

令和 2 年度

修士論文

建築空間における視覚情報が
音の広がり感（ASW）に与える影響

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

平岡千春

目次

第1章	序論	1
1-1	研究背景	2
1-2	研究目的	3
1-3	既往研究	3
1-4	研究概要	5
1-5	実験概要	5
1-5-1	刺激として用いる空間	5
1-5-2	視覚刺激	5
1-5-3	聴覚刺激	6
1-5-4	主観評価法	6
1-5-5	被験者	7
第2章	バイノーラル録音によるヘッドホン提示での ASW の主観評価実験	8
2-1	研究概要	9
2-2	実験概要	9
2-2-1	実験システム	9
2-2-2	対象空間と視覚刺激	9
2-2-3	聴覚刺激	10
2-2-4	実験手順	12
2-3	実験結果と分析	13
2-3-1	一対比較法	13
2-3-2	評定尺度法	16
2-3-3	一対比較法と評定尺度法の比較	20
2-4	小括	20
第3章	スピーカー提示による ASW の主観評価実験	21
3-1	研究概要	22
3-2	実験概要	22
3-2-1	実験システム	22
3-2-2	対象空間と視覚刺激	22
3-2-3	聴覚刺激	23
3-2-4	実験手順	25
3-3	実験結果と分析	25
3-3-1	実験Ⅰ・実験Ⅲ	25

3-3-2	実験Ⅱ	28
3-3-3	一対比較法と評定尺度法の比較	33
3-4	聴覚刺激の提示方法の違いによる比較・分析	34
3-4-1	一対比較法実験での結果比較	34
3-4-2	評定尺度法実験での比較	36
3-4-3	一対比較法と評定尺度法の比較	37
3-5	小括	38
第4章	<u>仮想環境（VR）におけるヘッドホン提示による ASW の主観評価実験</u>	39
4-1	研究概要	40
4-2	実験概要	40
4-2-1	実験システム	40
4-2-2	対象空間と視覚刺激	41
4-2-3	聴覚刺激	42
4-2-4	実験手順	44
4-2-4-1	広がり感の同定実験	44
4-2-4-2	広がり感の主観評価実験	45
4-3	実験結果と分析	45
4-3-1	広がり感の同定実験	45
4-3-2	広がり感の主観評価実験	48
4-4	広がり感の予測値と評定値の関係	58
4-5	同定実験による予測値と主観評価実験の モード間の大小関係から推定した予測値の関係	65
4-6	小括	66
第5章	<u>仮想環境（VR）におけるスピーカー提示による ASW の再実験</u>	67
5-1	研究概要	68
5-2	実験概要	68
5-2-1	実験システム	68
5-2-2	対象空間と視覚刺激	69
5-2-3	聴覚刺激	70
5-2-4	実験手順	72
5-3	実験結果と分析	72
5-4	予測値と評定値の関係	77
5-5	小括	79

第6章 結論 80

謝辞 83

記号一覧 84

参考文献 85

第 1 章

序論

1-1 研究背景

私達が生活する建築や都市において、多種多様な空間が存在し、多種多様な音場が存在する。音場は広さや形状、材質といった空間の仕様によって物理的に決定され、人間はこれらの関係性を経験的にある程度理解し、本能的に感じ取っている。一方、人間は視覚、聴覚、味覚、触覚、嗅覚の5感を通して環境の情報を得ており、特に視覚情報が多くを占め、次に聴覚刺激が大きい。それゆえ音の印象も聴覚のみでは決定されず、聴覚による情報判断は視覚情報によって補完され、影響を受けている。マガーク効果や腹話術効果に挙げられるように、視聴覚統合の条件下においては、視覚的に予期されるものと異なる聴覚刺激を受けた場合、視覚情報に合わせるように聴覚印象を補正するメカニズムが存在する。これは音場の印象においても当てはまると考えられ、視覚を通して得られた空間情報によって、音場の印象も影響を受けると考えられる。しかし音場の印象においては視覚情報の影響や効果についての研究はあまりなされていない。音場の印象について音の大きさ（ラウドネス）については研究事例があるものの、残響感や広がり感については研究がなされていない。現状では建築空間の内観など視覚情報が残響感に与える影響の存在は、石川らの研究[1]によって明らかにされているが、その定量化にはまだ未着手の状態であり、又広がり感においては影響の存在・定量化ともに研究例がない。建築空間の内観などの視覚情報は音場の印象に影響を与えており、その大きさが定量化できれば、建築設計や音響設計に生かすことが可能である。例えば、適切な広がり感を定量化し、それを体感できるような内観の意匠デザインを行うことで、同じ音場であっても評価の高いコンサートホールを作ることが可能なのではないかと考え、本研究に着手した。

