

周波数特性を考慮した残響デザインによる 空間的な印象変化に関する研究

Study on Spatial Impression Changes by Reverberation Design in Consideration of Frequency Characteristics

精密工学専攻 48号 前崎 壮真
Soma Maezaki

1. はじめに

近年、スーパーハイビジョン放送の開始などに伴い、高臨場感オーディオ技術など空間的な音のデザインに関する研究が行われている。音質評価語の分類や定量化に関する研究は古くから行われているが⁽¹⁾、主観量と物理量との対応検討という点では、現在でも十分な結論は得られていない⁽²⁾。

そこで本研究では、空間的印象としての拡がり感に注目する。また、拡がり感に寄与する物理現象として残響に着目する。拡がり感の定義は、「聴取する音によって想起される音場の広さ」とする。まず、残響の余韻を変化させた際の印象変化を把握する。次に、残響時間の聴感特性を把握し、それを補正した際の体感残響時間と拡がり感向上への効果を把握する。さらに、周波数および時間特性を操作した残響デザインによる拡がり感の印象変化から、特に影響の大きい周波数帯域を把握し、重回帰分析を用いた拡がり感推定モデルを構築し検証する。最後に、信号処理と建築音響設計における残響デザインの効果を検討する。なお、本研究における評価実験では被験者のインフォームド・コンセントを得ている。

2. 残響の周波数成分による印象変化の把握

インパルス応答(Impulse Response, 以下、IR)の後期残響成分に着目し、これを残響の余韻と呼称する。本章では残響の余韻の周波数特性を操作した際の印象変化を把握する。また、残響デザインに必要な疑似インパルス応答(Pseudo Impulse Response, 以下、PIR)の作成手順について説明する。

2.1 評価概要および評価音源について

IRの各周波数帯域の残響特性を差し替えることで残響の余韻の周波数特性を変化させた際の印象変化をSD法相対評価より把握する。評価音源は残響時間特性の異なる3種(Long, Standard, Short)のIRを加工して用いる。基準音源には残響時間が中程度であるStandard音源を用いる。まず、3種の音源に1/1オクターブバンドパスフィルタ(以下、BPF)を適用し、8つの帯域に分離する。次にStandard音源の特定の帯域をLong音源またはShort音源に差し替え、音源を再統合し、特定の帯域の残響特性を変更する。この手順を用いて8帯域について残響を伸ばしたLグループと、短くしたSグループの合計16種を作成し、音圧レベルを約70 dBに統一する。

2.2 SD法を用いた帯域別の残響時間変更時の印象変化把握

評価は無響室で実施し、音源はヘッドホンを用いて提示する。被験者は20代7名で、評価に用いる評価形容詞対は16対である。評価結果をFig. 1に示す。因子分析により、空間的因子、美的因子、明るさ因子、柔らかさ因子の計4因子を抽出した。これは先行研究⁽¹⁾の傾向と一致する。空間的因子に注目すると、Lグループでは矢印で示す中心周波数500 Hzと1000 Hz帯域付近をピークとした特徴的な印象変化が得られた。またSグループでは目立った印象変化は得られなかった。特定の帯域のみの残響を伸ばした場合、それは残響の余韻として感じられ、空間的印象に対して影響があると推察さ

