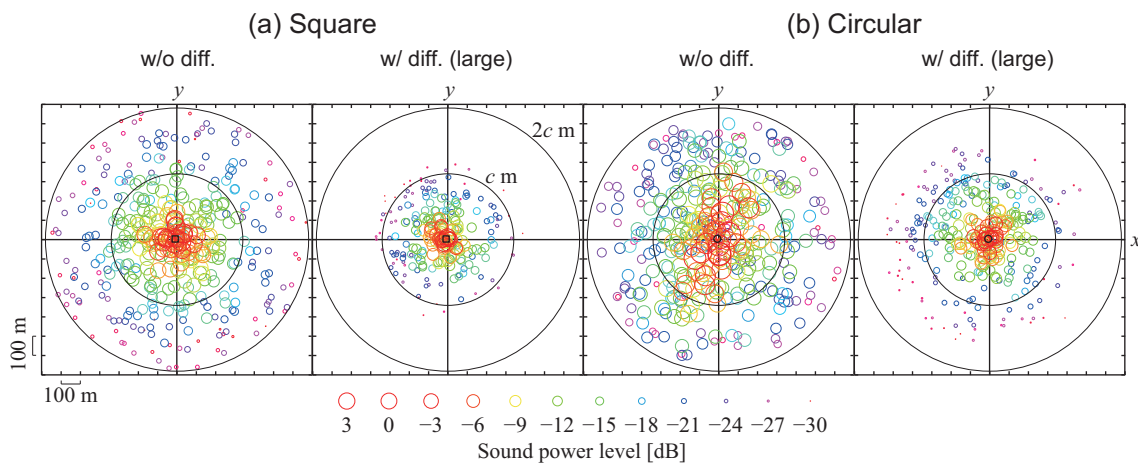


Figure 4.7 Virtual sound sources: (a) square room, (b) circular room, without and with triangular diffusers.

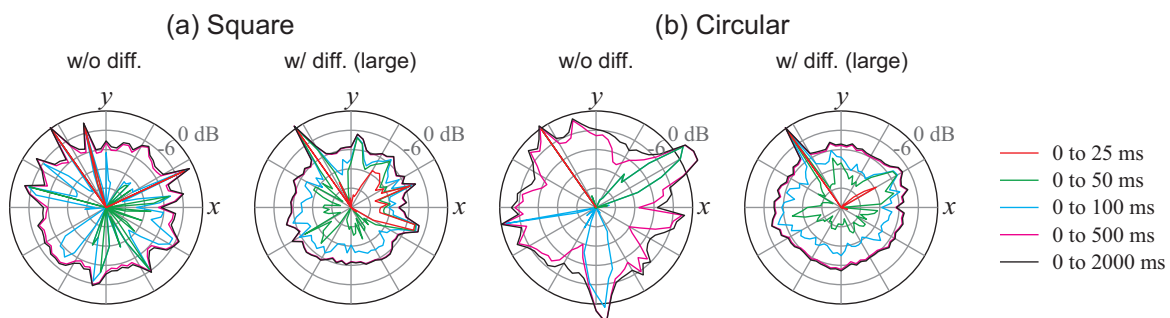


Figure 4.8 Accumulated distributions of arrival instant intensity: (a) square room, (b) circular room, without and with triangular diffusers.

4.3 室内音響指標への影響

本節では、室条件が室内音響指標に及ぼす影響を検討する。室条件は図 4.9 に示す、室形状、壁面吸音、壁面拡散等を変化させた 15 種類である。前節（第 4.2 節）まで検討対象とした図 4.1 の正方形室は室 A（拡散体なし）、室 J（拡散体小）及び室 K（拡散体大）に、円形室は室 B（拡散体なし）、室 N（拡散体小）及び室 O（拡散体大）に対応する。受音点は室 A 及び室 B について室中央を通る 2 m 間隔の格子点上に設置し、音源点とともに室寸法または室寸法比の変化に追従するものとする。その他の解析条件については前節（第 4.2 節）と同様である。算出する室内音響指標については、時間的観点として残響時間 T_{30} 、エネルギー的観点として音量因子 G 、明瞭性に関する C_{80} 及び T_S 、空間的観点として ASW を表す J_{LFC} とする。各指標は、1/1 オクターブバンドにおける各室の平均値及び標準偏差を求めることに加えて、ISO 3382-1^[132] に規定されている周波数平均による単一値（single number frequency averaging, 第 2.3.5 節）の空間分布を描く。尚、検討条件はいずれも音源を通る y 方向軸に関して対称であるため、空間分布は片側を表示する。また、矩形室の空間分布は室寸法及び室寸法比を統一して示す。さらに、本節の検討から除いている指標値は、参考に表 6.8 に示す。

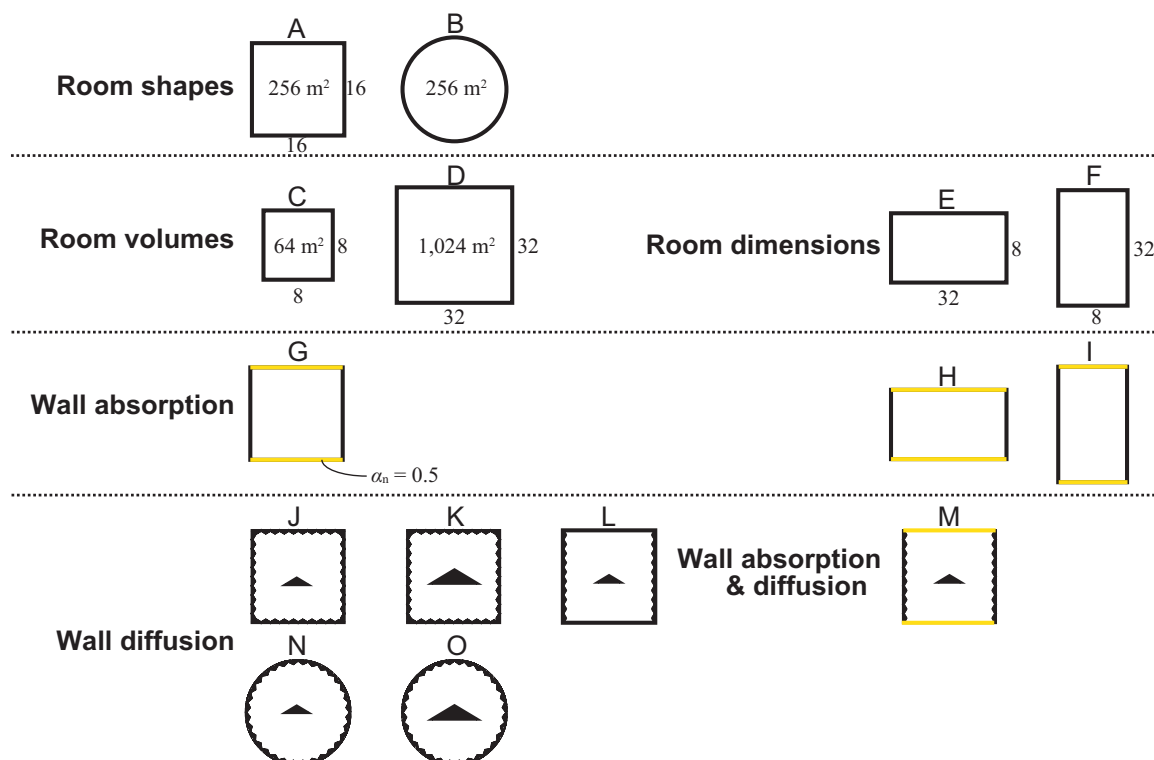


Figure 4.9 Room conditions with different room shapes, absorption distribution and diffusion.

4.3.1 時間的観点

残響時間 T_{30} (T_{30} (-5 to -35 dB) の平均値と標準偏差を図 4.10 に、空間分布を図 4.11 に示す。Eyring 式による残響時間は正方形室 (A) が 3.29 s, 円形室 (B) が 3.71 s である。室形状の影響 正方形室 (A) と円形室 (B) の結果を比較すると、どちらも平坦な周波数特性であるが、全体的に円形室の方が残響が長い。また、円形室では音源を通る同心円上の値が比較的に大きくなる傾向が見られる。

室寸法及び室寸法比の影響 室寸法が大きいほど ($C < A < D$), 残響が長くなっている。室が扁平形 (E, F) の場合、整形 (A) と概ね同程度であるが、高音域で扁平形の残響が長い。直進性の強い高音域では減衰の緩やかな長軸方向の往復反射が生じるためである。

壁面吸音の影響 吸音面が不均等な配置 (G, H, I) の場合、反射面が大きい室 I では均等の場合 (A) と同様に平坦な周波数特性であるが、全体的に残響が短い。また、反射性壁間距離が大きいほど ($I < G < H$) 高音域の残響が顕著に長くなっている。

壁面拡散の影響 正方形室の場合、拡散体を全面に設置した場合 (J, K), 設置しない場合 (A) に比べて周波数に依らず残響が抑制されており、拡散体の寸法の違いはあまり見られない。対向 2 面に設置した室 L では室 A に比べて高音域の残響が長くなっており、平滑壁間での往復反射によるものと考えられる。円形室の場合、設置する拡散体の寸法が大きいほど ($N < O$), 設置しない場合 (B) に比べて残響が抑制されている。

壁面吸音と壁面拡散の影響 均等吸音時 (A) には拡散体の影響 (J) が比較的に小さいが、不均等吸音時 (G) には拡散体を設置した場合 (M) に残響が顕著に抑制されている。

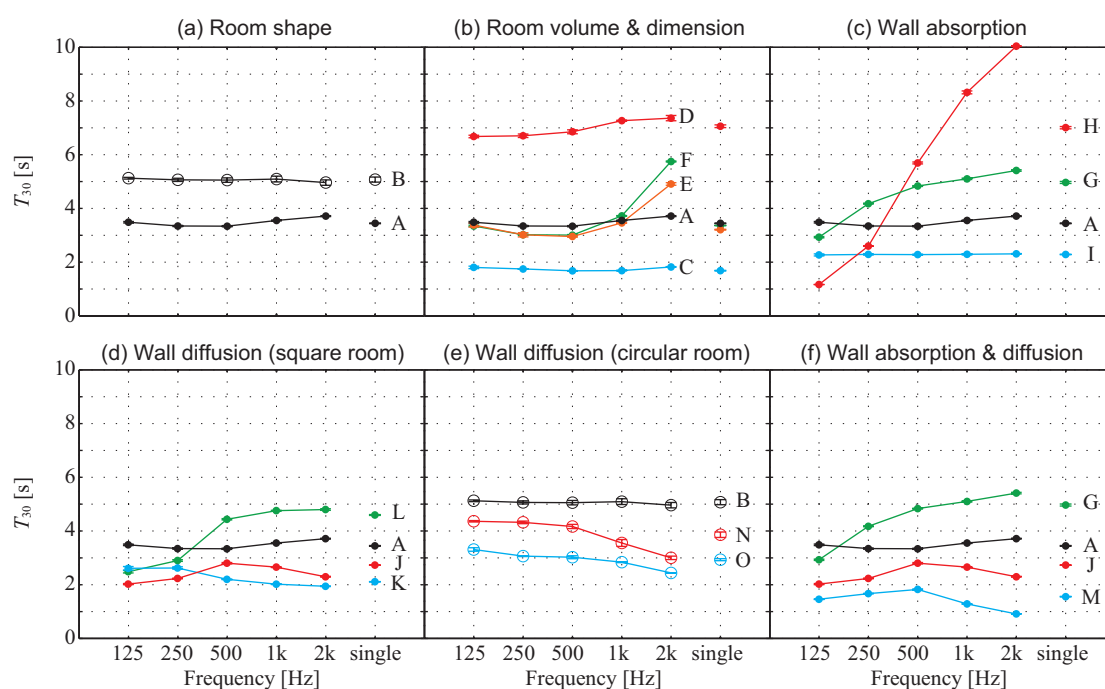
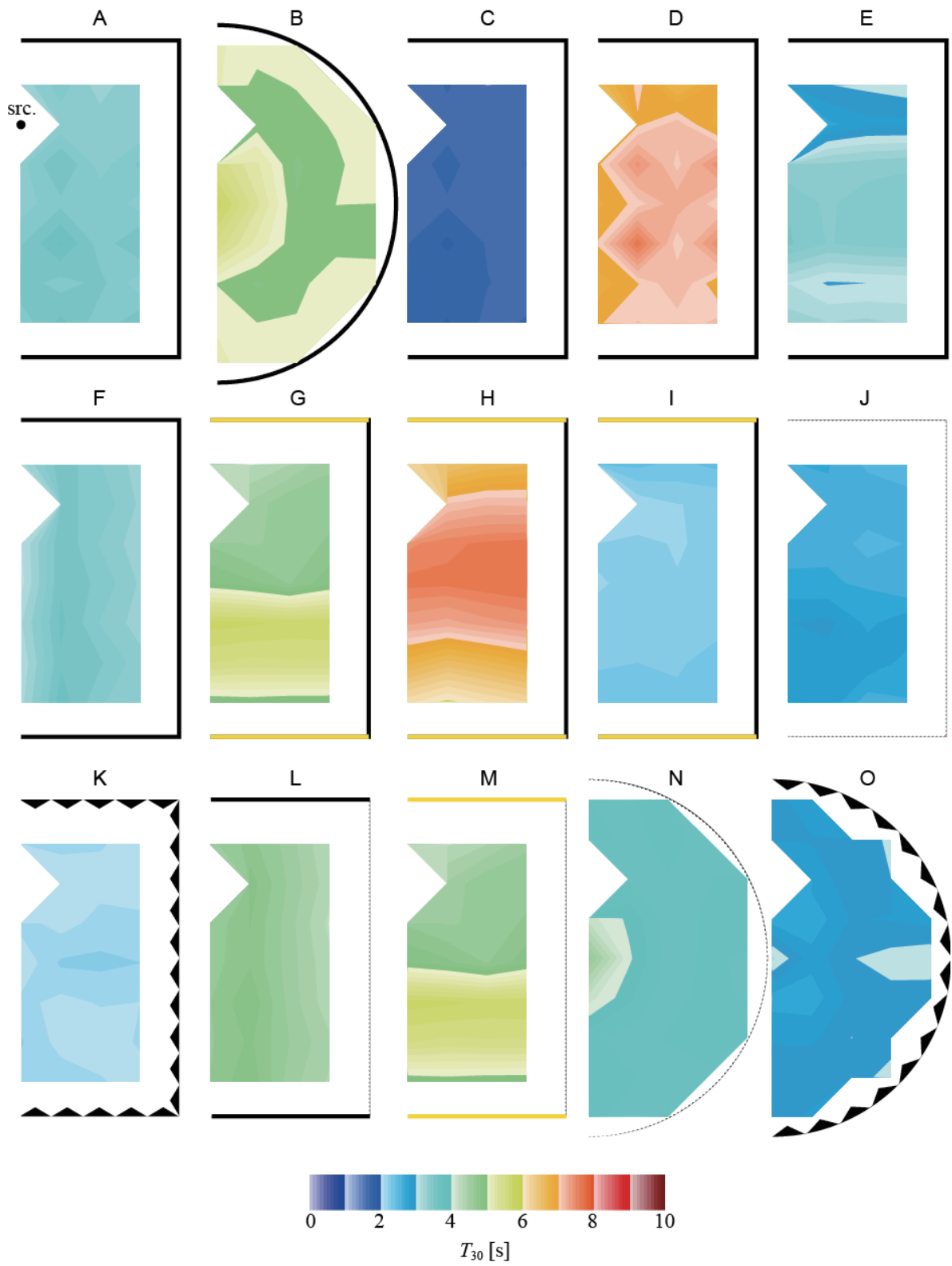


Figure 4.10 Error bars of reverberation times T_{30} (-5 to -35 dB).

Figure 4.11 Spatial distributions of reverberation times T_{30} (-5 to -35 dB).

4.3.2 エネルギー的観点

音量因子 G G の平均値と標準偏差を図 4.12 に，空間分布を図 4.13 に示す．

室形状の影響 正方形室 (A) と円形室 (B) の結果は同程度であり，周波数に依らず平坦な特性であるが，円形室のばらつきが比較的に大きい．

室寸法及び室寸法比の影響 室寸法が大きいほど ($C < A < D$)，値が小さくなっている．室が扁平形 (E, F) の場合，整形 (A) と比べて室 E の値は同程度であるのに対し，室 F では顕著に小さく，室寸法の大きい室 D に接近している．これは，室 F では音源が長軸の端部にあり，受音点距離が大きくなるためである．

壁面吸音の影響 吸音面を与えた場合 (G, H, I)，全面反射性の室 A に対して値は小さくなっており，吸音面が大きいほど ($I < G < H$) 顕著である．

壁面拡散の影響 拡散体の設置により，室形状に依らず値が小さくなっているが，これは拡散体による吸音の増加に起因すると考えられる．また，円形室では拡散体大きいほど値のばらつきが小さくなっている．

壁面吸音と壁面拡散の影響 吸音力が大きいほど ($A < J < G < M$) 値が小さくなっている．

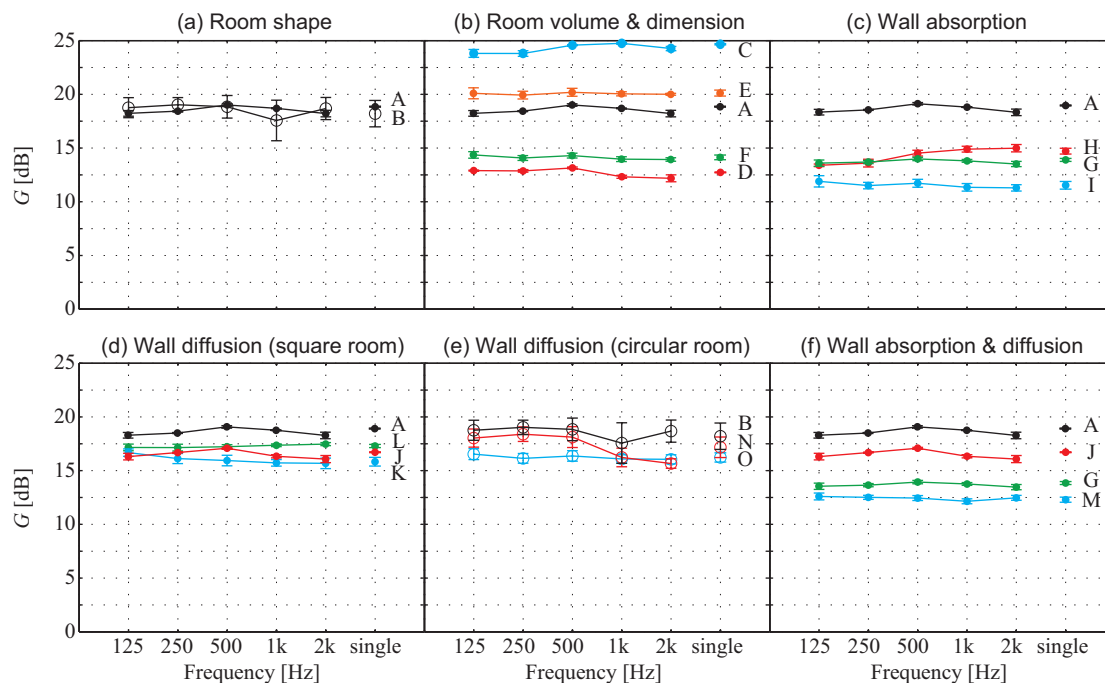
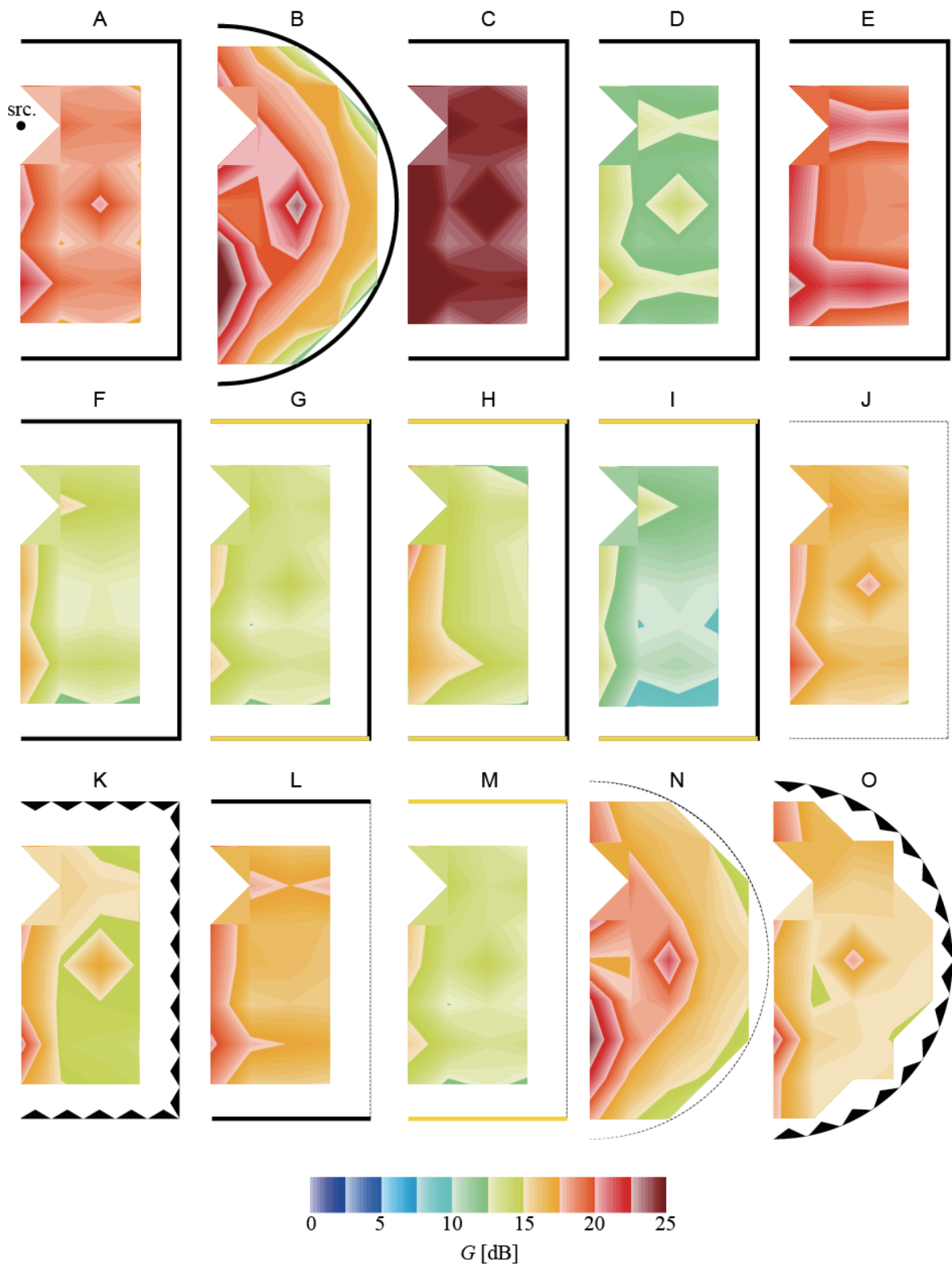


Figure 4.12 Error bars of sound strengths G .

Figure 4.13 Spatial distributions of sound strengths G .

明瞭性に関する指標 C_{80} C_{80} の平均値と標準偏差を図 4.14 に，空間分布を図 4.15 に示す．

室形状の影響 正方形室 (A) と円形室 (B) はどちらも平坦な周波数特性であるが，全体的に円形室の方が明瞭性が低く，値のばらつきが大きい．但し，円形室では室中心に関する音源の対称点近傍の値が大きい．

室寸法及び室寸法比の影響 室寸法が大きいほど ($C < A < D$)，明瞭性が低下している．室が扁平形 (E, F) の場合，整形 (A) よりも値が大きい．これは，扁平形は反射頻度が高く，初期反射音エネルギーが大きくなるためであると考えられる．

壁面吸音の影響 吸音面を与えた場合 (G, H, I)，全面反射性の室 A に対して値が大きくなっており，特に吸音面の大きい室 H では低音域ほど明瞭性が高まる傾向を示している．これは，波長の長い低音域ほど吸音面に回折入射するためであると考えられる．

壁面拡散の影響 正方形室の場合，拡散体を設置した場合 (J, K, L)，設置しない場合 (A) に比べて値が大きくなっているが条件間の違いはほぼ見られない．円形室の場合，拡散体を設置した場合 (N, O)，設置しない場合 (B) に比べて乱反射率の周波数特性に対応して明瞭性が向上しており，空間のばらつきは低下している．

壁面吸音と壁面拡散の影響 音量因子 G の結果とは逆に，室の吸音力が大きいほど ($A < J < G < M$) 値が大きくなっている．

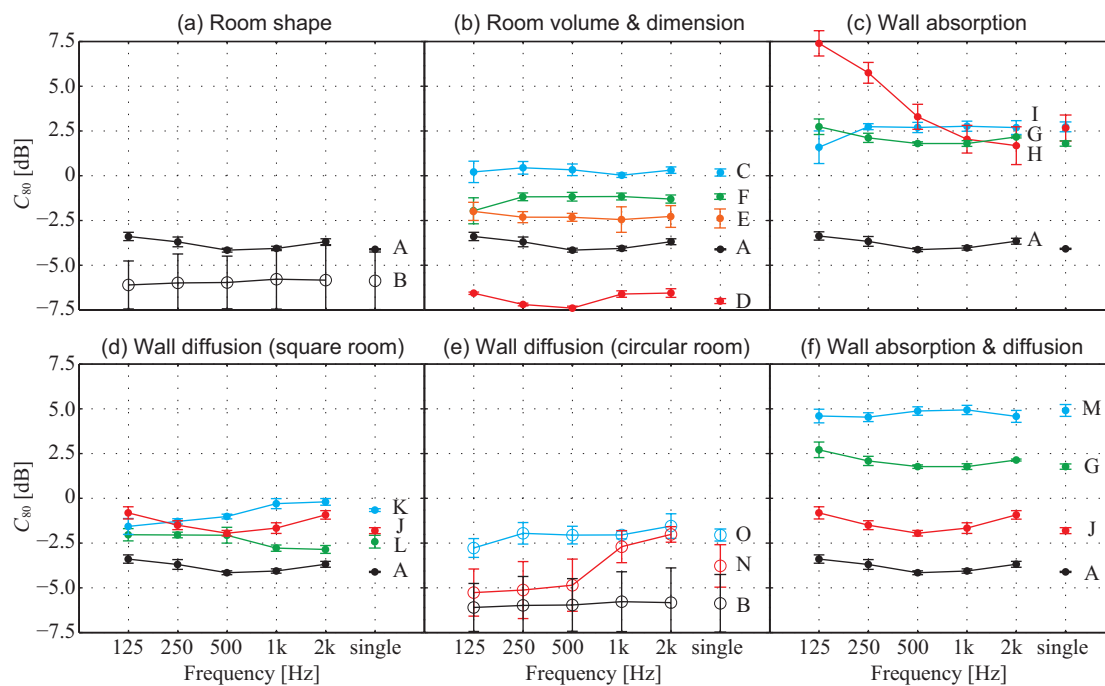
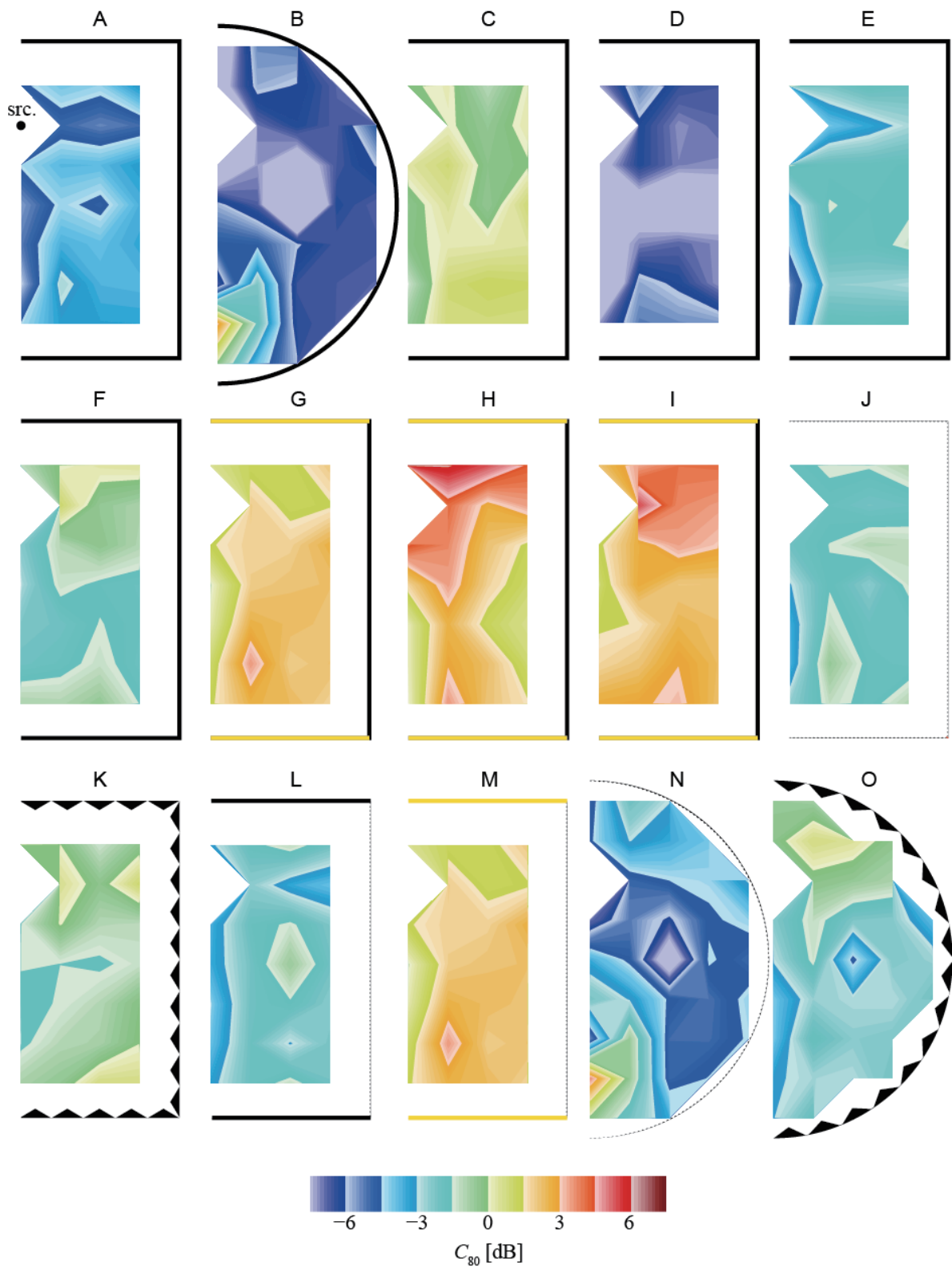


Figure 4.14 Error bars of clarity C_{80} .

Figure 4.15 Spatial distributions of clarity C_{80} .

臨界時刻の影響 明瞭性に関する指標（第 2.3.2 節）や空間印象に関する指標（第 2.3.3 節）の多くは室内インパルス応答の初期と後期を分離する時刻（臨界時刻）に依存する懸念がある．即ち，臨界時刻の直後に強い反射音が到来した場合の指標の妥当性や臨界時刻の周波数依存性について明らかでない．

ここでは後者について，第 6.2.2 節で提案する周波数特性を考慮した時刻 t_c [s] を臨界時刻として導入することを想定する．この時刻は幾何音響理論に基づき，FIR フィルターの周波数特性を考慮して反射音の粗密を分離する時刻を定式化したものである．2 次元音場における t_c は次式で与えられる．

$$t_c = \eta S / \pi c^2 \quad [\text{s}], \quad (4.1)$$

但し， S は室面積 [m^2]， c は音速 [m/s]， η はフィルターのエネルギー対ピーク比 [$1/\text{s}$] であり，帯域通過型 FIR フィルターでは中心周波数に比例する．尚，聴感による反射音の分離限界は t_c より小さくなると考えられる．

図 4.16 に正方形室（拡散体なし A / 拡散体大 K）と円形室（拡散体なし B / 拡散体大 O）における一受音点 R を対象として，臨界時刻 τ [s] を変化させて求めた C_τ [dB] を示す．尚， f_0 を中心周波数 [Hz] とするとき， $t_c \approx f_0 \times 10^{-3}$ [s] である． $\tau = 0.08$ の場合，比較的周波数特性は平坦であるが，臨界時刻として t_c を用いた場合には室条件の概ね保たれたまま，高音域ほど値が大きくなる傾向を示している．臨界時刻として t_c を用いることの妥当性は聴感印象に関する検討を待つ必要があるが，低音域に比べて高音域の明瞭性が高いという経験的な知見とは対応する．

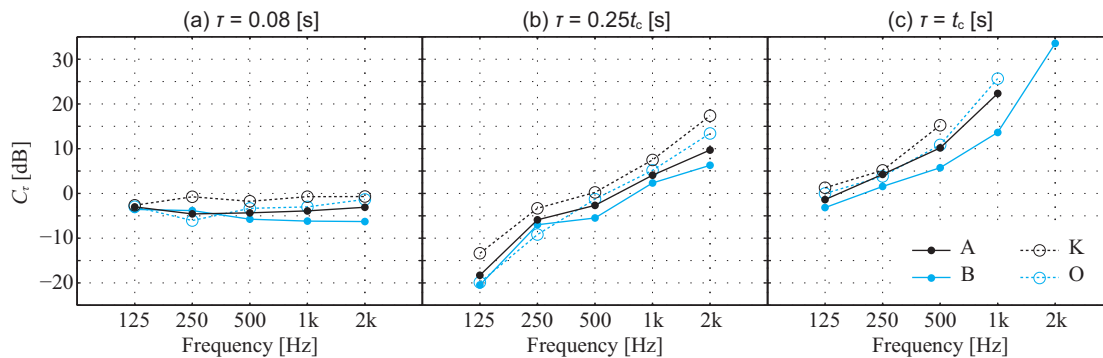


Figure 4.16 Error bars of clarity C_τ calculated with different separating time: (a) 0.08 s, (b) $0.25t_c$ s and (c) t_c s.

明瞭性に関する指標 T_S の平均値と標準偏差を図 4.17 に、空間分布を図 4.18 に示す。全体的に同じ明瞭性に関する指標である C_{80} の結果と概ね同様の傾向を示しているが、弁別閾 (just noticeable difference, JND) を考慮すると T_S の方が室条件の変化に対する感度が高いと考えられる。

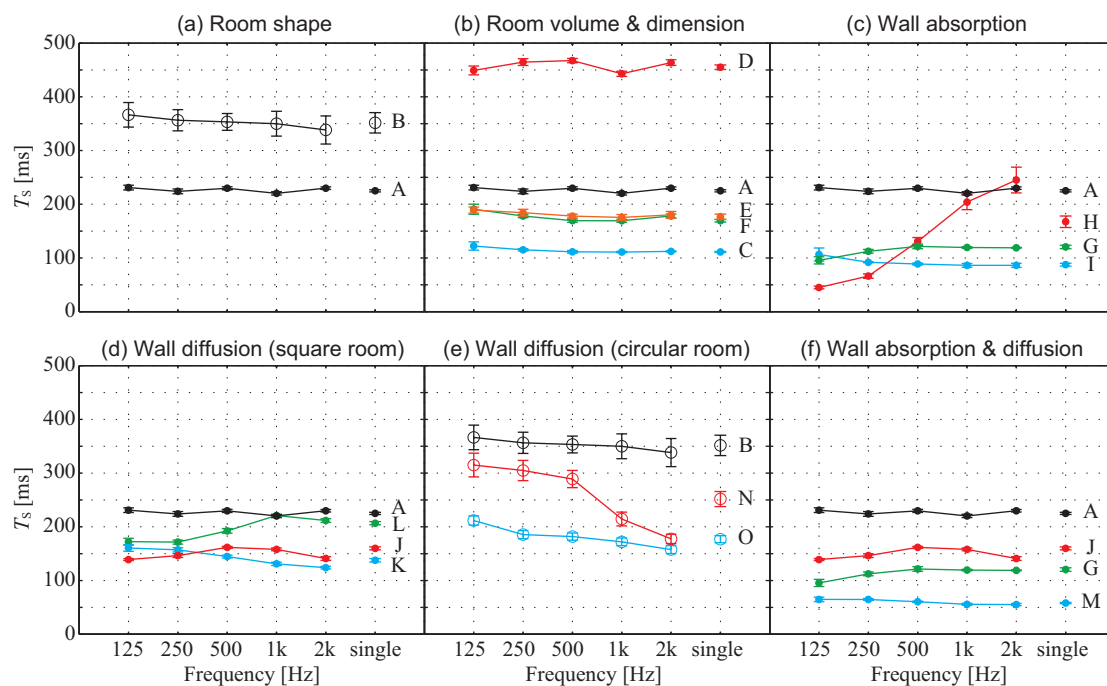
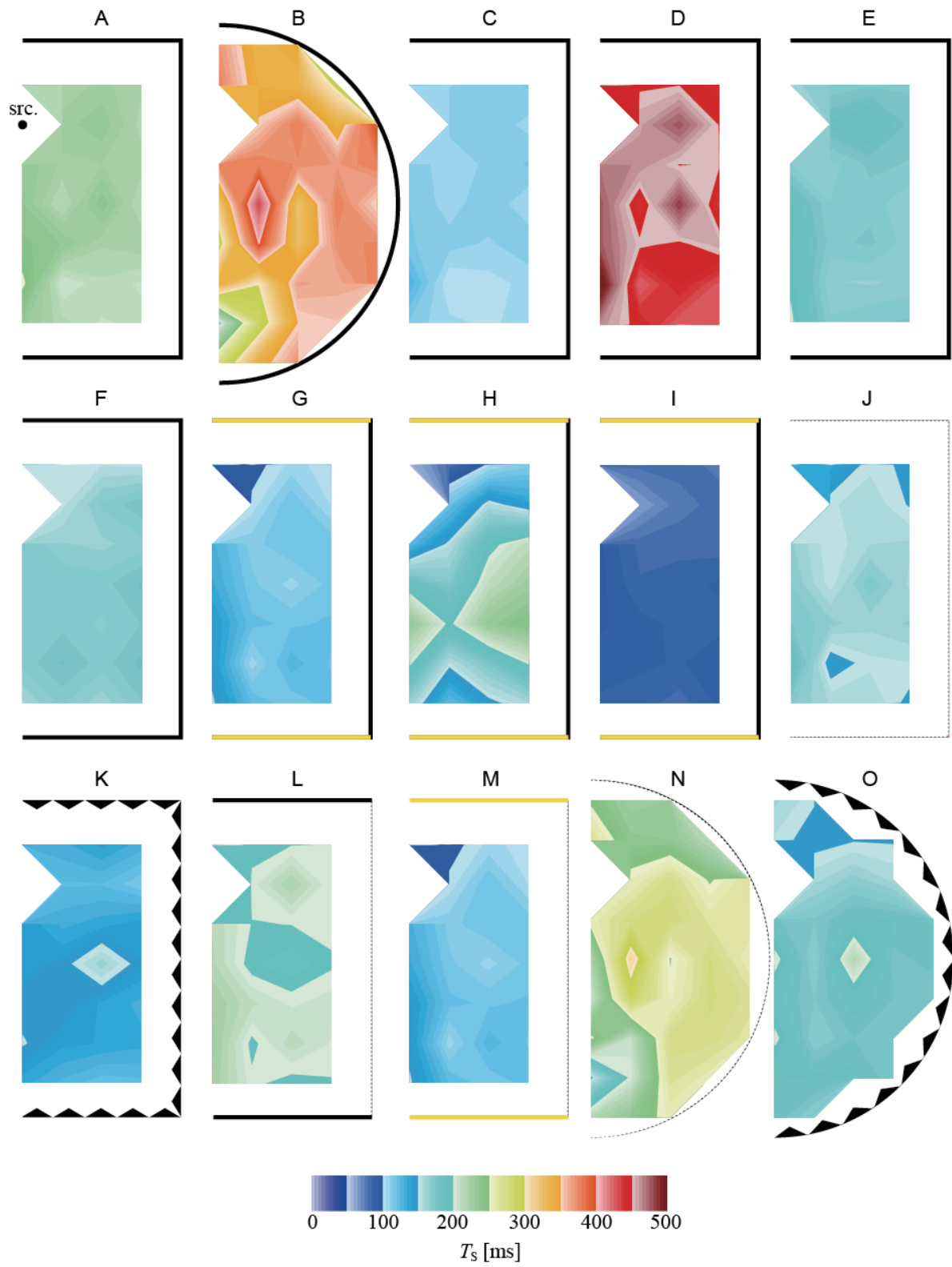


Figure 4.17 Error bars of center times T_S .

Figure 4.18 Spatial distributions of center times T_s .

4.3.3 空間的観点

みかけの音源の幅に関する指標 J_{LFC} の平均値と標準偏差を図 4.19 に，空間分布を図 4.20 に示す．

室形状の影響 円形室 (B) に比べて正方形室 (A) の値が大きい傾向が見られる．空間分布に関しては，正方形室では壁近傍の値が大きいのにに対して，円形室では逆の傾向を示している．

室寸法及び室寸法比の影響 全体的に大きな傾向は捉え難いが，室寸法が大きい室 D の値がやや小さいことがわかる．

壁面吸音の影響 全面反射性の室 A に対して吸音面が不均等な配置 (G, H, I) の場合の値は小さく，吸音面が大きいほど ($I < G < H$) 顕著である．これは， J_{LFC} の算出は受音点において音源を正面とするため，室寸法比により側方に吸音面が向くためであると考えられる．

壁面拡散の影響 正方形室の場合には拡散体の影響はあまり見られないが，拡散体を設置した場合 (J, K, L)，設置しない場合 (A) に比べてやや値が低下する傾向にある．円形室の場合には拡散体 (大) を設置した室 O では中音域で値が大きくなっている．

壁面吸音と壁面拡散の影響 平滑面の場合，均等吸音の室 A に対して不均等吸音の室 G の値が小さい．拡散体の影響により，吸音条件に関わらず乱反射率の大きい高音域で値がやや低下している．

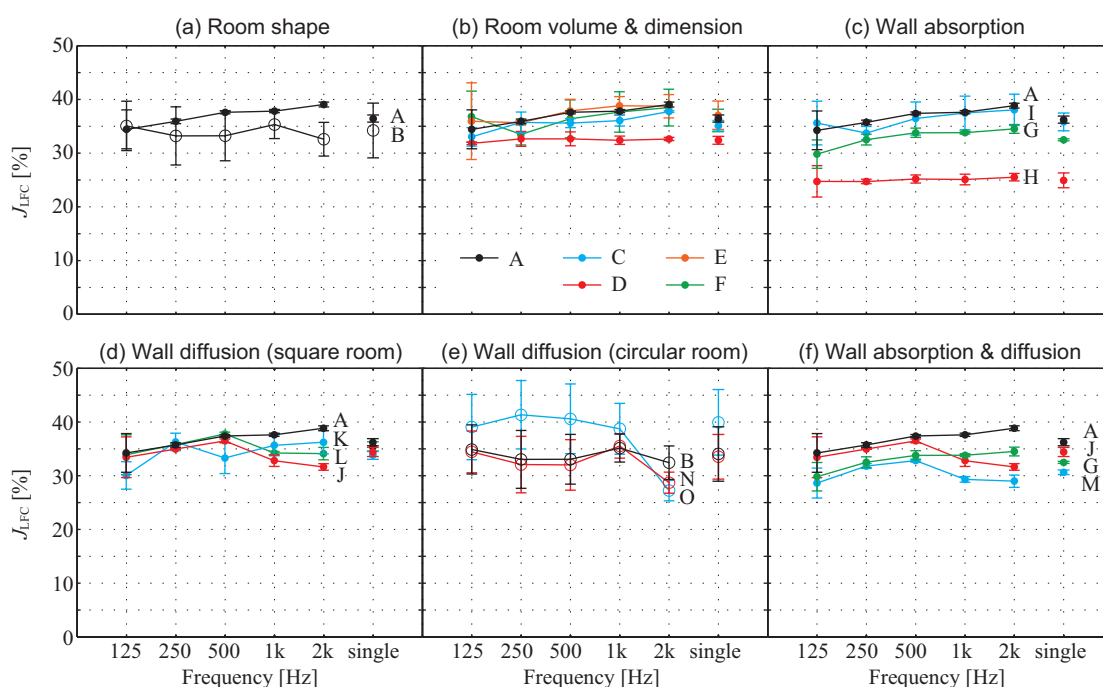
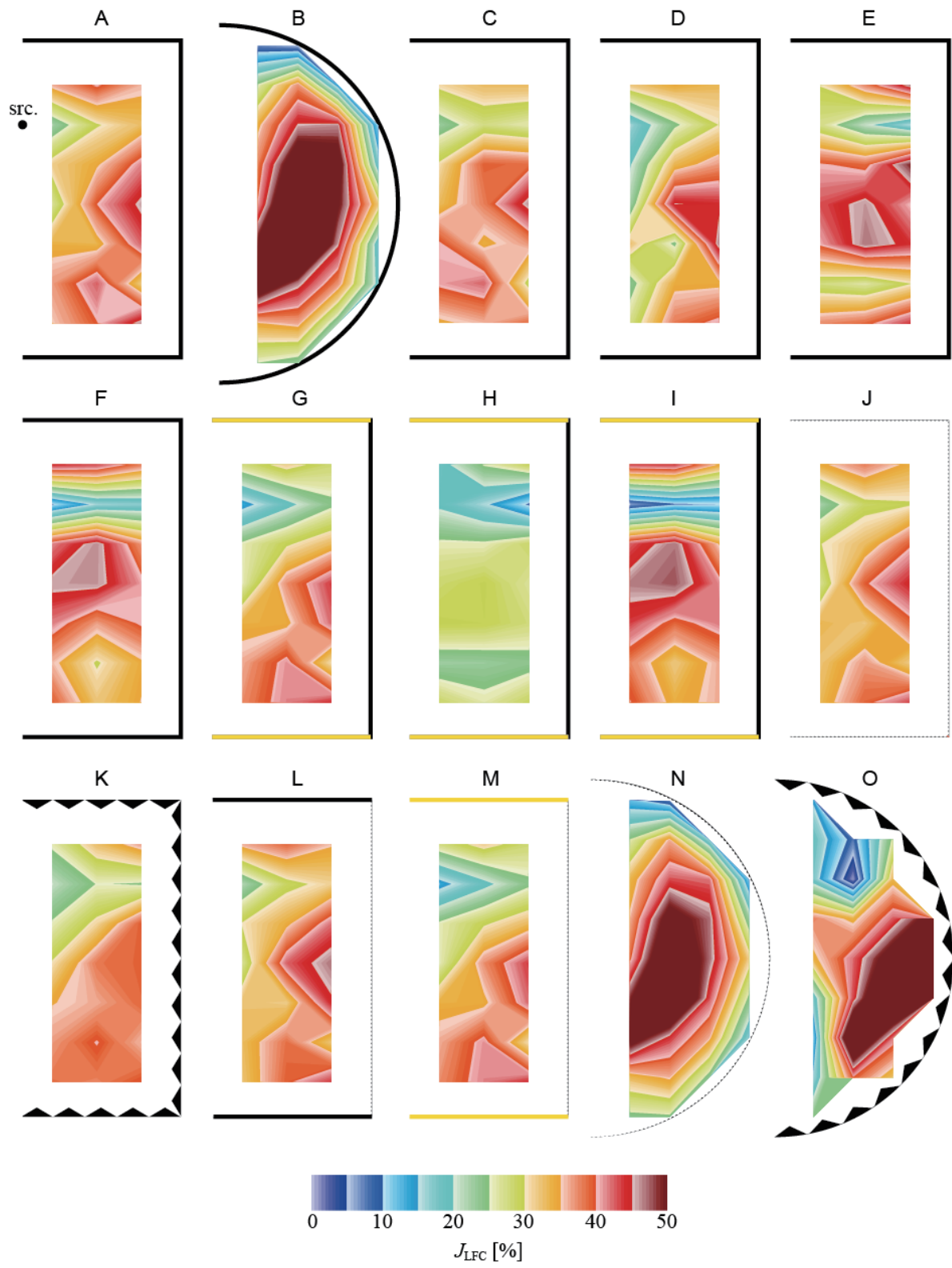


Figure 4.19 Error bars of lateral energy fractions J_{LFC} .

Figure 4.20 Spatial distributions of lateral energy fractions J_{LFC} .

4.3.4 指標間の比較

室条件が室内音響指標に及ぼす影響の程度を指標間で比較するために, JND に対する変化^[281]を求める. JND は ISO 3382-1^[36,132] (第 2.3.5 節) に基づき, T_{30} は 5 % (相対), G 及び C_{80} は 1 dB, T_S は 10 ms, J_{LFC} は 5 % とした.

図 4.21 に結果を示す. 図 4.21(e) のみ室 B に対する変化量を示しており, その他は室 A を基準としている. 全体的に室条件の変化の影響は T_{30} , C_{80} , T_S に大きく表れ, 最大で 15 段階以上の差が生じている. G は壁面吸音による影響が見られるが, 室形状や壁面拡散の影響は小さい. 以上の 4 指標は吸音材や拡散体による比較的に軽微な室仕様の変更で制御可能である一方, J_{LFC} は室条件の変化による影響が小さく, 室全体での平均値の制御は困難であると言える. 尚, 壁面拡散の影響に関しては Wang and Rathsam^[281] が行った幾何音響解析による検討結果と概ね対応している.

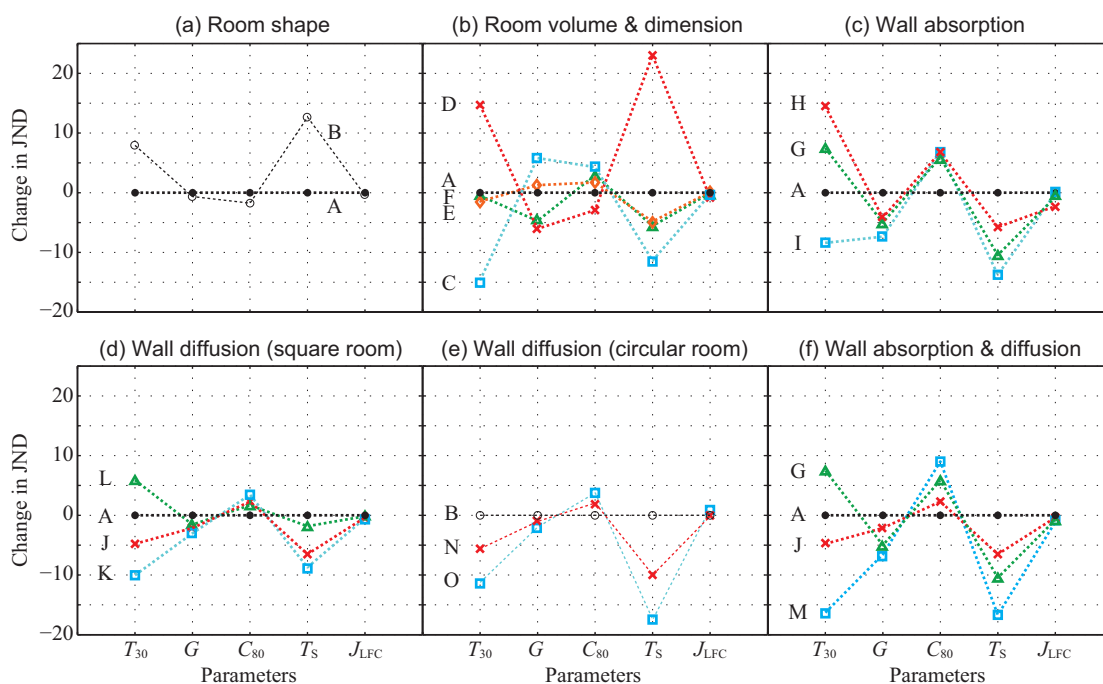


Figure 4.21 Change in room acoustic parameters across different room conditions compared to the case A (ex. figure (e)) and to the case B (figure (e)), expressed as number of JND.

4.4 音場の拡散性への影響

本節では、室条件が音場の拡散性に及ぼす影響を検討する。室条件は前節（第 4.3 節）と同様の 15 条件とする。評価は、空間的観点として空間分布の均一性及び音波の到来方向分布の一様性、周波数的観点として周波数応答関数の平坦性、時間的観点として室内インパルス応答における反射音構造の均一性に着目する。評価は主に既往の指標に基づくが、領域横断的な分析手法 [208, 290, 325, 336] を参考として時間発展的に算出し、定常状態に向かう過程を観察する。

4.4.1 空間的観点

空間分布

相対分散 NV により音響エネルギーの空間分布に関する偏在の程度を評価する。 NV は全格子点上のポテンシャルエネルギーの時間累積値に適用する。図 4.22 に結果を残響減衰曲線とともに示す。

室形状の影響 室条件に依らず、音源が放射された直後は波面の伝搬とともに値が小さくなるのがわかる。正方形室 (A) では値が収束する傾向が見られるが、円形室 (B) では波面が特定の軌跡を描くため後期で徐々に値が大きくなっている。

室寸法及び室寸法比の影響 室寸法が大きいほど ($C < A < D$)、値の低下は緩やかであるが収束値は同程度である。室が扁平形 (E, F) の場合、収束値が整形 (A, C, D) に比べてやや大きい値を示している。

壁面吸音の影響 吸音面が不均等な配置 (G, H, I) の場合、均等の場合 (A) に比べて収束値が大きい値を示しており、特に吸音面が大きい室 H で顕著である。

壁面拡散の影響 室形状に依らず、拡散体を設置した場合には後期で値が上昇する傾向が示されている。これは、拡散体の反射指向特性により微細な位相干渉が生じることに起因すると考えられ、図 4.23 に示す時刻 500 ms の累積エネルギーレベル分布にも表れている（尚、本図は図 4.6 の表示レベルを変更したものである）。但し、時刻 500 ms では円形室のエネルギー分布は拡散体の有無で明らかに異なるが、室全体での NV 値は同程度であることから評価には NV の統計的性質に留意する必要がある。室形状に依らず、通常の見聴位置を想定すると拡散体を設置した場合の均一性が高いように見られるため、設計実務上は拡散体の設置により音場の拡散性が低下すると結論付けるのではなく、評価範囲を再考することが望ましいと考えられる。また、円形室の場合には設置する拡散体の寸法が大

きいほど ($N < O$), 設置しない場合 (B) に比べて初期に見られる最小値が小さくなることとがわかる。

壁面吸音と壁面拡散の影響 吸音面の分布に依らず, 拡散体を設置した場合に類似して値が上昇するが, 最小値は均等吸音時に小さい。

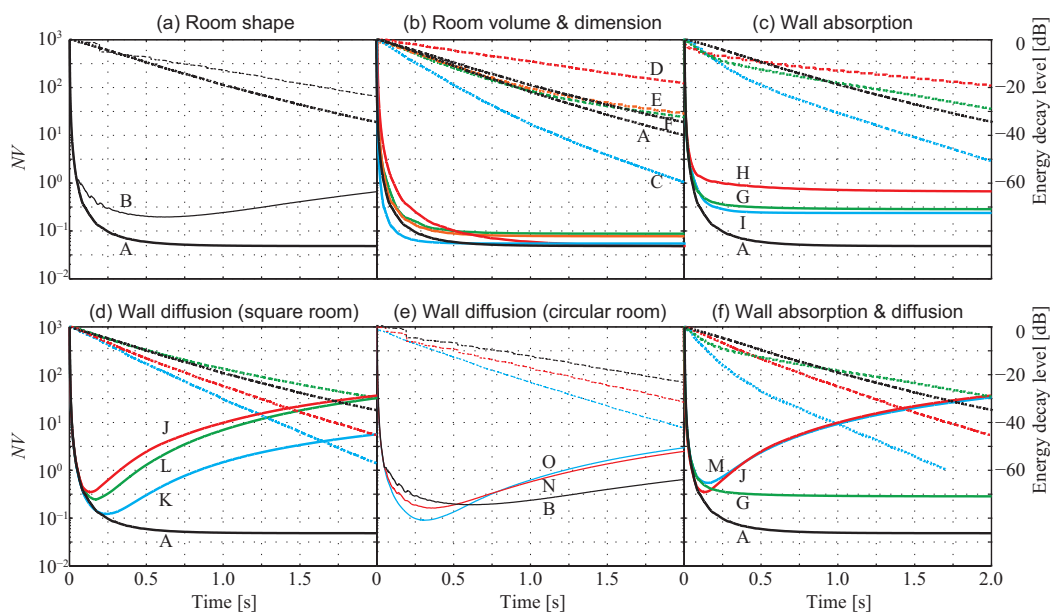


Figure 4.22 Non-uniformity for spatial distribution of sound energy.

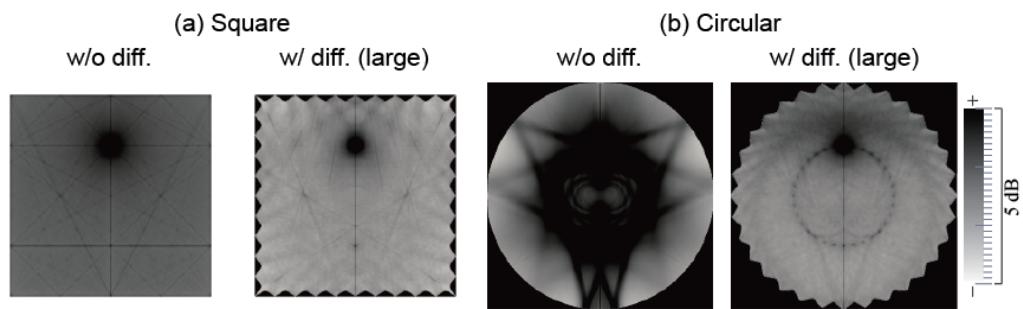


Figure 4.23 Visualization of sound propagation for accumulated sound energy at 500 ms, corresponding to Figure 4.6 with different range.

方向分布

指向拡散度 d_θ により音波の到来方向分布に関する均一性の程度を評価する． d_θ は受音点 R における瞬時音響インテンシティの時間累積値に適用する．尚，方向離散角は 5° とする．図 4.24 に結果を残響減衰曲線とともに示す．

全体的に室条件に依存する値に収束する傾向が見られる．収束値は円形に比べて矩形が大きく，吸音面が不均等な場合や室寸法比が扁平な場合に値が小さくなり，拡散体を設置した場合に大きくなる傾向が見られる等，室条件と音場の拡散性に関する既往の経験的な知見と概ね対応する結果である．

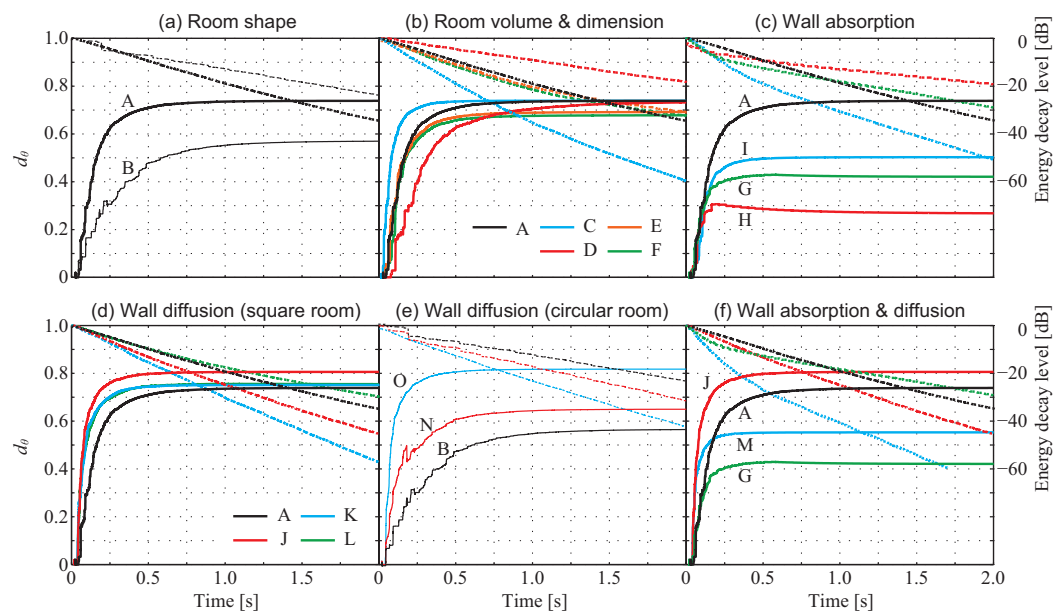


Figure 4.24 Uniformity for directivity distribution of sound energy

4.4.2 周波数的観点

周波数応答関数の二乗波形のばらつきを変動係数 (C_V) により評価する．対象周波数帯域は 125 Hz の 1/1 オクターブバンド下限周波数から 2 kHz 帯域の上限周波数までとし，受音点 R における室内インパルス応答を対象として時刻 0 を始端として 10 ms 毎に時間窓を広げることで時間発展的に C_V を算出する．尚，Gaussian 関数を用いているため，音源の周波数特性が平坦でないことに留意されたい．図 4.25 に結果を残響減衰曲線とともに示す．

全体的に空間的観点として示した NV 及び d_θ や後述する時間的観点の結果と比べて変動が大きい．比較的に室条件の影響が読み取りにくい，吸音面が不均等な場合や拡散体を設置した場合に後期で値が上昇する傾向が見られる．拡散体の乱反射率や平行壁の反射性状に周波数特性があることに起因すると考えられる．

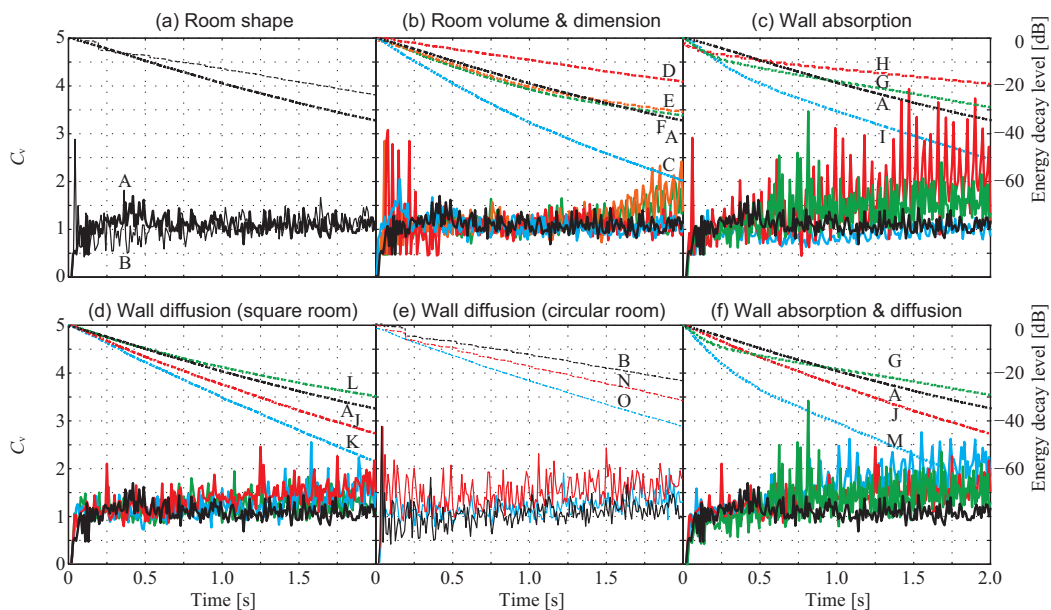


Figure 4.25 Coefficients of variation (C_V) of squared frequency response functions.

