

平成 26 年度
修士論文

建築空間の再現提示によって想起される
聴覚の主観印象に対する視覚情報の影響

指導教員 寺島貴根 准教授

三重大学大学院工学研究科

建築学専攻

石川 あゆみ

目次

第 1 章	<u>序論</u>	1
1-1	研究背景	2
1-2	研究目的	4
1-3	既往研究	5
1-4	研究概要	9
1-4-1	聴覚刺激概要	9
1-4-2	視覚刺激概要	10
1-4-3	実験システム概要	10
1-4-4	被験者概要	12
1-4-5	主観評価概要	12
第 2 章	<u>室内音場の主観印象に及ぼす残響時間の影響</u>	13
2-1	研究概要	14
2-2	実験概要	14
2-2-1	実験システム	14
2-2-2	実験刺激	15
2-2-3	実験手順	16
2-3	実験結果	17
2-4	分析	19
2-5	小括	21
第 3 章	<u>視覚情報の空間用途による室内音場の主観印象</u>	22
3-1	研究概要	23
3-2	実験概要	23
3-2-1	実験システム	23
3-2-2	実験刺激	24
3-2-3	実験手順	25
3-3	実験結果	27
3-3-1	実験 1 の結果	27
3-3-2	実験 2 の結果	29
3-3-3	実験 3 の結果	30
3-4	分析	35
3-4-1	提示刺激のマルチモード化による主観聴覚印象の変化	35
3-4-2	違和感とマルチモード化に関する評定倍率の関係	37

3-5 小括	41
第4章 視覚情報の空間用途による主観印象の違い	42
4-1 研究概要	43
4-2 実験概要	43
4-2-1 実験システム	43
4-2-2 実験刺激	44
4-2-3 実験手順	45
4-3 実験結果	47
4-3-1 実験1の結果	47
4-3-2 実験2の結果	48
4-3-3 実験3の結果	49
4-4 分析	51
4-4-1 違和感とマルチモード化に関する評定倍率の関係	51
4-4-2 第3章の実験結果との比較	52
4-5 小括	63
第5章 異なる音楽空間における視覚と聴覚の主観印象	64
5-1 研究概要	65
5-2 実験概要	65
5-2-1 実験システム	65
5-2-2 実験刺激	66
5-2-3 実験手順	67
5-3 実験結果	69
5-3-1 実験1の結果	69
5-3-2 実験2の結果	71
5-3-3 実験3の結果	72
5-4 分析	76
5-4-1 残響時間として T_{sub} を採用した場合	76
5-4-1-1 シングルモード提示時の聴覚印象の評価結果	76
5-4-1-2 マルチモード提示時の聴覚印象の評価結果	78
5-4-1-3 モード間の聴覚印象の評価結果の比較	80
5-4-1-4 違和感とマルチモード化に関する評定倍率の関係	82
5-5 小括	85

第6章 結論	86
6-1 モード変化による視聴覚印象の相互関係	87
6-2 視聴覚刺激のマルチモード提示時に生じる違和感	88
6-3 総括	89
謝辞	91
参考文献	92

第 1 章

序論

1-1 研究背景

我々は日常生活の中で、様々な目的に応じた建築空間を利用し、様々な公共空間に遭遇する。公共空間の中には、エントランスのように誰もが自由に出入りできるが短時間で通り過ぎてしまう空間や、体育館やレストランのように必要に応じてある一定時間滞在する空間、また廊下のように空間から空間への移動の際に通過する空間などがある。このように、我々の身の周りには用途や使用目的の異なる多数の公共的な建築・都市空間が存在するが、工事現場などの特殊な空間を除いて、そこは特別な制約を受けることなく誰もが自由に出入りできる空間である。それぞれの空間の利用者や利用率、利用時間、利用方法は様々であるが、たとえ一時的であっても、その空間で耳にする音によって利用者に不快な印象を与えることはあってはならない。

人が聴取した音から受ける聴覚的な印象に関しては、音の種類・性質だけでなくその音を聴取した場所・時間、更には聴き手の行動など、多くの要因が関与している。様々な建築・都市空間における音環境を誰にとっても快適な空間とすることは困難であるが、そこで聴取された音はその空間に滞在する人に不快な印象を与えないようにするという最低限の配慮は必要である。建築音響デザインを考える上で、可能な限り不要な音の発生を抑えたとともに、発せられた音や響きはその空間の用途や目的を妨げることのないようにしたい。したがって、劇場・ホールといった音楽専用空間に限らず、様々な意匠・用途の空間を含めた様々な公共的な建築空間における意匠及び音場の特徴及びそれらに対して人が抱く主観印象を把握する必要があると考えた。

既往研究においては、日常生活の中で得る全情報量のうち、視覚からの情報が約7割であるのに対し、聴覚からの情報は約2割で、聴覚刺激と視覚刺激が同時に与えられたとき、人間は視覚優位の知覚をされると言われている。つまり、音場の体験において視覚情報から受ける影響は大きいと言い換えることができるだろう。実際の建築空間においては、たとえそれが適切な音響設計がなされた空間であっても、それは聴覚的な感覚の観点のみから「音響的に好ましい」とされた空間であり、視覚と聴覚相互に関わる印象評価がなされた場合には、人がその空間の響きを聴いたときにより評価が得られるとは限らない。つまり、視覚的な情報によって聴覚的な印象が変化する可能性があるということである。このような印象変化が建築環境において生じ得る例を挙げて具体的に示すと、ホール空間の場合、残響時間の実測値はホールとして最適な長さであるにもかかわらず、天井高が低く視覚的な圧迫感があるため、聴衆が実際よりも残響時間を短く感じてしまう。または、残響時間の実測値はホールとしては少し短めであっても、容積や天井高を十分に確保すれば聴衆は視覚的な印象からその空間の残響時間を長く感じる、といった状況が考えられる。こうい

った研究はオーディオ・ビジュアルの分野で進められており、例えばオーディオ・ビジュアル・メディアを通じて音楽を聴く際に生じる視覚と聴覚の相互作用として、以下の三つが明らかにされている¹⁾。

① 感覚の感受性の変化

わざと音質の劣化した音楽再生音を聴覚刺激とした場合、その音楽再生音だけを提示して音質評価実験を行うと、この音質の劣化は明瞭に捉えられる。一方、映像を同時に提示すると、聴覚系の音質の劣化に対する感度が鈍り、その結果、音質の劣化が判断しづらくなることが分かった。

② 視覚と聴覚の共鳴現象（通様相性における相互作用）

視覚と聴覚に共通して存在する心理的性質（通様相性）を通して生じる相互作用。例えば、ボールがバウンドする様子の映像とテンポの異なる音楽を組み合わせ、それらから受ける印象を「楽しいー寂しい」といった尺度を用いて測定した実験では、テンポの速い音楽と早いバウンドの映像が組み合わせられたとき、音楽の印象が映像の印象に影響を与え、より「楽しい」という印象が増大することが分かった。

③ 視覚と聴覚の協合現象（総合的評価に見られる相乗効果）

音と映像が一体となって、それぞれをより印象的なものにする（評価を高める）現象。この現象は、音と映像の組み合わせに強く依存し、それらの組み合わせが「適切である」と判断された場合にのみ機能することが分かっている。

以上のような作用が建築環境においても生じていると仮定するならば、それをうまく活用し、建築音響設計の観点から実設計に適用し得る有用な知見を得ることができるのではないかという考えに至った。視覚と聴覚の2つを組み合わせたマルチモーダルな刺激に対する主観印象の研究事例は、騒音・サウンドスケープあるいはマルチメディア作品制作の分野において若干見られるが、聴覚として音場、すなわち反射音構造を取り扱っている研究はほとんど見られない。そこで、本研究に着手した。

1-2 研究目的

我々は日常生活の様々な場面において、様々な建築・都市空間に遭遇し、その空間を視覚的・聴覚的に体験している。本研究の目的は、それらの様々な空間から得られる視覚情報（広さ・形状・色調・意匠など）と聴覚情報（響きの長さ、残響感、明瞭感などの反射音構造としての音場）によるマルチモーダルな刺激に対して、人々が抱く視覚的・聴覚的な主観印象の特徴を明らかにすること、また、提示刺激が単一（視覚刺激または聴覚刺激のみが提示されるシングルモード提示）の場合と複数（視覚刺激と聴覚刺激が同時に提示されるマルチモード提示）の場合における各主観印象の関係を明らかにすることである。

例えば、残響時間という音響パラメータは、人間には「響きの長さ」や「残響感」などという言葉で表される感覚として捉えられる。音だけを提示したときのこれらの感覚量と、音に映像を加えたときのこれらの感覚量の変動傾向を明らかにすることで、オーディオ・ビジュアルの分野で見られるような視覚と聴覚の共鳴現象を利用した設計が、建築分野においても可能なのではないかと考えている。

本研究では、様々な建築空間のヴァーチャル・リアリティ映像（視覚刺激）と残響時間の異なるインパルス応答（聴覚刺激）の実時間畳み込み音場を提示することで、無響室内に多様な空間を仮想的に再現し、被験者にそれぞれの主観印象を評価させる実験を行う。この実験結果を分析することにより、視覚情報と音場の相互関係や人が抱く主観印象に影響を及ぼす要素について検討する。

本研究の最終的な目標は、将来的に実務的な音響設計や建築設計（ホール音響のみならず一般空間におけるバリアフリー音響設計、サウンドスケープデザインなど）に資する知見を得ることであり、そのためには、視覚と聴覚の共鳴現象の定量化が必要であると考えている。

1-3 既往研究

音楽と映像のマルチモーダル・コミュニケーション

岩宮 眞一郎

映像と音楽を提示した際の、画面サイズや色彩などの違いによる印象に及ぼす影響を論じている。その中でも、オーディオ・ビジュアル・メディアを通して音楽を聴く際に、視覚と聴覚がどのような相互作用を生じているかの論を挙げる。

ここでは SD 法を用いた被験者実験を行っている。視聴覚素材として音楽ライブ映像、環境ビデオ、アニメーション映像などの音と映像の調和が図られたものと、それら音と映像の同期をずらしたもの、別の音と映像を組み合わせたもの等の調和を崩したものを用い、それらの主観評価結果を比較している。更に、視聴覚素材の提示方法に関して、音のみ提示、映像のみ提示の単独提示と、両方提示の 2 パターンによる比較も行っている。得られた実験結果をもとに因子分析を行ったところ、引き締まり因子・評価因子・美的因子・明暗因子・ユニーク因子の 5 因子に分けられた。更に、単独提示から両方提示への因子得点の変化から、聴覚と視覚に共鳴現象が認められた。加えて、視覚と聴覚の統合過程の働きによって直接もたらされる協動的な相互作用もみられた。

AUDITORY VERSUS VISUAL SPATIAL IMPRESSION: A STUDY OF TWO AUDITORIA

Densil Cabrera 他

ステージ音響学の分野では、音楽空間の印象が「音源までの距離」・「包まれている感覚」・「親密感」に分類される。Cabrera は視覚と聴覚の空間的印象を 2 つのホール観客席で測定し、その結果がどのように異なるかについて実験を実施し、考察を加えた。

実験は、形状の異なる 2 つの音楽ホールを対象に聴覚実験と視覚実験を別セクションに分けて行った。視覚実験では、広さ・包まれている感覚・ステージ優勢度・親密感を評価させた。ステージの上に視覚目標があったとき 2 つのホール観客席で様々な位置（異なる音源位置）から撮影したグレースケールの写真を映し出すことで、視覚刺激を提示している。聴覚実験では、音源までの距離・包まれている感覚・親密さを評価させた。演奏者までの距離は、ステージ上の同じ位置から 2 つのホール観客席においてインパルス応答を測定し、そのインパルス応答に様々な位置で録音した無響音楽（オーケストラ演奏）を畳み込むことで表現した。その結果は、目標距離が聴覚と視覚の空間印象に対して最も重要であることが分かり、聴覚と視覚の空間印象を分離して評価を行ったにもかかわらず、いくつかの特性の間の相関の原理を示した。

視聴覚刺激に対する評価および情動反応における視覚と聴覚の関連性

市川 周平（広島大学） 他

先行研究において、視聴覚刺激に対する反応は各モダリティの表象が形成された後にそれらが統合されて刺激全体の表彰が形成されることが示されている。この統合過程における視覚と聴覚の関係性として挙げられている加算モデル（2つのモダリティが独立して反応に影響すると考えるモデル）と乗算モデル（2つのモダリティが相乗的に関連しあって反応に影響すると考えるモデル）があるが、そのどちらが適当であるかはまだ一貫した知見が得られているとは言い難い状況にある。また、先行研究では刺激の評価と喚起される情動反応のいずれかのみが検討対象とされ、それらの関係性はあまり検討されていない。このような現状を踏まえ、視聴覚刺激に対する評価と情動反応において、視覚と聴覚の情動価の関係性を把握することを目的として実験を行った。

視聴覚刺激は映像と背景音楽（BGM）を組み合わせたものであり、それぞれ明暗性の高いものと低いものを用意した。これらを組み合わせた4条件の刺激に対する主観印象を評価させる実験を行った。その結果、明暗性に関して視覚と聴覚の交互作用が認められた。一方、刺激性においてはその作用は認められなかった。視聴覚刺激に対する情動反応については、緊張感・高揚感の双方で視覚と聴覚の交互作用が認められた。また、視覚と聴覚の関係性を表すモデルは加算・乗算のどちらが適当かという問題に明確な回答を得るためには、実験要因の水準数を増やして検討を行う必要があると結論づけた。

建築内部における視覚情報と聴覚情報の同時提示に対する主観印象評価に関する研究

堀内 宏剛（三重大学） 他

視聴覚の同時刺激によって人間心理内でそれらの印象が決定すると言われているが、それは建築空間においても同様であり、それによって建築空間のイメージが確定するのではないかと考えられる。したがって、室内の意匠と音響に対して主観印象評価実験を行う事で、それらの相互作用を考慮した設計に資する知見を得ることを目的として実験を行った。

実験は、人々が日常的に利用する教室・多目的ホール・教会・参拝堂・斎場の用途空間に対してそれぞれ2種類ずつの視覚刺激を用い、無響室においてヴァーチャル・リアリティ映像及びインパルス応答の畳み込み音場により仮想音場を再現し主観印象評価させるものである。この実験結果をもとに因子分析とベイジアンネットワーク分析を行い、視覚と聴覚の相互関係について探った。具体的な設計例につながる主観評価項目については更なる検討が必要であるが、主に意匠の空間形状因子においては音響の迫力因子・美的因子に依存していること、音響においては音の迫力因子と美的因子が空間の美的因子に対する影響力が大きいことが分かった。

視覚情報が空間認知に関わる音響パラメータに与える影響
-視覚と聴覚の相互作用を考慮した音響設計に関する基礎的研究-

藤本 隆史（三重大学） 他

視覚情報が聴覚の空間性に依存する音響パラメータに与える影響を把握するために、画面の大きさが残響感及び音の広がり感に与える影響について調べ、視覚と聴覚の相互作用を効果的・積極的に用いた音響空間の設計に関する基礎的な情報を得ることを目的とした。

実験はスクリーンとスピーカーを配した無響室内で行われた。視覚情報としての映像はスクリーン上に投影され、音楽は被験者の正面に配置された直接音用スピーカーと左右対称に配置された反射音用スピーカーから再生した。その条件下において被験者に対して聴覚情報のみの基準音場を提示し、その後スクリーンに投影される静止画像と繰り返し再生される音楽を視聴しながら、基準音場に合うように音響パラメータを調整させた。分析においては「聴覚情報のみを提示した場合の被験者が調整した残響時間」に対する「視覚情報と聴覚情報を両方提示した場合の被験者が調整した残響時間」の比である調整比率を算出した。その結果、被験者が広い空間をイメージし得る視覚情報を提示された場合、基準音場に合わせるためにはより長い残響時間を必要とし、より大きい視覚情報が提示された場合、より小さい初期側方エネルギー率で必要な広がり感を得ることができる可能性が窺えた。

室内における視覚情報が残響時間の予想値に対して与える影響
-視覚と聴覚の相互作用を効果的に用いた建築音響設計に関する基礎的研究-

徳永 泰伸（三重大学） 他

視覚情報から想起される空間の印象と、予想される響きの長さ（残響時間）の関連性について明らかにすることを目的とした実験が実施された。

まず、ある室内空間（教室）の内観写真を視覚刺激として無響室内に設置されたスクリーンに投射し、この視覚刺激から得た室内の印象をカテゴリー尺度を用いて評価させる実験が行われた。その後、その空間の教壇位置において人が手を叩く映像が投射され、同時にスピーカーから無響録音された手を叩く音がエフェクターを介して再生されるので、予想した室の響きの長さになるように残響時間の調整を行う。調整法によって得られた残響時間の予想値は、視覚刺激の差異に対して有意な変動を示し、空間の奥行きや容積が大きくなれば、予想される残響時間の値は大きくなることが明らかになった。

建築空間に対する視聴覚の主観印象に及ぼす視覚情報と音場の影響

和仁 優子（三重大学） 他

建築空間における視聴覚主観印象の相互関係を探ることを目的とし、4 シリーズの実験を行った。

1 つ目の実験では、様々な用途、特性の空間を実験対象空間とし、人が建築空間に対する視聴覚印象の特徴を見出した。2 つ目の実験では、特定の用途空間における視聴覚印象の特徴を検討し、更に視聴覚刺激のマルチモーダル化による影響の方向性を明らかにした。3 つ目の実験において、視聴覚刺激の組み合わせ提示に対する主観印象の変化と、違和感の知覚に注目して検討した。4 つ目の実験では、聴覚印象の、特に残響感に注目して実験を行い、残響感と違和感の知覚の関係性を見出した。

ブース空間における色彩環境が脳活動に与える影響

一志 哲夫（東京電機大学） 他

知的創造に関わる仕事の向上が求められる今日、人間の身体動作としての生産性のみならず、知的活動における生産性向上が期待されている。先行研究においては色と疲労度の関係や、色に対する印象とその色が与える気分との関係性、また提示した色によって気分の時間的変化があることなどが示唆されている。以上を踏まえて、人の知的活動能力を支援することができる物的環境デザインに関する知見を得ることを目的とした。

白・赤・青・黄の4色のパターンのブース空間（作業机とモニター、コントローラーを配置）を用意し、その空間において被験者に計算問題（情報処理の知的活動に相当する）を処理させた。20秒の安静区間の後、問題スライド・解答スライドを3秒ずつ提示する流れを34回繰り返し、脳血流の変化を計測する実験を行った。また、実験の前後に生理状態を確認するアンケートと、ブース空間に対する主観印象の評価アンケートを実施した。その結果、疲労状態の評価において各色のブースで変化が見られ、なかでも黄色ブースにおける知的活動が最も疲労感を抱く傾向があることが分かり、情報処理活動が行われる環境が活動者の疲労感に影響を及ぼす可能性が示唆された。更に、印象評価アンケートからは、明るい・派手な・刺激のあるといった印象を備えた環境が、情報処理の知的活動活性化を促すことが推測された。

1-4 研究概要

本研究において主となるのは、実験室（無響室）における視覚的・聴覚的な刺激提示による主観評価実験である。以下では全章に共通する実験方法の概要を述べる。

1-4-1 聴覚刺激概要

第2章以降の実験で提示する聴覚刺激の素材となるインパルス応答の測定模様を写真1-1に示す。インパルス応答測定時の音源位置は室の中央とし、そこに12面体スピーカーを設置する。受信位置は音源位置から1 m離れた位置とし、そこにマイクロフォンの役割を果たす騒音計を設置する。ただし、測定空間がステージを持つホール空間の場合、音源位置はステージ上の客席側から2.5 m奥の上手側と下手側の中間点、受信位置は客席部の中央とする。12面体スピーカーと騒音計の床面からの高さは、おおよそ人間の耳の高さである1.5 mとする。

インパルス応答の測定方法としては、まず12面体スピーカーからTSP信号を発生し、その直接音と反射音（室の応答）を騒音計で録音する。この際、十分なS/N比が得られているか確認を行っている。録音したインパルス応答をパソコン上のソフトウェア（Sound Analyzer）で解析し、波形や音響パラメータなどの指標を得る。

第2章以降の実験で使用する聴覚刺激は、ある空間のインパルス応答を基準として、残響時間（基本的に T_{sub} 値を基準とする）を0.5 s刻みに波形編集を施したものである。この編集については、パソコン上の波形編集ソフトウェア Gold Wave 内のエフェクトである“Time warp”、または“Fade out”を用いた。前者は残響時間を長く、後者は残響時間を短くするエフェクトである。また、聴覚刺激の音量（ L_{Aeq} ）は統一している。



写真 1-1 インパルス応答測定模様

1-4-2 視覚刺激概要

第2章以降の実験で提示する視覚刺激として、ヴァーチャル・リアリティ映像（以下、VR映像）を用いた。VR映像とは、映像内のある地点から上下左右360°を見渡せるマルチメディア技術であり、写真を用いた視覚刺激の提示よりも滑らかな視点変更を行うことができるため、あたかもその空間に滞在しているかのような臨場感のある情報提示が可能である。

以下に、VR映像の作成手順を示す。まず、円周魚眼レンズを取り付けた一眼レフ・デジタル・カメラを用意し、視覚刺激となる空間の中央（インパルス応答の受信位置と同じ位置）に設置した三脚の上に取り付ける。空間の内観正面を0°の位置として魚眼写真を撮影した後、パノラマ雲台（Nodal Ninja）を左右に120°回転させ、室内左側・右側それぞれの魚眼写真を撮影する。撮影した3枚の魚眼写真は他の視覚刺激の空間と比較して違和感が生じないように、画像処理ソフトウェア（Image J）でコントラストとブライトネスの値を調整した。その後、フリーウェアであるFish4 Cube Xmに取り込んで各空間の魚眼写真3枚を合成することでVR映像を作成し、Quick Time Playerによって再生を行った。

視覚刺激の空間としては、日常的に体験する幅広い用途の公共的な空間を選定した。魚眼写真の撮影時には空間内は無人で、備え付けの備品以外の物品は極力撤去している。また、照明に関しては、その空間の利用時に最も自然で最適と思われる程度に調整している。

1-4-3 実験システム概要



写真 1-2 無響室内の様子



写真 1-3 超指向性マイクロフォン



写真 1-4 デジタル・マルチ・エフェクター

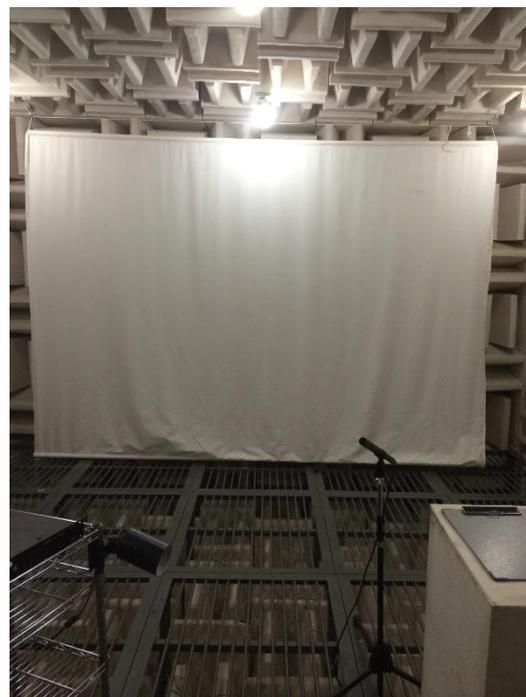


写真 1-5 布製スクリーン

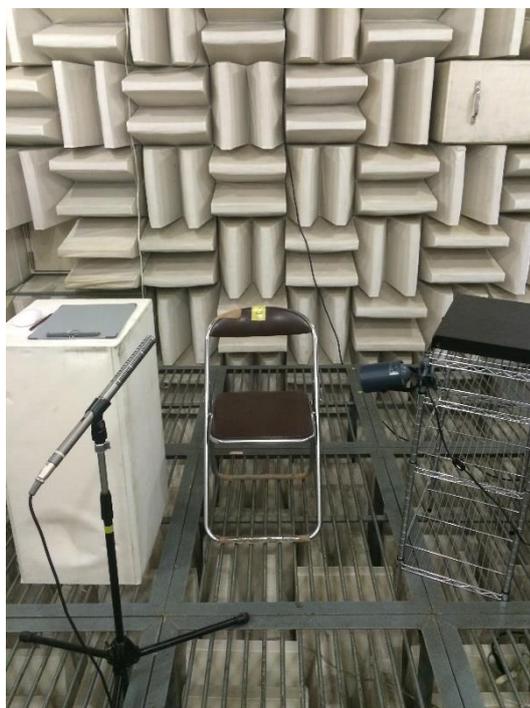


写真 1-6 被験者周辺の機器設置状況

本研究で用いた実験システムは、写真 1-2 に示すように無響室内に構築された。パーソナル・コンピュータ上で作動するソフトウェア（Logic Pro）で、本章 1-4-1 で述べた聴

覚刺激を再生する。オーディオ・インターフェースとして FIRE FACE 800 を用いた。音響入力側には写真 1-3 に示す超指向性マイクロフォン (Primo EMU-4740) が設置された。音響出力側はアンプ (YAMAHA XM 6150) とスピーカー (YAMAHA S55) が設置された。実験によってはマイクとパソコンの間に写真 1-4 のデジタル・マルチ・エフェクター (YAMAHA SPX990) が接続された。

視覚刺激の提示は、写真 1-5 のように無響室の天井から吊り下げた布製スクリーンに、同じく天井から吊り下げたプロジェクターを通じて対象空間の VR 映像を投影することで行う。写真 1-6 (スクリーンの反対側を撮影) に示すように、被験者は手元のマウスを操作することで、対象空間の内観を全方向において確認することができる。

聴覚刺激の提示は、無響室に設置された指向性マイクロフォンに集音された音 (被験者の声や手を叩いた音など) を、パソコン上のソフトウェア (Logic Pro) 上で聴覚刺激である音響インパルス応答に実時間で畳み込み、その響きが付加した音をアンプで増幅し、スピーカーで再生して被験者にフィードバックすることで行う。

実験においては、視覚刺激と聴覚刺激を同時 (マルチモード) あるいは単独 (シングルモード) に被験者に提示する。各試行において、順番効果などによる影響を無くすため、刺激は被験者毎にランダムな順に提示する。

1-4-4 被験者概要

正常な視覚と聴覚をもつ大学生及び一般から募集した。なお、人数は統計的に 50 ~ 100 名程度を被験者とした時とほぼ同等の結果を得ることができるとされる 10 名前後とする。

1-4-5 主観評価概要

主観評価には SD 法を用い、視覚と聴覚の主観印象に関する形容詞対の項目を複数挙げ、刺激提示の直後にこれらの形容詞で表される印象の程度について 7 段階のカテゴリー尺度を用いて被験者に回答を行わせる。視覚刺激に対する印象形容詞対は「近代建築の視覚的印象による意匠特性の研究」から、聴覚刺激に対する印象形容詞対は、「音の評価のための心理学的測定法」から抜粋した。分析及び考察の便宜を図るため形容詞対をひとまとめにした表現にし、それらを項目とすることとした。

この結果を分析することで、建築空間における視聴覚情報の音場主観に対する影響の詳細を明らかにするとともに、音響設計・建築設計に提供出来る定量的情報を得ることを目標とする。

第 2 章

室内音場の主観印象に及ぼす残響時間の影響

2-1 研究概要

本章における目的は、様々な空間の視覚刺激（各種室内ヴァーチャル・リアリティ映像、以下 VR 映像）と残響時間の異なる聴覚刺激（実時間畳み込みによる各種室内シミュレーション音場）を提示した際の主観印象を測定し、視覚刺激の同時提示の有無による影響について明らかにすることである。被験者は正常な視覚と聴覚をもつ男女 10 名である。

2-2 実験概要

2-2-1 実験システム

様々な空間における適切な残響時間と、その空間の印象と音の響きとの関わりを探るため、無響室におけるシミュレーション音場で実験を行う。本実験では実際の空間の状況に近い視覚情報と聴覚情報を再現するための実験システムを構築した。無響室で聴覚刺激である畳み込み音場と、視覚刺激である VR 映像を提示して複合環境を再現する図 2-1 のような実験システムを構築した。視覚刺激は布製スクリーンに映写され、被験者は自身のマウス操作により、視覚刺激の各空間の内観 VR 映像を 360° 見渡せる。被験者近傍に設置した超指向性マイクに入力された音（被験者の声や手を叩く音）はパソコンを通して刺激音場のインパルス応答に実時間で畳み込まれ、聴覚刺激としてスピーカーからステレオ再生される。

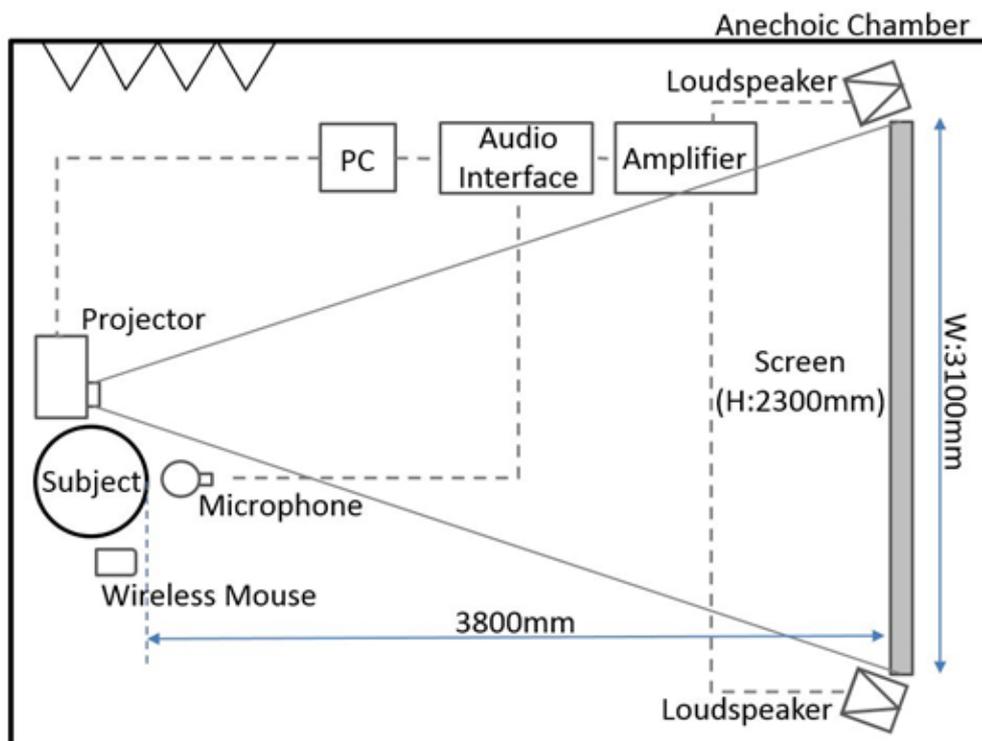


図 2-1 実験システムの概要

2-2-2 実験刺激

視覚刺激として用いた空間の用途とその実際の音響特性を表 2-1 に示す。図 2-2 にそのイメージ画像を示すが、これは魚眼レンズを装着したデジタル・カメラで撮影した写真画像そのものである。これらを VR 映像に加工すると、写真上で見られるような画面端の柱が歪みなどの違和感は無くなる。

実験で聴覚刺激として用いた音場の特性を表 2-2 に示す。聴覚刺激は、先行研究における実験結果から、被験者がほぼ 0.5 s 刻みに等間隔であると評価した残響時間になるように、基準のインパルス応答（ホールのホワイエの響き）の波形をパソコンのソフトウェア上で編集したものである。視覚刺激としては、被験者が日常的によく経験していると思われる公共空間のうち意匠、用途に違いがあり、音響特性の異なるものを 5 空間選定した。

表 2-1 視覚刺激として用いた空間の用途及び音響特性

名称	用途	T _{sub} [s]	EDT [s]	C ₈₀ [dB]
a	教室	0.68	0.65	8.8
b	レストラン	0.94	7.23	1.1
c	渡り廊下	1.57	1.42	5.6
d	図書館入口ホール	1.94	1.99	4.8
e	体育館	3.07	2.72	3.2



図 2-2 視覚刺激のイメージ画像

表 2-2 聴覚刺激として用いた音場の音響特性

名称	T _{sub} [s]	EDT [s]	C ₈₀ [dB]
基準IR	3.56	3.11	-1.8
刺激1	0.80	0.99	6.0
刺激2	1.09	1.26	2.7
刺激3	1.42	1.41	2.8
刺激4	1.73	1.57	-0.6
刺激5	2.17	2.06	-0.6
刺激6	3.06	2.46	-1.8

2-2-3 実験手順

まず、被験者に聴覚刺激のみ提示（シングルモード）し、聴覚の主観印象を評価させる。次に視覚刺激と聴覚刺激を同時提示（マルチモード）し、視覚と聴覚それぞれに対する主観印象を評価させる。聴覚に関する主観評価項目を表 2-3 に示す。評価は-3 ~ +3（響きの長さのみ 0 ~ +6）の 7 段階尺度で行わせた。

表 2-3 主観聴覚印象の評価項目

評価項目名	形容詞対	
	響きの長さ	長い
残響感	豊か	乏しい
明瞭感	はっきり	ぼんやり

2-3 実験結果

図 2-3 に「響きの長さ」に対する評定平均値を示す。シングルモード及びマルチモード提示時の各刺激において、概ね残響時間に対して線形かつ、ほぼ等間隔に評価され、聴覚刺激の作成意図を反映した結果となった。