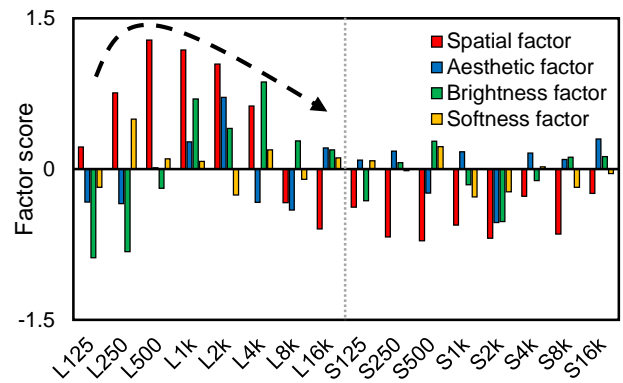


Fig. 1 Evaluation results by SD method

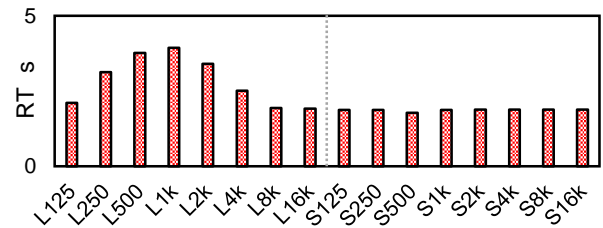


Fig. 2 Reverberation time of each sound sources

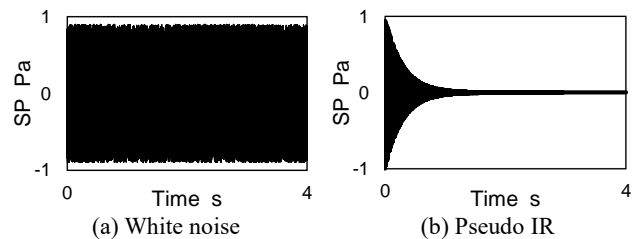


Fig. 3 Creating a pseudo impulse response

れる。また、Fig. 2に各評価音源の残響時間(RT)を示すが、特に帯域の残響時間を伸ばしたグループについて、残響時間と空間的因子と傾向の一致が確認できる。これより残響の余韻の周波数特性による効果と同時に残響時間の長さが空間的印象に影響を与える可能性が示唆された。

2.3 ホワイトノイズを基にした疑似インパルス応答の作成と残響特性の付与のための手法について

Fig. 3(a)に示すホワイトノイズにBPFを適用して帯域ごとに分離し、それぞれ任意の減衰特性を持つように指数減衰させたものを再統合することで、Fig. 3(b)に示すPIRを作成する。これにより評価用音源に任意の残響時間特性を帯域別に持たせることができる。ドライソースへのPIRの残響時間特性の付与にはコンボリューションリバーブを用いる。

2.4 SD法を用いた残響の余韻の周波数特性の効果の検証

Lグループに注目した際の残響の余韻の周波数特性による空間印象向上の効果の検証のために、SD法相対評価を用いた評価を実施する。評価条件は2.1節と同様とする。評価音源はFig. 2に示すLグループの各音源と同様の残響時間特性を全帯域一様に持つ8種のPIRの残響特性を2.1節で用いたStandard音源に付与したものである。Fig. 4に評価結果から抽出された空間的因子の因子得点の比較を示す。本節の全帯域一様に減衰する場合よりも、残響の余韻の周波数特性を変更した場合の空間的印象の変化の方が大きいことがわかる。これより、空間的印象について残響時間だけでなく残響の余韻の周波数特性の変更による印象操作の可能性が示された。

3. 残響時間の聴感特性の把握と補正および印象変化の把握

物理的な残響時間と聴感上の残響の長さ感は異なる。後者を体感残響時間(Subjective Reverberation Time, 以下, SRT)と呼称する。本章では被験者の体感残響時間特性の把握とこれらの補正手法を検討し、拡がり感の向上への効果を把握する。

3.1 体感残響時間特性把握のための実験

実験は無響室で実施し、音源はスピーカを用いて提示する。被験者は20代8名である。専用で作成した実験用アプリを用いて被験者自身が音源の再生と可聴時間測定を行う。提示する音源は残響時間が2秒で音圧レベルの始点を60 dBに設定した9つの帯域別のPIRである。被験者は音が聞こえなくなるまでの時間を音源ごとに5回申告し、それらの平均値を取得する。SRTの測定結果を対象としてクラスタ分析を行い、4名ずつの2つのクラスタを抽出した。そのうち全員の帯域別のSRTの値が2秒を超えていないクラスタに注目し、その4名を本実験における被験者として選定した。Fig. 5に体感残響時間特性としての選定したクラスタの帯域別のSRTを示す。なお、図内のエラーバーは標準偏差を表す。設定した物理的な残響時間は2秒であるが、SRTは全帯域に渡ってこれに達しておらず、低域と高域では中域と比較してさらに短くなる特性を示した。これは従来広く用いられる音の大きさの聴感指標である等ラウドネス曲線と同様の傾向である。