4.4.3 時間的観点

室内インパルス応答の反射音構造の変動性により音場の拡散性に関する時間的側面を評価するために、第 6 章で述べる減衰率比の変動係数 (C_v) を算出する。減衰率比の算出には残響減衰曲線の非線形回帰曲線 (第 6.3.3 節) を用いることとし、評価区間は 0 dB から -60 dB とする。図 4.26 に結果を残響減衰曲線とともに示す。

多くの室条件では、時々刻々と値が減少する傾向が見られ、反射音密度が高まっていくことと対応する。但し、円形室 (A) や吸音面が不均等な条件 (H, M) では不規則変動が見られ、必ずしも経過とともに拡散性が向上していない。室寸法が小さいほど ($C < A < D$) 値が低下しているが、室寸法比の影響はあまり見られない。吸音面が不均等な場合には吸音面が大きいほど ($I < G < H$) 値が大きくなっている。拡散体の影響は矩形室では小さいが、円形室では値が小さくなっており、特に拡散体 (大) を設置した室 O で顕著である。矩形室であっても吸音面が不均等な場合には拡散体を設置することにより (M)、拡散体なしの室 G や均等吸音の室 A と比べて初期における値の減少が速やかとなるが、後期で値が増大している。このことから、室 M では後期に相対的に強い反射音が離散的に到来していると考えられるが、 C_v が増加を始める時刻では約 30 dB 減衰しているため、フラッターエコー等は検知されないと推察される。

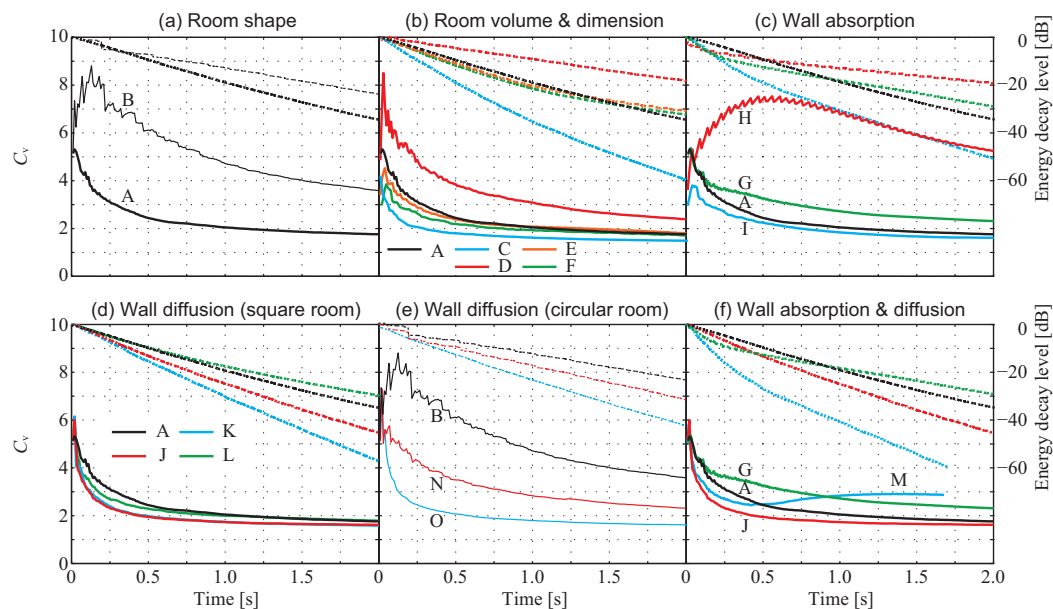


Figure 4.26 Coefficients of variation (C_v) of slope ratios.

4.5 結言

本章では、室条件が音響特性に及ぼす基礎的影響に関する知見を得るために、音響伝搬性状、室内音響指標、音場の拡散性に着目して同一の室条件を設定した検討を2次元FDTD法解析を用いて行った。音響伝搬性状については、室内インパルス応答波形の算出や、音圧等の空間分布及び音波の到来方向分布に関する様々な可視化を行い、室形状及び拡散体が及ぼす影響を観察した。室内音響指標については、表す聴感印象（時間的・エネルギー的・空間的観点及びそれらの周波数特性）や算出処理の特徴（臨界時刻の要不要、指向性受音等）が異なる指標を選択して求め、指標の空間分布や聴感印象に室条件が及ぼす影響に関して検討した。音場の拡散性については、空間・周波数・時間の各領域に関して主に既往の指標に基づくものの、領域横断的な分析方法を提案して行った結果、各領域で概ね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評価の可能性が示唆された。このことを受け、第6章では室内インパルス応答の反射音構造分析に基づく音場の拡散性に関する効率的な評価の可能性について検討を行う。

以下に、本章の検討で得られた主要な知見を室条件毎に整理する。尚、本検討はあくまでも2次元音場を対象としたものであり、例えば室内音響指標においてはISO 3382-1^[132]で示されている typical range を外れることが散見されたが、異なる室条件の相対的な傾向の変化については設計実務における有効な知見となることと期待している。

室形状の影響 正方形室については、室内インパルス応答が比較的に滑らかに減衰し、音圧等の空間分布や音波の到来方向分布、仮想音源分布のいずれもが均一であった。室内音響指標は、指標に依らず周波数特性が平坦であり、空間偏差が小さかった。円形室については、室内インパルス応答に周期的な反射音が到来していること、波面の収縮と拡大を繰り返し周期的な軌跡を描くこと、仮想音源のパワーが偏在していることがわかり、いずれも相互に対応する結果が示された。音場の拡散性は正方形室に比べ評価領域に依らず概ね低いことがわかった。

室寸法及び室寸法比の影響 室寸法が大きいほど、室内音響指標については T_{30} や T_S は大きくなり、 C_{80} や G は小さくなり、 J_{LFC} はあまり変化は表れなかった。音場の拡散性については評価領域に依らず概ね低くなった。室が扁平形である場合、整形に比べ、 T_{30} は同程度であったが、 C_{80} と T_S はどちらも明瞭性がやや高い側に変化した。音場の拡散性に関しては室寸法比の影響はあまり見られなかった。

壁面吸音の影響 吸音分布が不均等な場合、減衰率の低い反射性壁間の往復反射によって均等な場合に比べて T_{30} が大きくなり、反射性壁の寸法に応じた周波数特性が表れた。従って、吸音力が増加しているにもかかわらず T_{30} が増加し得ることが示され、設計時には吸音面配置に留意する必要があると言える。また、 T_{30} の増大とともに C_{80} や T_S が不明

瞭側に变化し、 G に関しては吸音の増加によって小さくなった。 J_{LFC} は吸音面が偏在することで小さくなり、吸音面が大きいほど顕著であった。音場の拡散性については、吸音分布が不均等な場合、評価領域に依らず低下した。

壁面拡散の影響 拡散体を設置した場合、均等吸音の正方形室では顕著な変化が見られなかったが、不均等吸音時の正方形室や円形室では T_{30} の抑制、 C_{80} や T_S の明瞭側への変化など、望ましい側への効果が示された。拡散体が室内音響特性に及ぼす影響は、室形状や吸音分布等の他の室条件に強く依存することが明らかとなり、他の室条件との相互作用を考慮した設計が望まれる。拡散体が室内音響指標に及ぼす影響としては残響時間 T_{30} に顕著に表れ、幾何音響解析による Wang and Rathsam の知見と対応する結果であった。音場の拡散性に関しては、拡散体の設置によって必ずしも向上する結果とはならなかった。但し、音響伝搬の可視化を行った結果、拡散体により空間全体の均一性は向上していることが見受けられ、一部の指標で見られた拡散性の低下は波面の微細な干渉縞が生じることに起因することが明らかとなり、受聴環境や評価指標の統計的性質に留意した評価を行うことでより実地的な知見が得られることが示唆された。

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

5.1 緒言

拡散音場の仮定が厳密に成立する室は現実には存在せず，一部の大きな空間等で近似的に成立するのみである（第 2.5 節）．従って，拡散音場の仮定に基づく Sabine 式^[227] や Eyring 式^[85] 等の古典的残響式の適用は限定的であり，例えば吸音が偏在した矩形室では，特に中高音域で誤評価が生じることが知られている^[286]．室形状や吸音分布を考慮した残響式は Fitzroy 式^[91] を端緒として提案されてきたが，近年，Sakuma^[230] により乱反射率を導入することで壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論が定式化された．この理論は壁面拡散だけでなく周波数特性が考慮されているため，非拡散音場の室内残響に関する簡易予測精度を向上させるものとして設計段階への利用が期待される．

本章では，壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論の適用性に関する検証を主に以下の観点から行う．

1. 入射角度依存の吸音率・乱反射率の与え方
2. Hirata 理論^[115] に対する修正の影響：臨界角の定義，吸音率の平均方法，エネルギーの規準化係数の導入
3. 各鏡面反射場の単一指数減衰の仮定の影響
4. 鏡面・拡散反射場の可逆性の影響
5. 室稜線による端部散乱の影響

1. のうち吸音率に関しては局所作用を仮定して理論的に考察し，乱反射率に関しては数値解析で求めた値を導入する．その他の項目に関しては，数値解析によるケーススタディを通じて結果の対応を考察する．4. 及び 5. は理論では考慮していない現象であり，特に波

動場への適用時の課題になると考えられる．ケーススタディは幾何音響解析及び波動音響解析により行い，室条件として室寸法比，吸音分布，壁面拡散の程度を変化させる．

5.2 理論的考察 ^[230]

本節では，第一に基本的な室条件を設定して壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論に基づくエネルギー減衰の傾向を観察し，第二に，平均自由行路の近似方法及び入射角度依存の吸音率の推定方法に関して理論的に考察する．

5.2.1 ケーススタディ

壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論に基づき，矩形室のアスペクト比，吸音分布及び壁面の乱反射率が残響に及ぼす影響を調べる．表 5.1 の通り，室容積 1000 m^3 ，吸音面積 210 m^2 を一定として，アスペクト比と吸音率の異なる 4 種の室を想定する．ここで，吸音率・乱反射率の入射角度依存性はなく，乱反射率は室内全面で一様とする．Sabine 式では残響時間は全て 0.77 s ，Eyring 式では Case 1a/b で 0.62 s ，Case 2a/b で 0.65 s となる．以降，エネルギー密度レベルは $L_0 = 10 \log_{10}(W/c) [\text{dB}]$ で相対化し，各音源群の鏡面反射場と拡散反射場とそれらの合計を算出し，減衰曲線を描く．

Table 5.1 Conditions of rectangular rooms.

Case	$L_x [\text{m}]$	$L_y [\text{m}]$	$L_z [\text{m}]$	α_x^\pm	α_y^\pm	α_z^\pm	Ratio α/L
1a	10	10	10	0.35	0.35	0.35	1:1:1
1b	10	10	10	0.15	0.30	0.60	1:2:4
2a	20	10	5	0.30	0.30	0.30	1:2:4
2b	20	10	5	0.10	0.20	0.40	1:4:16

結果と考察 図 5.1 に Case 1b，Case 2b における各成分の減衰曲線を示す（乱反射率 0.1, 500 Hz 及び 2 kHz）．各音源群の鏡面反射場は直線であるのに対して，拡散反射場は湾曲が生じている．周波数の影響として，軸，面近傍音源群の寄与が低域側で比較的大きく，それに伴い全体の減衰曲線の湾曲が特に Case 2b で顕著となっている．

図 5.2 に全ケースの 500 Hz において乱反射率を 0.05 から 0.8 まで変化させた場合の減衰曲線を示す．立方体・均等吸音の Case 1a では，乱反射率が全体減衰に及ぼす影響は見られないが，それ以外の場合は顕著に表れている．乱反射率の増加に伴い，鏡面反射成分は急速に減衰し，全体減衰の湾曲が抑制されている．しかし，乱反射率が 0.4 から 0.8 の変化は全ケースで殆ど影響が生じないことがわかる．

図 5.2 の減衰曲線における鏡面・拡散エネルギーの全体割合の時間推移を図 5.4 に示す．

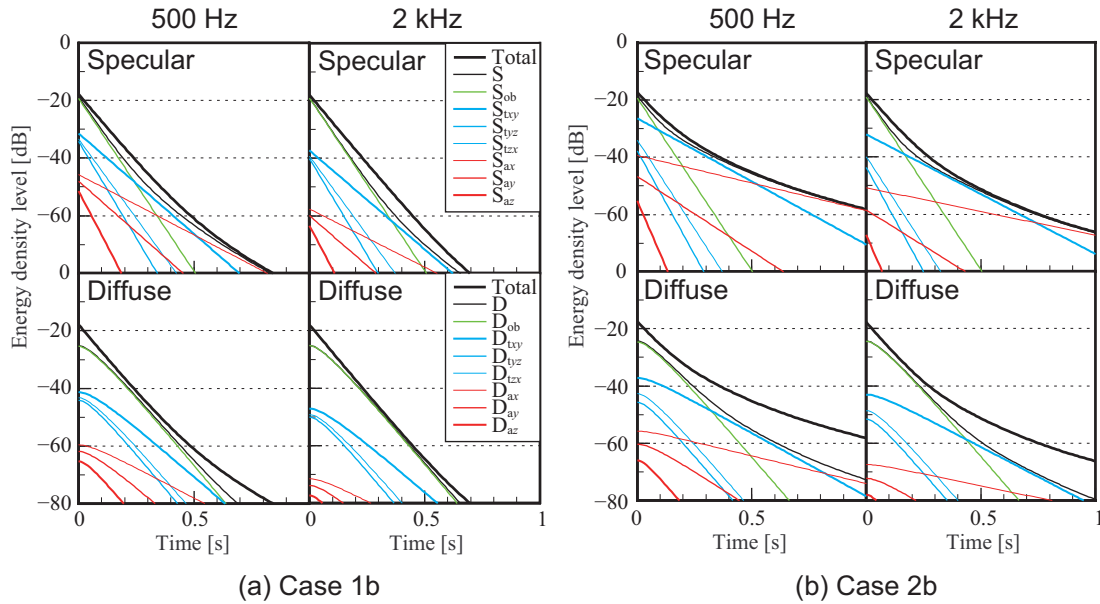


Figure 5.1 Energy decay of specular, diffuse and total fields, with a scattering coefficient of 0.1: (a) Case 1b, (b) Case 2b. Abbreviations: specular/diffuse fields in subtotal (S/D), of oblique sources (Sob/Dob), of xy-tangential sources (Stxy/Dtxy), of x-axial sources (Sax/Dax).

音源停止時の鏡面・拡散エネルギーの割合は乱反射率に依存し，今回の等吸音面積のケースに依らないことが確認できる．鏡面反射場の各成分に着目すると，音源停止時は3次元成分が支配的であり，式 (2.119) の近似を裏付けている．後期減衰に関しては，乱反射率がある値以下の場合，1次元鏡面エネルギー比の増加に伴い，拡散エネルギー比は非ゼロ値に収束することが確認できる．この傾向は $\hat{A}_r > \hat{B}_{ax}$ の条件下で成り立つ式 (2.120) に合致する．

図 5.3 に乱反射率を 0.05 から 0.8 まで変化させた場合の残響時間 T_{30} (−5 dB to −35 dB (回帰なし)，500 Hz 及び 2 kHz) を示す．参考として，Sabine，Eyring，Fitzroy，Arau-Puchades の理論値を併記する．乱反射率が 0.4 以上の場合，全ケースで推定値は Eyring 値とほぼ等しい．乱反射率が 0.05 の場合，Case 1b と Case 2a では Eyring 値より 5 % から 30 % の若干の増加が見られるのに対して，Case 2b では 2 倍から 3 倍の大幅な増加となり，Fitzroy 値もかなり上回っている．現時点での理論では壁端部からの散乱を考慮しておらず，低音域ではその影響として鏡面反射場の残響がある程度抑制されるものと予想される．従って，残響時間の推定値は乱反射率がかなり低い場合に過大評価されているものと考えられる．

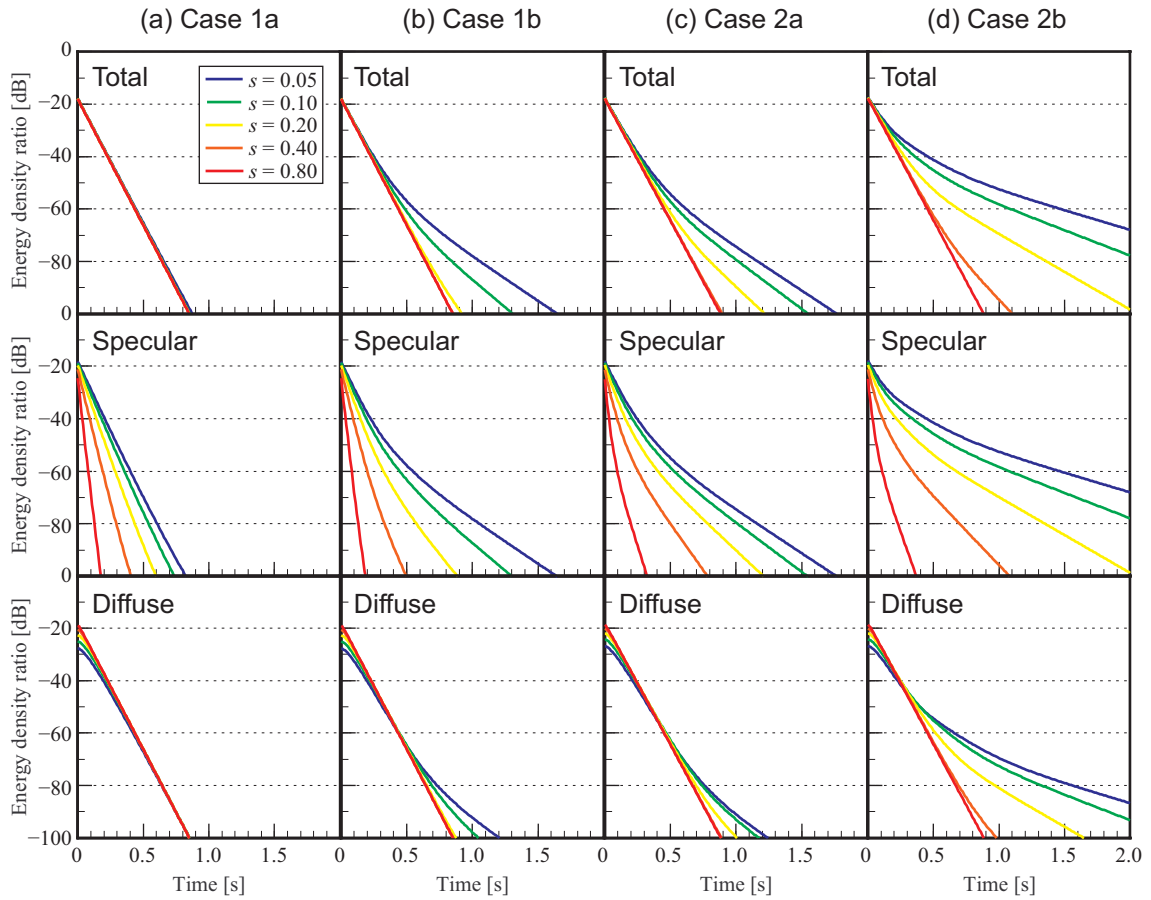


Figure 5.2 Energy decay of specular, diffuse and total fields at 500 Hz, with changing the scattering coefficient from 0.05 to 0.8.

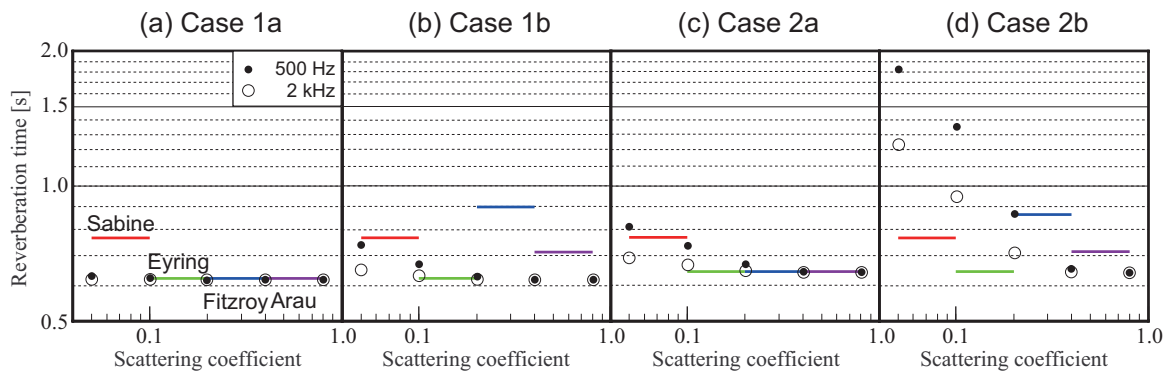


Figure 5.3 Reverberation times T_{30} (-5 to -35 dB) at 500 Hz and 2 kHz, with changing the scattering coefficient from 0.05 to 0.8. Four types lines represent theoretical values by Sabine, Eyring, Fitzroy and Arau-Puchades.

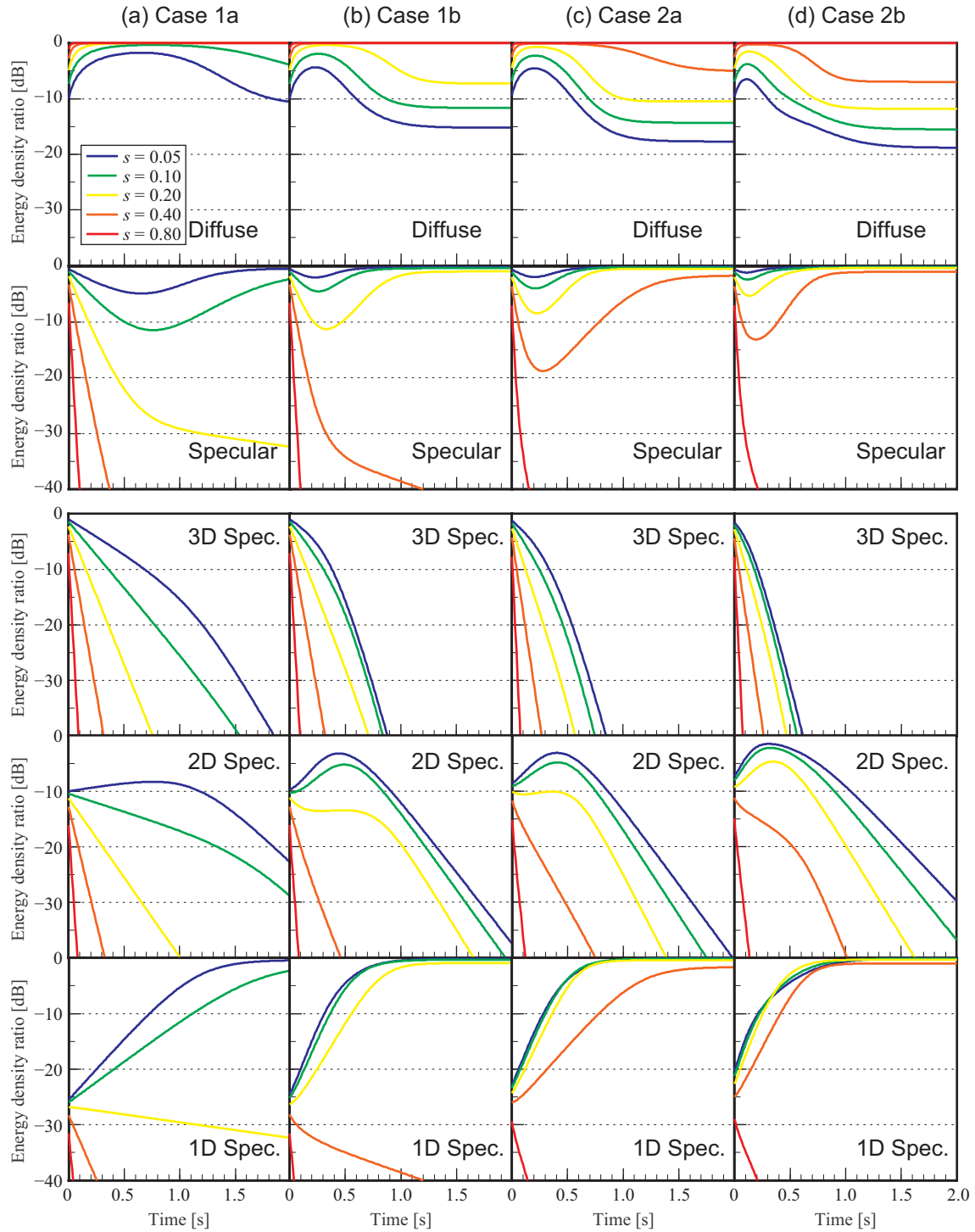


Figure 5.4 Transient proportion of specular and diffuse to the total energy at 500 Hz, with changing the scattering coefficient from 0.05 to 0.8.

5.2.2 鏡面反射場における平均自由行路の近似

平均自由行路 [21, 123, 153] は、音速に対する平均反射頻度の比の逆数であり、鏡像音源の鏡面反射場が考慮されている。全鏡像音源による 3 次元的な平均反射頻度は次式で表される。

$$\bar{n}_{xyz} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (n_x + n_y + n_z) \sin \theta d\theta d\phi = \frac{cS}{4V} [1/s], \quad (5.1)$$

但し、 $n_x = c|\sin \theta \cos \phi|/L_x [1/s]$ 、 $n_y = c|\sin \theta \sin \phi|/L_y [1/s]$ 、 $n_z = c|\cos \theta|/L_z [1/s]$ であり、鏡面反射場における平均自由行路は拡散音場における値と等しく $l_r = 4V/S [m]$ とした。式 (5.1) から軸近傍音源群と面近傍音源群の寄与を除くと、斜方向音源群の平均反射頻度が次式で表される。

$$\begin{aligned} \bar{n}_{ob} &= \frac{\bar{n}_{xyz} - \sum_{xy}(\bar{n}_{txy} + \bar{n}_{tz}) \frac{2\pi(2\theta_z)}{4\pi} + \sum_x(\bar{n}_{ax} + \bar{n}_{axy} + \bar{n}_{axz}) \frac{2(2\theta_y)(2\theta_z)}{4\pi}}{1 - \sum_{xy} \frac{2\pi(2\theta_z)}{4\pi} + \sum_x \frac{2(2\theta_y)(2\theta_z)}{4\pi}} \\ &\approx \bar{n}_{xyz} \frac{1 - \frac{2cL}{\omega S}}{1 - \frac{\pi cS}{4\omega V}} [1/s], \end{aligned} \quad (5.2)$$

但し、 $\theta_{x(y,z)}$ は臨界角 [rad]、 \bar{n}_{ax} 、 \bar{n}_{axy} は x 軸近傍音源に関する値、 \bar{n}_{txy} 、 \bar{n}_{tz} は xy 面近傍音源に関する値（第 2.4.2 節内「軸近傍音源群の鏡面反射場」及び「面近傍音源群の鏡面反射場」参照）。従って、斜方向音源群の平均自由行路は次式で近似される。

$$l_{ob} \approx \frac{4V - \pi cS/\omega}{S - 2cL/\omega} < l_r [m]. \quad (5.3)$$

ここで、大空間における中高音域では $l_{ob} \approx l_r$ とさらに近似される。

同様に、軸近傍音源群を除く面近傍音源群による 2 次元的な平均反射頻度は次式で表される。

$$\begin{aligned} \bar{n}_{txy} &= \frac{\bar{n}_{xy} - (\bar{n}_{ax} + \bar{n}_{ay}) \frac{2\theta_y}{2\pi} - (\bar{n}_{ay} + \bar{n}_{ayx}) \frac{2\theta_x}{2\pi}}{1 - \frac{2\theta_y}{2\pi} - \frac{2\theta_x}{2\pi}} \\ &\approx \bar{n}_{xy} \frac{1 - \frac{\pi c}{2\omega} \frac{1}{L_x + L_y}}{1 - \frac{c}{2\omega} \frac{L_x + L_y}{L_x L_y}} [1/s], \end{aligned} \quad (5.4)$$

但し、 $\bar{n}_{xy} = c/l_{xy} = 2c(L_x + L_y)/\pi L_x L_y$ 。従って、平均自由行路は次式で近似される。

$$l_{txy} \approx \frac{\pi L_x L_y - \pi c(L_x + L_y)/2\omega}{2(L_x + L_y) - \pi c/\omega} < l_{xy} [m], \quad (5.5)$$

ここで同様に、 $l_{txy} \approx l_{xy}$ とさらに近似される。

5.2.3 垂直・擦過入射吸音率の推定

壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論では、吸音率として乱入射値に加えて垂直・擦過入射の値を必要とする。ここで擦過入射とは周波数と壁面寸法に依存する臨界角から水平角までの範囲を意味するため、吸音率の与え方が大きな課題となる。壁面の局所作用を仮定した場合の垂直・擦過入射吸音率の推定方法について理論的に考察する。

壁面の局所作用を仮定した場合、斜入射吸音率は垂直入射音響インピーダンス比 ($z_n = r_n + jx_n$ [Pa·s/m]) より次式で表される (式 (3.23) の再掲)。

$$\alpha_\theta = \frac{4r_n \cos \theta}{(r_n \cos \theta + 1)^2 + (x_n \cos \theta)^2}, \quad (5.6)$$

また、上式に対する全方向の統計平均により、乱入射吸音率は次式で表される [205] (式 (3.25) の再掲)。

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_r &= \frac{\int_0^{\pi/2} \alpha_\theta \cos \theta \sin \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta} \\ &= \frac{8r_n}{r_n^2 + x_n^2} \left\{ 1 + \frac{r_n^2 - x_n^2}{x_n(r_n^2 + x_n^2)} \tan^{-1} \left(\frac{x_n}{1 + r_n} \right) - \frac{r_n}{r_n^2 + x_n^2} \ln[(1 + r_n)^2 + x_n^2] \right\}. \end{aligned} \quad (5.7)$$

同様に、平均化の範囲を 0 から臨界角 θ_c までに限定すると、垂直入射吸音率は次式で表される。

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_n &= \frac{8r_n}{(r_n^2 + x_n^2)} \left\{ 1 - \cos \theta_c + \frac{r_n^2 + x_n^2}{x_n(r_n^2 + x_n^2)} \right. \\ &\quad \times \tan^{-1} \left[\frac{x_n(1 - \cos \theta_c)}{(1 + r_n)(1 + r_n \cos \theta_c) + x_n^2 \cos \theta_c} \right] - \frac{r_n}{r_n^2 + x_n^2} \ln \left[\frac{(1 + r_n)^2 + x_n^2}{(1 + r_n \cos \theta_c)^2 + (x_n \cos \theta_c)^2} \right] \left. \right\}. \end{aligned} \quad (5.8)$$

式 (5.6) は垂直近傍での入射角度依存性が小さいため、 θ_c が小さい場合、式 (5.8) は本来の垂直入射吸音率に近似する。

$$\bar{\alpha}_n \approx \alpha_n = \frac{4r_n}{(r_n + 1)^2 + x_n^2}, \quad (5.9)$$

従って、臨界角に依らず、本来の垂直入射吸音率を使用可能である。

一方、平均化の範囲を $\pi/2 - \theta_c$ から $\pi/2$ までに限定すると、軸近傍音源群と面近傍音

源群に関する擦過入射吸音率は次式で表される．

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_g = \frac{8r_n}{(r_n^2 + x_n^2) \sin^2 \theta_c} & \left\{ \sin \theta_c + \frac{r_n^2 - x_n^2}{x_n(r_n^2 + x_n^2)} \right. \\ & \times \tan^{-1} \left(\frac{x_n \sin \theta_c}{1 + r_n \sin \theta_c} \right) - \frac{r_n}{r_n^2 + x_n^2} \ln [(1 + r_n \sin \theta_c)^2 + (x_n \sin \theta_c)^2] \left. \right\}. \end{aligned} \quad (5.10)$$

θ_c が小さい場合， $|x_n| \theta_c \ll 1 + r_n \theta_c$ が成り立ち，式 (5.10) は次式のように近似される．

$$\bar{\alpha}_g \approx \frac{8r_n^2}{(r_n^2 + x_n^2) \theta_c^2} \left\{ \frac{[2r_n + (r_n^2 + x_n^2) \theta_c] \theta_c}{1 + r_n \theta_c} - \ln [(1 + r_n \theta_c)^2 + (x_n \theta_c)^2] \right\}. \quad (5.11)$$

さらに，実インピーダンスを仮定した場合 ($x_n = 0$)，

$$\bar{\alpha}_g \approx \frac{8}{r_n \theta_c} \left[1 + \frac{1}{1 + r_n \theta_c} - \frac{2}{r_n \theta_c} \ln(1 + r_n \theta_c) \right]. \quad (5.12)$$

ここで，両極端の条件において， $\bar{\alpha}_g \approx 8/r_n \theta_c$ ($r_n \theta_c \gg 1$) 及び $\bar{\alpha}_g \approx (8/3)r_n \theta_c - 4(r_n \theta_c)^2$ ($r_n \theta_c \ll 1$) となる．擦過入射吸音率は臨界角に依存するため推定が困難であるが，垂直入射吸音率が与えられた場合には式 (5.12) により概算可能である．

5.3 幾何音響解析による壁面拡散のない室内の残響に関する検討

壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論は鏡像法に基づいた近似理論である。鏡像法は音源の分布方法について2種に大別できる。一方は、離散分布音源を仮定する一般的に用いられる方法であり、他方は離散的な音源を室内一様に平滑化した連続分布音源を仮定する方法であり、イメージ拡散法^[302,303]と称されることがある。

近似理論は連続分布音源を仮定した鏡像法を基礎として、臨界角を導入することで音源を7種に区分し、各々単一の指数減衰を仮定して導かれたものである。理論ではモード理論との整合が意図されているため、室寸法と周波数に依存する臨界角の導入及びエネルギーの規準化係数の導入により、鏡像法を基礎としていながらも音波の波動性が一部考慮されている。

本節から次節（第5.4節）にかけて、幾何音響解析との比較を通じて理論の近似精度について検討する。その際、壁面拡散のない室内の残響については鏡像法を、壁面拡散のある室内の残響については音線法を用いる。鏡面反射場に関する検討では、離散分布音源を仮定した鏡像法により各鏡像音源の減衰率分布及び相対エネルギー分布を観察することで減衰性状に関する考察を行う。また、連続分布音源を仮定した鏡像法により臨界角に関する考察を行う。さらに、予備的な検討として、2種の音源を仮定した鏡像法で算出した減衰曲線を比較することで、離散分布音源を仮定した鏡像法解析については音源位置の影響を、連続分布音源を仮定した鏡像法解析については角度離散化幅と収束性の関係を相互に考察する。

5.3.1 検討方法

室容積 $1,000 \text{ m}^3$ 、吸音面積 210 m^2 の矩形室に対して、アスペクト比と吸音分布が均等、不均等となる4条件を設定する（表5.2）。尚、吸音率は入射角度に依存しないものとする。拡散音場を仮定した場合の残響時間は、Sabine式では全条件で 0.77 s 、Eyring式では 0.62 s （Case 1a/b）、 0.65 s （Case 2a/b）である。

Table 5.2 Conditions of rectangular rooms (identical to Table 5.1).

Case	L_x [m]	L_y [m]	L_z [m]	α_x^\pm	α_y^\pm	α_z^\pm	Ratio α/L
1a	10	10	10	0.35	0.35	0.35	1:1:1
1b	10	10	10	0.15	0.30	0.60	1:2:4
2a	20	10	5	0.30	0.30	0.30	1:2:4
2b	20	10	5	0.10	0.20	0.40	1:4:16

離散分布音源を仮定した鏡像法

図 5.5 に示すように，直方体室 ($L_x \times L_y \times L_z$ [m³]) の中心 O に出力 W [W] の点音源と受音点を設置する． $x(y,z)$ 軸に垂直な 2 壁面を $x(y,z)$ 方向壁面と称し，各方向壁面の平均吸音率を $\alpha_{x(y,z)}^\pm$ ，反射回数を $n_{x(y,z)}^\pm$ とすると，受音点における音響エネルギー密度は次式で表される [163]．

$$E(t) = \sum_{n_x^\pm=-\infty}^{\infty} \sum_{n_y^\pm=-\infty}^{\infty} \sum_{n_z^\pm=-\infty}^{\infty} \frac{W}{4\pi cr^2} (1 - \alpha_x^\pm)^{n_x^\pm} (1 - \alpha_y^\pm)^{n_y^\pm} (1 - \alpha_z^\pm)^{n_z^\pm} \quad [\text{J/m}^3], \quad (5.13)$$

但し， c は音速 [m/s]， r は鏡像音源・受音点間距離であり，次式で表される．

$$r = ct = \sqrt{(n_x^\pm L_x)^2 + (n_y^\pm L_y)^2 + (n_z^\pm L_z)^2} \quad [\text{m}]. \quad (5.14)$$

尚，直接音の寄与は除くものとする．

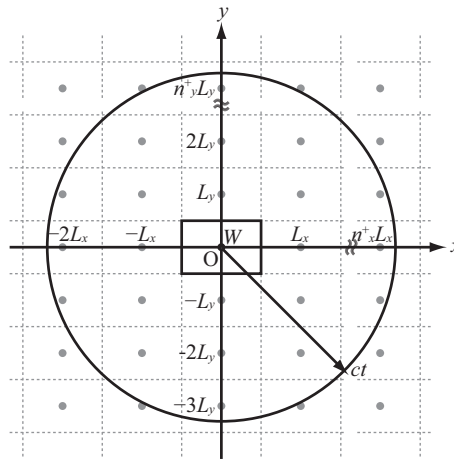


Figure 5.5 Arrangements of image sources in xy -plane ($z = 0$).

連続分布音源を仮定した鏡像法

矩形室内の点音源に対して鏡像音源の連続分布を想定し，反射場の平均エネルギー密度に着目する．受音点から等距離にある微小区間内の音源個数，距離減衰及び壁面吸音を算定すると，定常状態 $t = 0$ [s] で音源出力 W [W] を停止した場合，鏡面反射場の音響エネルギー密度は次式で表される．

$$E(t) = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_{ct}^\infty \frac{W}{4\pi cr^2} \frac{r^2 \sin \theta dr d\theta d\phi}{L_x L_y L_z} \times (1 - \tilde{\alpha}_x)^{\frac{r \sin \theta \cos \phi}{L_x}} (1 - \tilde{\alpha}_y)^{\frac{r \sin \theta \sin \phi}{L_y}} (1 - \tilde{\alpha}_z)^{\frac{r \cos \theta}{L_z}} \quad [\text{J/m}^3], \quad (5.15)$$

但し, $\tilde{\alpha}_{x(y,z)} = 1 - \sqrt{(1 - \alpha_{x(y,z)}^+)(1 - \alpha_{x(y,z)}^-)}$, $\alpha_{x(y,z)}^\pm$ は各方向壁面 2 面の吸音率.

式 (5.15) の球面積分については極座標系において全球を等立体角で離散化することを想定する (図 5.6). 第一象限における θ 方向の分割数 N_θ をパラメーターとして方位角 $\theta_{i,j}$, $\phi_{i,j}$ と離散化幅 $\Delta\theta_{i,j}$, $\Delta\phi_{i,j}$ を次式により設定する.

$$\Delta\theta_{i,j} = \frac{\pi/2}{N_\theta} \text{ [rad]}, \quad \theta_{i,j} = (i - \frac{1}{2})\Delta\theta_{i,j} \text{ [rad]}, \quad (i = 1, 2, \dots, 2N_\theta), \quad (5.16)$$

$$\Delta\phi_{i,j} = \frac{\pi/2}{N_\phi^i} \text{ [rad]}, \quad \phi_{i,j} = (i - \frac{1}{2})\Delta\phi_{i,j} \text{ [rad]}, \quad (i = 1, 2, \dots, 4N_\phi^i), \quad (5.17)$$

但し, $N_\phi^i = \lceil N_\theta \sin \theta_{i,j} \rceil$ は第一象限の θ_i における ϕ 方向分割数.

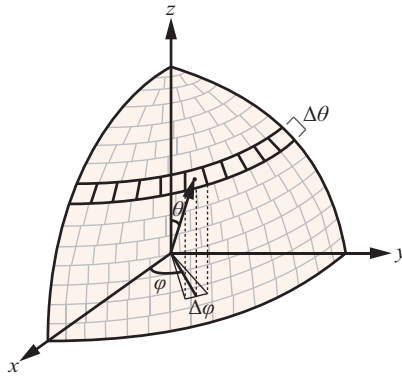


Figure 5.6 Discretization of angles of quadrant I.

5.3.2 結果と考察

残響減衰の性状

全体残響 離散分布音源を仮定した鏡像法解析の結果を理論値 (125, 500, 2k Hz) 及び Eyring 値とともに図 5.7 に示す (但し, $L_0 = 10 \log_{10}(W/c)$ [dB] で基準化). 尚, 鏡像法解析では, $t = 1.5$ [s] までに到来する鏡像音源の寄与から残響減衰曲線を得た.

室条件に依らず, 理論値は解析値と比較的に類似し, 特に低音域で良い対応を示している. 立方体かつ均等吸音の Case 1a では, 解析値, 理論値ともに直線的に減衰し, 勾配が Eyring 値と概ね一致していることから, 音場の拡散性が高いと言える. その他の条件では減衰に湾曲が生じ, Eyring 値と乖離している. 特に扁平形かつ不均等吸音の Case 2b で顕著である. また, α/L 比が等しい Case 1b と Case 2a の残響減衰曲線は概ね一致している.

ここでは音源を室中央に設定したが, 音源位置の依存性について検討するために, 連続分布音源を仮定した鏡像法の結果と比較する. 併せて, 式 (5.15) の球面積分に関して方向

離散化幅を変化させ、残響減衰曲線の収束性を確認する．方向分割数を約 4 倍ずつ増加した場合の計算結果を図 5.8 に示す．尚，離散分布音源を仮定した鏡像法と同様に 1.5 s までの応答から残響減衰曲線を得た．

拡散性が低い条件でも離散方向数 $N = 1,352$ ($N_\theta = 16$: 離散角 0.1 rad 相当) で残響減衰曲線は概ね収束し、離散分布音源を仮定した鏡像法解析値及び低音域の理論値に接近することがわかる．このことから、離散分布音源を仮定した場合の音源位置の影響は小さいと言える．上記離散角は低音域の臨界角 (図 5.9) と同程度であるのに対し、中高音域では臨界角の方がかなり小さく、理論値との相違が生じるものと考えられる．但し、鏡像法に基づく計算値は周波数依存性を含まないため、ここで理論値の誤差を明示することはできない．

連続分布音源を仮定した鏡像法 (離散方向数 $N = 1,352$) 及び理論 (125, 500, 2k Hz) により得られた残響減衰曲線から算出した残響時間 T_{30} (−5 to −35 dB) 及び湾曲指標 Q_{30} を表 5.3 に示す．尚、 Q_{30} の解析値については、音線法では初期反射音密度が疎であるため、0 ms から 100 ms 及び 300 ms から 400 ms の線形回帰直線の減衰率から算出した．理論値は低音域で解析値と良く対応していることがわかる．

Table 5.3 Reverberation times T_{30} (−5 to −35 dB) (left values) and the curvature index Q_{30} (right values), calculated by the image source method and by the approximation theory at 125, 500 and 2k Hz.

Case	ISM	Theory 125 Hz	500 Hz	2 kHz
1a	0.67 / 0.39	0.69 / 0.29	0.65 / 0.13	0.63 / 0.04
1b	1.20 / 3.16	1.29 / 3.66	0.95 / 2.86	0.71 / 1.13
2a	1.15 / 2.59	1.17 / 2.63	0.98 / 2.48	0.76 / 1.21
2b	2.41 / 4.65	2.38 / 4.82	3.14 / 7.65	2.11 / 6.11

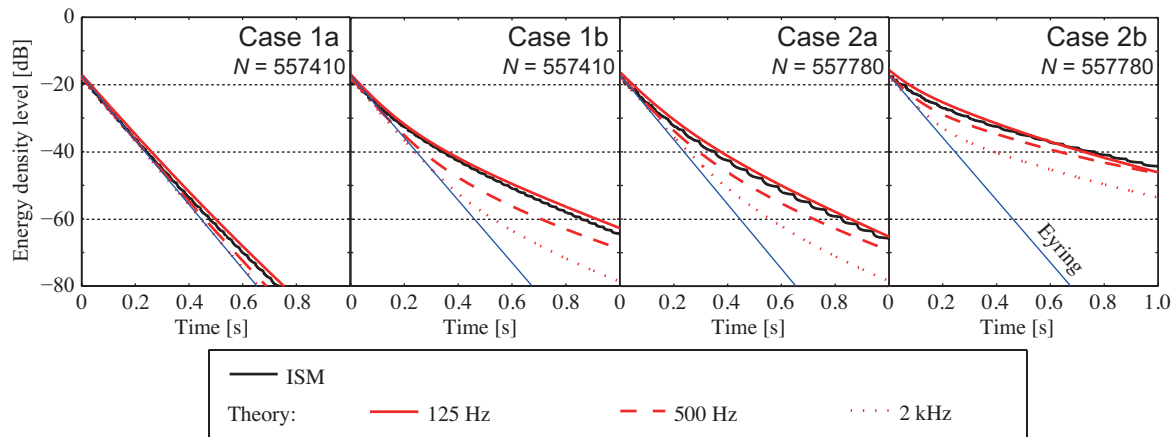


Figure 5.7 Energy decay curves calculated by the image source method (N : number of image sources) and by the approximation theory at 125, 500 and 2k Hz.

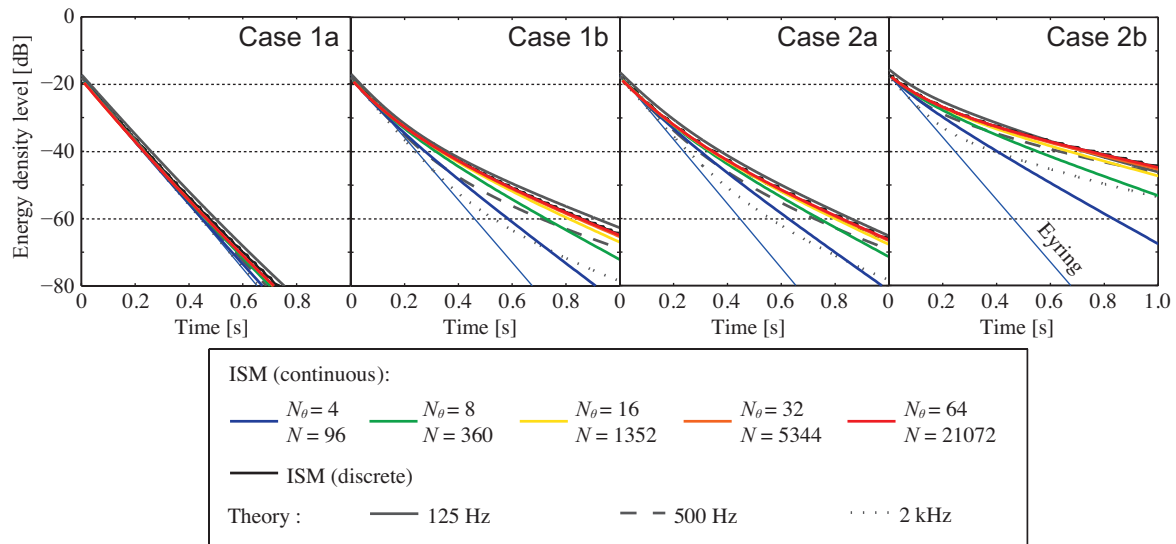


Figure 5.8 Energy decay curves calculated by the image source method, with changing the number of discretization of angles N .

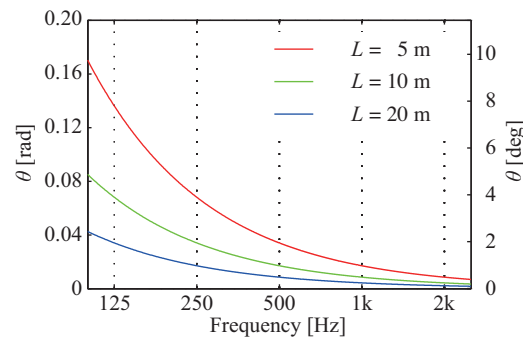


Figure 5.9 The critical angles of axial and tangential image sources with changing the length of walls.

各成分の残響 理論では、周波数と室寸法に依存する臨界角 $\theta_{x(y,z)}$ (図 5.9) を導入することにより、波動論における軸波 (ax, ay, az), 接線波 (tx, ty, tz) 及び斜波 (ob) に寄与する 7 種の音源群に鏡像音源を区分する。区分された音源群に対して各々単一の指数減衰が仮定され、エネルギー規準化係数を乗じて合計することで鏡面反射場の残響が得られる。導入した 3 つの仮定、即ち、1) 臨界角、2) 単一指数減衰、3) エネルギー規準化係数の影響について、各成分の減衰を鏡像法解析の結果と比較することで考察する。

連続分布音源を仮定した鏡像法による検討 連続分布音源を仮定した鏡像法について、鏡像音源を 125, 500, 2k Hz における臨界角で区分した各成分の残響減衰曲線 (軸近傍: $E_{ax(y,z)}$, 面近傍: $E_{ux(y,z,zx)}$, 斜方向: E_{ob}) を図 5.10(a) に示す。尚、方向分割数はいずれの条件でも臨界角内に成分が含まれるよう $N = 1,337,141$ ($N_\theta = 512$: 離散角 0.03 rad 相当) とした。

全体エネルギー減衰については、図 5.8 と同様に低音域の理論値は解析値と良い対応を示し、高音域ほど湾曲が強くなり乖離している。このことから、各成分に関する考察は主に 125 Hz を対象として行う。

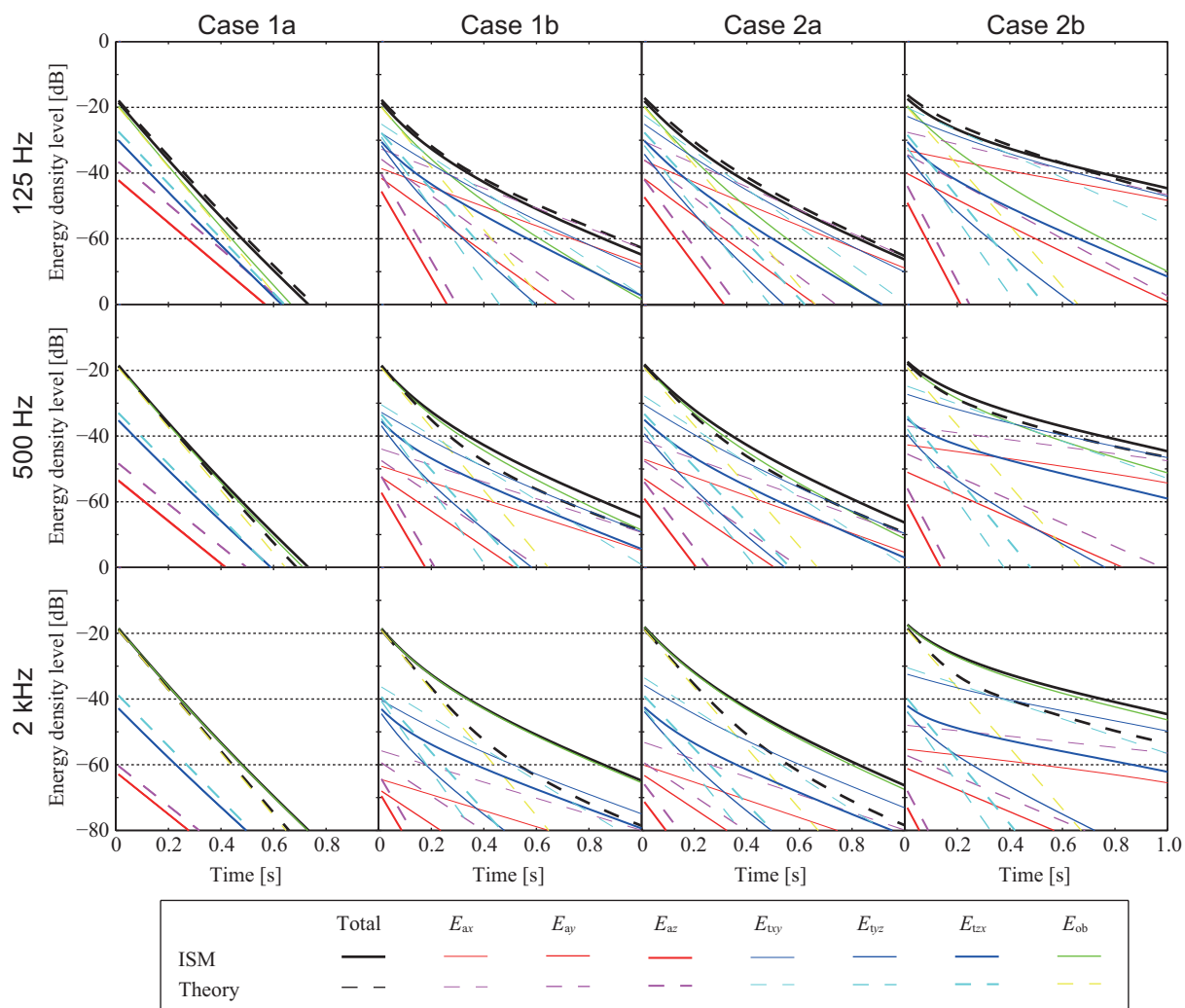
立方体かつ均等吸音の Case 1a では、勾配についてはどの成分も理論値は解析値と概ね一致しているが、絶対値については軸近傍成分及び面近傍成分に乖離が見られる。この乖離は、理論ではエネルギー規準化係数を導入することにより、軸近傍音源群の寄与は 4 倍に、面近傍音源群の寄与は 2 倍にしていることに由来していると考えられる。従って、理論値は解析値に対してそれぞれ +6 dB, +3 dB の乖離が生じる。

拡散性が低く、残響減衰曲線が湾曲したその他の室条件については、軸近傍成分の勾配は良い対応を示しているが、その他の成分は大きく乖離しており、特に斜方向成分で顕著である。理論では、軸近傍、面近傍、斜方向音源群の残響はそれぞれ 1 次元、2 次元、3 次元的な音場における平均的な単一指数減衰で表されるため、対数軸上で直線となる。対して、解析値は方向依存の多数の指数減衰を積分したものであるため、角度毎に異なる減衰率を持つ拡散性が低い音場では各成分の残響減衰曲線が湾曲することから、理論値が解析値と一致することは原理的にない。しかしながら、全体エネルギー減衰については解析値の湾曲を捉えて良い対応を示していることから、全体エネルギー減衰を決定付ける時間依存の支配的な成分の対応は良いものと考えられる。即ち、初期については斜方向成分が、中期については面近傍成分のうち最も減衰の遅い成分が、後期については軸近傍成分のうち同様の成分が各時間内で支配的となり、それらの包絡線として全体エネルギー減衰が決定付けられていると考えられる。また、各成分の近似誤差は埋め合わせられる関係にあることも推察される。

離散分布音源を仮定した鏡像法による検討 初期の減衰性状を観察するために、離散分布音源を仮定した鏡像法を同様の臨界角で区分した残響減衰曲線を図 5.10(b) に示す。

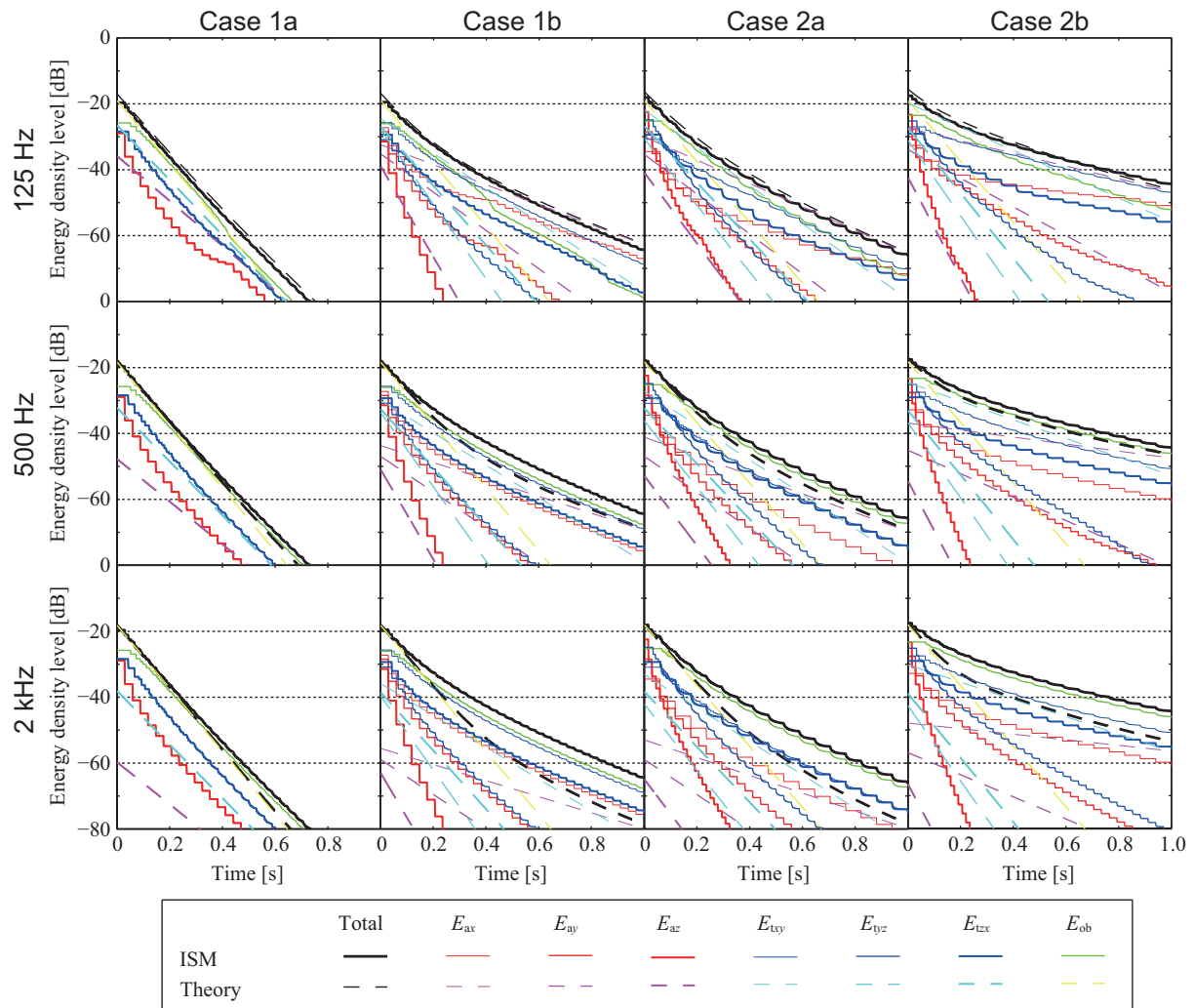
Case 1a の結果において，125 Hz の軸近傍音源群については，初期では軸上音源のみの距離減衰により冪乗減衰を示すが，約 0.4 s 以降では軸上以外の音源が含まれることにより指数減衰に近づき，理論値に接近している．面近傍，斜方向音源群についても概ね同様の傾向を示している．尚，500, 2k Hz については臨界角が非常に小さいため，1.5 s までの計算では両者に違いは現れない．その他の条件についても全体エネルギーの減衰曲線は湾曲も含めて理論値と良い対応を示している．一方，各成分の残響減衰曲線については，減衰の大きい z 軸近傍音源群を除いて乖離が見られ，特に斜方向音源群では理論値の減衰が顕著に大きい．

以上の理論値の誤差要因として主に次の 2 点が考えられる．第一に，鏡像法では軸上音源は軸方向の壁面のみで吸音されるが，近似理論では臨界角内の軸上以外の音源も含む平均反射頻度を想定するため，他方向の壁面の擦過入射吸音が影響する点である．第二に，理論では斜方向音源群の平均吸音率として拡散音場と同様に各方向壁面の吸音率の算術平均を仮定している点である．



(a) Continuous image sources.