図 2-4 に「残響感」の評定平均値を示す。概ね残響時間が長くなるにつれて評定平均値は増加する傾向にあるが、「響きの長さ」に比べ、どの刺激条件においても評価は残響時間に対して非線形である。また、シングルモード提示時には残響感は残響時間の長さ順に評価されたが、マルチモード提示時には視覚刺激が c の場合を除いて、聴覚刺激 5 より聴覚刺激 6 の評価が低くなっている。

図 2-5 に「明瞭感」の評定平均値を示す。全体的に残響時間が長くなるにつれて評定値が小さくなる傾向が見られ、概ね「響きの長さ」と相反する評価がなされた。特に、残響時間の長い刺激に対しては、評定値の間隔が狭くなるといった非線形性が見られる。

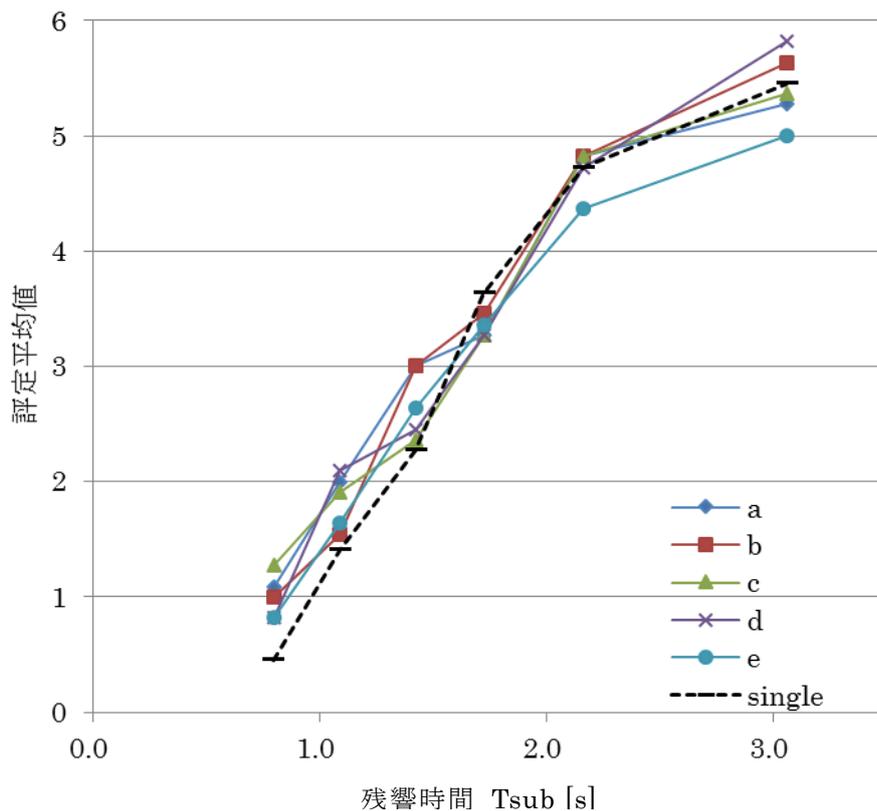


図 2-3 「響きの長さ」の評定平均値

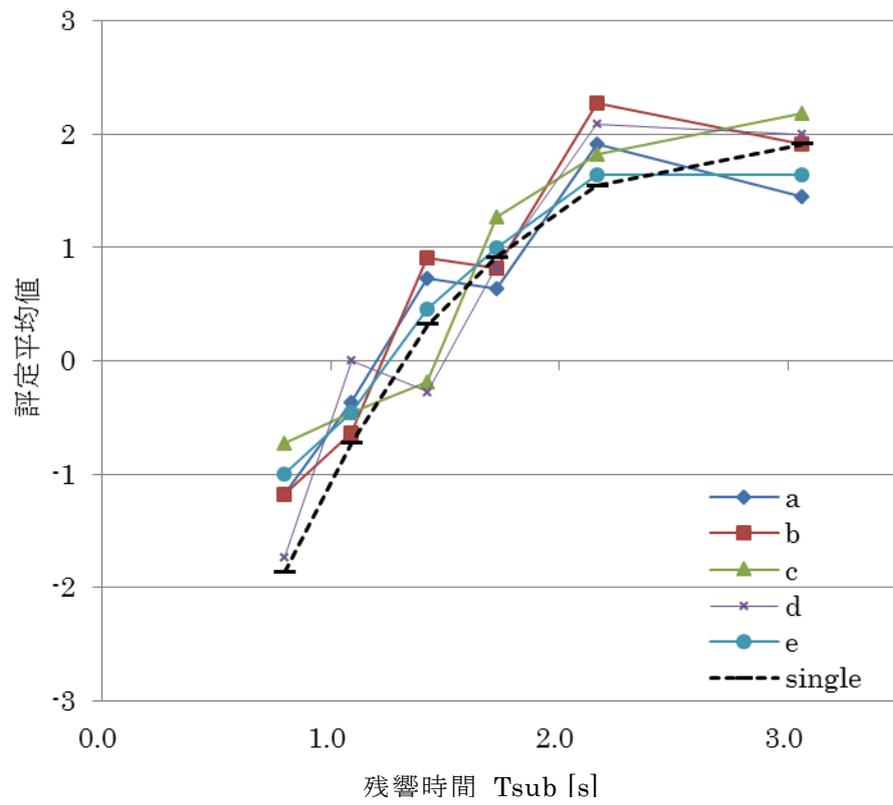


図 2-4 「残響感」の評定平均値

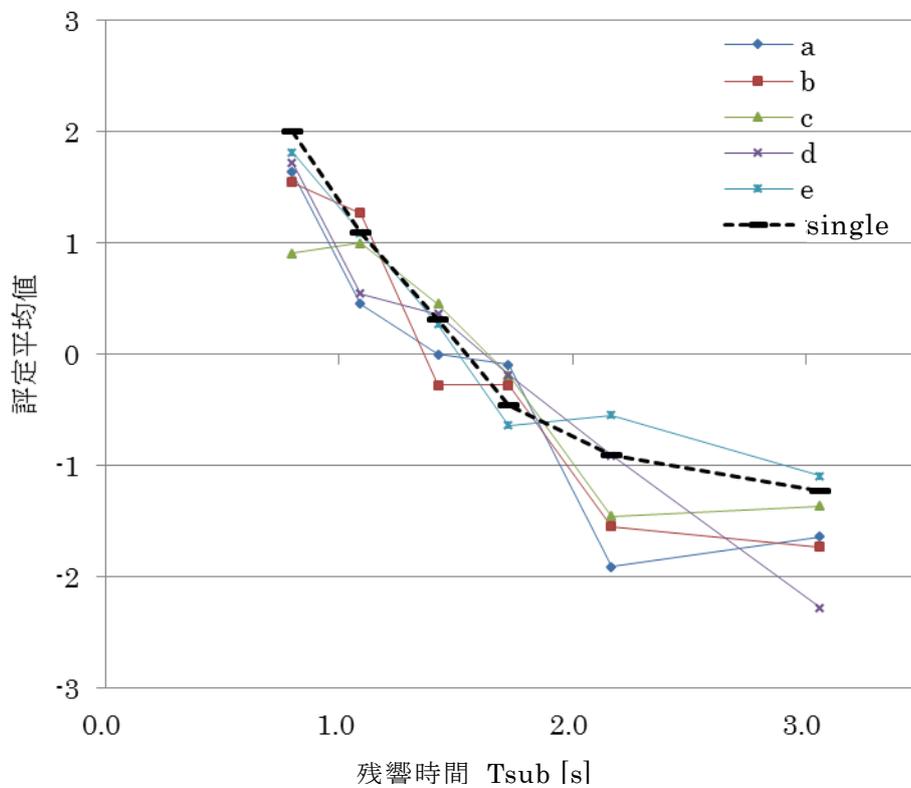


図 2-5 「明瞭感」の評定平均値

2-4 分析

聴覚印象の主観評価項目に関し、シングルモード提示時の評定平均値に対するマルチモード提示時の評定平均値の倍率を評定倍率として算出し、その結果を図 2-6～8 に示す。

図 2-6 で示す「響きの長さ」は視聴覚刺激の大半の組み合わせで評定倍率が 1.0 以上で、聴覚刺激に視覚刺激が加わると評定値が増大する方向に変動している。また、聴覚刺激 4 より残響時間の長い刺激は視覚刺激の違いによる評価の変動が小さくなり、倍率が 1.0 に近づく傾向が見られる。しかし、視覚刺激の種類による変動傾向の違いは見られない。

図 2-7 で示す「残響感」は「響きの長さ」と変動傾向が近似しており、視聴覚刺激の大半の組み合わせで倍率が 1.0 以上で、聴覚刺激に視覚刺激が加わると評定値が増大している。また、聴覚刺激 4 より残響時間の長い刺激は視覚刺激の違いによる変動が小さくなり、倍率が 1.0 に近づく傾向も見られる。聴覚刺激 3 において、視覚刺激による評定倍率の違いが若干見られるが、その原因は不明である。

一方、図 2-8 で示す「明瞭感」では倍率が 1.0 未満の組合せが多く、聴覚刺激に視覚刺激が加わると評定値が減少する方向に変動している。また、聴覚刺激 5 より残響時間の長い刺激は視覚刺激の違いによる変動が大きく、それぞれの変動傾向にも違いが見られた。

傾向の違いが現れた残響時間 1.5～2.0 s 付近の聴覚刺激については、生活環境の中で経験する平均的な残響時間や視聴覚刺激間の違和感との関連性が窺われ、違和感の測定結果の分析とともに今後の詳細な検討項目とする。

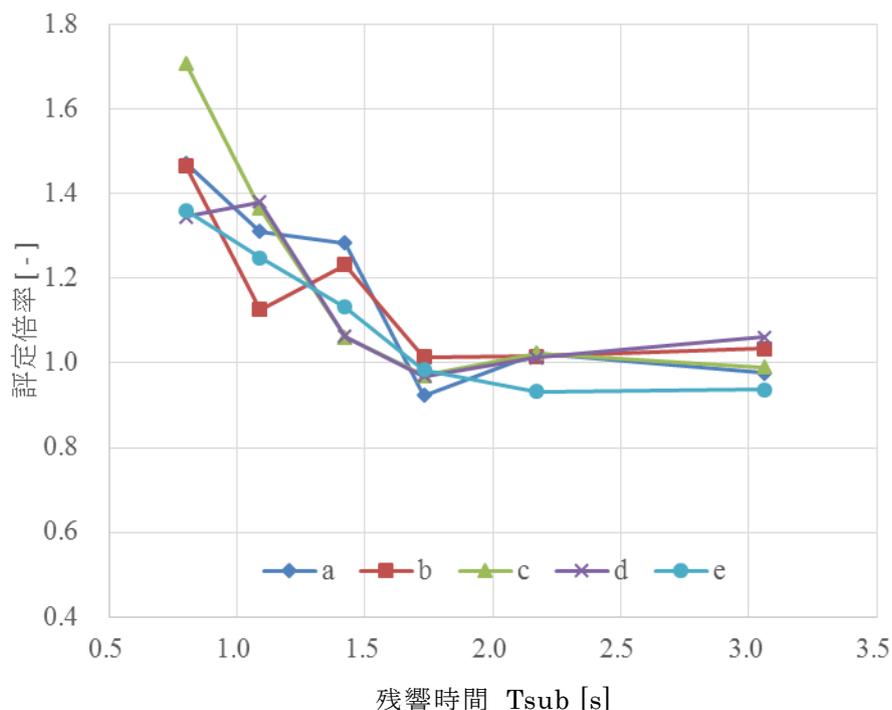


図 2-6 「響きの長さ」の評定値のシングルモードに対する評定倍率

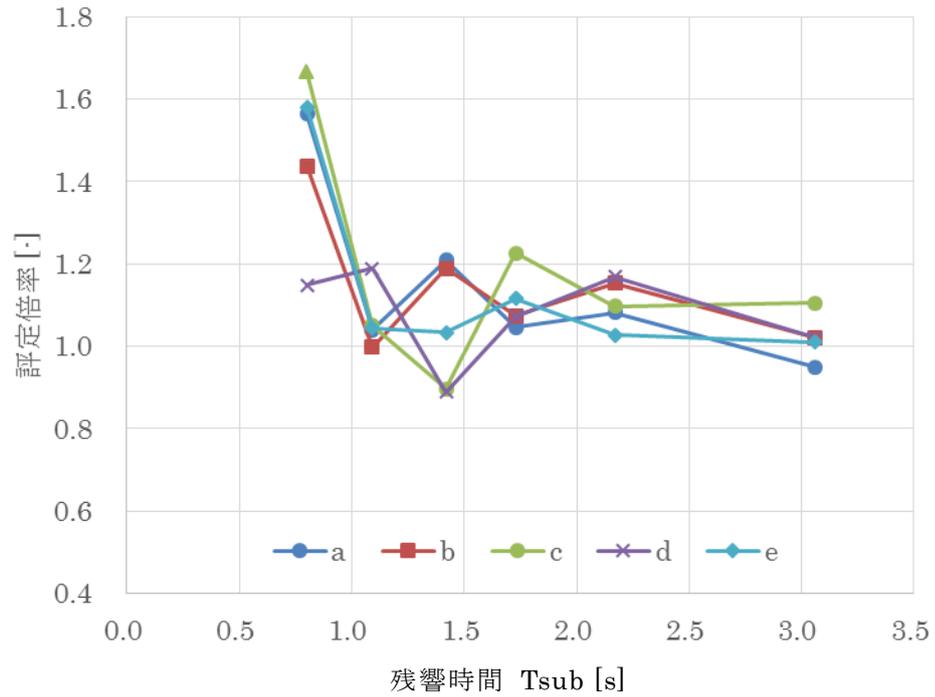


図 2-7 「残響感」の評定値のシングルモードに対する倍率

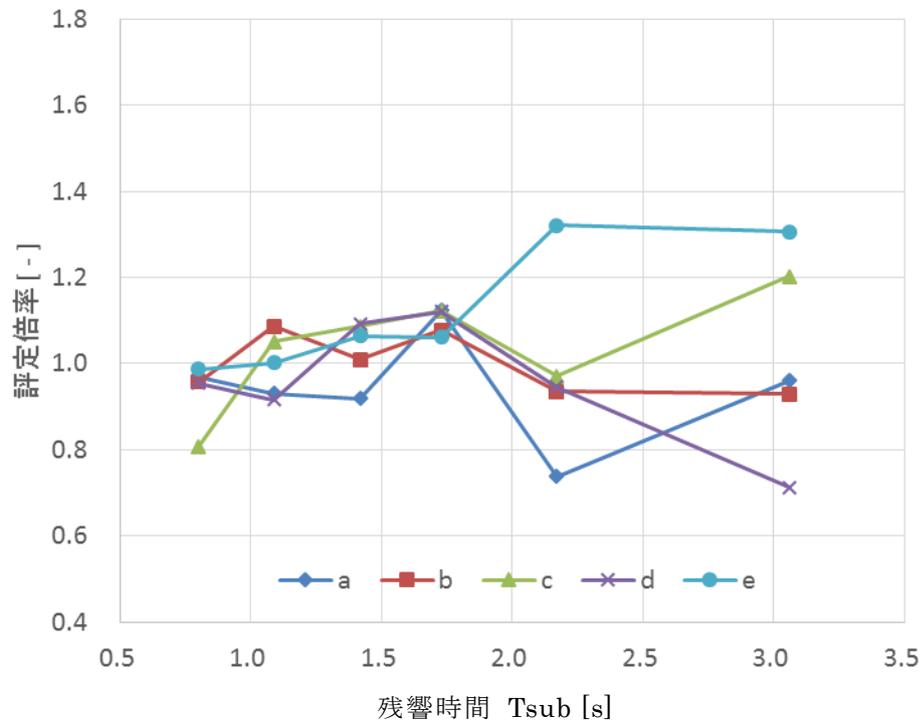


図 2-8 「明瞭感」の評定値のシングルモードに対する倍率

2-5 小括

残響時間の異なる聴覚刺激に視覚刺激が加わることによる音場の主観印象に対する影響が把握された。

シングルモード提示時の評定値に比べ、マルチモード提示時の「響きの長さ」と「残響感」の評定値は、残響時間 1.5 s 未満の聴覚刺激の条件で高くなり、「明瞭感」は残響時間 2.0 s を超える条件で視覚刺激の違いにより高くまたは低くなる傾向が見られた。

生活環境の中で経験する平均的な残響時間 1.5～2.0 s 付近を境界として、その前後で評定値の変動の傾向が異なることが観測された。

第 3 章

視覚情報の空間用途による室内音場の主観印象

3-1 研究概要

第2章において、被験者に聴覚刺激のみ提示（シングルモード）したときと、視覚刺激と聴覚刺激を同時提示（マルチモード）したときのそれぞれの主観聴覚印象を比較することで、提示刺激のマルチモード化による音場の主観印象に対する影響をおおよそ把握することができた。

本章では主に、被験者の予想残響時間を測定することで、響きと映像の間の違和感が音場の主観評価に与える影響を明らかにすることを目標に、新たに設定した条件の元で第2章とほぼ同様の手順で追加実験を行った結果を分析する。被験者は正常な視覚と聴覚をもつ男女10名である。ただし、この被験者は第2章における実験の被験者とは異なる。

3-2 実験概要

3-2-1 実験システム

図3-1に示すように、第2章における実験と同様の無響室内のシステムに、予想残響時間を測定するためのデジタル・マルチ・エフェクター（YAMAHA SPX990）を加えた。被験者自身がエフェクターの上下のスイッチ操作を行うことで、エフェクターに内蔵された響きの残響時間を0.1sずつ変化させることができる。また、音場の再生方法はモノラルとし、スピーカーを1つにしてスクリーン中央の裏側に設置した。

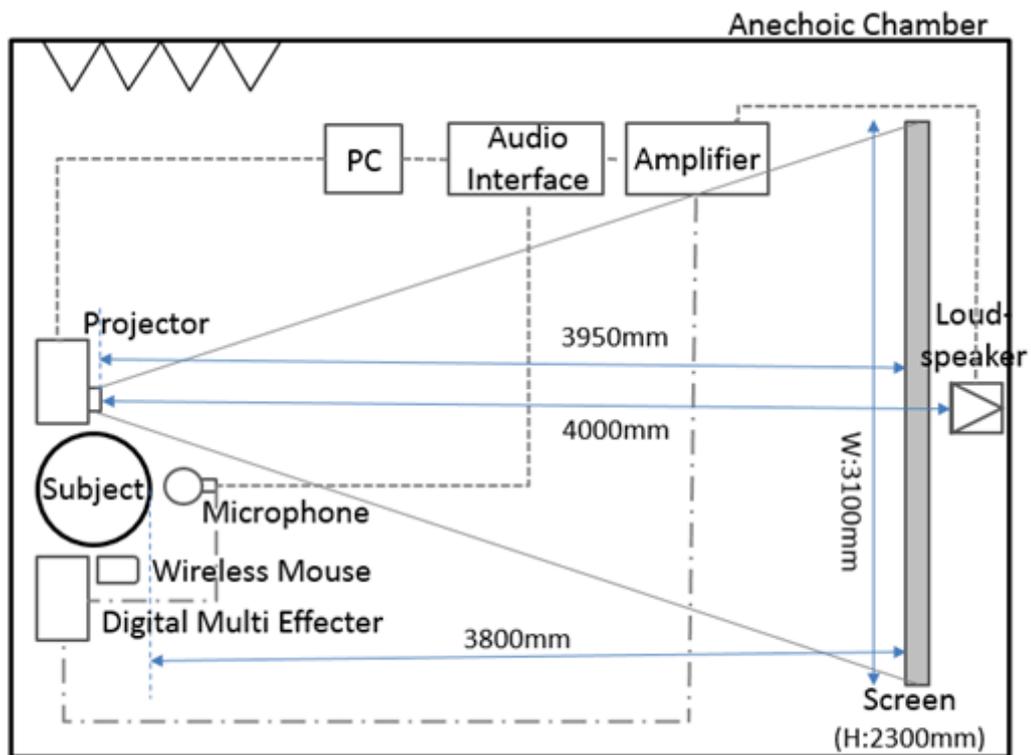


図 3-1 実験システムの概略

3-2-2 実験刺激

一般的な公共空間として日常的に用いられる、異なる内観デザインと室内音響特性を持つ3つの実在する空間 A～C を実験の視覚刺激として採用した。その用途及び音響特性を表 3-1 に示す。第 2 章における実験では、視覚刺激の空間による評価の違いがあまり表れなかったため、空間の評価が被験者にとって容易ではなかった（イメージしにくかった）と思われる図書館入口ホール（エントランス空間）・渡り廊下といった空間を排し、音楽演奏会や講演会などに用いられる多目的ホールを新たに採用した。また、本実験の被験者が主に三重大学の学生であることから、選定した 3 空間はほとんどの学生が使用したことがあると予想され、それぞれの空間の視覚的・聴覚的なイメージをある程度持っている想定している。図 3-2 に視覚刺激の空間のイメージ画像を示す。

聴覚刺激は、第 2 章における実験で使用したもの（表 2-1）に、表 3-1 に示した視覚刺激の空間の響きを加えた 9 種類である。本実験の聴覚刺激について、表 3-2 に残響時間 (T_{sub}) の短い順にまとめる。表中の数字が太字で表記されている刺激 a, b, c が、視覚刺激の空間そのものの響き（波形編集をしていないインパルス応答）である。

表 3-1 視覚刺激として用いた空間の音響特性（500 Hz 基準）

名称	用途	T_{sub} [s]	EDT [s]	C_{80} [dB]	容積 [m^3]
刺激A	教室	0.68	0.65	8.8	750
刺激B	多目的ホール	1.50	1.71	0.1	12000
刺激C	体育館	3.07	2.72	3.2	6100

表 3-2 聴覚刺激として用いた音場の音響特性（500 Hz 基準）

名称	T_{sub} [s]	EDT [s]	C_{80} [dB]
刺激a	0.68	0.65	8.8
刺激1	0.80	0.99	6.0
刺激2	1.09	1.26	2.7
刺激3	1.42	1.41	2.8
刺激b	1.50	1.71	0.1
刺激4	1.73	1.57	-0.6
刺激5	2.17	2.06	-0.6
刺激6	3.06	2.46	-1.8
刺激c	3.07	2.72	3.2



図 3-2 視覚刺激の空間のイメージ画像

3-2-3 実験手順

実験 1：視覚刺激のシングルモード提示

表 3-3 主観視覚印象の評価項目

カテゴリ	評価項目名	形容詞対	
		色覚	明度
彩度	鮮やかな		くすんだ
色相	暖かみのある		冷やかな
色の数	単色な		多色な
明るさ(光)	明るい		暗い
空間	立体感	立体感のある	平面的な
	複雑さ	複雑な	単純な
	開放感	開放的な	閉鎖的な
	広さ	広い	狭い
	質感	やわらかい	かたい
	親しみやすさ	親しみやすさ	親しみにくい

表 3-1 に示した視覚刺激としての 3 種類の VR 映像のみがランダムな順にスクリーンに映写されることで提示され、被験者はそれを自身のマウス操作によって見渡す。次に、被験者は視覚情報からその空間の残響時間を予測する。予想した残響時間の表現するために、超指向性マイクに向けて発した音を聴いて残響時間を確認しながら、手元のデジタル・マルチ・エフェクターの上下のスイッチ操作により、エフェクターに内蔵されたホール空間の代表的な響き (CONCERT HALL) の残響時間を 0.1 s 刻みに納得いくまで調整する。このエフェクターの響きの残響時間は、実験の試行ごと (視覚刺激が切り替えられるごと) に 1.5 s に設定し直しており、被験者は必ず残響時間の初期値 1.5 s を聴いてから残響時間を調節する作業に移る。

最後に、被験者は提示された建築空間の映像に対する視覚的な印象についての質問項目に-3～+3の7段階尺度で回答する。この質問項目を表3-3に示した。さらに予備的情報として、被験者各人のそれぞれの空間の経験の有無を、「利用したことがある」・「多分利用したことがある」・「多分利用したことがない」・「利用したことがない」の4段階で回答するように求めた。

実験2：聴覚刺激のシングルモード提示

表3-2に示した聴覚刺激としての9種類の音場のみがランダムな順に、パソコン上のソフトウェア（Logic Pro）を通じてスピーカーから再生されることで被験者に提示される。被験者はマイクに向けて発した音（被験者の声や手を叩いた音）を聴いたときの主観的な聴覚印象を-3～+3の7段階尺度で回答する。質問項目を表3-4に示すが、これらは第2章の実験で用いた主観聴覚印象評価項目と同じである。

表3-4 主観聴覚印象の評価項目

評価項目名	形容詞対	
響きの長さ	長い	短い
残響感	豊か	乏しい
明瞭感	はっきり	ぼんやり

実験3：視覚刺激と聴覚刺激のマルチモード提示

実験1の視覚刺激3種類と実験2の聴覚刺激9種類を組み合わせることで、27種のマルチモーダルな視聴覚刺激とした。それらはランダムな順に提示され、被験者はそのマルチモーダル提示に対する主観的な聴覚印象を回答する。その評価項目は実験2と同様である。加えて、被験者は音場（聴覚刺激）と映像（視覚刺激）の組み合わせに対する違和感の程度を、-3（違和感がある）～+3（違和感がない）の7段階尺度で回答する。

3-3 実験結果

3-3-1 実験1の結果

空間経験の有無

各視覚刺激の空間に対する経験の有無（その空間を利用したことがあるかどうか）を尋ねた結果、空間Aは80%、空間Bは100%、空間Cは90%の被験者が「利用したことがある」または「多分利用したことがある」と回答した。一般的な公共空間における主観的な視覚・聴覚印象については、被験者の経験の有無（その空間の的確なイメージを持っているかどうか、またそのイメージを正確に記憶しているかどうか）が主観評価に影響を与えると考えることもできるが、この仮説の根拠を見出すには至っていない。暫定的に、今回の実験の被験者らはみな、視覚刺激の空間を体験したことがあり、その空間のイメージを持っている（そのイメージが正確であるかどうかは不明である）とみなす。

予想残響時間



図 3-3 視覚刺激の各空間の予想残響時間

図 3-3 に、視覚刺激のみ（3 つの建築空間の映像）を提示した際の、各被験者の各視覚刺激に対する予想残響時間の測定結果を示した。予想残響時間と本来の残響時間(実測値)との間の誤差は、視覚刺激 A で+0.48 s、視覚刺激 B で+0.38 s、視覚刺激 C で-0.85 sである。視覚刺激 A と B の予想残響時間は実際の残響時間を上回っており、その誤差は小さいが、各被験者の予想値にはかなり幅がある。一方で C の予想残響時間は実際の残響時間を大きく下回っており、その誤差は大きい、各被験者の予想値にはあまり幅が無い。教室や多目的ホールに比べ、体育館では「音を集中して聴く」という機会が少ないことが、残

響時間の予想を難しくさせたと思われる。また、体育館の容積はホールの容積の約半分であり、その視覚的な情報によって実際よりも残響時間が短く判断されたと予想される。

各視覚刺激間の評定平均値の母平均の差の検定の結果、視覚刺激 A-B 間と A-C 間には 1%水準で有意差が検出された。予想残響時間の値が近似している B と C の間には、統計的有意差は検出されなかった。

視覚刺激に対する印象評価

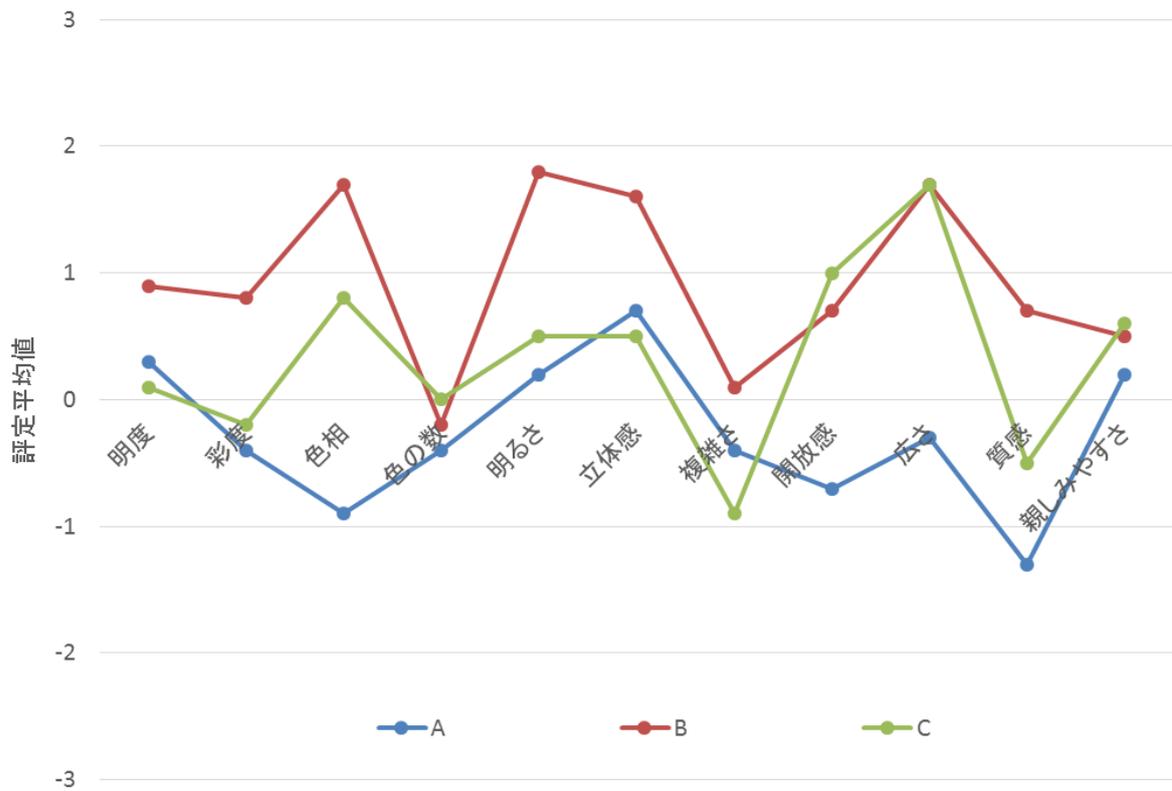


図 3-4 シングルモード提示時の視覚印象の平均評定値

図 3-4 に、視覚刺激のシングルモード提示時の主観的な視覚印象の平均評定値のプロファイルを示した。

全体的に見て、最も容積の小さい空間 A は平均評定値が小さく、評価値のバラつき（標準偏差）も小さい。

空間 B は彩度・色相・明るさなどの色覚の評価項目に対する評定値が特に高い。VR 映像の元となる画像は、画像加工ソフトウェア（Image J）によってブライトネスの平均値を約 77.7（素材となる画像 9 枚のブライトネスの平均値）に統一してあり、実験で使用するプロジェクターのブライトネスの設定も統一してあるため、本来ならば明度の評定値は 3

つの空間ではほぼ同程度になるはずである。しかしながら、空間 B の明度のみ少し高い評定値になっているのは、明度や色相など他の色覚印象が影響したと思われる。また、全体的に、空間 A と C に比べて空間 B は評価のバラつきが大きい。

空間 C については、色覚カテゴリーの評価のバラつきが比較的小さいが、立体感・複雑さ・開放感といった空間カテゴリーの評価のバラつきが大きい。また、「広さ」については、空間 B とほぼ同じだと評価されたが、空間 C の実際の容積は空間 B の約半分である。空間 C は単純な矩形室である一方、空間 B はステージと客席の *coupled room* であることや、客席に高低差があることなどの室形状の違いが、広さの感覚を曖昧にしたと思われる。

母平均の差の検定の結果、色覚カテゴリーにおいて視覚刺激間に有意差が検出されたのは、「色相」（暖かみのある・冷やかな）であった。また、A-B 間の「彩度」にも 5 %水準の有意差が検出された。更に、A-C, B-C 間に「明るさ」（明るい・暗い）の項目で共に 1 %水準で有意差が検出された。一方で空間カテゴリーにおいては、B-C 間の「立体感」、A-B, A-C 間の「開放感」と「広さ」、A-B, B-C 間の「質感」に 1 %ないし 5 %の有意差が検出された。