コンサートホールのような音楽空間の音響設計においては音像の広がり感は重要な要件の一つである。広がり感は見かけの音源の幅（ASW）と音に包まれた感じ（LEV）に分類することができ、本研究では見かけの音源の幅（ASW）について検討する。ここで、ASWとは「直接音の到来方向に直接音と時間的にも空間的にも融合して知覚される音像の大きさ」と定義される。[3]

ASW に影響を及ぼす要因として音圧レベル、周波数成分の他に初期反射音の到来方向が挙げられ、これによって変化する指標の両耳間相互相関関数（IACC）、初期側方エネルギー率（LF）が挙げられる。音響設計においては初期反射音の到来方向、すなわち IACC と LF のみ自由度があり、他の要素は自ずと決定されるものであるため本研究では IACC と LF の値が変化するような刺激を作成し、実験を行う。IACC は 0 から 1 の値で表され、1 に近づくほど両耳間の相関度が高いことを示している。IACC においては値が小さくなるほど、LF では値が大きくなるほど ASW は大きくなる。LF・IACC について、詳しくは記号一覧に記載されている。

ここで言う広がり感は「音像の広がり感」であり、「ASW」を指している。以下「広がり感」で統一する。

1-2 研究目的

本研究では建築空間において知覚できる空間の広さや形状、材質などと言った視覚を通して得られる情報が、その空間の音場に対して感じられる広がり感にどのような影響を与えるのかを明らかにすることを目的とする。

1-3 既往研究

本論文に関連する主な既往研究を以下に列挙する。

○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

映像と音楽を組み合わせた時の効果について論じている。

オーディオ・ヴィジュアル・メディアを通しての音楽聴取行動における視覚と聴覚の相互作用について、SD 法による印象評定実験を行った。視聴覚素材としてライブ、環境ビデオ、アニメーションなど音と映像の調和が図られたものと、それらの音と映像の同期をずらしたり、ミスマッチに組み合わせて調和を崩したものをを用いた。提示方法として、音楽のみ、映像のみの単独提示、音と映像の両方提示を行い、それぞれの音楽再生音、映像の印象評価をさせ、因子分析を用いて考察している。単独提示と両方提示の印象因子得点の変化から、視覚と聴覚の共鳴現象がみられた。

○室の内観と音場が与える主観印象における視聴覚様相間の相互影響について

川合 正浩（三重大学） 他

建築空間において、提示条件の変化による主観評価の変化や、「空間の明るさ」と「響きの明るさ」などの、視覚と聴覚の通様相性をもつ主観評価項目の相互作用について調べた。

実験はスクリーンによる視覚刺激提示とスピーカによる聴覚刺激提示から成り立つ。視覚刺激には用途の異なる複数の空間を用い、実験によっては視覚刺激の照度を3段階に変化させたものも使用した。聴覚刺激には実空間で録音した実測および実測インパルス応答を基準に残響時間を変化させた疑似インパルス応答、それらを楽音のドライソースに畳み込んだものなどを用いた。主観評価には評価対象を絶対的に評価するカテゴリー尺度法、相対的に評価するシェッフェの一対比較法のどちらかを用いている。

主観評価について、3次元の量的イメージを伴う聴覚印象項目「残響感」が豊かに評価されるほど、視覚的に広い空間であると判断される傾向がみられた。視覚と聴覚に通様相生をもつ「空間の明るさ」と「響きの明るさ」、「空間の暖かさ」と「響きの暖かさ」などの主観評価項目の相互影響について、「空間の明るさ」が明るいとは評価されると、「響きの明るさ」が明るいとは評価されるような、視聴覚間で影響を及ぼし合う共鳴現象がみられた。これらは視覚刺激の照度の違いによる影響である。また、同じ残響時間でも、聴覚刺激の与え方が異なると、同時提示化による主観印象の変化の程度に差が生じた。