Figure 5.10 Energy decay curves of seven image source groups and the total, calculated by the image source method and by the approximation theory at 125, 500 and 2k Hz.



(b) Discrete image sources.

Figure 5.10 continued.

減衰率分布の性状

離散分布音源を仮定した鏡像法解析において、各鏡像音源の減衰率を残響時間に換算し、時間窓 0.1 s 毎の鏡像音源の相対度数分布（残響時間 0.01 s 刻み）を図 5.11 に示す。初期（0 to 0.1 s）では分布が疎らで傾向が明確ではないが、後期（0.5 s 以降）では条件に依存する分布に概ね収束することが確認される。Case 1a では分布が Eyring 値の近傍に集中しており、直線的な減衰を示すことと対応する、一方、室の拡散性が低いその他の条件では分布が Eyring 値より大きい側にばらつき、特に減衰の湾曲が強い Case 2b で顕著である。

図 5.12 は、各鏡像音源からの受音エネルギーを図 5.11 と同じ残響時間刻み毎に合計した相対エネルギー分布（但し、 $L_0 = 10\log_{10}(W/c)$ [dB] で基準化）である。初期では、図 5.11 で鏡像音源度数にばらつきが見られた室条件であっても、残響時間刻み毎のエネルギーは同程度となっている。一方、後期では残響時間が Eyring 値に近い側でエネルギーが顕著に低下し、図 5.11 とは逆の分布を示している。従って、後期では軸近傍の音源個数は相対的に少ないが、減衰が緩やかであるため、時間経過とともに全体に占めるエネルギーの割合は高まることが推察される。

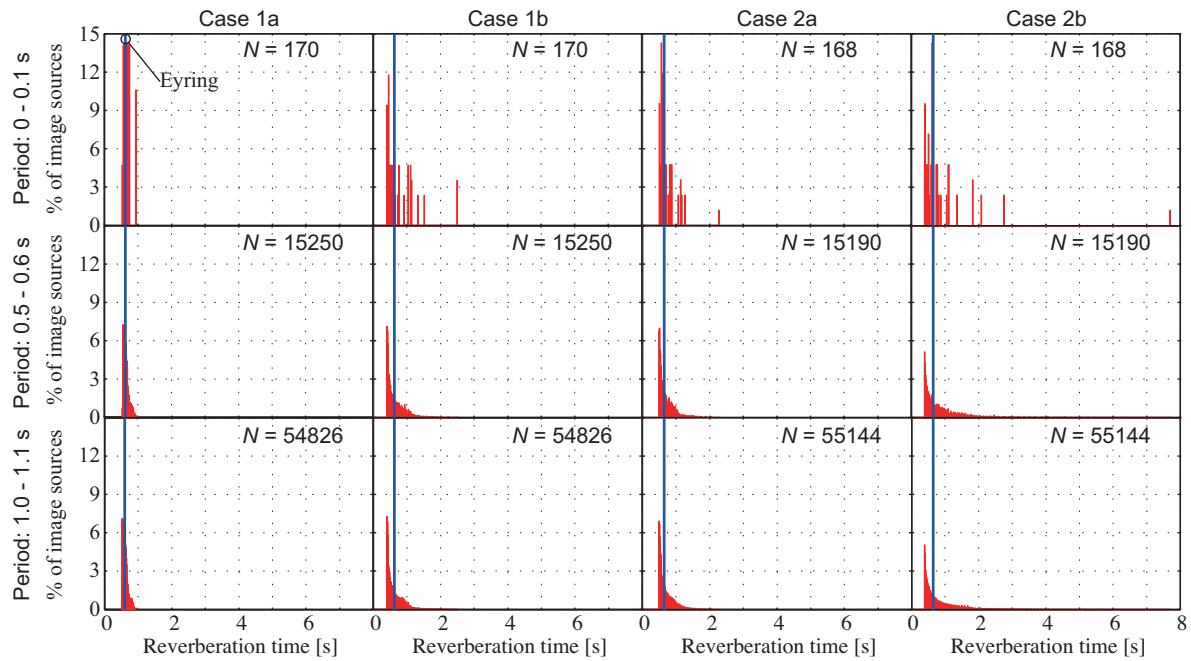


Figure 5.11 Distributions of image sources in reverberation time converted from each decay rate. Upper: within the period from 0 to 0.1 s; middle: from 0.5 to 0.6 s; lower: from 1.0 to 1.1 s, (N : number of image sources).

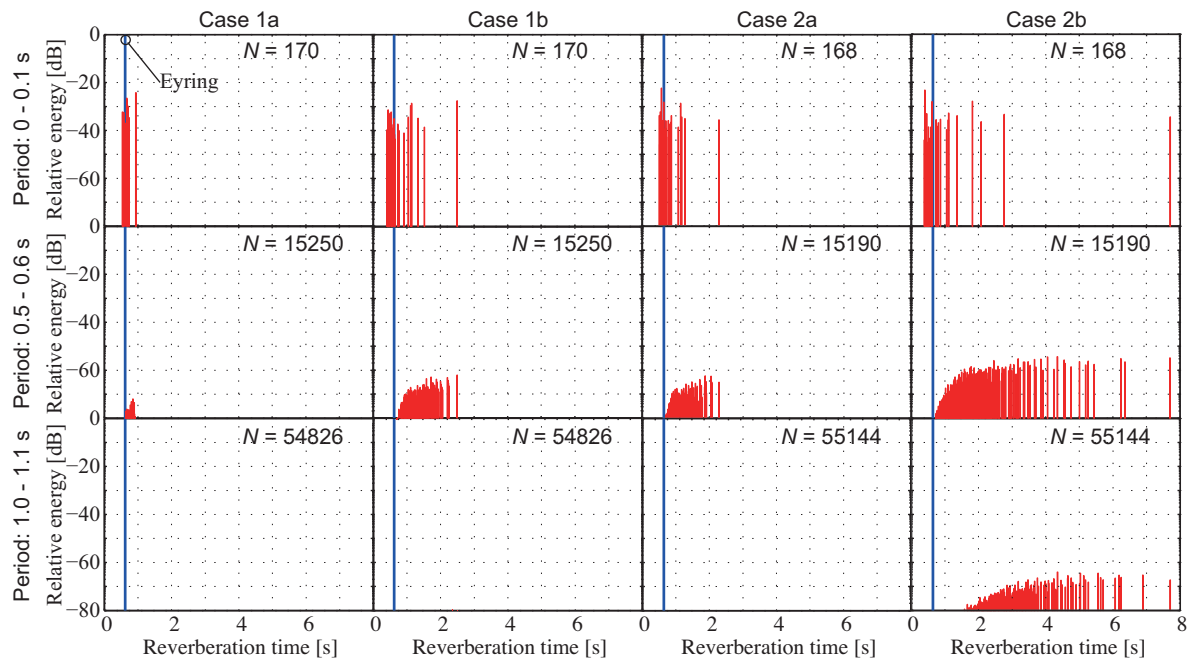


Figure 5.12 Relative energy distribution of image sources in reverberation time, corresponding to Fig. 5.11.

5.4 幾何音響解析による壁面拡散のある室内の残響に関する検討

5.4.1 検討方法

室容積 $1,000 \text{ m}^3$, 吸音面積 210 m^2 の矩形室に対して , アスペクト比と吸音分布が均等 , 不均等となる 4 条件を設定し (表 5.4) , 各条件で乱反射率 s を全面一律に 0.05 から 0.8 に変化させる . 尚 , 吸音率及び乱反射率は入射角度に依存しないものとする . 拡散音場を仮定した場合の残響時間は , Sabine 式では全条件で 0.77 s , Eyring 式では 0.62 s (Case 1a/b) , 0.65 s (Case 2a/b) である . 音源及び受音球を室中央に設定し , サンプリング周波数 1 kHz , 応答長 1.5 s のエネルギーインパルス応答を音線法解析により得る .

Table 5.4 Conditions of rectangular rooms (identical to Table 5.1).

Case	L_x [m]	L_y [m]	L_z [m]	α_x^\pm	α_y^\pm	α_z^\pm	Ratio α/L
1a	10	10	10	0.35	0.35	0.35	1:1:1
1b	10	10	10	0.15	0.30	0.60	1:2:4
2a	20	10	5	0.30	0.30	0.30	1:2:4
2b	20	10	5	0.10	0.20	0.40	1:4:16

5.4.2 結果と考察

音線法解析パラメータの妥当性検証

音線法解析パラメータである受音球の大きさ及び音線数の妥当性を検証するために , 鏡像法及び理論と残響減衰曲線を比較する .

受音球の大きさの影響 音線数を 10^5 本とし , 受音球半径 r [m] を変化させた場合の結果を図 5.13 に示す . 尚 , 結果は受音球の見かけ面積で基準化した . 全ての室条件で , 受音球の大きさによらず音線法による解析値は鏡像法と一致し , 低音域の理論値に接近している . 但し , 受音球半径が小さい $r = 0.25$ [m] の場合には曲線の滑らかさがやや低減している . 以後の検討では受音球の見かけ面積が 1 m^2 となる $r = \sqrt{1/\pi}$ [m] とする .

音線数の影響 音線数を 10^3 本から 10^6 本まで 10 倍ずつ増加した場合の結果を図 5.14 に示す . $s = 0$ の場合には , 室条件によらず 10^5 本程度で残響減衰曲線は概ね収束しているが , $s = 0.2$ の場合には Case 1a を除く拡散性の低い条件では収束性が悪いため , 以降の検討では 10^6 本とする .

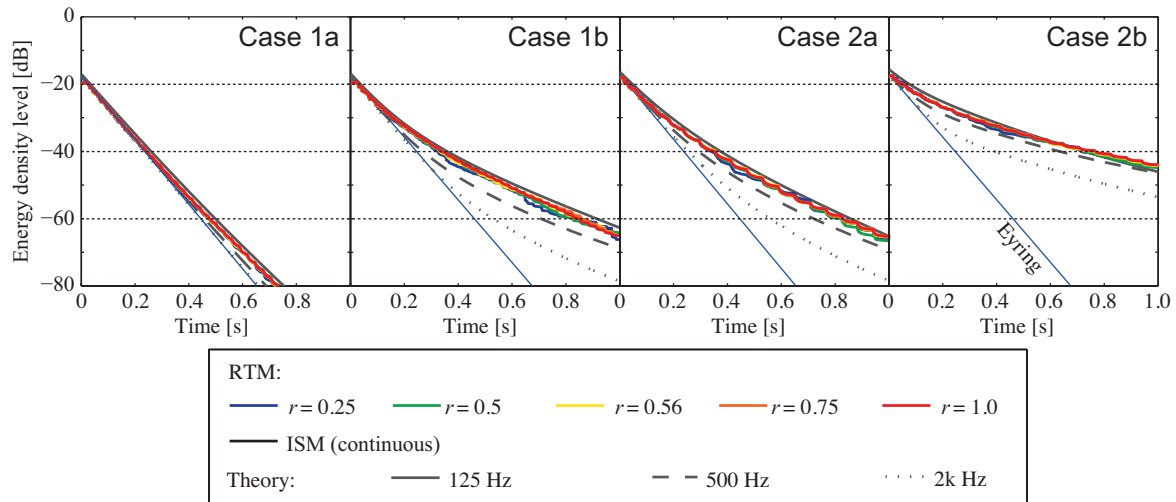


Figure 5.13 Energy decay curves calculated by the ray tracing method, with changing radius of the receiving sphere r from 0.1 to 1.0 m.

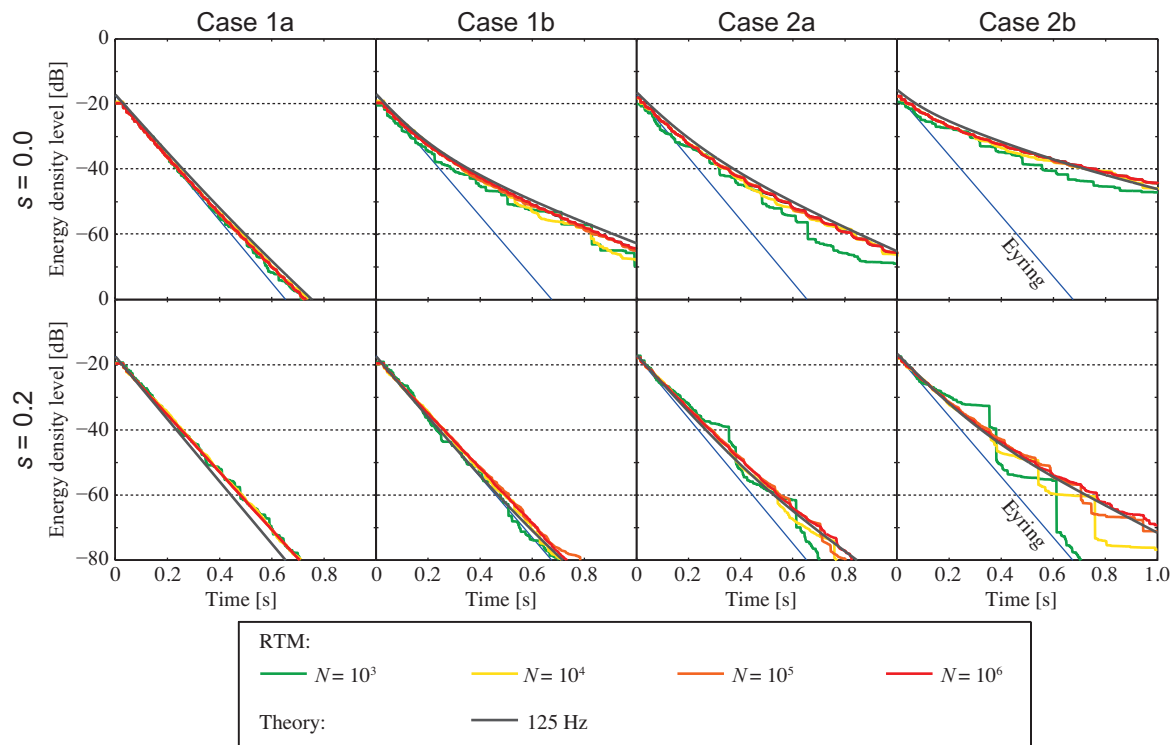
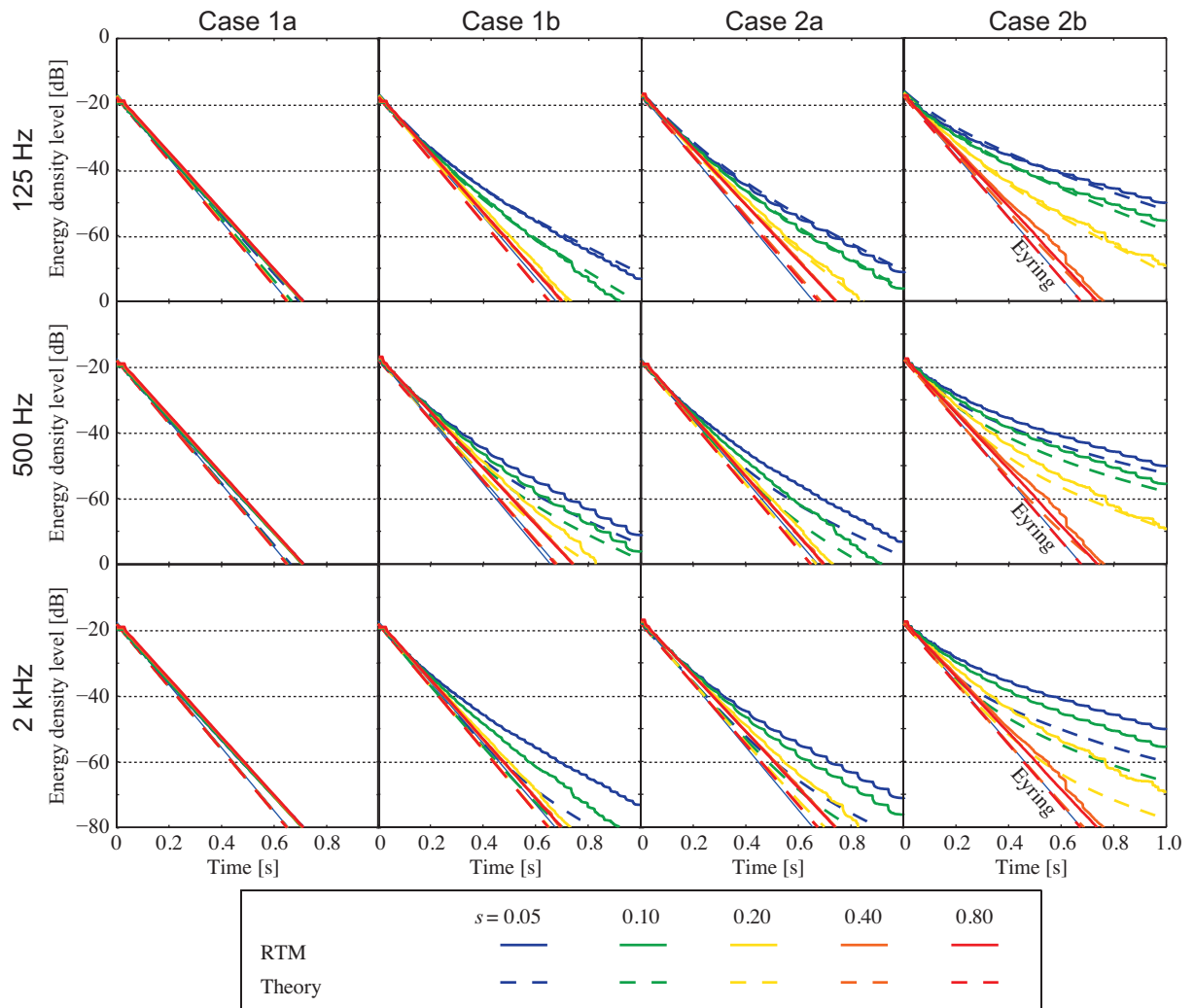


Figure 5.14 Energy decay curves calculated by the ray tracing method, with changing number of rays N from 10^3 to 10^6 .

残響減衰の性状

理論では拡散反射成分は鏡面反射成分に再帰しないことが仮定されている．同様の仮定に基づいた音線法による計算結果を 125, 500, 2k Hz の理論値とともに図 5.15(a) に示す．室条件によらず，鏡像法の結果と同様に 125 Hz の理論値と解析値の対応が比較的良く，中高音域では過小評価側に乖離している．壁面拡散の影響については，理論値は解析値の傾向を概ね捉え，乱反射率の変化に追従していることがわかる．

理論値・解析値ともに，立方体・均等吸音の Case 1a では乱反射率が減衰に及ぼす影響は見られないが，それ以外の室では影響が表れ，特に扁平・不均等吸音の Case 2b では顕著となっている．また，乱反射率が 0.4 を下回ると減衰が生じているのに対して，平均吸音率を上回る 0.4 以上では直線となり，Eyring 値とほぼ一致している．

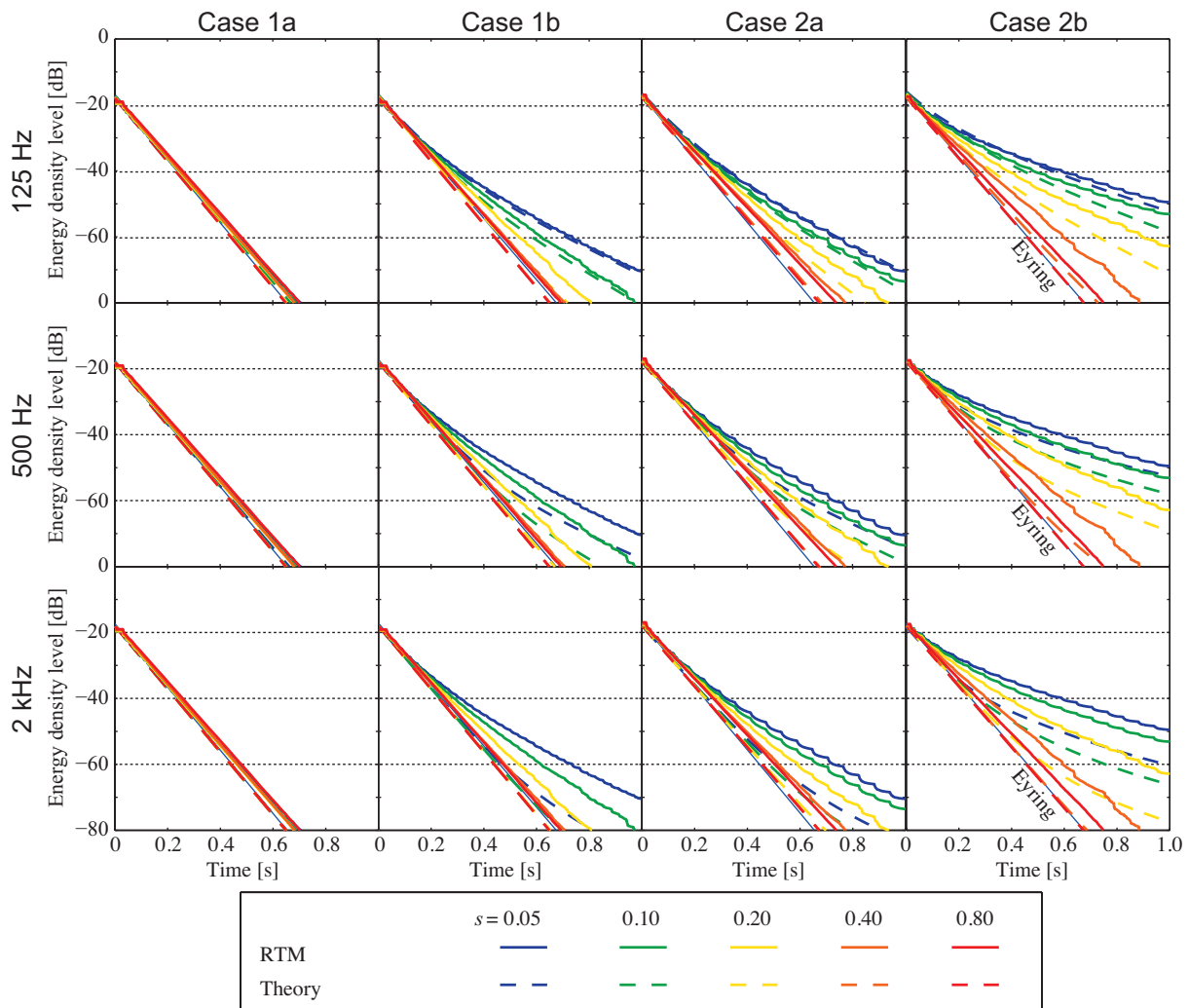


(a) Nonreversible.

Figure 5.15 Energy decay curves calculated by the ray tracing method and by the approximation theory at 125, 500 and 2k Hz, with changing scattering coefficient s from 0.05 to 0.8.

反射成分の遷移の影響 理論とは異なり，音線が壁面に入射する度に反射性状（鏡面または拡散）を確率的に決定することとした計算結果を図 5.15(b) に示す．図 5.15(a) と比較すると，同じ乱反射率であっても減衰が鈍り，理論値と乖離することがわかる．特に，乱反射率 0.2 から 0.4 で顕著である．

図 5.15 の残響減衰曲線から算出した残響時間 T_{30} (−5 to −35 dB) 及び減衰指標 Q_{30} を図 5.16 に示す．尚，残響時間については，参考として Sabine，Eyring，Fitzroy，Araupuchades の理論値を併記し，湾曲指標については，音線法では初期反射音密度が疎であるため，0 ms から 100 ms 及び 300 ms から 400 ms の線形回帰曲線の減衰率から算出した．前述の通り，乱反射率が 0.4 以上の場合，全室で理論値は Eyring 値とほぼ等しい．乱反射率が 0.05 の場合，Case 1b/2a では Eyring 値より 5 % から 30 % の若干の増加となり，Fitzroy 値をもかなり上回っている．全体的に理論値は音線法解析の結果と傾向が類似し，特に反射場の再遷移を仮定しない解析結果と良く対応している．



(b) Reversible.

Figure 5.15 continued.

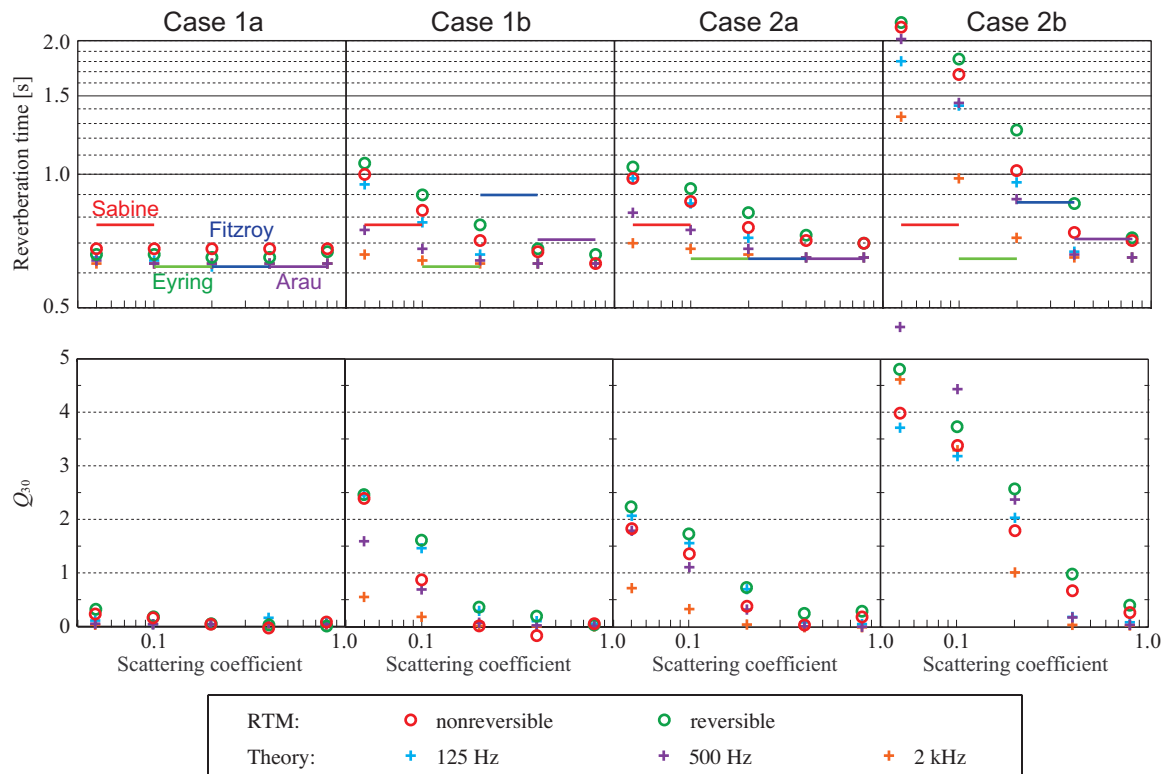


Figure 5.16 Reverberation times T_{30} (-5 to -35 dB) and the curvature index Q_{30} , calculated by the ray tracing method and the approximation theory at 125, 500 and 2k Hz, with changing scattering coefficient from 0.05 to 0.8. Four types lines on the upper graphs represent theoretical values by Sabine, Eyring, Fitzroy and Arau-Puchades.

波動音響との比較

次節以降，FDTD 法解析との比較を通じて理論の波動場への適用性を検討するが，先立って本節では，音線法を加えた三者の比較を行う．室条件，及び理論計算と FDTD 法解析については，第 5.6 節に示す通りである．音線法解析については，理論を模擬して周波数特性を与えることとする．即ち，鏡面反射時は入射角度に応じて乱・垂直・擦過入射の吸音率及び乱反射率を与え，乱反射率時には入射角度によらずに乱入射吸音率を与え，以後は乱反射を続けることとする．

残響時間の結果を図 5.17 に示す．全体的に，音線法に比べて理論による値は小さく，乖離はあるものの FDTD 法の結果に類似している．乖離は低音域で特に大きく，室稜線で生じる端部散乱の影響によるものと推察される．解析手法に依らず，拡散体なし（Type FF）に対して，拡散体を設置した場合（Type DF/DD）では乱反射率の周波数特性に応じて残響が抑制されている．

理論と音線法の乖離の要因として次の点が挙げられる．1 次元的な成分については，理論では擦過入射値を考慮した平均的な吸音率が与えられるが，音線法では入射面の吸音率が与えられるのみであるため減衰が比較的鈍くなる．また，臨界角が小さいため，音線法では乱入射吸音率による減衰が支配的であり，値の大きい擦過入射吸音率の寄与が小さいため減衰が鈍くなる．

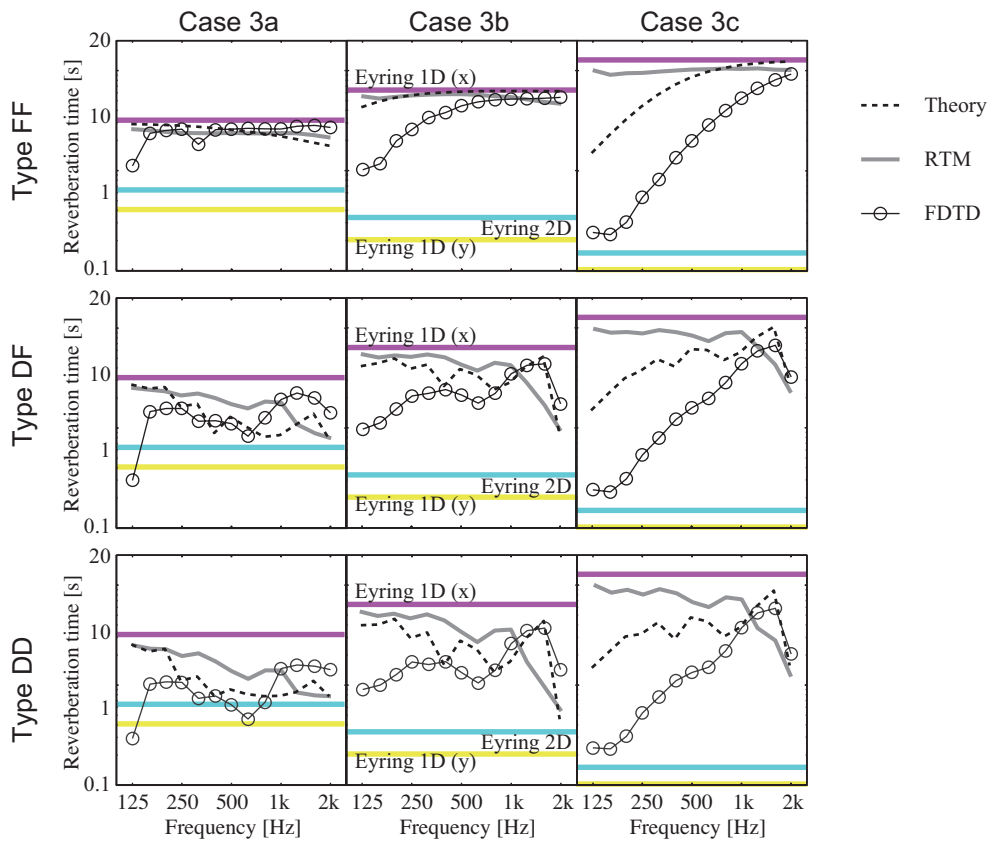


Figure 5.17 Reverberation times T_{30} (-5 to -35 dB), calculated by the ray tracing method, by the FDTD method and by the approximation theory.

5.5 波動音響解析による 2 次元平行壁間残響に関する検討

本節以降では、壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論の波動場への適用性を、FDTD 法解析との比較を通じて検討する。本節では、2 次元平行壁間音場を対象とした基礎的な検討を行う。

5.5.1 検討方法

点音源と平行壁からなる検討対象を図 5.18 に示す。平行壁間の条件は表 5.5 に示す通り、壁間距離 L_x 、壁長 L_y 、垂直入射吸音率 α_n を変化させ、拡散体設置条件を 3 種（FF：なし、DF：1 面設置、DD：2 面設置）設定し、それらの組合せ計 108 条件を設定する。

FDTD 法解析については、空間離散化幅は 0.01 m、時間離散化幅は CFL 条件を満たす $1/48,151$ s とする。境界条件として壁には表 5.5 に示す吸音率相当の垂直入射音響インピーダンスを実数で与え、開口部には PML 無反射境界条件を設定する。音源には 2 kHz の $1/3$ オクターブバンド上限周波数以下の成分が含まれる Gaussian 関数を音圧の空間分布として与える。得られた応答に $1/3$ オクターブバンドフィルター処理を行い、受音点 13 点の平均エネルギー減衰に対して同定区間内で最小二乗法による線形回帰を行い、残響時間 T_{30} （ -30 to -60 dB）を算出する。

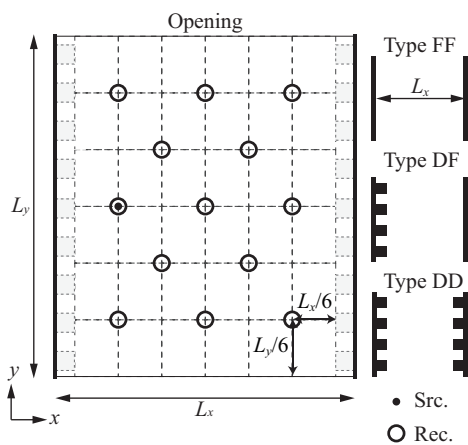


Table 5.5 Conditions of parallel walls.

L_x [m]	L_y [m]	α_n	Wall type
4	4	0.025	FF
8	8	0.050	DF
16	16	0.100	DD
		0.200	

Figure 5.18 Arrangement of a source and receiving points, and three types of x -directional walls. Diffusive walls have square blocks of a side length of 100 mm, spaced at a pitch of 200 mm.

理論計算

1 次元音場における Eyring 式は次式で表される．

$$T = \frac{13.8}{c} \frac{L_x}{-\ln(1 - \alpha_x^n)} \quad [\text{s}], \quad (5.18)$$

但し， c は音速 [m/s]， L_x は平行壁間距離 [m]， α_x^n は壁の垂直入射吸音率．上式，及び式 (A.7)，(A.8) より壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論に基づく 1 次元残響式が次式で与えられる．

$$T = \frac{13.8}{c} \frac{L_x}{\beta_{\text{Eax}}} \quad [\text{s}], \quad (5.19)$$

但し，

$$\beta_{\text{Eax}} = -\{\ln(1 - \tilde{\alpha}_x^n) + \ln(1 - \tilde{s}_x^n)\} - \frac{cL_x}{8f} \left(\frac{1}{L_y^2} \right) \ln(1 - \tilde{\alpha}_y^g), \quad (5.20)$$

L_y は壁間距離 [m]， $\tilde{\alpha}_x^n$ は壁の平均垂直入射吸音率， \tilde{s}_x^n は平均垂直入射乱反射率， $\tilde{\alpha}_y^g$ は開口部の平均擦過入射吸音率であり，それぞれ平行壁間の交互反射を考慮して，

$$\tilde{\alpha}_{x(y)}^{(\cdot)} = 1 - \sqrt{(1 - \alpha_{x(y)}^{(\cdot)+})(1 - \alpha_{x(y)}^{(\cdot)-})}, \quad \tilde{s}_x^n = 1 - \sqrt{(1 - s_x^{n+})(1 - s_x^{n-})}, \quad (5.21)$$

但し， $\alpha_{x(y)}^{(\cdot)\pm}$ ， $s_x^{n\pm}$ はそれぞれ対向 2 面の吸音率と乱反射率．式 (5.20) の第 1 項及び第 2 項は鏡面反射場の垂直入射吸音を，第 3 項は壁への入射に対する開口部への入射回数比を考慮した開口部の擦過入射吸音を表し，第 1 項は $s_y^n = 0$ のとき x 方向壁の無限長を想定した 1 次元 Eyring 式と一致する．理論計算には， s_x^n として境界要素法で算出した値^[168] (図 5.19) を， α_y^g として FDTD 法で算出した Type FF の残響時間から逆算した値 (図 5.20) を与える．従って，拡散体なしの場合 (Type FF)，残響時間に関して理論値は解析値と一致する．

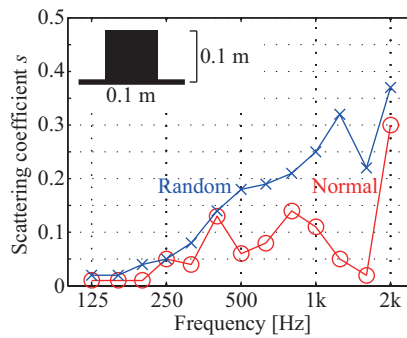


Figure 5.19 Normal/random-incidence scattering coefficients of the x -directional diffusive walls, substituted for the approximation theory, calculated by the numerical analysis.

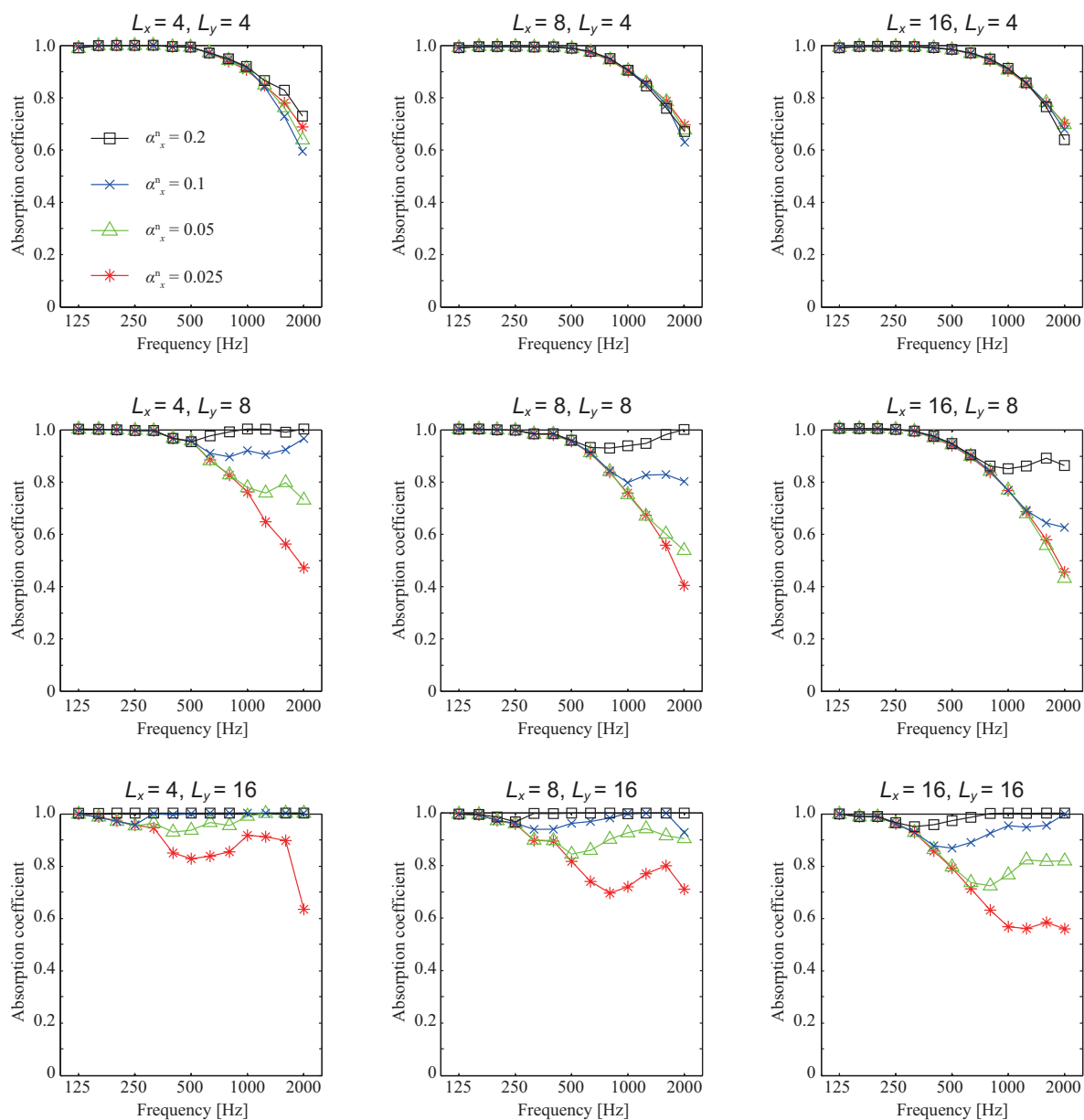


Figure 5.20 Grazing-incidence absorption coefficients substituted for the approximation theory, obtained by the FDTD method of Type FF.

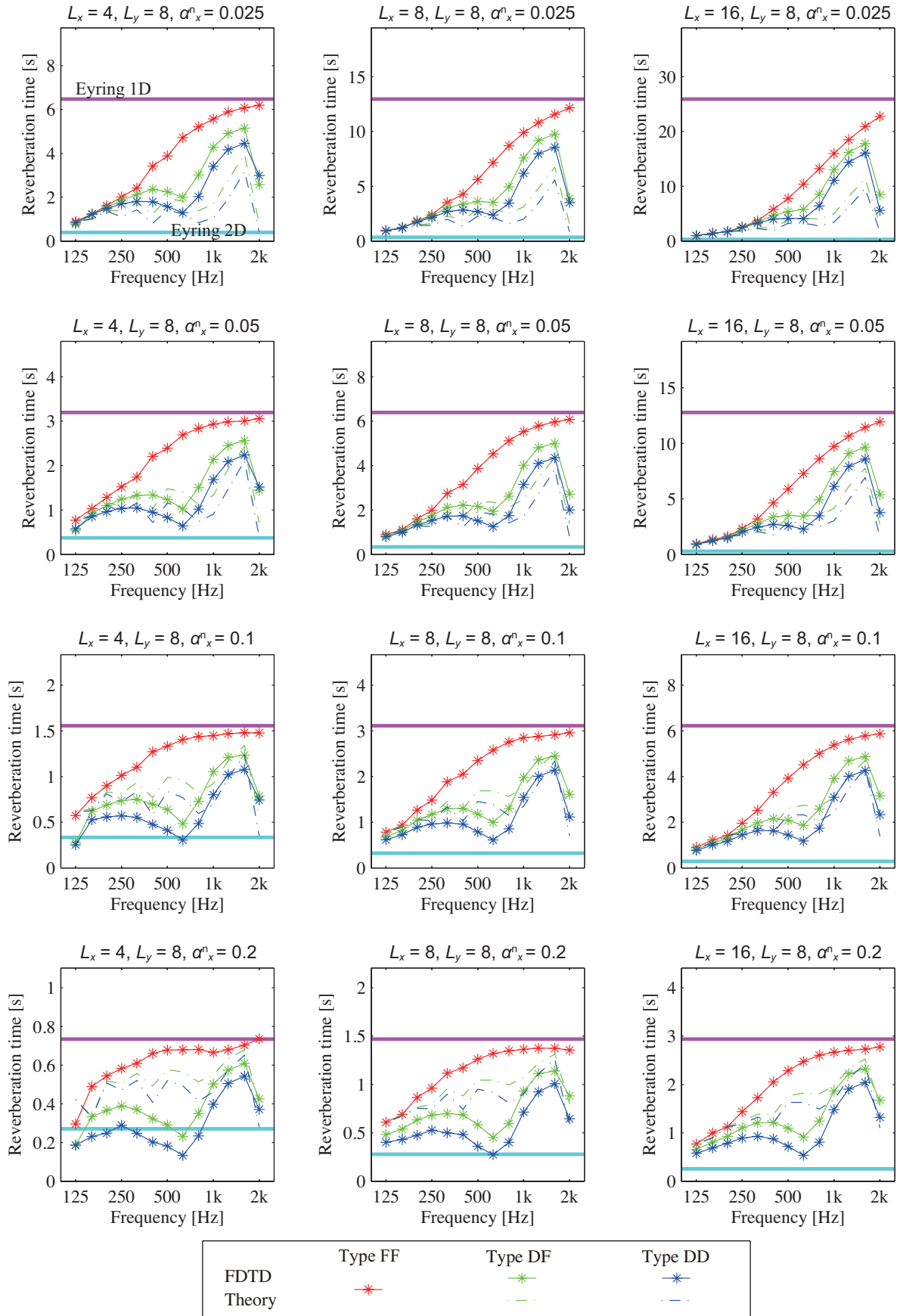
5.5.2 結果と考察

壁間距離の影響 壁長 $L_y = 8 \text{ m}$ とし，壁間距離 L_x と吸音率を変化させた結果を図 5.21(a) に示す．全体的に，壁間距離に比例して残響時間の最大値が大きくなる傾向が見られる．拡散体を設置することで，垂直入射乱反射率の周波数特性に応じて解析値，理論値ともに残響が抑制されている．壁間距離が小さい場合に，比較的に拡散体の効果が大きく表れている．

壁長の影響 壁間距離 $L_x = 8 \text{ m}$ とし，壁長 L_y と吸音率を変化させた結果を図 5.21(b) に示す．全体的に，壁長が大きいほど低音域の残響時間が長くなり 1 次元 Eyring 値に接近する傾向が見られる．但し，残響時間の最大値は壁長の影響をほぼ受けず，吸音率に依存している．拡散体の影響は壁長が大きい場合に顕著に表れている．

吸音率の影響 図 5.21 から，理論値と解析値の対応の傾向に関しては，その周波数特性が吸音率に強く依存していることがわかる．即ち，吸音率が小さい場合には高音域で過小評価側に乖離し，吸音率が高い場合には低音域で過大評価側に乖離している．この傾向は特に，壁間距離が小さい場合，また壁長が大きい場合に顕著であることから，開口部の擦過入射吸音率は室アスペクト比に依存する可能性が示唆される．また，FDTD 法解析では拡散体設置時に壁の表面長の変化に伴う吸音力の増加や位相干渉による吸音の影響，さらに解析値が帯域値であるのに対して理論値が単一周波数での値であることが乖離の要因として挙げられる．

残響時間予測図表 以上より，残響時間の最大値は壁間距離に比例し，周波数特性は壁長に依存することが示された．FDTD 法で得られた残響時間を壁間距離 (L_x) で除して縦軸とし，その周波数に壁長 (L_y) を乗じて横軸とし，吸音率毎に整理した結果を図 5.22 に示す．室アスペクト比が等しい条件の値は概ね一致し， $L_x : L_y = 1 : 4, 1 : 2, 1 : 1, 2 : 1, 4 : 1$ の順に，即ち壁間距離に対して壁長が大きいほど，残響時間が大きくなる傾向が見られる．

(a) $L_x = 4, 8, 16$ m, $L_y = 8$ m.Figure 5.21 Reverberation times T_{30} (−30 to −60 dB) calculated by the FDTD method and by the approximation theory.

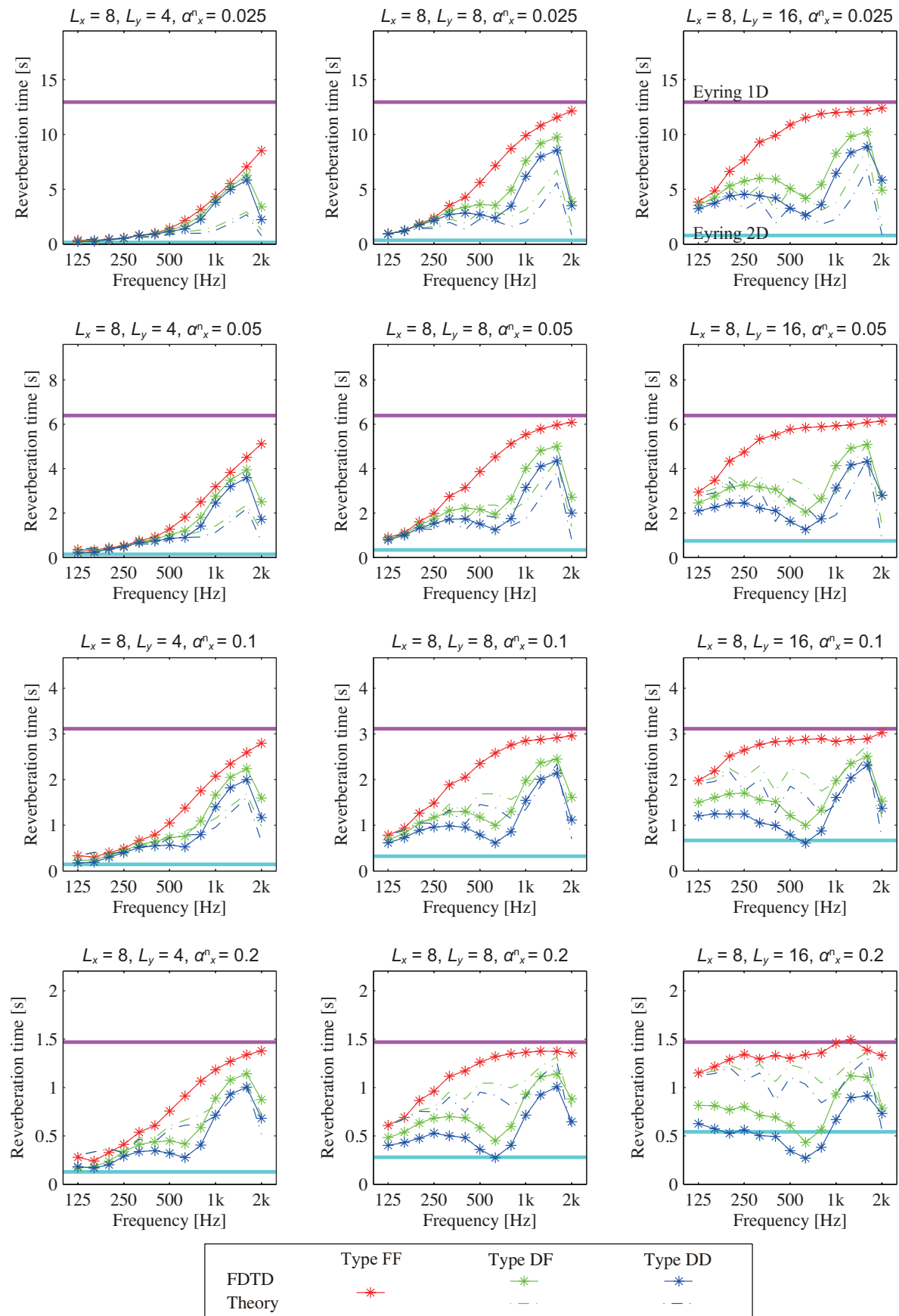
(b) $L_x = 8$ m, $L_y = 4, 8, 16$ m.

Figure 5.21 continued.

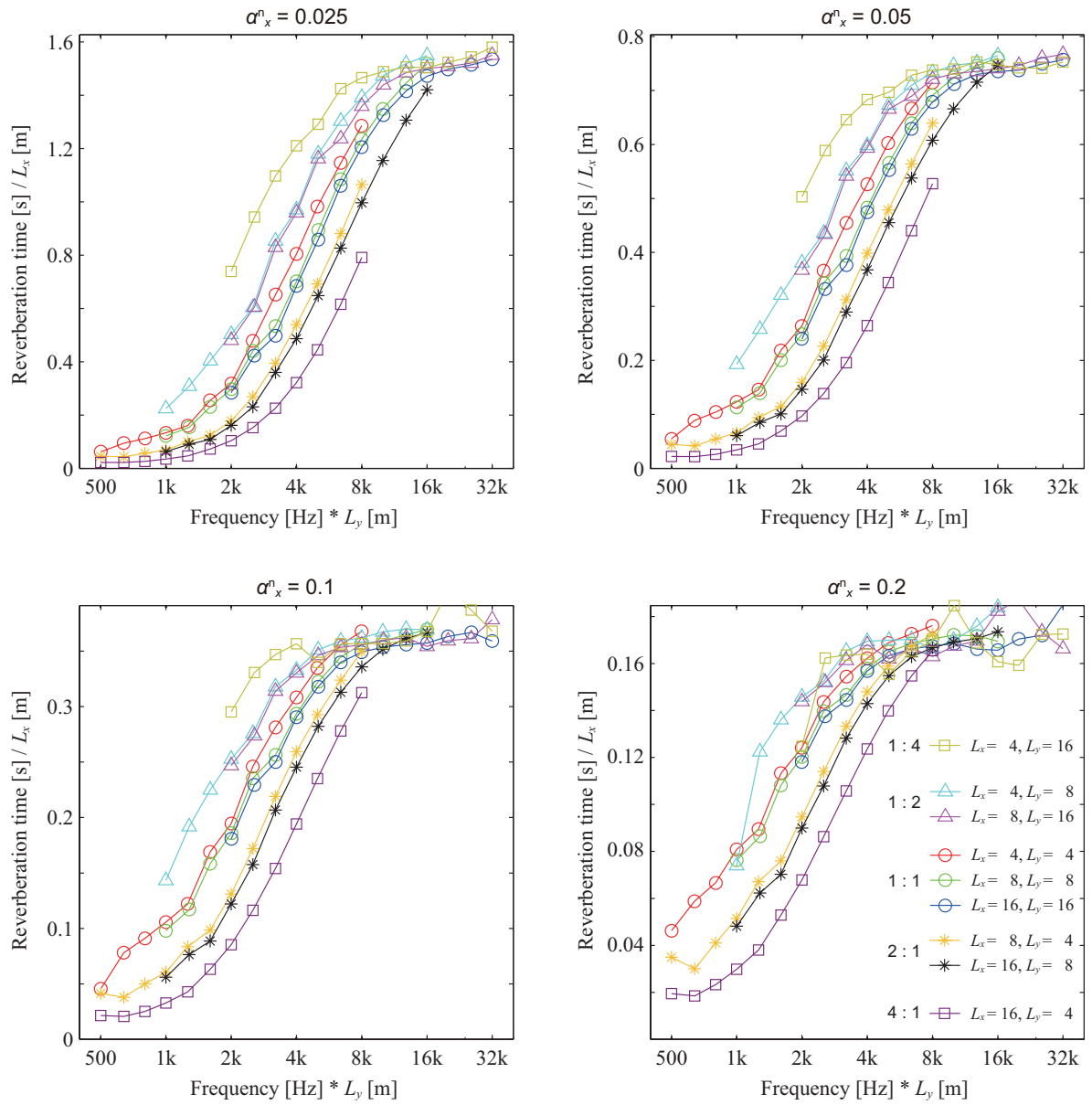


Figure 5.22 Prediction charts of reverberation times for parallel plain walls.

5.6 波動音響解析による 2 次元矩形室内残響に関する検討

5.6.1 検討方法

点音源と矩形室からなる検討対象を図 5.23，表 5.6 に示す． $x(y)$ 軸に垂直な 2 壁を $x(y)$ 方向壁と称する．室条件については，いずれも x 方向壁を反射性 ($\alpha_x^n = 0.05$) とし， y 方向壁の吸音率と室アスペクト比を変化させた 9 条件を設定する．さらに，各々について x 方向壁の拡散体設置条件を 3 種 (Type FF：なし，Type DF：1 面設置，Type DD：2 面設置) 設定する．

FDTD 法解析については，空間離散化幅は 0.01 m，時間離散化幅は CFL 条件を満たす $1/48,151$ s とする．境界条件として表 5.6 に示す吸音率相当の垂直入射音響インピーダンスを実数で与え，音源には 2 kHz の 1/3 オクターブバンド上限周波数以下の成分が含まれる Gaussian 関数を音圧の空間分布として与える．得られた応答に 1/3 オクターブバンドフィルター処理を行い，受音点 13 点の平均エネルギー減衰に対して同定区間内で最小二乗法による線形回帰を行い，残響時間を算出する．

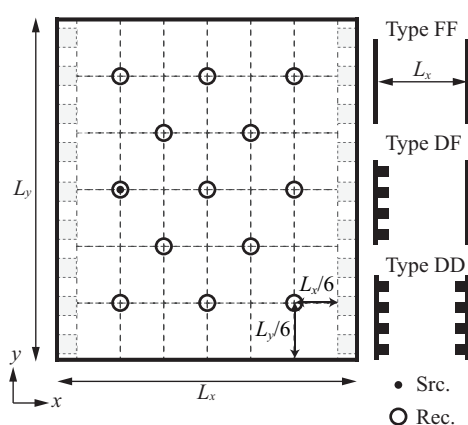


Figure 5.23 Arrangement of a source and receiving points, and three types of x -directional walls. Diffusive walls have square blocks of a side length of 100 mm, spaced at a pitch of 200 mm.

Table 5.6 Conditions of rectangular rooms.

	L_x [m]	L_y [m]	$\alpha_x^{n\pm}$	$\alpha_y^{n\pm}$
Case 1a	4	16	0.05	0.05
Case 1b	8	8	0.05	0.05
Case 1c	16	4	0.05	0.05
Case 2a	4	16	0.05	0.2
Case 2b	8	8	0.05	0.2
Case 2c	16	4	0.05	0.2
Case 3a	4	16	0.05	0.8
Case 3b	8	8	0.05	0.8
Case 3c	16	4	0.05	0.8

理論計算

2 次元音場における壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論では，室内の残響は臨界角と乱反射率によって，鏡面反射場 3 種（接線方向成分及び $x(y)$ 軸近傍成分）と，鏡面反射成分の一部が転化することで生じる完全拡散音場の計 4 種の指数減衰に分解される．各々の成分は入射角度依存の吸音率と乱反射率，及び室寸法に依存する反射頻度で減衰の性状が決定される（第 A 章）．

本節における理論計算では，入射角度依存の吸音率は Paris の式 [205] の積分区間を臨界角 $\theta_{x(y,z)}$ （図 5.24）に基づく範囲（表 5.7）に限定し，垂直入射吸音率から推定した値を用いる．尚，Paris の式（式 (3.25)）は 2 次元音場では次式で表され，斜入射吸音率 α_θ は式 (3.23) を用いて算出する．

$$\alpha_{x(y)}^{(\cdot)} = \frac{\int_0^{\pi/2} \alpha_\theta \cos \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} \cos \theta d\theta}. \quad (5.22)$$

従って，乱入射吸音率については図 3.8 に示す統計入射吸音率を，垂直入射吸音率については図示を省略するが概ね本来の垂直入射吸音率と一致した値を，擦過入射吸音率は図 5.26 に示す値を与える．擦過入射吸音率は垂直入射吸音率に依らず一定の最大値を有し，その周波数特性は垂直入射吸音率や室寸法に依存することから，反射性の材料であっても擦過入射吸音率が大きい値を示す周波数があるという点で現実的でない場合も生じ得る．乱反射率については，乱・垂直入射値としては境界要素法で算出した値（図 5.25）[168] を，擦過入射値としては 0 を与える．

Table 5.7 Interval of integration for Eq. (5.22).

Interval of integration θ [rad]				
Normal $\alpha_{x(y)}^n$	0	\leq	$\theta \leq$	$\theta_{x(y)}$
Random $\alpha_{x(y)}^r$	0	\leq	$\theta \leq$	$\pi/2$
Grazing $\alpha_{x(y)}^g$	$\pi/2 - \theta_{x(y)}$	\leq	$\theta \leq$	$\pi/2$

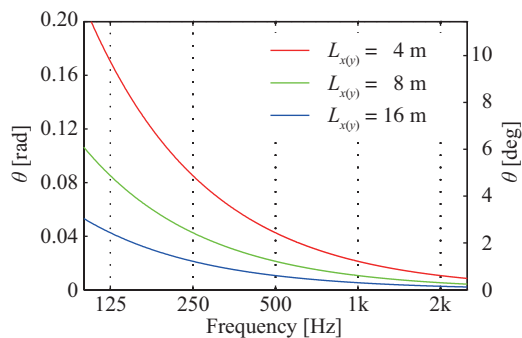


Figure 5.24 The critical angles of axial and tangential image sources with changing the length of walls.

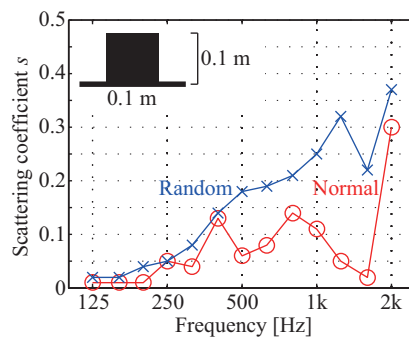


Figure 5.25 Normal/random-incidence scattering coefficients of the x -directional diffusive walls, substituted for the approximation theory, calculated by the numerical analysis (identical to Figure 5.19).