3-3-2 実験 2 の結果

聴覚刺激に対する印象評価

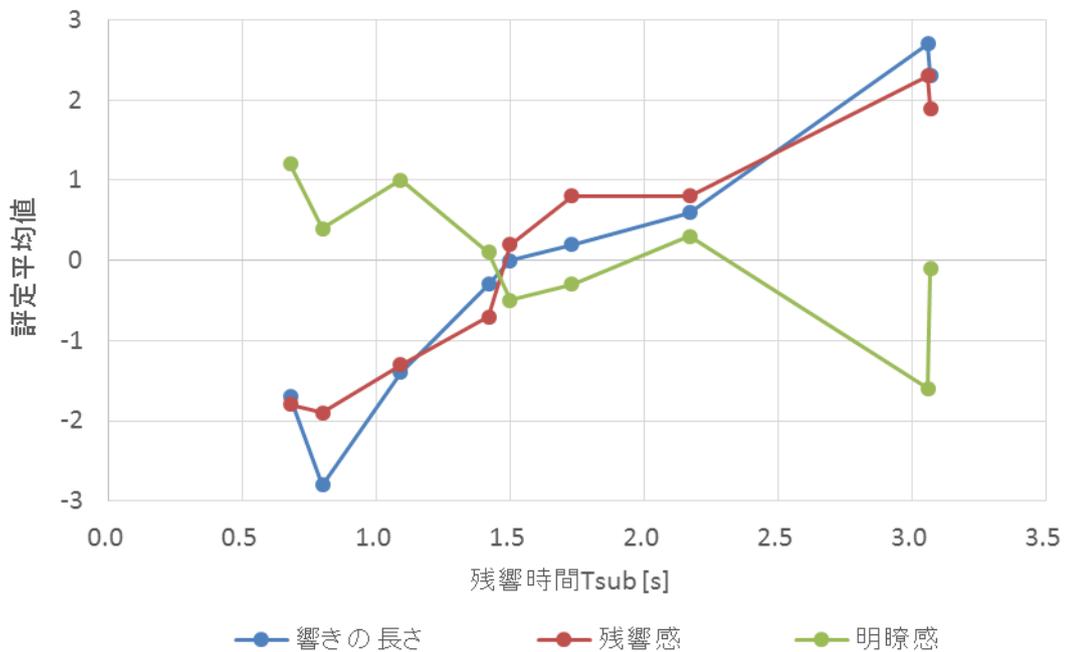


図 3-5 シングルモード提示時の聴覚印象の平均評定値の変動

図 3-5 に、聴覚刺激のシングルモード提示時の主観的な聴覚印象の平均評定値の残響時間による変化を示した。横軸は、聴覚刺激の残響時間 T_{sub} [s] である。

「響きの長さ」と「残響感」は、物理的にそれぞれを表現する音響指標の概念の通り、「明瞭感」とほぼ相反する評価を得る。また、「響きの長さ」と「残響感」は、おおよそ聴覚刺激の残響時間に沿って増加していく右肩上がりの評価がなされている。

一方で「明瞭感」の評価は必ずしも残響時間に依存せず、評価のばらつきも大きい。残響時間 1.50 s ~ 2.17 s 間の聴覚刺激は各評価項目について評定値の変動は小さい。一方でそれよりも残響時間が短いまたは長い聴覚刺激に関しては、評定値の変動幅が大きい。

母平均の差の検定の結果、「響きの長さ」と「残響感」においてはほとんどの聴覚刺激間で 1 % ないし 5 % 水準で有意差が検出された。当然ながら残響時間が近い聴覚刺激間ではそれぞれを聞き分けて区別することが難しかったと思われ、有意差が検出されなかった。一方で、「明瞭感」で有意差が検出されたのは残響時間が大きく異なる組合せのたった 7 組であり、聴覚刺激のみの提示では「響きの長さ」と「残響感」よりも判断が難しかったと思われる。

3-3-3 実験3の結果

視聴覚刺激に対する印象評価

図 3-6 ~ 8 に、視覚刺激と聴覚刺激のマルチモード提示時における、聴覚刺激に対する印象の評価平均値の残響時間 T_{sub} による変化を実線で示す。図中において破線で示した **single** の値は、実験 2 の聴覚刺激のシングルモード提示時における評価平均値である。

図 3-6 と図 3-7 に示す「響きの長さ」と「残響感」は、視覚刺激に関わらず近似した評価傾向が見られた。また、シングルモード提示時よりマルチモード提示時の方が評定値はやや高く、提示刺激のマルチモーダル化によって残響がより長く・豊富に感じられるようになったと言える。

図 3-8 に示す「明瞭感」は「響きの長さ」・「残響感」とほぼ反対の変動傾向を示したが、それらに比べ残響時間による評定値の変動幅は小さい。また、空間 A の教室ではシングルモード提示時よりマルチモード提示時の方がやや評価値が小さくぼんやりとした印象であるのに対し、空間 B のホールと空間 C の体育館ではシングルモード提示時とマルチモード提示時の評価はほぼ等しいといった空間による評価の違いが見られた。

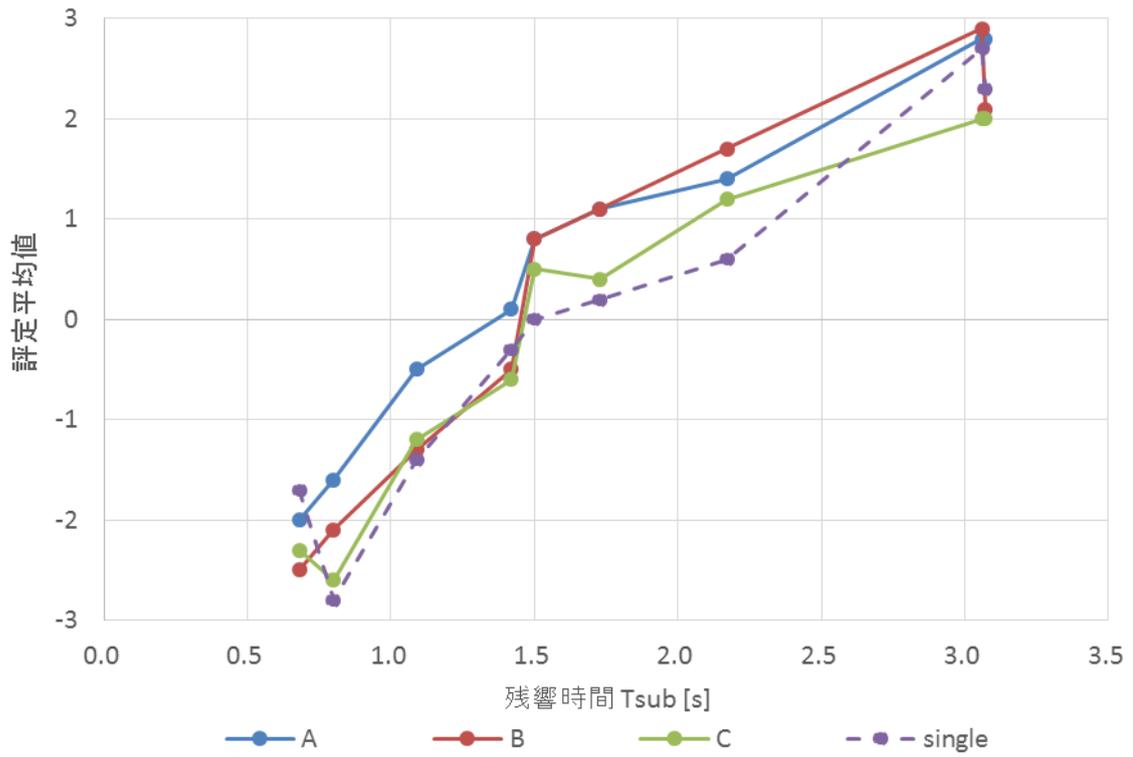


図 3-6 視聴覚刺激に対する「響きの長さ」の評定平均値

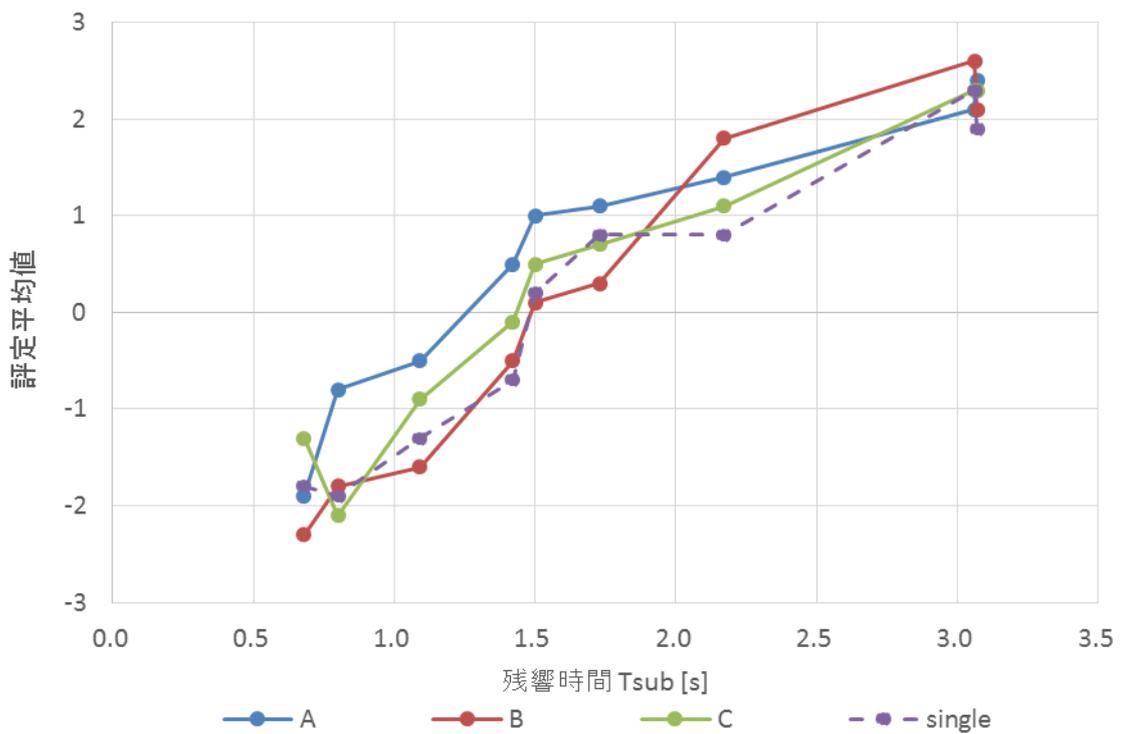


図 3-7 視聴覚刺激に対する「残響感」の評定平均値

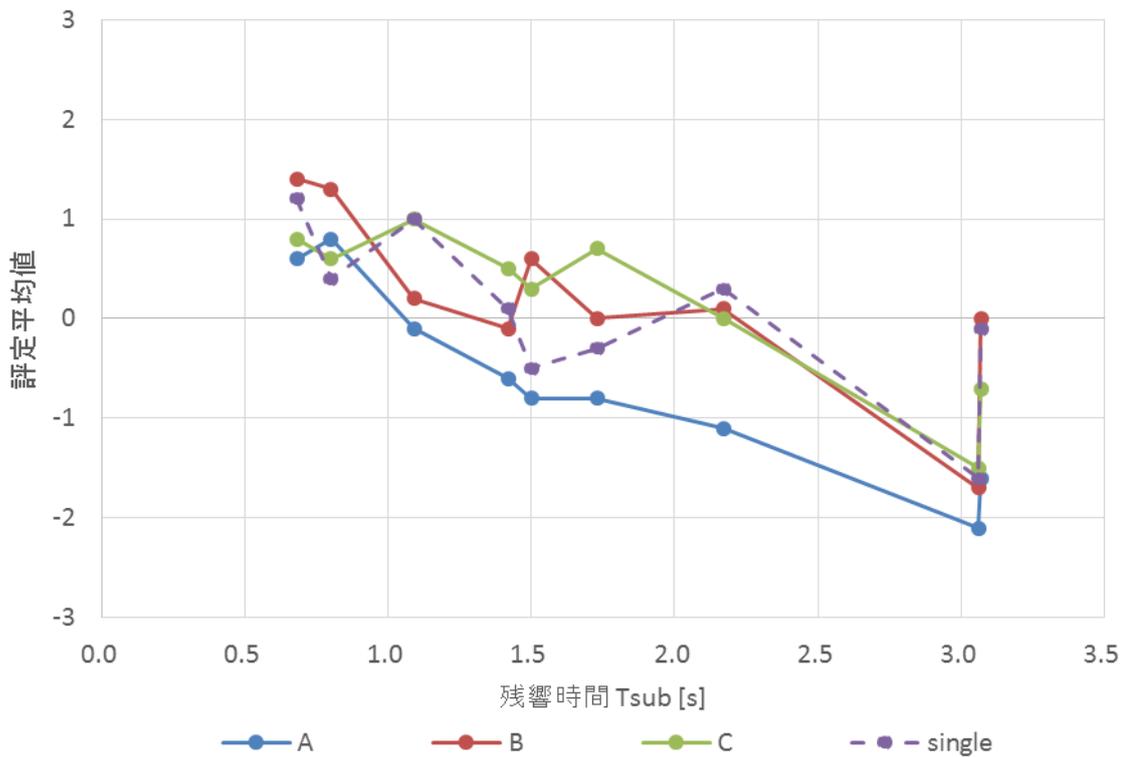


図 3-8 視聴覚刺激に対する「明瞭感」の評定平均値

違和感

図 3-9 ~ 11 に、視覚刺激 A, B, C それぞれにおけるマルチモード提示時の主観的な聴覚印象と、響きと映像の組み合わせに対する違和感の程度の評価平均値を示す。

図 3-9 に示すように、空間 A では予想残響時間が実際の残響時間より長かったため、残響時間 1.5 s 以上の聴覚刺激において違和感が生じたと思われる。

図 3-10 に示すように、空間 B では空間 A とは逆に、聴覚刺激の残響時間が 1.5 s 以上になると違和感が小さくなっている。残響時間が短いと違和感は大いだが、実際よりも残響時間が長いのは許容される傾向にある。

図 3-11 に示すように、空間 C では予想残響時間が残響時間より短かったため、組み合わせ Cc (実際の状況) より、実際の残響時間のよりも短い聴覚刺激 b などとの組み合わせに対する違和感の方が小さい。

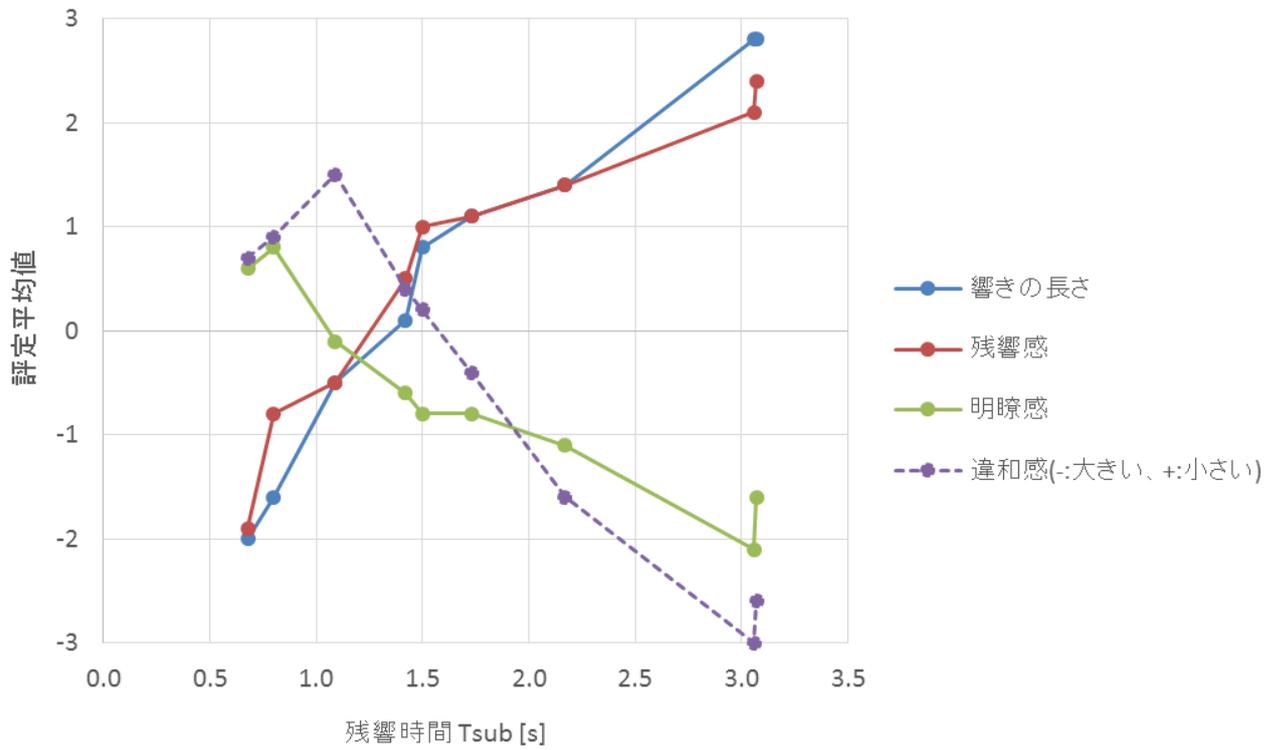


図 3-9 マルチモード提示時の空間 A（教室）の平均評定値

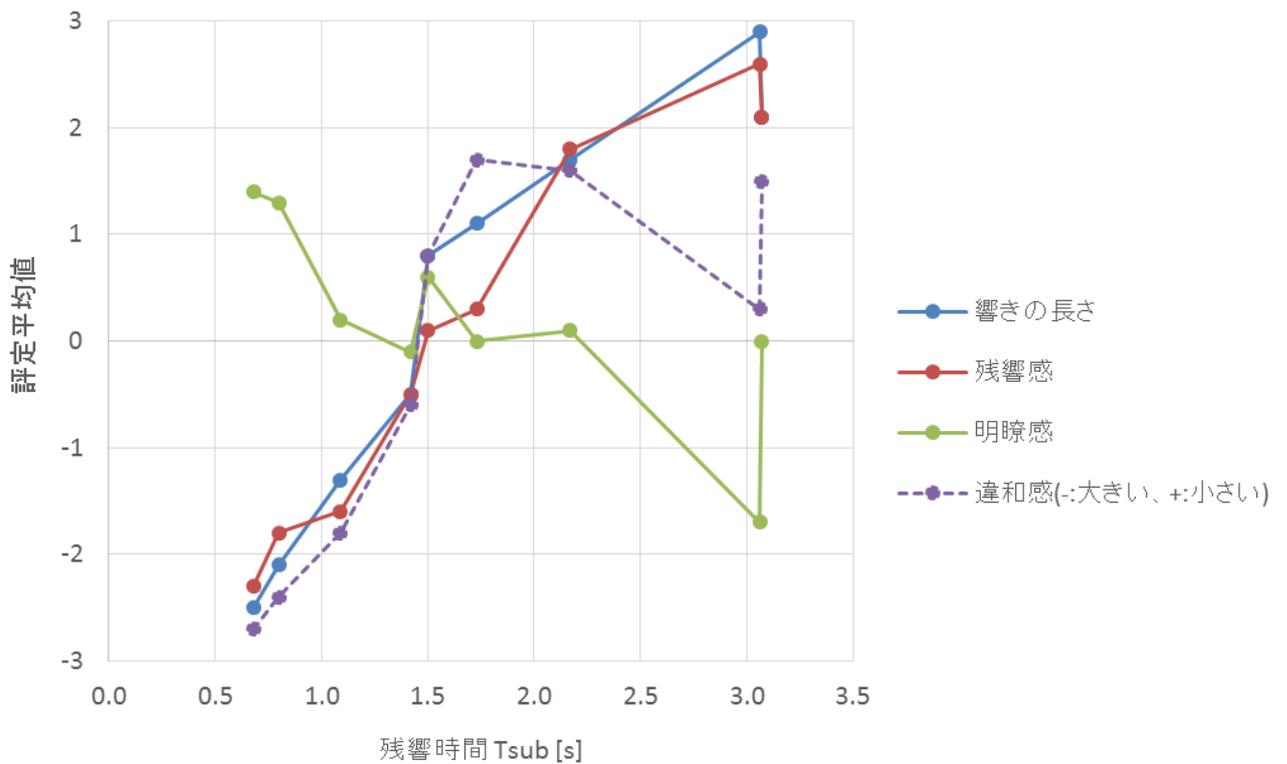


図 3-10 マルチモード提示時の空間 B（ホール）の平均評定値

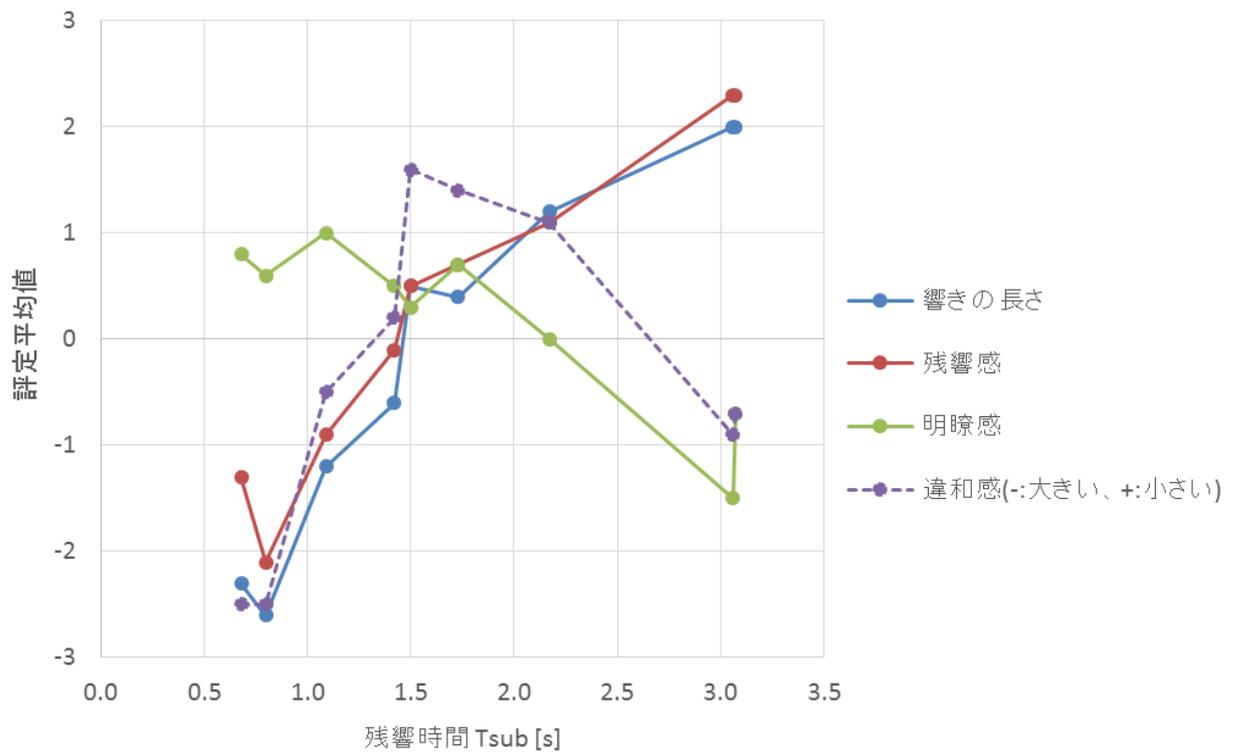


図 3-11 マルチモード提示時の空間 C (体育館) の平均評定値

3-4 分析

3-4-1 提示刺激のマルチモード化による主観聴覚印象の変化

提示刺激のマルチモーダル化による主観評価への影響を更に詳しく考察するため、シングルモード提示時の評定値（実験2の結果）に対するマルチモード提示時の評定値（実験3の結果）の割合を、評定倍率として表現した。その結果を図3-12～14に示す。

図3-12に示す「響きの長さ」については、残響時間0.80～2.17sの聴覚刺激間のほとんどで評定倍率が1.0以上、つまりシングルモード提示時の評定値よりもマルチモード提示時の評定値のほうが大きいことから、マルチモーダル化によって響きがより長く感じられたと推察される。一方で、残響時間が極端に短い聴覚刺激a、または残響時間が極端に長い聴覚刺激6,cのとき、マルチモーダル化による印象の変化はあまり見られない。また、変動幅は空間Aが最も大きく、空間Cが最も小さい。聴覚刺激のみのシングルモード提示時の評価値に対する視聴覚同時提示時の評価値の間で母平均の差の検定を実施した結果、聴覚刺激2と視聴覚刺激A2の評定値の間に5%水準で有意差が検出された。

図3-13に示す「残響感」においても、「響きの長さ」と同様にほぼ全ての評定倍率が1.0以上であり、マルチモーダル化によって残響感がより豊かに感じられたことが推察される。マルチモーダル化による影響は「響きの長さ」のそれに極めて近似していることが分かった。母平均の差の検定を実施した結果、聴覚刺激1と視聴覚刺激A1、視聴覚刺激A1とB1の評定値の間に5%水準で有意差が検出された。

図3-13に示す「明瞭感」については、空間Bと空間Cでほぼ全ての評定倍率が1.0以上であり、提示刺激のマルチモーダル化によって明瞭感がより感じられたことが推察される。一方で空間Aは、ほぼ全ての評定倍率が1.0を若干下回り、マルチモーダル化によって明瞭感が損なわれていることが分かった。また、「響きの長さ」・「残響感」と比べ、どの視覚刺激の空間においても評価値の変動幅は小さい。母平均の差の検定を実施した結果、聴覚刺激5と視聴覚刺激A5間に5%水準で有意差が検出された。

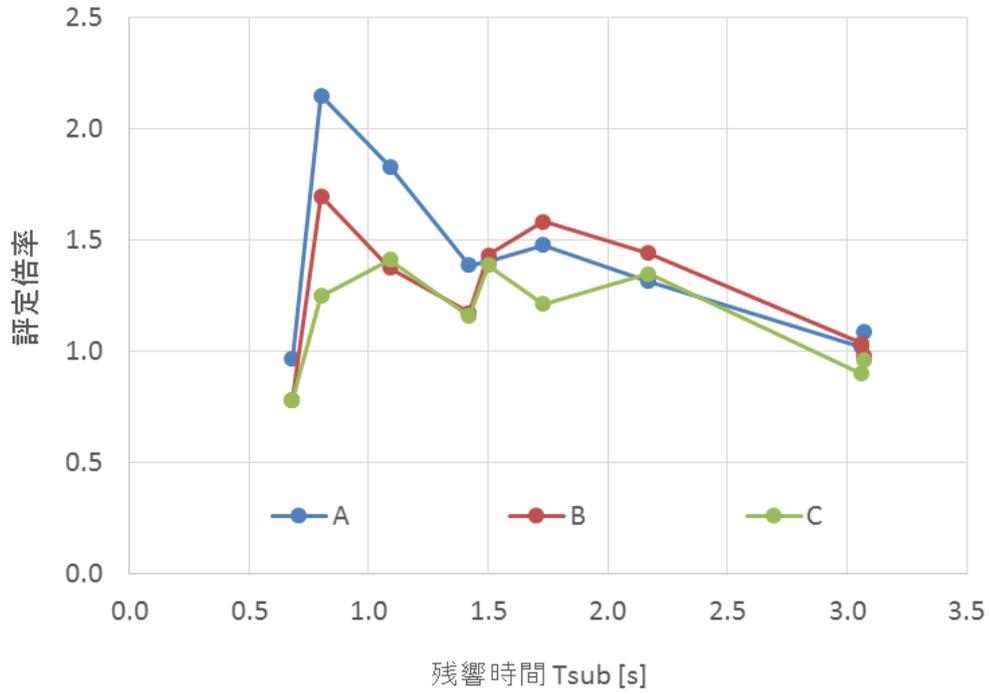


図 3-12 「響きの長さ」の評定倍率

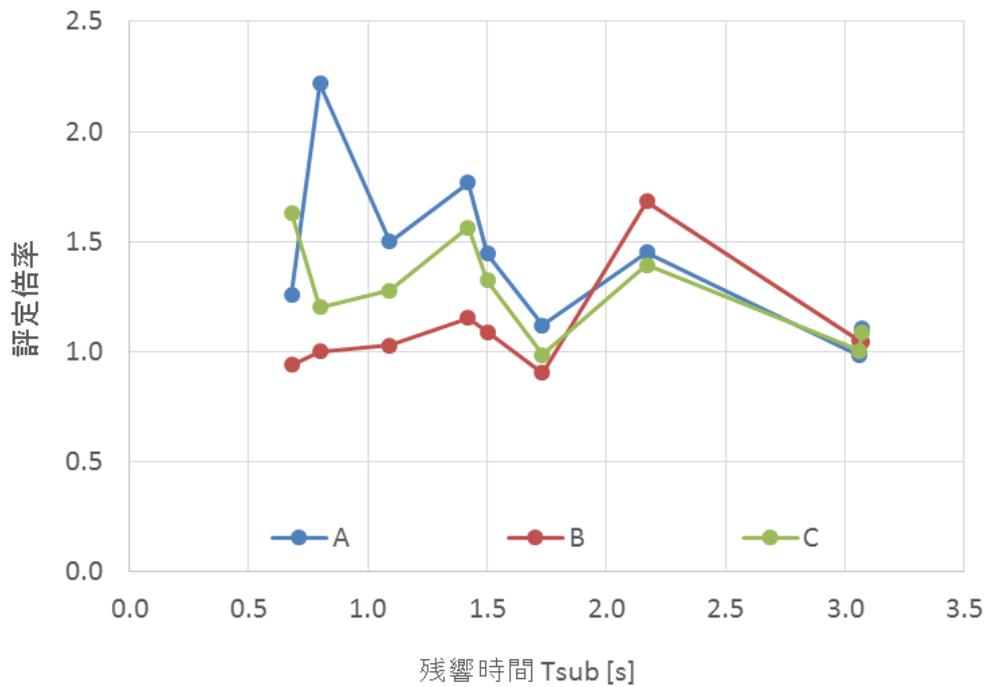


図 3-13 「残響感」の評定倍率

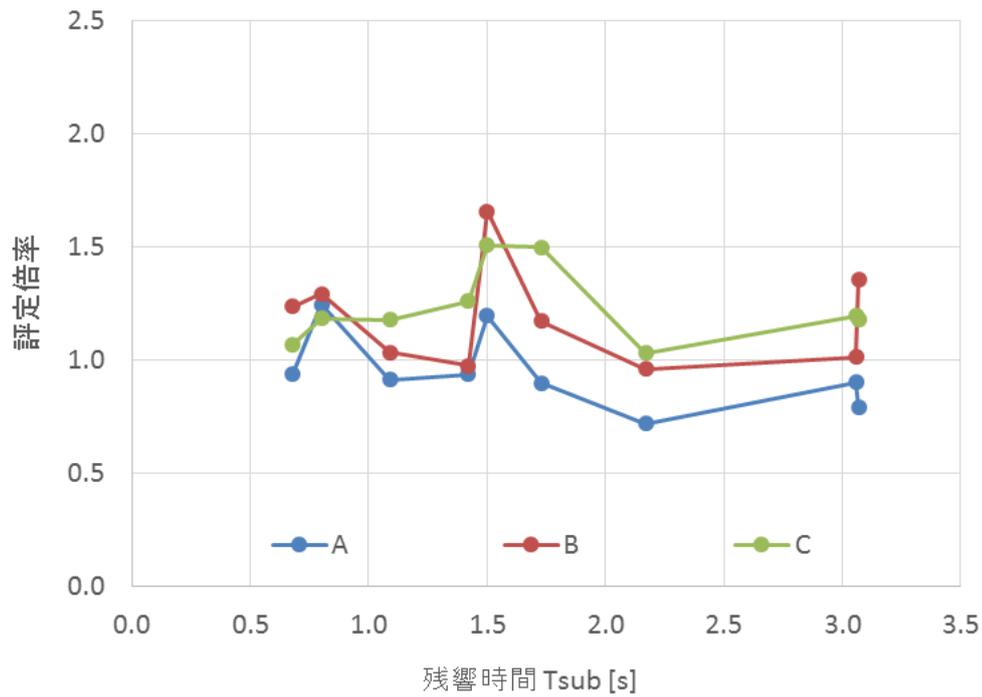


図 3-14 「明瞭感」の評定倍率

3-4-2 違和感とマルチモード化に関する評定倍率の関係

更に、違和感について考察を深めるため、空間毎の響きの印象のシングルモード提示に対するマルチモード提示時の主観評価の評定倍率（実線）と違和感の評定平均値（破線）をまとめて図 3-15～17 に示す。図中には、各空間の実際の残響時間（垂線）と予想残響時間（◆印）も示されている。