3.2 帯域別の残響時間操作と音圧レベル操作による体感残響時間の補正

好ましい残響特性の条件の1つとして、残響の長さ感が各周波数帯域で等しいことが挙げられている⁽³⁾。本節では帯域別のSRTを一様に近づけるために、帯域ごとの音圧レベルと残響時間の操作の2手法により補正し、効果を検討する。

まず、音圧レベル補正の概要について説明する。各帯域の残響時間は変更せずに、PIRの始点の音圧レベルを変更することでSRT補正を行う。補正後の音圧レベル(SPLa)を求める計算式を以下に示し、算出された補正値をFig. 6(a)に示す。

$$SPLa(f) = SPL(f) + 60 * \frac{\Delta SRT(f)}{SRT(f) + \Delta SRT(f)} \quad (1)$$

ただし、 ΔSRT : SRTと目標SRTの差分

次に、残響時間補正の概要について説明する。各帯域のPIRの始点の音圧レベルは変更せずに、音圧の減衰割合を変更することでSRT補正を行う。補正後の残響時間(RTa)を求める計算式を以下に示し、算出された補正値をFig. 6(b)に示す。

$$RTa(f) = \frac{[SRT(f) + \Delta SRT(f)]^2}{SRT(f)} \quad (2)$$

3.2節と同様の実験を行い、補正効果を検証する。被験者

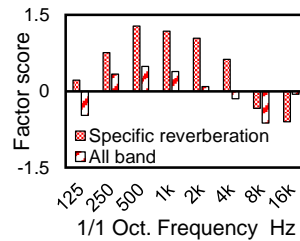


Fig. 4 Evaluation results by SD method

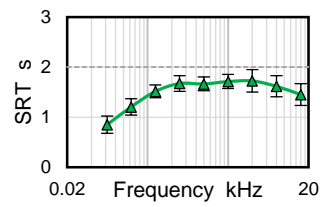
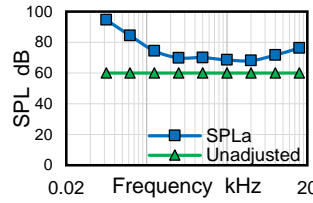
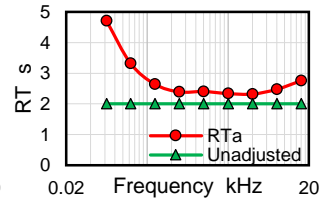


Fig. 5 Pre control SRT (SRT characteristic)

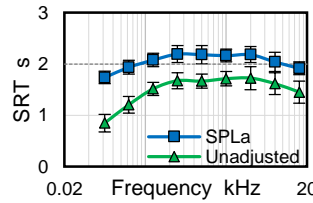


(a) Sound pressure level adjustment value

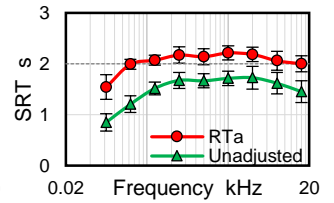


(b) Reverberation time adjustment value

Fig. 6 Subjective reverberation control value



(a) Sound pressure level adjustment result



(b) Reverberation time adjustment result

Fig. 7 Post control subjective reverberation time

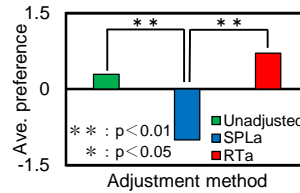


Fig. 8 Ave. preferences of expansive feeling

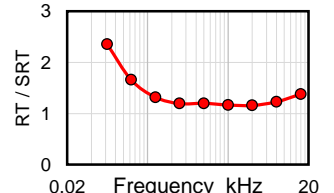


Fig. 9 SRT adjustment characteristic

はクラスタ分析で選定した4名である。Fig. 7に実験結果を示す。各帯域一様ではないが、帯域間SRTのばらつきをある程度抑えられた。また2種の補正方法を用いたが、どちらもほぼ同様の補正結果が得られた。注目する物理量は異なるが同じ目的で補正した結果であり、傾向の一致は妥当である。