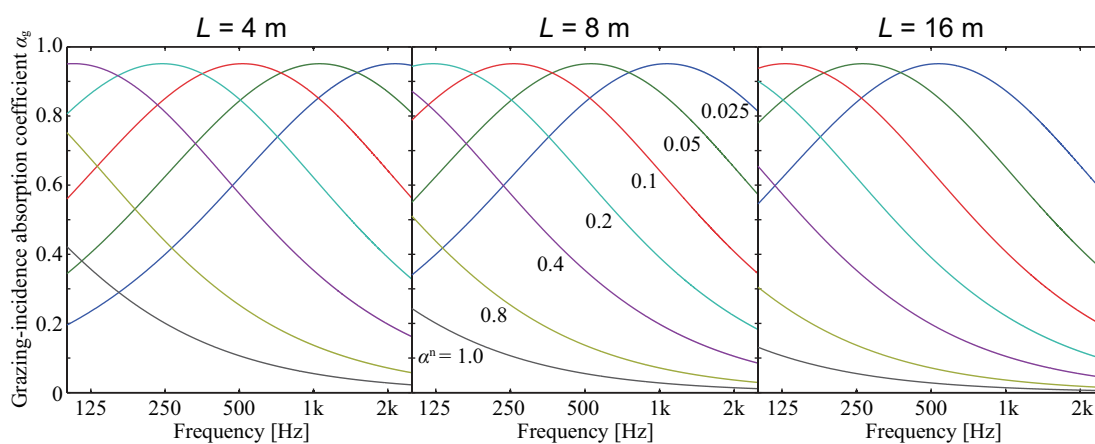


Figure 5.26 Grazing-incidence absorption coefficients for three lengths of walls, substituted for the approximation theory, obtained by Eq. (5.22), with changing normal-incidence absorption coefficients.

5.6.2 結果と考察

音波伝搬の性状

正方形かつ全面反射性の条件 (Case 1b) について, FDTD 法で求めた音圧レベル分布による音波伝搬の様子を図 5.27 に示す.

拡散体なしの場合 (Type FF), 壁での鏡面反射を繰り返し 100 ms 時点では分布に偏りが見られるが 500 ms 時点では概ね一様に分布し, 以後では比較的に均一に減衰している. 拡散体を設置した場合 (Type DF/DD), 拡散反射によって 100 ms 時点で分布の一様性が高まっており, Type FF に比べて速やかである. 対向して拡散体を設置した Type DD では, x 方向の伝搬成分は拡散反射によって速やかに減衰しているが, y 方向の成分は 1500 ms 時点でも往復反射を続けており, 他の条件と比べて減衰が顕著に鈍い. また, 拡散反射成分の一部が y 方向の鏡面反射成分に転化していることが示唆される.

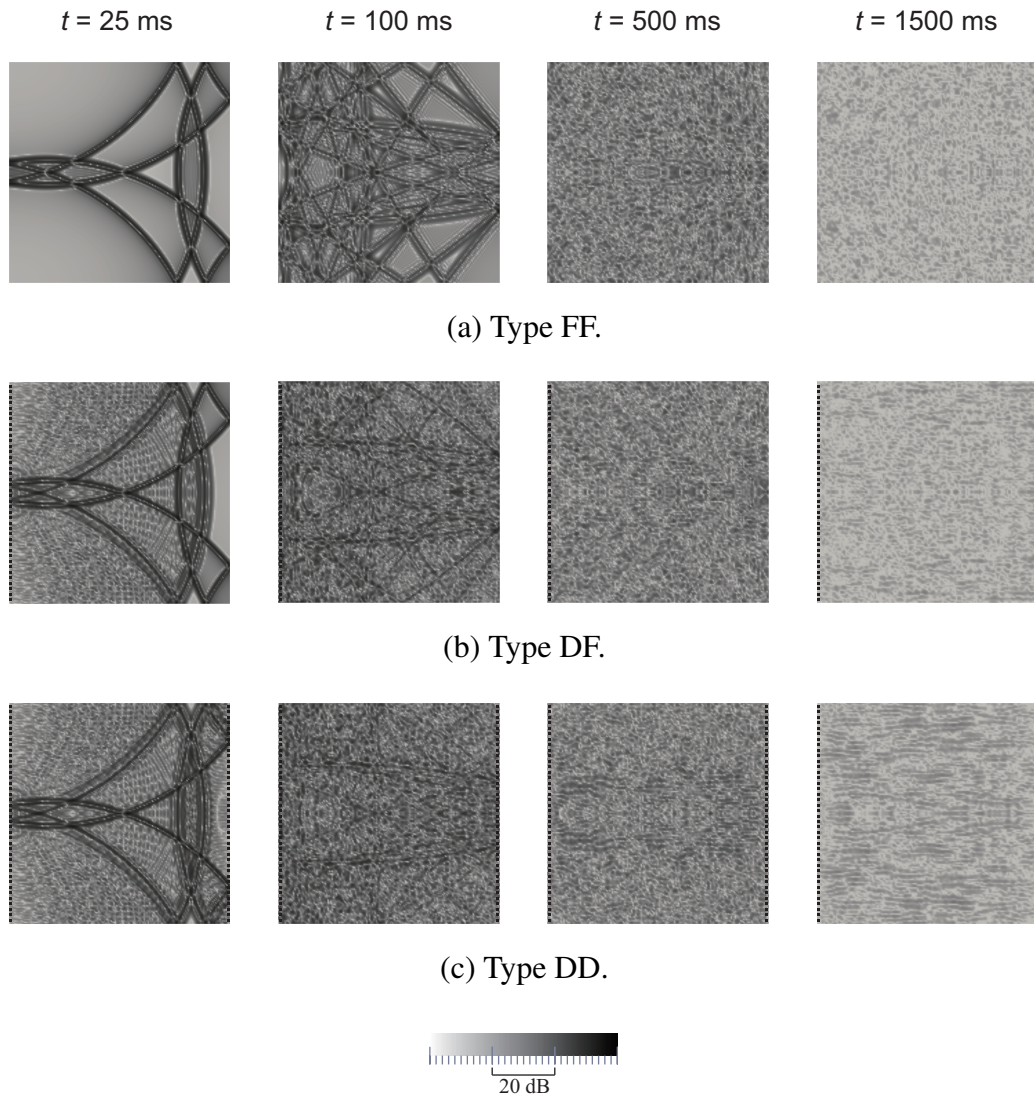


Figure 5.27 Sound pressure level distributions of Case 1b.

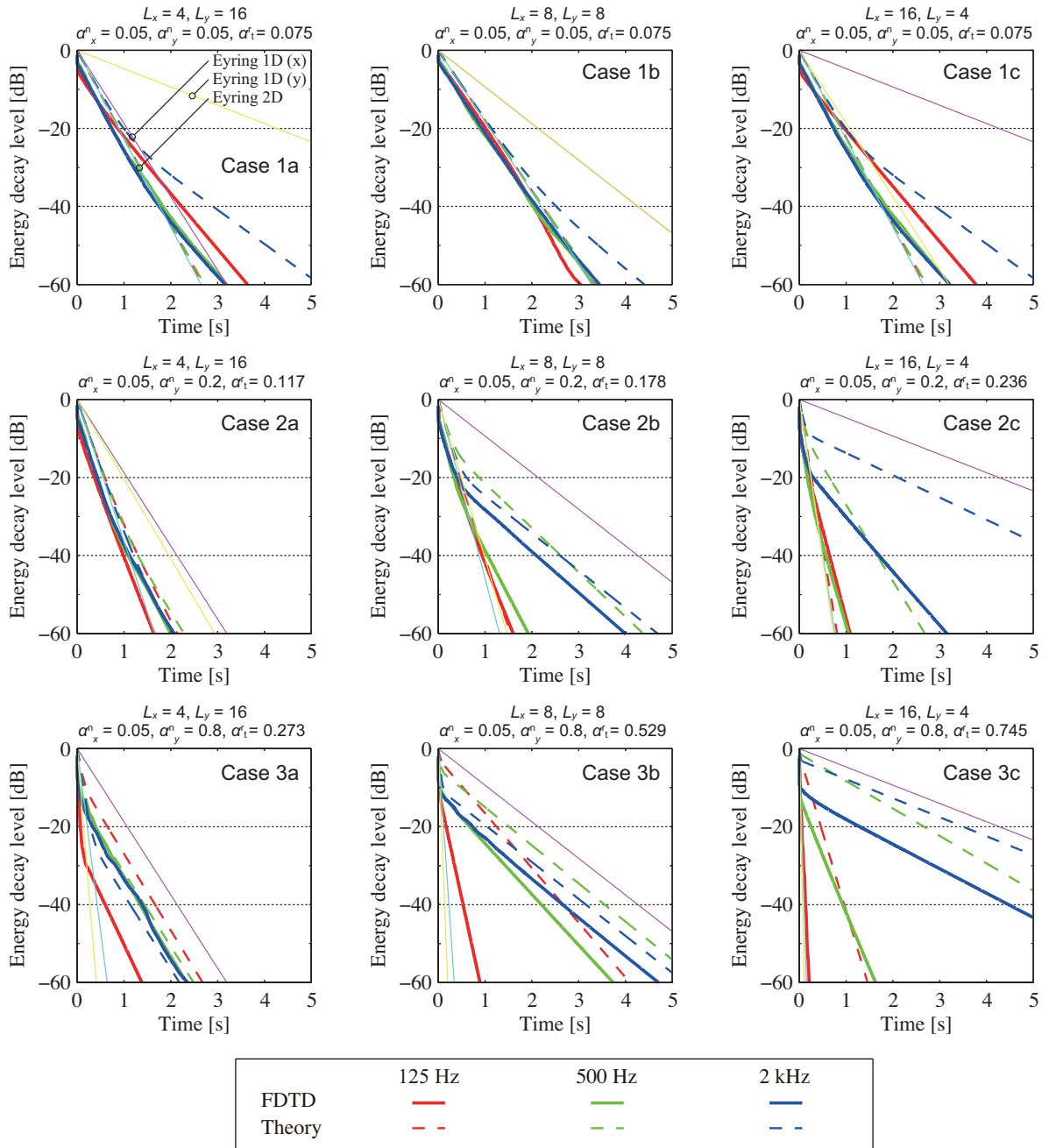
残響減衰の性状

平滑壁の場合 拡散体なしの場合 (Type FF) の残響減衰曲線を図 5.28(a) に示す。

全面反射性とした場合 (Case 1a/1b/2c) については, 正方形室 (Case 1b) では周波数帯域によらず 2 次元 Eyring 値と概ね一致して直線的に減衰しており, 理論値と解析値の対応は比較的に良い。扁平形の Case 1a と Case 1c については, 同一の室であるため理論値は一致し, 解析値は音源・受音点位置の影響のみが差異として表れる。解析値については, 全帯域で緩やかな湾曲が見られ, 高音域ほど湾曲が強く, 後期では吸音機会が少ない長手方向の 1 次元 Eyring 値に接近している。理論値についても概ね同様の傾向が見られるが, 低音域では 2 次元 Eyring 値と概ね一致した直線減衰を示し, 高音域の湾曲は解析値より強く, 湾曲の位置は初期側に異なっている。

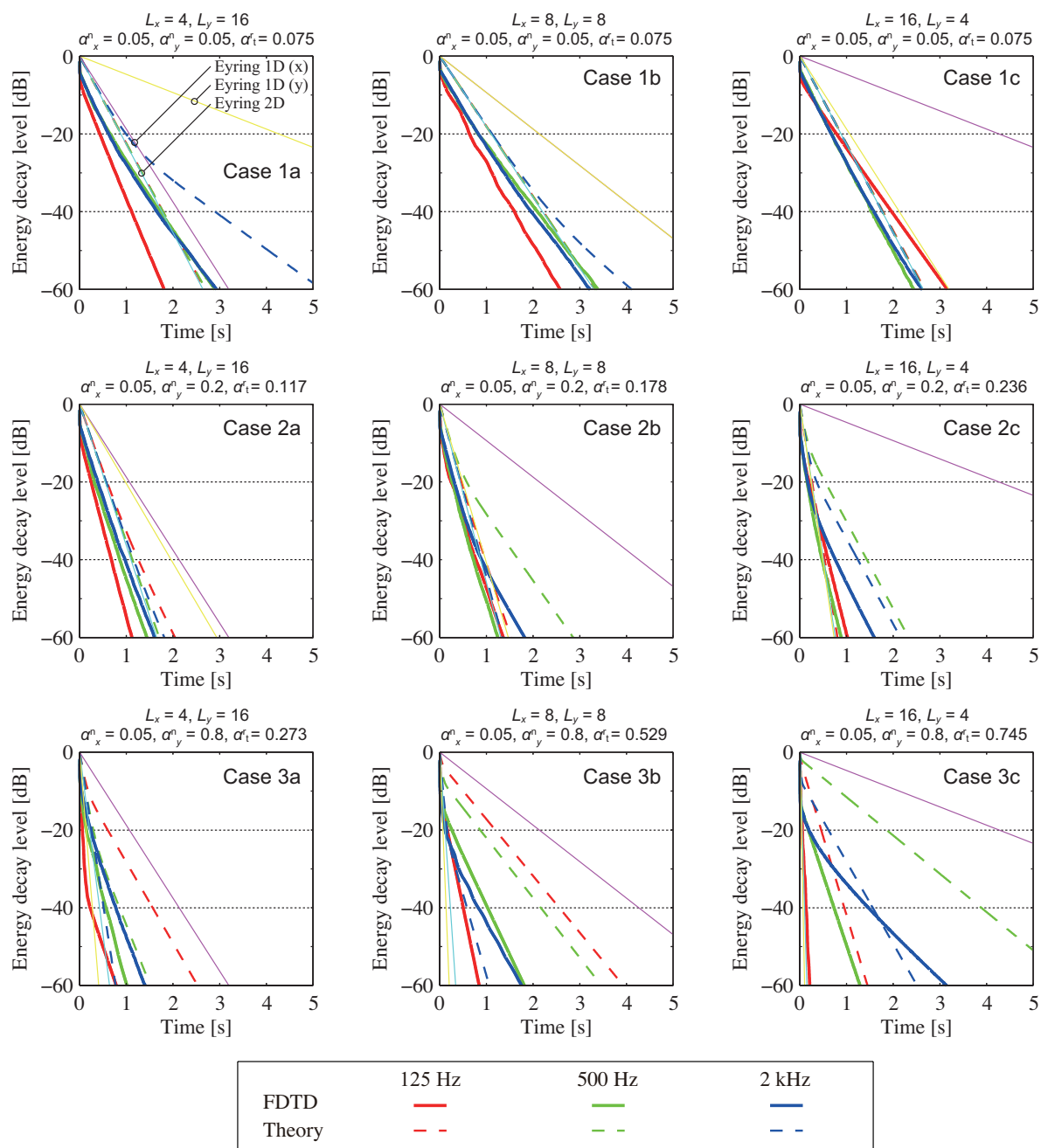
y 方向壁の吸音率を 0.2 とした場合 (Case 2a/2b/2c) については, 全面反射性とした Case 1a/1b/1c の結果とそれぞれ比較すると, 初期の減衰については解析値, 理論値ともに速やかになっているが, 後期については L_x が大きい条件ほど x 方向壁による吸音機会が減少するため, x 方向の 1 次元成分が卓越し 1 次元 Eyring 値に接近するように湾曲が生じている。特に理論値の湾曲が強く, 解析値に対して残響が長い側に乖離している。これらの傾向は, y 方向壁の吸音率を 0.8 とした場合 (Case 3a/3b/3c) に顕著に見られる。

壁面拡散の影響 拡散体を設置した場合 (Type DF/DD) の結果を図 5.28(b) 及び (c) にそれぞれ示す。拡散体なしの場合 (Type FF) と比較して, 1 面設置の場合 (Type DF) には解析値, 理論値ともに減衰が速やかになっており, 特に高音域で顕著である。対向 2 面設置時 (Type DD) については, y 方向壁を吸音性とした場合には Type DF より速やかに減衰する傾向が見られるが, 反射性とした場合 (Case 1a/1b/1c) には拡散体を設置することにより却って減衰が鈍くなっている。この傾向は y 方向の壁間距離 L_y が大きい場合, 及び拡散体の乱反射率が大きい高音域に顕著であり, x 方向壁で拡散反射した成分が y 方向壁間で多重鏡面反射を繰り返すことに起因していると考えられ, 音波伝搬の性状 (図 5.27) と対応する。



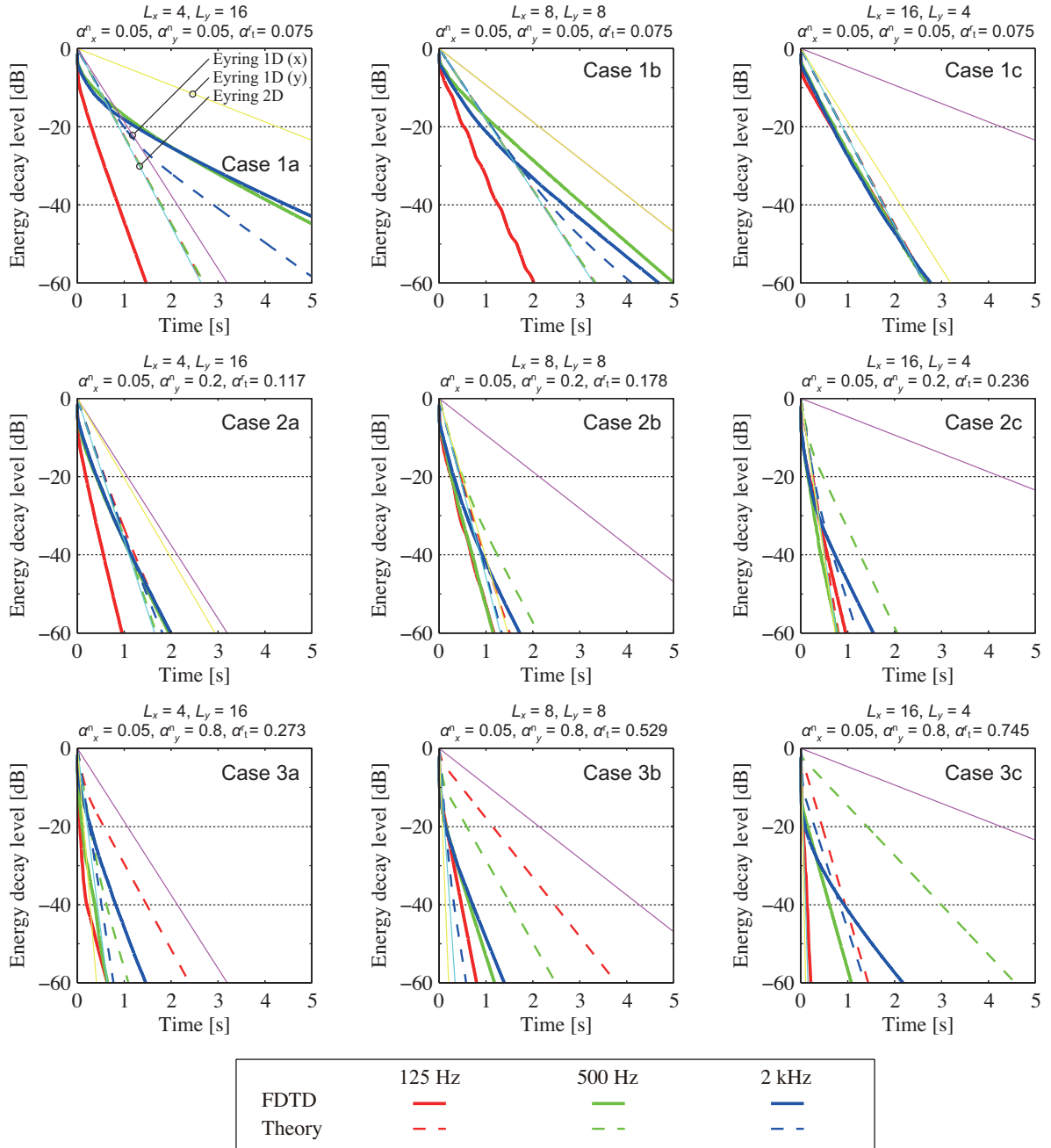
(a) Type FF.

Figure 5.28 Energy decay curves calculated by the FDTD method and by the approximation theory at three frequency bands.



(b) Type DF.

Figure 5.28 continued.



(c) Type DD.

Figure 5.28 continued.

残響時間 残響時間 T_{30} (−5 to −35 dB) を図 5.29 に示す．残響減衰曲線に関する上述の傾向と概ね同様であるが，以下には室アスペクト比と吸音面配置の観点から整理する．加えて，残響時間の同定区間に関する検討を行う．

室アスペクト比の影響 不均等吸音室の解析値については，Type FF では y 方向壁の吸音により x 方向成分が卓越するため，鏡面反射性が強い高音域ほど残響時間は長くなっている．また， L_y が大きい条件ほど低音域から 1 次元 Eyring 値に接近しており，平行壁間残響の結果（第 5.5 節）と類似した傾向である．Type DF/DD については x 方向成分が拡散体により散乱され，y 方向壁面で吸音されるため残響時間は減少し，その傾向は垂直入射乱反射率と対応している．理論については，拡散体設置条件に依らず低音域で解析値に対して過大評価側に乖離しており，この要因として室稜線で生じる端部散乱の影響や拡散体の実効的な吸音の影響が考えられる．

吸音面配置の影響 均等吸音室の解析値については，Type FF では 2 次元 Eyring 値付近を示しているが，Type DF/DD では拡散体の実効的な吸音により低音域で値が吸音性である y 方向の 1 次元 Eyring 値を下回る場合が見られる．対向 2 面に拡散体を設置した Type DD の中音域では残響時間が顕著に長くなっており，拡散反射成分が y 方向の鏡面反射成分に転化したことに起因すると考えられる．この転化は本理論では想定していないため大きく乖離し，予測が不可能である．Omoto^[202] は鏡面・拡散反射の可逆性を考慮したモデルを提案しており，さらなる発展が期待される．

同定区間の影響 Case 1b 及び Case 3a/3b/3c に関して，同定区間を変化させた残響時間と解析値に対する理論値の相対誤差を図 5.30 に示す．下に凸である残響減衰曲線は初期で同定した残響時間は後期に比べて小さくなると考えられ，Case 3c の理論値を除いてその傾向が見られる．吸音面が大きい Case 3c では最初期に y 方向の 1 次元成分及び 2 次元成分が吸音され，反射性の x 方向の 1 次元成分が支配的となり，全同定区間内で直線減衰を示している．相対誤差については，Case 1b では同定区間の影響に傾向を捉えがたいが，その他の条件では最初期の T_{10} (−5 to −15 dB) の条件で顕著に誤差が大きく，その他は同程度であり，全体的に低音域での誤差が比較的に大きい．また，誤差の程度は拡散体設置条件への依存性が小さいことから，誤差の要因として拡散体の実効的な吸音の影響は比較的に小さいと考えられる．

拡散体形状の影響 矩形波形状と三角波形状を対象として拡散体形状の影響を検討する．図 5.31 に両形状の乱反射率を示す．矩形波形状の場合は周波数特性に凹凸はあるものの周波数に比例して値が大きくなっている．三角波形状の場合は 500 Hz 以下ではほぼ 0 であるが，1 kHz 以上で急峻に値が大きくなっており，矩形波形状に比べて著しく大きい．

Case 1b 及び Case 3a/3b/3c に関する残響時間 T_{30} (−5 to −35 dB) を図 5.32 に示す．三角波形状では低中音域で乱反射率が微小であるため拡散体の影響は見られず Type FF と一致している．高音域については矩形波形状と同様に解析値の傾向を捉えている．

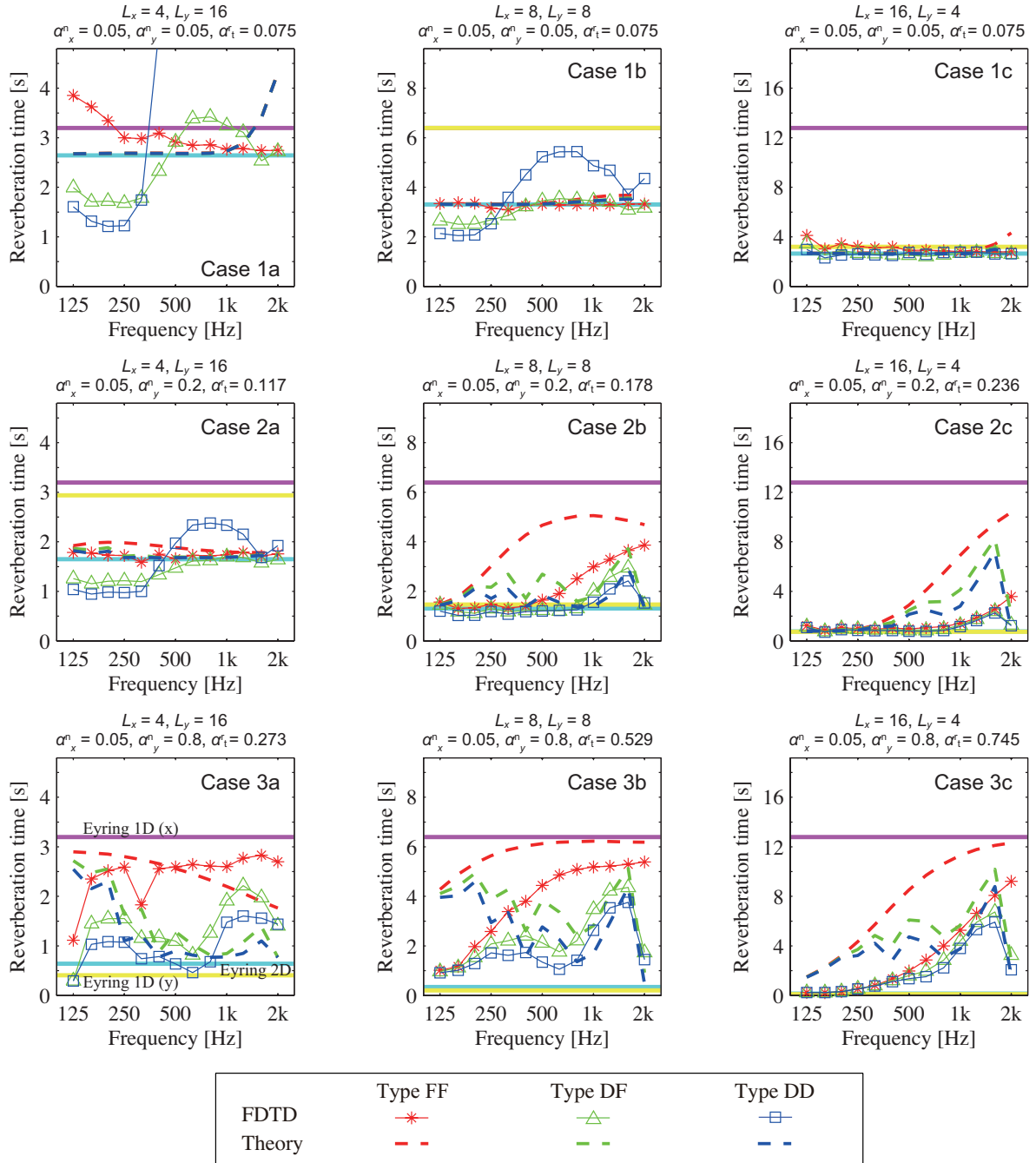


Figure 5.29 Reverberation times T_{30} (−5 to −35 dB) calculated by the FDTD method and by the approximation theory.

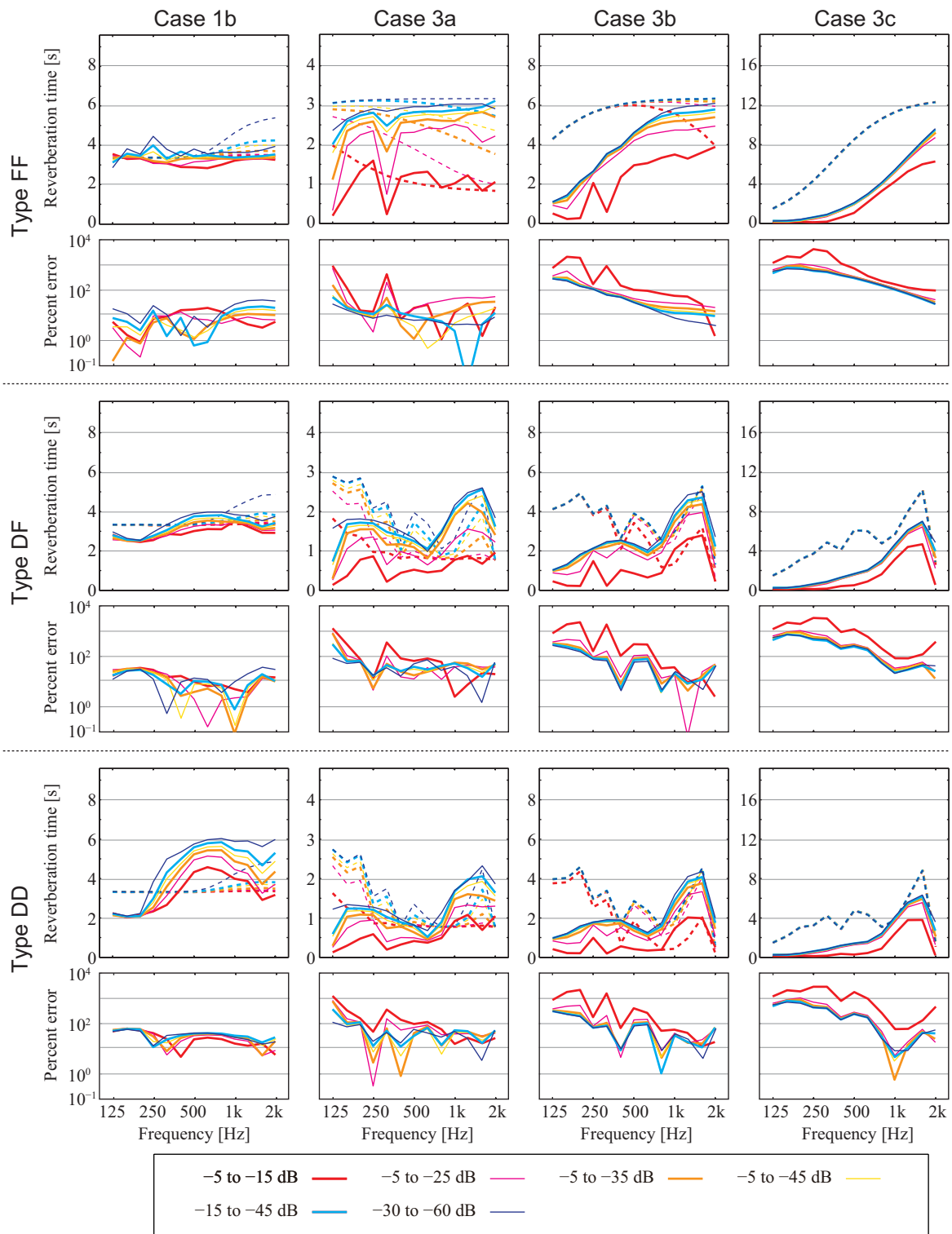
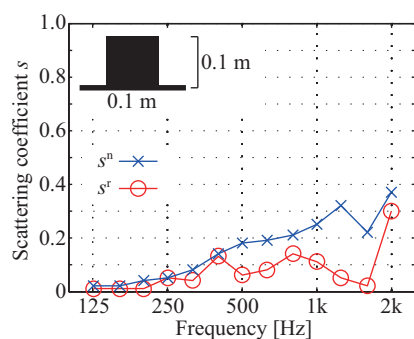
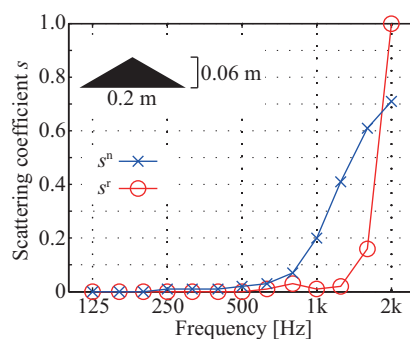


Figure 5.30 Reverberation times estimated by different decay level ranges. Thick: the FDTD method, stitched: the approximation theory.



(a) Square.



(b) Triangular.

Figure 5.31 Normal/random-incidence scattering coefficients of two types of diffusers (identical to Figures 4.2, 5.19).

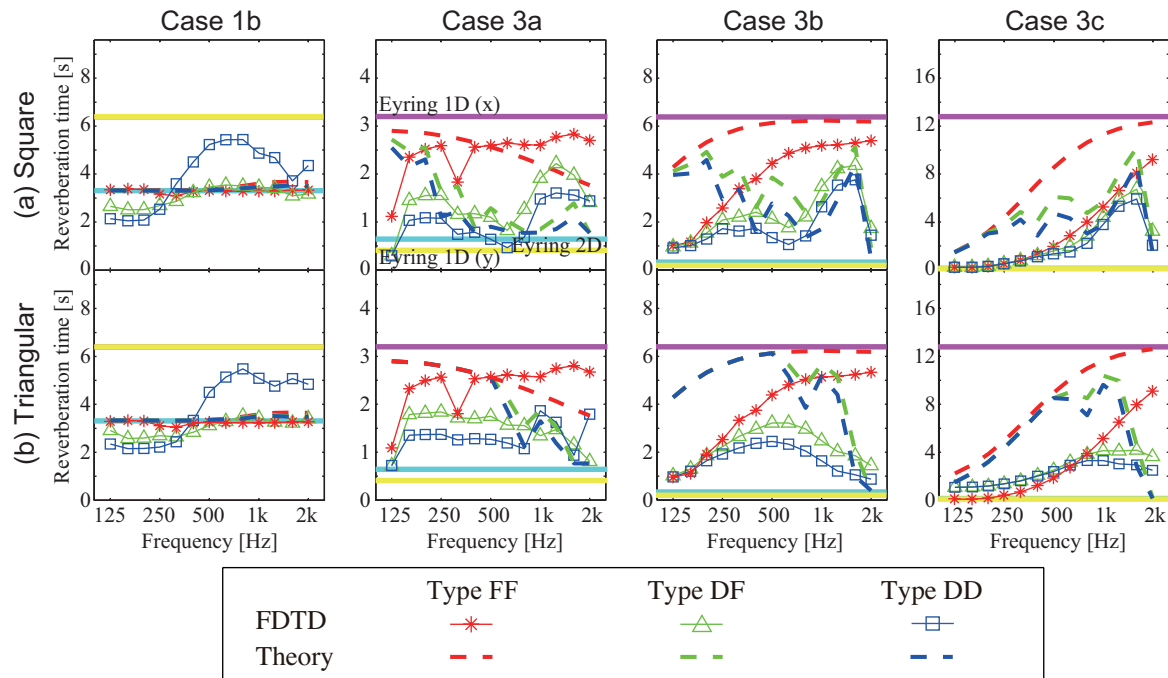


Figure 5.32 Reverberation times T_{30} (−5 to −35 dB) calculated by the FDTD method with different shapes of diffusers.

臨界角の範囲及び吸音率の平均方法の影響^[333] 壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論（以下 Sakuma 式と表記）は Hirata 式^[115]を基礎としているが、臨界角の定義と吸音率の平均方法を修正している。

軸近傍・面近傍音源群の範囲 軸近傍・面近傍音源の範囲を定義する臨界角 $\theta_{x(y,z)}$ について、Hirata の式では値が 4 倍、即ちより広い範囲を想定している。平均反射頻度の比 $\varepsilon_{axy(z)}$ 、 ε_{tz} 等も同様である。以下では、Sakuma 式及び Hirata 式における臨界角の定義をそれぞれ θ_S 、 $\theta_H = 4\theta_S$ と表記する。

各方向壁面の平均吸音率 式 (2.86) の $\tilde{\alpha}_{x(y,z)}$ に対し、Hirata 式では下記のように対向壁面の吸音率の算術平均となっている。尚、Hirata 式では入射角度依存の吸音率は導入されていない。

$$\tilde{\alpha}_{H,x(y,z)} = \frac{1}{2}(\alpha_{x(y,z)}^+ + \alpha_{x(y,z)}^-). \quad (5.23)$$

式 (2.95) の $\tilde{\alpha}_{xy(yz,zx)}^r$ 、式 (2.87) の α_{ob} についても、Hirata の式（以下 $\tilde{\alpha}_{H,xy(yz,zx)}^r$ 、 $\alpha_{H,ob}$ と表記）では通常の面積加重平均となっている。但し、 $\alpha_{x(y,z)}^+ = \alpha_{x(y,z)}^-$ の場合、 $\tilde{\alpha}_{x(y,z)} = \tilde{\alpha}_{H,x(y,z)}$ 、 $\tilde{\alpha}_{xy(yz,zx)}^r = \tilde{\alpha}_{H,xy(yz,zx)}^r$ 、 $\alpha_{ob} = \alpha_{H,ob}$ となる。

1 次元的・2 次元的音場の平均吸音率 式 (2.91) の $\alpha_{ax(y,z)}$ 、式 (2.94) の $\alpha_{txy(yz,zx)}$ に対し、Hirata 式では下記で与えられている。

$$\alpha_{H,ax(y,z)} = (1 - \varepsilon_{ax(y,z)})\tilde{\alpha}_{H,x(y,z)}^r + \varepsilon_{ax(y,z)}\tilde{\alpha}_{H,yz(zx,xy)}^r, \quad (5.24)$$

$$\alpha_{H,txy(yz,zx)} = (1 - \varepsilon_{tz(x,y)})\tilde{\alpha}_{H,xy(yz,zx)}^r + \varepsilon_{tz(x,y)}\tilde{\alpha}_{H,z(x,y)}^r, \quad (5.25)$$

但し、 $\varepsilon_{ax(y,z)} = \sqrt{\varepsilon_{axy(yz,zx)}\varepsilon_{axz(zx,xy)}}^{[319]}$ 。式 (5.23)–(5.25) が平均反射頻度の比による Sabine 的な平均であるのに対し、対応する Sakuma 式における式 (2.86)、(2.91)、(5.25) は、式 (2.91) を変形した次式の通り平均反射頻度の比による Millington 的な平均となっている。

$$-\ln(1 - \alpha_{ax}) = -\{\ln(1 - \tilde{\alpha}_x^n) + \varepsilon_{axy} \ln(1 - \tilde{\alpha}_y^g) + \varepsilon_{axz} \ln(1 - \tilde{\alpha}_z^g)\}. \quad (5.26)$$

以下では、Sakuma 式及び Hirata 式における α をそれぞれ α_S 、 α_H と表記する。吸音面が偏在している場合、 $\alpha_S > \alpha_H$ となる。

ケーススタディ Sakuma 式に対して、臨界角の範囲と吸音率の平均方法を Hirata 式による定義に変化させ、FDTD 法による数値解析結果と比較する。Case 3c を対象とした結果を図 5.33 に示す。

Sakuma 式に基づく残響減衰曲線 (E) を、その各成分 (E_t 、 $E_{ax(y)}$)、Eyring 式に基づくもの (E_{Eyring}) と併せて図 5.33(a) に示す。接線方向音源群、軸近傍音源群それぞれによる残響減衰曲線の傾きが異なっていることが確認できる。高音域では E_{ax} 成分の傾きが緩く、全体の残響減衰を支配している。しかしながら、解析値と比較すると周波数に依らず残響が長い結果となっており、特に低中音域で顕著である。

Sakuma 式に対して、平均吸音率を α_H で与えた場合の残響減衰曲線を図 5.33(b) に示す。 $\alpha_S > \alpha_H$ の関係にあるものの、臨界角が小さい高音域では Paris の式に基づく擦過入射吸音率は $\alpha_S^g < \alpha_H^g$ となるため勾配が急峻となっている。

Sakuma 式に対して、臨界角を θ_H で与えた場合の残響減衰曲線を図 5.33(c) に示す。臨界角が大きい場合、明らかに残響減衰が速やかになると考えられ、周波数に依らずにその傾向が表れており、解析値と勾配が良く対応している。

Sakuma 式に対して、平均吸音率を α_H 、臨界角を θ_H で与えた場合の残響減衰曲線を図 5.33(d) に示す。低中音域で数値解析結果に接近する傾向が見られるが、高音域では残響減衰の勾配が急峻となり乖離している。

以上より、理論的根拠は不明であるが、Sakuma 式に対して臨界角として θ_H を与えることで数値解析結果に接近することがわかった。数値解析では拡散体の実効的な吸音や室稜線で生じる端部散乱により見かけ上の吸音が増加していると考えられるが、この影響に対して臨界角の範囲を広げることで埋め合わせているものと推察される。翻って、このことから拡散体の実効的な吸音や端部散乱の影響は周波数依存性があると推察される。

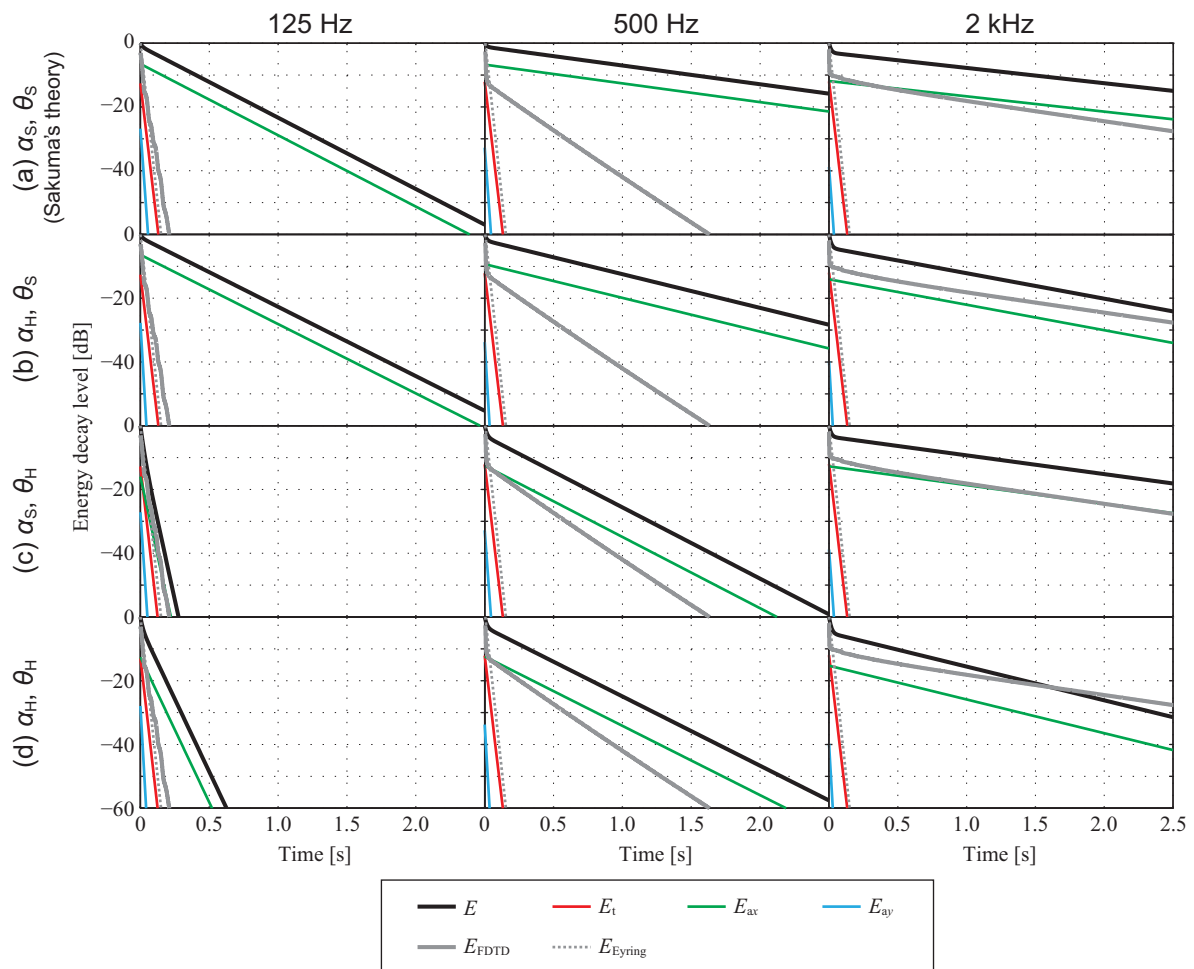


Figure 5.33 Energy decay curves of Case 3c, calculated by theories, Eyring's formula and the FDTD method.

室稜線で生じる端部散乱の影響 波動場では室稜線における反射波に位相干渉が生じ、見かけの上で音波が散乱すると考えられるが、この影響は幾何音響理論では考慮されていない。そこで、次式の通り、端部散乱の影響を考慮した乱反射率 s_{edge} を壁の端部領域に与え（図 5.34）、壁全面に面積加重平均を行い壁の乱反射率 s_{wall} に加算した実効的な乱反射率 s_{eff} を用いた理論計算を行い、波動音響解析の結果と比較する。

$$s_{\text{eff}} = s_{\text{wall}} + s_{\text{edge}} \times 2L_{\text{edge}}/L, \quad (s_{\text{eff}} \leq 1) \quad (5.27)$$

但し、 L_{edge} は端部長さ [m] であり、 s_{edge} とともに 3 種の既往研究から以下のように設定する。

1. Farina^[89] model :

$$s_{\text{edge}} = (1 - s_{\text{wall}}) - (1 - s_{\text{wall}}) \frac{d_{\text{edge}}}{L_{\text{edge}}}, \quad L_{\text{edge}} = \lambda/2. \quad (5.28)$$

2. CATT Acoustic^[49] model :

$$s_{\text{edge}} = 0.5, \quad L_{\text{edge}} = \lambda/4. \quad (5.29)$$

3. Zeng^[293] model :

$$s_{\text{edge}} = 0.5 \left(1 - \frac{d_{\text{edge}} \cos \theta}{\lambda} \right), \quad L_{\text{edge}} = \lambda. \quad (5.30)$$

但し、 d_{edge} は端部からの距離 [m] であり、 $0 \leq d_{\text{edge}} \leq L_{\text{edge}}$ 。

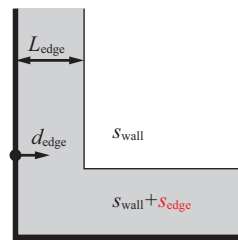


Figure 5.34 A model of edge scattering.

Farina model は、壁端部 ($d_{\text{edge}} = 0$) で最大値 $s_{\text{eff}} = 1$ を、 $d_{\text{edge}} = L_{\text{edge}}$ で最小値 $s_{\text{eff}} = s_{\text{wall}}$ を示すこととして線形補間したモデルである。CATT Acoustic model は端部に一様に $s_{\text{edge}} = 0.5$ を与えるモデルである。Zeng model は、壁端部 ($d_{\text{edge}} = 0$) で極大値を、 $d_{\text{edge}} = L_{\text{edge}}$ で極小値を示すこととして線形補間している点については Farina model に類似しているが、加えて入射角度が考慮されており、垂直入射時に極小値を示し、入射角度が大きくなるに従って値が大きくなる。尚、Zeng model の定義域は $0 \leq s_{\text{edge}} \leq 0.5$ であ

る．端部長さの定義は各モデルで異なっているが，理論的根拠は示されておらず，回折理論等による考察が望まれる．以上より，端部散乱の影響は周波数及び壁長に依存する乱反射率として理論計算に与えられる．

ケーススタディ Case 1b 及び Case 3a/3b/3c について，3 種の端部散乱モデルを導入した理論計算による残響減衰曲線を FDTD 法解析の結果と併せて図 5.36 に示す．また，理論計算に用いた $L_{x(y)} = 4, 8, 16$ m で面積加重平均を行った s_{edge} を図 5.35 に示す．Zeng model の θ として，乱・垂直・擦過入射を定義する各角度範囲の平均値を与えた．壁を全面反射性とした Case 1b では，端部散乱の影響によらず近似値は解析値とともに 2 次元 Eyring 値と概ね一致している．y 方向壁を吸音性とした場合 (Case 3a/3b/3c) では，端部散乱を考慮することで周波数特性が解析値に接近しており，特に低音域で顕著である． s_{edge} が小さい高音域においても，x 方向の 1 次元残響が支配的な Case 3b/3c では解析値に接近している．一方，Case 3a の高音域では x 軸近傍音源個数に関する臨界角 θ_x が室アスペクト比により小さくなり，同定区間で 2 次元残響減衰が支配的になるため s_{edge} が及ぼす影響は小さい．端部散乱のモデル化の影響としては，Farina model と CATT Acoustic model は概ね一致しているが，Zeng model は比較的に勾配が急峻である．理論との対応は一長一短であり，室アスペクト比に依存して関係が異なることから，端部散乱影響は室アスペクト比に依存する可能性が示唆される．

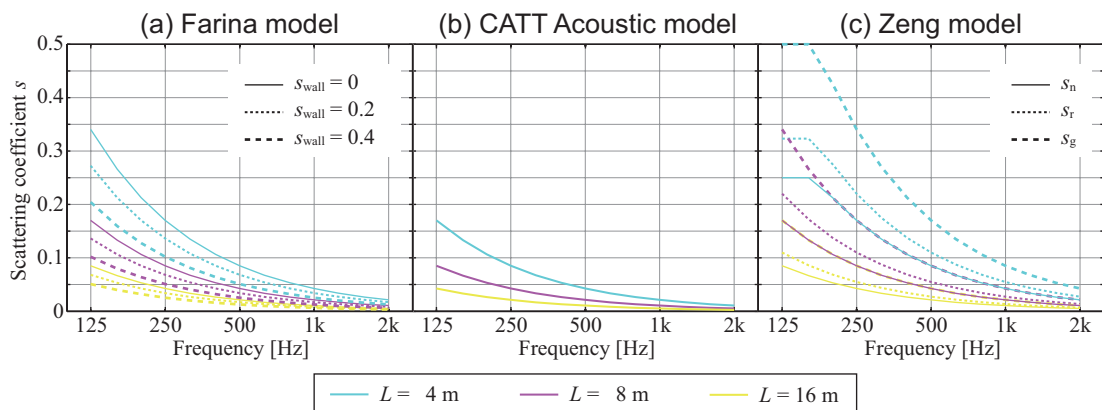


Figure 5.35 Additional scattering coefficients for the walls of three different width: (a) Farina model, (b) CATT Acoustic model and (c) Zeng model.

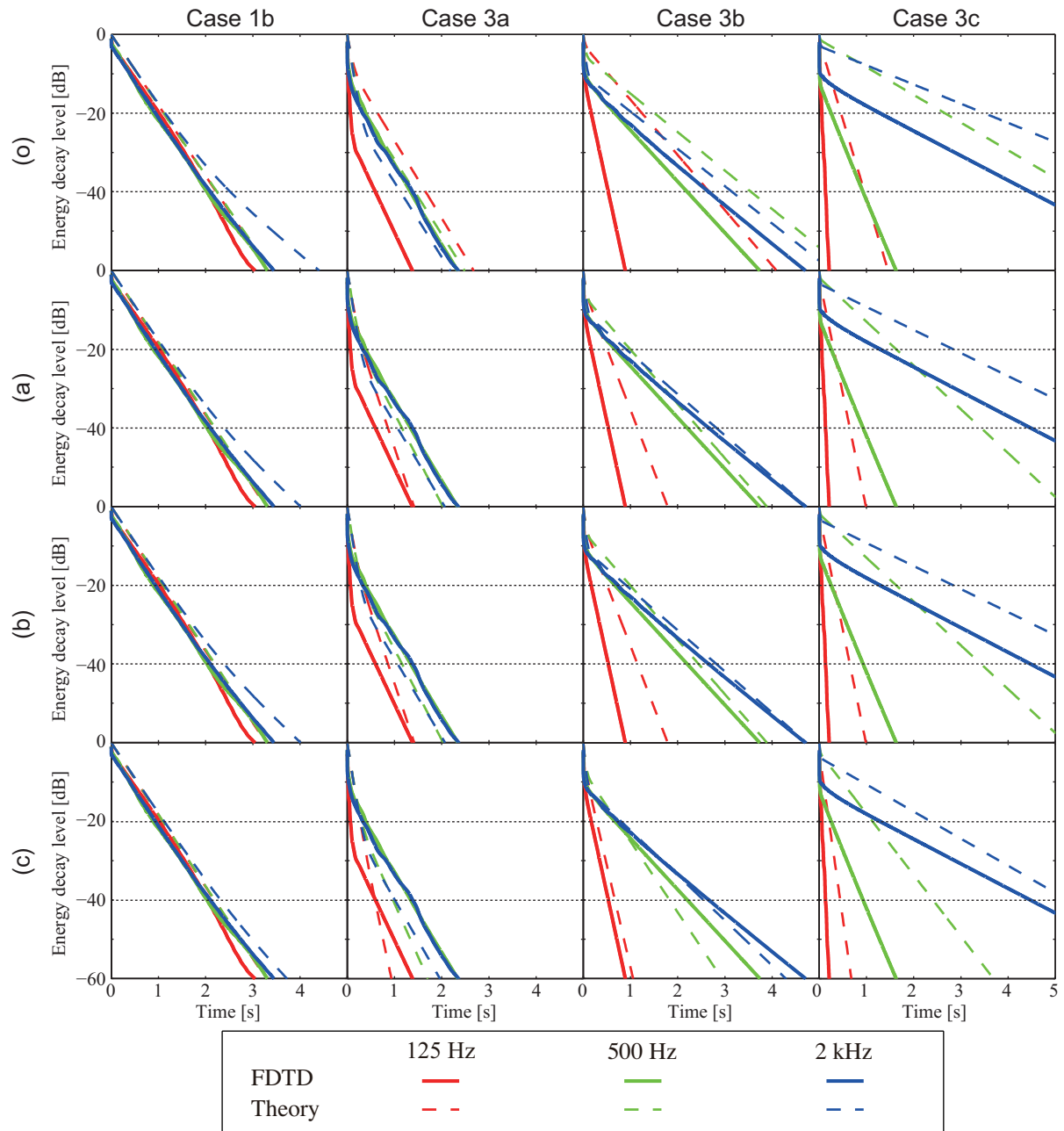


Figure 5.36 Energy decay curves calculated by the FDTD method and by the approximation theory without and with edge scattering at three frequency bands. (o) without edge scattering, (a) with Farina model, (b) with CATT Acoustic model and (c) with Zeng model.

拡散体による吸音の考慮 波動場では，拡散体の形状によって反射波の位相干渉が生じるため吸音性能を示すことが知られている [95,313]．また，波動音響解析では，拡散体を設置した場合に表面積が 2 倍に増加している．拡散体の実効的な吸音の影響を検討するため，簡単のために表面積の増加分として 2 倍の吸音率を与えて理論計算を行い，残響時間について FDTD 法による数値解析結果と比較する．

残響時間 T_{30} (−5 to −35 dB) を図 5.37 に示す．図 5.37(o) は本来の理論値，図 5.37(a) は拡散体の実効的な吸音を考慮した場合の結果であり，比較のために図 5.37(b) には理論式に θ_H を与えた場合，図 5.37(c) には CATT Acousti model による端部散乱を考慮した場合の結果を併記している．

拡散体の実効的な吸音を考慮した場合には，自明ながら，Type DF 及び Type DD の全周波数帯域で残響が抑制され，低音域では解析値に接近しているが，高音域では過小評価側に乖離している．対して，臨界角の範囲や端部散乱を考慮した場合には乖離が見られる帯域があるものの，周波数特性の傾向は解析値に類似している．特に，臨界角の範囲を広くした場合には良い対応を示しているが，Case 3a/3b の比較的に x 方向壁面が大きい条件では，拡散体を設置した場合に低中音域で過大評価側にやや乖離している．試みに，臨界角の範囲と端部散乱の両者を考慮した場合の結果を図 5.37(d) に示す．拡散体を設置した場合に解析値と良く一致する結果が見られる．

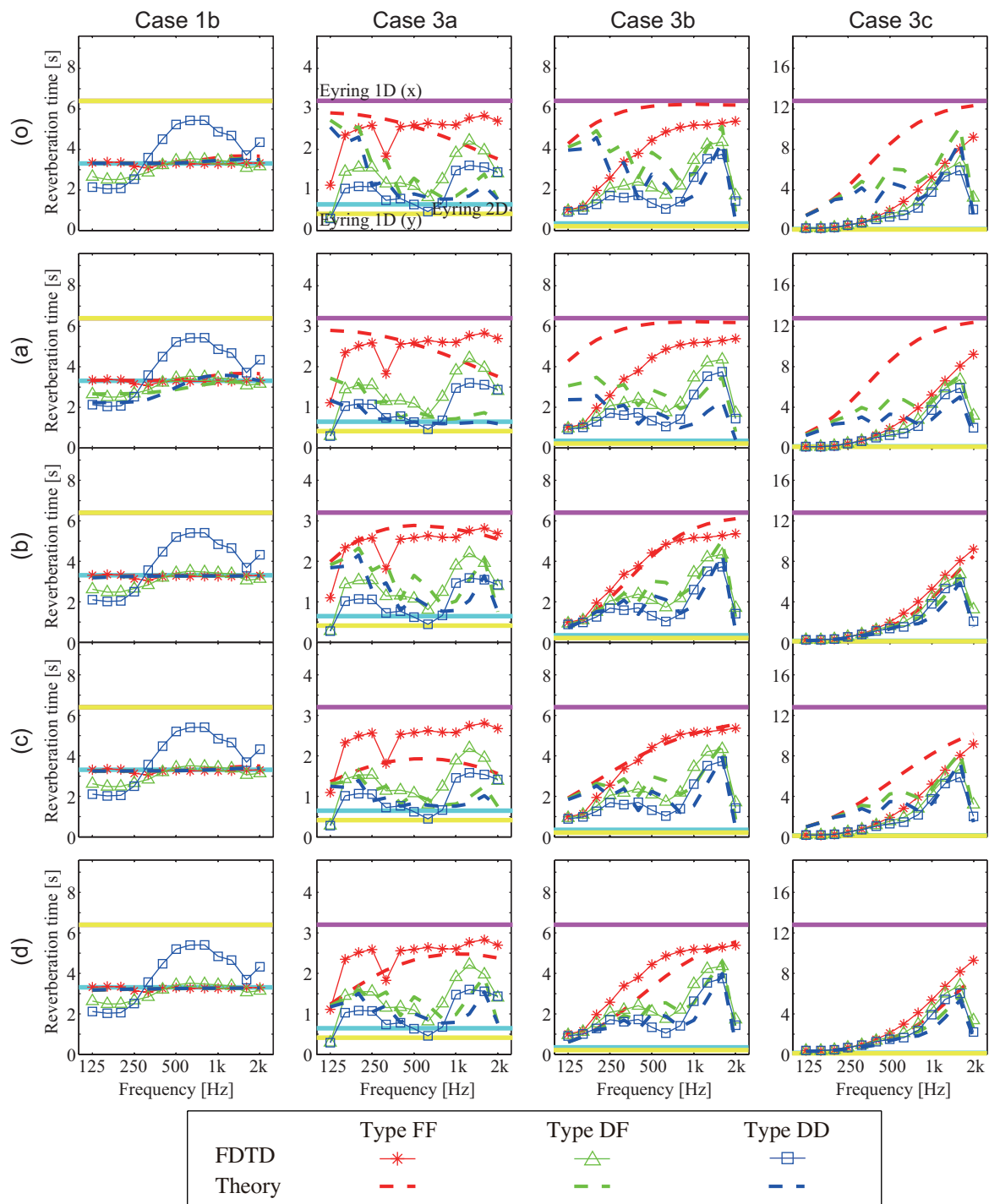


Figure 5.37 Reverberation times T_{30} (−5 to −35 dB) calculated by the FDTD method and by the approximation theory with various considerations for estimating wave nature. (o) the original theory, (a) with effective absorption of diffusers, (b) with θ_H , (c) with edge scattering modeled by CATT Acoustic and (d) with θ_H and with edge scattering.

5.7 波動音響解析による 3 次元矩形室内残響に関する検討

5.7.1 検討方法

直方体室と点音源からなる解析モデルを図 5.38 に示す．境界条件としては，全面反射性（reflec.: 垂直入射吸音率 $\alpha_n = 0.1$ 相当の実音響インピーダンス），天井のみ吸音（absorp.: $\alpha_n = 0.5$ 相当）の 2 種類を設ける．基本形状（noDiff）に対して，一次元周期構造の矩形拡散体（0.1 m 角 / 0.2 m 周期）を 8 通りに設置する（図 5.39）．

FDTD 法解析については，空間離散化幅は 0.025 m，時間離散化幅は 0.04 ms とする．音源には 2 kHz の 1/3 オクターブバンド上限周波数以下の成分が含まれる Gaussian 関数を音圧の空間分布として与える．0.2 m 間隔の格子状に 315 点の受音点を設定し，全点での平均エネルギー減衰及び受音点 R での瞬時音響インテンシティを算出する．

理論計算

理論計算では，前節（第 5.6 節）と同様に，吸音率（乱・垂直・擦過入射値）として臨界角に基づく角度範囲内で平均化した値を与える．壁の乱反射率としては，乱・垂直入射時には境界要素法で算出した値（図 5.25）^[168] を，擦過入射時には 0 を与える．

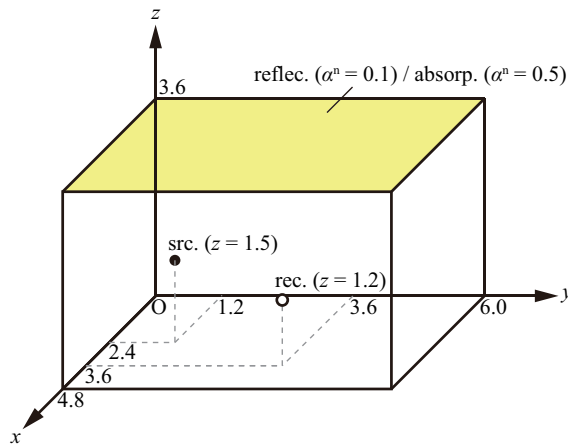


Figure 5.38 A rectangular room with a point source.