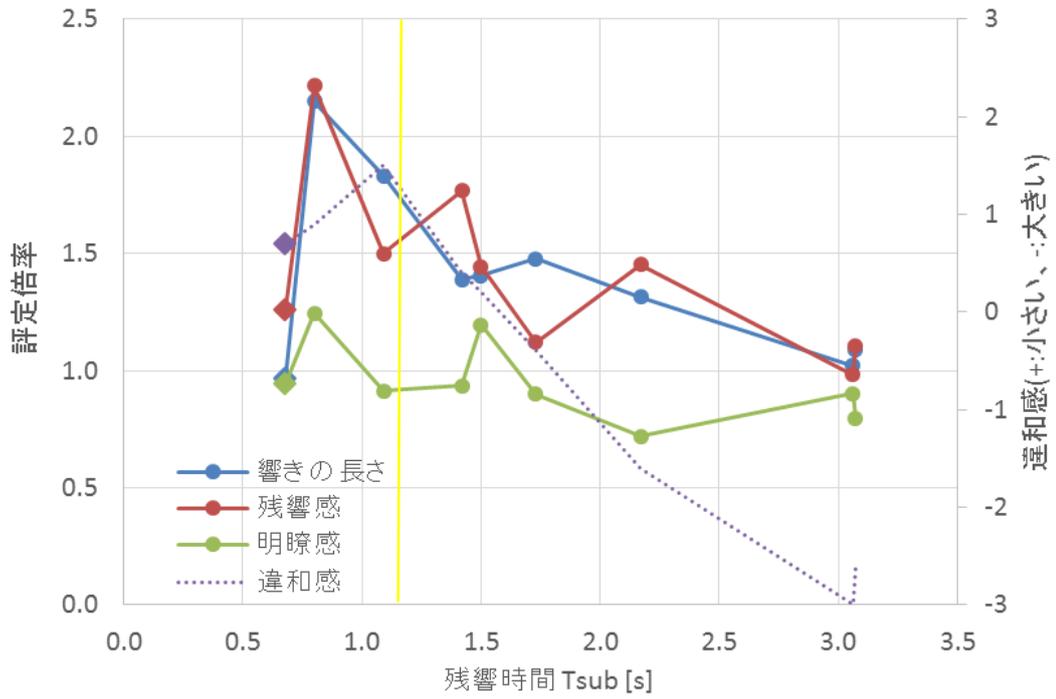


図 3-15 空間 A の違和感と評定倍率の関係

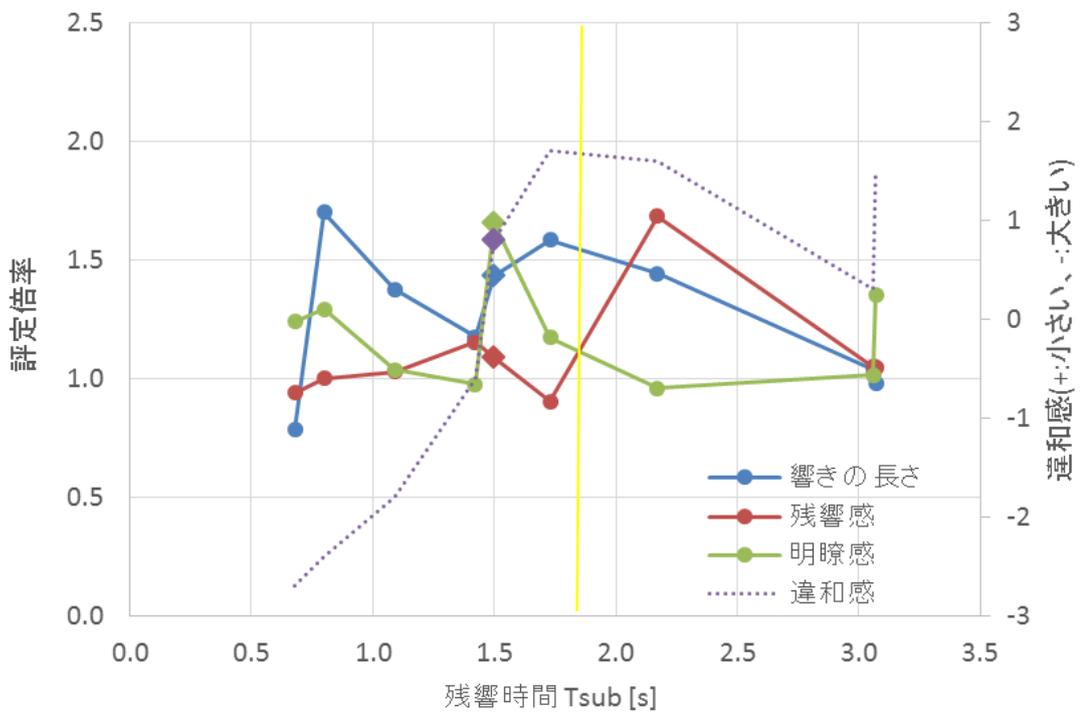


図 3-16 空間 B の違和感と評定倍率の関係

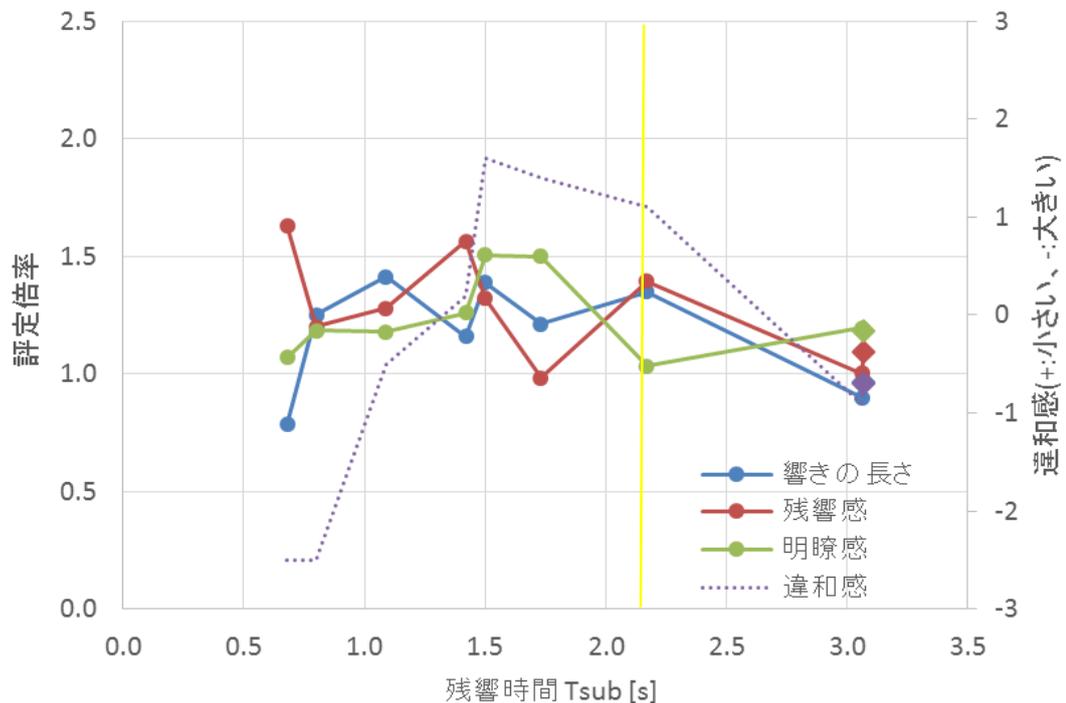


図 3-17 空間 C の違和感と評定倍率の関係

図 3-15 に示した空間 A に関しては、予想残響時間+0.34 s (聴覚刺激の残響時間+0.8 s) まで違和感が少なく、予想残響時間+0.57 s (聴覚刺激の残響時間+1.1 s) から違和感が大きくなっている。当然だが、予想残響時間より聴覚刺激の残響時間が長いと違和感が大きくなる。一方で、残響時間 1.5 s 程度までは許容される傾向にある。また、「響きの長さ」と「残響感」の倍率の変動傾向は近似しているが、「明瞭感」は提示刺激のマルチモーダル化、つまり聴覚刺激に視覚刺激が付加することによって減少することが多い。

図 3-16 に示した空間 B に関しては、予想残響時間-0.46 s (聴覚刺激の残響時間-0.08 s) まで違和感が生じており、予想残響時間 0.38 s (残響時間±0 s) から違和感が小さくなっている。空間 A とは対照的に、実際の響き b より残響時間が短いと違和感が生じ、それよりも長い残響は許容される傾向にある。また、「響きの長さ」と「残響感」は極端に短い実際の響き聴覚刺激 a を付加すると減少し、それ以外の響きを付加すると変化しない、または増大する傾向が見られる。一方で「明瞭感」はマルチモーダル化によって増大する傾向が見られた。

図 3-17 に示した空間 C に関しては、予想残響時間-1.13 s (聴覚刺激の残響時間-1.98 s) まで違和感があり、予想残響時間-0.80 s (残響時間-1.65 s) から予想残響時間-0.05 s (残響時間-0.90 s) まで違和感がなくなるが、予想残響時間+0.80 s (残響時間-0.01 s) から再び違和感が生じている。予想残響時間より残響時間が長いと、実際の響きである聴覚刺激 c

であっても被験者は違和感を受け、また残響時間が短すぎても（1.09 s 以下）違和感が生じるようである。またほとんどの場合、マルチモーダル化によって主観聴覚印象の評定値は増大する傾向が見られる。

3-5 小括

残響時間の異なる聴覚刺激に視覚刺激が加わることで、響きの主観に対する影響が見られ、その程度が把握された。

普段音を集中して聴く機会の少ない建築空間では、予想残響時間と実際の残響時間にギャップが大きくなり、響きに対する被験者の主観印象はバラつく傾向が見られる。

「響きの長さ」と「残響感」は比較的音響物理量に則った判断がなされたが、「明瞭感」の評価は必ずしもそうではなかった。特に聴覚刺激がパソコンのソフトウェア上で加工したインパルス応答の場合、実際の空間の響きとは異なる印象を与える可能性が窺え、聴覚刺激の作成には更なる注意が必要であることが分かった。

予想残響時間と実際の残響時間のギャップが大きいと、違和感が大きくなる。従来の知見通り、人間は視覚優位の判断を下すので、本実験においても、聴覚印象が視覚印象に影響される傾向が見られた。

提示刺激のマルチモーダル化によって、視覚刺激によらず「響きの長さ」はより長く、「残響感」はより豊かに評価された一方、「明瞭感」は視覚刺激によって評価が分かれた。これには、被験者の予想残響時間が大きく影響していると思われる。

第4章

視覚情報の空間用途による主観印象の違い

4-1 研究概要

第3章における実験の聴覚刺激は、視覚刺激の空間とは異なる空間（ホールホワイエ）の響きを基にして、そのインパルス応答の残響時間 T_{sub} が 0.5 s 刻みなるように波形編集を施したものであり、実験に用いた視覚刺激とは関係のない響きであった。

本章における実験は、視覚刺激の空間のインパルス応答の波形を編集したものを聴覚刺激に変更して、第3章の実験と同様の手順で行った。その結果を第3章の実験結果と比較し、聴覚刺激の基となるインパルス応答の違いが被験者の主観聴覚印象に影響するかどうか確かめることを目的とする。被験者は正常な視覚と聴覚をもつ男女9名である。なお、この被験者は第3章の被験者らとは一部異なる。

4-2 実験概要

4-2-1 実験システム

図4-1に示す本章における実験システムは、第3章における実験とほぼ同様のシステムであるが、実験のオペレーションをよりスムーズにするため、視覚刺激のVR映像を映写するためのプロジェクターを天井から吊り下げて設置した。そのため、各機器の配置を若干変更している。

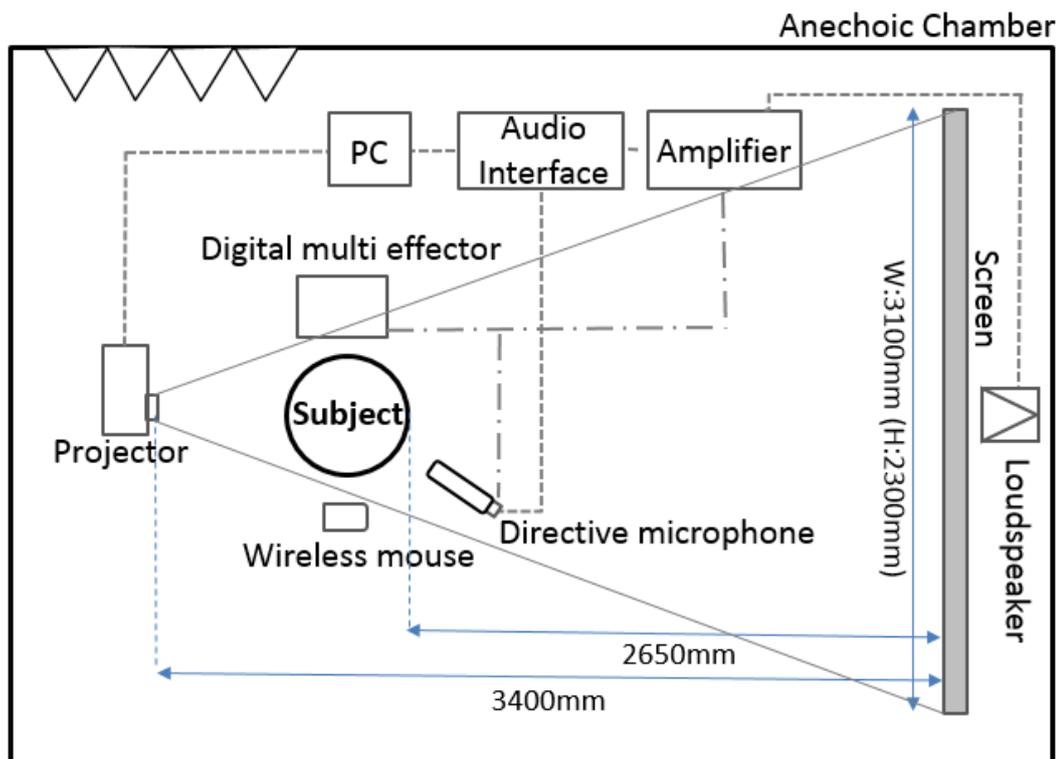


図 4-1 実験システムの概略

4-2-2 実験刺激

視覚刺激は第3章における実験で使用したものと同様の、教室・多目的ホール・体育館である。再度これらの音響特性を表4-1に示す。被験者も前回と同様に三重大大学の学生が中心であるため、これら3空間の視覚的・聴覚的なイメージは容易であると想定している。

聴覚刺激は、視覚刺激の空間毎に6種類用意する。いずれも視覚刺激の空間そのものの響き（表4-2中のa1, b3, c6）を基に、その響きを0.5s刻みに0.5~3.0sの残響時間（ T_{sub} ）になるようパソコンのソフトウェア（Gold Wave）上でインパルス応答の波形編集を行ったものである。視覚刺激に用いた教室に関しては、もともとの残響時間が短く（0.68s）、残響時間を長くするエフェクトの効果に限界があったため、聴覚刺激の残響時間は2.0sまでとした。本実験における聴覚刺激の音響特性を表4-2に示す。表中の数字が太字になっているものが、視覚刺激の空間そのものの響き（残響時間を加工していないインパルス応答）である。

表4-1 視覚刺激として用いた音場の音響特性（500 Hz 基準）

名称	用途	T_{sub} [s]	EDT [s]	C_{80} [dB]	容積 [m ³]
刺激A	教室	0.68	0.65	8.8	750
刺激B	多目的ホール	1.50	1.71	0.1	12000
刺激C	体育館	3.07	2.72	3.2	6100

表4-2 聴覚刺激として用いた音場の音響特性（500 Hz 基準）

	刺激名称	T_{sub} [s]	EDT [s]	C_{80} [s]
視覚刺激 A	a1	0.68	0.65	6.97
	a2	0.96	0.83	4.78
	a3	1.65	1.75	-0.13
	a4	1.99	2.01	-1.27
視覚刺激 B	b1	0.46	0.66	5.90
	b2	1.07	0.99	2.27
	b3	1.50	1.69	0.18
	b4	2.05	2.04	-1.02
	b5	2.56	2.60	-3.86
	b6	2.91	2.94	-4.50
視覚刺激 C	c1	0.45	0.86	6.23
	c2	0.98	1.33	1.01
	c3	1.41	1.65	-0.97
	c4	2.25	2.00	-2.37
	c5	2.65	2.31	-3.29
	c6	3.05	2.72	-4.06

4-2-3 実験手順

第3章における実験と同様の手順で実験を実施した。その詳細を以下に記す。

実験1：視覚刺激のシングルモード提示

表4-1に示した視覚刺激としての3種類のVR映像のみがランダムな順にスクリーンに映写されることで提示され、被験者はそれを自身のマウス操作によって見渡す。次に、被験者は視覚情報からその空間の残響時間を予測する。予想した残響時間の表現するために、超指向性マイクに向けて発した音を聴いて残響時間を確認しながら、手元のデジタル・マルチ・エフェクターのジョグダイヤルを回して操作することにより、エフェクターに内蔵されたホール空間の代表的な響き（CONCERT HALL）の残響時間を0.1 s刻みに納得いくまで調整する。ジョグダイヤルを時計回りに回すとエフェクターから再生される響きの残響時間は0.1 sずつ長くなり、反時計回りに回すとその残響時間は0.1 sずつ短くなる。一つの空間につき、残響時間の調整は上昇系列（残響時間0.0 sから徐々に長くしていく）と下降系列（空間毎に本来の2倍程度の残響時間から徐々に短くしていく）の二方向から行い、上昇系列における残響時間の予測値と下降系列における残響時間の予測値を算術平均することで、調整法による予想残響時間の値を算出した。

また予備的情報として、被験者にはそれぞれの空間の経験の有無を、「利用したことがある」・「多分利用したことがある」・「多分利用したことがない」・「利用したことがない」の4段階で回答させた。なお、視覚印象を尋ねることは省略した。

実験2：聴覚刺激のシングルモード提示

表4-2に示した聴覚刺激としての16種類の音場のみがランダムな順に、パソコン上のソフトウェア（Logic Pro）を通じてスピーカーから再生されることで被験者に提示された。被験者はマイクに向けて発した音（被験者の声や手を叩いた音）がそれぞれの聴覚刺激に畳み込まれた音場を聴いたときの主観的な聴覚印象を-3～+3の7段階尺度で回答する。質問項目を表4-3（本報23項、表3-4と同様）に示すが、これらは第2章の実験で用いた主観聴覚印象評価項目と同じである。

表4-3 主観聴覚印象の評価項目

評価項目名	形容詞対	
響きの長さ	長い	短い
残響感	豊か	乏しい
明瞭感	はっきり	ぼんやり

実験3：視覚刺激と聴覚刺激のマルチモード提示

視覚刺激の空間に対応する聴覚刺激を組み合わせる（空間 A の場合、視覚刺激 A と聴覚刺激 a1 ~ a4 を1つずつ組み合わせる）ことで、16種のマルチモーダルな視聴覚刺激とした。それらはランダムな順に提示され、被験者はそのマルチモーダル提示に対する主観的な聴覚印象を回答する。その評価項目は実験2と同様である。加えて、被験者は音場（聴覚刺激）と映像（視覚刺激）の組み合わせに対する違和感の程度を、-3（違和感がある）～ +3（違和感がない）の7段階尺度で回答する。

4-3 実験結果

4-3-1 実験1の結果

空間経験の有無

各視覚刺激の空間に対する経験の有無（その空間を利用したことがあるかどうか）を尋ねた結果、空間Aは約89%、空間Bは100%、空間Cは約89%の被験者が「利用したことがある」または「多分利用したことがある」と回答した。今回の実験の被験者らはみな、視覚刺激の空間を体験したことがあり、その空間のイメージを持っているとみなすが、そのイメージが正確であるかは不明である。

予想残響時間

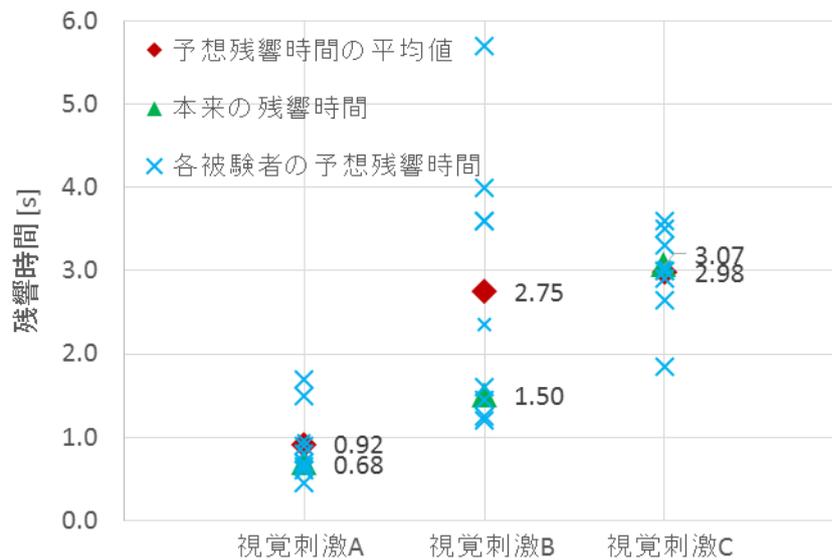


図 4-2 視覚刺激の各空間の予想残響時間

図 4-2 に、視覚刺激のみ（3つの建築空間の映像）を提示した際の、各被験者の各視覚刺激に対する予想残響時間の測定結果を示した。予想残響時間と本来の残響時間（ T_{sub} 実測値）との間の誤差は、視覚刺激 A で+0.24 s、視覚刺激 B で+1.25 s、視覚刺激 C で-0.09 sである。視覚刺激 A と C に関しては誤差が極めて小さく、また被験者間の予想残響時間のばらつきは少ない。一方で視覚刺激 B に関しては誤差が大きく、また被験者間の予想残響時間のばらつきは大きい。視覚刺激 B に対しては、実際の残響時間よりも 1.5~4.2 s 程長く予想した被験者が全体の約半数に及んだ。多くの被験者が「ホールはよく響く」という予断を持って予想残響時間を推定したことが原因と思われる。一方、実際の残響時間が最も長い視覚刺激 C は、音を集中して聴く機会の経験が少ないと思われることから予想が困難な空間と推察されるが、第 3 章の実験結果よりも予想残響時間と本来の値との誤差は

小さくなった。しかし、被験者全体の約半数において上昇方向・下降方向の同定値の間の差が大きくなっている（1.0~3.0 s程度）。また、残響時間が長くなるにつれて判断が難しくなる傾向が見受けられる。全体的に、第3章の実験における予想残響時間の測定結果と同様の結果が得られたと言えるであろう。

4-3-2 実験2の結果

聴覚刺激に対する印象評価

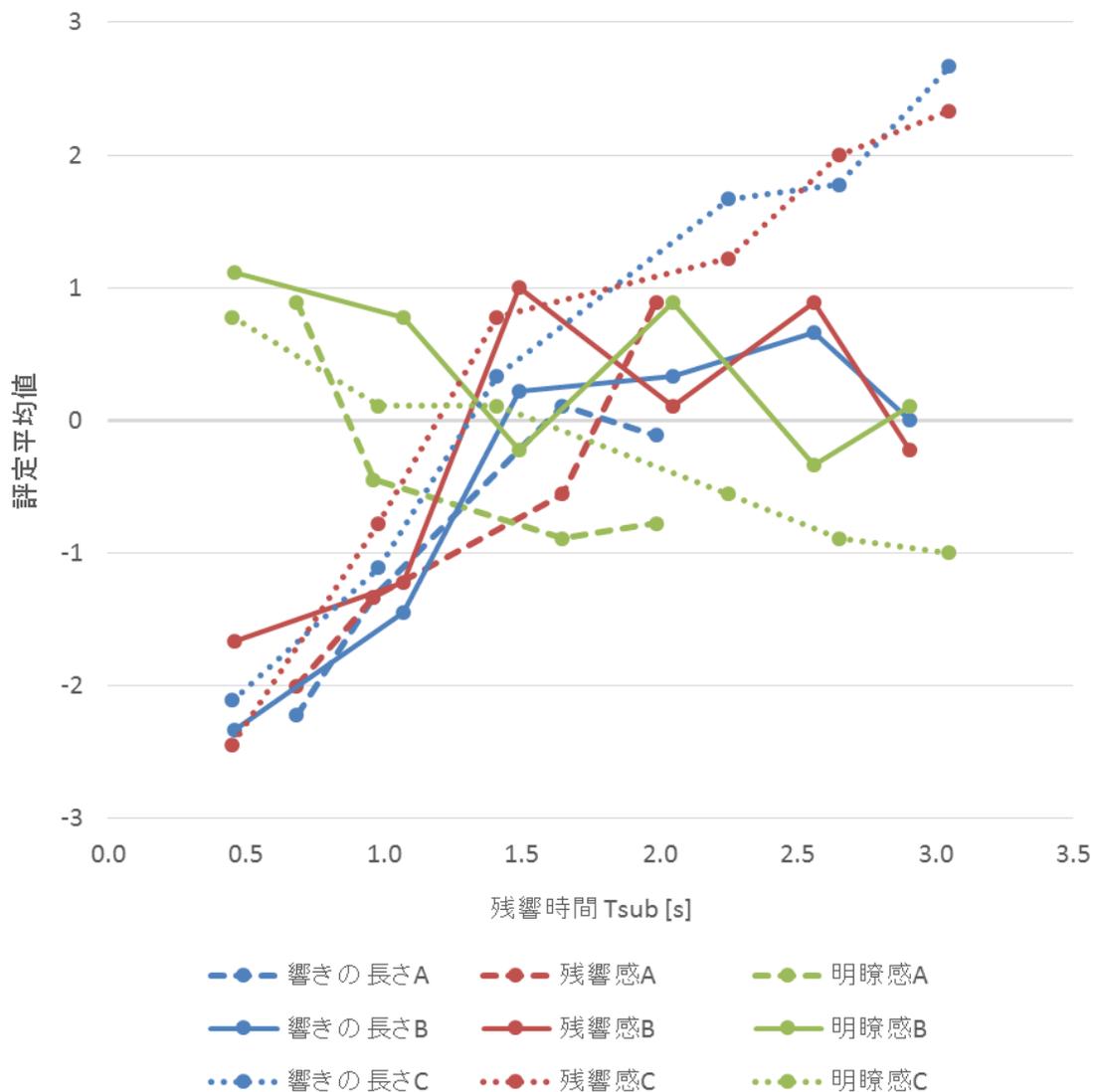


図 4-3 シングルモード提示時の聴覚印象の平均評定値の変動

図 4-3 に、聴覚刺激のシングルモード提示時の主観聴覚印象の平均評定値の残響時間による変化を示した。

視覚刺激 A と C の評価はおおよそ第 3 章の実験結果に一致し、「響きの長さ」と「残響感」はおおよそ残響時間の順に「長い」または「豊かな」と評価されている。

空間 B に対する聴覚印象に関しては、聴覚刺激 b3 を境に評価傾向が異なる。b3 は視覚刺激 B の空間の本来の響きであり、b3 までの刺激は残響時間に比例して評定値が高くなる一方、b3 より長い残響時間の刺激においては、評定値の変動はランダムに思える。「響きの長さ」が残響時間順に評価されなかったことから、刺激作成に問題があった可能性があるため、以降の考察からは視覚刺激 B に関する詳細な考察は省略する。

4-3-3 実験 3 の結果

視聴覚刺激に対する印象評価

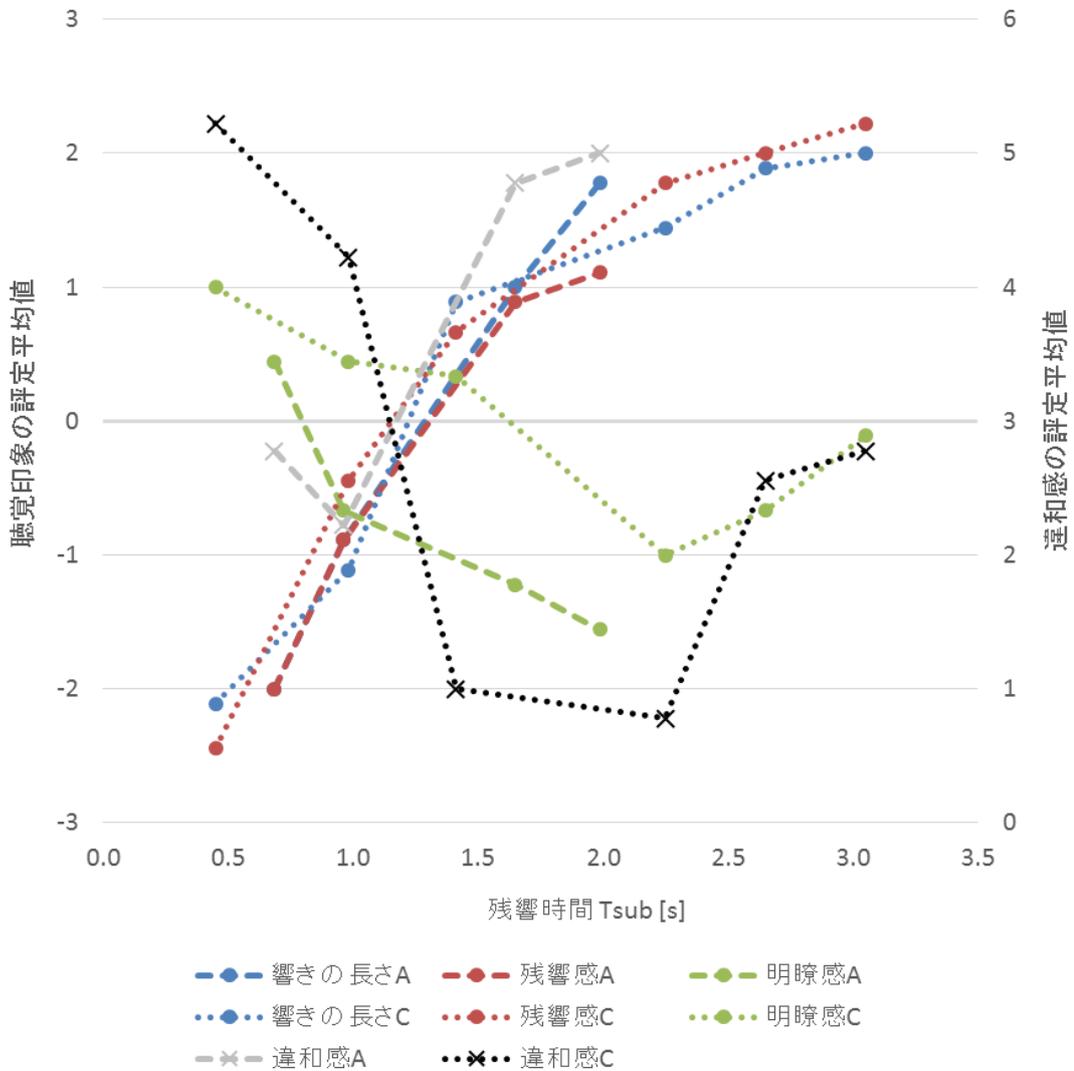


図 4-4 マルチモード提示時の視聴覚刺激に対する評定平均値の変動

図 4-4 に、視覚刺激と聴覚刺激のマルチモード提示時における、聴覚刺激に対する印象の平均評定値の残響時間による変化を示した。図には、視覚刺激と聴覚刺激の組合せに対する違和感の評定平均値の変化も同時に示している。

「響きの長さ」と「残響感」に関して、残響時間に対する評定値の増加率（グラフの線の傾斜）がシングルモード提示時に比べ緩やかになっており、視覚刺激が加わることで、感受性低下が生じていると思われる。しかし、「明瞭感」の評定値の変動幅はやや大きくなっている。

違和感

図 4-4 に示した違和感の評価に関して、視覚刺激 A については、残響時間が短いと違和感が小さいが、残響時間が 1.0 s（およそ視覚刺激 A に対する予想残響時間に相当）を超えると違和感の評定値が著しく大きくなる。第 3 章の実験結果と同様、提示された響きの残響時間が予想残響時間から遠ざかるにつれ、違和感が大きくなることが確認された。

視覚刺激 C では逆に、残響時間が短いと著しく違和感が大きく、残響時間が 1.4 ~ 2.3 s の聴覚刺激 c3, c4 の違和感がとりわけ小さくなっている。また一方で、ほとんどの被験者が予想残響時間を 3.0 s 程度と予想しているにもかかわらず、c5 以降の聴覚刺激の違和感が若干大きくなっている理由としては、視覚刺激 C は上昇系列と下降系列における予想残響時間の差が大きく、被験者がこの空間の響きに関する明確なイメージを持っていなかったからと思われる。