3.3 補正効果の把握のための評価

SRT補正による空間的印象としての拡がり感への効果の把握のために、シェッフェの対比較法(浦の変法)を用いた評価を実施する。評価は無響室で実施し、音源はスピーカを用いて提示する。被験者はクラスタ分析で選定した4名である。評価に用いる尺度は拡がり感である。評価に用いる音源は、無補正、音圧レベル補正、残響時間補正の3種のPIRの残響特性を2.1節で用いたStandard音源に付与したものである。

得られた平均嗜好度をFig. 8に示す。残響時間補正を施したものに拡がり感が感じられる傾向が確認でき、これによる拡がり感向上への効果が示された。また、残響補正と音圧レベル補正の間で有意差が確認できた。SRTの補正結果はほぼ同様であったが、想起される主観量には差が現れた。本評価から、空間的印象としての拡がり感向上のための補正には帯域ごとの残響時間補正が適することがわかった。得られた体感残響時間補正特性 RT/SRT をFig. 9に示す。

4. 残響の余韻の周波数特性の操作による印象変化の把握と重回帰分析を用いた検証

体感残響時間補整を施した場合の残響の余韻の周波数特性および残響時間が拡がり感へ及ぼす影響について整理し、特に影響を及ぼす周波数帯域を把握する。また、重回帰分析を用いた拡がり感推定モデルを構築し、結果を検証する。

4.1 体感残響時間補整を施した上での周波数および時間特性操作の複合条件下での印象変化の把握

シェッフェの対比較法(浦の変法)を用いた評価を実施する。評価は無響室で実施し、音源はスピーカを用いて提示する。被験者は3.1節のクラスタ分析で選定した4名である。評価に用いる尺度は拡がり感である。評価音源は基準の残響時間を2秒とし、250, 500, 1000, 2000 Hzの4帯域の残響時間をそれぞれ1.25, 1.5, 2.0倍(それぞれ、2.5, 3.0, 4.0秒の3段階)に設定した12種と、全帯域の残響時間を2秒に設定した基準音の計13種のPIRの残響特性を、2.1節で用いたStandard音源に付与したものである。

得られた平均嗜好度のうち、基準音と各音源の差分をFig. 10に示す。どの残響時間の段階においても1000 Hz帯域の平均嗜好度が最も高く、周波数による効果が残響時間による効果を上回る場合もあった。また平均嗜好度と全帯域の残響時間との単相関係数0.58に対して、1000 Hz帯域の残響時間との単相関係数は0.94と高い値を示した。これより空間的印象としての拡がり感の向上および推定においては、1000 Hz帯域の残響の長さが特に重要であることが示唆された。

4.2 重回帰分析を用いた検証と拡がり感推定モデルの構築

4.1節の評価結果から得た平均嗜好度を目的変数に設定し、評価に用いたPIRから算出した音響設計や評価に用いられる計37種の物理量や心理音響尺度群から選択した指標を説明変数に設定した重回帰分析を実施し、拡がり感推定モデルを作成する。そして、自由度修正済決定係数(R_f^2)の値からモデルの精度を検証する。まず、説明変数の1つに全帯域の残響時間を用いたモデルを以下に示す。

$$\begin{aligned} Model1 = & +0.35 * RT(All Band) \\ & +175.8 * Impulsiveness \\ & -15.7(Constant term) \end{aligned} \quad (3)$$