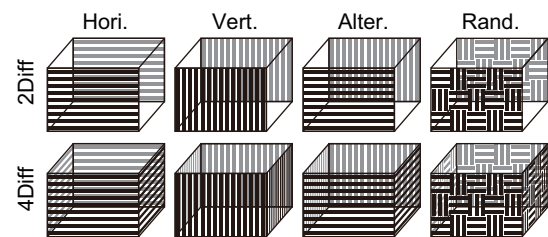


Figure 5.39 Arrangements of diffusers. Diffusive walls have square blocks of a side length of 100 mm, spaced at a pitch of 200 mm.

5.7.2 結果と考察

残響減衰の性状

残響減衰曲線 残響減衰曲線を図 5.40 に示す．全面反射性の場合，拡散体なし (noDiff) では，周波数帯域に依らず解析値，理論値ともに Eyring 値と概ね一致している．拡散体を設置した場合，理論値ではほぼ影響は見られないが，後期でやや湾曲していた条件で残響が抑制され直線的に減衰している．解析値については，解析値では初期の残響は抑制されるものの減衰に湾曲が生じている条件が見られる．解析値における湾曲の程度は拡散体の設置条件や周波数によって異なり，残響の長さは概ね Hori. > Rand. \approx Alter. > Vert. の傾向が見られる．特に，水平リブを全壁に設置した場合 (4Diff Hori.) には減衰の勾配が非常に緩く，拡散反射成分が鉛直方向の交互反射成分に遷移したものと推察される．

天井吸音時には，noDiff では中高音域で解析値，理論値ともに減衰が湾曲し，Eyring 値より長い側に乖離している．拡散体を設置した場合，理論値については残響が抑制され直線的に減衰しているが，解析値については却って残響が長くなっている条件もあり，特に長手 y 方向の交互反射を誘起すると考えられる Vert. で顕著である．吸音条件に関わらず拡散体を設置した場合には解析値は大きくばらつくが，理論値がその範囲内に含まれる条件が多い．

残響時間 残響時間 T_{30} (−5 to −30 dB) を図 5.41 に示す．全体的に残響減衰曲線と同様の傾向が見られるが，湾曲減衰時には同定区間に依存して値が異なると考えられる．また，FDTD 法解析では拡散体設置により吸音面積が増加していること，低音域で端部散乱が生じていること等が理論値の乖離要因として考えられる．

音響エネルギーの到来方向の性状

受音点 R で得られた瞬時音響インテンシティ^[86]を用いて，時間窓内で累積した到来方向分布の分析を行う．Staggered グリッドに基づく FDTD 法では音圧 p [Pa] と粒子速度ベクトル $\mathbf{v} = (u, v, w)$ [m/s] の定義点が時空間で異なるが，次式の通り瞬時音響インテンシティ I を算出する^[289,336]．

$$I_{i(j,k)}^n = P_{i(j,k)}^n \frac{u(v, w)_{i(j,k)+1/2}^{n-1/2} + u(v, w)_{i(j,k)-1/2}^{n-1/2}}{2} \quad [\text{W/m}^2], \quad (5.31)$$

但し， $q_{i(j,k)}^n$ は時刻 n における位置 $i(j, k)$ の物理量．ここで，音波の到来方向は xy 平面に関する方位角を ϕ ， z 方向に関する天頂角を θ として次式で得られる．

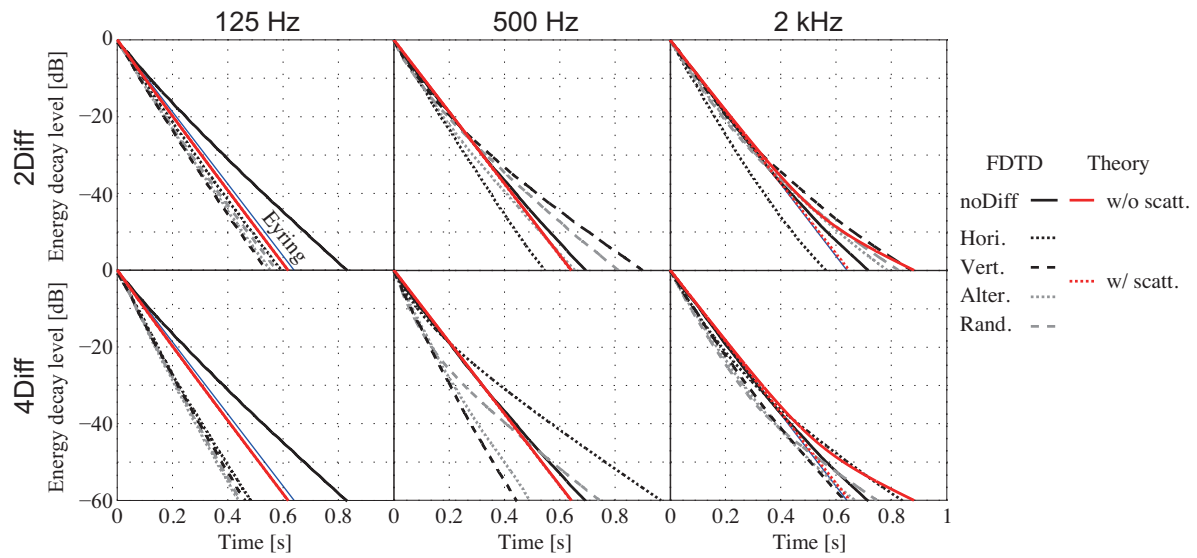
$$\phi_{i(j,k)}^n = \tan^{-1}(I_j^n / I_i^n) \quad [\text{rad}], \quad (5.32)$$

$$\theta_{i(j,k)}^n = \sin^{-1}(I_k^n / |\mathbf{I}^n|) \quad [\text{rad}], \quad (5.33)$$

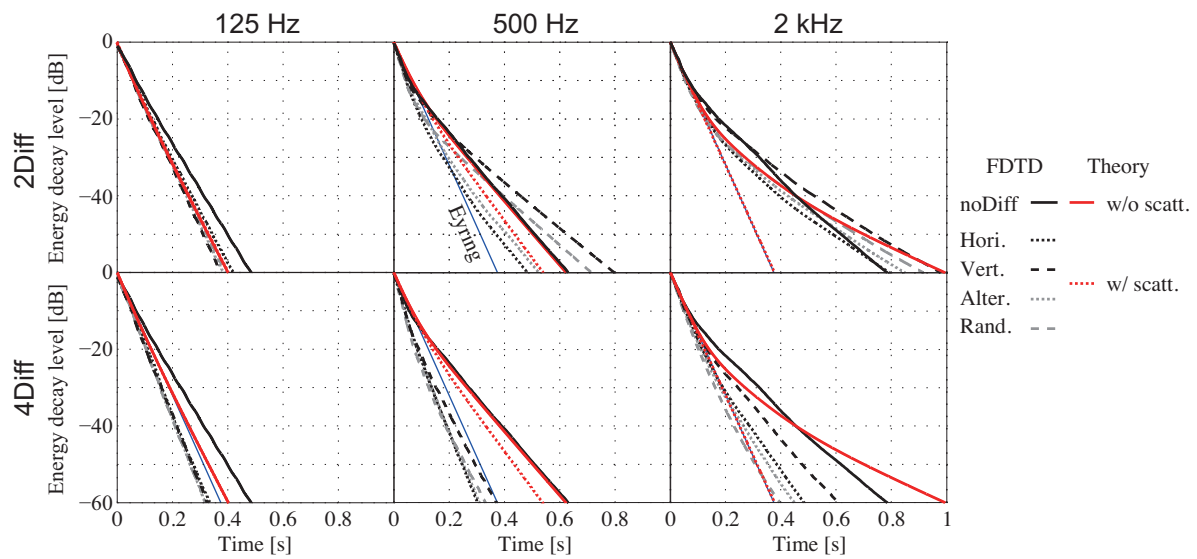
但し，

$$|\mathbf{I}^n| = \sqrt{(I_i^n)^2 + (I_j^n)^2 + (I_k^n)^2} \quad [\text{W/m}^2]. \quad (5.34)$$

時間窓は直接音到来時刻を 0 ms として 10, 20, 50, 500 ms までの 4 種類，方向離散角は 5° とし，直接音レベルで基準化した結果を図 5.42 に示す．10 ms までの累積値（赤線）は直接音及び初期反射音による離散的な分布であるが，壁面拡散（4Diff Hori.）により分布が広がることがわかる．時々刻々と分布が均一化し，50 ms（青線）程度で条件に依存する分布に概ね収束している．noDiff の場合，全面反射性では概ね均一な分布で発展しており，直線減衰することと対応する．天井吸音時には水平面（xy）内の鉛直成分が減少している．壁面拡散の影響としては，全面反射性では鉛直方向成分が大きくなり，交互反射が生じていることがわかる．天井吸音時にはその成分が吸音されるため，比較的に均一な分布を示している．



(a) Reflec.



(b) Absorp.

Figure 5.40 Energy decay curves calculated by the FDTD method and by the approximation theory at four frequency bands.

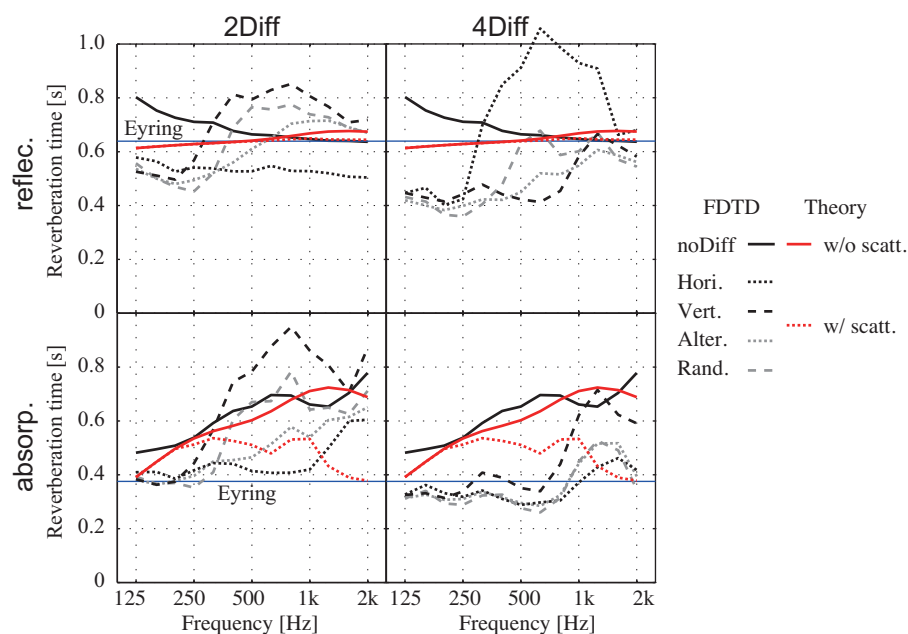


Figure 5.41 Reverberation times T_{30} (-5 to -35 dB) calculated by the FDTD method and by the approximation theory.

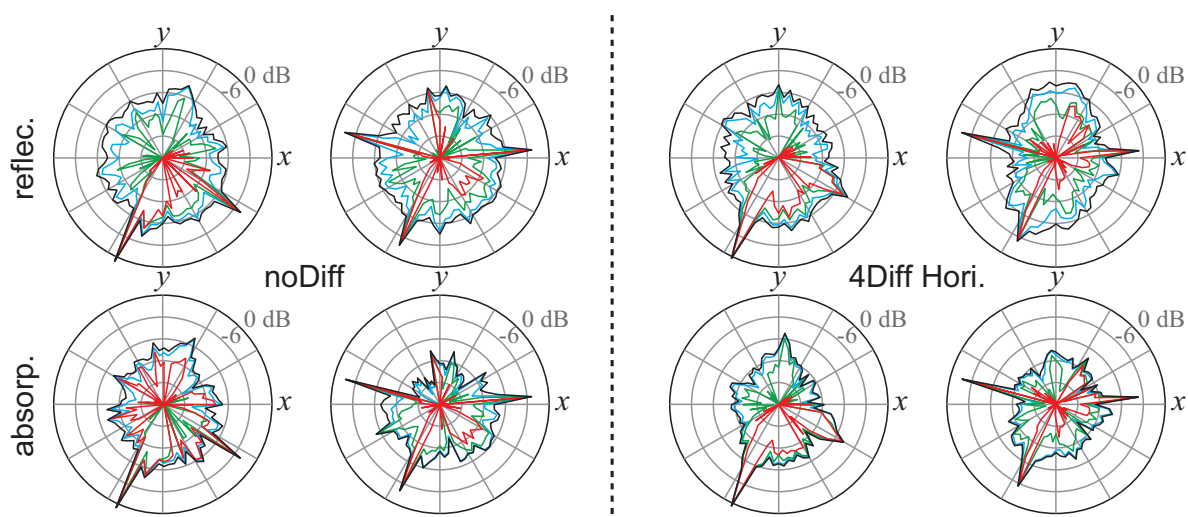


Figure 5.42 Accumulated distributions of arrival instant intensity for the case of noDiff and 4Diff in the two sections (red: 0 to 10 ms, green: 0 to 20 ms, blue: 0 to 50 ms, black: 0 to 500 ms).

5.8 結言

本章では、壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論の適用性に関する検証を、理論的な考察及び音響数値解析との対応の検討を通じて行った。主要な結果を以下に列挙する。

- 近似の影響 理論的な検討により、鏡面反射場における平均自由行路の近似に関する妥当性を示し、ケーススタディを通じて残響減衰の基本的な傾向を観察した。幾何音響解析との対応を検討した結果、全体残響については壁面拡散の影響を捉える等の良好な対応が示されたが、構成成分は乖離した。この乖離は各鏡像音源の減衰率のばらつきに起因することを明らかにしたが、波動論的な根拠に基づく臨界角の定義に関する妥当性を脅かすものではなく、各鏡像音源群の単一指数減衰を仮定する以上やむを得ないものと考えられる。
- 入射角度依存の物性値 局所作用を仮定した場合、臨界角が微小であることから入射角度依存の吸音率は Paris 式で推定可能であることを理論的に示した。乱反射率に関しては音響数値解析による算出手法が提案^[152]されており、本研究では既往の算出値^[168]を用いた。擦過入射値に関しては拡散体の形状によって大きな値を示すことが知られている^[152]が、音響数値解析によって入射角度依存値を算出できるにも関わらず本研究では便宜的に 0 としたことの影響が懸念される。但し、1 次元周期構造の拡散体の擦過入射乱反射率は入射方向に強く依存して値が変化することに留意する必要がある。
- 波動場への適用性 波動音響解析との対応を検討した結果、壁面拡散の有無を含めて傾向は概ね対応したものの乖離も見られた。但し、臨界角の範囲や室端部散乱の影響、残響時間を算出する際には同定区間を考慮することで理論は解析値に大きく接近することが示された。いずれも理論的根拠は乏しいものの波動場への実用的な設定方法として有効に機能するものと考えられる。拡散体の実効的な吸音の影響については、本研究では表面積の変化分を考慮したのみであり、位相干渉を含めた検討が課題として挙げられる。また、波動音響解析への対応は、幾何音響解析や従来の主な残響式に比べて本理論が優位であった。他方、理論的に考慮されていない鏡面・拡散反射場の可逆性の影響が波動音響解析で見られ、残響の予測が不可能であった。本章及び第 4 章で得られた拡散体が残響に及ぼす影響を踏まえて理論の適用の可否を判断することが望まれる。
- 室条件が残響減衰性状に及ぼす影響 理論の適用性に関する検討を通じて得られた副次的な知見として、先に挙げた可逆性の影響の他に、拡散体によるフラッターエコー等の平行壁間の往復反射の抑制効果や、拡散体形状や設置方法の影響を把握し、さらに平行壁間音場の残響時間に関する予測図表を作成した。

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

6.1 緒言

音場の評価は通常、音源・受音点間の音波伝搬情報が全て含まれる室内インパルス応答を基礎に、音響指標値等として所望の情報のみを抽出して行われる。二次的な情報を基に評価がなされることは同時に、不要とされる情報は棄却されていることを意味する。

音場の最も基礎的な性質である拡散性に関してはこれまで、空間・時間・周波数の各領域に関する評価方法が提案（第 2.5 節）されてきたが、多数点計測の必要性から検討事例が少なく、領域横断的な理解は不十分である。室内インパルス応答はあくまで、ある音源・受音点对の情報であるが、系としての室全体の寄与を受けていることから音場の拡散性に関係する情報も含まれていると考えられ、音場の拡散性に関する少数点計測の可能性が期待される。

近年、周波数領域における Schroeder 周波数^[211,233,241]（第 2.5.2 節）の類推から、Jeong *et al.*^[140,141] は時間領域における反射音のオーバーラップに着目して、鏡面反射音が支配的な時間と拡散反射音のそれとを分ける時刻として transition time を提案した。同時期に、Hanyu^[106] も少数の室内インパルス応答から音場の拡散性を評価することを目的とした指標として degree of time series fluctuation を提案している。両指標とも室内インパルス応答から残響減衰の影響を除去した反射音構造を用いて算出される。残響減衰の影響を除去することの意味は、エネルギー減衰過程における反射音の突発性を評価区間内で相対化することにある。しかしながら、これら反射音構造の抽出手法に関する理論的な関係性や影響要因、特に周波数分析時の影響に関しては明確でない上、狭義の拡散性（音響エネルギーの一様性及び到来方向の等確率性）との関係も不明である。

他方、室内インパルス応答の反射音構造に着目した分析は、突出した反射音（エコー）

の検知を目的として従来よりいくつかの分析手法^[139, 141, 163, 197]が考案されてきたが、いずれも目視等の定性的な評価に委ねられており物理的根拠に乏しい。一部、人間の聴覚特性を考慮した手法が提案^[284]されているものの、室条件による影響が整理されておらず、設計段階での利便性が高いとは言い難い。このような中で、減衰の影響を除去することで室内インパルス応答から反射音構造を抽出する分析手法は、音場の拡散性やエコー検出に関する定量的な分析が行えるものと期待できる。

本章では、室内インパルス応答の反射音構造に着目し、音場の拡散性とエコー検出に関する分析評価手法を考案することを目的として、以下の検討を行う。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諸手法を理論的に考察する。その中で反射音構造として得られる減衰率比と称する量に着目し、幾何・波動音響解析によるケーススタディを通じて影響要因を特定する。第二に、基本統計量により減衰率比の基本的性質を把握し、音場評価のための指標化の可能性を音響数値解析及び音響測定を通じて検討する。

6.2 理論的考察

6.2.1 室内インパルス応答の減衰除去

本節では、室内インパルス応答から減衰の影響を除去して反射音構造を抽出する、1) 指数関数を用いる方法、2) 残響減衰曲線を用いる方法、3) 一般化減衰曲線を用いる方法について述べ、簡単なケーススタディとともにその特徴を観察する。尚、結果的に次節以降では第二の方法である残響減衰曲線を用いる方法について検討を行う。

指数関数を用いる方法

Niese^[197]が定義するエコーに関する指標 ε (第 2.3.2 節) は、その算出に際して指数関数に対して室内インパルス応答が超過するエネルギーを用いる。類似して、Jeong *et al.*^[141]は残響時間から同定した指数関数で室内インパルス応答を除することで反射音構造を抽出する手法を compensated impulse response method と称して、後述する減衰率比に比べて算出が不安定であることを対比的に指摘している。図 6.1 は鏡像法で得たエネルギーインパルス応答に対して、同定区間を変化させて compensated impulse response method を施して反射音構造を抽出した結果である。尚、検討条件の詳細は第 6.3.2 節で後述するものと同様である。直線的に減衰する Case 1a では同定区間の影響はあまり見られないが、減衰が湾曲している Case 2b では同定区間に顕著に依存している。また、Case 2b はフラッターエコーが生じやすい条件であるが、結果は突発的な反射音の視認性が低く、却って Case 1b の方が局所的なピークが大きく表れている。

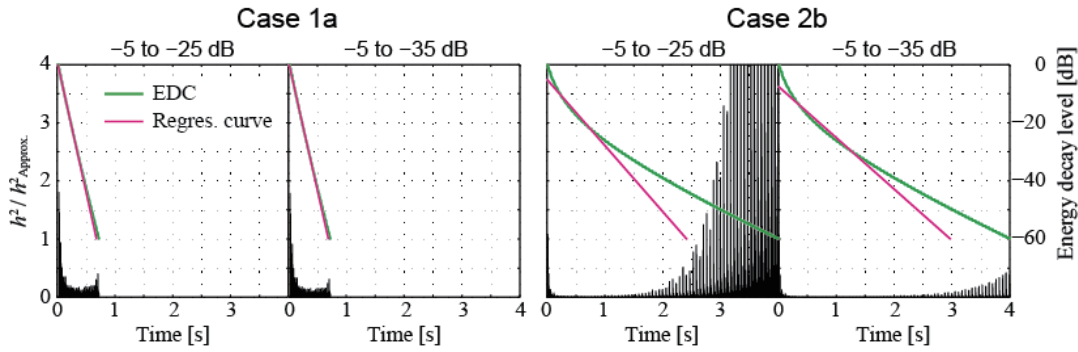


Figure 6.1 Energy decay curves and compensated impulse responses calculated by the image source method.

残響減衰曲線を用いる方法（減衰率比）

Jeong *et al.*^[140,141] 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．

$$D(t) = \frac{L(t + \Delta t_s) - L(t)}{\Delta t_s} \quad [\text{dB/s}], \quad (6.1)$$

但し, $L(t) = 10 \log_{10} E(t)$ [dB], $E(t) = \int_t^\infty I(\tau) d\tau$, $I(t)$ はエネルギーインパルス応答, $\Delta t_s = 1/f_s$ [s], f_s はサンプリング周波数 [1/s]．ここで, $\Delta t_s \rightarrow 0$ のとき,

$$D(t) = -\frac{10}{\ln 10} \frac{I(t)}{E(t)} \quad [\text{dB/s}], \quad (6.2)$$

となり, Hanyu^[106] 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．但し, 実用上, Jeong による手法は差分化の影響を受けるため, 以下では Hanyu による手法を用いる．また, 減衰率比の算出に際しては, 湾曲減衰時に平均的な減衰率 \bar{D} [dB/s] が評価区間に依存する懸念がある．

一般化減衰曲線を用いる方法

Huszy^[124] は, 室内インパルス応答 $h(t)$ [Pa] のサンプル間の平均化等を行うことなく, 独立かつ簡潔に残響減衰曲線の平滑化を行うために, 次式の通り, インパルス応答積分法に対して任意の冪指数 p を導入した一般化減衰曲線 $\Psi(t, p)$ を提案している．

$$\Psi(t, p) = \frac{2}{p} 10 \log_{10} \frac{\int_t^\infty |h(\tau)|^p d\tau}{\int_0^\infty |h(\tau)|^p d\tau} = \frac{2}{p} 10 \log_{10} \left(1 - \frac{\int_0^t |h(\tau)|^p d\tau}{\int_0^\infty |h(\tau)|^p d\tau} \right) \quad [\text{dB}]. \quad (6.3)$$

上式は, $p = 2$ のとき, 従来の残響減衰曲線と一致する．

ここで、減衰率 δ [1/s] で指数減衰する理想的な拡散音場では、次式の通り、一般化減衰曲線は p に依存しないことがわかる。

$$\Psi(t, p)_d = \frac{2}{p} 10 \log_{10} \frac{\int_t^\infty |\exp(-\delta \tau)|^p d\tau}{\int_0^\infty |\exp(-\delta \tau)|^p d\tau} = -\frac{10}{\ln 10} 2\delta t = -\frac{60}{T} t \quad [\text{dB}], \quad (6.4)$$

但し、 T は残響時間 [s]。対して、時刻 t_r [s] に直接音のみが存在する自由音場を想定すると、一般化減衰曲線は次式で表される。

$$\Psi(t, p)_n = \frac{2}{p} 10 \log_{10} \frac{\int_t^\infty |\delta(t - t_r)|^p d\tau}{\int_0^\infty |\delta(t - t_r)|^p d\tau} = \frac{2}{p} 10 \log_{10}(1 - H(t - t_r)) \quad [\text{dB}], \quad (6.5)$$

但し、 δ は Dirac のデルタ関数、 H は Heaviside の階段関数。上式より、 p の増加に伴って Ψ の絶対値が小さくなることがわかる。従って、エコーが生じている音場では、 p を大きくすることで突発的な反射音が相対的に大きくなると考えられる。

これらの性質を利用して Huszty は、式 (6.1) と同様に $\Psi(p, t)$ に対して時間に関する微分、即ち一般化瞬時減衰率、

$$G(t, p) = \left| \frac{\partial \Psi(t, p)}{\partial t} \right| \quad [\text{dB/s}], \quad (6.6)$$

を算出することでエコーを強調した反射音構造を抽出する手法を提案している。しかしながら、 $G(t, p)$ は dB/s の次元を持つため、異なる室間での比較には留意が必要である。

そこで、残響減衰の影響を除去するために、異なる冪指数 ($p = p_1, p_2$ 。但し、 $p_1 \neq p_2$) で算出した一般化減衰曲線における瞬時減衰率の比、即ち一般化減衰率比、

$$g(t, p_1, p_2) = \frac{G(t, p_1)}{G(t, p_2)}, \quad (6.7)$$

を求めることを想定する。ここで、理想的な拡散音場では、式 (6.4) より、常に $g(t, p_1, p_2) = 1$ となる。従って、 $g(t, p_1, p_2)$ は、室内インパルス応答の粗密や減衰の非線形性を捉えることができ、さらに、自由音場に関する上記の性質より、 p_1, p_2 の値に応じて（但し、 $p_1 > p_2$ ）、突発的な反射音を強調することができると考えられる。また、一般化減衰曲線は、冪指数 p を大きくすることで暗騒音の影響や有限長への打ち切りの影響を緩和することができるため、反射音構造分析においても高い安定性が期待できる。

冪指数の影響 次式の通り、2 種の指数関数の和で表される湾曲した室内インパルス応答を想定する。

$$h(t) = A_1 e^{-\delta_1 t} + A_2 e^{-\delta_2 t} \quad [\text{Pa}], \quad (6.8)$$

但し、 $A_{1(2)}$ は振幅 [Pa]、 $\delta_{1(2)}$ は減衰率 [1/s]。上式に対して $A_1 = 1$ 、 $A_2 = 0.0316$ 、 $\delta_1 = 6 \ln 10$ 、 $\delta_2 = 3 \ln 10$ を代入し、冪指数 p を変化させて算出した一般化減衰曲線 Ψ を図 6.2

に示す．冪指数が大きい場合に減衰の湾曲は急峻であるが湾曲部を除いて直線的に減衰しており，冪指数の増加とともに収束する傾向が見られる．ここでは滑らかに湾曲する減衰を想定したが，実際の不連続な応答においても突発的な反射音が減衰に局所的な湾曲を及ぼすと考えられ，冪指数の違いによって一般化減衰曲線上で異なる表れとなると推察される．

図 6.3 に一般化減衰率比 g を示す．一般化減衰曲線に示されている通り， $p_1 < p_2$ のときには湾曲部 ($t = 0.5$ s) を境として，前期では $G(t, p_1) < G(t, p_2)$ ，後期では $G(t, p_1) > G(t, p_2)$ となることから， g は 1 に対して上下する変化が見られる．図 6.3(a) は冪指数の差を一定 ($p_2 - p_1 = 2$) とした結果である．冪指数が小さいほど g のピークは大きいことから反射音の検出力は高いが，時間的な広がりが大きくなっているため反射音間で埋め合わせてしまうと考えられる．図 6.3(b) は $p_1 = 2$ として p_2 を変化させた結果である．冪指数に関わらず時間的な広がり是一定であり，冪指数の差が大きい場合にピークが大きくなることから反射音の検出に有効であると考えられる．

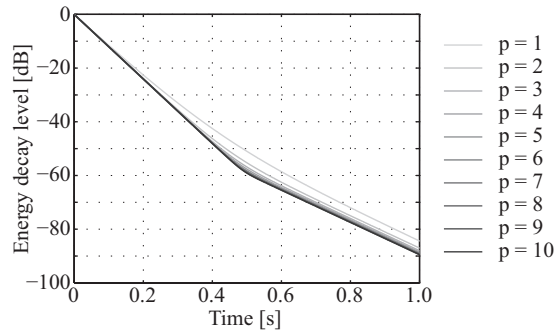


Figure 6.2 Representation of a double decay room impulse response by the generalized decay function with changing exponential number. Amplitude constants $A_1 = 1$ and $A_2 = 0.0316$, and time constants $\delta_1 = 6 \ln 10$ and $\delta_2 = 3 \ln 10$ were used to synthesize the room impulse response.

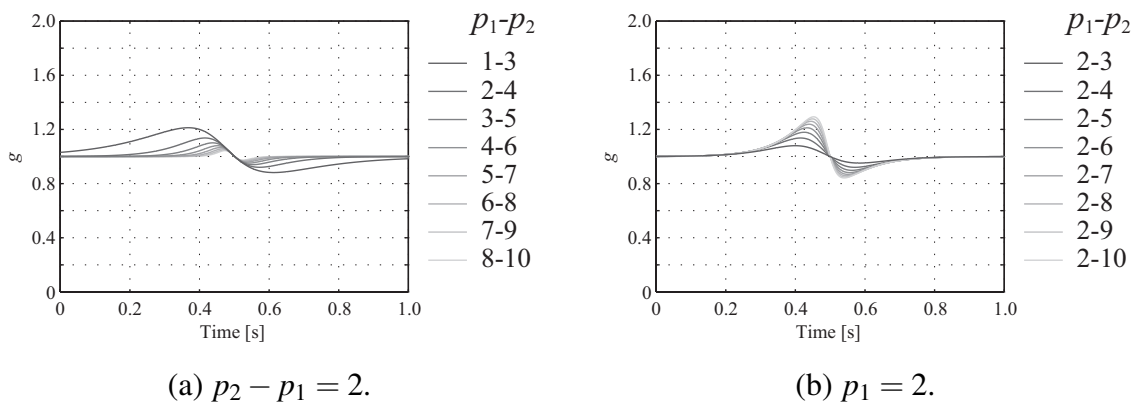
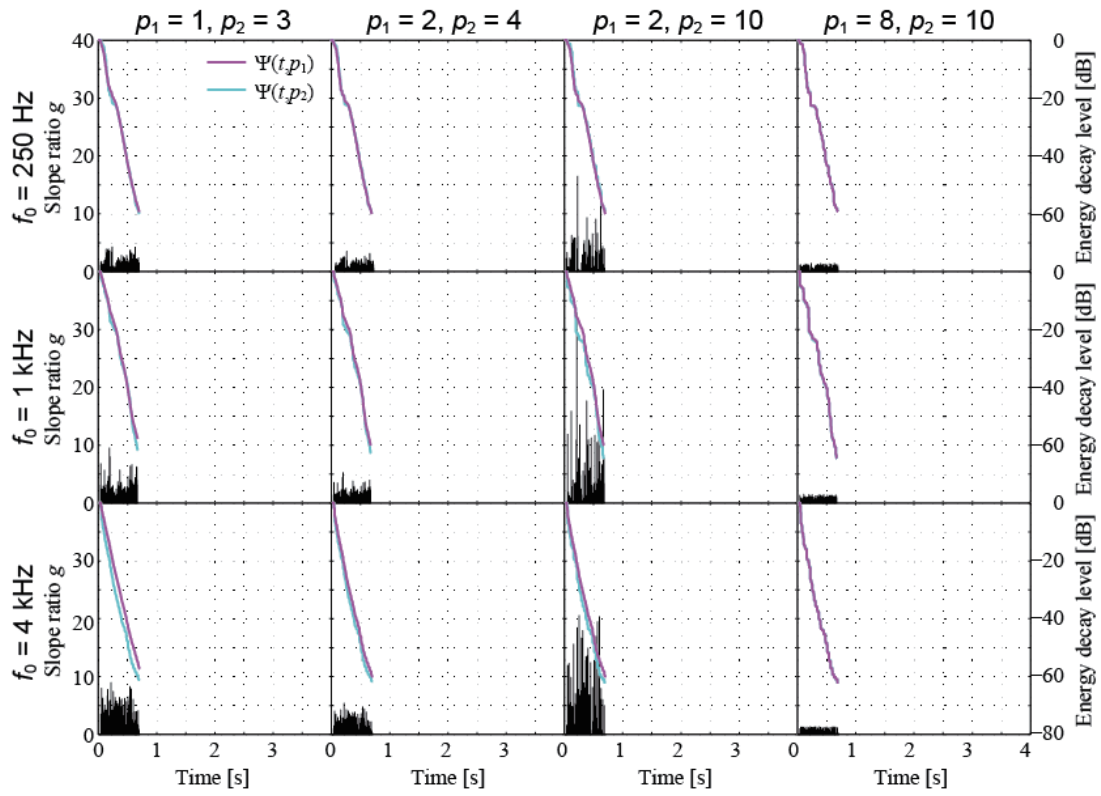


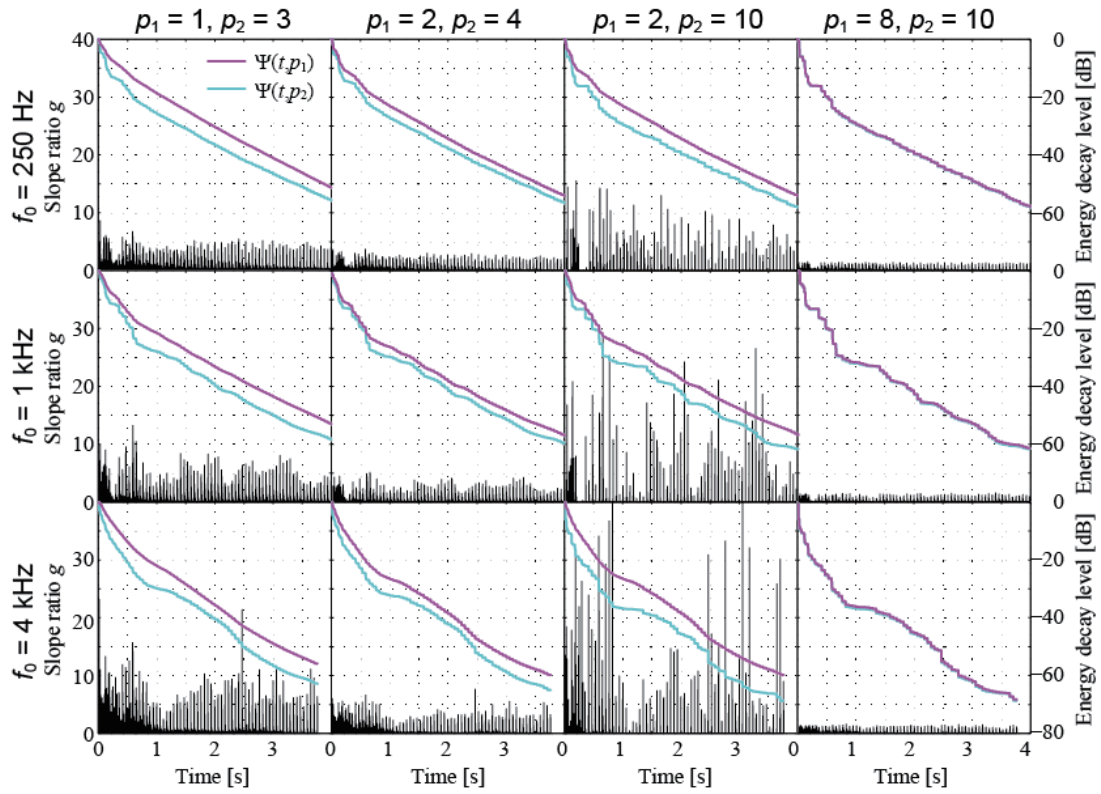
Figure 6.3 Generalized slope ratio with changing exponential number.

ケーススタディ 鏡像法による幾何音響解析を行い，一般化減衰率比の傾向を観察する．検討条件は第 6.3.2 節で後述する条件と同様であり，室は表 6.1 のうち立方体かつ均等吸音の Case 1a 及び直方体かつ不均等吸音の Case 2b を対象とする．

冪指数を変化させて算出した一般化減衰率比 g を図 6.4 に示す．全体的に先の考察と対応する結果である．冪指数の差を一定 ($p_2 - p_1 = 2$) とした場合， g のピークに室条件の違いがあまり表れず，冪指数が大きいほど値が小さくなる傾向にあり， p_1/p_2 に収束するものと推察される． $p_1 = 2, p_2 = 10$ とした場合，Case 1a に対して Case 2b が顕著にピークが大きくなっており，長手方向の壁面間でフラッターエコーが生じやすい条件であることと対応する結果である．また，直進性の強い高音域ほど値が大きくなっており，周波数帯域間の傾向も表されている．



(a) Case 1a.



(b) Case 2b.

Figure 6.4 Generalized decay curves and slope ratio calculated by the image source method at 250, 1k and 4k Hz in 1/1 octave bands, with changing exponential numbers.

6.2.2 鏡像法に基づく減衰率比の定式化

容積 V [m^3]，表面積 S [m^2]，平均吸音率 $\bar{\alpha}$ の室内にある点音源から時刻 $t = 0$ [s] に帯域制限されたパルス（単位エネルギー 1 [J]，エネルギー対ピーク比 η [1/s]）が発せられることを想定する．鏡像法に基づき，ある鏡像音源の到来時刻における音響エネルギー密度は，距離減衰，壁面吸音を算定すると次式で与えられる．

$$I_{\text{peak}}(t) = \frac{\eta}{4\pi c^3 t^2} (1 - \bar{\alpha})^{\frac{cS}{4V}t} \quad [\text{J}/\text{m}^3], \quad (6.9)$$

但し， c は音速．受音点から等距離にある微小区間内の音源個数を考慮して逆時積分を行うと，エネルギー減衰は次式で表される．

$$E(t) = \frac{4}{-cS \ln(1 - \bar{\alpha})} (1 - \bar{\alpha})^{\frac{cS}{4V}t} \quad [\text{J} \cdot \text{s}/\text{m}^3]. \quad (6.10)$$

反射音が同時刻に到来しないことを仮定すると，瞬時減衰率は式 (6.2) より，

$$D_{\text{peak}}(t) = -\frac{10}{\ln 10} \eta \frac{-S \ln(1 - \bar{\alpha})}{16\pi(ct)^2} \quad [\text{dB}/\text{s}], \quad (6.11)$$

となる．ここで，平均的な減衰率を，

$$\bar{D} = 10 \log_{10}(1 - \bar{\alpha})^{\frac{cS}{4V}} = -\frac{10}{\ln 10} \frac{-cS \ln(1 - \bar{\alpha})}{4V} \quad [\text{dB}/\text{s}], \quad (6.12)$$

とすると，減衰率比は次式で表される．

$$d_{\text{peak}}(t) = \eta \frac{V}{4\pi c^3 t^2} = \eta \Delta t_r(t), \quad (6.13)$$

但し， $\Delta t_r(t)$ は平均反射音間隔 [s]．理想的な反射音構造では， d_{peak} は時間の逆二乗に反比例して減少するが，臨界時刻 $t_c = \sqrt{\eta V / 4\pi c^3}$ [s] 以降では，反射音が同時刻に到来しない仮定が満たされないため，式 (6.13) は合理的でない．反射音が密にあり，かつ指数減衰を示す場合には $d(t) = 1$ を示す．

周波数帯域分析の影響

遮断周波数 f_c の理想的な低域通過型 FIR フィルター（LPF）のインパルス応答は次式で表される．

$$h_{\text{LPF}}(n) = \sin(2\pi f_c n) / \pi n, \quad (6.14)$$

但し， $n = N/2$ ， N は次数．上式のエネルギー対ピーク比は次式で表される．

$$\eta = \frac{h_{\text{LPF}}^2(0)}{\int_{-\infty}^{\infty} h_{\text{LPF}}^2(\tau) d\tau} = 2f_c \quad [1/\text{s}]. \quad (6.15)$$

従って、式 (6.13) の d_{peak} は遮断周波数に比例して増大することがわかる。尚、実際のフィルターは有限長であるため打ち切りの影響を受けると考えられる。また、フィルター処理を施さない場合のエネルギー対ピーク比は $\eta = 1/\Delta t_s$ と表されるが、上式に代入すると $f_c = f_s/2$ となり、サンプリング定理による帯域制限と対応する。

一方、帯域通過型 FIR フィルター (BPF) の場合、中心周波数 f_0 [Hz] のインパルス応答は次式で表される。

$$h_{\text{BPF}}(n) = 2 \cos(2\pi f_0 n) \cdot h_{\text{LPF}}(n). \quad (6.16)$$

上式の二乗積分は陽な表現を持たないが、 f_1 を下限周波数 [Hz]、 f_2 を上限周波数 [Hz] とすると、近似的には $\eta = 2f_1 = f_2$ となり、 d_{peak} は 1 オクターブ上がると 2 倍になると考えられる。

図 6.5 にフィルター長の異なる BPF のエネルギー対ピーク比を示す。尚、上軸はサンプリング周波数 $f_s = 48$ kHz の場合に対応する次数であり、丸印は IEC 61260 で規定される BPF の遮断特性を満たす次数の下限値を示している。

中心周波数の影響 図 6.5 (a) に、hamming 窓を用いた窓関数法により作成した BPF の中心周波数 f_0 を変化させた結果を示す。 η は f_0 に依らず、フィルター長が小さい場合に値が大きくなっており、有限長への打ち切りの影響が見られる。フィルター長が大きくなるに従って中心周波数に依存する値に収束している。収束値は 1 オクターブ上がると 2 倍になっており、理論と対応する。

帯域幅の影響 図 6.5 (b) に、hamming 窓を用いた窓関数法により作成した BPF の帯域幅を変化させた結果を示す。図 6.5 (a) と同様に η は、フィルター長が大きくなるに従って値は小さくなり、帯域幅に依存する値に収束している。収束値は帯域幅に比例している。従って、帯域幅を広くすることで反射音構造分析の分解能が高まると考えられる。

窓関数の影響 図 6.5 (c) に、中心周波数 $f_0 = 1$ kHz、帯域幅 1/1 オクターブバンドとして異なる窓関数を用いて作成した BPF の結果を示す。窓関数の違いによる影響はフィルター長が小さい場合に見られ、矩形窓を用いた場合の値が小さく、比較的収束値に近いことがわかる。しかしながら、一般に矩形窓を用いた場合には周波数遮断特性にリップルやサイドローブが比較的大きく表れることに留意する必要がある。

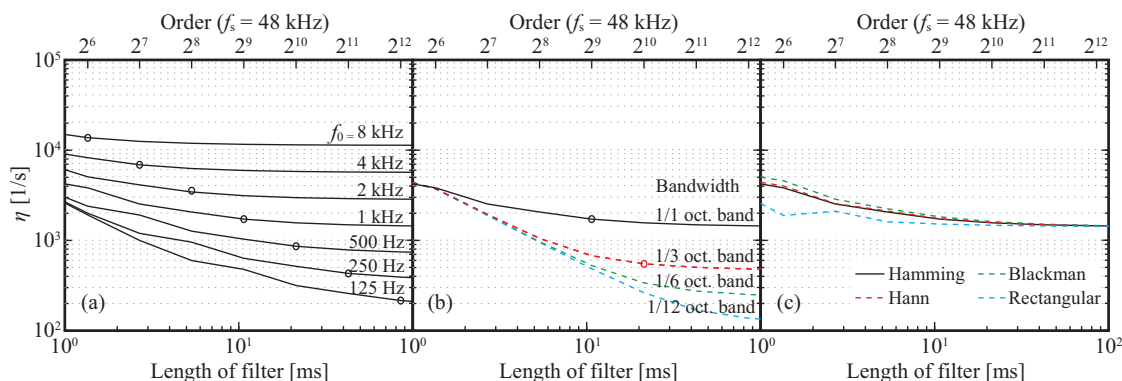


Figure 6.5 Peak-to-energy ratios of FIR band-pass filters of different lengths: (a) center frequency f_0 (1/1 octave band, hamming window), (b) bandwidth ($f_0 = 1$ kHz, hamming window), (c) window function ($f_0 = 1$ kHz, 1/1 octave bands). Circle marks denote the shortest lengths satisfying the class by IEC 61260.

オーバーラップの影響 図 6.6 に、指数減衰する一定間隔の反射音列にフィルター処理を施した場合の d_{peak} を示す。 d_{peak} は反射音間隔 Δt_r に比例しているが、 d_{peak} が 10 以下で変動が見られる。図示は省略するが、反射音間隔が無限に小さい場合、 d_{peak} は理論値の 2 倍となる。Jeong *et al.*^[141] は“transition time”を求める閾値を周波数帯域に依らず $d_c = 11$ としている。 Δt_r に換算すると、閾値は 1 オクターブ上がると 2 倍になり、 $d_{\text{peak}} = 10$ の場合、中心周波数の周期の 5 倍程度となる。

フィルターのオーバーラップの影響を緩和するため、移動平均を行うことを想定する。図 6.7 に、大きさの等しい 2 本のパルスにフィルター処理を施し、移動平均後に算出した η を示す。尚、フィルターの中心周波数は 1 kHz、帯域幅は 1/1 オクターブバンド、サンプリング周波数は 48 kHz、次数は 1,024、窓関数は hamming 窓とした。フィルターの過渡応答については、移動平均幅 Δt_{ave} が大きくなるに従って、変動及び最大振幅が小さくなっている。エネルギー対ピーク比 η についても同様に、移動平均幅 Δt_{ave} が大きくなるに従って、変動が小さくなっているが、移動平均を施さない場合と相似形状にあり、オーバーラップの影響を緩和できるとは言えない。また、同時にオーバーラップしない場合 ($\Delta t_r = T$) においても値が小さくなっており、移動平均を行うことによって反射音構造分析の分解能が向上することは期待できない。

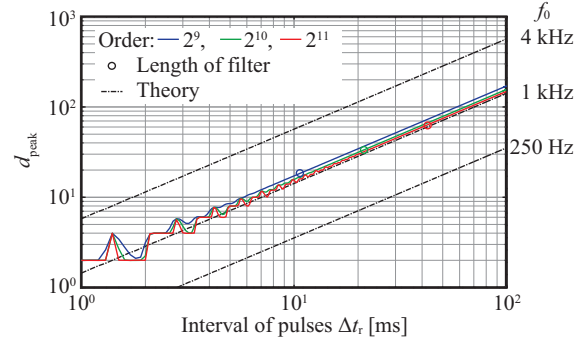


Figure 6.6 Peak slope ratios for exponentially decayed pulse sequences with constant intervals, calculated with 1/1 octave bands.

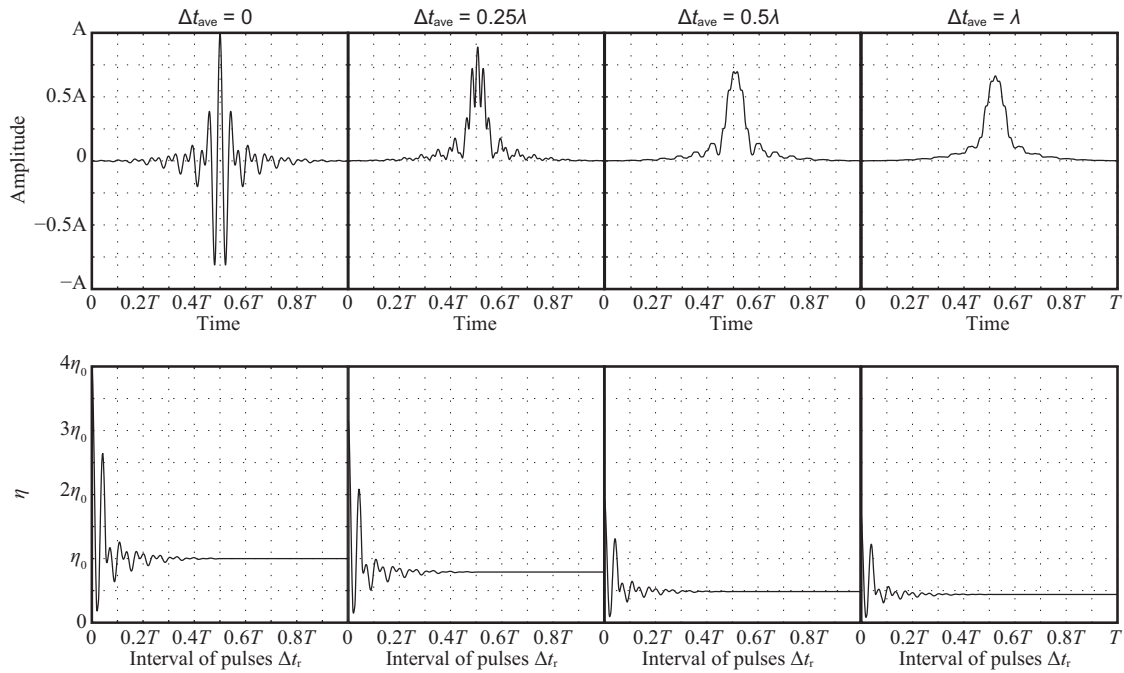


Figure 6.7 Effects of moving average of FIR band-pass filters on there amplitude and peak-to-energy ratios. Note that T is the length of the filter, A is maximum amplitude of the filter without moving average, Δt_{ave} is section of moving average, λ is the wave length corresponding center frequency of the filter.

6.3 幾何音響解析による検討

6.3.1 室容積と周波数帯域分析の影響

室容積と周波数帯域分析が減衰率比に及ぼす影響について鏡像法による幾何音響解析を用いて検討する．対象は立方体室とし，寸法を3水準（各辺 5, 10, 20 m）設け，吸音率は室内全面で一様に $\alpha = 0.35$ を与える．音源点は室中央とし，室寸法が各辺 10 m の場合の受音点は室中央から各軸方向に 0.3 m, 0.2 m, 0.1 m 移動した位置とし，室寸法の変化に追従することとする．サンプリング周波数は 48 kHz，計算の打ち切り時刻は 7.5 s とする．尚，直接音は除くこととし，減衰率比の評価区間は 0 dB から -60 dB とする．

図 6.8 に残響減衰曲線と減衰率比を理論値とともに示す．全体的に解析値は理論値よりも大きく， t_c 以降では概ね一定の変動が続いている．高音域では減衰曲線が直線的であるにも関わらず，初期の値が顕著に大きく，後期の変動も激しい．室容積の影響に関しては，容積が大きいほど値は幾分大きくなっている．

上記の減衰率に関する傾向から，高音域ほど，また大空間ほど音場の拡散性が低くなるように見える．これは定常場での知見と逆であり，周波数帯域分析の影響を含めて慎重に議論すべきである．スケール効果を考慮すると，縮尺が 2 倍のとき 1/2 倍の周波数と挙動が等しくなる．従って，今回の条件では 125 m³ の 1 kHz, 4 kHz の各帯域が，8,000 m³ の 250 Hz, 1 kHz の各帯域と対応することからスケール効果は満たされていると言える．但し，本解析では到来した鏡像音源からの寄与を離散時間内で合計しているが，サンプリング周波数も室寸法に追従して変化させることでスケール効果に関する完全な一致を得る．さらに厳密には，鏡像の決定的な到来時刻を求め再サンプリングを行う必要がある．

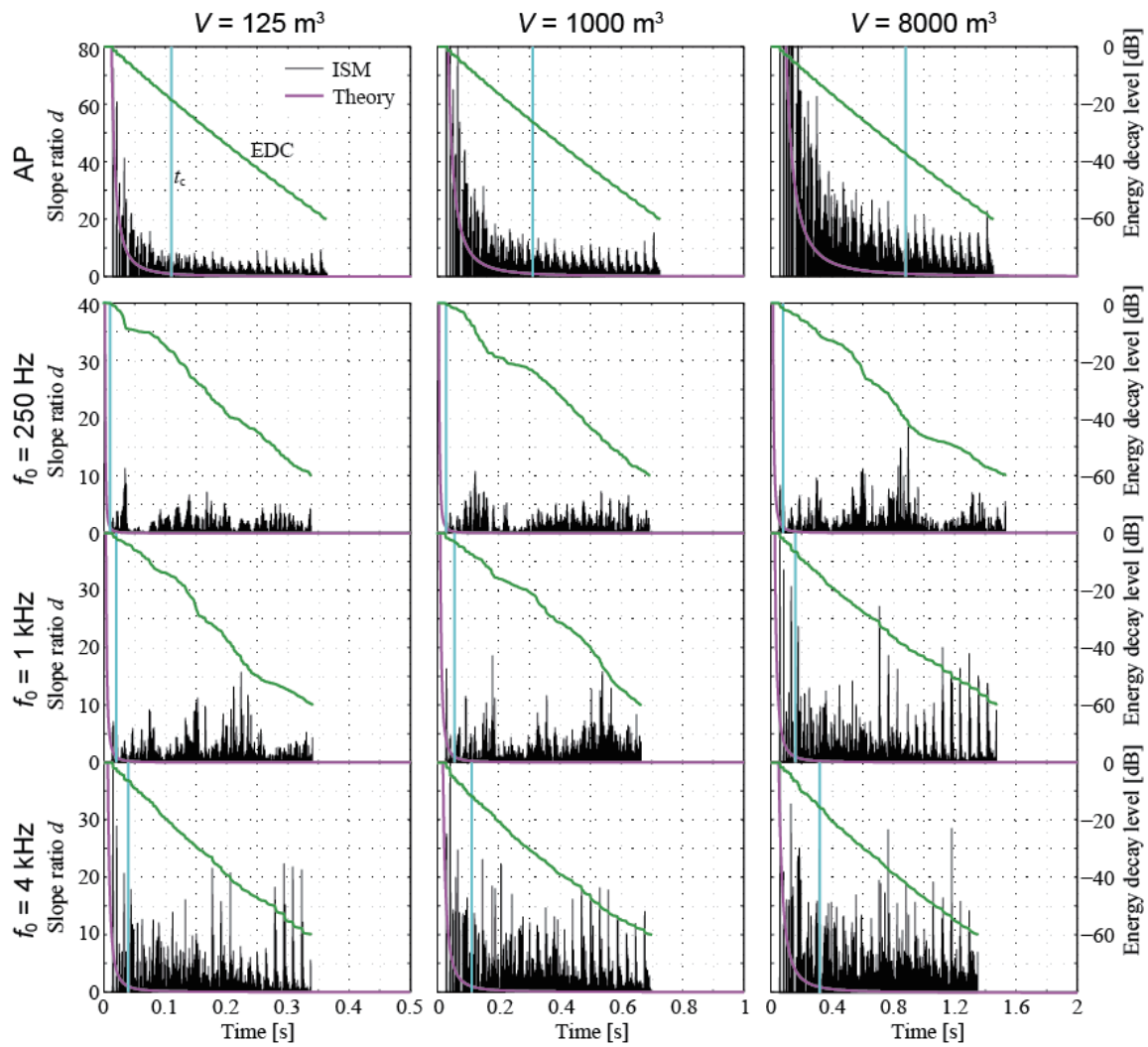


Figure 6.8 Energy decay curves and slope ratios calculated by the image source method at 250, 1k and 4k Hz in 1/1 octave bands: (a) square room, (b) circular room, without and with triangular diffusers.

6.3.2 壁面拡散の影響

壁面拡散が減衰率比 d に及ぼす影響について乱反射率を導入した音線法による幾何音響解析を用いて検討する．表 6.1 の通り，室容積 $1,000 \text{ m}^3$ ，吸音面積 210 m^2 を一定として，アスペクト比と吸音率が異なる 4 種の室を想定する．ここで，吸音率・乱反射率は入射角度依存性はなく，乱反射率は 0, 0.1, 0.4 の 3 水準として室内全面に一様に与える．Sabine 式では残響時間は全て 0.77 s ，Eyring 式では Case 1a/b で 0.62 s ，Case 2a/b で 0.65 s となる．音源点は室中央とし，Case 1a/b の受信球は室中央から各軸方向に 0.3 m , 0.2 m , 0.1 m 移動した位置とし，Case 2a/b については，室寸法の変化に追従することとする．サンプリング周波数 $f_s = 1 \text{ kHz}$ ，計算の打ち切り時刻は 7.5 s とする．尚，直接音は除くこととし，減衰率比の評価区間は 0 dB から -60 dB とする．

Table 6.1 Conditions of rectangular rooms (identical to Figure 5.1).

Case	L_x [m]	L_y [m]	L_z [m]	α_x^\pm	α_y^\pm	α_z^\pm	Ratio α/L
1a	10	10	10	0.35	0.35	0.35	1:1:1
1b	10	10	10	0.15	0.30	0.60	1:2:4
2a	20	10	5	0.30	0.30	0.30	1:2:4
2b	20	10	5	0.10	0.20	0.40	1:4:16

残響減衰曲線の性状 図 6.9 にエネルギー応答曲線と残響減衰曲線を示す．立方体・吸音均等の Case 1a では，両曲線とも概ね直線減衰を示しているが，他条件では湾曲し，直方体・吸音偏在の Case 2b で顕著である． α/L 比が等しい Case 1b と Case 2a の減衰曲線は概ね一致しているが，エネルギー応答曲線については，Case 1b に比べ Case 2a では突出した反射音が周期的に表れている．伝搬距離の大きい壁間での交互反射の影響であると考えられる．

減衰率比の性状 図 6.10 に all pass の残響減衰曲線と減衰率比を示す．立方体・均等吸音の Case 1a を除く室では，乱反射率が小さい場合に 1 次元的な往復反射が生じるため，減衰に湾曲が，また減衰率比に後期で激しいピークが表れている．しかし， $s = 0.4$ では室条件によらず，減衰が概ね直線となり，また減衰率比のピークが顕著に抑制され，Case 2b を除いて理論値を下回っている．

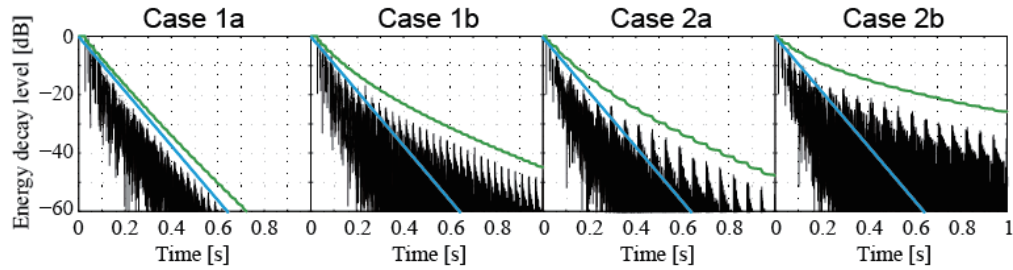


Figure 6.9 Energy-time curves calculated by the ray tracing method (black line), backward integrated decay curves (red line) and Eyring decay slopes (blue line).

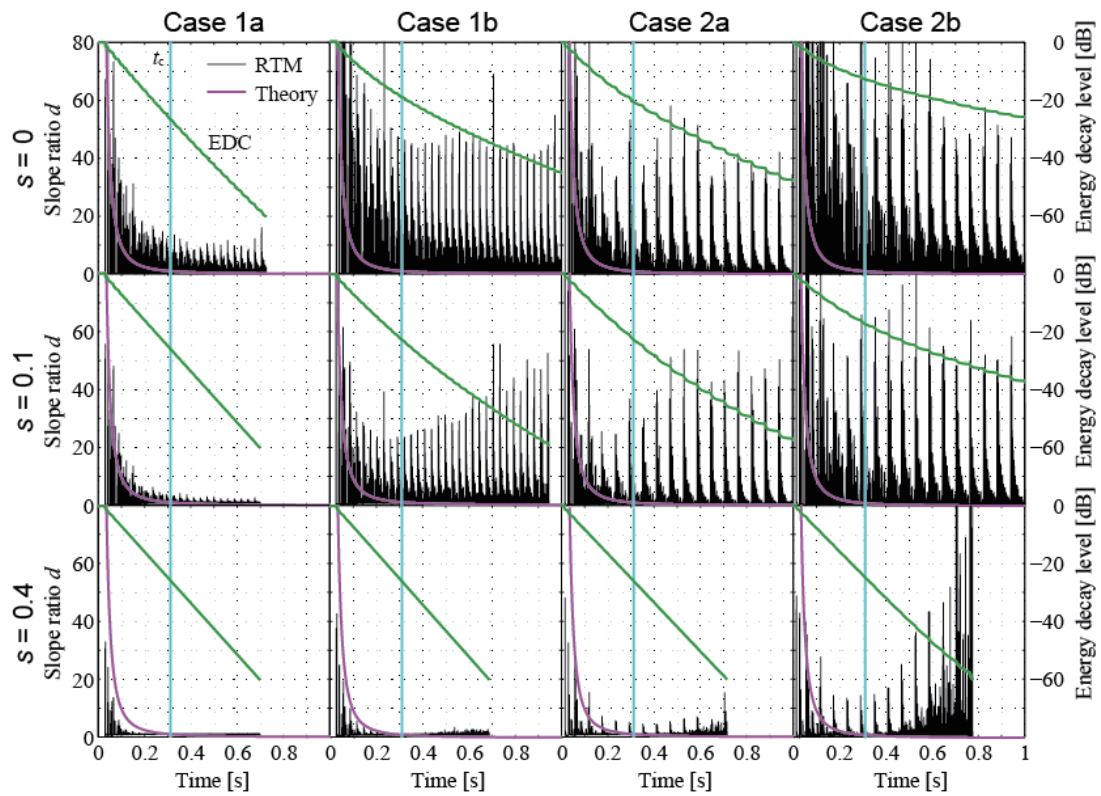


Figure 6.10 Energy decay curves and slope ratios calculated by the ray tracing method, with changing the scattering coefficient of walls.