4-4 分析

4-4-1 違和感とマルチモード化に関する評価倍率の関係

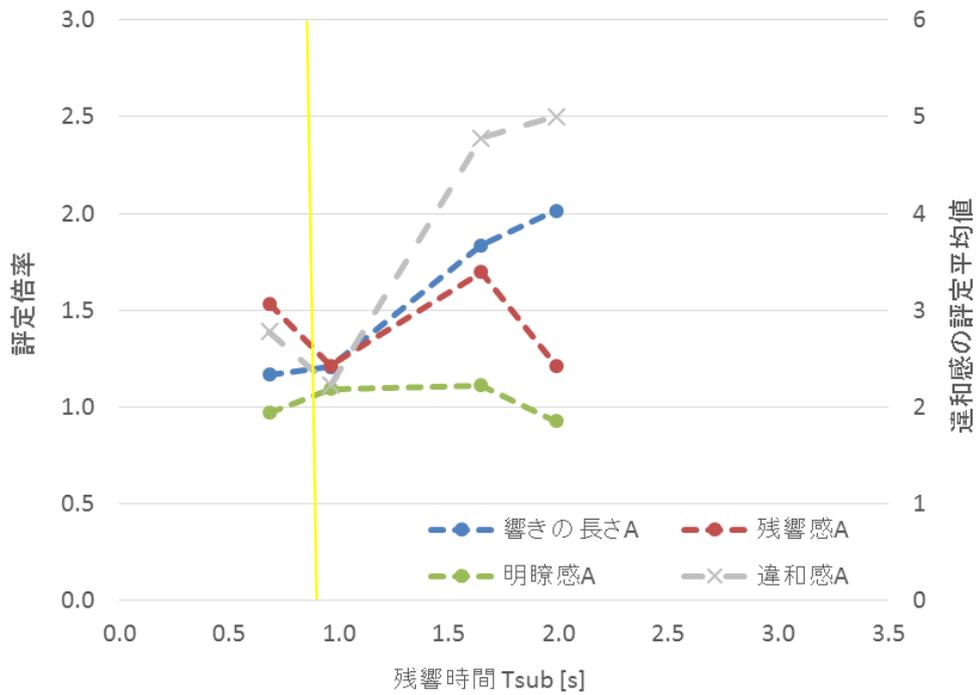


図 4-5 視覚刺激 A の空間に対する聴覚印象の評価値倍率・違和感の評価平均値・予想残響時間

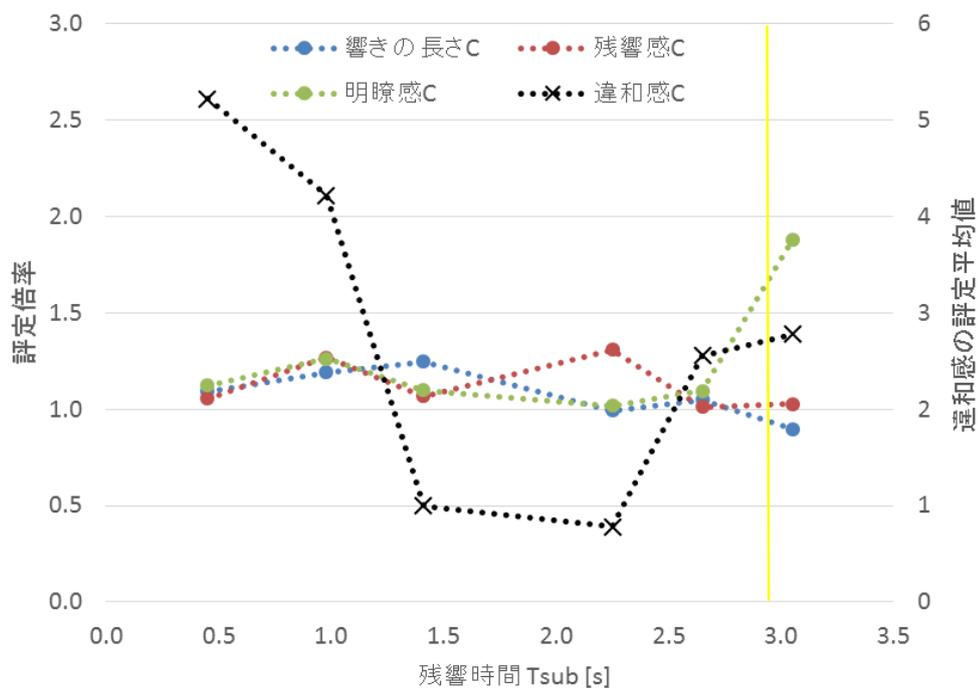


図 4-6 視覚刺激 C の空間に対する聴覚印象の評価値倍率・違和感の評価平均値・予想残響時間

シングルモード提示時の評定値に対するマルチモード提示時の評定値の割合（評定倍率）を算出し、主観聴覚印象の視覚刺激による影響を考察する。図 4-5, 6 に各視覚刺激における評定倍率と違和感評定値の残響時間による変化を示した。図中ではそれぞれの予想残響時間に相当する時刻を黄色の垂線で示している。

「響きの長さ」については、ほぼ全ての聴覚刺激において倍率が 1.0 以上であることから、提示刺激のマルチモーダル化によって響きがより長く感じられたことが分かる。マルチモーダル化による印象の変化は視覚刺激 A が最も大きく、視覚刺激 C が最も小さい。「残響感」においても同様の傾向が見られ、マルチモーダル化によって残響感がより豊かに感じられていることが分かる。「明瞭感」については、聴覚刺激の残響時間によらず倍率は 1.0 付近で一定であり、提示刺激のマルチモーダル化による影響はあまり見られない。また、視覚刺激の空間の実際の響き（加工を施していないインパルス応答 b3, c6）において、明瞭感が高く評価される傾向が見られる。

図 4-5 において、視覚刺激 A では、およそ予想残響時間を超える残響時間において、残響時間の増大とともに違和感が大きくなっている。また、「響きの長さ」の評定倍率も残響時間の増加に伴って大きくなるが、「残響感」についてはその限りではない。

図 4-6 において、視覚刺激 C では、残響時間 1.5～2.0 s 付近での違和感が極めて小さく、それより短い場合に違和感が大きくなっている。実際の響き c6 を含めて、それよりも長い残響時間も許容される傾向にある。また、各聴覚印象の倍率は聴覚刺激 c6 の「明瞭感」を除いてほぼ 1.0 付近で一定であり、提示刺激のマルチモード化による影響はほとんど見られず、違和感との関連性も見られなかった。

4-4-2 第3章の実験結果との比較

聴覚刺激の基となる素材の違いによって、被験者の主観聴覚印象評価が変化するかどうか、また変化する場合はどのような変化が見られるのかを確かめるため、第3章における実験結果と本章の実験結果を比較・検討する。第3章と本章の視覚刺激は全く同じものである。第3章の実験における聴覚刺激は、視覚刺激そのものの響き3種類（聴覚刺激 a, b, c）と、視覚刺激とは無関係のとある空間（ホールホワイエ）で測定したインパルス応答を基にその残響時間が 0.5 s 間隔になるよう波形編集を施したもの（聴覚刺激 1～6）であった。本章の実験における聴覚刺激は、それぞれの視覚刺激の空間で測定したインパルス応答（視覚刺激の空間の響きそのもの）を基にその残響時間が 0.5 s 間隔になるよう波形編集を施したものである。

本章の実験結果において視覚刺激 B の聴覚刺激 b5, b6 に波形編集上の問題があったと判断したため、以降の比較は視覚刺激 A, C のみを対象とする。表 4-4, 5 に、空間 A と C の視聴覚刺激の音響特性について再度まとめる。表 4-5 において、太字で表されている聴覚刺激が、視覚刺激そのものの響きである。

表 4-4 空間 A と C の音響特性 (500 Hz 基準)

名称	用途	T _{sub} [s]	EDT [s]	C80 [dB]	容積 [m ³]
刺激A	教室	0.68	0.65	8.8	750
刺激C	体育館	3.07	2.72	3.2	6100

表 4-5 空間 A と C に対応する聴覚刺激 (500 Hz 基準)

	刺激名称	T _{sub} [s]	EDT [s]	C80 [s]
第3章の聴覚刺激	刺激a	0.68	0.65	8.8
	刺激1	0.80	0.99	6.0
	刺激2	1.09	1.26	2.7
	刺激3	1.42	1.41	2.8
	刺激b	1.50	1.71	0.1
	刺激4	1.73	1.57	-0.6
	刺激5	2.17	2.06	-0.6
	刺激6	3.06	2.46	-1.8
	刺激c	3.07	2.72	3.2
本章の聴覚刺激	a1	0.68	0.65	7.0
	a2	0.96	0.83	4.8
	a3	1.65	1.75	-0.1
	a4	1.99	2.01	-1.3
	c1	0.45	0.86	6.2
	c2	0.98	1.33	1.0
	c3	1.41	1.65	-1.0
	c4	2.25	2.00	-2.4
	c5	2.65	2.31	-3.3
	c6	3.05	2.72	-4.1

予想残響時間の比較



図 4-7 第 3, 4 章の実験における予想残響時間の測定値の比較

図 4-7 に、第 3 章における実験と本章における実験の、予想残響時間の測定結果の比較を示した。以降、第 3 章における実験結果を緑色、本章における実験結果を赤色で示す。

予想残響時間の測定に関しては、第 3 章における実験ではデジタル・マルチ・エフェクターに内蔵されたとある響きの残響時間を 1.5 s に設定し、被験者がそれを基準に残響時間を調節する（長くするのも短くするのも自由で、残響時間の変化の方向は特に指定しない）方法を取った。一方で本章における実験では、デジタル・マルチ・エフェクターに内蔵されたとある響きの残響時間を上昇系列（0.0 s から）と下降系列（空間 A は 1.5 s から、空間 C は 5.0 s から）の両方向から徐々に変化させていく調整法を採用した。

視覚刺激 A については、いずれの実験においても、予想残響時間が本来の残響時間を上回る結果となった。第 3 章における予想残響時間の測定結果は、本来の残響時間より 0.48 s 長い、本章における結果は本来より僅か 0.24 s 長いだけであり、予想値と実測値は極めて近似している。

視覚刺激 C については、いずれの実験においても、予想残響時間が本来の残響時間を下回る結果となった。第 3 章における予想残響時間の測定結果は、本来の残響時間より 0.80 s 短い、本章における結果は本来より僅か 0.09 s 短い。第 3 章の

測定では予想値と実測値の誤差が大きく、違和感などの聴覚印象に影響を与える可能性があると思われる。

以上で述べたように、本章における調整法による予想残響時間の測定結果は、概して本来の残響時間に極めて近似している。しかしながら、本章における予想残響時間測定値の標準偏差は第3章におけるそれよりも大きいこと、また、同一空間における上昇系列・下降系列の2パターンでの残響時間の予想値が大きく異なる被験者が存在することから、実験方法の再検討の必要性を感じるに至った。

シングルモード提示時の主観聴覚印象の比較

図4-8～10に、空間AとCの聴覚刺激のシングルモード提示時におけるそれぞれの主観聴覚印象の測定結果を比較した図を示す。

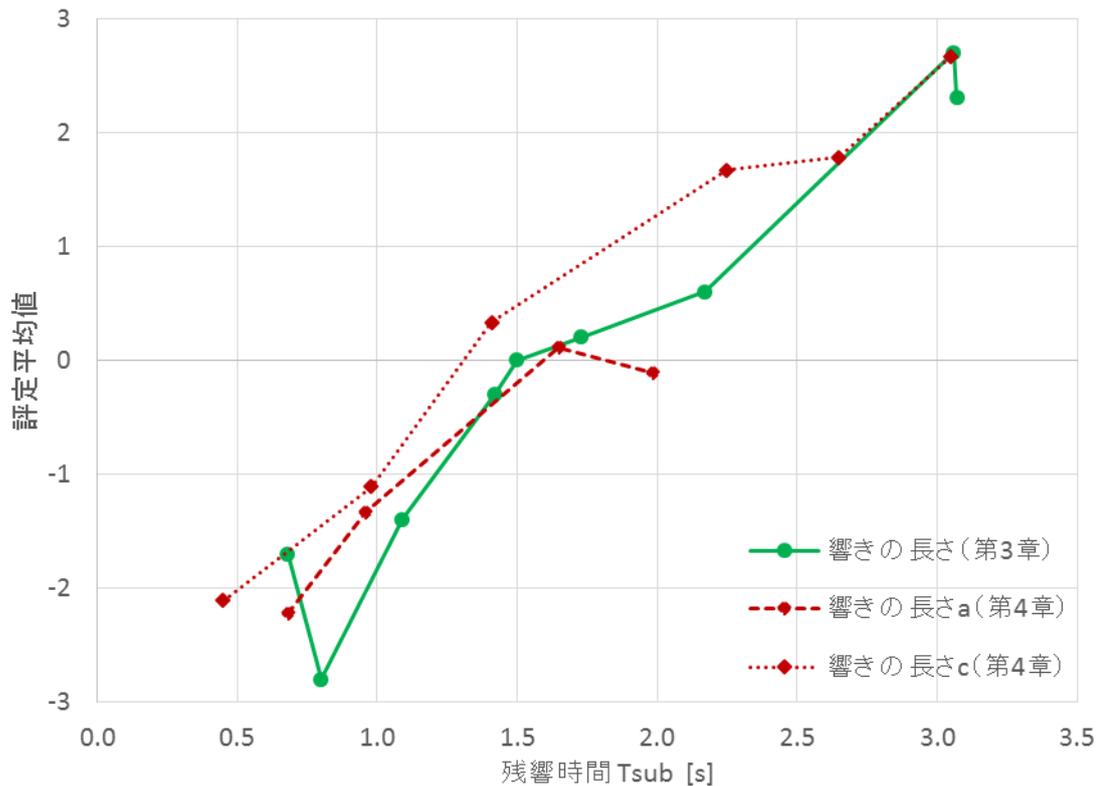


図 4-8 シングルモード提示時の「響きの長さ」の評価結果の比較

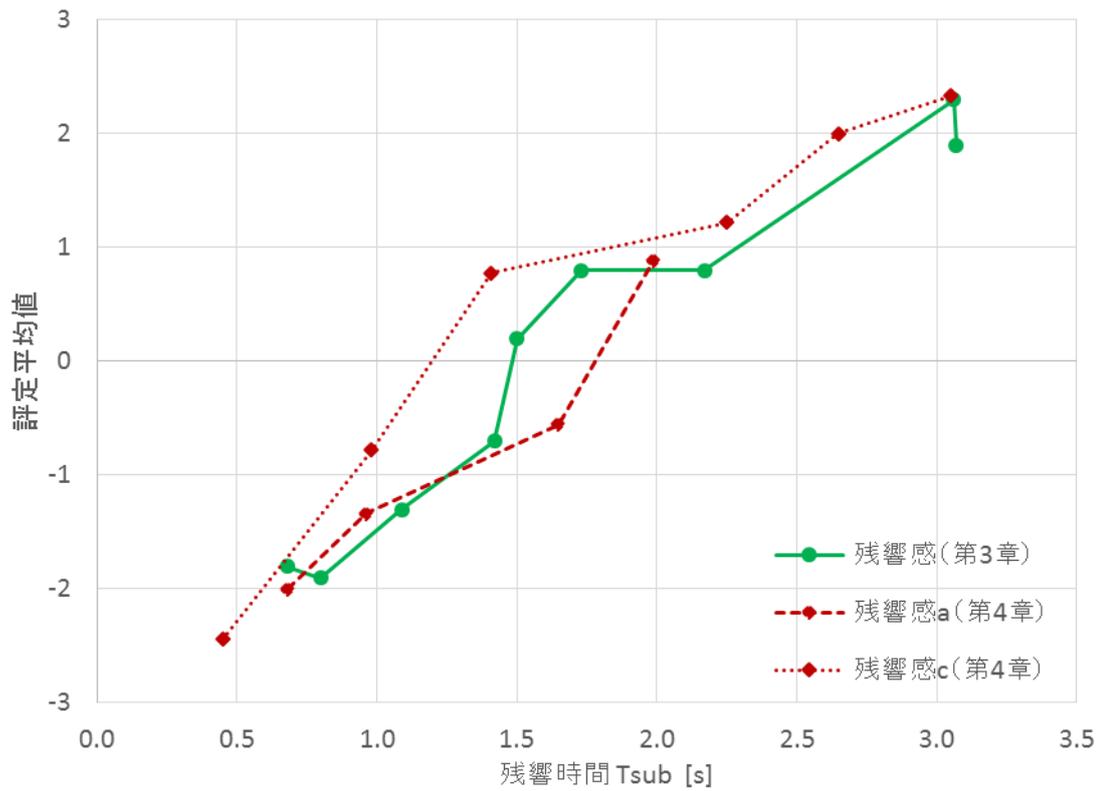


図 4-9 シングルモード提示時の「残響感」の評価結果の比較

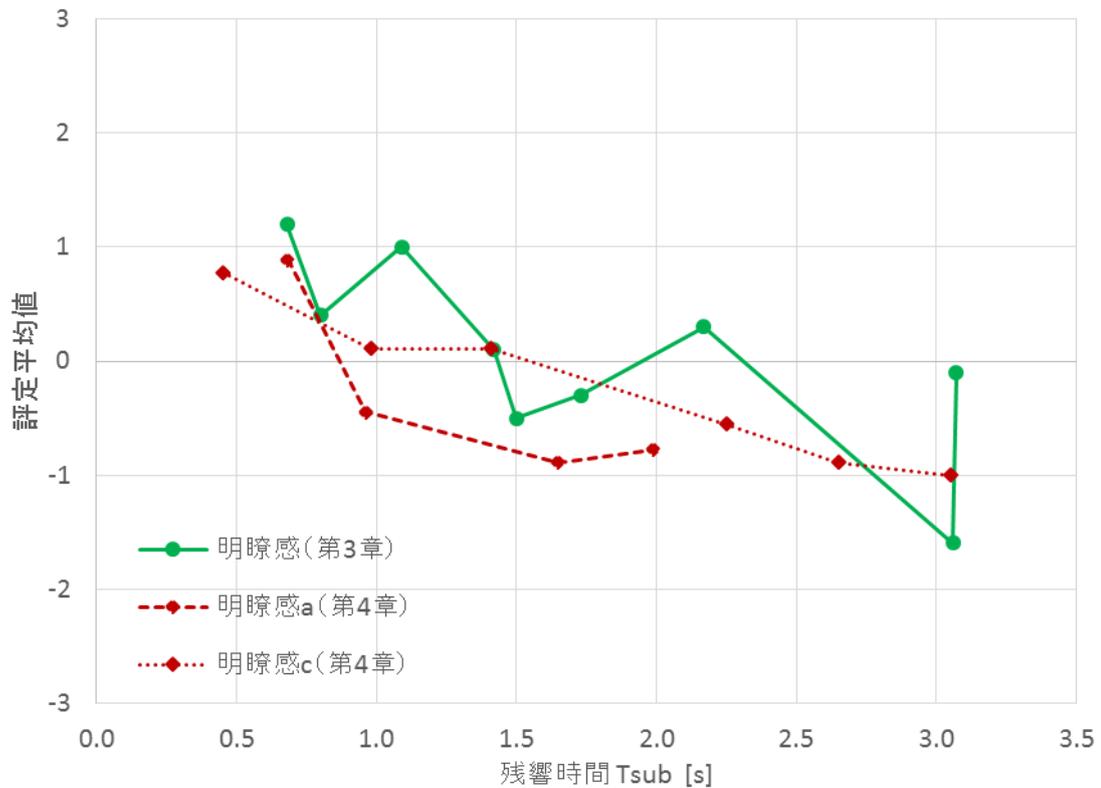


図 4-10 シングルモード提示時の「明瞭感」の評価結果の比較

図 4-8 で示した「響きの長さ」に関しては、第 3 章の実験の聴覚刺激で残響時間の最も短い刺激 a・最も長い刺激 c と本章の実験の聴覚刺激 a4 を除き、聴覚刺激の持つ残響時間の順番通りに評価されている。聴覚刺激 c, a4 の評価については、一般的に長い残響時間は区別が付き難いことが関係している可能性がある。聴覚刺激 a の評価については、グラフの勾配が明らかに連続的ではなく、後に続く聴覚刺激よりも残響時間が短く感じられている様子が窺えるが、その明確な原因は不明である。

図 4-9 で示した「残響感」に関しては、いずれの実験においても、おおよそ残響時間の増加に伴って残響感も増していると感じられていることが分かる。

図 4-10 で示した「明瞭感」に関しては、本章における実験結果を見ると、おおよそ残響時間の増加とともに明瞭感が減少していく傾向が見られる一方で、第 3 章における実験結果を見ると、明瞭感は残響時間の長さに関わらず評価が上下していることが見てとれる。特に、視覚刺激の空間の実際の響きである刺激 a, b, c の評価が、特にグラフ勾配の連続性を損なっていることから、聴覚刺激の基となる素材が空間に合ったものではなかったことが評価に影響した可能性が窺える。

マルチモード提示時の主観聴覚印象の比較

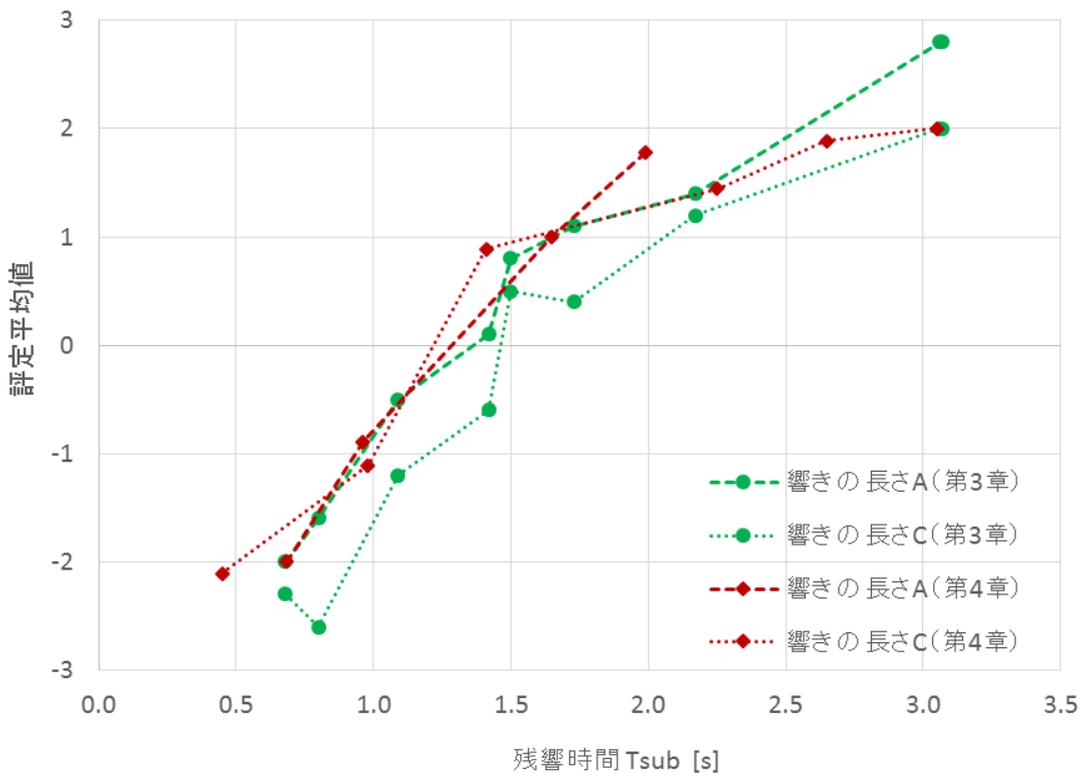


図 4-11 マルチモード提示時の「響きの長さ」の評価結果の比較

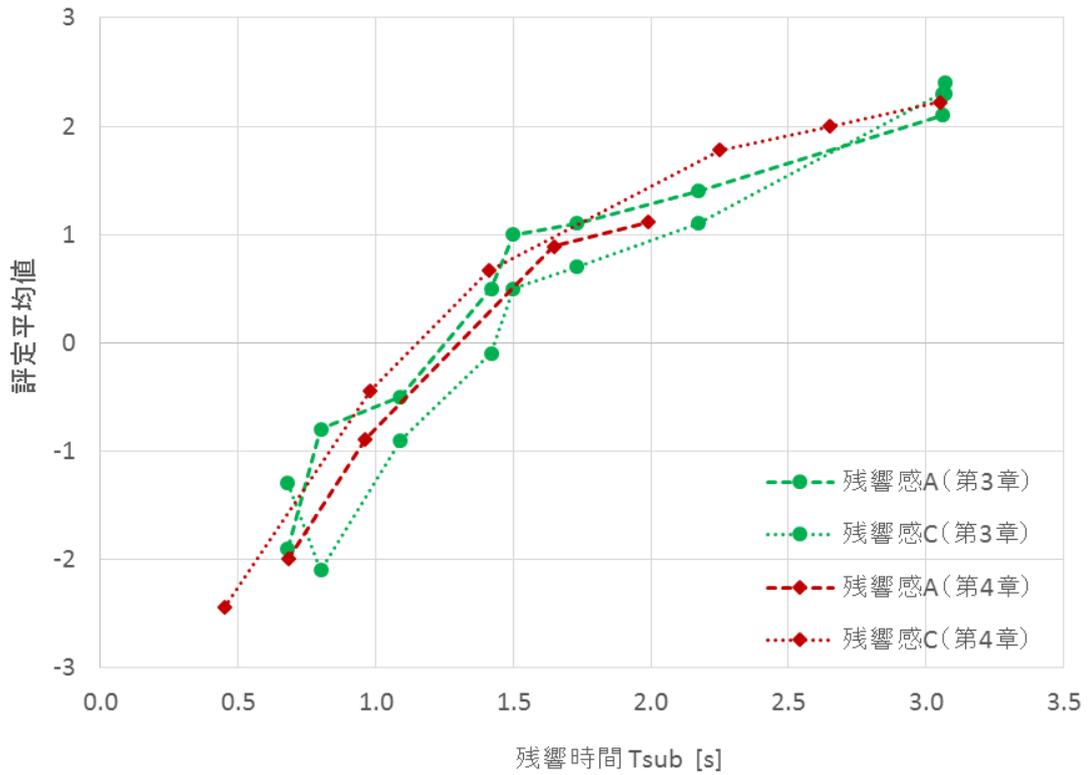


図 4-12 マルチモード提示時の「残響感」の評価結果の比較

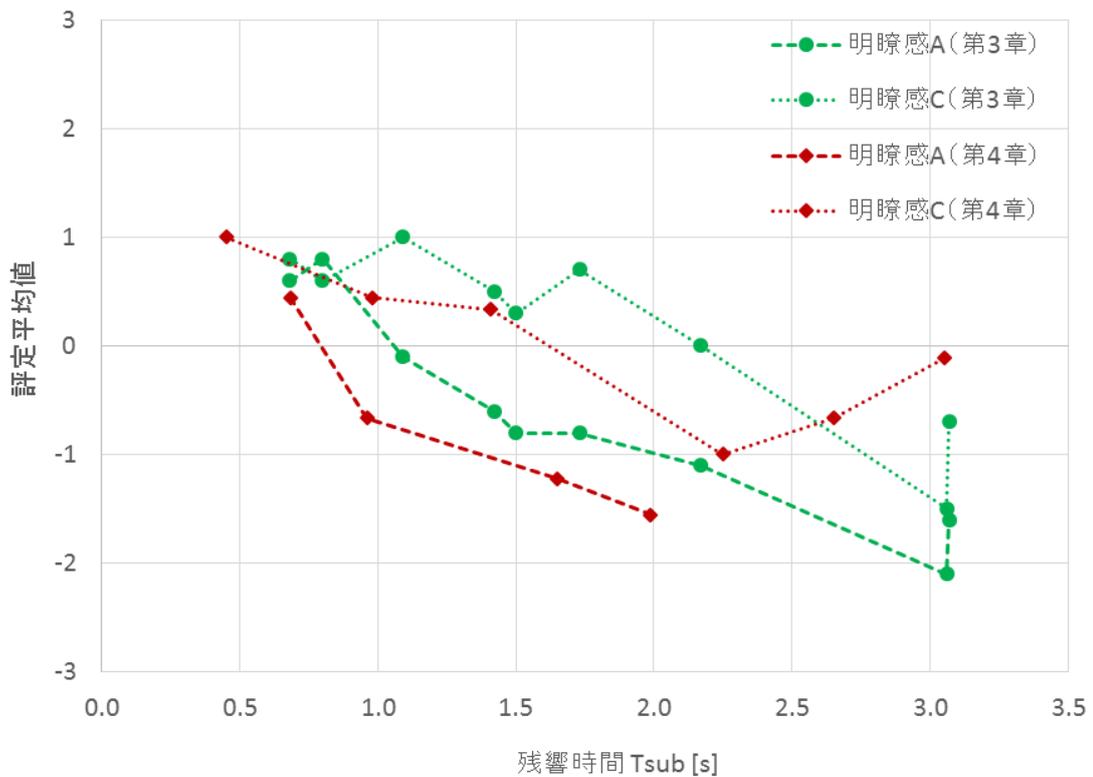


図 4-13 マルチモード提示時の「明瞭感」の評価結果の比較

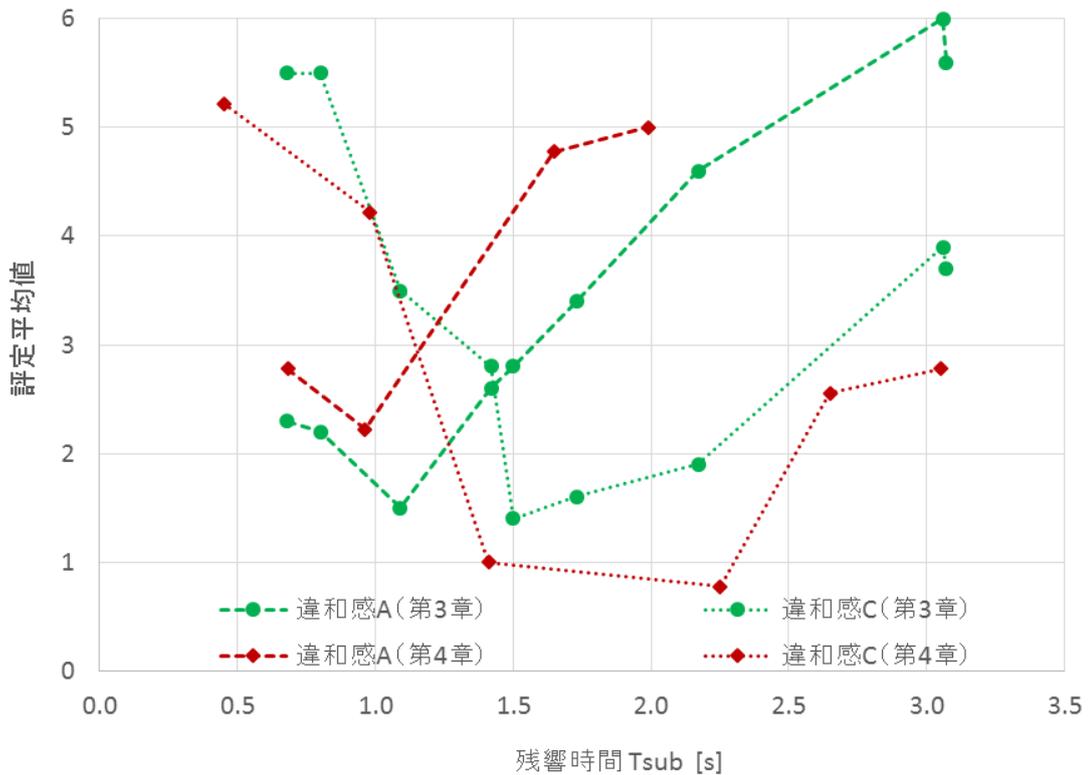


図 4-14 マルチモード提示時の「違和感」の評価結果の比較

図 4-11 ~ 14 に、空間 A と C における視聴覚刺激のマルチモード提示時におけるそれぞれの主観聴覚印象と違和感の測定結果を比較した図を示した。

図 4-11 で示した「響きの長さ」に関しては、いずれの実験においても、おおよそ聴覚刺激の持つ残響時間の順番通りに評価されている。残響時間が 1.5 s 程度の聴覚刺激の評価値が少し高くなる特徴が見られるが、その明確な理由は不明である。しかしながら、我々が日常生活において経験する残響時間として、1.5 s というのは主として音楽ホールなどの“音の響きを聞くための特別な空間”であることが関与している可能性、つまり、残響時間 1.5 s 程度の響きは「響きが長い」と感じ、それよりも長い残響時間を持つ響きを提示されても、慣れ親しんだ響きではなく判断の感度が鈍る可能性がある。

図 4-12 で示した「残響感」は「響きの長さ」と同様に、いずれの実験においても、おおよそ残響時間の増加に伴って残響感も増すと感じられていることが分かる。

図 4-13 で示した「明瞭感」に関しては、本章における実験の空間 A を除いて、残響時間が長い（第 3 章の実験においては 3.0 s 以上、本章の実験においては 2.0 s 以上）場合、残響時間の長さにかかわらず明瞭感が高くなるという傾向が見られる。いずれの実験においても特に空間 C でその傾向が顕著に見られるが、空間 C の実

際の残響時間は 3.05 s であり、実際の残響時間をもつ響きの明瞭感が高く評価されたとも言える。

図 4-14 で示した「違和感」に関しては、本章における尺度は「違和感のある (+6)」～「違和感のない (0)」という方向であるのに対し、第 3 章における尺度が「違和感のある (-3)」～「違和感のない (+3)」という逆の方向であったため、第 3 章の尺度を本章の尺度に対応させて評価値を同一尺度に修正し、同一軸のグラフ上に表現している。2 つの実験の同一空間同士を比較すると、どちらの空間もおおよそ同様の評価傾向であることが分かる。

モード間の評定倍率の比較

図 4-15 ~ 17 に、空間 A と C の聴覚刺激のシングルモード提示時に対するマルチモード提示時の評定平均値の評定倍率を、それぞれの主観聴覚印象で比較して示す。

図 4-15 で示した「響きの長さ」に関しては、いずれの実験においても、マルチモード提示時のほうがより響きの長さが長いと判断される傾向にあることが分かる。空間 C はどちらの実験もよく似た評価結果であるが、空間 A は本章における実験では明らかに残響時間とともに評定倍率も大きくなり、残響時間が長くなるにつれマルチモード化の影響が大きくなっている。一方で、第 3 章の実験では残響時間 0.8 s 付近をピークに、残響時間が長くなるにつれ評定倍率は 1.0 に近づきマルチモード化による影響が小さくなっていく傾向が見られた。

図 4-16 で示した「残響感」に関しては、いずれの実験においても、空間ごとのマルチモード化による影響はあまり変わらないことが分かる。

図 4-17 で示した「明瞭感」に関しては、空間 A はいずれの実験においても同じような評定倍率で、マルチモード化による影響は近似している。空間 C は、第 3 章における実験では残響時間 1.5 s 程度の聴覚刺激がマルチモード化によって最も明瞭感が高く感じられており、そのほかの範囲では評定倍率は 1.0 付近で横ばいである。一方本章における実験では、本来の響きである聴覚刺激 c6 を除き、評定倍率は 1.0 付近でほぼ一定である。聴覚刺激 c6 はインパルス応答の波形編集を施していないため、響きの明瞭感がもともと高かったこともその原因のひとつであると思われる。