注目した全帯域の残響時間に加え、音の衝動性を表すImpulsivenessが選定された。次に全帯域の残響時間の代わりに1000 Hz帯域の残響時間を用いたモデルを以下に示す。

$$\begin{aligned} Model2 = & +0.43 * RT(1000 Hz Band) \\ & -0.85 * Articulation Index \\ & -10.8 * Sharpness \\ & +109.2(Constant term) \end{aligned} \quad (4)$$

注目した1000 Hz帯域の残響時間に加え、音声明瞭度を表すArticulation Indexと、低域と高域の音のバランスを表すSharpnessが選定された。拡がり感と明瞭感はトレードオフの関係とされているため⁽⁴⁾、Articulation Indexの偏回帰係数が負の項として選定されたことは妥当である。同様に2000 Hz帯域を強調した音源で拡がり感が低減していることから、Sharpnessの偏回帰係数が負の項として選定されたことは妥当である。

評価値としての平均嗜好度と2種の拡がり感推定モデルによる推定値の比較をFig. 11に示す。 R_f^2 の値から、全帯域の残響時間を用いたModel1よりも1000 Hz帯域の残響時間を用いたModel2の推定精度が高いことがわかる。これより拡がり感の推定にはModel2が適しており、1000 Hz帯域の残響の余韻の付与による拡がり感向上への効果が検証できた。

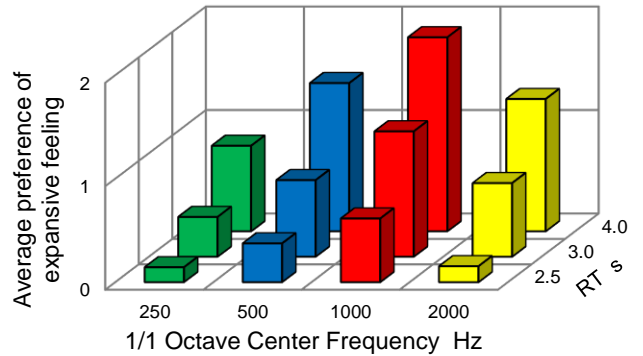


Fig. 10 Average preferences of expansive feeling

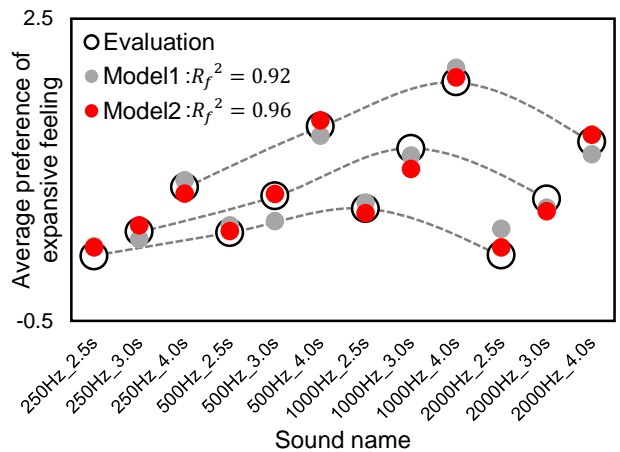


Fig. 11 Comparison of evaluation value and 2 types of estimation values

5. 信号処理と建築音響設計における残響デザインによる空間的印象への効果

信号処理や建築音響設計における、残響デザインによる空間的印象としての拡がり感の向上への効果を検証する。まず、信号処理により残響を付与した楽音を用いた評価を実施する。次に、音線法を用いた数値解析と、解析から得られたIRを用いた評価を実施する。