6.3.3 残響減衰曲線の湾曲の影響

湾曲減衰時には平均的な減衰率が評価区間により変化し、通常見られる下に凸の残響減衰曲線の場合、初期と後期でそれぞれ減衰率比の過大評価と過小評価を生じさせると考えられる。本節では、評価区間に依存しない減衰率比の算出法として、残響減衰曲線の非線形回帰曲線を用いることを検討する。

残響減衰曲線 $L(t)$ の非線形回帰は Xiang^[283] による手法を参考に、3 種の指数関数で構成される曲線 $\tilde{L}(\mathbf{x}, t)$ を仮定する。

$$\tilde{L}(\mathbf{x}, t) = 10 \log_{10}(x_1 e^{-x_2 t} + x_3 e^{-x_4 t} + x_5 e^{-x_6 t}) \quad [\text{dB}], \quad (6.17)$$

但し、 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ 。回帰区間を時間 $t = t_1$ to t_2 とし、次式で表される誤差関数 $G(\mathbf{x})$ に対して最小二乗法を適用することで \mathbf{x} を求める。

$$G(\mathbf{x}) = \int_{t_1}^{t_2} (\tilde{L}(\mathbf{x}, t) - L(t))^2 dt, \quad (6.18)$$

また、残響減衰曲線において、室内インパルス応答の打ち切りや暗騒音の影響が著しい場合は、式 (6.17) に代えて次式を用いることができる。

$$\tilde{L}(\mathbf{x}, t) = 10 \log_{10}\{x_1 e^{-x_2 t} + x_3 e^{-x_4 t} + x_5 (T - t)\} \quad [\text{dB}], \quad (6.19)$$

但し、 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ 。

前節の 4 条件（但し、乱反射率 $s = 0$ ）を対象として、2 種類の平均的な減衰率（0 dB から -60 dB を評価区間とする瞬時減衰率の平均値 \bar{D}_{60} と残響減衰曲線の非線形回帰曲線の瞬時減衰率 $\bar{D}(t)$ ）を用いて算出した減衰率比を比較する。

図 6.11 に結果を示す。図 6.11(a) は残響減衰曲線とその非線形回帰曲線である。概ね直線的に減衰している Case 1a であっても 3 種の指数関数によりわずかな湾曲が捉えられていることがわかる。図 6.11(b) は 2 種類の平均的な減衰率である。当然ながら \bar{D}_{60} は全時間で一定値を示しているが、 $\bar{D}(t)$ は初期の値が後期比べて大きく、特に湾曲が大きい条件で顕著である。

図 6.11(c) 及び (c') はそれぞれ \bar{D}_{60} 及び $\bar{D}(t)$ を用いて算出した減衰率比である。 \bar{D}_{60} による場合、概ね直線減衰を示す Case 1a については他の条件と比べて値が小さいが、減衰に湾曲が見られた 3 条件間の違いはあまり見られず、いずれも概ね一定の値を変動している。一方、 $\bar{D}(t)$ を用いた場合には上記の予想の通り、減衰の湾曲が大きい条件ほど全体的に値が大きく、また平行壁間の交互反射成分が時々刻々と強まることが表れており、経験的な知見と対応する。

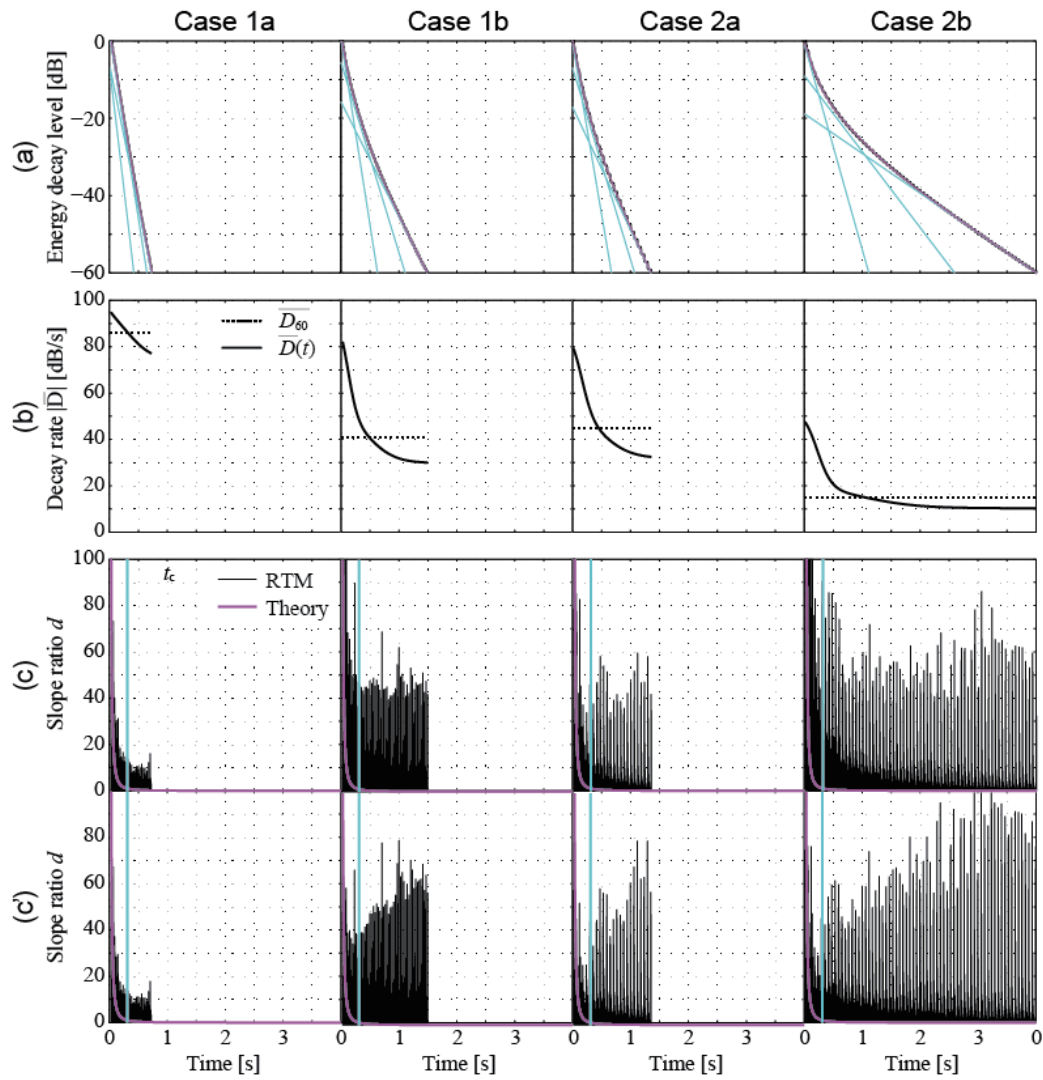


Figure 6.11 Comparison of slope ratios calculation with two mean slopes. (a) Energy decay curves (black: the ray tracing method, red: approximation curve, blue: components of the approximation curve), (b) mean slopes, and (c) and (c') slope ratios.

6.4 波動音響解析による検討

より現実的な音場について検討するために，正方形と円形の室（図 6.12，面積 256 m^2 ，垂直入射吸音率 $\alpha_n = 0.1$ ）を対象として，2次元 FDTD 法による波動音響解析を行う．壁面条件として，三角形状の拡散体（幅 20 cm ，高さ 6 cm ， $\alpha_n = 0.1$ ）の有無を設定する．図 6.13 に境界要素法で算出した拡散体の乱反射率^[168]を示す． 500 Hz ではほぼ乱反射しないが， 2 kHz では値が顕著に大きいことがわかる．音源には 2 kHz オクターブバンド上限周波数以下の成分が含まれるよう Gaussian 関数を音圧の空間分布として与える．サンプリング周波数は 48 kHz ，空間離散化幅は 0.01 m とし，境界条件として吸音率相当の垂直入射音響インピーダンスを実数で与える．評価区間は 0 dB から -60 dB とする．

6.4.1 室形状の影響

図 6.14 に受音点 R における 3 帯域（ 500 , 1k , $2\text{k} \text{ Hz}$ ）の残響減衰曲線と減衰率比を示す．拡散体のない正方形室では，初期のピークが理論値とよく対応しており，後期は 10 程度を上限として変動している．一方，円形室では大きなピークが特に初期で見られる．

6.4.2 壁面拡散の影響

拡散体の影響については特に円形室で顕著であるが，乱反射率の周波数特性と対応して高音域で減衰を速やかにし，初期のピークを抑制している．後期の変動については，室形状や周波数帯域によらず変化はあまり見られない．初期反射音は密度が小さく，かつエネルギーが大きいいため，拡散体の影響が大きいと考えられる．

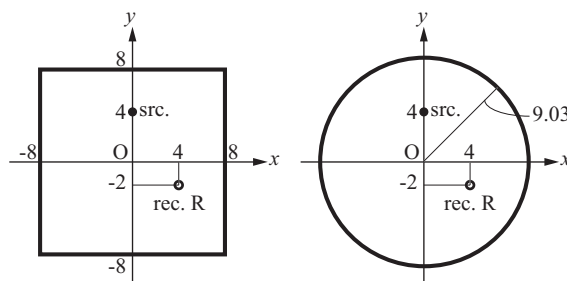


Figure 6.12 Geometries of square and circular rooms with an area of 256 m^2 (identical to Figure 4.1).

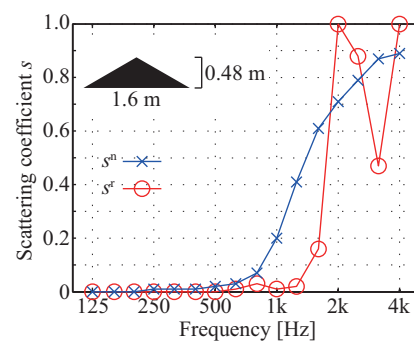


Figure 6.13 Random/normal-incidence scattering coefficients of triangular diffusers, calculated by the numerical analysis (identical to Figure 4.2).

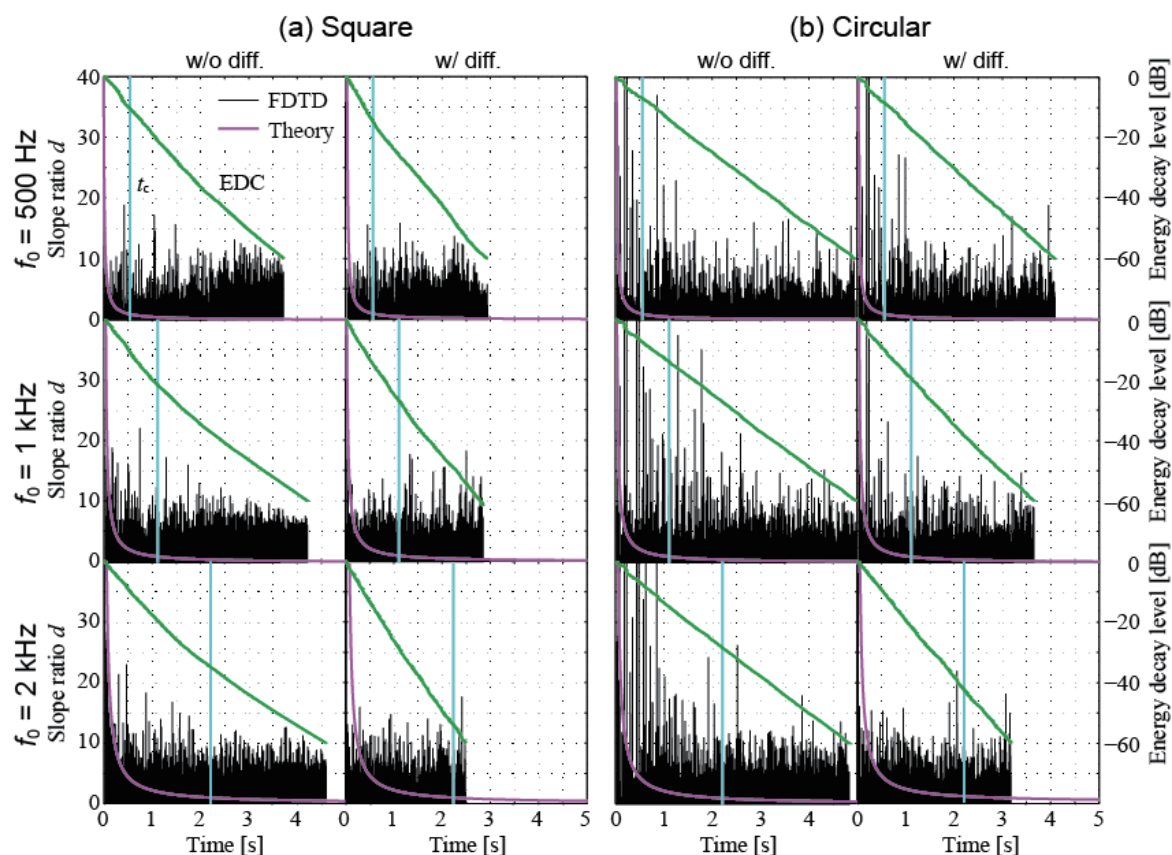


Figure 6.14 Energy decay curves and slope ratios calculated by the FDTD method at 500, 1k and 2k Hz in 1/1 octave bands: (a) square room, (b) circular room, without and with triangular diffusers.

6.5 音場の拡散性及びエコーに関する評価

6.5.1 減衰率比に基づく指標

音場の拡散性の評価指標として Jeong *et al.*^[140, 141] は, $d_c = 11$ 等の閾値を超える最後の時刻 transition time, t_{trans, d_c} を, また別の側面として残響時間に対する t_{trans, d_c} の比を transition-to-reverberation time ratio と称して提案している. これらの値は拡散性が向上するに従って小さくなると想定されているが, 閾値の物理的意味は不明であり, 指標算出の安定性にも懸念がある.

一方, Hanyu^[106] が提案する degree of time series fluctuation は減衰率比の n パーセントイル (d_n) を指標としており, Hanyu は $n = 99$ を用いている. t_{trans} と同様に拡散性が高い場合に小さい値を示すことが想定されてるが, d_n は統計量としての意味が明確である上, 比較的安定性も高いと考えられる.

減衰率比は周波数帯域分析の影響を受けるが、 t_{trans} は閾値を周波数帯域によらずに一定にすべきか不明であり、 d_{99} は周波数間の比較は不適切であるように見える．他の指標として考えられるのは基本的な統計量である、変動係数 (C_v)、歪度、尖度 (β_2) 等である．第 2.5 節で整理した通り、音響エネルギーの空間分布の一様性や周波数応答関数の平坦性を評価するために標準偏差や相対分散が用いられるが時間領域では見当たらない．変動係数は標準偏差を平均で除した無次元量であり、減衰率比の評価においては周波数帯域の影響を除いて、分布のばらつきを定量化できると考えられる．尖度は分散の 2 乗値で標準化された確率変数の 4 次モーメントであり、無次元量である．ここでは正規分布の尖度を 0 とする定義を採用する．尖度は分布の鋭さを表すが、同時に分布の裾の値に関する相対的な特異性の高さを表すためエコーの評価に適すると考えられる．両統計量の参考値としては、指数分布では $C_v = 1$ 、 $\beta_2 = 6$ 、一様分布では $C_v = 1/3$ 、 $\beta_2 = 6/5$ である．

図 6.8、6.10、6.11、6.14 に関する指標値を、表 6.2、6.3、6.4、6.5 にそれぞれ示す．統計量 (C_v 、 β_2) は、全時間と後期に関して算出した．全体的に d_{99} は C_v と類似した傾向を示し、 β_2 とは異なっている． β_2 は初期のピークに対する感度が高く、算出時間によって異なる値となると考えられる． t_{trans} に関しては、2 種の閾値 $d_c = 11, 15$ で算出したが、値の変化が不安定であり、 $t_{\text{trans},d_c}/T_{60}$ も合理性に欠ける．波動音響解析に関する結果 (表 6.5) については、 d_{99} と C_v の変化は小さいが、室形状と拡散体の影響としては合理的である．幾何音響解析の傾向とは異なり、正方形室について高音域ほど値が小さくなることは注目すべき点である．

Table 6.2 Indicators for diffuseness, calculated for the responses by the image source method in Figure 6.8.

V [m ³]	f_0 [Hz]	C_v		β_2		d_{99} 0- T_{60}	d_{95} 0- T_{60}	$t_{\text{trans},11}$ [s]	$\frac{t_{\text{trans},11}}{T_{60}}$	$t_{\text{trans},15}$ [s]	$\frac{t_{\text{trans},15}}{T_{60}}$
		0- T_{60}	t_c - T_{60}	0- T_{60}	t_c - T_{60}						
125	250	1.26	1.23	9.0	8.8	5.5	3.4	0.04	0.10	—	—
	1k	1.50	1.47	13.3	13.5	7.5	3.9	0.23	0.69	0.22	0.66
	4k	2.05	1.88	41.8	23.9	10.2	4.5	0.32	0.96	0.32	0.96
1,000	250	1.29	1.26	5.9	5.7	5.8	3.7	—	—	—	—
	1k	1.53	1.48	16.6	15.4	7.1	4.0	0.57	0.85	0.54	0.81
	4k	2.20	1.91	52.5	24.4	10.7	4.6	0.68	0.97	0.56	0.80
8,000	250	1.53	1.50	15.9	16.3	7.2	4.0	0.90	0.59	0.90	0.59
	1k	2.13	1.94	48.2	26.2	10.3	4.6	1.42	0.96	1.35	0.92
	4k	2.09	1.73	54.6	26.8	10.1	4.4	1.30	0.96	1.24	0.92

Table 6.3 Indicators for diffuseness, calculated for the responses by the ray tracing method in Figure 6.10.

Case	s	C_v		β_2		d_{99}	d_{95}	$t_{\text{trans},11}$	$\frac{t_{\text{trans},11}}{T_{60}}$	$t_{\text{trans},15}$	$\frac{t_{\text{trans},15}}{T_{60}}$
		$0-T_{60}$	t_c-T_{60}	$0-T_{60}$	t_c-T_{60}	$0-T_{60}$	$0-T_{60}$	[s]		[s]	
1a	0	2.63	1.42	186.0	10.0	10.1	4.3	0.71	0.97	0.71	0.97
	0.1	1.57	0.21	493.3	20.0	4.4	1.7	0.15	0.21	0.12	0.17
	0.4	0.67	0.06	1,202.0	0.2	1.3	1.1	0.07	0.10	0.04	0.06
1b	0	4.46	3.94	234.9	83.3	19.3	4.7	1.50	1.00	1.50	1.00
	0.1	2.77	2.61	223.2	135.8	11.7	3.1	0.95	1.00	0.95	1.00
	0.4	0.72	0.18	1,379.6	13.6	1.7	1.2	0.06	0.09	0.06	0.09
2a	0	4.07	3.49	449.1	76.2	17.2	4.9	1.35	1.00	1.35	1.00
	0.1	3.10	3.03	352.2	121.5	12.7	3.2	1.00	0.97	1.01	0.97
	0.4	0.91	0.29	1,496.4	534.4	2.3	1.2	0.70	0.98	0.70	0.98
2b	0	5.32	4.17	1,317.4	90.3	20.4	4.7	4.00	1.00	4.00	1.00
	0.1	4.66	4.78	344.6	174.0	19.3	3.5	2.06	1.00	2.06	1.00
	0.4	2.78	3.47	2,533.3	2,006.6	4.8	1.4	0.77	1.00	0.77	1.00

Table 6.4 Indicators for diffuseness, calculated for the responses by the ray tracing method in Figure 6.11.

Case	s	C_v		β_2		d_{99}	d_{95}	$t_{\text{trans},11}$	$\frac{t_{\text{trans},11}}{T_{60}}$	$t_{\text{trans},15}$	$\frac{t_{\text{trans},15}}{T_{60}}$
		$0-T_{60}$	t_c-T_{60}	$0-T_{60}$	t_c-T_{60}	$0-T_{60}$	$0-T_{60}$	[s]		[s]	
1a	0	2.47	1.42	158.8	10.29	9.8	4.5	0.71	0.97	0.71	0.97
1b	0	4.06	4.04	92.9	92.9	18.8	4.8	1.50	1.00	1.50	1.00
2a	0	3.65	3.59	124.7	84.9	17.2	5.0	1.35	1.00	1.35	1.00
2b	0	4.35	4.32	122.7	107.2	21.0	4.8	4.00	1.00	4.00	1.00

Table 6.5 Indicators for diffuseness, calculated for the responses by the FDTD method in Figure 6.14.

Case	f_0 [Hz]	C_v		β_2		d_{99}	d_{95}	$t_{\text{trans},11}$	$\frac{t_{\text{trans},11}}{T_{60}}$	$t_{\text{trans},15}$	$\frac{t_{\text{trans},15}}{T_{60}}$
		$0-T_{60}$	t_c-T_{60}	$0-T_{60}$	t_c-T_{60}	$0-T_{60}$	$0-T_{60}$	[s]		[s]	
Sq. w/o diff.	500	1.60	1.59	11.4	10.3	7.6	4.3	3.24	0.87	1.49	0.40
	1k	1.50	1.41	16.6	8.3	6.8	4.0	2.41	0.57	1.73	0.41
	2k	1.46	1.30	47.3	6.7	6.4	3.8	4.12	0.90	1.41	0.31
Sq. w/ diff.	500	1.61	1.62	10.4	9.8	7.4	4.3	2.43	0.83	1.11	0.88
	1k	1.51	1.49	24.2	14.8	7.0	4.0	2.81	0.98	2.50	0.88
	2k	1.49	1.47	81.4	14.6	6.8	3.9	2.42	0.97	2.41	0.97
Circ. w/o diff.	500	1.94	1.59	184.4	37.4	8.0	3.9	4.87	0.98	4.87	0.98
	1k	2.38	1.63	718.4	46.6	8.1	3.9	4.41	0.89	4.32	0.87
	4k	2.61	1.42	1,312.2	14.6	7.9	3.9	4.76	0.98	3.86	0.80
Circ. w/ diff.	500	1.98	1.58	33.9	25.3	7.9	4.6	3.96	0.97	3.96	0.97
	1k	1.70	1.42	120.8	11.7	7.3	4.0	3.39	0.93	1.24	0.34
	2k	1.53	1.41	173.3	12.2	6.7	3.8	3.16	1.00	3.07	0.97

指標算出の安定性

算出設定の影響 図 6.15 に、波動音響解析の結果（図 6.14）を対象として、異なる評価区間で算出した C_v 及び β_2 を示す．初期（0 to t_c s）については、経験的な知見と対応して、正方形室に比べて円形室の拡散性が低く、また壁面拡散の設置により拡散性が向上する傾向が見られる．しかし、後期（ t_c to T_{60} s）では条件間の差異があまり見られず、全時間（0 to T_{60} s）については、 C_v では中程度、 β_2 では初期寄りの傾向である．このことから、室形状や壁面形状等の室条件が反射音構造に及ぼす影響は初期に顕著であると言えるが、初期の評価は音源・受音点位置に依存する懸念がある．室の代表値として安定的な指標算出のためには後期残響を評価する必要性が示唆された．

図 6.16 に、異なる閾値で算出した d_n 及び $t_{\text{trans},d_c}/T_{60}$ を示す． d_n については、 $n = 99$ の場合には C_v 及び β_2 と類似した傾向が見られ、室条件の感度については概ね、 C_v 、 d_{99} 、 β_2 の順に高い．しかし、 $n = 95$ の場合では条件間の違いが埋もれており、閾値に大きく依存する結果となった． $t_{\text{trans},d_c}/T_{60}$ については、 d_c に依らず他の指標と傾向を異にし、解釈が困難である上、算出できない場合もある（便宜的に 0 として表示）．さらに、閾値の依存性も大きく、またその系統性も見られない．

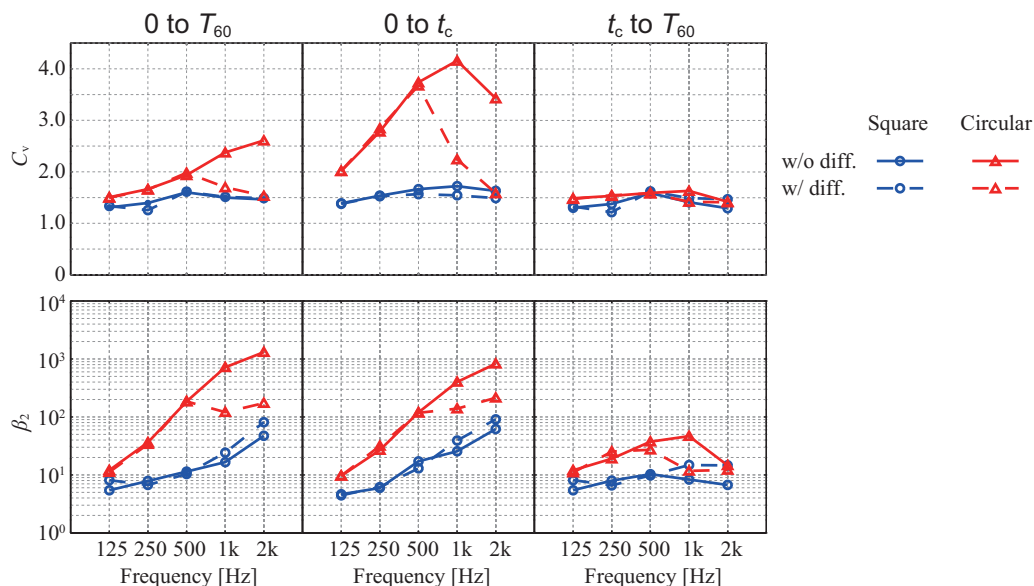


Figure 6.15 Effects of evaluation sections on coefficient of variation (C_v) and kurtosis (β_2), calculated by the FDTD method.

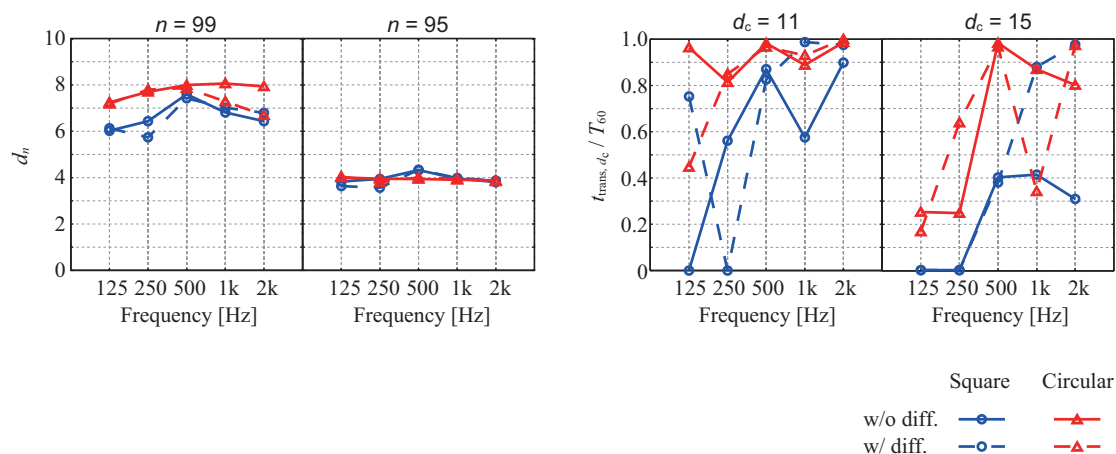
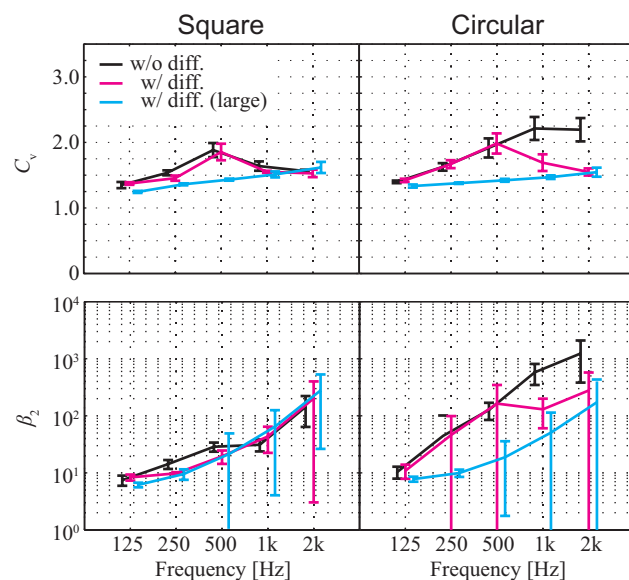
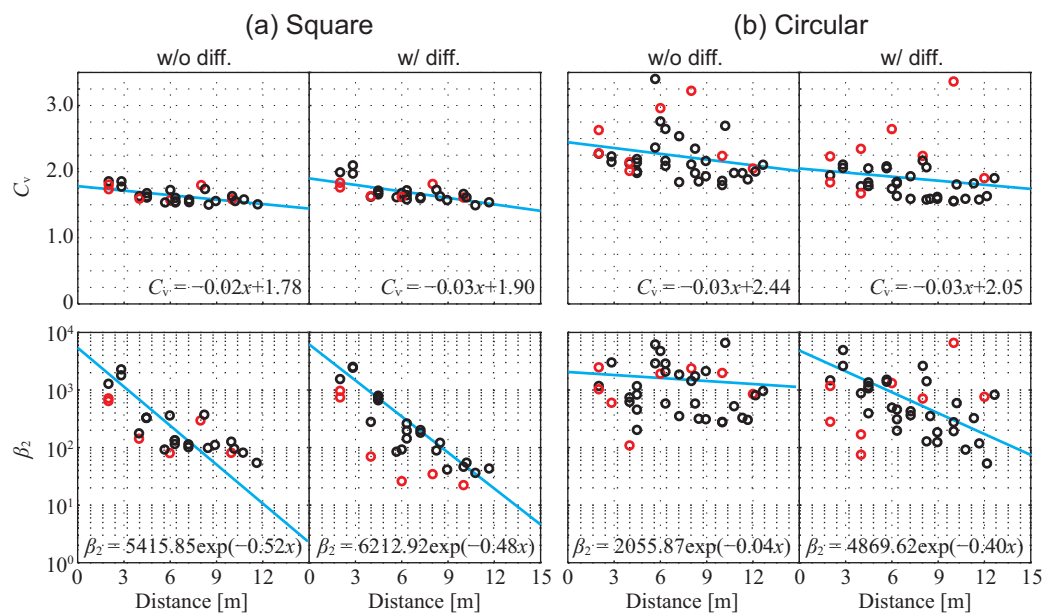


Figure 6.16 Effects of thresholds on percentile slope ratio (d_n) and transition to reverberation time ratio ($t_{\text{trans},d_c} / T_{60}$), calculated by the FDTD method.

減衰率比に関する基本統計量の空間偏差 各室について音源点を通る 2 m 間隔の格子点上に受音点を設置（音源点は除く）し，各受音点で得られた減衰率比に関する C_v と β_2 の平均値を図 6.17 に示す．尚，拡散体の寸法を 4 倍とした結果も併記している．乱反射率の周波数特性に対応して値が低下しており，円形室で顕著である． C_v では空間偏差の低減も見られる．図 6.18 に C_v と β_2 を音源・受音点間距離で整理した結果を示す．全体的に遠方ほど値がやや低下する傾向にある．直接音や初期反射音の影響と考えられる．値のばらつきは拡散性が低いと思われる円形室で比較的に大きく，特に，音源軸上の値の安定性が低い．従って，音場の拡散性の評価を行うには，他の室内音響指標と同様に，1 点ではなく音源軸上を除く複数点の測定を用いて指標値の平均化等を行うことで安定性が高まるものと考えられ，少数点計測の可能性が示唆される．

Figure 6.17 Spatial means and standard deviations of coefficient of variation (C_v) and kurtosis (β_2).Figure 6.18 Spatial distributions of coefficient of variation (C_v) and kurtosis (β_2); Red marks denote the central axis of rooms through the source.

6.5.2 室条件が及ぼす影響

室条件が減衰率比の基本統計量 (C_v , β_2) に及ぼす影響を関して 2 次元 FDTD 法解析により検討する．対象は図 6.19 に示す通り，室形状，壁面吸音，壁面拡散等を変化させた 15 種類である．尚，前節まで検討対象とした図 6.12 の正方形室は室 A (拡散体なし) 及び室 J (拡散体あり) に，円形室は室 B (拡散体なし) 及び室 N (拡散体あり) に対応する．室 K と室 O の拡散体は幅 160 cm，高さ 48 cm であり，乱反射率は図 6.13 を 4 オクターブ下げた特性になると相似則から考えられる．解析条件については第 6.4 節と同様とし，音源・受音点位置は室寸法または室寸法比の変化に追従するものとする．

図 6.20 に， C_v と β_2 に関する全受音点の平均値を 2 次元配置した結果を，指数関数を仮定した回帰曲線とともに示す．全体的に室条件の相対的な関係は概ね保たれたまま，低音域では C_v の値域が，高音域では β_2 の値域が大きい傾向が見られる．このことは，高音域では減衰率比のピーク値が大きい，ピーク値の出現頻度が低いことに起因する．標準偏差等による従来のばらつき評価を以って音場の拡散性を評価するだけではなく，尖度による特異性評価等を含めた分析を行うことで現象理解の深化が進むものと考えられる．詳細は，All pass に着目した以下の観察の通り，室条件が C_v 及び β_2 に及ぼす影響は音場の拡散性及びエコーに関する既往の知見と概ね対応する．

室形状の影響 正方形室 (A) と円形室 (B) の結果を比較すると， C_v , β_2 ともに正方形室に比べて円形室で値が大きい．円形は幾何学的に焦点があることにより，波面が乱れにくいいため音響エネルギー分布の一樣性が比較的に低く，また周期的に反射音が到来するためフラッターエコーが生じやすいことと対応する．

室寸法及び室寸法比の影響 室寸法が大きくなるに従い ($C < A < D$)， C_v の変化は小さいが， β_2 が大きくなっている．壁面間距離が大きくなると反射音が離散的に到来するためエコーが生じやすいことと対応する．室が扁平形 (E, F) の場合，整形 (A) に比べて β_2 が大きくなっているが，扁平 2 室の差は比較的に小さい．

壁面吸音の影響 吸音面が不均等な配置 (G, H, I) の場合，均等の場合 (A) に比べて C_v , β_2 とも値が大きい．特に，反射性壁間距離が大きいほど ($I < G < H$) 顕著となり，長軸方向の 1 次元的な反射成分によるフラッターエコーが生じやすいことと対応する．

壁面拡散の影響 円形室の場合，設置する拡散体のサイズが大きいほど ($N < O$)，設置しない場合 (B) に比べて C_v , β_2 ともに値が小さくなっており，音場の拡散性が高まり，またフラッターエコーが低減されていると考えられる．正方形室の場合，拡散体を設置した場合 (J, K, L)，設置しない場合 (A) に比べて β_2 がやや大きくなっている．

壁面吸音と壁面拡散の影響 均等吸音の場合 (A) には拡散体の影響 (J) が比較的に小さいが, 不均等吸音 (G) については拡散体を設置した場合 (M) に C_v が大きく, β_2 が小さくなり, 回帰曲線から大きく乖離している.

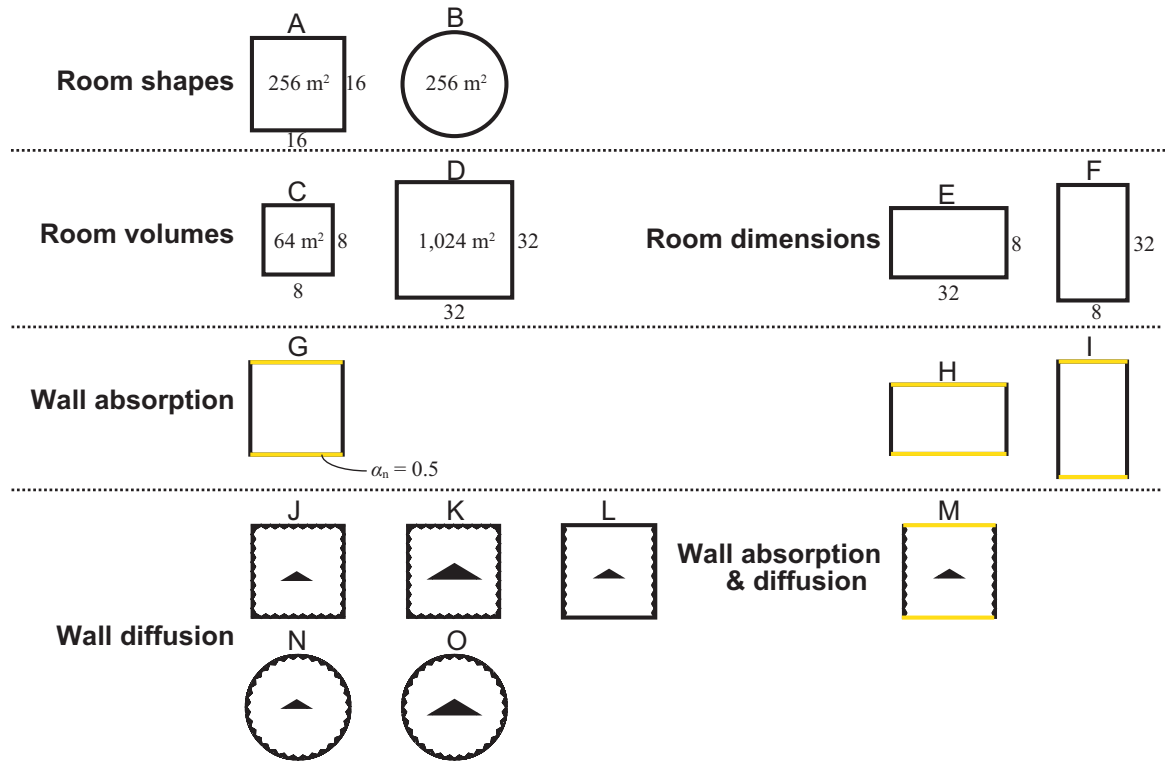


Figure 6.19 Room conditions with different room shapes, absorption distribution and diffusion (identical to Figure 4.9).

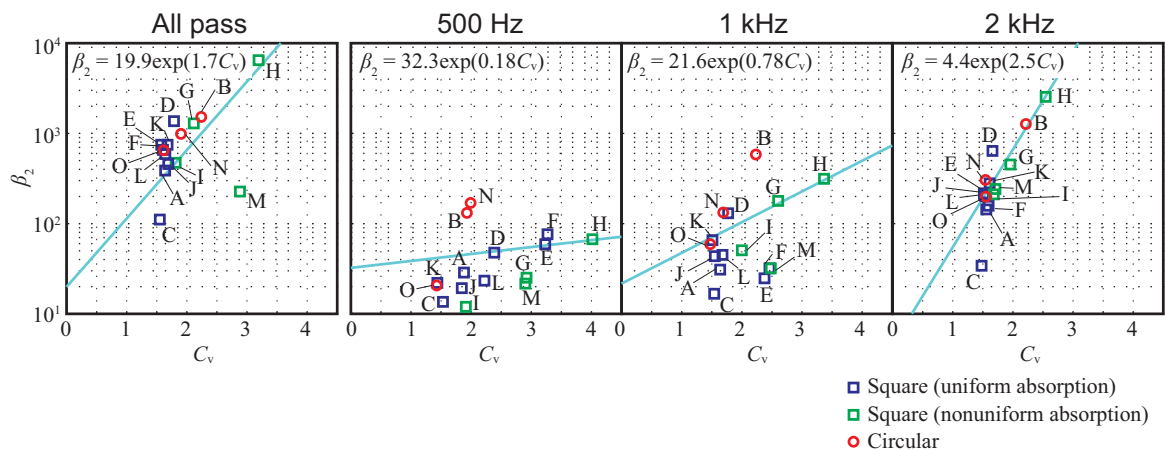


Figure 6.20 Coefficient of variation (C_v) and kurtosis (β_2) of slope ratios in all pass and three frequency bands, calculated by the FDTD method.

6.5.3 室内音響に関する既往指標との関係

以上では、減衰率比の基本統計量により音場の拡散性及びエコーに関する評価を試みた。本節では、前節(図 6.19)の 15 種類の室条件を対象として、これら基本統計量と既往の指標との相関を検討する。解析条件については第 6.4 節と同様とし、音源・受音点位置は室容積及び室寸法比の変化に追従するものとする。算出する指標は以下の通りである。

- Statistics of slope ratios: C_v , β_2
- Sound diffusion: NV , d_θ
- Echo: EC
- Curvature and non-linearity: C , ξ
- Sound strength: G
- Reverberation: T_{30} , EDT
- Clarity: C_{80} , D_{50} , T_S
- Spaciousness: J_{LF} , J_{LFC} , L_J

指標値の算出は、原則的に全受音点での all pass 値の平均化を行い、例外的に個別の受音点での評価が適当と考えられる d_θ , EC, G については受音点 R における値を用いることとする。尚、EC は話声を想定して算出し、EC との相関係数を求める際には、他の指標 (NV を除く) についても同様の周波数帯域 (700 Hz to 1.4 kHz) の値を用いる。また、 NV 及び d_θ は第 4.4.1 節と同様にエネルギーの時間累積値から求め、残響減衰曲線における 30 dB 減衰時の値を用いる。

表 6.6 に相関係数を抜粋して示す。尚、表 6.7 に全ての相関係数を、表 6.8 に算出した室内音響指標値を示す。表 6.6(a) に、 C_v 及び β_2 と室内音響指標との相関係数を示す。減衰率比の統計量は d_θ , T_{30} , J_{LFC} と相関があり、 β_2 はエコーに関する EC と高い相関がある。しかしながら、音響エネルギー分布の空間偏差を表す NV とは相関が見られない。表 6.6(b) に、音場の拡散性に関する指標間の相関係数を示すが、全体的に相関は高くない。

Table 6.6 Correlation coefficients, calculated by the FDTD method (part).

(a) Between statistics of slope ratios (C_v , β_2) and room acoustic parameters.

	Diffusivity		Echo	Curvature	Strength	Reverberance	Clarity	Spaciousness
	NV	d_θ	EC	ξ	G	T_{30}	C_{80}	J_{LFC}
C_v	-0.15	-0.68	0.22	0.05	-0.38	0.42	0.49	-0.85
β_2	-0.14	-0.68	0.68	-0.11	-0.17	0.81	0.14	-0.71

¹ Red: 0.70 to 1.00; Magenta: 0.40 to 0.70.

(b) Between objective parameters for sound diffusion in a broad sense.

	Diffusivity		Echo	Curvature
	NV	d_θ	EC	ξ
NV	1.00	0.28	-0.11	-0.15
d		1.00	-0.19	-0.15
EC			1.00	-0.44
ξ				1.00

¹ Red: 0.70 to 1.00; Magenta: 0.40 to 0.70.

Table 6.7 Correlation coefficients between room acoustic parameters (whole).

	Slope ratio		Diffusivity		Echo	Curvature		Strength	Reverberance		Clarity		Spaciousness		
	C_v	β_2	NV	d_θ	EC	C	ξ	G	T_{30}	EDT	C_{80}	D_{50}	J_{LF}	J_{LFC}	L_J
C_v	1.00	0.71	-0.15	-0.68	0.22	0.06	0.05	-0.38	0.42	0.18	0.49	0.66	-0.77	-0.85	-0.75
β_2	1.00		-0.14	-0.68	0.68	-0.07	-0.11	-0.17	0.81	0.54	0.14	0.33	-0.80	-0.71	-0.53
NV			1.00	0.28	-0.11	-0.12	-0.15	0.07	-0.02	-0.04	-0.09	-0.14	0.13	-0.04	0.10
d			1.00		-0.19	-0.18	-0.15	0.39	-0.51	-0.11	-0.53	-0.68	0.69	0.55	0.77
EC					1.00	-0.44	-0.44	-0.20	0.67	0.88	-0.56	-0.36	-0.46	-0.63	-0.16
C						1.00	0.99	-0.27	0.01	-0.25	0.33	0.28	-0.02	0.26	-0.31
ξ							1.00	-0.25	-0.03	-0.27	0.31	0.25	0.02	0.28	-0.27
G								1.00	-0.21	-0.05	-0.31	-0.36	0.21	0.35	0.81
T_{30}									1.00	0.82	-0.28	-0.09	-0.69	-0.52	-0.39
EDT										1.00	-0.69	-0.53	-0.49	-0.41	-0.06
C_{80}											1.00	0.97	-0.16	-0.19	-0.57
D_{50}												1.00	-0.35	-0.38	-0.68
T_S													-0.27	-0.18	0.15
J_{LF}													1.00	0.70	0.60
J_{LFC}														1.00	0.59
L_J															1.00

¹ Red: 0.70 to 1.00; Magenta: 0.40 to 0.70.

Table 6.8 Room acoustic parameters of various room conditions, calculated by the FDTD method.

Case	Slope ratio		Diffusivity		Echo	Curvature		Strength	Reverberance		Clarity		Spaciousness		
	C_v [-]	β_2 [-]	NV [-]	d_θ [-]		C [%]	ξ [%]		T_{30} [s]	EDT [s]	C_{80} [dB]	D_{50} [%]	J_{LF} [%]	J_{LFC} [%]	L_I [dB]
A	1.64	388.4	0.03	0.74	1.12	8.5	3.6	18.6	3.57	3.15	-3.9	21.8	28.2	39.7	11.5
B	2.24	2520.1	0.90	0.57	1.87	0.7	0.2	18.5	5.03	4.94	-5.8	17.5	25.9	34.2	11.3
C	1.55	111.2	0.03	0.74	0.72	4.6	1.4	24.5	1.74	1.57	0.2	36.5	27.7	39.0	16.1
D	1.79	1365.1	0.03	0.74	1.91	8.5	3.3	12.5	7.20	6.39	-6.8	13.5	24.1	33.6	6.3
E	1.57	749.0	0.06	0.69	0.94	34.0	27.1	20.1	4.05	2.64	-2.4	29.7	31.0	40.5	12.8
F	1.61	651.9	0.07	0.68	0.90	43.4	36.9	14.0	4.61	2.63	-1.2	29.2	29.2	36.6	7.1
G	2.12	1288.4	0.22	0.42	1.07	11.5	7.5	13.7	5.15	1.77	1.9	51.0	25.6	35.4	3.9
H	3.19	6487.9	0.52	0.27	1.64	12.9	6.4	14.8	9.24	4.99	2.2	57.6	18.9	26.5	-0.7
I	1.81	473.0	0.19	0.50	0.81	19.6	12.9	11.3	2.30	1.44	2.7	48.1	29.9	39.5	3.1
J	1.69	461.1	11.65	0.81	1.07	5.3	1.4	16.4	2.56	2.20	-1.4	32.2	28.5	34.5	8.9
K	1.68	745.0	1.25	0.75	1.18	2.6	0.7	15.8	2.09	1.97	-0.4	35.6	33.9	37.1	8.7
L	1.64	593.7	29.76	0.76	1.09	10.6	5.2	17.4	4.71	3.08	-2.6	25.8	29.6	36.4	10.5
M	2.88	227.3	3.01	0.55	1.03	27.7	22.0	12.4	1.37	0.89	4.8	62.0	25.3	31.1	1.4
N	1.90	986.4	1.71	0.65	1.46	1.7	0.3	16.6	3.85	3.36	-3.0	26.5	30.6	32.8	9.9
O	1.60	647.2	1.07	0.82	1.25	3.7	0.7	16.2	2.81	2.48	-1.9	28.8	32.1	36.5	14.3
Avg.	1.93	1113.0	3.37	0.65	1.20	13.0	8.6	16.2	4.02	2.90	-1.2	34.4	28.0	35.8	8.3

6.6 室内音響測定への適用例

実音場を対象として減衰率比に基づく反射音構造分析を行う．検討対象は容積及び用途の異なる 3 種の矩形室とする（表 6.9）．会議室は約 100 m^3 の小空間であり，反射性の平行壁間でのフラッターエコーが感じられる．執務室は賃貸を目的とした coworking 型の空間である．室は扁平形であり，一部に反射性の折上天井があることからフラッターエコーが生じる懸念がある．ホールは平土間式の室であり，比較的に整形な空間である．音楽演奏を目的として音響に特別の配慮がなされているため，エコー等の問題は少ない．残響調整のための吸音カーテンが設置されている．

以下では，各室の反射音構造を減衰率比により観察し，減衰率比に基づく拡散性評価指標を用いて室間の傾向を比較する．

Table 6.9 Conditions of rectangular rooms for acoustic measurements.

	Volume [m^3]	Dimension [m]
Meeting room	100	$7.0 \times 4.9 \times 3.0$
Office room	2,423	$42.0 \times 19.0 \times 3.0$
Hall	3,600	$22.0 \times 14.0 \times 12.0$

6.6.1 会議室における検討

検討方法

会議室（図 6.21）を対象として室内インパルス応答測定を行った．室内の基本条件として，壁は石膏ボード張り（一部，金属製パネル），床はビニルシート，天井は岩綿吸音板の仕上げであり，室中央に机及び椅子 4 脚を配置した（図 6.22）．基本条件（Case O）に対して，吸音性（図 6.23）のパネル（ $2,000 \times 900 \times t36 \text{ mm}$ ）を対向 2 壁面に各 4 枚配置した Case A，全壁面に各 4 枚配置した Case B の計 3 条件を設定した．

測定については，12 面体スピーカを長手壁面の中央（高さ 1.3 m ）に，受音点を特定の座席位置（高さ 1.2 m ）に設置した．図 6.24 に測定系統を示す．音源から 16 次の TSP 信号を放射し，受音点で長さ 1.365 秒 の室内インパルス応答を得た．尚，同期加算回数は 10 回，サンプリング周波数は 48 kHz とした．受音点 R で得られた応答に $1/1$ オクターブバンドフィルター処理を施し，減衰率比を算出する．評価区間は -5 dB から -35 dB とし，平均的な減衰率として残響減衰曲線の非線形回帰曲線（第 6.3.3 節）の瞬時減衰率を用いる．



(a) Without absorbing panels.



(b) With absorptive panels.

Figure 6.21 Views of the meeting room.

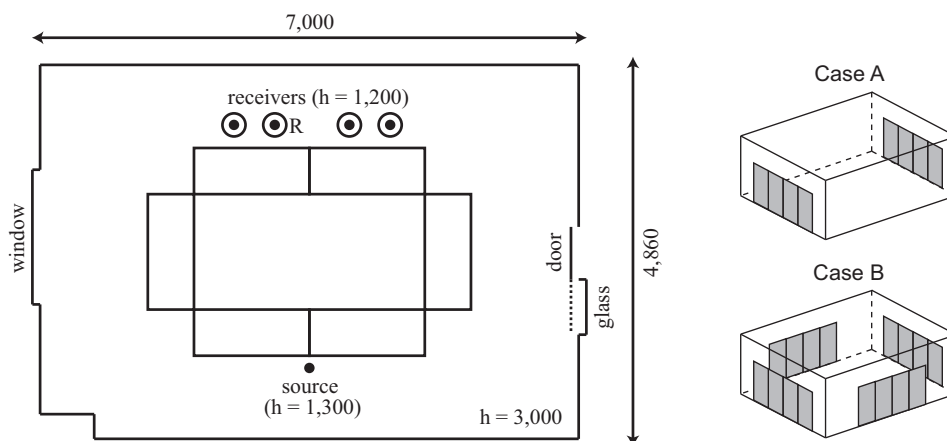


Figure 6.22 A plan of the meeting room and configurations of the absorptive panels.

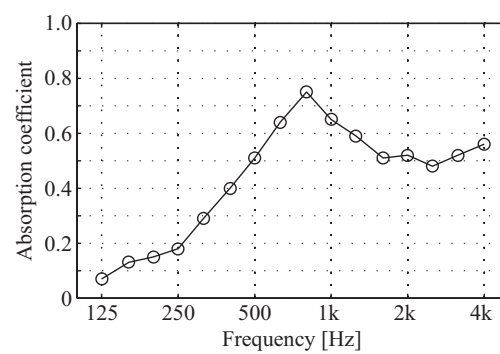


Figure 6.23 Random-incidence absorption coefficients of the absorptive panel in 1/3 octave bands.

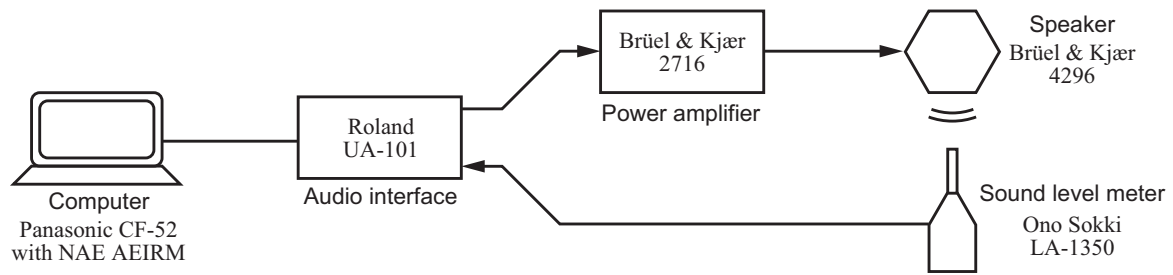
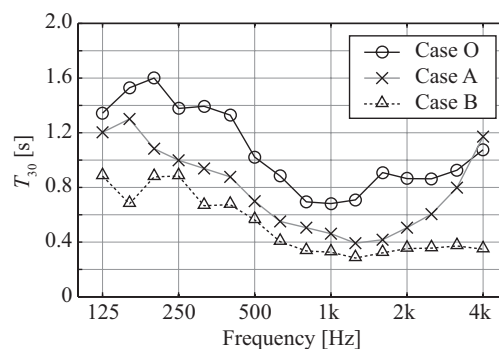


Figure 6.24 Measurement system for the meeting room.

結果と考察

図 6.25 に残響時間 T_{30} (−5 to −35 dB) を示す．基本条件である Case O については，中音域の値が小さい谷型の特性を示しており，会議室としては全体的に残響が長い．吸音パネルを配置した Case A 及び Case B では，パネルの吸音特性に応じて残響が抑制されているが，対向 2 壁面に設置した Case A の高音域では値が大きくなっている．これは，反射性の平行壁間での往復反射に起因するものであり，フラッターエコーが強調されたものと考えられる．設計においては反射性の平行壁間が生じないよう壁面の仕上げに留意することが必要である．

図 6.26 に残響減衰曲線と減衰率比を示す．吸音条件に依らず，高音域ほど減衰率比のピークが大きくなる傾向が見られる．吸音条件の影響については，フラッターエコーが生じていると考えられる Case A の 4 kHz 帯域では減衰曲線が湾曲し，減衰率比のピークが大きい．

Figure 6.25 Reverberation times T_{30} (−5 to −35 dB), measured in the meeting room.

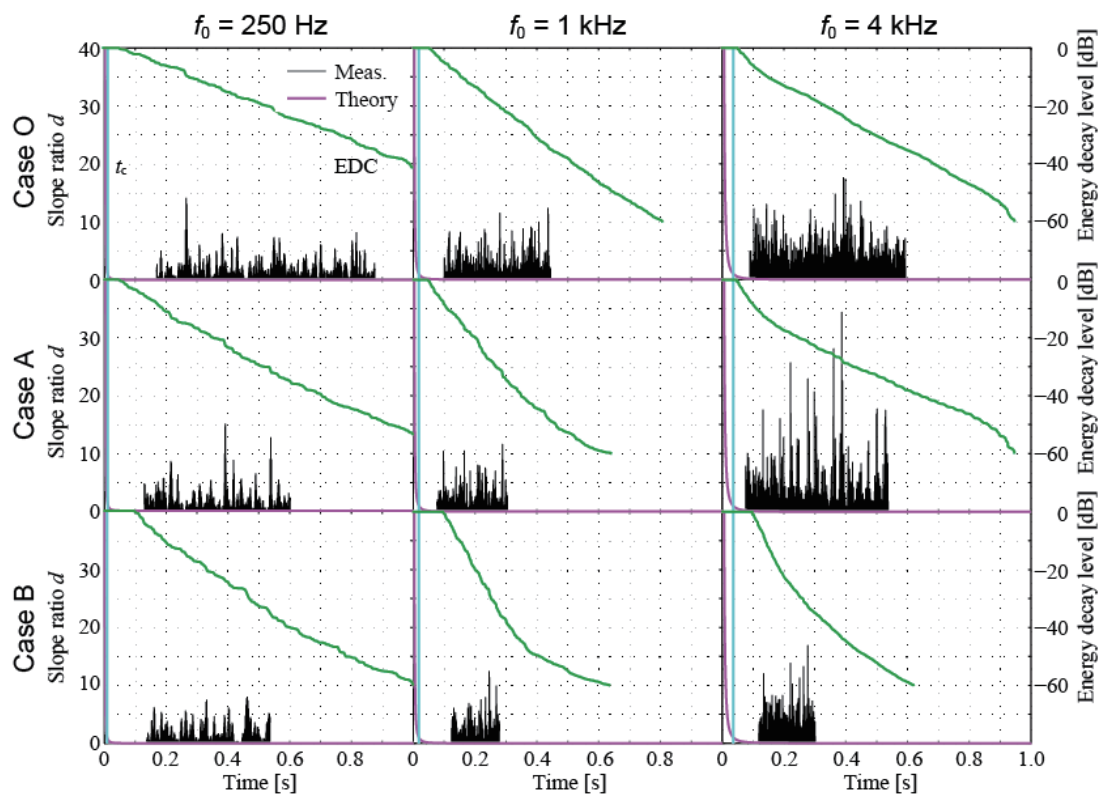


Figure 6.26 Energy decay curves and slope ratios, measured in the meeting room.

6.6.2 執務室における検討

検討方法

執務室（図 6.27）を対象として室内インパルス応答測定を行った．室内の基本条件として，壁は主にガラス（一部，石膏ボード），床はフローリング張り，天井は主に木毛セメント板（折上部は石膏ボード）である．室内はデスクワーク，ミーティング，リラックス等の活動を想定したゾーニングがなされ，比較的低密度に家具類が配置されている．

測定については，家具搬入前後に行った．図 6.28 に示す通り，音源として 12 面体スピーカ（高さ 1.5 m）を設置し，受音点（高さ 1.2 m）を多数設けた．本測定は，空室時の基本音響特性及び運用時のゾーン間での音響伝達特性の把握を目的^[311]としたものであるため，家具搬入前後で測定点が異なる．主な測定系統は図 6.24 と同様であるが，パワーアンプは RME 社製 Fireface 800 を用いた．音源から家具搬入前では 18 次，搬入後には 17 次の TSP 信号を放射し，それぞれ受音点で長さ 5.46 秒，2.73 秒の室内インパルス応答を得た．尚，同期加算回数は 10 回，サンプリング周波数は 48 kHz とした．受音点 R で得られた応答に 1/1 オクターブバンドフィルター処理を施し，減衰率比を算出する．評価区間は -5 dB から -35 dB とし，平均的な減衰率として残響減衰曲線の非線形回帰曲線（第 6.3.3 節）の瞬時減衰率を用いる．

結果と考察

図 6.29 に残響減衰曲線と減衰率比を示す．家具の有無に依らず，高音域ほど減衰率比のピークが大きくなる傾向が見られる．家具の影響については，吸音力の増加に伴い残響が抑制されていること以外には傾向を捉え難い．

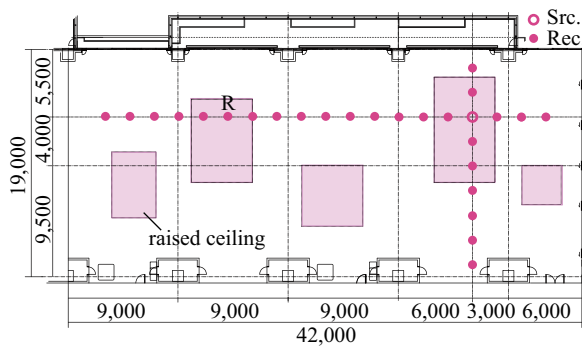


(a) A panoramic view.

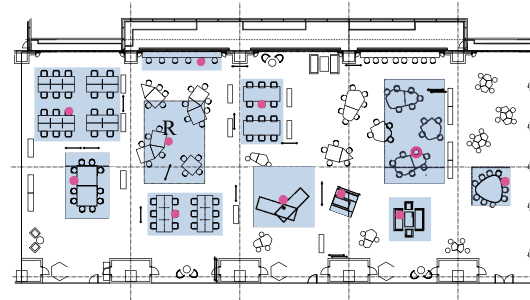


(b) A measurement configuration.

Figure 6.27 Views of the office room.



(a) Vacant.