比較値を 1.0 として各主観評価項目の評定倍率の値を対象に母平均の差の検定を行った結果、空間 A の「残響感」、空間 B の「響きの長さ」に 5 %水準の統計的有意差が現れた。

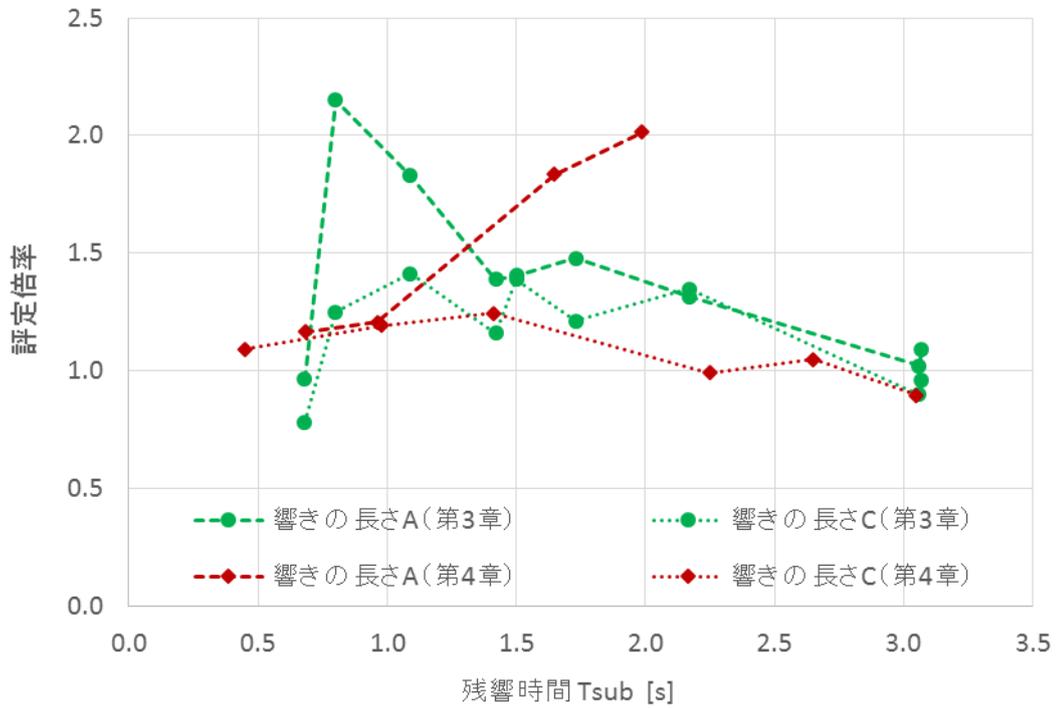


図 4-15 モード間の「響きの長さ」の評定倍率の比較

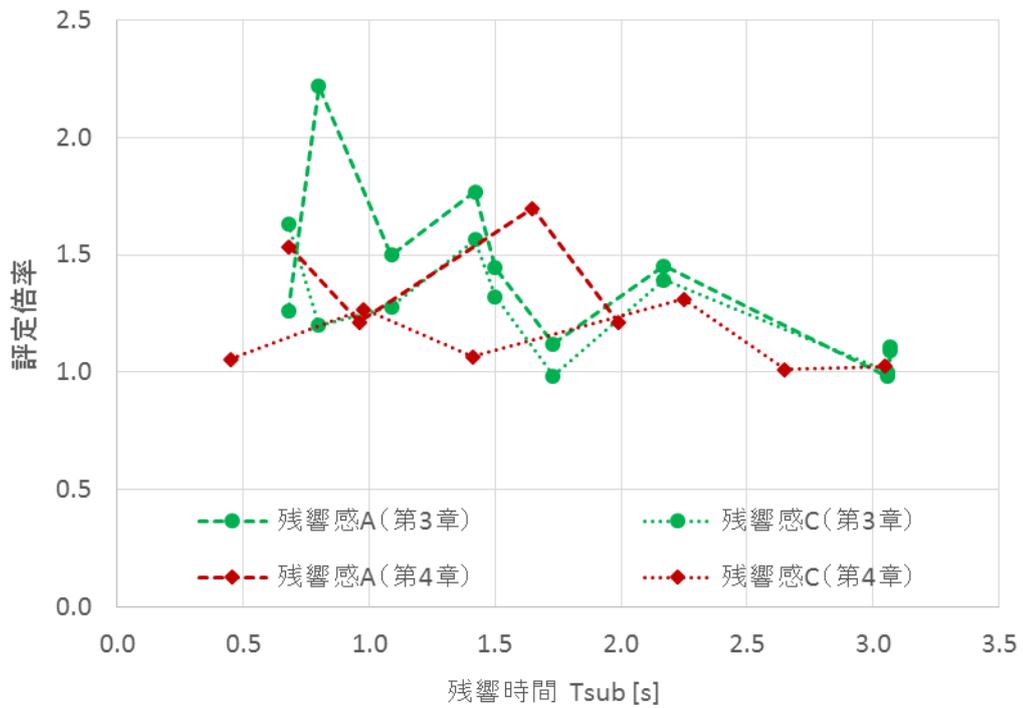


図 4-16 モード間の「残響感」の評定倍率の比較

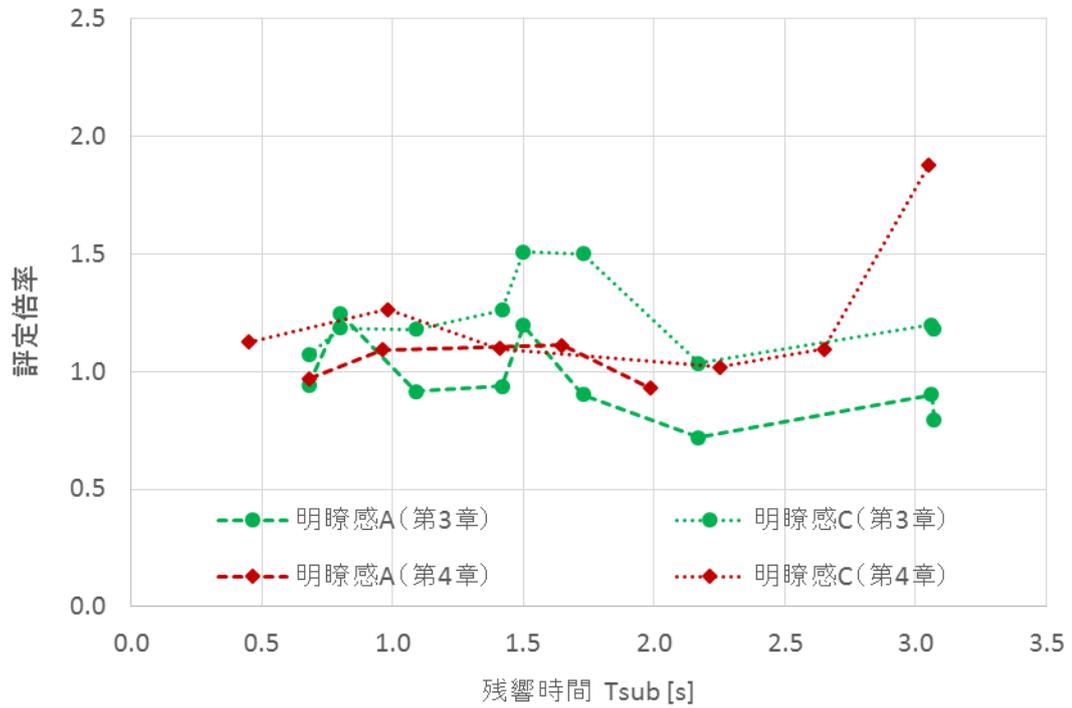


図 4-17 モード間の「明瞭感」の評定倍率の比較

4-5 小括

本章では、残響時間の異なる聴覚刺激に用途や容積の異なる様々な視覚刺激が加わることによる主観聴覚印象に対する影響とその程度、およびそれらと被験者が抱く違和感の程度との関係性について、第3章の実験結果との比較を通じて検討した。

視覚刺激 B と聴覚刺激 b1～b6 の組合せによるマルチモーダル刺激に対する結果は解釈が難しく、聴覚刺激の作成に問題がないか再検討し、次章で聴覚刺激を作成し直したうえで再実験を行う。

「響きの長さ」と「残響感」は比較的音響物理量に則った判断がなされたが、「明瞭感」の評価は必ずしもそうではなかった。視覚刺激の空間の用途によっても、その評価傾向は異なる。

予想残響時間と実際の残響時間のギャップが大きいと、違和感が大きくなる。従来の知見通り、人間は視覚優位の判断を下すので、本実験においても聴覚印象が視覚印象に影響される傾向が見られた。

予想残響時間と刺激の残響時間との関係性は、聴覚印象に対するマルチモーダル化による影響や違和感に関連すると思われる。しかし、これまでの実験では統一した性状を把握するに至らなかった。

第3章の実験結果と比較したところ、おおよその評価傾向は一致していたが、異なる傾向が見られる箇所も存在した。主観聴覚印象の評定値が残響時間に沿ってより滑らかに変動するのは、聴覚刺激の素材として視覚刺激の空間のインパルス応答を用いた場合（本章における実験結果）であった。今後の実験において、その目的によって適切な聴覚刺激を選択することが重要である。

第5章

異なる音楽空間における視覚と聴覚の主観的印象

5-1 研究概要

本章では、第4章における実験結果を受け、インパルス応答の波形編集方法に問題があったと思われる聴覚刺激 b3 以降を作成し直し、第4章と同様の手順で再実験を行うことにした。被験者は正常な視覚と聴覚をもつ男女11名である。

更に、内観・容積などが異なる同一用途空間に対して主観印象評価の違いが生じるかどうかを明らかにすることを目的に、第4章までの実験刺激として用いてきた空間 B よりも小規模なホール空間 D を刺激として加え、それら2空間の視覚印象と聴覚印象の主観評価結果を比較する。

5-2 実験概要

5-2-1 実験システム

図5-1に示すように、本章における実験システムは、第4章の実験システムと全く同じである。

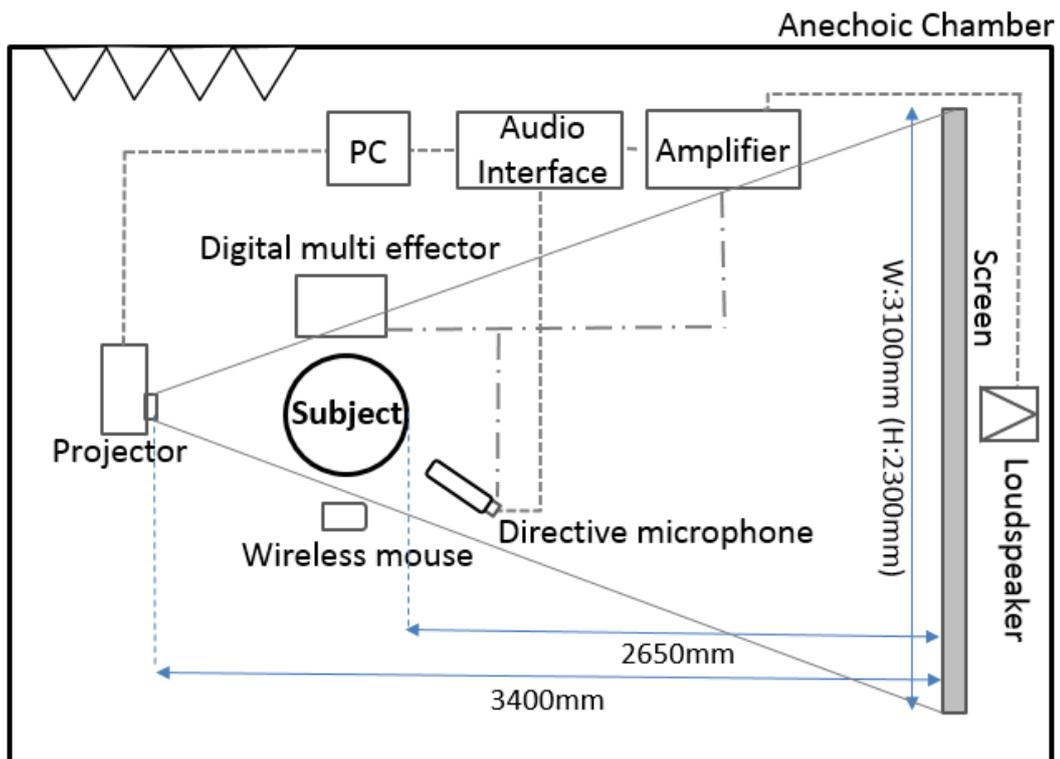


図 5-1 実験システムの概略

5-2-2 実験刺激

表 5-1 に、視覚刺激の空間の概要とその音響特性を示す。視覚刺激 B は第 3 章、第 4 章の視覚刺激 B と同じものである。2 空間の用途は共に、演奏会や講演会などの様々な用途で用いられる多目的ホールである。容積は空間 B の方が大きく、空間 D の約 2.3 倍であるが、残響時間 T_c はほぼ同じ長さである。図 5-2 に、2 空間のイメージ画像を示す。本実験における聴覚刺激の音響特性を表 5-2 に示す。表中の数字が太字で表記されているものが、視覚刺激の空間そのものの響き（残響時間を加工していないインパルス応答）である。聴覚刺激は、いずれも視覚刺激の空間そのものの響き（表 5-2 中の b3, d3）を基に、その響きの残響時間を 0.5 s 刻みに 0.5 ~ 3.0 s の残響時間になるようパソコンのソフトウェア (Gold Wave) 上でインパルス応答の波形編集を行ったものである。本章では、聴覚刺激作成の都合上、今までの章とは異なり、残響時間として T_{sub} ではなく、残響曲線における 30dB の減衰区間 (-1 dB ~ -31 dB) を自ら設定した T_c を採用した。空間 A の聴覚刺激は 6 つ、空間 D の聴覚刺激は 7 つである。

表 5-1 視覚刺激として用いた音場の音響特性 (500 Hz 基準)

名称	用途	T_c [s]	T_{sub} [s]	EDT [s]	C_{80} [dB]	容積 [m^3]	横幅 [m]	奥行 [m]	天井高 [m]
刺激B	多目的 ホール	1.47	1.49	1.69	0.18	12000	48.4	41.6	14.5
刺激D		1.42	1.89	1.77	-3.92	5200	20.5	32.1	10.8

表 5-2 聴覚刺激として用いた音場の音響特性 (500 Hz 基準)

	刺激名称	T_c [s]	T_{sub} [s]	EDT [s]	C_{80} [s]
視覚 刺激 B	b1	0.69	0.46	0.66	5.90
	b2	1.10	1.07	0.99	2.27
	b3	1.47	1.49	1.69	0.18
	b4	2.23	2.05	2.05	-0.89
	b5	2.51	2.56	3.93	-2.18
	b6	2.96	2.91	2.28	-1.20
視覚 刺激 D	d1	0.61	0.62	0.84	3.57
	d2	1.13	1.24	1.33	-5.19
	d3	1.42	1.89	1.77	-3.92
	d4	1.51	1.31	1.31	-1.19
	d5	2.09	1.85	1.86	-1.94
	d6	2.46	2.23	2.20	-2.36
	d7	2.94	2.52	2.62	-4.42

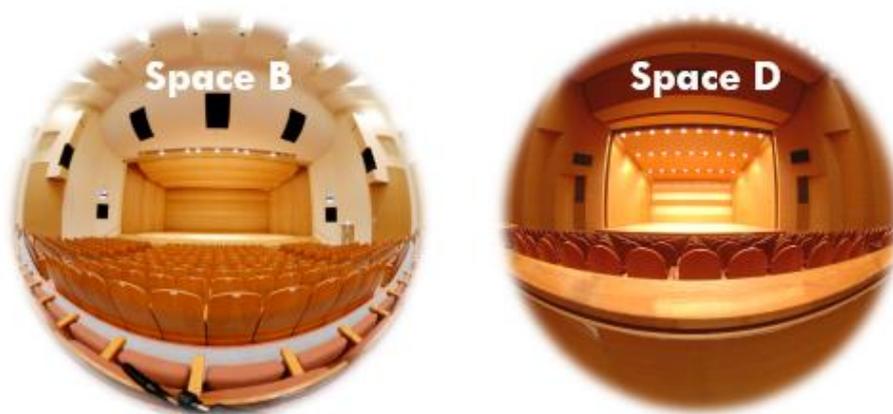


図 5-2 視覚刺激の空間の VR 映像イメージ

5-2-3 実験手順

第4章における実験とほぼ同様の手順で、主観評価実験が実施された。以下に、本章における実験手順を記す。

実験 1：視覚刺激のシングルモード提示

表 5-3 主観視覚印象の評価項目

カテゴリ	評価項目名	形容詞対	
色覚	明度	白っぽい	黒っぽい
	彩度	鮮やかな	くすんだ
	色相	暖かみのある	冷やかな
	色の数	単色な	多色な
	明るさ(光)	明るい	暗い
空間	立体感	立体感のある	平面的な
	複雑さ	複雑な	単純な
	開放感	開放的な	閉鎖的な
	広さ	広い	狭い
	質感	やわらかい	かたい
	親しみやすさ	親しみやすさ	親しみにくい

表 5-1 に示した視覚刺激としての 2 種類の VR 映像のみがランダムな順にスクリーンに映写されることで提示され、被験者はそれを自身のマウス操作によって見渡す。次に、被験者は提示された視覚情報からその空間の残響時間を予測する。予想した残響時間を表現するために、超指向性マイクに向けて発した音（被験者の声や手を叩いた音）が畳み込まれた聴覚刺激を聴いて残響時間を確認しながら、手元のデジタル・マルチ・エフェクターのジョグダイヤルを操作することにより、エフェクターに内蔵されたホール空間の代表的

な響き（CONCERT HALL）の残響時間を 0.1 s 刻みで納得いくまで調整する。ジョグダイヤルを時計回りに回すとエフェクターから再生される響きの残響時間は 0.1 s ずつ長くなり、反時計回りに回すとその残響時間は 0.1 s ずつ短くなる。1 つの空間につき、残響時間の調整は上昇系列（残響時間 0.0 s から徐々に長くしていく）と下降系列（残響時間 3.0 s から徐々に短くしていく）の 2 方向から行い、上昇系列における残響時間の予測値と下降系列における残響時間の予測値を算術平均することにより、調整法による予想残響時間の値を算出した。

最後に、被験者は提示された建築空間の映像に対する視覚的な印象についての質問項目に -3 ~ +3 の 7 段階尺度で回答する。この質問項目を表 5-3 に示した。さらに予備的情報として、被験者各人の視覚刺激の空間に対する経験の有無を、「利用したことがある」・「多分利用したことがある」・「多分利用したことがない」・「利用したことがない」の 4 段階で回答させた。

実験 2：聴覚刺激のシングルモード提示

表 5-2 に示した聴覚刺激としての 13 種類の音場のみがランダムな順に、パソコン上のソフトウェアを通じてスピーカーから再生されることで被験者に提示された。被験者はマイクに向けて発した音（被験者の声や手を叩いた音）が畳み込まれた聴覚刺激を聴いたときの主観的な聴覚印象を -3 ~ +3 の 7 段階尺度で回答する。質問項目を表 5-4 に示すが、これらは第 2~4 章の実験で用いた主観聴覚印象評価項目と同じである。

表 5-4 主観聴覚印象の評価項目

評価項目名	形容詞対	
響きの長さ	長い	短い
残響感	豊か	乏しい
明瞭感	はっきり	ぼんやり

実験 3：視覚刺激と聴覚刺激のマルチモード提示

視覚刺激の空間に対応する聴覚刺激を組み合わせる（空間 B の場合、視覚刺激 B と聴覚刺激 b1 ~ b6 を 1 つずつ組み合わせる）ことで、13 種のマルチモーダルな視聴覚刺激とした。それらは被験者にランダムな順に提示される。被験者はそのマルチモーダル提示に対する主観的な聴覚印象を回答する。その評価項目は実験 2 と同様である。加えて、被験者は音場（聴覚刺激）と映像（視覚刺激）の組み合わせに対する違和感の程度を、0（違和感がない）～ +6（違和感がある）の 7 段階尺度で回答する。

5-3 実験結果

5-3-1 実験1の結果

空間経験の有無

各視覚刺激の空間に対する経験の有無（その空間を利用したことがあるかどうか）を尋ねた結果、空間 B は約 89 % の被験者が「利用したことがある」と回答したが、空間 D は約 89 % の被験者が「利用したことがない」または「多分利用したことがない」と回答した。今回の実験の被験者らは、視覚刺激の空間 B は体験したことがあり、その空間のイメージを持っているとみなせるが、空間 D に関しては空間経験がなく、その空間のイメージを持っていないとみなす。

予想残響時間

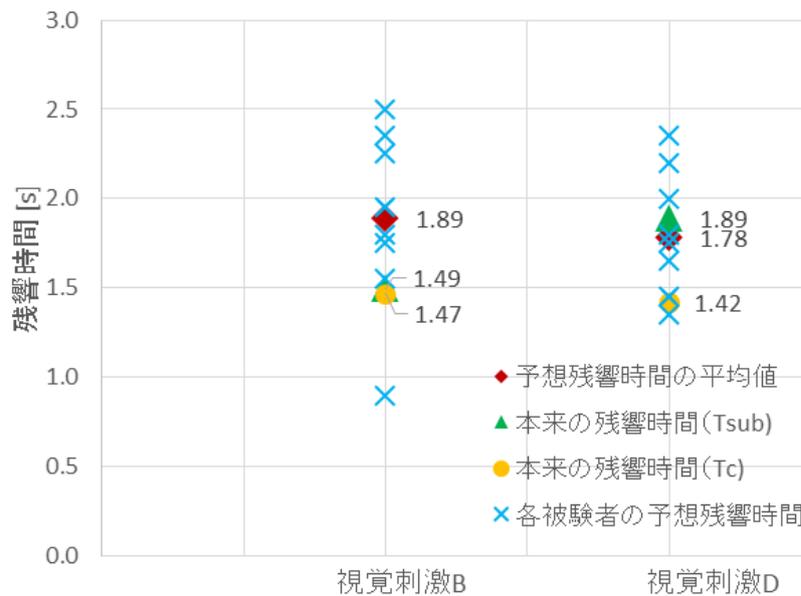


図 5-3 視覚刺激の各空間の予想残響時間

図 5-3 に、視覚刺激のみ（2つの建築空間の VR 映像）を提示した際の、各被験者の各視覚刺激の空間に対する予想残響時間の測定結果を示した。視覚刺激 B の予想残響時間は 1.89 s、視覚刺激 D の予想残響時間は 1.78 s である。その予想残響時間と本来の残響時間（ T_c の実測値）との間の誤差は、視覚刺激 B で +0.42 s、視覚刺激 D で +0.36 s であり、どちらの空間も本来の残響時間よりも長めに予想された。一方 T_{sub} を残響時間として採用した場合、その誤差は視覚刺激 B で +0.40 s、視覚刺激 D で -0.11 s であり、どちらも T_c の実測値と比べた場合より誤差は小さい。また、被験者間の予想残響時間のバラつきは、視覚刺激 D より視覚刺激 B の方がやや大きい。

視覚刺激に対する印象評価

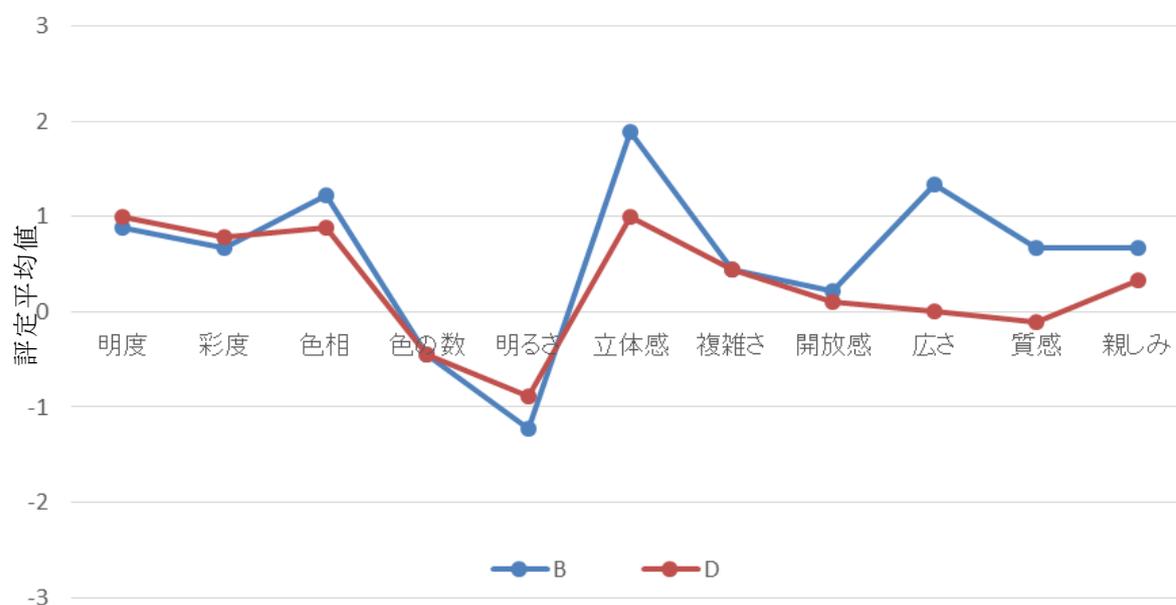


図 5-4 シングルモード提示時の視覚印象の評定平均値

図 5-4 に、視覚刺激のみのシングルモード提示時の主観的な視覚印象の評定平均値のプロファイルを示した。

全体的に見て、彩度・色相・明るさなどといった色覚に関する評価項目の評定値は空間によらず同程度である。第3章における実験と同様、VR映像の元となる画像は、画像加工ソフトウェア (Image J) によってブライトネスの平均値を約 77.7 (素材となる画像 6 枚のブライトネスの平均値) に統一してあり、実験で使用するプロジェクターのブライトネスの設定も統一したため、色覚に関する主観視覚印象にはあまり差が生じなかったと思われる。

一方、空間感覚に関する評価項目に関しては、全体的に空間 B の方が評定値は大きく、特に「立体感」・「広さ」でその傾向が顕著である。「広さ」に関しては、空間 B の容積が空間 D の約 2.3 倍であり VR 映像から受ける印象が大きく異なること、「立体感」に関しては、空間 B は容積が大きいことに加えて客席数も多く、客席部の高低差が大きいことなどが評価に影響を与えたと考えられる。

また、全体的に、評定値のバラつき (標準偏差) はどちらの空間もさほど小さくなく、最大でも 1.74 (空間 D の「複雑さ」) 程度であった。しかしながら、母平均の差の検定の結果、有意差はいずれの視覚印象評価項目間にも検出されなかった。

5-3-2 実験2の結果

聴覚刺激に対する印象評価

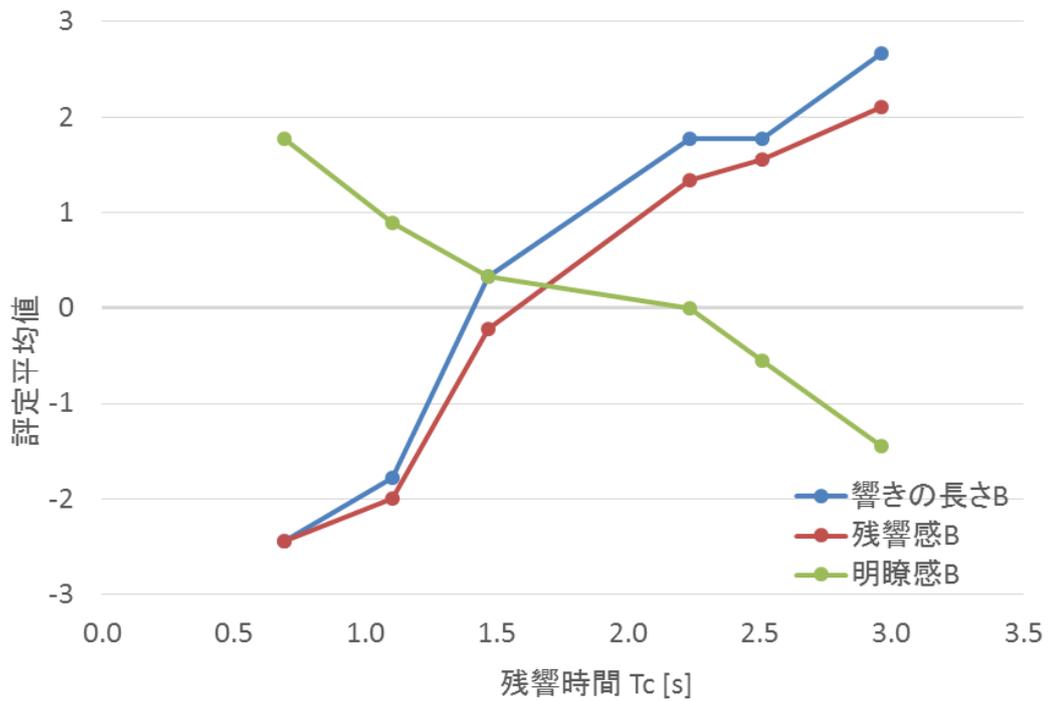


図 5-5 シングルモード提示時の空間 B の聴覚印象の評定平均値の変動

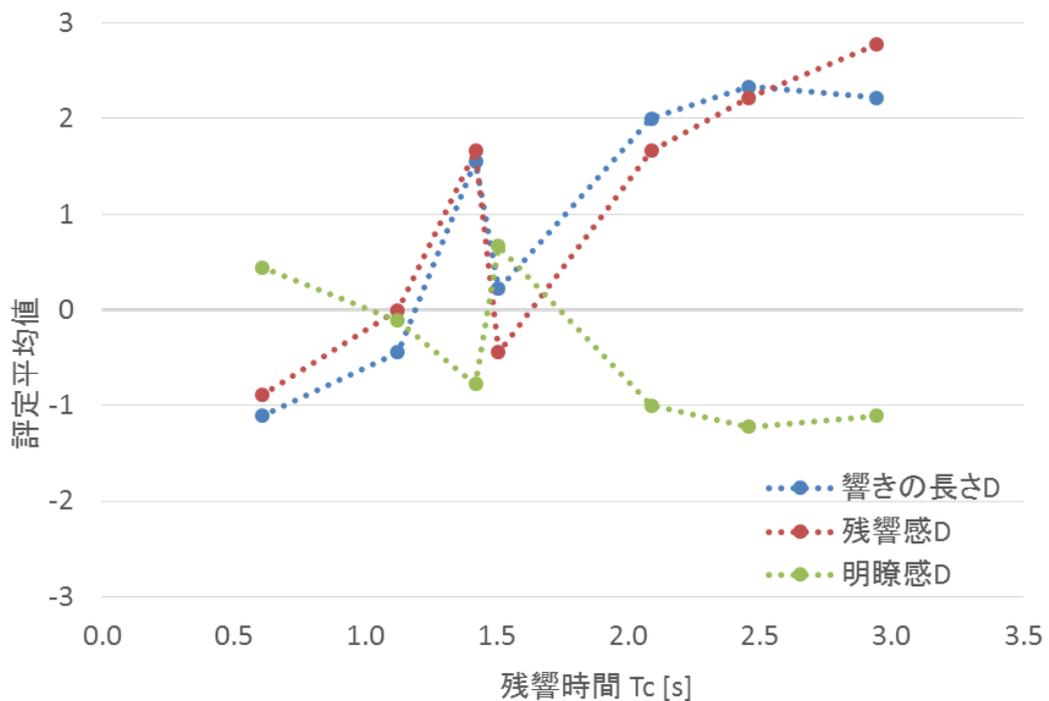


図 5-6 シングルモード提示時の空間 D の聴覚印象の評定平均値の変動

図 5-5 と図 5-6 に、聴覚刺激のみのシングルモード提示時の主観的な聴覚印象の評定平均値の残響時間による変化を示した。横軸は、聴覚刺激の残響時間 T_c [s] である。

図 5-5 に示した空間 B の評価結果はおおよそ第 3 章のそれと近似した傾向が見られ、「響きの長さ」と「残響感」が「明瞭感」とほぼ相反する評価を得ている。また、「響きの長さ」と「残響感」は、おおよそ聴覚刺激の残響時間に沿った評価がなされた。

一方で図 5-6 に示した空間 D の評価結果を見ると、 $T_c = 1.42$ [s] の空間 D の本来の響きである聴覚刺激 d3 において、「響きの長さ」と「残響感」の評定値が著しく大きくなっており、 $T_c = 1.51$ [s] の聴覚刺激 d4 で再び評定値が大きく減少していることが分かる。「明瞭感」では聴覚刺激 d1 から d3 にかけて評価値が減少しているのに対し、d4 で評定値が急に正の方向に転じ、d5 以降は再び負の方向に大きく減少するといった変動を示している。空間 B とは異なり、空間 D で残響時間によらない評価がなされた原因としては、d3 以前 (d1, d2) と d3 以降 (d4~) では、インパルス応答の波形編集の方法が異なることが考えられ、それに起因して聴覚印象に影響が生じた可能性がある。例えば、d3 以前の聴覚刺激の作成には波形編集ソフトウェア (Gold Wave) 上のエフェクトである“Fade out”を用いたのに対し、d3 以降の聴覚刺激の作成には同ソフトウェア上のエフェクトである“Time warp”を用いた。前者は加工後も比較的違和感のない響きになるが、後者は加工後に若干波打つような響きになる。本実験の聴覚印象の評価結果を受け、聴覚印象の作成方法について再度検討が必要であると感じた。