○建築空間の内観に対する視覚印象と音場による聴覚印象の相互作用に関する基礎的研究

石川 あゆみ（三重大学） 他

建築空間における聴覚刺激と視覚刺激を様々な刺激の提示条件においてそれらの刺激に対する在室者の主観印象を SD 法によって測定し、その結果を T 検定や因子分析を用いて分析することで、聴覚刺激に対する在室者の主観印象に及ぼす視覚刺激の影響を調べた。室内で発生する任意音またはインパルス応答信号によって在室者が能動的に感じ取る総合的な室の響きの印象を対象とし、視覚情報から室内全体の状況を把握できるように視覚刺激として QuickTimeVR 形式の画像を用いた。実験の結果、被験者は視覚刺激に対して比較的実測値に近い残響時間を予想することができること、聴覚印象は視覚刺激を伴うと変化し、特に残響感の印象がより“豊か”に感じられるようになること、聴覚刺激の残響時間と視覚刺激による予想残響時間との差が大きい場合に違和感が大きくなることなどが分かった。

○建築空間の内観に対する視覚印象と音場による聴覚印象の相互作用に関する基礎的研究

竹山 由里子（三重大学） 他

本研究は、視覚と聴覚の相互関係性や主観印象に影響を及ぼす要素について検討している。既往研究では、視聴覚刺激の提示にはスクリーン映写とスピーカ再生を用いてきたが、被験者の空間把握の質や程度において現実との乖離が懸念された。そこで、ヘッド・マウント・ディスプレイとヘッドフォンを視聴覚刺激提示に用いることで、被験者に対してよりリアリティのある刺激を提示でき、精度の高い心理量測定ができると考えた。結果として、聴覚印象の評価に関しては新旧及び実空間いずれの実験方法による主観評価の間に有意差はほとんどみられなかった。しかし、「広さ」・「立体感」・「天井の高さ」などの空間の容積に関わる視覚印象項目に関しては、実空間を含む他の提示方法では残響時間が長くなるにつれて評価定平均値が高くなる有意な上昇傾向が見られた。また、既往の研究で取り扱われなかった音場の明瞭感について視聴覚相互作用に関する実験を新しい実験方法を用いて行った。音場主観である響きの「明瞭感」に対応する客観指標を変化させバリエーションを持たせたインパルス応答を多数作成し、音声や音楽のドライソースに畳みこみ演算した聴覚刺激を用いた。概ね明瞭感も視覚と聴覚の組み合わせの整合性に関わると思われる。聴覚刺激に音声を用いた場合は、会話を主な用途とする教室を視覚刺激とした際に視聴覚統合が起りやすいといった、聴覚刺激の種類と建築空間の用途の関連性も視聴覚統合が起こるか否かに関わる可能性が示唆された。

1-4 研究概要

本研究では、実験室において仮想の室内空間の内観（視覚刺激）と音場（聴覚刺激）を被験者に提示して広がり感を測定する主観評価実験を行い、視覚情報が音の広がり感に与える影響を明らかにする。視覚刺激には実空間の内観パノラマ画像、聴覚刺激には実空間のインパルス応答（以下、IR）を実験用に加工した信号にドライソース音源を畳み込んだ楽音を使用する。刺激の提示方法として、視覚刺激はヘッド・マウント・ディスプレイ（以下、HMD）を、聴覚刺激は無響室に配置したスピーカ又はヘッドホンを用いた。また、被験者に対して聴覚刺激のみを提示する条件をシングルモード、視聴覚刺激の両方を提示する条件をマルチモードと呼ぶこととする。本研究ではマルチモードとシングルモードの主観評価結果を比較分析することで、音の広がり感に対する視覚情報の影響の有無とその程度を明らかにし、心理モデル[2]との整合性を検証する。

1-5 実験概要

本節では第2章以降に共通する実験の概要を示す。

1-5-1 刺激として用いる空間

研究対象が「音の広がり感」であるため、刺激として用いる空間は音楽が催されるコンサートホールや多目的ホールとする。空間の特徴による影響も分析できるように、様々な容積、形状や仕上げの空間を選定した。

1-5-2 視覚刺激

本研究の実験では室内の内観パノラマ画像を HMD を通して提示される VR 映像を視覚刺激として使用した。VR 映像とは、映像内のある地点から上下左右 360° を見渡すことができ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、その空間に滞在しているような臨場感のある情報を得ることができる。