(b) Furnished.

Figure 6.28 Configurations of measurements in the office room.

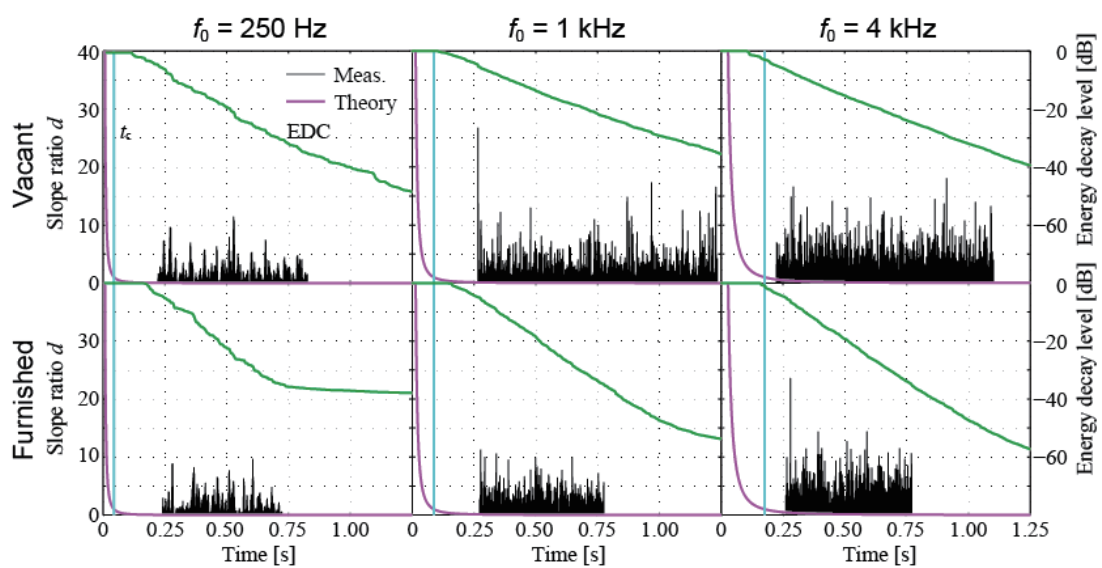


Figure 6.29 Energy decay curves and slope ratios, measured in the office room.

6.6.3 ホールにおける検討

検討方法

ホール（図 6.30）を対象として室内インパルス応答測定を行った．室条件として，1 階部全周壁の吸音性カーテンに関する有無を設定した．測定については，図 6.31 に示す通り，音源として 12 面体スピーカ（高さ 1.5 m）を設置し，受音点（高さ 1.5 m）については，室の対称性を考慮して室の片側に複数設けた．図 6.32 に測定系統を示す．音源から 17 次の TSP 信号を放射し，受音点で長さ 2.73 秒の室内インパルス応答を得た．尚，同期加算回数は 2 回，サンプリング周波数は 48 kHz とした．受音点 R で得られた応答に 1/1 オクターブバンドフィルター処理を施し，減衰率比を算出する．評価区間は -5 dB から -35 dB とし，平均的な減衰率として残響減衰曲線の非線形回帰曲線（第 6.3.3 節）の瞬時減衰率を用いる．



(a) Without absorbing curtains.



(b) With absorbing curtains.

Figure 6.30 Views of the concert hall.

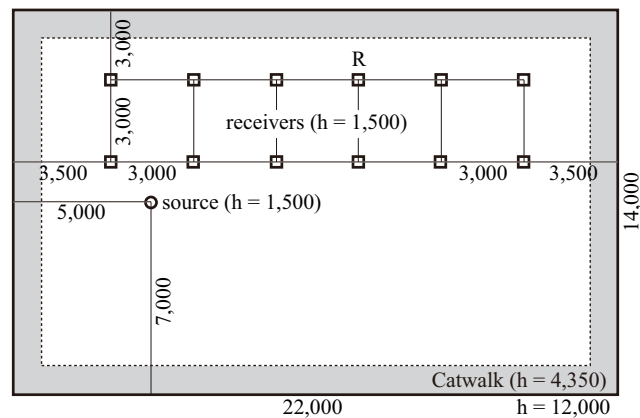


Figure 6.31 Configurations of measurements in the concert hall.

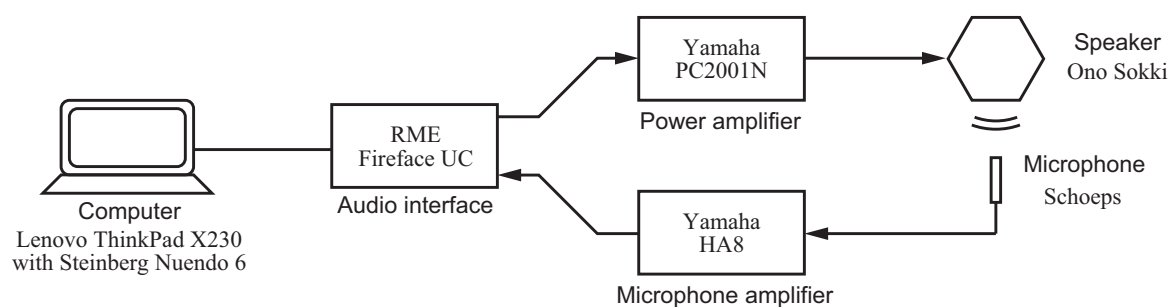


Figure 6.32 Measurement system for the concert hall.

結果と考察

図 6.33 に残響減衰曲線と減衰率比を示す．カーテンの有無に依らず，高音域ほど減衰率比のピークが大きくなる傾向が見られる．カーテンの影響については，吸音力の増加に伴い残響が抑制されていること以外には傾向を捉え難い．

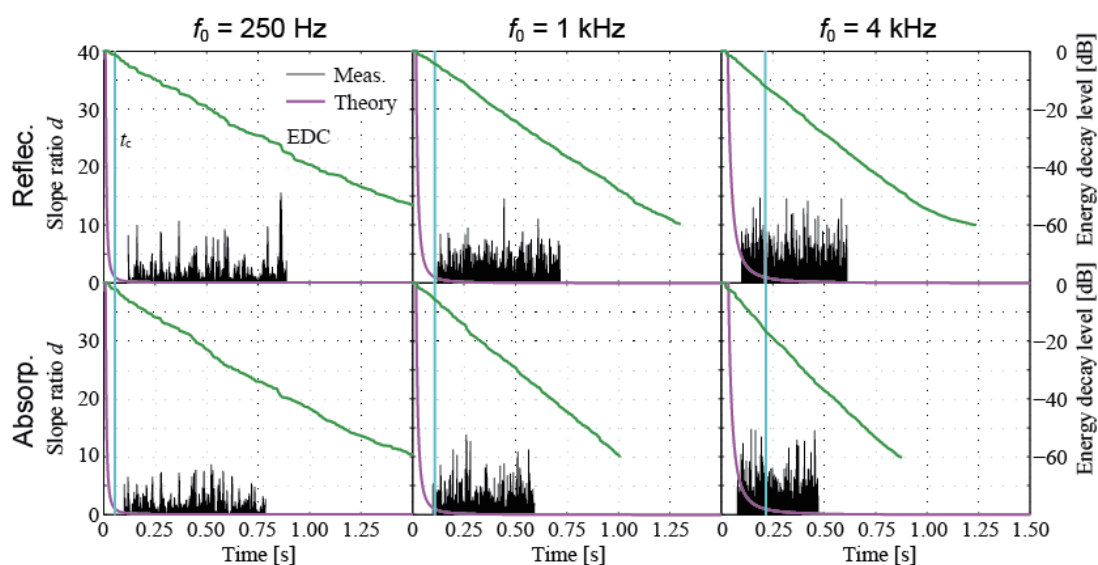


Figure 6.33 Energy decay curves and slope ratios, measured in the concert hall.

6.6.4 指標値による比較

減衰率比の基本統計量である変動係数 C_v 及び尖度 β_2 により 3 種の室を比較する．図 6.34 に，各受音点で得られた減衰率比に関する統計量の平均値を 2 次元配置して示す．尚，値は各室条件における全受音点の平均値である．

高音域ほど，また室容積が大きいほど値が大きい傾向が見られるが，全体的に値のばらつきが小さく室条件の違いを捉え難い．これは，室条件の影響が顕著に表れる初期反射音の影響を除外しているため，また 2 次元空間を対象とした第 6.5.2 節と異なり，本検討は 3 次元空間であるため反射音の密度が高く，反射音が疎である時間が短いためであると考えられる．従って，高い分解能で室条件の影響を評価するためには，反射音が疎である初期反射音を評価区間を含めることや，音源に比較的に近い受音点を用いることが考えられる．

尚，4 kHz 帯域に見られる特異値はフラッターエコーが生じていると考えられる会議室 (Case A) の値である．

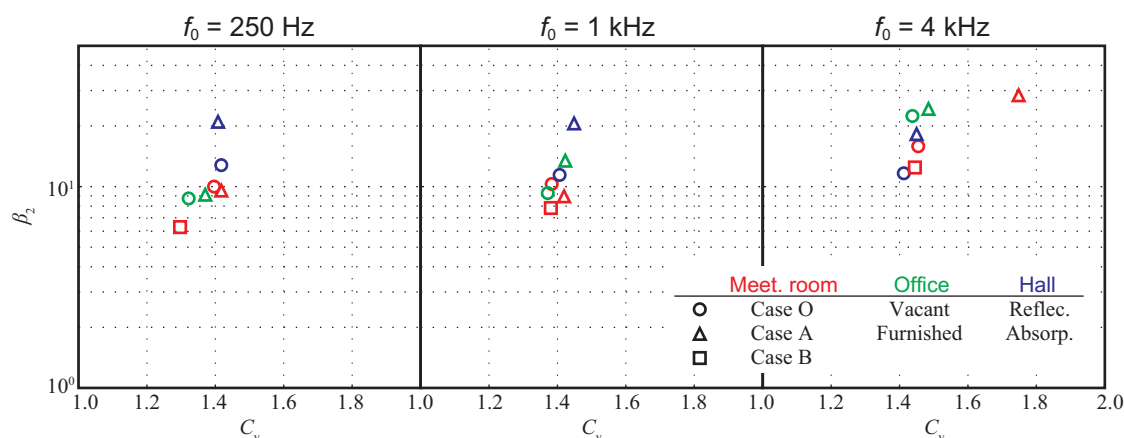


Figure 6.34 Comparison of three rooms on statistics of slope ratios.

6.7 結言

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手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た。その中で一般化減衰曲線を用いる手法を提案するとともに、残響減衰曲線を用いる既往の2種類の手法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比と称する量に着目し、幾何・波動音響解析によるケーススタディ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の提案を行った。第二に、基本統計量により減衰率比の基本的性質を把握し、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一側面の評価及びエコーの定量的評価が可能であることを明らかにした。

但し、2次元FDTD法解析による結果では指標上に強く表れた室条件の影響が室内音響測定ではあまり見られなかった。対象とした室の選定が不適当であった可能性は棄却できないが、3次元音場では反射音密度が高いことから2次元音場に比べて指標値の変化量は小さくなると考えられる。評価区間等に関する指標算出方法のさらなる工夫が望まれる。さらに、減衰率比に基づく指標を含め、既往の音場の拡散性に関する指標間の相関を検討したが、強い傾向は見られなかった。

従来より音場の拡散性は評価領域に依らず標準偏差等による物理量のばらつきの程度で評価されてきたが、統計的には強い特異点が存在する場合にもばらつきは小さくなる場合がある。本章で用いた尖度により特異性の程度を分析することは音場の拡散性に関する多角的な理解に寄与すると考えられる。いずれにしても音場の拡散性に関してはその解釈が発散しつつあるため、一つの定義に依らずとも音場の物理的側面及び心理的側面を考慮したある収束点が与えられることを期待したい。その他、特にエコーに関しては物理量と心理量の対応を検討し、設計目標値を設定すること等が今後の課題として挙げられる。

第 7 章

総括

本研究は、壁面の部位音響性能として吸音性に加えて拡散性を基軸に据えた二元的音響設計スキームの確立を目指し、室内音響設計の各段階の确实性の向上に資するよう検討を行ったものである。本章では、本研究によって得られた成果を総括した上で、今後の展望及び課題について述べる。

7.1 研究の成果

第 1 章では、本研究の背景及び本研究の目的について述べた。

第 2 章では、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。基礎事項に関しては、波動方程式に代表される音場の基礎方程式の導出や、閉空間における音響伝搬の表出である室内インパルス応答について述べた。室内音響指標については、時間的・エネルギー的・空間的・周波数的な観点で分類し、ISO 3382^[131, 132, 134]を中心として周辺の事項も含めてまとめた。残響理論に関しては、適用可能な室形状として任意形状室と矩形室に分類し、特に壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論の特徴及び適用性に係る課題を挙げた。音場の拡散性に関してはこれまでなされてきた様々な解釈に基づいて広義に捉え、空間だけでなく周波数や時間の各領域の評価方法をまとめた。その上で、全体的に室条件が室内音響特性に及ぼす影響に関する領域横断的な知見が不足していることを指摘した。

第 3 章では、本研究で用いる音響解析手法の基礎理論を概説した。幾何音響的手法として鏡像法及び音線法を、波動音響的手法として FDTD 法に関して述べ、解析設定に関する基礎検討を行った。

第 4 章では、室内音響設計時の基本設計段階における設計案の作成・修正に資する知見を得るため、室条件が音響特性に及ぼす基礎的影響を把握した。検討は、音響伝搬性状、

室内音響指標，音場の拡散性に着目して同一の室条件を設定した検討を2次元FDTD法解析を用いて行った．音響伝搬性状については，室内インパルス応答波形の算出や，音圧等の空間分布及び音波の到来方向分布に関する様々な可視化を行い，室形状及び拡散体が及ぼす影響を観察した．室内音響指標については，表す聴感的特徴（時間的・エネルギー的・空間的観点及びそれらの周波数特性）や算出処理の特徴（臨界時刻の要不要，指向性受音等）が異なる指標を選択して求め，指標の空間分布や聴感印象に室条件が及ぼす影響に関して検討した．音場の拡散性については，空間・周波数・時間の各領域に関して主に既往の指標に基づくものの，領域横断的な分析方法を提案して行った．

その結果，特に拡散体が室内音響特性に及ぼす影響に関して，室形状や吸音分布等の他の室条件に強く依存することが明らかとなった．また，拡散体が室内音響指標に及ぼす影響としては残響時間 T_{30} が顕著に表れることを明らかにした．本検討はあくまでも2次元音場を対象としたものであるが，異なる室条件の相対的な傾向の変化については設計実務における有効な知見となることと期待している．

第5章では，壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論の適用性に関する検証を，理論的な考察及び音響数値解析との対応の検討を通じて行った．理論的な考察及び幾何音響解析による検討を通じて理論の定式化における物理現象の近似精度に関する妥当性を明らかにしたが，波動音響解析との対応を比較した結果，必ずしも良好な対応が示されなかった．しかしながら，波動場への適用に際しては，理論的根拠は乏しいものの理論計算に関する実用的な設定方法を提案し，予測精度が大幅に向上することを示した．具体的には，室稜線で生じる端部散乱の影響に関する乱反射率としての付加，臨界角の範囲の拡張である．但し，理論では想定していない拡散反射場から鏡面反射場への遷移に係る現象に関しては捉えることができず，そのような室内への適用は不可能であると言える．従って，本章及び第4章で得られた壁面拡散とその他の室条件の相互作用による影響傾向を踏まえて，理論の適用の可否を判断することが望まれる．また，データベースが希薄である入射角度依存の物性値については，吸音率はParis式により推定可能であることを理論的に示し，乱反射率については測定法が確立しつつある音響数値解析による算出手法を用いることで与えられる．将来の課題としては本理論の矩形室以外の室形への理論拡張が挙げられる．

第6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手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た．その中で一般化減衰曲線を用いる手法を提案するとともに，残響減衰曲線を用いる既往の2種類の手法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比と称する量に着目し，幾何・波動音響解析によるケーススタディ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の提案を行った．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一側面の評価及びエコーの定量的評価が可能であることを明らかにした．同時に，音場の拡散性に関しては従来の標準偏差等による物理量のばらつき評価だけでなく，尖度による特異性評価の必要性・可能性に関する問題提起を行った．これらの成果は，室内音響設計における音場の性状把握だけでなく，音響試験室（残響室）性能の把握に有用であると考えられる．

7.2 今後の展望・課題

室内音響設計の目標は人間の quality of life (QOL) に対する欲求の高まりを受けて変化するが，一品生産である建築空間に対する設計の画一的な解は存在しない．しかしながら，要素分解した室条件と音響特性の因果関係を明確化することで設計の確実性は向上すると考えられる．この点で，本研究は一部貢献するものと考えている．今後も計算機性能や信号処理技術の向上に伴って膨大かつ精密な情報処理が可能となることで，音源・受音系及び境界条件の指向特性・周波数特性の考慮等，音場の物理的側面の研究は広がると思われるが，必ずしも深まるとは言えない．当然のことながら音は人間が知覚することで意味を成すことから，望ましい音環境のあり方の探求や心理尺度の解明も平行して行う必要がある．特に，室表面の拡散性を目視で評価する指標である SDI が提案され，音場の良否を効果的に表すという報告もあるように，五感を横断する知見も重要である．本研究では，直接的に心理量については検討しておらず，心理量との一定の対応が知られている一部の室内音響指標を用いて室条件の影響を検討したものの，解析対象が主に 2 次元空間であることの懸念や反射板やパーティション等の中空にある物体の影響に関する課題が残されている．また，例えば，一般的に楕円形の室はエコーが生じやすいため嫌厭されるが焦点で吸音すれば全ての音を吸収することができるように，経験的な先入観を棄却することで音響設計の自由度は向上の余地が十分に残されていると思われる．さらに，第 6 章で提案した音場の拡散性や音響障害に関する指標においても算出や評価の方法が完全ではない．音場の拡散性に関しては室内音響学とともに発生し歴史をとともに歩んでいるが，その解釈が発散しつつあるため，一つの定義に依らずとも音場の物理的側面及び心理的側面を考慮したある収束点が与えられることを期待したい．室内音響設計スキーム及び古くて新しいテーマである音場の拡散性に関して，本研究の成果が視座を与える一つの基礎を担うことを祈念して本論文を結ぶ．

付録 A

壁面の拡散性を考慮した矩形室の残響理論: 2次元音場における定式化

矩形室の鏡面反射場の残響

鏡像音源による鏡面反射場 図 A.1 の通り，矩形室内の点音源に対して鏡像音源配列が定まる．以降，室中央の受音点に対して鏡像音源の連続的分布を想定し，反射場の平均エネルギー密度に着目する．受音点から等距離にある微小区間の音源個数，距離減衰，壁面吸音を算定すると，定常状態 $t = 0$ [s] で音源出力 W [W] を停止した場合，鏡面反射場の音響エネルギー密度は次式で表される．

$$E^S(t) = \int_0^{2\pi} \int_{ct}^{\infty} \frac{W}{2\pi cr} \frac{r dr d\theta}{L_x L_y} (1 - \tilde{\alpha}_x)^{\frac{r \cos \theta}{L_x}} (1 - \tilde{\alpha}_y)^{\frac{r \sin \theta}{L_y}} \quad [\text{J/m}^2], \quad (\text{A.1})$$

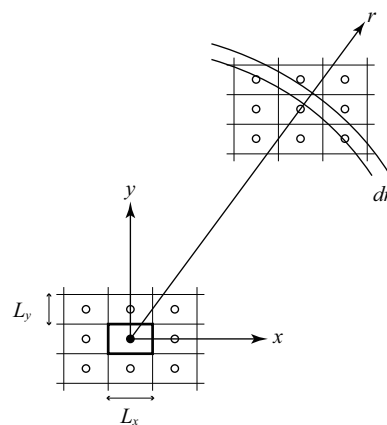


Figure A.1 Image sources of a rectangular room.

但し, 音速 c [m/s], 室寸法 $L_{x(y)}$ [m], 平均吸音率 $\tilde{\alpha}_{x(y)}$ であり, 平行壁間の交互反射を考慮して,

$$\tilde{\alpha}_{x(y)} = 1 - \sqrt{(1 - \alpha_{x(y)}^+)(1 - \alpha_{x(y)}^-)}, \quad (\text{A.2})$$

但し, $\alpha_{x(y)}^\pm$ は各方向対向 2 面の吸音率である. 一般に, 式 (A.1) は方向依存の多数の指数減衰からなり, 厳密には数値積分が必要となる^[100].

古典的残響理論と同様, 接線方向音源群の平均自由行路 l_t を 2 次元完全拡散音場の理論値 $l_r = \pi S/L$ ^[153] [m] ($S = L_x L_y$ [m²], $L = 2(L_x + L_y)$ [m]) と概ね等しいものとし, 単一指数減衰を仮定する. さらに, 式 (A.2) による各方向の幾何平均乱入射吸音率 $\tilde{\alpha}_{x(y)}^r$ に対して, 2 方向の壁長加重平均を仮定する.

$$\alpha_t = \frac{L_y \tilde{\alpha}_x^r + L_x \tilde{\alpha}_y^r}{L_y + L_x}. \quad (\text{A.3})$$

その結果, 式 (A.1) は次式のように近似される.

$$\begin{aligned} E_t^S(t) &= \int_{ct}^{\infty} \frac{W}{2\pi cr} (1 - \alpha_t)^{\frac{r}{l_t}} \frac{2\pi r dr}{S} \\ &= \frac{W}{c\hat{A}_t} \exp(-\hat{A}_t ct/S) \quad [\text{J/m}^2], \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

但し, 吸音に関して, $\hat{A}_t = A_t/\pi$ [m], $A_t = L\alpha_{E_t}$ [m], $\alpha_{E_t} = -\ln(1 - \alpha_t)$ である.(以降, \hat{A} はエネルギー密度に対する入射インテンシティの比を考慮した室吸音面積を表し, $\hat{A}/S = \alpha_E/l$ の関係が成り立つ.) 式 (A.4) は接線方向音源群の鏡面反射場の第 1 近似であり, Eyring 式と同形ながら平行壁間では Millington の平均吸音率を用いている. 但し, この式は平均的な減衰から逸脱しやすい軸近傍音源群の寄与も含まれている. 以降では, 鏡像音源を波動モードと関連づけて軸近傍・接線方向音源群に区分し, 1 次元・2 次元鏡面反射場として取り扱う.

軸近傍音源群の鏡面反射場 x 軸近傍音源として正負方向から角度 $\pm\theta_y$ [rad] 以内の音源群を想定する (Fig. A.2). この音源群は x 方向壁面に垂直入射, y 方向壁面に擦過入射する. 室内 y 方向に対する鏡像音源からの行路差が 1/4 波長 (位相差 $\pi/2$) 以下の場合, 波動論的には主に x 軸モードに寄与すると考えられる. 音源が遠方かつ角度 θ_y が小さい場合, 最大行路差は $\Delta_y \approx L_y \sin \theta_y \approx L_y \theta_y$ [m] となり, 従って臨界角は次式で表される.

$$\theta_{x(y)} = \frac{\pi c}{2\omega L_{x(y)}} \quad [\text{rad}]. \quad (\text{A.5})$$

臨界角 θ_y における x 方向壁面の反射頻度は $n_{ax} \approx c/L_x$ [1/s], y 方向壁面の反射頻度は $n_{axy} \approx c \sin \theta_y / L_y \approx c \theta_y / L_y$ [1/s] で表され, 音源群の平均としては $\bar{n}_{ax} \approx n_{ax}$, $\bar{n}_{axy} \approx n_{axy}/2$

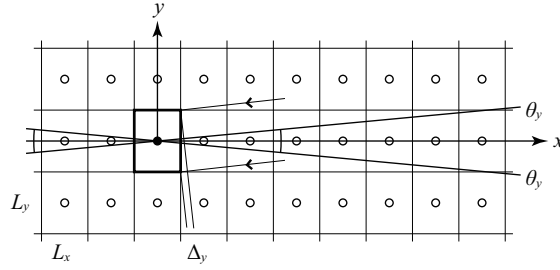


Figure A.2 Axial Image sources for the x -axis (identical to Figure 2.5).

となる．式 (A.1) の角度に関する積分区間を限定することにより， x 軸近傍音源群による 1 次元鏡面反射場のエネルギー密度は次式で表される．

$$\begin{aligned}
 E_{ax}^S(t) &= \frac{2W}{c} \int_{ct}^{\infty} (1 - \tilde{\alpha}_x^n)^{\frac{r}{L_x}} (1 - \tilde{\alpha}_y^g)^{\frac{\theta_y r}{2L_y}} \frac{2(2\theta_y)dr}{2\pi S} \\
 &= \frac{2W}{c} \frac{cL_x}{\omega S^2} \int_{ct}^{\infty} (1 - \alpha_{ax})^{\frac{r}{L_x}} dr \\
 &= \frac{2W}{c} \frac{cL_x}{\omega S \hat{A}_{ax}} \exp(-\hat{A}_{ax} ct/S) \text{ [J/m}^2\text{]},
 \end{aligned} \tag{A.6}$$

但し，1 次元平均自由行路 $l_x = L_x$ [m]，軸近傍音源の 1 次元反射場への寄与は他の 1 方向で同相のため 2 次元反射音場への寄与の 2 倍となる（モード理論における規準化係数の比に相当する）．吸音に関しては， $\hat{A}_{ax} = A_{ax}/2$ [m]， $A_{ax} = 2L_y \alpha_{Eax}$ [m]， $\alpha_{Eax} = -\ln(1 - \alpha_{ax})$ ，

$$\alpha_{ax} = 1 - (1 - \tilde{\alpha}_x^n)(1 - \tilde{\alpha}_y^g)^{\epsilon_{axy}}, \tag{A.7}$$

$$\epsilon_{axy} = \frac{\bar{n}_{axy}}{\bar{n}_{ax}} \approx \frac{\pi c L_x}{4 \omega L_y^2}, \tag{A.8}$$

但し， x 方向壁面の垂直入射吸音率 $\tilde{\alpha}_x^n$ ， y 方向壁面の擦過入射吸音率 $\tilde{\alpha}_y^g$ であり，これらは式 (A.2) の平行壁間の幾何平均に基づく．厳密には，上記の垂直・擦過入射は軸近傍音源群の角度範囲からの入射に相当し，その範囲は周波数に依存する．従って斜入射吸音率のデータベースが必要となるが，実用的には局所作用の仮定に基づき概算が可能である（第 5.2.3 節）．1 次元反射場としての全平均吸音率 α_{ax} は， x 方向に対する y 方向の平均反射頻度の比 ϵ_{axy} を通して，各方向の反射頻度が反映される．

軸近傍音源の各方向の反射頻度はほぼ独立であるため，式 (A.7) では平均反射頻度の重み付け幾何平均としている．但し，擦過入射吸音率が $\alpha_y^g = 1$ （完全吸音）の場合は $\alpha_{ax} = 1$ となり，式 (A.6) の x 軸近傍音源群の寄与は完全に消失する．この場合は明らかに不自然であり，理論の適用外となる．

全鏡面反射場の残響 式 (A.4) は軸近傍音源群の寄与を含むことから, 寄与の重複を除いて式 (A.6), (A.4) を合計すると, 全鏡面反射場のエネルギー密度は次式で表される.

$$E^S(t) = \frac{W}{c} \left[\frac{\gamma_t}{\hat{A}_t} \exp(-\hat{A}_t ct/S) + \sum_x \frac{2\gamma_{ax}}{\hat{A}_{ax}} \exp(-\hat{A}_{ax} ct/S) \right] [\text{J/m}^2], \quad (\text{A.9})$$

但し, 各音源群の音源個数の割合を次式で表す.

$$\gamma_t = 1 - \frac{\pi c S}{2\omega S}, \quad (L = 2(L_x + L_y) [\text{m}]),$$

$$\gamma_{ax} = \frac{\pi c L_x}{\omega S}.$$

従って, 鏡面反射場の残響は接線方向 1 種, 軸近傍 2 種, 計 3 種の指数減衰により構成され, 各減衰率は次式で表される.

$$D_{t(ax)}^S = 10 \log_{10} e \cdot c \hat{A}_{t(ax)} / S [\text{dB/s}]. \quad (\text{A.10})$$

尚, 各減衰率に関しては以下の関係が成り立つ.

$$\min(D_{ax}^S, D_{ay}^S) < D_t^S. \quad (\text{A.11})$$

式 (A.9) は, 波動音響のモード理論から導出される近似表現 [190, 267] と完全に一致する. 軸近傍音源の範囲を図 A.3 の波数空間の固有モード分布から解釈できる. 軸モードの支配領域を隣接する接線モードの格子点との中間までとみなすと, 波数によって上限角度が次式で定まる.

$$\frac{\pi}{2L_y} = k \sin \theta_y \approx k \theta_y [1/\text{s}] \quad (\text{A.12})$$

上式は式 (A.5) と一致し, 波数空間の軸モード領域が鏡像空間の軸近傍音源群に対応すると言える.

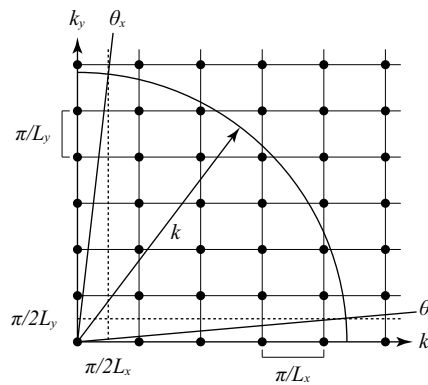


Figure A.3 Axial modes in the xy -plane in wavenumber space (identical to Figure 2.6).

以上の理論では Hirata 理論^[115] に対して 3 つの修正点，即ち臨界角の定義，吸音率の平均方法，エネルギーの規準化係数の導入が含まれる．元の理論では臨界角の導出が曖昧で本論と異なるため，モード理論と完全には整合していない．吸音率に関しては，平行壁間の交互反射を考慮せず，1 次元についても反射頻度の加重算術平均となっているため，最終的に残響減衰が異なってくる^[116]．

修正理論では，各方向の反射頻度の独立性を考慮して幾何平均を導入した．しかし，完全吸音面を含む極端な条件では，全ての 1 次元音場が完全に消失する矛盾が生じ，具体的には擦過入射の完全吸音条件は適用外となる．一方，元の理論では上記条件で 1 次元が消失することはなく，完全吸音面に垂直入射する 1 次元音場すら消失しない．従って，元の理論は垂直入射の完全吸音条件に適用不能となる．

壁面散乱を伴う矩形室の残響

鏡面反射場と拡散反射場 壁面の乱反射率は全反射エネルギーに対する非鏡面反射エネルギーの比として定義される^[280]．この乱反射率の導入により，鏡像音源からのエネルギーを反射毎に鏡面・拡散エネルギーの分配が可能となる．鏡面エネルギーは反射行程で一度も散乱されない成分と仮定すると，鏡面反射場のエネルギー密度は式 (A.9) の吸音率を全て鏡面反射吸音率 $\beta = \alpha + (1 - \alpha)s$ (乱反射率 s) に置換することで単純に導出される．即ち，各種係数 $\tilde{\alpha}$, α_E , A , \hat{A} を $\tilde{\beta}$, β_E , B , \hat{B} に置換し，次式で表される．

$$E^S(t) = \frac{W}{c} \left[\frac{\gamma_t}{\hat{B}_t} \exp(-\hat{B}_t ct/S) + \sum_x \frac{2\gamma_{ax}}{\hat{B}_{ax}} \exp(-\hat{B}_{ax} ct/S) \right] \text{ [J/m}^2\text{]}. \quad (\text{A.13})$$

ここで，各減衰率は次式に修正される．

$$D_{t(ax)}^S = 10 \log_{10} e \cdot c \hat{B}_{t(ax)} / S \text{ [dB/s]}. \quad (\text{A.14})$$

図 A.4 の通り，鏡面エネルギーの一部が各反射で拡散エネルギーに遷移し，遷移後は完全拡散反射により減衰し，受音点に乱入射として到来するものと仮定する．鏡像音源から距離 r' [m] の微小区間で散乱するエネルギーの割合は次式で表される．

$$\begin{aligned} \lim_{dr' \rightarrow 0} 1 - (1 - s_t)^{\frac{dr'}{l_t}} &= \lim_{dr' \rightarrow 0} 1 - \exp[-(s_{Et}/l_t)dr'] \\ &\rightarrow (s_{Et}/l_t)dr' = (\hat{S}_t/S)dr', \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

但し， $\hat{S}_t = S_t/\pi$ [m]， $S_t = L s_{Et}$ [m]， $s_{Et} = -\ln(1 - s_t)$ ，3 次元音場の平均乱反射率は次式で与えられる．

$$s_t = \frac{L_y(1 - \tilde{\alpha}_x^r) \tilde{s}_x^r + L_x(1 - \tilde{\alpha}_y^r) \tilde{s}_y^r}{L_y(1 - \tilde{\alpha}_x^r) + L_x(1 - \tilde{\alpha}_y^r)}, \quad (\text{A.16})$$

但し， $\tilde{s}_{x(y)}^r$ は式 (A.2) の平行壁間の幾何平均に基づく乱入射乱反射率であり， s_t は各方向の面積加重算術平均を仮定している．距離 r' で遷移する拡散成分を算定し，音源から受

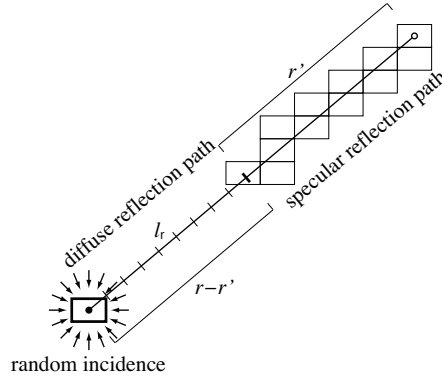


Figure A.4 Transition from specular to diffuse reflections (identical to Figure 2.7).

音点の全行路で積分すると、接線方向音源群の拡散反射場のエネルギー密度が次式で表される。

$$\begin{aligned}
 E_t^D(t) &= \frac{W}{c} \int_{ct}^{\infty} \int_0^r (1 - \beta_t)^{\frac{r'}{l_t}} (1 - \alpha_r)^{\frac{r-r'}{l_r}} \frac{s_{Et} dr'}{l_t} \frac{dr}{S} \\
 &= \frac{W}{c} \mu_t \int_{ct}^{\infty} \left[(1 - \alpha_r)^{\frac{r}{l_r}} - (1 - \beta_t)^{\frac{r}{l_t}} \right] \frac{dr}{S} \\
 &= \frac{W}{c} \mu_t \left[\frac{\exp(-\hat{A}_r ct/S)}{\hat{A}_r} - \frac{\exp(-\hat{B}_t ct/S)}{\hat{B}_t} \right] \text{ [J/m}^2\text{]},
 \end{aligned} \tag{A.17}$$

但し、 $\mu_t = \hat{S}_t / (\hat{B}_t - \hat{A}_r)$ 、拡散反射場の平均自由行路は l_r [m] である。遷移前の鏡面反射行程では、鏡面吸音率により減衰する ($\hat{B}_t = B_t / \pi$ [m]、 $B_t = L \beta_{Et}$ [m]、 $\beta_{Et} = -\ln(1 - \beta_t) = \alpha_{Et} + s_{Et}$)。一方、遷移後の拡散反射行程では、古典的残響理論に基づき面積加重算術平均の乱入射吸音率により減衰する ($\hat{A}_r = A_r / \pi$ [m]、 $A_r = L \alpha_{Er}$ [m]、 $\alpha_{Er} = -\ln(1 - \alpha_r)$)。ここで、 $l_t \approx l_r$ と $\alpha_t \geq \alpha_r$ の関係により、 $\hat{B}_t \geq \hat{A}_r$ と $0 \leq \mu_t \leq 1$ が常に成り立つ。

軸近傍音源群の拡散反射場 軸近傍音源に関して式 (A.6)、(A.17) と同様に考えると、x 軸近傍音源群の拡散反射場のエネルギー密度は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 E_{ax}^D(t) &= \frac{W}{c} \int_{ct}^{\infty} \int_0^r (1 - \tilde{\beta}_x^n)^{\frac{r'}{l_x}} (1 - \tilde{\beta}_y^g)^{\frac{\theta_y r'}{2l_y}} (1 - \alpha_r)^{\frac{r-r'}{l_r}} \frac{s_{Eax} dr'}{l_x} \frac{2(2\theta_y) dr}{2\pi S} \\
 &= \frac{W}{c} \frac{cL_x}{\omega S} \int_{ct}^{\infty} \int_0^r (1 - \beta_{Eax})^{\frac{r'}{l_x}} (1 - \alpha_r)^{\frac{r-r'}{l_r}} \frac{\hat{S}_{ax} dr'}{l_x} \frac{dr}{S} \\
 &= \frac{W}{c} \frac{cL_x}{\omega S} \mu_{ax} \left[\frac{\exp(-\hat{A}_r ct/S)}{\hat{A}_r} - \frac{\exp(-\hat{B}_{ax} ct/S)}{\hat{B}_{ax}} \right] \text{ [J/m}^2\text{]},
 \end{aligned} \tag{A.18}$$

但し、 $\mu_{ax} = \hat{S}_{ax} / (\hat{B}_{ax} - \hat{A}_r)$ 、軸近傍音源の拡散反射場への寄与は接線方向音源と同等である。吸音に関して、 $\hat{S}_{ax} = S_{ax} / 2$ [m]、 $S_{ax} = 2L_y L_z s_{Eax}$ [m]、 $s_{Eax} = -\ln(1 - s_{ax})$ であり、

式 (A.7) と同様 ,

$$s_{ax} = 1 - (1 - \hat{s}_x^n)(1 - \hat{s}_y^g)^{\varepsilon_{axy}}, \quad (\text{A.19})$$

但し , x 方向壁面の垂直入射乱反射率 \hat{s}_x^n , y 方向壁面の擦過入射乱反射率 \hat{s}_y^g であり , これらは式 (A.2) の平行壁間の幾何平均に基づく . 上記の垂直・擦過入射は周波数に依存する角度範囲からの入射に相当するため , 自由音場法測定 [280] または数値計算 [152] による斜入射乱反射率のデータベースが必要となる . 1 次元反射場としての全平均乱反射率 s_{ax} は , x 方向に対する y 方向の平均反射頻度の比 ε_{axy} を通して , 各方向の反射頻度が反映される . 1 次元鏡面反射場が拡散反射場より速く減衰する場合 ($\hat{B}_{ax} > \hat{A}_r$) は $\mu_{ax} \geq 0$, 遅い場合は不等号が反転し , 拡散反射場は 1 次元鏡面反射場の減衰に追従し , フラッターエコーが生じやすくなる . 尚 , 両者の減衰が等しい特異な場合 ($\hat{B}_{ax} = \hat{A}_r$) , 式 (A.18) は次式となる .

$$E_{ax}^D(t) = \frac{W}{c} \frac{\pi c L_x}{\omega S} \frac{s_{Eax}}{\beta_{Eax}} \frac{1 + \hat{A}_r ct/S}{\hat{A}_r} \exp(-\hat{A}_r ct/S) \quad [\text{J/m}^2]. \quad (\text{A.20})$$

吸音率の場合と同様 , 何れかの壁面の擦過入射乱反射率が $\hat{s}_y^g = 1$ (完全拡散) の場合は $\beta_{ax} = 1$ となり , 式 (A.13) の x 軸近傍音源群の寄与は完全に消失するため , 理論の適用外となる .

全拡散反射場の残響 鏡面反射場と同様 , 軸近傍音源群の寄与の重複を除いて式 (A.17) , (A.18) を合計すると , 全鏡面反射場のエネルギー密度は次式で表される .

$$E^D(t) = \frac{W}{c} \left\{ \gamma_t \mu_t \left[\frac{\exp(-\hat{A}_r ct/S)}{\hat{A}_r} - \frac{\exp(-\hat{B}_t ct/S)}{\hat{B}_t} \right] + \sum_x \gamma_{ax} \mu_{ax} \left[\frac{\exp(-\hat{A}_r ct/S)}{\hat{A}_r} - \frac{\exp(-\hat{B}_{ax} ct/S)}{\hat{B}_{ax}} \right] \right\} \quad [\text{J/m}^2]. \quad (\text{A.21})$$

定常状態 ($t = 0$) では ,

$$E^D(0) = \frac{W}{c \hat{A}_r} \left(\gamma \frac{s_{Et}}{\beta_{Et}} + \sum_x \gamma_{ax} \frac{s_{Eax}}{\beta_{Eax}} \right) \quad [\text{J/m}^2]. \quad (\text{A.22})$$

従って , 全壁面が完全拡散の場合 ($s_E/\beta_E \rightarrow 1$) , $E^D(0) \rightarrow W/c\hat{A}_r$ となることが確認できる .

拡散反射場の残響は見かけ上 3 種の二重指数減衰から構成され , 各減衰率は次式で表される .

$$D_{(\cdot)}^D = D_r^D \frac{1 - \exp[-(\hat{B}_{(\cdot)} - \hat{A}_r)ct/S]}{1 - (\hat{A}_r/\hat{B}_{(\cdot)}) \exp[-(\hat{B}_{(\cdot)} - \hat{A}_r)ct/S]} \quad [\text{dB/s}], \quad (\text{A.23})$$

但し, $D_r^D = 10 \log_{10} e \cdot c \hat{A}_r / S$ は 3 次元拡散音場の減衰率 [dB/s] である. 音源停止直後 ($t \rightarrow 0$), 全音源群とも減衰は緩やかに開始され ($D_{t(ax)}^D(t) \rightarrow 0$), 後期減衰では ($t \rightarrow \infty$), 接線方向音源群は完全拡散音場の減衰に従う ($D_t^D(t) \rightarrow D_r^D \leq D_t^S$) のに対して, 軸近傍音源群では $D_{ax}^D(t) \rightarrow \min(D_r^D, D_{ax}^S)$, 即ち対応する鏡面反射場と完全拡散音場のうち減衰が遅い方に追従することがわかる.

矩形室の総合残響 現実の室の残響は, 鏡面反射場と拡散反射場が重ね合わされて観測される. 式 (A.13), (A.21) より両方の反射場を合計すると, 次式が得られる.

$$E(t) = \frac{W}{c} \left[\frac{\mu_r}{\hat{A}_r} \exp(-\hat{A}_r c t / S) + \gamma \frac{1 - \mu_t}{\hat{B}_t} \exp(-\hat{B}_t c t / S) + \sum_x \gamma_{ax} \frac{2 - \mu_{ax}}{\hat{B}_{ax}} \exp(-\hat{B}_{ax} c t / S) \right] [\text{J/m}^2], \quad (\text{A.24})$$

但し, $\mu_r = \gamma \mu_t + \sum \gamma_{ax} \mu_{ax}$ である. 従って, 室全体の残響は見かけ上 4 種の指数減衰から構成され, 鏡面反射場の 3 種の減衰率 $D_{t(ax)}^S$ と完全拡散音場の減衰率 D_r^D に対応する. 式 (A.11) の関係より, 後期減衰において全体として 1 次元鏡面反射場または完全拡散音場のうち最も遅い減衰に収束する.

定常状態の全エネルギー密度は次式で表される.

$$E(0) = \frac{W}{c \hat{A}_r} \left[\gamma \frac{\hat{A}_r + \hat{S}_t}{\hat{B}_t} + \sum_x \gamma_{ax} \frac{2 \hat{A}_r + \hat{S}_{ax}}{\hat{B}_{ax}} \right] [\text{J/m}^2]. \quad (\text{A.25})$$

実際の室の中高音域では定常状態で接線方向音源群が支配的となるため, 上式は次式で近似されよう.

$$E(0) \approx \frac{W}{c \hat{A}_r} \frac{\alpha_{Er} + s_{Et}}{\beta_{Et}} \leq \frac{W}{c \hat{A}_r} [\text{J/m}^2]. \quad (\text{A.26})$$

このとき, 鏡面エネルギーと拡散エネルギーの割合は α_{Er}/s_{Et} となる. 従って, 拡散エネルギーの全体比は次式で表され, 従来の平均吸音率と接線方向音源群の平均乱反射率により定まる.

$$R^D(0) \approx -10 \log_{10} \left(1 + \frac{\alpha_{Er}}{s_{Et}} \right) [\text{dB/s}]. \quad (\text{A.27})$$

後期減衰において, D_r^D が最小の場合 ($\hat{A}_r \leq \hat{B}_{ax(y)}$), 鏡面反射成分は拡散反射成分より速く消失する ($R^D(t) \rightarrow 0$). 最小でない場合, 特定の 1 次元鏡面反射成分が拡散反射成分とともに残存し, そのエネルギー比は次式の通り均衡することになる.

$$R^D(t) \rightarrow -10 \log_{10} \left(1 + 2 \frac{\hat{A}_r - \hat{B}_{ax(y)}}{\hat{S}_{ax(y)}} \right) [\text{dB/s}]. \quad (\text{A.28})$$

即ち, その比は従来の平均吸音率と軸近傍音源群の平均吸音率・乱反射率によって定まる.

参考文献

- [1] A. Abdou and R. W. Guy. Spatial information of sound fields for room-acoustics evaluation and diagnosis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 100, No. 5, pp. 3215–3226, 1996.
- [2] Acoustic Design Ahnert. EASE version 4.3 user's guide & tutorial, 2009.
- [3] Niels Werner Adelman-Larsen, Eric R. Thompson, and Anders C. Gade. Suitable reverberation times for halls for rock and pop music. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 127, No. 1, pp. 247–255, 2010.
- [4] Jont B. Allen and David A. Berkley. Image method for efficiently simulating small-room acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 65, No. 4, pp. 943–950, 1979.
- [5] American National Standards Institute. *ANSI/ASA S3.5-1997 (R 2012) Methods for Calculation of the Speech Intelligibility Index*. 1997.
- [6] American National Standards Institute. *ANSI/ASA S3.2-2009 (R 2014) Method for Measuring the Intelligibility of Speech over Communication Systems*. 2009.
- [7] American National Standards Institute. *ANSI/ASA S1.11-2014/Part 1/IEC 61260-1:2014 American National Standard Electroacoustics - Octave-band and Fractional-octave-band Filters - Part 1: Specifications (a nationally adopted international standard)*. 2014.
- [8] Y. Ando. Subjective preference in relation to objective parameters of music sound fields with a single echo. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 62, No. 6, pp. 1436–1441, 1977.
- [9] Yoichi Ando. Calculation of subjective preference at each seat in a concert hall. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 74, No. 3, pp. 873–887, 1983.
- [10] James A. S. Angus and Claire I. McManmon. Orthogonal sequence modulated phase reflection gratings for wideband diffusion. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 46, No. 12, pp. 1109–1118, 1998.
- [11] Nobuharu Aoshima. Computer-generated pulse signal applied for sound measurement. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 69, No. 5, pp. 1484–1488, 1981.
- [12] H. Arau-Puchades. An improved reverberation formula. *Acustica*, Vol. 65, No. 4, pp. 163–180, 1988.
- [13] Bishnu S. Atal, Manfred Robert Schroeder, and Gerhard M. Sessler. Subjective reverberation time and its relation to sound decay. In *Proceedings of the 5th International Congress on Acoustics*, Liege, Belgium, 1965.
- [14] Mark R. Avis, Lejun Xiao, and Trevor J. Cox. Stability and sensitivity analyses for diffusers with single and multiple active elements. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 53, No. 11, pp. 1047–1060, 2005.
- [15] C. G. Balachandran and D. W. Robinson. Diffusion of the decaying sound field. *Acustica*, Vol. 19, No. 5, pp. 245–257, 1967.
- [16] Glen Ballou. *Handbook for sound engineers*. Focal Press, 2008.
- [17] M. Barron and L.-J. Lee. Energy relations in concert auditoriums . I. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 84, No. 2, pp. 618–628, 1988.
- [18] M. Barron and A. H. Marshall. Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: The derivation of a physical measure. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 77, No. 2, pp. 211–232, 1981.
- [19] Michael Barron. *Auditorium acoustics and architectural design*. E & FN SPON, 1993.
- [20] Mike Barron. Using the standard on objective measures for concert auditoria, ISO 3382, to give reliable results. *Acoustical Science and Technology*, Vol. 26, No. 2, pp. 162–169, 2005.

- [21] Laurence Batchelder. Reciprocal of the mean free path. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 36, No. 3, pp. 551–555, 1964.
- [22] G. Benedetto, E. Brosio, and R. Spagnolo. The effect of stationary diffusers in the measurement of sound absorption coefficients in a reverberation room: An experimental study. *Applied Acoustics*, Vol. 14, No. 1, pp. 49–63, 1981.
- [23] L. L. Beranek and Th. J. Schultz. Some recent experiences in the design and testing of concert halls with suspended panel arrays. *Acustica*, Vol. 10, No. Supplement 1, pp. 307–316, 1965.
- [24] Leo Beranek. *How they sound: Concert and opera halls*. American Institute of Physics, 1996.
- [25] Leo Beranek. *Concert halls and opera houses: music, acoustics and architecture*. Springer, 2nd edition, 2003.
- [26] Leo L. Beranek. The notebooks of Wallace C. Sabine. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 61, No. 3, pp. 629–639, 1977.
- [27] Leo L. Beranek. Subjective rank-orderings and acoustical measurements for fifty-eight concert halls. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 89, No. 3, pp. 494–508, 2003.
- [28] Leo L. Beranek. Listener envelopment LEV, strength G and reverberation time RT in concert halls. In *Proceedings of the 20th International Congress on Acoustics*, No. 296, p. 5, Sydney, Australia, 2010.
- [29] Jean-Pierre Berenger. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Acoustics*, Vol. 114, pp. 185–200, 1994.
- [30] A. Billon, F. Picaut, and A. Sakout. Prediction of the reverberation time in high absorbent room using a modified-diffusion model. *Applied Acoustics*, Vol. 69, No. 1, pp. 68–74, 2008.
- [31] F. A. Bilsen. Thresholds of perception of repetition pitch. Conclusions concerning coloration in room acoustics and correlation in the hearing organ. *Acustica*, Vol. 19, No. 1, pp. 27–32, 1967.
- [32] Sylvio R. Bistafa and John S. Bradley. Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 107, No. 2, pp. 861–875, 2000.
- [33] M. A. Błaszak. Acoustic design of small rectangular rooms: normal frequency statistics. *Applied Acoustics*, Vol. 69, No. 12, pp. 1356–1360, 2008.
- [34] K. Bodlund. A new quantity for comparative measurements concerning the diffusion of stationary sound fields. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 44, No. 2, pp. 191–207, 1976.
- [35] R. H. Bolt. Note on normal frequency statistics for rectangular rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 18, No. 1, pp. 130–133, 1946.
- [36] Ingolf Borg. A comparison of room simulation software - The 2nd round robin on room acoustical computer simulation. *Acustica. Acustica united with Acta Acustica*, Vol. 86, No. 6, pp. 943–956, 2000.
- [37] Jeffrey Borish. Extension of the image model to arbitrary polyhedra. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 75, No. 6, pp. 1827–1836, 1984.
- [38] J. S. Bradley. Predictors of speech intelligibility in rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 80, No. 3, pp. 837–845, 1986.
- [39] J. S. Bradley. A comparison of three classical concert halls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 89, No. 3, pp. 1176–1192, 1991.
- [40] J. S. Bradley. Comparison of concert hall measurements of spatial impression. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 96, No. 6, pp. 3525–3535, 1994.
- [41] J. S. Bradley. Review of objective room acoustics measures and future needs. *Applied Acoustics*, Vol. 72, No. 10, pp. 713–720, 2011.
- [42] J. S. Bradley and G. A. Soulodre. Objective measures of listener envelopment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 98, No. 5, pp. 2590–2597, 1995.
- [43] John S. Bradley. Using ISO 3382 measures, and their extensions, to evaluate acoustical conditions in concert halls. *Acoustical Science and Technology*, Vol. 26, No. 2, pp. 170–178, 2005.
- [44] John S. Bradley and Gilbert A. Soulodre. The influence of late arriving energy on spatial impression. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 97, No. 4, pp. 2263–2271, 1995.
- [45] Jeroen Breebaart, Steven Van de Par, and Armin Kohlrausch. Binaural processing model based on contralat-

- eral inhibition. I. Model structure. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 110, No. 2, pp. 1074–1088, 2001.
- [46] Jeroen Breebaart, Steven Van de Par, and Armin Kohlrausch. Binaural processing model based on contralateral inhibition. II. Dependence on spectral parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 110, No. 2, pp. 1089–1104, 2001.
- [47] Jeroen Breebaart, Steven Van de Par, and Armin Kohlrausch. Binaural processing model based on contralateral inhibition. III. Dependence on temporal parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 110, No. 2, pp. 1105–1117, 2001.
- [48] P. V. Brüel. *Sound insulation and room acoustics*. Chapman & Hall, 1951.
- [49] CATT 2012. CATT-Acoustic v9.0c user's manual, 2012.
- [50] S. Cerdá, A. Giménez, J. Romero, and R. Cibrián. A factor analysis approach to determining a small number of parameters for characterising halls. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 97, No. 3, pp. 441–452, 2011.
- [51] S. Cerdá, A. Giménez, J. Romero, R. Cibrián, and J.L. Miralles. Room acoustical parameters: A factor analysis approach. *Applied Acoustics*, Vol. 70, No. 1, pp. 97–109, 2009.
- [52] J. G. Charney, R. Fjörtoft, and J. Von Neumann. Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, Vol. 2, pp. 237–254, 1950.
- [53] Claus Lynge Christensen. ODEON room acoustics software version 12 user manual, 2012.
- [54] W. T. Chu. Room response measurements in a reverberation chamber containing a rotating diffuser. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 77, No. 3, pp. 1252–1256, 1985.
- [55] C. Cianfrini, M. Corcione, and D. M. Fontana. A method for predicting non-uniform steady sound fields within spaces bounded by difusive surfaces. *Applied Acoustics*, Vol. 54, No. 4, pp. 305–321, 1998.
- [56] Richard K. Cook, R. V. Waterhouse, R. D. Berendt, Seymour Edelman, and M. C. Thompson Jr. Measurement of correlation coefficients in reverberant sound fields. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 27, No. 6, pp. 1072–1077, 1955.
- [57] Trevor J. Cox. The optimization of profiled diffusers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 97, No. 1, pp. 2928–2936, 1995.
- [58] Trevor J. Cox and Peter D'Antonio. Fractal sound diffusers. In *Proceedings of the 103rd Audio Engineering Society Convention*, No. 4578, New York, The United States of America, 1997.
- [59] Trevor J. Cox and Peter D'Antonio. *Acoustic absorbers and diffusers -Theory, design and application*. Taylor & Francis, New York, The United States of America, 2009.
- [60] Trevor J. Cox, Peter D'Antonio, and Mark R. Avis. Room sizing and optimization at low frequencies. *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 52, No. 6, pp. 640–651, 2004.
- [61] L. Cremer. *Statistische Raumakustik*. S. Hirzel Verlag, 1961.
- [62] Lothar Cremer and Helmut Müller. *Principles and application of room acoustics, Volume 1*. Applied Science Publishers, 1982.
- [63] Konstantinos Dadiotis, Jamie A. S. Angus, and Trevor J. Cox. Lüke and power residue sequence diffusers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 123, No. 4, pp. 2035–2042, 2008.
- [64] Bengt-Inge L. Dalenbäck. Room acoustic prediction based on a unified treatment of diffuse and specular reflection. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 100, No. 2, pp. 899–909, 1996.
- [65] P. Damaske. Subjektive Untersuchung von Schallfeldern (Subjective investigation of sound fields). *Acustica*, Vol. 19, No. 4, pp. 199–213, 1967.
- [66] S. M. Dance and B. M. Shield. Modelling of sound fields in enclosed spaces with absorbent room surfaces, part I: Performance spaces. *Applied Acoustics*, Vol. 58, No. 1, pp. 1–18, 1999.
- [67] S. M. Dance and B. M. Shield. Modelling of sound fields in enclosed spaces with absorbent room surfaces, part II: Absorptive panels. *Applied Acoustics*, Vol. 61, No. 4, pp. 373–384, 2000.
- [68] Peter D'Antonio. Performance evaluation of optimized diffusers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 97, No. 5, pp. 2937–2941, 1995.
- [69] Peter D'Antonio and H. Konnert, John. The reflection phase grating diffusor: Design theory and application. *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 32, No. 4, pp. 228–238, 1984.
- [70] Torsten Dau, Dirk Püschel, and Armin Kohlrausch. A quantitative model of the "effective" signal processing

- in the auditory system. I. Model structure. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 99, No. 6, pp. 3615–3622, 1996.
- [71] Torsten Dau, Dirk Püschel, and Armin Kohlrausch. A quantitative model of the "effective" signal processing in the auditory system. II. Simulations and measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 99, No. 6, pp. 3623–3631, 1996.
- [72] J. L. Davy. The variance of multitone decays. *Acustica*, Vol. 45, No. 2, pp. 103–114, 1980.
- [73] J. L. Davy, I. P. Dunn, and P. Dubout. The variance of decay rates in reverberation rooms. *Acustica*, Vol. 43, No. 1, pp. 12–25, 1979.
- [74] Diemer de Vries, Edo M. Hulsebos, and Jan Baan. Spatial fluctuations in measures for spaciousness. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 110, No. 2, pp. 947–954, 2001.
- [75] G. Defrance and J.-D. Polack. Estimating the mixing time of concert halls using the eXtensible Fourier Transform. *Applied Acoustics*, Vol. 71, No. 9, pp. 777–792, 2010.
- [76] T. Devezé, L. Beaulieu, and W. Tabbara. A fourth order scheme for the FDTD algorithm applied to Maxwell's equation. In *Proceedings of Antennas and Propagation Society International Symposium*, Vol. 1, pp. 346–349, Chicago, The United States of America, 1992.
- [77] L. Dietsch and W. Kraak. Ein objektives Kriterium zur Erfassung von Echostörungen bei Musik- und Sprachdarbietungen (An objective criterion for the measurement of echo disturbances during presentation of music and speech). *Acustica*, Vol. 60, No. 3, pp. 205–216, 1986.
- [78] Leslie L. Doelle. *Environmental acoustics*. McGraw-Hill, 1972.
- [79] Xiang Duanqi, Wang Zheng, and Chen Jinjing. Acoustic design a reverberation chamber. *Applied Acoustics*, Vol. 32, No. 2, pp. 83–91, 1991.
- [80] Jean-Jacques Embrechts. A geometrical acoustics approach linking surface scattering and reverberation in room acoustics. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 100, No. 5, pp. 864–879, 2014.
- [81] Jean-jacques Embrechts and Michael Vorländer. Calculation of the random-incidence scattering coefficients of a sine-shaped surface. *Acta Acustica United with Acustica*, Vol. 92, No. 4, pp. 593–603, 2006.
- [82] José Escolano, Finn Jacobsen, and José J. López. An efficient realization of frequency dependent boundary conditions in an acoustic finite-difference time-domain model. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 316, No. 1–5, pp. 234–247, 2008.
- [83] European Committee for Standardization. *EN 12354-6:2003 Building Acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 6: Sound absorption in enclosed spaces*. Brussel, Belgium, 2003.
- [84] F. Alton Everest and Ken C. Pohlmann. *Master handbook of acoustics*. McGraw-Hill, 5th edition, 2009.
- [85] Carl F. Eyring. Reverberation in "dead" rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 1, No. 2A, p. 168, 1930.
- [86] Frank Fahy. *Sound intensity*. CRC Press, 2nd edition, 1995.
- [87] Angelo Farina. Auralization software for the evaluation of the results obtained by a pyramid tracing code: Results of subjective listening tests. In *Proceedings of the 15th International Congress on Acoustics*, pp. 20–23, Trondheim, Norway, 1995.
- [88] Angelo Farina. Verification of the accuracy of the pyramid tracing algorithm by comparison with experimental measurements of objective acoustic parameters. In *Proceedings of the 15th International Congress on Acoustics*, pp. 26–30, Trondheim, Norway, 1995.
- [89] Angelo Farina. A new method for measuring the scattering coefficient and the diffusion coefficient of panels. *Acustica. Acustica united with Acta Acustica*, Vol. 86, pp. 928–942, 2000.
- [90] Angelo Farina. Acoustic quality of theatres: correlations between experimental measures and subjective evaluations. *Applied Acoustics*, Vol. 62, No. 8, pp. 889–916, 2001.
- [91] Dariel Fitzroy. Reverberation formula which seems to be more accurate with nonuniform distribution of absorption. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 31, No. 7, pp. 893–897, 1959.
- [92] Harvey Fletcher and H. Galt. The perception of speech and its relation to telephony. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 22, No. 2, pp. 89–151, 1950.
- [93] N. R. French and J. C. Steinberg. Factors governing the intelligibility of speech sounds. *The Journal of the*

- Acoustical Society of America*, Vol. 19, No. 1, pp. 90–119, 1947.
- [94] K. Fujiwara. Effects of the absorption distribution over the boundaries of rooms divided by a partition on its shielding efficiency. *Acustica*, Vol. 59, No. 4, pp. 255–262, 1986.
 - [95] K. Fujiwara. A Study on the sound absorption of a quadratic-residue type diffuser. *Acustica*, Vol. 81, No. 4, pp. 370–378, 1995.
 - [96] Yoshinari Fukushima, Hisaharu Suzuki, and Akira Omoto. Visualization of reflected sound in enclosed space by sound intensity measurement. *Acoustical Science and Technology*, Vol. 27, No. 3, pp. 187–189, 2006.
 - [97] Hiroshi Furuya, Kazutoshi Fujimoto, Akiko Wakuda, and Yusuke Nakano. The influence of total and directional energy of late sound on listener envelopment. *Acoustical Science and Technology*, Vol. 26, No. 2, pp. 208–211, 2005.
 - [98] A. C. Gade. Investigations of musicians' room acoustic conditions in concert halls. Part I: Methods and laboratory experiments. *Acustica*, Vol. 69, pp. 193–203, 1989.
 - [99] A. C. Gade. Investigations of musicians' room acoustic conditions in concert halls. Part II: Field experiments and synthesis of results. *Acustica*, Vol. 69, pp. 249–262, 1989.
 - [100] M. C. Gomperts. Do the classical reverberation formulae still have a right for existence. *Acustica*, Vol. 16, No. 5, pp. 255–268, 1965.
 - [101] David Griesinger. IALF-binaural measures of spatial impression and running reverberance. In *Proceedings of the 92nd Audio Engineering Society Convention*, No. 3292, Vienna, Austria, 1992.
 - [102] ChanHoon Haan and Fergus R. Fricke. An evaluation of the importance of surface diffusivity in concert halls. *Applied Acoustics*, Vol. 51, No. 1, pp. 53–69, 1997.
 - [103] H. Haas. Über den Einfluss Eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache (Influence of a single echo on the audibility of speech). *Acustica*, Vol. 1, No. 2, pp. 49–58, 1951.
 - [104] Mohammed F. Hadi and Melinda Piket-May. A modified FDTD (2, 4) scheme modeling electrically large structures with high-phase accuracy. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 45, No. 2, pp. 254–264, 1997.
 - [105] Toshiki Hanyu. A theoretical framework for quantitatively characterizing sound field diffusion based on scattering coefficient and absorption coefficient of walls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 128, No. 3, pp. 1140–48, 2010.
 - [106] Toshiki Hanyu. Analysis method for estimating diffuseness of sound fields by using decay-cancelled impulse response. *Building Acoustics*, Vol. 21, No. 2, pp. 125–134, 2014.
 - [107] Toshiki Hanyu and Sho Kimura. A new objective measure for evaluation of listener envelopment focusing on the spatial balance of reflections. *Applied Acoustics*, Vol. 62, No. 2, pp. 155–184, 2001.
 - [108] Tristan J. Hargreaves, Trevor J. Cox, Y. W. Lam, and Peter D'Antonio. Surface diffusion coefficients for room acoustics: free-field measures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 108, No. 4, pp. 1710–1720, 2000.
 - [109] Renate Heinz. Binaural room simulation based on an image source model with addition of statistical methods to include the diffuse sound scattering of walls and to predict the reverberant tail. *Applied Acoustics*, Vol. 38, No. 2-4, pp. 145–159, 1993.
 - [110] Takayuki Hidaka and Leo L. Beranek. Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan, and the Americas. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 107, No. 1, pp. 368–383, 2000.
 - [111] Takayuki Hidaka, Leo L. Beranek, and Toshiyuki Okano. Interaural cross-correlation, lateral fraction, and low- and high-frequency sound levels as measures of acoustical quality in concert halls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 98, No. 2, pp. 988–1007, 1995.
 - [112] Takayuki Hidaka and Noriko Nishihara. Objective evaluation of chamber-music halls in Europe and Japan. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 116, No. 1, pp. 357–372, 2004.
 - [113] Takayuki Hidaka, Noriko Nishihara, and Leo L. Beranek. Relation of acoustical parameters with and without audiences in concert halls and a simple method for simulating the occupied state. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 109, No. 3, pp. 1028–1042, 2001.
 - [114] Takayuki Hidaka, Yoshinari Yamada, and Takehiko Nakagawa. A new definition of boundary point between

- early reflections and late reverberation in room impulse responses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 122, No. 1, pp. 326–332, 2007.
- [115] Y. Hirata. Geometrical acoustics for rectangular rooms. *Acustica*, Vol. 43, No. 4, pp. 247–252, 1979.
- [116] Y. Hirata. Dependence of the curvature of sound decay curves and absorption distribution on room shapes. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 84, No. 4, pp. 509–517, 1982.
- [117] Murray Hodgson. Evidence of diffuse surface reflections in rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 89, No. 2, pp. 765–771, 1991.
- [118] Murray Hodgson, Natalie York, and Wonyoung Yang. Comparison of predicted, measured and auralized sound fields with respect to speech intelligibility in classrooms using CATT-Acoustic and ODEON. *Acta Acustica United with Acustica*, Vol. 94, No. 6, pp. 883–890, 2008.
- [119] R. Höhne and G. Schroth. Zur Wahrnehmbarkeit von Deutlichkeits- und Durchsichtigkeitsunterschieden in Zuhörersälen. *Acustica*, Vol. 81, No. 4, pp. 309–319, 1995.
- [120] Kazuma Hoshi, Hiroyuki Okubo, Jun Kanda, Takumi Asakura, Atsushi Marui, Hideo Miyazaki, Motoki Yairi, and Yosuke Yasuda. A Study on establishing benchmarks for acoustical parameters derived from impulse responses. In *Proceedings of International Symposium on Room Acoustics*, No. P107, p. 11, Toronto, Canada, 2013.
- [121] T. Houtgast and H. J. M. Steeneken. The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility. *Acustica*, Vol. 28, No. 1, pp. 66–73, 1973.
- [122] T. Houtgast and H. J. M. Steeneken. A multi-language evaluation of the RASTI-method for estimating speech intelligibility in auditoria. *Acustica*, Vol. 54, No. 4, pp. 185–199, 1984.
- [123] F. V. Hunt. Remarks on the mean free path problem. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 36, No. 3, pp. 556–564, 1964.
- [124] Csaba György Huszty. *Time-domain swept signal based measurement and processing of impulse responses for room acoustic evaluation*. Dissertation, The University of Tokyo, 2012.
- [125] International Electrotechnical Commission. *IEC 60849:1998 Sound systems for emergency purposes (withdrawn, superseded by ISO 7240-16)*. Geneva, Switzerland, 2nd edition, 1998.
- [126] International Electrotechnical Commission. *IEC 60268-16:2003 Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index*. Geneva, Switzerland, 2003.
- [127] International Electrotechnical Commission. *IEC 61260-1:2014 Electroacoustics – Octave-band and fractional-octave-band filters – Part 1: Specifications*. Geneva, Switzerland, 1st edition, 2003.
- [128] International Organization for Standardization. *ISO/TR 4870:1991 Acoustics – The construction and calibration of speech intelligibility tests*. Geneva, Switzerland, 1991.
- [129] International Organization for Standardization. *ISO 3741:1999 Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for reverberation rooms*. Geneva, Switzerland, 1999.
- [130] International Organization for Standardization. *ISO 17497-1:2004 Acoustics – Sound-scattering properties of surfaces – Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room*. Geneva, Switzerland, 2004.
- [131] International Organization for Standardization. *ISO 3382-2:2008 Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms*. Geneva, Switzerland, 2008.
- [132] International Organization for Standardization. *ISO 3382-1:2009 Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces*. Geneva, Switzerland, 2009.
- [133] International Organization for Standardization. *ISO 17497-2:2012 Acoustics – Sound-scattering properties of surfaces – Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field*. Geneva, Switzerland, 2012.
- [134] International Organization for Standardization. *ISO 3382-3:2012 Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 3: Open plan offices*. Geneva, Switzerland, 2012.
- [135] Toshio Irino and Roy D. Patterson. A dynamic compressive gammachirp auditory filterbank. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, Vol. 14, No. 6, pp. 2222–2232, 2006.
- [136] F. Jacobsen. A note on acoustic decay measurements. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 115, No. 1, pp.