5.1 信号処理上の検証としての楽音を用いた評価

信号処理上の残響デザインによる、拡がり感に代表される空間的印象の変化の把握を目的として、評価音源に楽音を用いたSD法相対評価を実施する。評価は無響室で実施し、音源はスピーカを用いて提示する。被験者は20代7名である。評価に用いる評価形容詞対は16対である。評価音源の基となる音源として、讃美歌でBPMが66のSong1と、クラシックでBPMが90のSong2の2種の楽音を用いる。評価音源として、2種の楽音に体感残響時間補整を施した上で、余韻なし、500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hzの4種の残響の余韻を付与したものを用いる。各楽音に付与する残響時間は、以下に示す式より算出する。

$$Target RT(f) = 60 * \frac{BC}{BPM} * RTa(f) \quad (5)$$

ただし、BPM: 曲のテンポ, BC: 付与する残響の拍長

算出したターゲット残響時間はそれぞれ1.82秒, 1.33秒である。付与する残響の余韻の長さは、各ターゲット残響時間の2倍とする。基準音として、残響を付与しない各楽音を用いる。

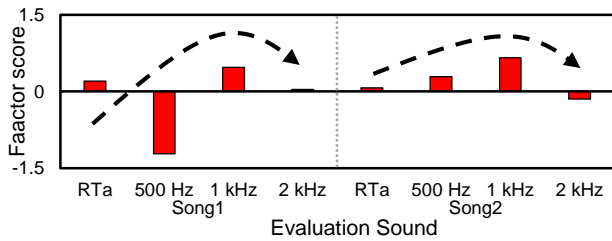


Fig. 12 Score of spatial factor by SD method

評価結果を基にした因子分析により、空間的因子、美的因子、明るさ因子、柔らかさ因子の計4因子を抽出した。これは従来研究⁽¹⁾や、2章のIRを用いた評価の結果と一致している。Fig. 12に空間的因子の因子得点を示す。両楽曲共に1000 Hz帯域の残響の余韻を付与した音源の得点が最も高いことから、4章で示したように、1000 Hz帯の残響の余韻の付与による空間的印象の向上効果を検証できた。

5.2 建築音響設計上の検証としての音線法による数値解析

体感残響時間補整や1000 Hz帯域の残響の余韻付与による残響デザインの建築音響設計上での再現およびIRの取得とそれを用いた評価を目的として、音線法を用いた数値解析を実施する。音線法とは幾何音響理論の一つで、Fig. 13に示すように音の伝搬の軌跡を線と捉え、伝搬の様子の可視化や仮想音響空間の特性の解析などが可能な手法である。

解析に用いる簡易モデルとしての仮想音響空間はFig. 14に示す(縦、横、高さ)=(15, 10, 5 m)の直方体状とする。入力点は(x, y, z)=(2.5, 5.0, 1.0 m)の点とし、観測点は(x, y, z)=(10.0, 5.0, 1.5 m)の点とする。入力にはインパルスを用いる。反射面に与える境界条件としての吸音率の周波数特性は、以下に示すEyringの残響式⁽⁶⁾から算出する。

$$RT(f) = 0.161 * \frac{V}{-S * \ln[1 - \alpha(f)]} \quad (6)$$

ただし、 V : 空間の容積、 S : 空間の表面積、 α : 吸音率

音線法を用いた数値解析を実施する。まず、吸音率の周波数特性を全帯域一定に設定し、残響時間が約0.8秒となるIR-Aを得た。次に、3章で得た体感残響時間補整特性から、SRTが0.8秒となる帯域ごとの目標値を算出し、式(6)を用いて各帯域の吸音率を算出し境界条件として与えることで、SRTが0.8秒となるIR-Bを得た。最後に、SRTを0.8秒とした上で、1000 Hz帯域に残響の余韻を与えたIR-Cを得た。

体感残響時間補整特性から算出した目標値(SRTa)と解析から得た3種のIRの残響時間の周波数特性の比較をFig. 15に示す。これより、数値解析上で意図する残響デザインが再現されていることがわかる。以上より、体感残響時間特性を考慮した建築音響設計を提案した。

5.3 音線法から得られたインパルス応答を用いた評価

建築音響設計上の残響デザインによる拡がり感の印象変化の把握を目的として、シェッフエの対比較法(浦の変法)を用いた主観評価を実施する。評価は無響室で実施し、音源はヘッドホンを用いて提示する。被験者は20代10名である。評価に用いる尺度は拡がり感である。評価音源として、ドライソース(DS)としてのハンドクラップ音と、5.2節の音線法を用いた数値解析から得た3種のIRをDSに付与したものの計4種を用いる。