室内の内観パノラマ画像は、実空間の3方向を魚眼レンズで撮影し、PTGuiを使用して画像編集したものをつなぎ合わせて作成されたものである。視覚刺激は HMD（HTC 社 VIVE）を用いて、第2章・3章の実験においては、Steam 社のソフトウェア VR Photo Viewer によって映像の再生を行い、第4章・5章では Unity 開発環境において球面背景への投影によって再生した。映像の空間内は無人で、備え付けの備品以外の物品は極力撤去している。また、海外の空間を採用した視覚刺激における映像はオーディオ・イズ社のコンボリューション（畳み込み演算）リバーブ・プラグインである Altiverb 7 に収録されているパノラマ画像を流用した。

1-5-3 聴覚刺激

本研究の実験で提示する聴覚刺激を作成する際に基本とする IR の測定は、視覚刺激に示されるステージ上の中央にある音源位置に 12 面体スピーカを設置し、パノラマ画像が撮影された位置を受音位置とし、騒音計（ONO SOKKI LA-2560）を設置して行われた。12 面体スピーカと騒音計の床面からの高さは、大凡立位の人間の耳の高さである 1.5 m とする。また、海外の空間の基本 IR については Altiverb 7 に収録されている IR のデータを流用した。

音の広がり感は初期反射音の方向により変化する。そのため、本研究の実験では各空間の IR を図 1-1 のように①直接音（0～10ms）と残響音（80ms～）、②第一初期反射音（10～45ms）、③第二初期反射音（45～80ms）の 3 つの信号に分割した。②、③の信号の被験者から見たときの到来（放射）方向を変化させることにより広がり感の異なる音場のバリエーションを作成することができる。分割した IR①～③をそれぞれ楽音のドライソースに畳み込んで、被験者の位置で同時に重ね合わせた信号を聴覚刺激とした。無響室において多数のスピーカを用いて聴覚刺激を提示する場合は、マルチチャンネルのオーディオ・インターフェースとして Syntax 社の FIREFACE 800 を使用した。ヘッドホン再生により聴覚刺激を提示する場合には、無響室で聴覚刺激をスピーカ再生した聴覚刺激を仮想環境においてサラウンド再生された音場を BOSE 社の Quiet Comfort25 を通して被験者に提示した。または分割した IR を被験者の位置で同時に重ね合わせた信号をバイノーラルマイクロホンによってステレオで録音し、録音した IR に楽音のドライソースを畳み込んだ信号をヘッドホン再生により聴覚刺激として提示した。

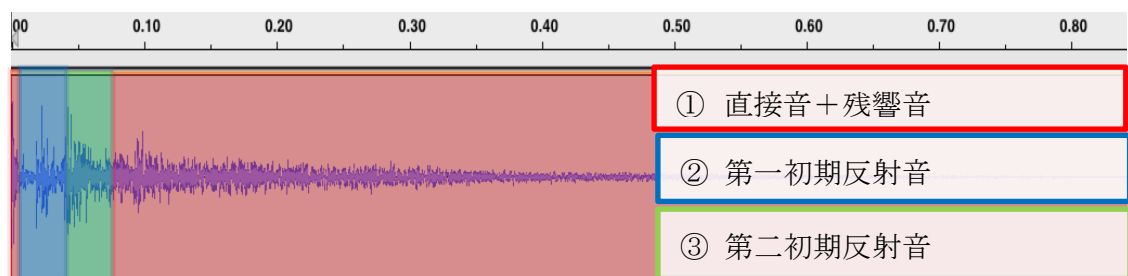


図 1-1 IR の分割図

1-5-4 主観評価法

主観評価の方法には、被験者に刺激対の広がり感の大小関係を回答させる Thurstone の一対比較法（第 2・3 章の実験シリーズのみ）と被験者自身の基準で刺激提示の直後に広がり感の程度を数値で回答させる評定尺度法（すべての実験シリーズ）を用いた。広がり感の程度について第 2・3 章では 7 段階のカテゴリ尺度で、第 4・5 章では、unity 仮想環境上における spread パラメータによって 0～360 までの無段階で回答させた。