5-3-3 実験 3 の結果

視聴覚刺激に対する印象評価

図 5-7 ~ 9 に、視覚刺激と聴覚刺激のマルチモード提示時における、主観聴覚印象の評定平均値の残響時間 T_c による変化を示す。図中の **single** の値は、実験 2 の聴覚刺激のみのシングルモード提示時における評価平均値を示している。

図 5-7 と図 5-8 に示す「響きの長さ」と「残響感」は、視覚刺激やモードに関わらずおおよそ近似した評価傾向が見られるが、やはり空間 D の聴覚刺激 d3, d4 の間で評定値が大きく上下する結果となった。また、シングルモード提示時とマルチモード提示時の評定値の間にはほとんど差が無く、提示刺激のマルチモーダル化による聴覚印象への影響はあまり無いと言える。

図 5-9 に示す「明瞭感」は「響きの長さ」・「残響感」と相反する従来通りの変動傾向を示したが、それらに比べ残響時間による評定値の変動幅は小さい。また、空間 D ではシングルモード提示時よりマルチモード提示時の方がやや評価値が大きく、響きがはっきりとした印象であるのに対し、空間 B ではシングルモード提示時とマルチモード提示時の評価はほぼ等しく、提示刺激のマルチモーダル化による影響はあまり無いと言える。

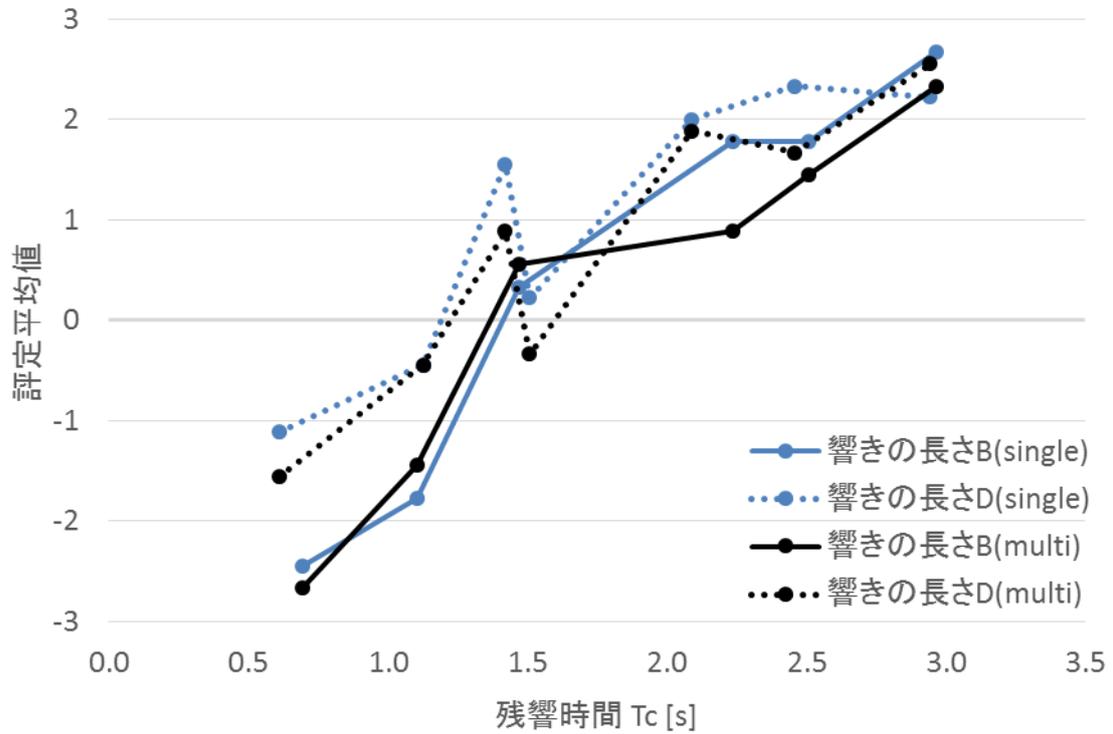


図 5-7 視聴覚刺激に対する「響きの長さ」の評定平均値

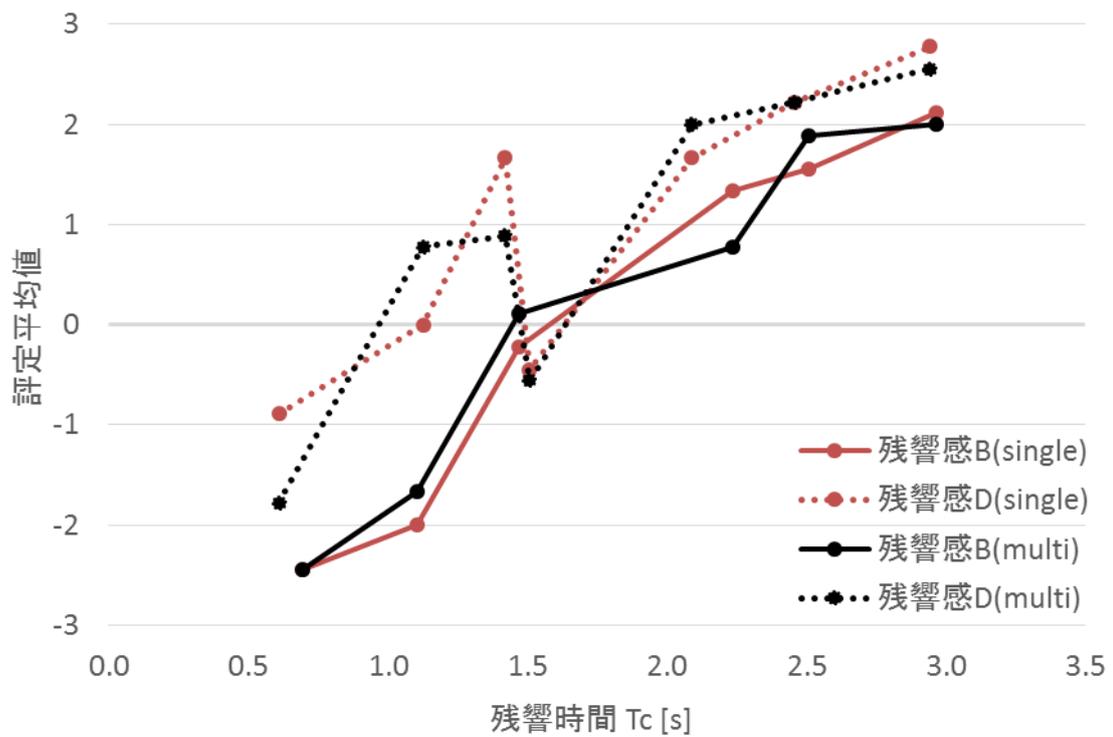


図 5-8 視聴覚刺激に対する「残響感」の評定平均値

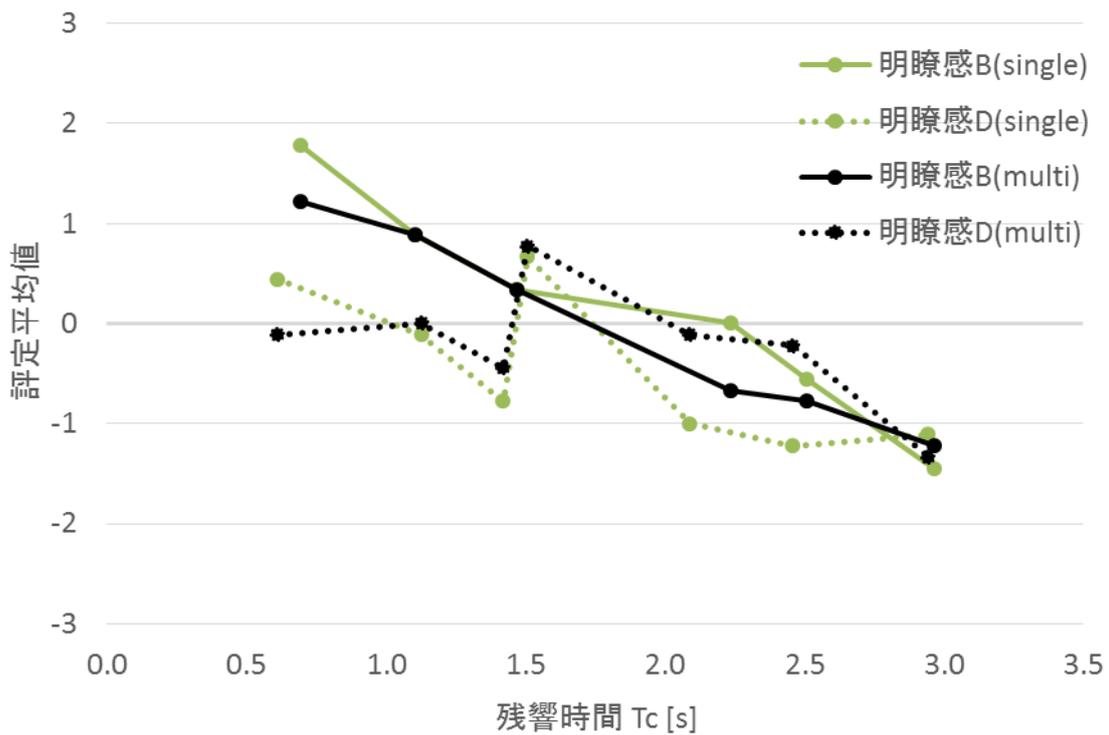


図 5-9 視聴覚刺激に対する「明瞭感」の評定平均値

違和感

図 5-10, 11 に、視覚刺激それぞれにおける視聴覚刺激のマルチモード提示時の主観的な聴覚印象と、響きと映像の組み合わせに対する違和感の程度の評定平均値を示す。

図 5-10 に示す空間 B の評価結果については、予想残響時間が実際の残響時間を上回っていることから、被験者らがホール空間は残響時間が長い・残響感が豊かであるという聴感イメージを持っていると思われる、実際よりも長い残響時間は許容される傾向にある。また、予想残響時間に近い $T_c = 2.0$ [s] 付近の残響時間をもつ聴覚刺激において、違和感が最も小さくなっていることが分かる。

一方で図 5-11 に示す空間 D の評価結果については、聴覚印象の評価が残響時間によらない傾向があることからか、違和感の評価も残響時間によらず上下している。空間 B と異なり、予想残響時間に近い $T_c = 2.0$ [s] 付近の残響時間をもつ聴覚刺激においても、違和感が大きいと判断されている。これらに関する詳細な原因は不明であるが、次項 5-4 において異なる観点から分析を行うこととする。

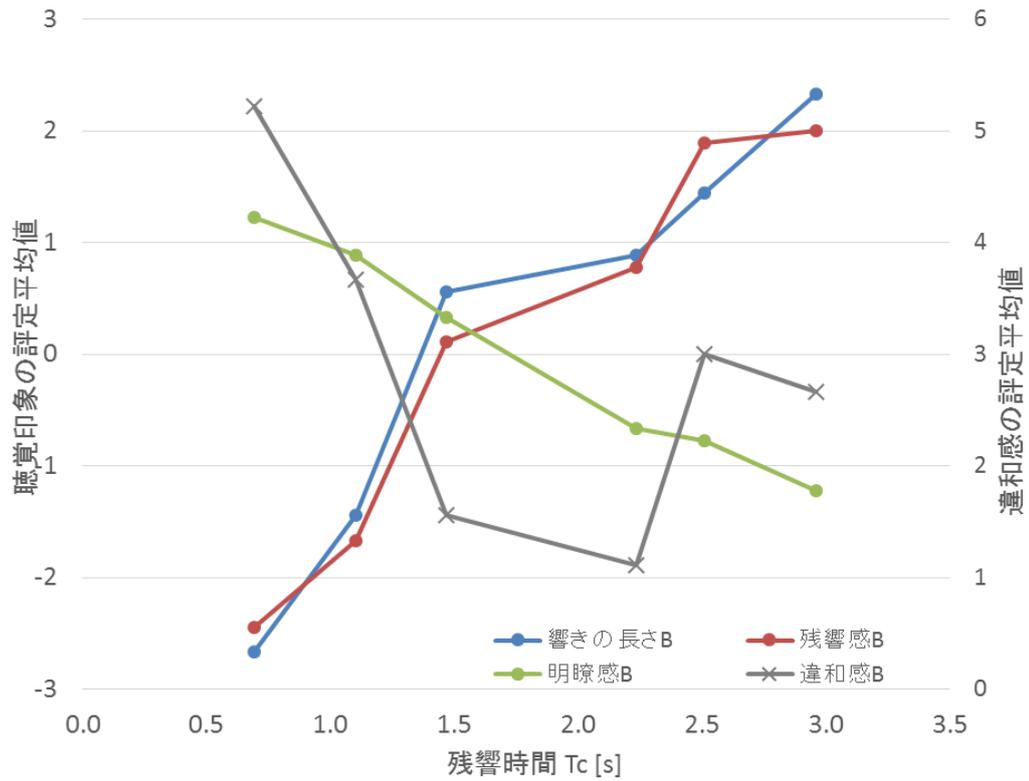


図 5-10 マルチモード提示時の空間 B の評定平均値

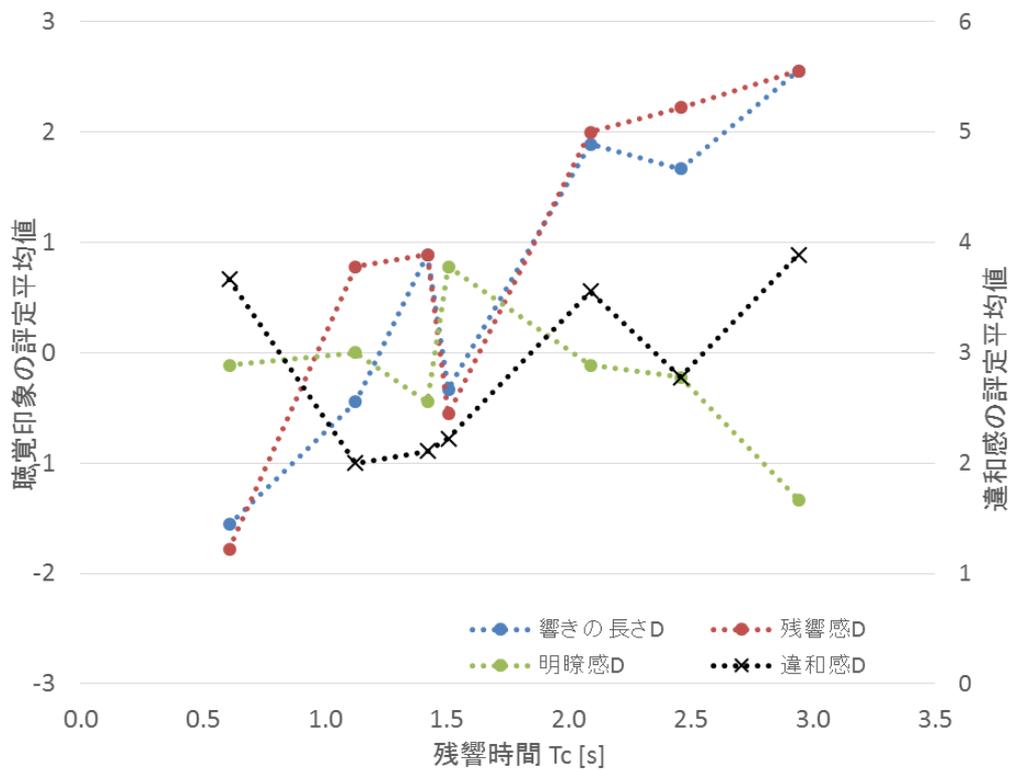


図 5-11 マルチモード提示時の空間 D の評定平均値

5-4 分析

5-4-1 残響時間として T_{sub} を採用した場合

本章の実験では、聴覚刺激の残響時間として今までの T_{sub} とは異なり T_c を採用した。その結果、被験者の聴覚印象評価と残響時間の関係性があまり見られなくなり、今までとは異なる実験結果となった。このことを受け、今まで通り残響時間として T_{sub} を採用した場合の聴覚印象評価の変動について、再分析を行うこととする。

表 5-5 に、聴覚刺激の T_{sub} の値を示す。空間 D では聴覚刺激 d3 よりも聴覚刺激 d4, d5の方が T_{sub} 値が長く、 T_c の場合とは聴覚刺激の順番が異なることに注意されたい。

表 5-5 聴覚刺激の残響時間 T_{sub} [s]

	b1	b2	b3	b4	b5	b6	d1	d2	d4	d5	d3	d6	d7
$T_{sub}(500\text{Hz})$	0.46	1.07	1.49	2.05	2.56	2.91	0.62	1.24	1.31	1.85	1.89	2.23	2.52

5-4-1-1 シングルモード提示時の聴覚印象の評価結果

図 5-12 ~ 14 に、残響時間として T_{sub} を採用した場合の聴覚刺激のみのシングルモード提示時の主観聴覚印象の評定平均値を示す。

図 5-12 に示す空間 B に対する評価については、残響時間の増加に伴って評定値も大きくなる「響きの長さ」・「残響感」の 2 項目が「明瞭感」とほぼ相反するような評価結果となり、第 3 章と第 4 章の実験結果と同様の結果が得られたと言える。

一方で図 5-13 に示す空間 D に対する評価については、残響時間 T_{sub} の値が近い聴覚刺激 d2 と d4, d5 と d6 のそれぞれの間で評価値の差が生じている。残響時間として T_c を採用していた本章の実験結果（図 5-5）と比較すると、特定の聴覚刺激で評定値が急激に大きくなることはなく、今までの実験結果のように残響時間に沿って「響きの長さ」・「残響感」が大きくなり、反対に「明瞭感」は小さくなる傾向が見られるようになった。

ここで、本章の聴覚刺激は残響時間 T_c が 0.5 s 刻みになるよう波形編集したものであるため、 T_{sub} の値は秒数の間隔が均一でない。そこで、 T_{sub} の値を 0.5 s 間隔に近づけるため、聴覚刺激 d4, d5 を除いた場合の評定平均値のグラフを図 5-14 に示す。この図と図 5-12 を比較すると、空間 D の聴覚印象の評定値の変化幅は空間 B よりも小さいものの、およそ残響時間に沿って「響きの長さ」・「残響感」が増加し、反対に「明瞭感」は減少するという従来と同様の実験結果が得られた。よって、聴覚刺激の残響時間としては T_{sub} を採用することが妥当だと考えられる。その理由として、本実験の聴覚刺激は、後期残響が被験者の聴覚印象の評価にあまり影響しない（残響時間がある程度長くなると、残響時間の差を聴き分けることが極端に難しくなる）音楽刺激ではなく、後期残響が聴覚印象の評価に大きく影響する被験者の声などを畳み込んだ音場であることが挙げられる。

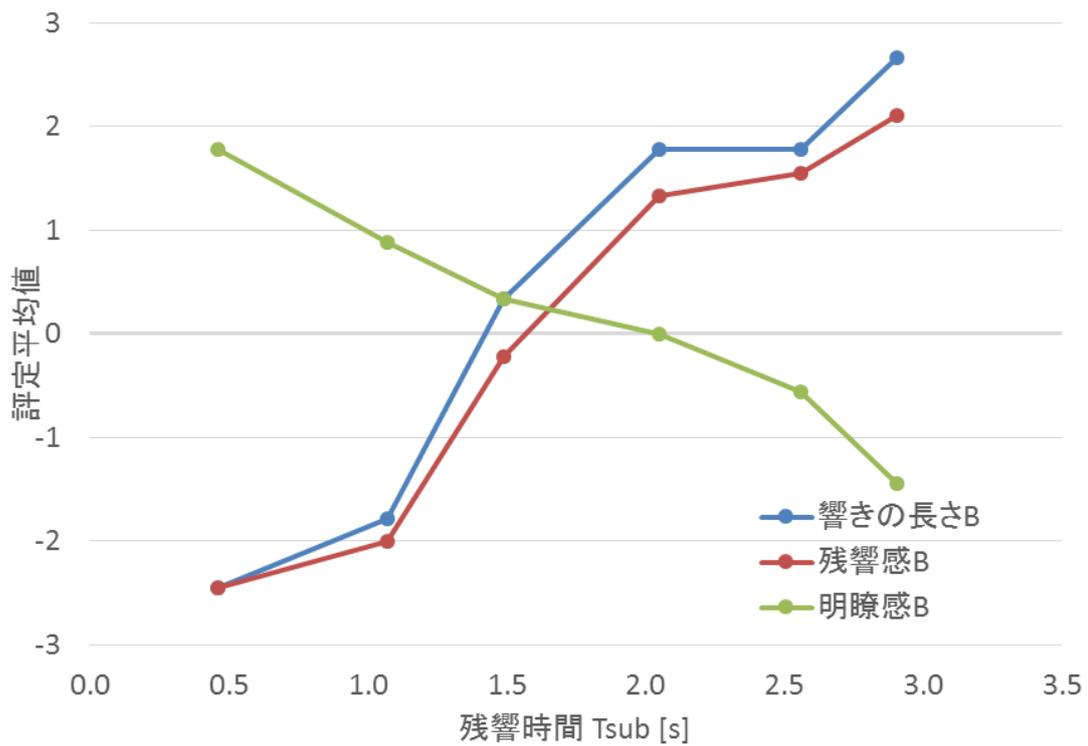


図 5-12 シングルモード提示時の空間 B の評定平均値 (残響時間: T_{sub})

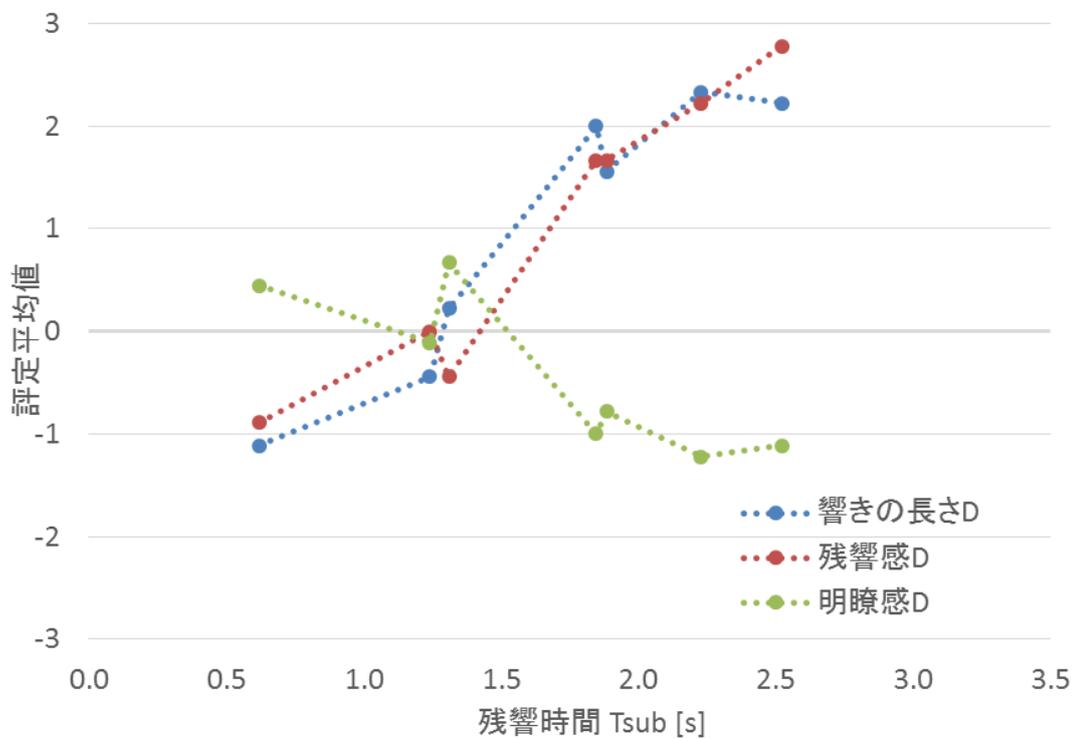


図 5-13 シングルモード提示時の空間 D の評定平均値 (残響時間: T_{sub})

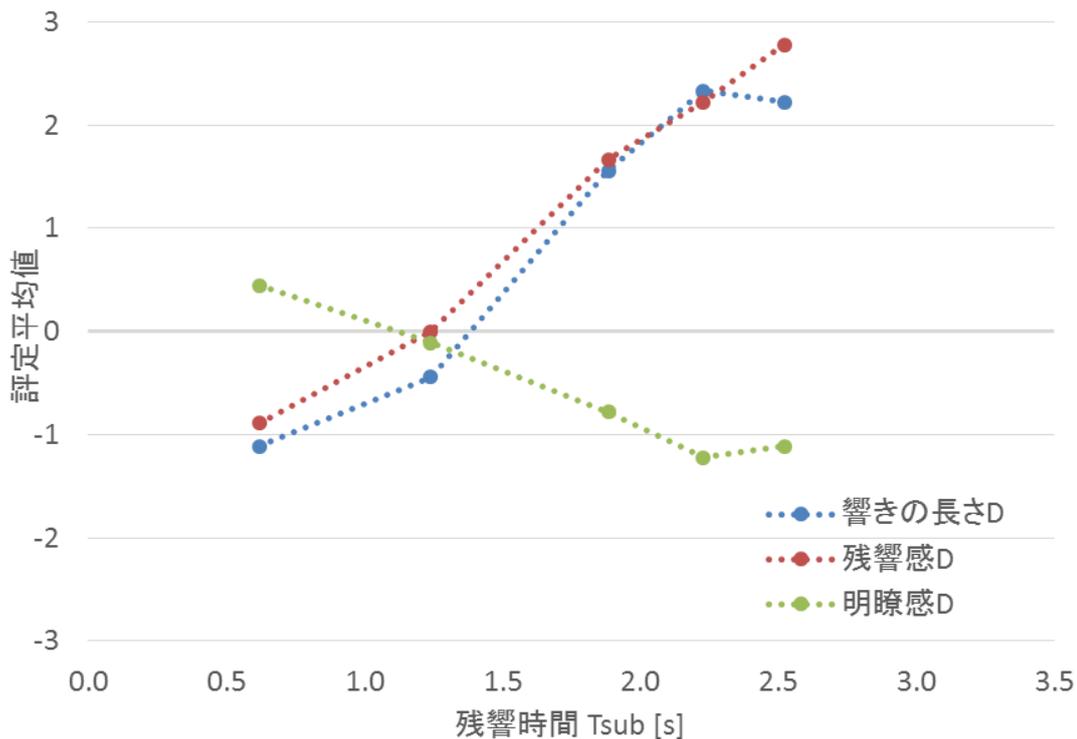


図 5-14 シングルモード提示時の空間 D の評定平均値（残響時間： T_{sub} 、d4、d5 を除外）

5-4-1-2 マルチモード提示時の聴覚印象の評価結果

残響時間として T_{sub} を採用した場合の視聴覚刺激のマルチモード提示時の主観聴覚印象の評定平均値のグラフを図 5-15 ~ 17 に示す。

図 5-15 に示す空間 B を視覚刺激とした場合の聴覚印象の評価に関しては、残響時間に沿って「響きの長さ」・「残響感」が大きくなっていき、反対に「明瞭感」は小さくなっていくという従来の実験結果と同様の結果が得られた。同様にして違和感についても従来の実験結果と同様の結果が得られ、予想残響時間に近い $T_{sub} = 2.05$ [s] 付近で最も違和感が小さく、それよりも残響時間の短い場合違和感が大きくなる様子が見て取れる。また、予想残響時間以上の残響時間に関しては、許容される傾向にある。

図 5-16 に示す空間 D を視覚刺激とした場合の聴覚印象の評価に関しては、図 5-12 のシングルモード提示時の評価結果よりも更に、残響時間 T_{sub} の値が近い聴覚刺激 d2 と d4、d5 と d6 のそれぞれの間で評定値の変動が大きくなっている。そこで、図 5-14 と同様に、聴覚刺激 d4、d5 を除いた場合の評定平均値のグラフを図 5-17 に示した。この図を見ると、「響きの長さ」・「残響感」は従来の実験結果と同様の結果が得られたが、「明瞭感」に関しては、残響時間に関わらず評定値がほぼ一定であり、残響時間が一番長い聴覚刺激 d7 で急激に評定値が小さくなっている。また、容積の大きい空間 B とは異なり、残響時間が短すぎる場合、長すぎる場合の両方で違和感が生じていることが分かる。

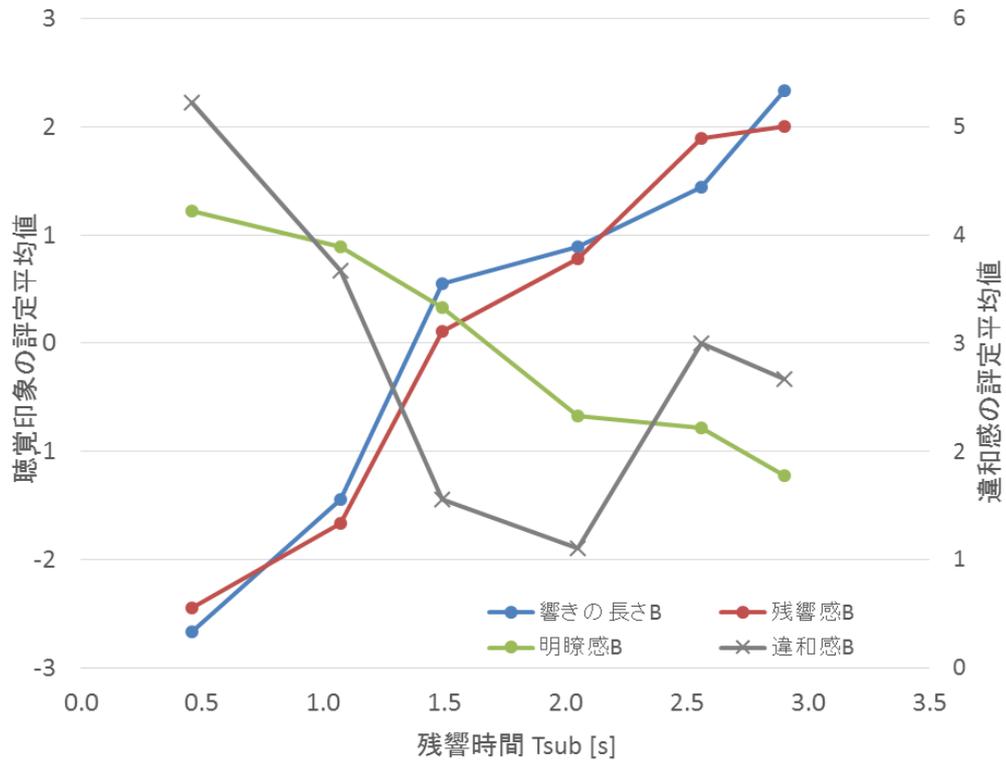


図 5-15 マルチモード提示時の空間 B の評定平均値 (残響時間 : T_{sub})

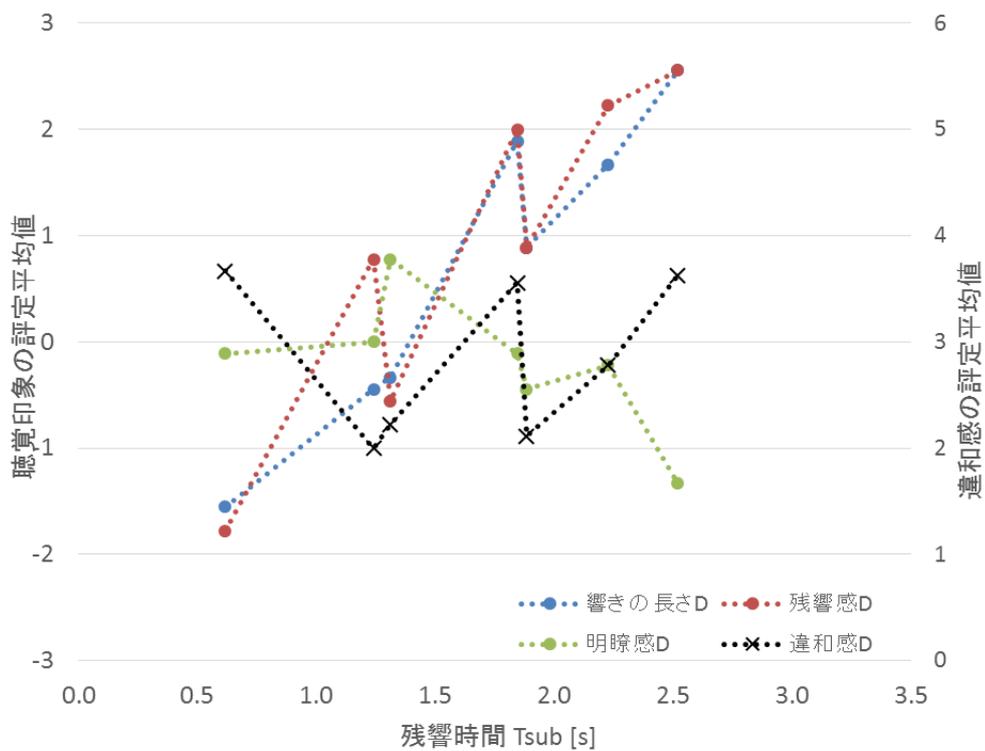


図 5-16 マルチモード提示時の空間 D の評定平均値 (残響時間 : T_{sub})