- 163–170, 1987.
- [137] Finn Jacobsen. The diffuse sound field: Statistical considerations concerning the reverberant field in the steady state. *Technical University of Denmark Report*, No. 27, 1979.
 - [138] Finn Jacobsen and Thibaut Roisin. The coherence of reverberant sound fields. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 108, No. 1, pp. 204–210, 2000.
 - [139] Jin Yong Jeon, Hyung Suk Jang, and Yong Hee Kim. Subjective and objective evaluations of scattered sounds in concert halls. In *Proceedings of International Symposium on Room Acoustics*, No. P077, p. 7, Toronto, Canada, 2013.
 - [140] Cheol-Ho Jeong, Jonas Brunskog, and Finn Jacobsen. Room acoustic transition time based on reflection overlap. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 127, No. 5, pp. 2733–2736, 2010.
 - [141] Cheol-Ho Jeong, Finn Jacobsen, and Jonas Brunskog. Thresholds for the slope ratio in determining transition time and quantifying diffuser performance in situ. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 132, No. 3, pp. 1427–1435, 2012.
 - [142] Yun Jing and Ning Xiang. A modified diffusion equation for room-acoustic predication. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 121, No. 6, pp. 3284–3287, 2007.
 - [143] Vilhelm Lassen Jordan. Acoustical criteria for auditoriums and their relation to modal techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 47, No. 2 (Part 1), pp. 408–412, 1970.
 - [144] Vilhelm Lassen Jordan. *Acoustical design of concert halls and theaters*. London, England, 1980.
 - [145] W. B. Joyce. Exact effect of surface roughness on the reverberation time of a uniformly absorbing spherical enclosure. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 64, No. 5, pp. 1429–1436, 1978.
 - [146] Fukushi Kawakami. Evaluation of initial decay rate of power-law decays for measuring random incident absorption. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, Vol. 19, No. 5, pp. 315–326, 1998.
 - [147] Fukushi Kawakami and Kiminori Yamaguchi. A systematic study of power-law decays in reverberation rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 80, No. 2, pp. 543–554, 1986.
 - [148] W. de Villiers Keet. The influence of early lateral reflections on spatial impression. In *Proceedings of the 6th International Congress on Acoustics*, No. E-2-4, Tokyo, Japan, 1968.
 - [149] Mendel Kleiner. A new way of measuring the lateral energy fraction. *Applied Acoustics*, Vol. 27, pp. 321–327, 1989.
 - [150] Mendel Kleiner and Jiri Tichy. *Acoustics of small rooms*. CRC Press, 2014.
 - [151] Vern Oliver Knudsen and Cyril M. Harris. *Acoustical designing in architecture*. Wiley, 1950.
 - [152] Yoshiyuki Kosaka and Tetsuya Sakuma. Numerical examination on scattering coefficients of architectural surfaces using the boundary element method. *Acoustical Science and Technology*, Vol. 26, No. 2, pp. 136–144, 2005.
 - [153] C. W. Kosten. The mean free path in room acoustics. *Acustica*, Vol. 10, No. 4, pp. 245–250, 1960.
 - [154] U. R. Kristiansen, A. Krokstad, and T. Follestad. Extending the image method to higher-order reflections. *Applied Acoustics*, Vol. 38, No. 2-4, pp. 195–206, 1993.
 - [155] A. Krokstad, S. Strøm, and S. Sørdsal. Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 8, No. 1, pp. 118–125, 1968.
 - [156] R. Kürer. Zur Gewinnung von Einzahlkriterien bei Impulsmessungen in der Raumakustik (To the extraction of single criteria with impulse measurements in the room acoustics). *Acustica*, Vol. 21, No. 6, pp. 370–372, 1969.
 - [157] R. Kürer and U. Kurze. Integrationsverfahren zur Nachhallausswertung (Integration method for the evaluation of reverberation measurements). *Acustica*, Vol. 19, No. 6, pp. 313–322, 1967.
 - [158] H. Kuttruff. Raumakustische Korrelationsmessungen mit einfachen Mitteln. *Acustica*, Vol. 13, No. 2, pp. 120–122, 1963.
 - [159] H. Kuttruff. Über Autokorrelationsmessungen in der Raumakustik. *Acustica*, Vol. 16, No. 3, pp. 166–174, 1965.
 - [160] H. Kuttruff. Weglängverteilung und Nachhallverlauf in Räumen mit diffuse reflektierenden Wänden (Path-length distributions and reverberation processes in rooms with diffusely reflecting walls). *Acustica*, Vol. 23, No. 4, pp. 238–239, 1970.

- [161] H. Kuttruff. Nachhall und effektive Absorption in Räumen mit diffuser Wandreflexion (Reverberation formula which seems to be more accurate with nonuniform distribution of absorption). *Acustica*, Vol. 35, No. 3, pp. 141–153, 1976.
- [162] H. Kuttruff. A simple iteration scheme for the computation of decay constants in enclosures with diffusely reflecting boundaries. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 98, No. 1, pp. 288–293, 1995.
- [163] Heinrich Kuttruff. *Room acoustics*. Spon Press, 5th edition, 2009.
- [164] Y. W. Lam. A comparison of three diffuse reflection modeling methods used in room acoustics computer models. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 100, No. 4, pp. 2181–2192, 1996.
- [165] Y. W. Lam. The dependence of diffusion parameters in a room acoustics prediction model on auditorium sizes and shapes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 100, No. 4, pp. 2193–2203, 1996.
- [166] Doheon Lee, Densil Cabrera, and William L. Martens. Accounting for listening level in the prediction of reverberance using early decay time. *Acoustics Australia*, Vol. 40, No. 2, pp. 103–110, 2012.
- [167] Heewon Lee and Byung-Ho Lee. An efficient algorithm for the image model technique. *Applied Acoustics*, Vol. 24, No. 2, pp. 87–115, 1988.
- [168] Hyojin Lee and Tetsuya Sakuma. Numerical characterization of acoustic scattering coefficients of one-dimensional periodic surfaces. *Applied Acoustics*, Vol. 88, pp. 129–136, 2015.
- [169] P. Lehmann. *Über die Ermittlung raumakustischer Kriterien und deren Zusammenhang mit subjektiven Beurteilungen der Hörsamkeit (On the ascertainment of room acoustical criteria and correlation of the same with subjective assessments of the acoustic overall impression)*. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1976.
- [170] Hilmar Lehnert. Systematic errors of the ray-tracing algorithm. *Applied Acoustics*, Vol. 38, No. 2-4, pp. 207–221, 1993.
- [171] Sanjiva K. Lele. Compact finite difference schemes with spectral-like resolution. *Journal of Computational Physics*, Vol. 103, pp. 16–42, 1992.
- [172] T. Lewers. A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics. *Applied Acoustics*, Vol. 38, No. 2-4, pp. 161–178, 1993.
- [173] Marshall Long. *Architectural acoustics*. Academic Press, 2006.
- [174] M. M. Loudon. Dimension ratios of rectangular rooms with good distribution of eigentones. *Acustica*, Vol. 24, No. 5, pp. 101–104, 1971.
- [175] David Lubman. Precision of reverberant sound power measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 56, No. 2, pp. 523–533, 1974.
- [176] Richard H Lyon. Needed: A new definition of diffusion. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 56, No. 4, pp. 1300–1302, 1974.
- [177] Walter A. MacNair. Optimum reverberation time for auditoriums. *Bell System Technical Journal*, Vol. 9, No. 2, pp. 390–397, 1930.
- [178] L. Gerald Marshall. An analysis procedure for room acoustics and sound amplification system based on the early-to-late sound energy ratio. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 44, No. 5, pp. 373–381, 1996.
- [179] F. Martellotta. The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 128, No. 2, pp. 654–663, 2010.
- [180] Yuki Matsumoto and Akira Omoto. Sound field evaluation using auditory filter: Application of dynamic compressive gammachirp filter. *Acoustical Science and Technology*, Vol. 31, No. 5, pp. 368–370, 2010.
- [181] Juha Merimaa and Ville Pulkki. Spatial impulse response rendering I: Analysis and synthesis. *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 53, No. 12, pp. 1115–1127, 2006.
- [182] E. Meyer and R. Thiele. Raumakustische Untersuchungen in zahlreichen Konzertsälen und Rundfunkstudios unter Anwendung neuerer Messverfahren (Room acoustical investigation in numerous concert halls and broadcast studios with application newer measuring procedures). *Acustica*, Vol. 6, No. Supplement 2, pp. 425–444, 1956.
- [183] Erwin Meyer. Definition and diffusion in rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 26, No. 5, pp. 630–636, 1954.
- [184] X. Meynial and O. Vuichard. Objective measure of sound colouration in rooms. *Acustica. Acustica united*

- with *Acta Acustica*, Vol. 85, No. 1, pp. 101–107, 1999.
- [185] R. N. Miles. Sound field in a rectangular enclosure diffusely reflecting boundaries. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 92, No. 2, pp. 203–226, 1984.
 - [186] G. Millington. A modified formula for reverberation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 4, No. 1A, pp. 69–82, 1932.
 - [187] Joseph R. Milner and Robert J. Bernhard. An investigation of the modal characteristics of nonrectangular reverberation rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 85, No. 2, pp. 772–779, 1989.
 - [188] Eckard Mommertz. Determination of scattering coefficients from the reflection directivity of architectural surfaces. *Applied Acoustics*, Vol. 60, No. 2, pp. 201–203, 2000.
 - [189] Masayuki Morimoto and Christoph Pössl. Contribution of reverberation to auditory spaciousness in concert halls. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, Vol. 10, No. 2, pp. 87–92, 1989.
 - [190] Philip M. Morse and Richard H. Bolt. Sound waves in rooms. *Reviews of Modern Physics*, Vol. 16, No. 2, pp. 69–150, 1944.
 - [191] Philip M. Morse and K. Uno Ingard. *Theoretical acoustics*. McGraw-Hill, 1968.
 - [192] Kiyoshi Nakagawa, Toru Miyajima, and Yasuhiko Tahara. An improved geometrical sound field analysis in rooms using scattered sound and an audible room acoustic simulator. *Applied Acoustics*, Vol. 38, No. 2-4, pp. 115–129, 1993.
 - [193] G. M. Naylor. ODEON -Another hybrid room acoustical model. *Applied Acoustics*, Vol. 38, No. 2-4, pp. 131–143, 1993.
 - [194] H. Nelisse and J. Nicolas. Characterization of a diffuse field in a reverberant room. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 101, No. 6, pp. 3517–3524, 1997.
 - [195] Reinhard O. Neubauer. Estimation of reverberation time in rectangular rooms with non-uniformly distributed absorption using a modified fitzroy equation. *Building Acoustics*, Vol. 8, No. 2, pp. 115–137, 2001.
 - [196] Johan L. Nielsen, M. Miklin Halstead, and A. Harold Marshall. On spatial variability of room acoustics measures. In *Proceedings of the 16th International Congress on Acoustics*, pp. 2141–2142, Seattle, The United States of America, 1998.
 - [197] H. Niese. Der Nutzscha- und Echogradverteilung zur Beurteilung der Hörsamkeit in Räumen (The useful sound and echo degree distribution for the evaluation of the acoustics in rooms). *Acustica*, Vol. 11, No. 4, pp. 201–213, 1961.
 - [198] Erling Nilsson. Decay processes in rooms with non-diffuse sound fields, part I: Ceiling treatment with absorbing material. *Building Acoustics*, Vol. 11, No. 1, pp. 39–60, 2004.
 - [199] Erling Nilsson. Decay processes in rooms with non-diffuse sound fields, part II: Effect of irregularities. *Building Acoustics*, Vol. 11, No. 2, pp. 133–143, 2004.
 - [200] R. F. Norris. A derivation of the reverberation formula. In V. O. Knudsen, editor, *Architectural acoustics*, chapter Appendix I. John Wiley & Sons, 1932.
 - [201] Toshiyuki Okano, Leo L. Beranek, and Takayuki Hidaka. Relations among interaural cross-correlation coefficient ($IACC_E$), lateral fraction (LF_E), and apparent source width (ASW) in concert halls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 104, No. 1, pp. 255–265, 1998.
 - [202] Akira Omoto. Comment on "A theoretical framework for quantitatively characterizing sound field diffusion based on scattering coefficient and absorption coefficient of walls" [J. Acoust. Soc. Am. 128, 1140–1148 (2010)] (L). *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 133, No. 1, pp. 9–12, 2013.
 - [203] Akira Omoto and Kohta Sugiura. Visualization and evaluation of reflections inside an enclosed space using sound intensity measurement. *Building Acoustics*, Vol. 21, No. 2, pp. 135–144, 2014.
 - [204] Jie Pan and David Alan Bies. The effect of fluid-structural coupling on acoustical decays in a reverberation room in the high-frequency range. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 87, No. 2, pp. 718–727, 1990.
 - [205] E. T. Paris. On the coefficient of sound-absorption measured by the reverberation method. *Philosophical Magazine*, Vol. 5, No. 29, pp. 489–497, 1928.
 - [206] Roy D. Patterson. Auditory filter shapes derived with noise stimuli. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 59, No. 3, pp. 640–654, 1976.

- [207] Jukka Pätynen. *A virtual symphony orchestra for studies on concert hall acoustics*. Dissertation, Aalto University, 2011.
- [208] Jukka Pätynen, Sakari Tervo, and Tapio Lokki. Analysis of concert hall acoustics via visualizations of time-frequency and spatiotemporal responses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 133, No. 2, pp. 842–57, 2013.
- [209] Xavier Pelorson, Jean-Paul Vian, and Jean-Dominique Polack. On the variability of room acoustical parameters: Reproducibility and statistical validity. *Applied Acoustics*, Vol. 37, No. 3, pp. 175–198, 1992.
- [210] V. M. A. Peutz. Articulation loss of consonants as a criterion for speech transmission in a room. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 19, No. 11, pp. 915–919, 1971.
- [211] A. D. Pierce. *Acoustics*. McGraw-Hill, 1981.
- [212] Jean-Dominique Polack. Playing billiards in the concert hall: The mathematical foundations of geometrical room acoustics. *Applied Acoustics*, Vol. 38, No. 2-4, pp. 235–244, 1993.
- [213] J. Pujolle. Nouvelle formule pour la durée de réverbération (New formula for the length of time of reverberation). *Revue d'Acoustique*, Vol. 19, pp. 107–113, 1975.
- [214] Ville Pulkki. Spatial sound reproduction with directional audio coding. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 55, No. 6, pp. 503–516, 2007.
- [215] Ville Pulkki and Juha Merimaa. Spatial impulse response rendering II: Reproduction of diffuse sound and listening tests. *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 54, No. 1/2, pp. 3–20, 2006.
- [216] Quan Qi and Thomas L. Geers. Evaluation of the perfectly matched layer for computational acoustics. *Journal of Computational Physics*, Vol. 139, pp. 166–183, 1998.
- [217] Z. W. Qian. Diffraction on locally reacting surface—Schroeder's diffusor. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 75, No. 5, pp. 1373–1379, 1984.
- [218] Boaz Rafaely. Spatial-temporal correlation of a diffuse sound field. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 107, No. 6, pp. 3254–3258, 2000.
- [219] Baron John William Strutt Rayleigh. Chapter XIII, § 272. In *The theory of sound, Volume II*. Macmillan, 1894.
- [220] W. Reichardt, O. Abdel Alim, and W. Schmidt. Abhängigkeit der Grenzen zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit von der Art des Musikmotives, der Nachhallzeit und der Nachhalleinsatzzeit. *Applied Acoustics*, Vol. 7, No. 4, pp. 243–264, 1974.
- [221] W. Reichardt and U. Lehmann. Raumeindruck als Oberbegriff von Räumlichkeit und Halligkeit, Erläuterungen des Raumeindrucksmaßes R (Room impression as an overall concept of spaciousness and liveness, Examples of room measurement factor R). *Acustica*, Vol. 40, No. 5, pp. 277–290, 1978.
- [222] W. Reichardt and U. Lehmann. Optimierung von Raumeindruck und Durchsichtigkeit von Musikdarbietungen durch Auswertung von Impulsschalltests (Optimisation of room-impression and transparency of musical performances by evaluation through sound-impulse tests). *Acustica*, Vol. 48, No. 3, pp. 174–185, 1981.
- [223] Thomas D. Rossing, editor. *Springer handbook of acoustics*. Springer, 2007.
- [224] Per Rubak. Coloration in room impulse responses. In *Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting 2004*, p. 14, Mariehamn, Finland, 2004.
- [225] Ronald D. Ruth. A canonical integration technique. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. NS-30, No. 4, pp. 2669–2671, 1983.
- [226] Paul E. Sabine. The effects of cylindrical pillars in a reverberation chamber. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 9, No. 3, pp. 272–273, 1938.
- [227] Wallace Clement Sabine. *Collected papers on acoustics*. Harvard University Press, 1922.
- [228] Shinichi Sakamoto. Phase-error analysis of high-order finite difference time domain scheme and its influence on calculation results of impulse response in closed sound field. *Acoustical Science and Technology*, Vol. 28, No. 5, pp. 295–309, 2007.
- [229] Shinichi Sakamoto, Hiroshi Nagatomo, Ayumi Ushiyama, and Hideki Tachibana. Calculation of impulse responses and acoustic parameters in a hall by the finite-difference time-domain method. *Acoustical Science and Technology*, Vol. 29, No. 4, pp. 256–265, 2008.
- [230] Tetsuya Sakuma. Approximate theory of reverberation in rectangular rooms with specular and diffuse reflection.

- tions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 132, No. 4, pp. 2325–2336, 2012.
- [231] Tetsuya Sakuma and Hyojin Lee. Recent topics in acoustic scattering coefficient determination for wall surfaces. *Building Acoustics*, Vol. 21, No. 2, pp. 105–116, 2014.
- [232] W. Schmidt and W. Ahnert. Einfluß der Richtungs- und Zeitdiffusität von Anfangsreflexionen auf den Raumeindruck. *Wissenschaftliche Zeitschrift Technische Universität Dresden*, Vol. 22, No. 2, pp. 313–317, 1973.
- [233] M. Schröder. Die statistischen Parameter der Frequenzkurve von grossen Räumen (Statistic parameters of the frequency response curves of large rooms). *Acustica*, Vol. 4, No. Supplement 2, pp. 594–600, 1954.
- [234] M. R. Schroeder. Frequency-correlation functions of frequency responses in rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 34, No. 12, pp. 1819–1823, 1962.
- [235] M. R. Schroeder. New method of measuring reverberation time. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 37, No. 3, pp. 409–412, 1965.
- [236] M. R. Schroeder. Some new results in reverberation theory and measurement methods. In *Proceedings of the 5th International Congress on Acoustics*, No. G31, p. 4, Liege, Belgium, 1965.
- [237] M. R. Schroeder. Diffuse sound reflection by maximum-length sequences. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 57, No. 1, pp. 149–150, 1975.
- [238] M. R. Schroeder. Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls : More lateral sound diffusion. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 65, No. 4, pp. 958–963, 1979.
- [239] M. R. Schroeder. Integrated-impulse method measuring sound decay without using impulses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 66, No. 2, pp. 497–500, 1979.
- [240] M. R. Schroeder, D. Gottlob, and K. F. Siebrasse. Comparative study of European concert halls: Correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 56, No. 4, pp. 1195–1201, 1974.
- [241] M. R. Schroeder and K. H. Kuttruff. On frequency response curves in rooms. Comparison of experimental, theoretical, and Monte Carlo results for the average frequency spacing between maxima. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 34, No. 1, pp. 76–80, 1962.
- [242] Manfred R. Schroeder. The “Schroeder frequency” revisited. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 99, No. 5, pp. 3240–3241, 1996.
- [243] T. J. Schultz. Diffusion in reverberation room. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 16, No. 1, pp. 17–28, 1971.
- [244] Katsuaki Sekiguchi, Sho Kimura, and Toshiki Hanyuu. Analysis of sound field on spatial information using a four-channel microphone system based on regular tetrahedron peak point method. *Applied Acoustics*, Vol. 37, No. 4, pp. 305–323, 1992.
- [245] Katsuaki Sekiguchi, Sho Kimura, and Tomoyuki Sugiyama. Approximation simulation based of impulse on finite response sound through computer ray integration. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, Vol. 6, No. 2, pp. 103–115, 1985.
- [246] L. W. Sepmeyer. Computed frequency and angular distribution of the normal modes of vibration in rectangular rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 37, No. 3, pp. 413–423, 1965.
- [247] W. J. Sette. A new reverberation time formula. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 4, No. 3, pp. 193–210, 1933.
- [248] A. F. Seybert, B. Soenarko, F. J. Rizzo, and D. J. Shippy. An advanced computational method for radiation and scattering of acoustic waves in three dimensions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 77, No. 2, pp. 362–368, 1985.
- [249] Simulation und Evaluation akustischer Umgebungen (SEACEN). <https://www.seacen.tu-berlin.de/menue/>, Retrieved November 3, 2014.
- [250] Dimitris Skarlatos and Dimitris Kostakis. A statistical approach for the diffusion of sound by reflecting surfaces in large enclosures. *Applied Acoustics*, Vol. 47, No. 1, pp. 67–81, 1996.
- [251] Software Dsign Ahnert. EASERA Users Manual.
- [252] Gilbert A. Soulodre, Michel C. Lavoie, and Scott G. Norcross. Objective measures of listener envelopment in multichannel surround systems. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 51, No. 9, pp. 826–840, 2003.

- [253] H. J. M. Steeneken and T. Houtgast. A physical method for measuring speech-transmission quality. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 67, No. 1, pp. 318–326, 1980.
- [254] Uwe M. Stephenson. Different assumptions -Different reverberation formulae. In *Proceedings of Inter-Noise 2012*, No. 1134, p. 12, New York, The United States of America, 2012.
- [255] Hans Werner Strube. Scattering of a plane wave by a Schroeder diffusor: A mode-matching approach. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 67, No. 2, pp. 453–459, 1980.
- [256] Hans Werner Strube. More on the diffraction theory of Schroeder diffusors. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 70, No. 2, pp. 633–635, 1981.
- [257] Dennis M. Sullivan. Frequency-dependent FDTD methods using Z transforms. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 40, No. 10, pp. 1223–1230, 1992.
- [258] Hisaharu Suzuki, Akira Omoto, and Kyoji Fujiwara. Treatment of boundary conditions by finite difference time domain method. *Acoustical Science and Technology*, Vol. 28, No. 1, pp. 16–26, 2007.
- [259] Yôiti Suzuki, Futoshi Asano, Hack-Yoon Kim, and Toshio Sone. An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 97, No. 2, pp. 1119–1123, 1995.
- [260] Y. Tahara and T. Miyajima. A new approach to optimum reverberation time characteristics. *Applied Acoustics*, Vol. 54, No. 2, pp. 113–129, 1998.
- [261] Daiji Takahashi. Development of optimum acoustic diffusers. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, Vol. 16, No. 2, pp. 51–58, 1995.
- [262] Warner R. Th. ten Kate. On the bandwidth of diffusors based upon the quadratic residue sequence. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 98, No. 5, pp. 2575–2579, 1995.
- [263] Sakari Tervo, Jukka Pätynen, and Antti Kuusinen. Spatial decomposition method for room impulse responses. *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 61, No. 1/2, pp. 17–28, 2013.
- [264] R. Thiele. Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrueckwuerfe in Räumen (Direction and time series of the sound reflection in rooms). *Acustica*, Vol. 3, No. Supplement 2, pp. 291–302, 1953.
- [265] Jiri Tichy and Peter K. Baade. Effect of rotating diffusers and sampling techniques on sound-pressure averaging in reverberation rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 56, No. 1, pp. 137–143, 1974.
- [266] M. Tohyama. Equivalent sound absorption area in a rectangular reverberant room (Sabine's sound absorption factor). *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 108, No. 2, pp. 339–343, 1986.
- [267] Mikio Tohyama and Shokichiro Yoshikawa. Approximate formula of the averaged sound energy decay curve in a rectangular reverberant room. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 70, No. 6, pp. 1674–1678, 1981.
- [268] Masahiro Toyoda, Tomohiro Furukawa, and Daiji Takahashi. Study on echo suppression effect and coloration due to periodic-type diffusers. *Applied Acoustics*, Vol. 70, No. 5, pp. 722–729, 2009.
- [269] S. Uosukainen. Active sound scatterers based on the JMC method. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 267, No. 5, pp. 979–1005, 2003.
- [270] V. Valeau, J. Picaud, and M. Hodgson. On the use of a diffusion equation for room-acoustic prediction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 119, No. 3, pp. 1504–1513, 2006.
- [271] Jasper Van Dorp Schuitman. *Auditory modelling for assessing room acoustics*. Dissertation, Delft University of Technology, 2011.
- [272] Dirk Van Maercke and Jacques Martin. The prediction of echograms and impulse responses within the epidaure software. *Applied Acoustics*, Vol. 38, No. 2-4, pp. 93–114, 1993.
- [273] J. P. Vian and D. Van Maercke. Calculation of the room impulse response using a ray-tracing technique. In *Proceedings of ICA Symposium on Acoustics and Theatre Planning for the Performing Arts*, pp. 74–78, Vancouver, Canada, 1986.
- [274] Tor Erik Vigran. *Building acoustics*. Taylor & Francis, 2008.
- [275] Virtual Acoustics. <https://mediatech.aalto.fi/en/research/113-virtualacoustics>, Retrieved November 3, 2014.
- [276] Ernst-Joachim Völker and Fischer Sabine. Absorptions and reflections: Useful and new tools in room acoustical design. In *Proceedings of the 106th Audio Engineering Society Convention*, No. 4982, Oberursel, Ger-

- many, 1999.
- [277] Michael Vorländer. Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 86, No. 1, pp. 172–178, 1989.
 - [278] Michael Vorländer. International round robin on room acoustical computer simulations. In *Proceedings of the 15th International Congress on Acoustics*, pp. 689–692, Trondheim, Norway, 1995.
 - [279] Michael Vorländer. Simulation and evaluation of acoustic environments. *Proceedings of International Symposium on Room Acoustics*, No. P110, p. 9, 2013.
 - [280] Michael Vorländer and Eckard Mommertz. Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. *Applied Acoustics*, Vol. 60, No. 2, pp. 187–199, 2000.
 - [281] Lily M. Wang and Jonathan Rathsam. The influence of absorption factors on the sensitivity of a virtual room 's sound field to scattering coefficients. *Applied Acoustics*, Vol. 69, No. 12, pp. 1249–1257, 2008.
 - [282] Richard V. Waterhouse. Interference patterns in reverberant sound fields. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 27, No. 2, pp. 247–258, 1955.
 - [283] Ning Xiang. Evaluation of reverberation times using a nonlinear regression approach. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 98, No. 4, pp. 2112–2121, 1995.
 - [284] Yoshinari Yamada, Takayuki Hidaka, and Yôiti Suzuki. A simple method to detect audible echoes in room acoustical design. *Applied Acoustics*, Vol. 67, No. 9, pp. 835–848, 2006.
 - [285] Yoshio Yamasaki and Takeshi Itow. Measurement of spatial information in sound fields by closely located four point microphone method. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, Vol. 10, No. 2, pp. 101–110, 1989.
 - [286] Yosuke Yasuda, Ayumi Ushiyama, Shinichi Sakamoto, and Hideki Tachibana. Experimental and numerical studies on reverberation characteristics in a rectangular room with unevenly distributed absorbers. *Acoustical Science and Technology*, Vol. 27, No. 6, pp. 366–374, 2006.
 - [287] Kane S. Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-14, No. 3, pp. 302–307, 1966.
 - [288] Takatoshi Yokota, Shinichi Sakamoto, and Hideki Tachibana. Visualization of sound propagation and scattering in rooms. *Acoustical Science and Technology*, Vol. 23, No. 1, pp. 40–46, 2002.
 - [289] Takatoshi Yokota, Shinichi Sakamoto, and Hideki Tachibana. Sound field simulation method by combining finite difference time domain calculation and multi-channel reproduction technique. *Acoustical Science and Technology*, Vol. 25, No. 1, pp. 15–23, 2004.
 - [290] Takatoshi Yokota, Takuma Seimiya, Shinichi Sakamoto, and Hideki Tachibana. Difference in acoustic effect of sound diffusers due to room shapes. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, Vol. 21, No. 5, pp. 283–285, 2000.
 - [291] Xiaojun Yuan, David Borup, James W. Wiskin, Michael Berggren, Rick Eidens, and Steven A Johnson. Formulation and validation of Berenger 's PML absorbing boundary for the FDTD simulation of acoustic scattering. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 44, No. 4, pp. 816–822, 1997.
 - [292] Pavel Zahorik. Perceptually relevant parameters for virtual listening simulation of small room acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 126, No. 2, pp. 776–91, 2009.
 - [293] Xiangyang Zeng, Claus Lynge Christensen, and Jens Holger Rindel. Practical methods to define scattering coefficients in a room acoustics computer model. *Applied Acoustics*, Vol. 67, No. 8, pp. 771–786, 2006.
 - [294] 李孝振. 壁面音響乱反射率の実験室測定と数値解析に関する研究. Dissertation, 東京大学, 2013.
 - [295] 入野俊夫. 聴覚末梢系の計算理論 (SP95-40) . 電子情報通信学会技術研究報告, p. 8, 1995.
 - [296] 岩津玲磨, 鶴秀生. 時間領域音響計算に用いる compact 差分と多段階積分法の最適化. 京都大学数理解析研究所講究録, No. 1539, p. 14, 2007.
 - [297] 宇野亨. FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析. 1998.
 - [298] 翁長博. 反射音構造の物理パラメータと「拡がり感」について. 日本音響学会誌, Vol. 44, No. 9, pp. 658–668, 1988.
 - [299] 金田豊. インパルス応答測定の際の留意点. 日本音響学会誌, Vol. 55, No. 5, pp. 364–369, 1999.

- [300] 川上福司. 残響過程における拡散の同定に関する研究. Dissertation, 名古屋大学, 2004.
- [301] 久野和宏, 池谷和夫. ランダムな平面波および球面波を用いた不規則音場モデルに関する統計的考察. 日本音響学会誌, Vol. 30, No. 2, pp. 65–75, 1974.
- [302] 久野和宏, 野呂雄一, 井研治. イメージ拡散法による閉空間内の音場解析 音源分布の平滑化法と近距離場に対する補正. 日本音響学会誌, Vol. 44, No. 12, pp. 893–899, 1988.
- [303] 久野和宏, 野呂雄一, 成瀬治興, 吉久光一, 大石弥幸, 龍田建次, 岡田恭明, 木村和則, 松本敏雄, 佐野泰之. 建築音響. 技法堂出版, 2005.
- [304] 子安勝, 山下充康. 空間相関による残響室音場の拡散度評価. 日本音響学会誌, Vol. 26, No. 3, pp. 132–143, 1971.
- [305] 坂本慎一. 音波の進行方向に適応した PML 無反射境界. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (秋季), pp. 909–910, 2005.
- [306] 坂本慎一, 渡辺充敏, 尾本章, 石田康二, 荘大作, 羽入敏樹, 小口恵司, 山川高史, 岸永伸二, 兼子紳一郎, 鶴秀生, 渡辺直樹, 押野康夫. 特集 されど幾何音響シミュレーション. 音響技術, Vol. 34, No. 1, pp. 2–66, 2005.
- [307] 坂本慎一, 横田孝俊. FDTD 法による音場解析とその応用. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (春季), pp. 1233–1234, 2006.
- [308] 佐久間哲哉. 壁面の拡散性の解析及び評価法. 日本音響学会誌, Vol. 61, No. 1, pp. 39–44, 2005.
- [309] 佐藤史明. 室内音響インパルス応答の測定技術. 日本音響学会誌, Vol. 58, No. 10, pp. 669–676, 2002.
- [310] 鮫島俊哉, 平手小太郎, 安岡正人. 音場伝達関数の極の分布に基づく室境界条件最適設計手法. 日本建築学会計画系論文集, No. 511, pp. 9–14, 1998.
- [311] 澤幡麻佑子, 江田和司, 佐久間哲哉. 折上天井を有する扁平なオープンプランオフィスにおける室内音響測定. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (秋季), pp. 1213–1216, 2014.
- [312] 高橋顕吾, 小林哲, 岸永伸二. 散乱体の設計手法と音場における評価 (AA2000-53). 日本音響学会建築音響研究会資料, p. 7, 2000.
- [313] 高橋大式. 平方剰余型拡散体の吸音特性. 日本音響学会誌, Vol. 51, No. 2, pp. 103–110, 1995.
- [314] 田口東, 吉澤哲也, 佐藤克昌, 芹川光彦. 幾何音響学的シミュレーションにおける音線反射経路の効率的な計算法. 日本音響学会誌, Vol. 41, No. 8, pp. 542–545, 1985.
- [315] 橘秀樹. 相関法による建築音響騒音の測定. 音響技術, Vol. 10, pp. 33–42, 1975.
- [316] 千葉修, 柏達也, 霜田英麿, 鏡慎, 深井一郎. リーフフロッグアルゴリズムに基づく時間依存差分法による 3 次元音場解析. 日本音響学会誌, Vol. 49, No. 8, pp. 551–562, 1993.
- [317] 土屋裕造, 李孝振, 佐久間哲哉. 縮尺模型によるリブ・ブロック構造壁面の乱反射率測定. 日本建築学会技術報告集, Vol. 19, No. 41, pp. 175–178, 2013.
- [318] 東山三樹夫, 伊藤毅. エルゴード仮定に基づく Sabine 理論の解釈. 日本音響学会誌, Vol. 33, No. 7, pp. 339–341, 1977.
- [319] 東山三樹夫. 信号解析と音響学. 丸善出版, 2012.
- [320] 日本建築学会 (編). 室内音場予測手法 理論と応用. 日本建築学会, 2001.
- [321] 日本建築学会 (編). 音環境の数値シミュレーション 波動音響解析の技法と応用. 日本建築学会, 2011.
- [322] 日本建築学会 (編). はじめての音響数値シミュレーションプログラミングガイド. コロナ社, 2012.
- [323] 日本建築学会環境工学本委員会音環境運営委員会室内音響小委員会インパルス応答予測・計測 WG. 室内音響指標ベンチマーク, http://news-sv.aij.or.jp/kankyo/s24/benchmark/index_j.html, Retrieved November 5, 2014.
- [324] 日本建築学会環境工学本委員会音環境運営委員会音響数値解析小委員会音響数値解析 WG. Benchmark platform on computational methods for architectural/environmental acoustics, <http://gacoust.hwe.oita-u.ac.jp/AIJ-BPCA/index.html>, Retrieved November 5, 2014.
- [325] 羽入敏樹, 木村翔, 坂本吉宏. 音場の過渡応答に着目した拡散性の検討. 日本建築学会計画系論文集, No. 471, pp. 11–18, 1995.
- [326] 羽入敏樹, 阪上公博, 坂本慎一. 室内音場の物理測定の課題と将来展望. 日本音響学会誌, Vol. 61, No. 1, pp. 50–55, 2005.
- [327] 日野幹雄. スペクトル解析. 朝倉書店, 1977.
- [328] 藤原恭司, 増田潔. 周期構造を持つ壁面の乱反射特性について. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (春季), pp. 581–582, 1989.

-
- [329] 藤原恭司, 吉村道彦, 増田潔. 周期構造壁を持つ室内音場シミュレーション. 日本音響学会誌, Vol. 47, No. 1, pp. 2–12, 1991.
- [330] 前川純一, 森本政之, 阪上公博. 建築・環境音響学. 共立出版, 第3版, 2011.
- [331] 森本政之, 藤森久嘉, 前川純一. みかけの音源の幅と音に包まれた感じの差異. 日本音響学会誌, Vol. 46, No. 6, pp. 449–457, 1990.
- [332] 安田洋介. 高速多重境界要素法による大規模音場予測に関する研究. Dissertation, 東京大学, 2004.
- [333] 安田洋介, 佐藤正和, 土屋裕造, 佐久間哲哉. 非拡散音場の室内音響特性に関する研究 その2 吸音面が偏在した室の残響計算. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (春季), pp. 1291–1292, 2011.
- [334] 山本航介, 坂本慎一, 橘秀樹. 高次差分を用いた FDTD 法の精度向上. 日本音響学会研究発表会講演論文集 (秋季), pp. 831–832, 2004.
- [335] 山本照二, 鈴木文吉. 室内の響きに関する心理尺度と諸物理量の相関. 日本音響学会誌, Vol. 32, No. 10, pp. 599–605, 1976.
- [336] 横田孝俊. 室内における音響拡散・反射体の効果に関する研究. Dissertation, 東京大学, 2001.

目次

1.1	The relation between architectural and acoustic design processes.	2
1.2	The relative importance of three acoustic treatments for sound production.	4
1.3	A classification of acoustic simulation methods.	5
1.4	The flow chart of this thesis.	6
2.1	An example of a room impulse response.	14
2.2	Reverberation time estimation from energy decay curves.	17
2.3	Incidence to wall in diffuse sound field.	32
2.4	Image sources of a rectangular room.	37
2.5	Axial Image sources for the x -axis in xy -plane.	38
2.6	Axial modes in the xy -plane in wavenumber space.	41
2.7	Transition from specular to diffuse reflections.	42
3.1	Distribution of image sources.	62
3.2	An example on image source not being visible in a receiving point.	62
3.3	Propagation and reflection characteristics of sound rays.	63
3.4	Definition points of sound pressure and particle velocity on staggered grid system in space domain.	66
3.5	Ditto, in time domain.	66
3.6	Relationships between absorption coefficient and acoustic impedance ratio.	68
3.7	Relationships between normal- and oblique-incidence absorption coefficients.	70
3.8	Relationships between normal-incidence and statistical absorption coefficients.	70
3.9	A spectrum of Gaussian source.	72
3.10	An example of initial distribution of sound pressure.	72
3.11	The geometry of cubic cavity.	74
3.12	Transient sound pressure waveforms.	74
4.1	Geometries of square and circular rooms.	78
4.2	Random/normal-incidence scattering coefficients of the triangular diffusers.	78
4.3	Room impulse responses of different room shapes.	79
4.4	Room impulse responses of the circular room.	79
4.5	Comparison of visualization manner of sound propagation.	80
4.6	Visualization of sound propagation and diffusion.	81
4.7	Virtual sound sources.	83
4.8	Accumulated distributions of arrival instant intensity.	83
4.9	Room conditions.	84
4.10	Error bars of reverberation times T_{30}	85
4.11	Spatial distributions of reverberation times T_{30}	86
4.12	Error bars of sound strengths G	87

4.13	Spatial distributions of sound strengths G .	88
4.14	Error bars of clarity C_{80} .	89
4.15	Spatial distributions of clarity C_{80} .	90
4.16	Error bars of clarity C_τ calculated with different separating time.	91
4.17	Error bars of center times T_S .	92
4.18	Spatial distributions of center times T_S .	93
4.19	Error bars of lateral energy fractions J_{LFC} .	94
4.20	Spatial distributions of lateral energy fractions J_{LFC} .	95
4.21	Change in room acoustic parameters across different room conditions.	96
4.22	Non-uniformity for spatial distribution of sound energy.	98
4.23	Visualization of sound propagation with accumulated sound energy	98
4.24	Uniformity for directivity distribution of sound energy	99
4.25	Coefficients of variation (C_v) of squared frequency response functions.	100
4.26	Coefficients of variation (C_v) of slope ratios.	101
5.1	Energy decay of specular, diffuse and total fields.	107
5.2	Energy decay of specular, diffuse and total fields, with changing the scattering coefficient.	108
5.3	Reverberation times T_{30} calculated by the theory, with changing the scattering coefficient.	108
5.4	Transient proportion of specular and diffuse to the total energy.	109
5.5	Arrangements of image sources in xy -plane ($z = 0$).	114
5.6	Discretization of angles.	115
5.7	Energy decay curves calculated by ISM and the theory.	117
5.8	Energy decay curves, with changing the number of discretization of angles.	117
5.9	The critical angles of axial and tangential image sources ($L = 5, 10, 20$ m).	117
5.10	Energy decay curves of seven image source groups and the total.	120
5.11	Distributions of image sources in reverberation time converted from each decay rate.	123
5.12	Relative energy distribution of image sources in reverberation time.	123
5.13	Energy decay curves calculated by RTM.	125
5.14	Energy decay curves calculated with changing number of rays.	125
5.15	Energy decay curves calculated by RTM and the theory.	126
5.16	Reverberation times T_{30} and curvature index Q_{30} .	128
5.17	Reverberation times T_{30} , calculated by RTM, FDTD and the theory.	129
5.18	Arrangement of a source and receiving points in parallel walls.	130
5.19	Normal/random-incidence scattering coefficients of the square diffusers.	131
5.20	Grazing-incidence absorption coefficients estimated by FDTD.	132
5.21	Reverberation times T_{30} of parallel walls calculated by FDTD and the theory.	134
5.22	Prediction charts of reverberation times for parallel plain walls.	136
5.23	Arrangement of a source and receiving points in 2D rectangular rooms.	137
5.24	The critical angles of axial and tangential image sources ($L = 4, 8, 16$ m).	139
5.25	Normal/random-incidence scattering coefficients of the square diffusers (identical to Figure 5.19).	139
5.26	Grazing-incidence absorption coefficients estimated by the Paris equation.	139
5.27	Sound pressure level distributions for visualization of propagation.	140
5.28	Energy decay curves of 2D rectangular rooms calculated by FDTD and the theory.	142
5.29	Reverberation times T_{30} of 2D rectangular rooms calculated by FDTD and the theory.	146
5.30	Reverberation times estimated by different decay level ranges.	147
5.31	Scattering coefficients of two types of diffusers (identical to Figures 4.2, 5.19)	148
5.32	Reverberation times T_{30} with different shapes of diffusers.	148
5.33	Comparison of energy decay curves between the theories and FDTD.	150
5.34	A model of edge scattering.	151
5.35	Additional scattering coefficients due to edge scattering.	152

5.36	Energy decay curves without and with edge scattering.	153
5.37	Reverberation times T_{30} with various considerations for estimating wave nature.	155
5.38	A 3D rectangular room with a point source.	156
5.39	Arrangements of diffusers.	156
5.40	Energy decay curves of 3D rectangular rooms calculated by FDTD and the theory.	159
5.41	Reverberation times T_{30} of 3D rectangular rooms calculated by FDTD and the theory.	160
5.42	Accumulated distributions of arrival instant intensity.	160
6.1	Energy decay curves and compensated impulse responses calculated by ISM.	165
6.2	Representation of a double decay room impulse response by the generalized decay function.	167
6.3	Generalized slope ratio with changing exponential number.	167
6.4	Generalized decay curves and slope ratio.	169
6.5	Peak-to-energy ratios of FIR band-pass filters.	172
6.6	Peak slope ratios for exponentially decayed pulse sequences.	173
6.7	Effects of moving average of FIR band-pass filters on there amplitude and peak-to-energy ratios.	173
6.8	Energy decay curves and slope ratios calculated by ISM.	175
6.9	Energy-time curves calculated by RTM.	177
6.10	Energy decay curves and slope ratios calculated by RTM.	177
6.11	Comparison of slope ratios calculation with two mean slopes.	179
6.12	Geometries of square and circular rooms (identical to Figure 4.1).	180
6.13	Random/normal-incidence scattering coefficients of triangular diffusers (identical to Figure 4.2).	180
6.14	Energy decay curves and slope ratios calculated by FDTD.	181
6.15	Effects of evaluation sections on statistics of slope ratios.	184
6.16	Effects of thresholds on percentile slope ratio and transition to reverberation time ratio.	185
6.17	Spatial means and standard deviations of statistics of slope ratio.	186
6.18	Spatial distributions of statistics of slope ratio.	186
6.19	Room conditions (identical to Figure 4.9).	188
6.20	Statistics of slope ratios of various room conditions.	188
6.21	Views of the meeting room.	193
6.22	A plan of the meeting room and configurations of the absorptive panels.	193
6.23	Random-incidence absorption coefficients of the absorptive panel.	193
6.24	Measurement system for the meeting room.	194
6.25	Reverberation times T_{30} , measured in the meeting room.	194
6.26	Energy decay curves and slope ratios, measured in the meeting room.	195
6.27	Views of the office room.	197
6.28	Configurations of measurements in the office room.	197
6.29	Energy decay curves and slope ratios, measured in the office room.	197
6.30	Views of the concert hall.	198
6.31	Configurations of measurements in the concert hall.	198
6.32	Measurement system for the concert hall.	199
6.33	Energy decay curves and slope ratios, measured in the concert hall.	199
6.34	Comparison of three rooms on statistics of slope ratios.	200
A.1	Image sources of a rectangular room.	207
A.2	Axial Image sources for the x -axis (identical to Figure 2.5).	209
A.3	Axial modes in the xy -plane in wavenumber space (identical to Figure 2.6).	210
A.4	Transition from specular to diffuse reflections (identical to Figure 2.7).	212

表目次

2.1	Typical values for the reverberation time for different types of rooms.	18
2.2	Typical mean reverberation time frequencies.	18
2.3	Commonly used IACC measures and their calculation.	25
2.4	Acoustic quantities grouped according to listener aspects.	28
2.5	Maximum allowable standard deviation of L_p	51
5.1	Conditions of rectangular rooms.	106
5.2	Conditions of rectangular rooms (identical to Table 5.1).	113
5.3	Reverberation times T_{30} and the curvature index Q_{30}	116
5.4	Conditions of rectangular rooms (identical to Table 5.1).	124
5.5	Conditions of parallel walls.	130
5.6	Conditions of two dimensional rectangular rooms.	137
5.7	Interval of integration for the Paris equation.	138
6.1	Conditions of rectangular rooms (identical to Figure 5.1).	176
6.2	Indicators for diffuseness, calculated for the responses by ISM in Figure 6.8.	182
6.3	Indicators for diffuseness, calculated for the responses by RTM in Figure 6.10.	183
6.4	Indicators for diffuseness, calculated for the responses by RTM in Figure 6.11.	183
6.5	Indicators for diffuseness, calculated for the responses by FDTD in Figure 6.14.	183
6.6	Correlation coefficients between objective values for evaluating room acoustics (a part).	189
6.7	Ditto, (whole).	190
6.8	Room acoustic parameters of various room conditions.	191
6.9	Conditions of rectangular rooms for acoustic measurements.	192

業績

国際会議論文

- [1] Y. Yasuda, K. Eda, T. Sakuma and T. Oshima, "A fast multi pole BE analysis of a small room with sound absorbers using domain decomposition approach," Proceedings of Inter-Noise 2010 (Lisbon, Portugal), No. 0503, 8 p., 2010. [invited]
- [2] K. Eda, Y. Yasuda and T. Sakuma, "Acoustical effects of columns, beams and furniture on sound fields in small enclosures," Proceedings of 20th International Congress on Acoustics (Sydney, Australia), No. 813, 6 p., 2010.
- [3] T. Sakuma and K. Eda, "Energy decay analysis of non-diffuse fields in rectangular rooms," Proceedings of 21st International Congress on Acoustics (Montreal, Canada), 5aAAb1, 9 p., 2013.
- [4] T. Sakuma and K. Eda, "An attempt to estimate sound field diffuseness from room impulse responses," Proceedings of Forum Acusticum 2014 (Krakow, Poland), PJ04-6, 6 p., 2014. [invited]

国内会議論文

- [1] 土屋裕造, 李孝振, 江田和司, 佐久間哲哉, "壁面の音響拡散が室内に与える音響効果 —縮尺模型実験による検討—," 日本音響学会研究発表会講演論文集 (春季), pp. 1093–1094, 2008.
- [2] 安田洋介, 江田和司, 佐久間哲哉, "小空間における壁面拡散が音場に及ぼす影響 —吸音面偏在室の定常応答解析による検討—," 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学 1), pp. 315–316, 2009.
- [3] 江田和司, 安田洋介, 大嶋拓也, 佐久間哲哉, "小空間における壁面拡散が音場に及ぼす影響 —吸音面偏在室の過渡応答解析による検討—," 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学 1), pp. 317–318, 2009.
- [4] 安田洋介, 江田和司, 佐久間哲哉, 大嶋拓也, "吸音体を含む室内の高速多重極 BEM による領域分割解析," 日本音響学会研究発表会講演論文集 (春季), pp. 1221–1222, 2010.
- [5] 江田和司, 安田洋介, 佐久間哲哉, 木村亮祐, "家具・柱・梁が小空間音場に及ぼす影響 —波動音響解析による検討—," 日本音響学会研究発表会講演論文集 (春季), pp. 1126–1127, 2010.
- [6] 江田和司, 安田洋介, 佐久間哲哉, "家具・柱・梁が小空間音場に及ぼす影響 —波動音響解析による検討—," 日本音響学会建築音響研究会資料 AA2010-8, 8 p., 2010.
- [7] 江田和司, 安田洋介, 佐久間哲哉, "小型ピアノ練習室において室仕様が音場に及ぼす影響 —音響測定及び波動数値解析による検討—," 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学 1), pp. 359–360, 2010.
- [8] 江田和司, 佐久間哲哉, "矩形室非拡散音場の残響特性に関する研究 —室隅における端部散乱の影響—," 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学 1), pp. 189–180, 2012.
- [9] 江田和司, 佐久間哲哉, "非拡散音場の室内音響特性に関する研究 その 7 —矩形室残響の鏡像法解析—," 日本音響学会研究発表会講演論文集 (秋季), pp. 1157–1160, 2012.
- [10] 江田和司, 楠井尚貴, 佐久間哲哉, "非拡散音場の室内残響に関する研究 —2次元 FDTD 法解析による検討—," 日本音響学会建築音響研究会資料 AA2012-38, 7 p., 2012.
- [11] 江田和司, 佐久間哲哉, "非拡散音場の室内音響特性に関する研究 その 8 —矩形室残響の音線法解析—," 日本音響学会研究発表会講演論文集 (春季), pp. 1187–1188, 2013.
- [12] 江田和司, 竹下圭悟, 佐久間哲哉, "インパルス応答の時間構造に関する研究 —その 1 特異反射音抽出の基礎検討—," 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学 1), pp. 157–158, 2013.
- [13] 竹下圭悟, 江田和司, 佐久間哲哉, "インパルス応答の時間構造に関する研究 —その 2 実音場を対象とした周波数特性の検討—," 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学 1), pp. 159–160, 2013.

- [14] 江田和司, 佐久間哲哉, “非拡散音場の室内音響特性に関する研究 その9 — 3次元矩形室内残響の数値解析—,” 日本音響学会研究発表会講演論文集(秋季), pp. 1069–1070, 2013. [第8回学生優秀発表賞]
- [15] 竹下圭悟, 江田和司, 佐久間哲哉, “室内インパルス応答における反射音構造の評価 —非線形回帰を用いた減衰除去—,” 日本音響学会研究発表会講演論文集(秋季), pp. 1071–1072, 2013.
- [16] 江田和司, 竹下圭悟, 佐久間哲哉, “室内音響インパルス応答の時空間特性に関する研究 —反射音構造分析の基礎的検討—,” 日本音響学会建築音響研究会資料 AA2013-46, 8 p., 2013.
- [17] 江田和司, 竹下圭悟, 佐久間哲哉, “室内インパルス応答における反射音構造の評価 —減衰率比の理論的考察—,” 日本音響学会研究発表会講演論文集(春季), pp. 1165–1166, 2014.
- [18] 江田和司, 佐久間哲哉, “室内インパルス応答における反射音構造の評価 —減衰率比に基づく音場の拡散性に関する分析—,” 日本音響学会研究発表会講演論文集(秋季), pp. 1105–1106, 2014.
- [19] 澤幡麻佑子, 江田和司, 佐久間哲哉, “折上天井を有する扁平なオープンプランオフィスにおける室内音響測定,” 日本音響学会研究発表会講演論文集(秋季), pp. 1213–1216, 2014.
- [20] 江田和司, 佐久間哲哉, “室内インパルス応答における反射音構造の時間構造分析 —減衰率比の周波数帯域分析に関する理論的考察—,” 日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学1), pp. 249–150, 2014. [2014年度大会学術講演会若手優秀発表]
- [21] 江田和司, 佐久間哲哉, “室内インパルス応答の反射音構造分析による音場の拡散性評価,” 日本音響学会建築音響研究会資料 AA2015-8, 8 p., 2015.

受賞

- [1] 日本音響学会 第8回学生優秀発表賞, 2013.
- [2] 日本建築学会 2014年度大会学術講演会若手優秀発表, 2014.

学協会活動

- [1] 日本建築学会 建築音響数値解析環境整備[若手奨励]特別研究委員会, 委員, 2009.4-2011.3.

謝辞

本論文は、筆者が東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻博士課程において、同専攻 佐久間哲哉准教授の御指導のもとに行った研究をまとめたものです。筆者は東京大学に佐久間研究室が誕生して 10 期という節目の年に所属して以来 7 年に亘って、佐久間先生から研究に止まらず様々なお教示をいただく機会に恵まれました。修士論文のテーマの選定から博士論文作成に至るまで終始一貫して懇切丁寧なお指導をいただきましたことに対し、ここに心より感謝申し上げます。

東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻 佐々木淳教授、佐藤淳准教授、東京大学生産技術研究所 坂本慎一准教授、神奈川大学工学部建築学科 安田洋介准教授には本論文の副査を担当していただき、有益かつ貴重なご意見及びご指摘をいただきました。ここに感謝申し上げます。

同時期に博士論文を書いた東京大学新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻の佐久間研究室 井上尚久氏、清家研究室 磯部孝行氏、佐々木留美子氏とは直接的な助け合いに止まらず、様々な刺激を受ける環境を共有することができました。また、同専攻の大学院生・卒業生の皆様には日常の議論を通じて多くの示唆をいただきました。特に、楠井尚貴氏、竹下圭悟氏には関連する研究をともに行い、様々な形で手伝っていただきました。ここにお礼申し上げます。

最後に、妻 ひとみは研究以外の様々な側面から常に筆者を支えてくれました。私事ではありますが、この場を借りて心から感謝いたします。

多くの方々のご助力に対し、深く謝意を表します。