得られた平均嗜好度をFig. 16に示す。まず、DSとIR-Aを比較すると、残響の付与により拡がり感が向上していることがわかる。次に、IR-AとIR-Bを比較すると、3章で示したように、体感残響時間補整を施したIR-Bの拡がり感が向上していることがわかる。最後に、IR-BとIR-Cを比較する

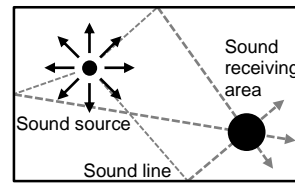


Fig. 13 Outline of Ray-tracing method

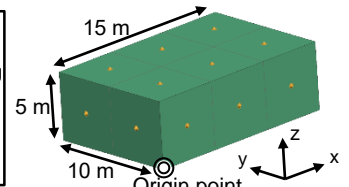


Fig. 14 Virtual acoustic space model

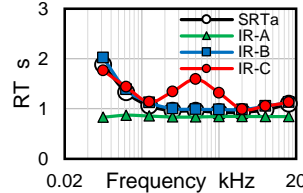


Fig. 15 Reverberation time of 3 types IR

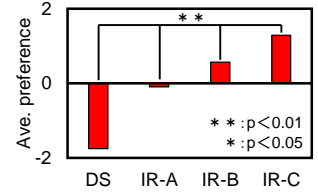


Fig. 16 Ave. preferences of expansive feeling

と、4章で示したように、体感残響時間補整を施した上で1000 Hz帯域の残響の余韻を付与したIR-Cの拡がり感が向上していることがわかる。以上より、建築音響設計での残響デザインによる効果を検証した。

6. 研究成果

- (1) インパルス応答の提示により空間的印象としての拡がり感を評価する手法を提案し、従来研究で用いられてきた音の印象因子と同様の傾向を得た。また、拡がり感向上には残響時間を伸ばすだけではなく、残響の余韻の周波数特性の操作が効果的であることを示した。
- (2) 残響時間の聴感特性を把握し、帯域別の音圧レベルまたは帯域別の残響時間の補整により体感上の残響時間を操作する手法を提案し、残響時間補正に拡がり感向上の効果を認めた。
- (3) 拡がり感の推定と向上には1000 Hz帯域の残響時間に注目することが効果的であることを把握した。また、重回帰分析を用いた拡がり感推定モデルを構築し、数学的な検証を行った。
- (4) 信号処理上の残響デザインによる印象変化の把握を目的として、楽音を用いた評価を実施し、インパルス応答を用いた評価と同様に、1000 Hz帯域の残響の余韻の付与による空間的印象の向上への効果を確認した。
- (5) 建築音響設計上の残響デザインによる印象変化の把握を目的として、音線法を用いた数値解析および評価を実施し、拡がり感の向上への効果を検証した。

参考文献

- (1) 曾根敏夫, 城戸健一, 二村忠元, 音の評価に使われることばの分析, 日本音響学会誌, **18-6**, (1962), pp.320-326.
- (2) 前崎壮真, 戸井武司, 音の広がり感に関する主観評価と物理量との関連, 日本音響学会講演論文集(春), (2020), pp.1311-1312.
- (3) 田原靖彦, 聴感の特性に基づく室内残響設計・評価法, 日本音響学会誌, **47-10**, (1991), pp.711-722.
- (4) Diana Deutsch, 寺西立年, 大串健吾, 宮崎謙一, 音楽の心理学(上), 西村書店, 新潟, (1987), p.176.
- (5) 前川純一, 森本正之, 坂上公博, 建築・環境音響学, 共立出版株式会社, 東京, (1990), pp.52-53.
- (6) 前崎壮真, 戸井武司, 残響デザインによる空間的印象変化に関する研究, 日本音響学会講演論文集(春), (2021), 1-11-17.