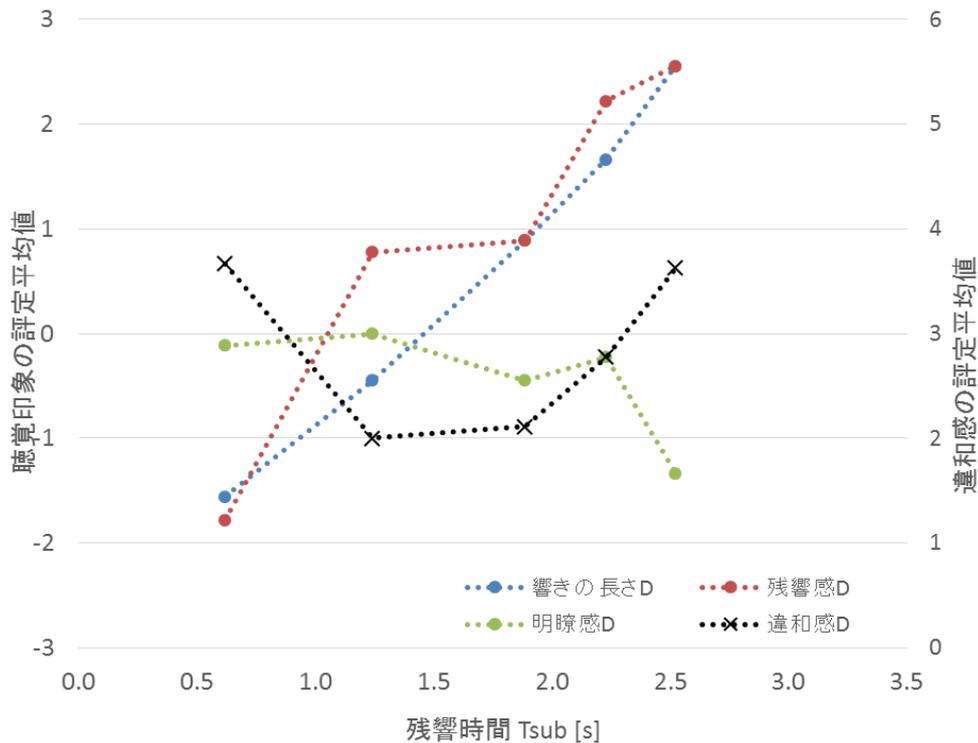


図 5-17 シングルモード提示時の空間 D の評定平均値（残響時間：T_{sub}、d4, d5 を除外）

5-4-1-3 モード間の聴覚印象の評価結果の比較

図 5-18 ~ 20 に、残響時間として T_{sub} を採用した場合のモード毎の各聴覚印象の評定平均値を示す。図中では、実線で空間 B、破線で空間 D の評定平均値を示し、黒色がマルチモード提示時、青色・赤色・黄緑色のそれぞれがシングルモード提示時の評定平均値であることを示している。また、図中では聴覚刺激 d4, d5 を除外している。

全体的に、どの評価項目に関しても、各空間ともモード間の評定値差はほとんどなく、提示刺激のマルチモーダル化による影響は小さかったと思われる。

図 5-18 の「響きの長さ」と図 5-19 の「残響感」に関しては、空間 B においては従来の実験結果と同様に、シングルモード提示時よりマルチモード提示時の評定値の方が僅かながら大きい場合が多い。一方で空間 D においては従来の実験結果と異なり、シングルモード提示時よりマルチモード提示時の評定値の方が僅かながら小さい場合がある。

一方で図 5-20 の「明瞭感」に関しては、空間 B においては従来の実験結果と異なり、シングルモード提示時よりマルチモード提示時の評定値の方が僅かながら小さい場合が多い。空間 D においては従来の実験結果と同様に、シングルモード提示時よりマルチモード提示時の評定値の方が僅かながら大きい場合が見られた。このような評価がなされた明確な要因は不明である。

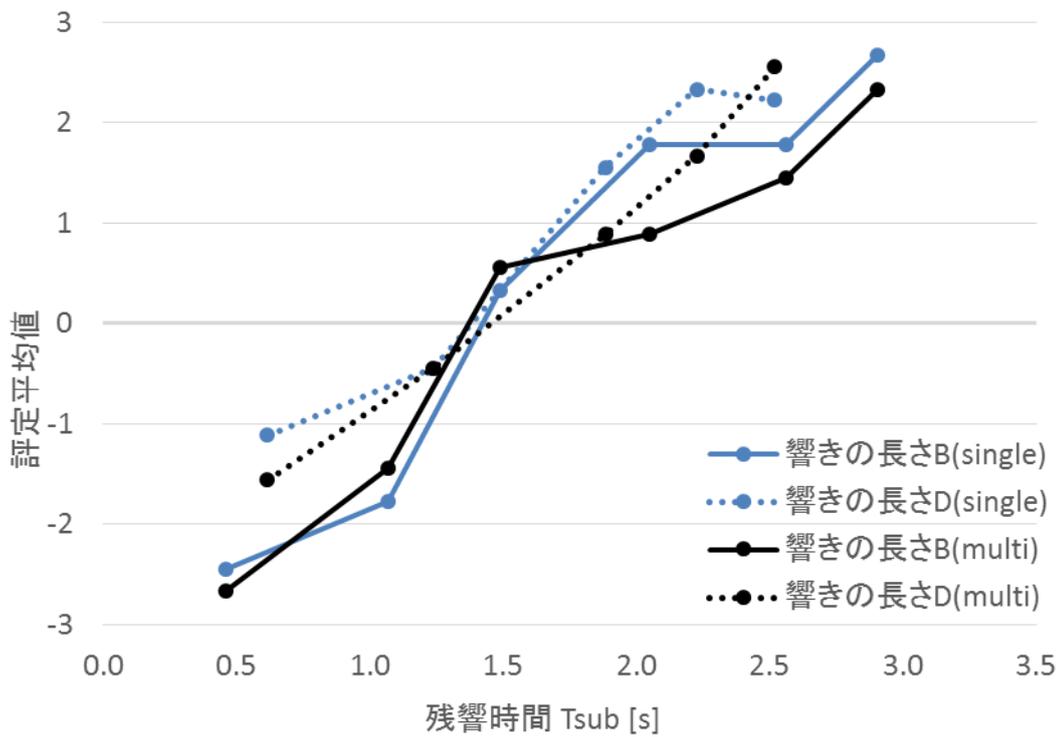


図 5-18 モード毎の「響きの長さ」の評定平均値の比較（残響時間： T_{sub} 、d4、d5 を除外）

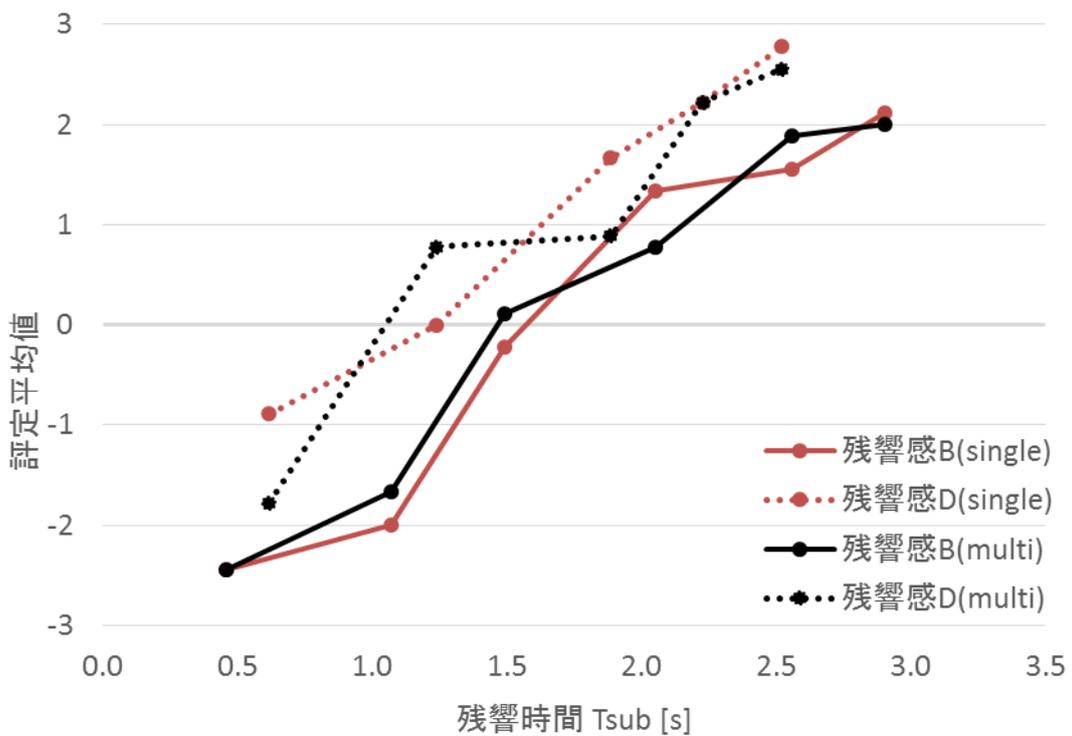


図 5-19 モード毎の「残響感」の評定平均値の比較（残響時間： T_{sub} 、d4、d5 を除外）

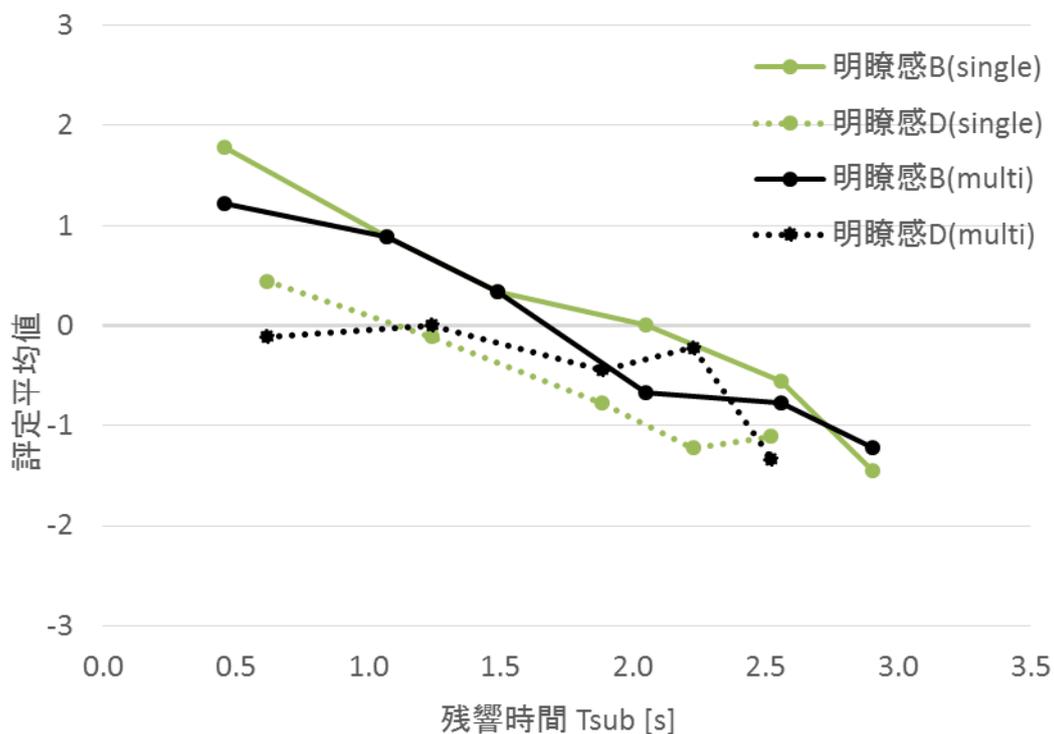


図 5-20 モード毎の「明瞭感」の評定平均値の比較（残響時間： T_{sub} 、d4, d5 を除外）

5-4-1-4 違和感とマルチモード化に関する評定倍率の関係

更に、違和感について考察を深めるため、空間毎の響きの印象のシングルモード提示に対するマルチモード提示時の主観評価の評定倍率と違和感の評定平均値をまとめて図 5-21 ~ 22 に示す。図中の垂線は、各空間の予想残響時間である。

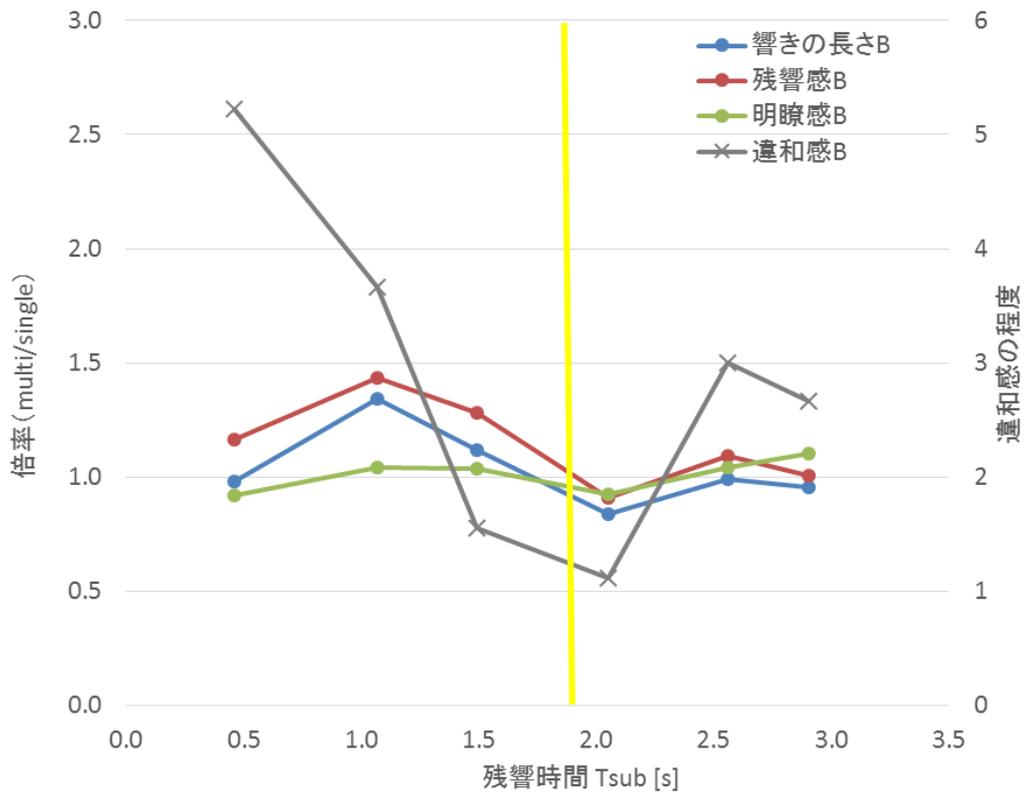


図 5-21 空間 B の違和感と評定倍率の関係 (残響時間 : T_{sub})

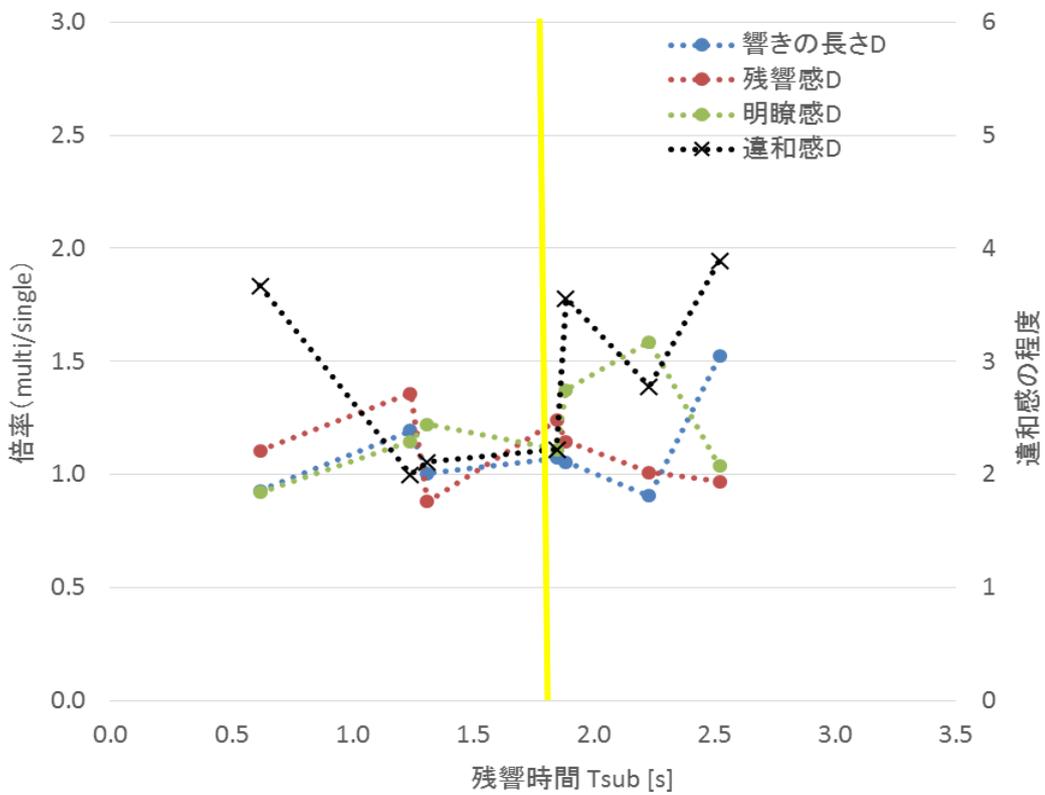


図 5-22 空間 D の違和感と評定倍率の関係 (残響時間 : T_{sub})

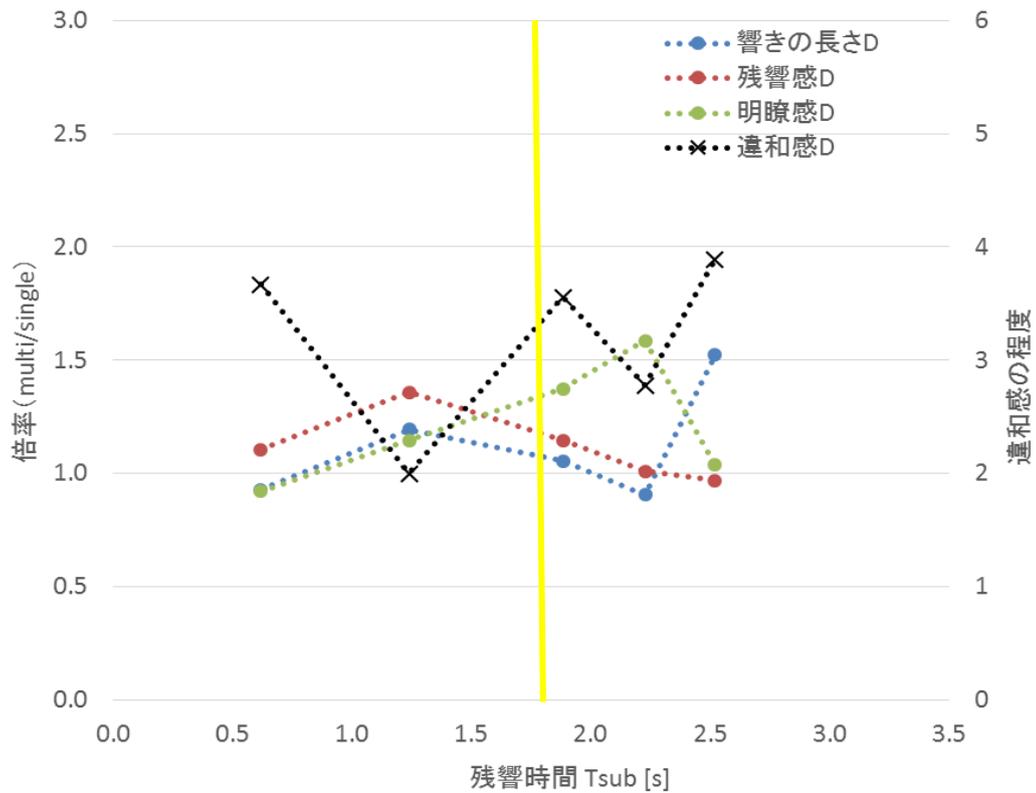


図 5-23 空間 D の違和感と評定倍率の関係（残響時間： T_{sub} 、d4, d5 を除外）

図 5-21 に示した空間 B に関しては、残響時間が 1.0 s 以下の場合に特に違和感が大きくなっている。当然ながら、予想残響時間に近い残響時間をもつ聴覚刺激 b3, b4 で最も違和感が小さくなる。一方で、それよりも長い残響時間をもつ聴覚刺激は、許容される傾向にある。違和感の評価のおおよその傾向は、第 3 章における実験結果にはほぼ等しいと言えよう。また、「響きの長さ」と「残響感」の倍率の変動傾向は近似しており、提示刺激のマルチモーダル化、つまり聴覚刺激に視覚刺激が付加することによってやや残響が長く・豊かに感じられていることが分かる。一方で「明瞭感」は評定倍率の値は 1.0 付近でほぼ一定であり、提示刺激のマルチモーダル化による影響はほとんど見られない。

図 5-22 に示した空間 D に関しては、やはり残響時間 T_{sub} の値が近い聴覚刺激 d2 と d4, d5 と d6 のそれぞれの間で評定値の差が生じたため、聴覚刺激 d4, d5 を除いた場合の評定平均値のグラフを図 5-23 に示した。最も違和感が小さい聴覚刺激は d2 であり、それ以外の聴覚刺激においては、それがたとえ空間 D の実際の響きであっても、違和感が生じたと思われる。空間 D は空間 B と比べて容積や客席数などが明らかに小規模であり、被験者らは予想残響時間を約 1.8 s としたものの、広さなどの視覚的な情報が聴覚印象の判断を曖昧にし、聴覚印象の評価に影響を及ぼした可能性があるが、より詳細に関しては今後の検討課題とする。

5-5 小括

本章では、残響時間の異なる聴覚刺激に用途の同じで容積などが異なる2種類の視覚刺激が加わることによる主観聴覚印象に対する影響とその程度、及びそれらと被験者が抱く違和感の程度との関係性について、様々な分析を通じて検討した。

聴覚刺激の残響時間としては、後期残響が聴覚印象を左右することを考慮し、 T_c ではなく T_{sub} を採用したほうがより適切である。

聴覚刺激の作成の際、元々の残響時間から長くする場合と短くする場合では波形編集方法が異なるため、聴覚印象の評価に影響するような響きの変質が生じていないかどうか、試聴を繰り返して確認を行うことが重要である。

今までの実験結果と同様、予想残響時間と実際の残響時間のギャップが小さいと、違和感があまり生じないことが分かった。しかしながら、容積の大きい空間 B に関しては予想残響時間以上の残響時間が許容される傾向がある一方で、容積の小さい空間 D に関しては予想残響時間以上の残響時間は違和感が大きくなる傾向が見られた。

本実験においては、提示刺激のマルチモーダル化による聴覚印象の評価にはあまり影響が見られなかった。

第4章の実験結果と比較すると、おおよその評価傾向は一致していたが、異なる傾向が見られる箇所も存在した。その原因を明らかにするため、更に詳細な検討を行う予定である。

第 6 章

結論

6-1 モード変化による視聴覚印象の相互関係

第2章から第5章に渡って、視聴覚刺激のシングルモード提示・マルチモード提示の実験及び分析を行い、提示刺激のマルチモーダル化による影響について検討を重ねてきた。

第2章から第4章にかけては、聴覚刺激のシングルモード提示時の評定値と視聴覚刺激のマルチモード提示時の評定値を比較するため、後者を前者で除した値を評定倍率として表現した。提示刺激のマルチモーダル化によって、視覚刺激によらず「響きの長さ」はより長く、「残響感」はより豊かに評価される傾向が見られた。「明瞭感」に関しては視覚刺激によって評価が異なり、統一的な評価傾向は見られなかったものの、建築空間における人々の主観印象に対して視覚情報が聴覚の主観印象に影響を及ぼす可能性があることが示唆された。

第5章で報告した実験結果においては、提示刺激のマルチモーダル化による聴覚印象の評価にはあまり影響が見られなかったが、これについては、聴覚刺激の作成時に、残響時間を第4章までの T_{sub} ではなく、残響曲線における 30dB の減衰区間 (-1 dB ~ -31 dB) を自ら設定した T_c を基準にしたことなどが影響している可能性もある。

6-2 視聴覚刺激のマルチモード提示時に生じる違和感

第3章から第5章に渡る実験の提示刺激として、本来の視覚情報と聴覚情報の組み合わせと、本来とは異なる組み合わせを用意した。その結果、被験者に違和感を抱かせる刺激の組み合わせが存在することが分かり、その違和感の程度について測定を行い、更に違和感の程度と他の分析結果との関連性について検討を行った。

違和感に最も影響すると思われるのは被験者の視覚刺激の空間の予想残響時間である。視覚刺激のみの提示でイメージした予想残響時間と、視覚刺激の空間のもつ実際の残響時間のギャップが大きいと、違和感が大きくなる。つまり、聴覚印象が視覚印象に影響される傾向が見られ、人間は視覚優位の判断を下すという従来知見に従う実験結果が得られたと言える。しかしながら、特に普段音を集中して聴く機会の少ない建築空間では、残響時間の予測が困難であったと推察され、被験者の主観聴覚印象の評価のバラつきが大きくなるのが問題となる。

また、第5章では残響時間がほぼ同じである2つのホール空間を対象とした主観評価実験を行った結果を報告したが、容積の大きい空間 B に関しては予想残響時間以上の残響時間が許容される傾向がある一方で、容積の小さい空間 D に関しては予想残響時間以上の残響時間は違和感が大きくなる傾向が見られた。このように、視覚的な情報によっても主観聴覚印象の評価に違いが生じる可能性が示唆された。

更に、違和感の程度と視聴覚刺激に対する主観評価との間の関係性については、主に「広さ」などの空間感覚が影響すると思われるが、明らかな関係性を見出すには至っていない。

6-3 総括

これらの実験を行い、その結果を分析することで、建築空間において人々が抱く視覚と聴覚に関する主観印象の相互関係を詳細に検討してきた。被験者の視覚・聴覚に関する主観評価の傾向は提示刺激によって異なる場合も多いが、響きの長さや残響感の評価値が聴覚刺激の残響時間の増加に伴って大きくなるなど、一部の関係性も明らかになってきた。

特に、提示刺激のマルチモーダル化によって主観印象が変化すること、視聴覚刺激の組み合わせによって、違和感を生じさせる空間の存在が明らかにされた。違和感に関しては、視覚刺激と聴覚刺激を同時に提示した際の音響と視覚の異なる物理量間で生じるものと考えている。違和感はいくまで主観であるが、それは印象評価の最終的なアウトプットの際に生じるもの、つまり、最終的な評価の前の段階に「広さ」や「響きの長さ」、「明瞭感」などその他の様々な主観評価を総合した結果生じていると思われる。ゆえに、違和感が生じる提示刺激の組合せを抽出し、その刺激の様々な音響・視覚のパラメータ（物理量）を参考にしながら分析を行うことで、空間毎にどのような状況で違和感が発生し得るかを特定することができ、音響的・建築的な実設計に活かせる知見が得られると考えている。

今後は、提示刺激のマルチモーダル化による主観印象の変化の方向や大きさについて様々な観点から検討するため、実験に用いる視覚刺激と聴覚刺激は、空間の使用用途や容積などといった様々な要素毎に対象を絞って選定されることが効果的であると考えている。また、提示刺激のマルチモーダル化による各種主観印象の変化を定量的に表現する（例えば、「響きの長さ」の評定倍率がこれだけ大きくなると、実際に残響時間が何秒長くなる、など）ことで、実務設計に応用できるようにしたいと考えている。

更に、今までは各種主観印象の変化を聴覚刺激の残響時間と照らし合わせながら検討を行ってきたが、今後は他の音響パラメータ（聴覚刺激の提示をステレオ再生にした場合の拡がり感や、明瞭感に関わる C_{80} など）を用いた検討も行いたい。

また、これまでの実験で用いた聴覚刺激は、視覚刺激の空間の用途に関わらず、全てインパルス応答の畳み込み音場であり、声を出したときの響きを聴く・手を叩いたときの響きなどの不連続なもので、被験者によって聴覚刺激の受け取り方は様々であった。そこで、今後は聴覚刺激として連続的な音、つまり音楽刺激（様々な残響時間をもつインパルス応答に無響音楽を畳み込んだもの）を用いる実験も実施する予定であり、主観聴覚印象に対する視覚刺激の空間の用途などによる影響について分析していく。

更に、視覚刺激に関しては、視覚的な情報を物理量で表現することが必須であると考えられている。まずは、今まで用いてきた視覚刺激の基となる素材の写真画像を解析し、視覚物理量を得ることから取り組み始める予定である。その暁には、視覚刺激・聴覚刺激の物理量と各種主観評価の関係性について考察すべきであると考えている。また、その後の発展的な試みとしては視覚刺激にCGの利用することも視野に入れている。

被験者の空間経験については、別途議論が必要であると考えている。視覚刺激の空間を実際に利用・経験したことがある被験者とそうでない被験者では視覚・聴覚の主観印象評価に差は生じるのかどうか、視覚刺激の空間を利用・経験したことがあっても被験者はその視覚的・聴覚的イメージを正確に記憶しているのかどうか、またそのイメージが視覚・聴覚の主観印象評価に影響するかどうかなど多くの疑問はあるが、それらについて検討するには至っていない。提示刺激の素材として様々な空間を用意し、実験の実施に際して被験者の属性をある程度限定したうえでそれに合わせた刺激を用いるなど、工夫が必要であると考えている。

研究を進めるにあたり、多くの方々のご指導とご協力を賜りました。

三重大学大学院工学研究科建築学専攻准教授 寺島貴根先生には、本研究を進めるにあたり大変貴重なご指導を賜りました。厚くお礼申し上げます。

また、永井久也教授、北野博亮准教授には本研究の副査として熱心にご指導を頂きました。厚くお礼申し上げます。

本研究における視聴覚主観評価実験に、多くの方々に被験者としてご協力頂きました。記して感謝の意を申し上げます。

共に研究を進めてきた寺島研究室の皆様には、大変お世話になりました。感謝致します。

その他、多くの方のご協力によって、この論文を完成させることができました。改めて感謝の意を申し上げます。

1. 岩宮眞一郎：“音の生態学 ―音と人間のかかわり―”、コロナ者、2000.
2. 岩宮眞一郎：“音楽と映像のマルチモーダル・コミュニケーション”、九州大学出版会、2000.
3. 難波精一郎 他：“音の評価のための心理学的測定法”、コロナ社、1998.
4. 重野純：“音の世界の心理学”、ナカニシヤ出版、2003.
5. 淀川英司 他：“視聴覚の認知科学”、電子情報通信学会、1998.
6. 中村雄二郎：“共通感覚論”、岩波書店、2000.
7. 山崎浩一：“とても基本的な学習心理学”、おうふう、2013.
8. 南博文：“環境心理学の新しいかたち”、誠信書房、2006.
9. Densil Cabrera et al.：“AUDITORY VERSUS VISUAL SPATIAL IMPRESSION: A STUDY OF TWO AUDITORIA” , Proceeding of ICAD 04-Tenth Meeting of the International Conference on Auditory Display, 2004.
10. 市川周平 他：“視聴覚刺激に対する評価および情動反応における視覚と聴覚の関係性” Japanese Journal of Research on Emotions Vol. 18、2011.
11. 堀内宏剛 他：“建築内部における視覚情報と聴覚情報の同時提示に対する主観印象評価に関する研究”、2011.
12. 岡井映里香 他：“様々な建築・都市空間における視覚情報と音場の主観評価について”、2011.
13. 徳永泰伸 他：“室内における視覚情報が残響時間の予想値に対して与える影響 -視覚と聴覚の相互作用を効果的に用いた建築音響設計に関する基礎的研究-”、2009.
14. 若山滋 他：“近代建築の視覚的印象による意匠特性の研究”、1986

15. 藤本隆史 他：“視覚情報が空間認知に関わる音響パラメータに与える影響 -視覚と聴覚の相互作用を考慮した音響設計に関する基礎的研究-”、日本建築学会東海支部研究報告集 43 号、pp.341-344、2005.
16. 和仁優子 他：“建築空間に対する視聴覚の主観印象に及ぼす視覚情報と音場の影響”、2013.
17. 石川あゆみ 他：“室内音場の主観印象に対する視覚刺激と残響時間の影響、日本建築学会 2014 年度大会（近畿）学術講演梗概集”、44043、pp.99-100、2014.
18. Ayumi ISHIKAWA et al., “Effect of Visual Stimulus on Subjective Impression of Indoor Sound Fields with Various Reverberation Times” , Proceedings of Inter-noise 2014, p.133, Melbourne, Australia, 2014.
19. 石川あゆみ 他：“建築空間における視聴覚情報の主観印象の関連性の研究”、日本音響学会東海支部建築音響・騒音・振動関連若手研究発表会梗概集、p.3、2014.
20. 石川あゆみ 他：“視覚刺激の提示の有無による室内音場の主観印象の変化”、日本建築学会東海支部学術研究発表会梗概集 第 53 号、308、pp.325-328、2015.