1-5-5 被験者

正常な視覚と聴覚をもつ大学生および一般人から採用した。一シリーズの実験において被験者数は 10 名前後であるが、これは統計的に約 50～100 名に対して実験を行った際とほぼ同等の結果を得られるとされている。

第2章

バイノーラル録音によるヘッドホン提示での

ASWの主観評価実験

2-1 研究概要

本章の目的は、身近な 2 つの多目的ホール空間を対象に、HMD を通して視覚刺激を、ヘッドホンを通して聴覚刺激を提示した際の主観評価量を測定し、視覚情報が広がり感に与える影響を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

実験に使用した器具の装着の様子を図 2-1 に示す。



図 2-1 実験の器具を装着した時の状態

HMD は、HDMI や USB ポートおよびハブを通してパソコン (Windows10) に接続され、VR 基本ソフトウェア SteamVR によってコントロールされている。空間内観のパノラマ画像は、SteamVR 上で動く VR Photo Viewer を通して VR 映像に変換され、視覚刺激として被験者に提示される。被験者は仮想的に空間内を 360° 見渡すことができる。一方、ヘッドホンはパソコンのヘッドホンジャックに接続され、聴覚刺激はパソコンに内蔵されている Groove ミュージックを介してステレオ再生される。

2-2-2 視覚刺激

対象とした空間の概要および音響特性を表 2-1 に示す。また、視覚刺激の VR 映像スクリーンショットを図 2-2 に示す。実際には被験者にとって評価し易いように、VR 映像に評価スケールをスーパーインポーズしている。シングルモードにおいては、内観 VR 映像の代わりに無地の灰色映像に評価スケールをスーパーインポーズした映像を被験者に提示した。

表 2-1 対象空間概要及び音響特性(500Hz 基準)

空間名	空間用途	容積 [m ³]	座席数 [席]	T_{30} [s]
A	大学講堂(多目的ホール)	12000	1650	1.4
B	多目的ホール	5200	604	1.8

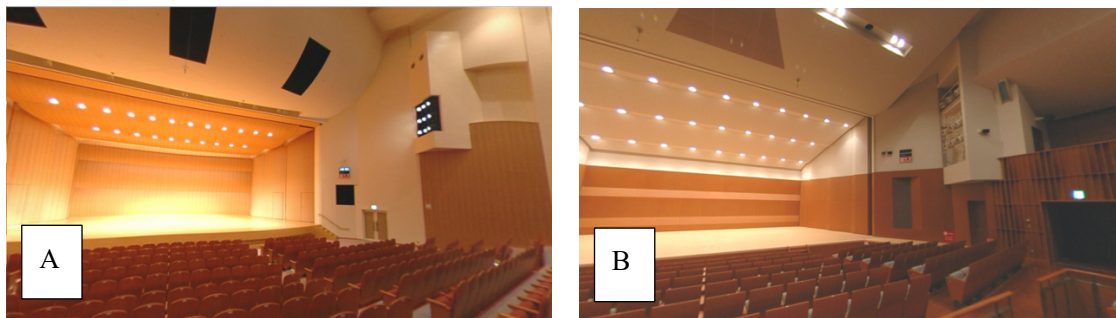


図 2-2 視覚刺激の VR 映像のスクリーンショット

2-2-3 聴覚刺激

聴覚刺激は対象空間の実測 IR を元に以下の手順で無響室にて再生した音場をバイノーラル録音して作成した。実測 IR を①直接音 (0~10ms) と残響音 (80ms~)、②第一初期反射音 (10~45ms)、③第二初期反射音 (45~80ms) の 3 つに分離した信号を図 2-3 のように配置したスピーカーからそれぞれ再生させた。全てのスピーカーは録音位置から等距離であり、①を発するスピーカーを録音位置の正面に固定し、②③を発するスピーカーを左右対称な方位角に設置した。②③のスピーカー配置方位角は $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 75^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$ とした (①~③を全て正面のスピーカーから発する場合を $\pm 0^\circ$ とみなす)。録音者は録音位置でバイノーラルイヤホンをつけた状態で着席し、3 つのスピーカーから発せられた①~③の合成 IR をバイノーラル録音した。スピーカーの中心高さは録音者の耳の位置に、スピーカーの正面は中心を向くように調整した。このようにして作成したバイノーラルの合成 IR による音場の IACC や LF の計算値は表 2-2、表 2-3 の通りであった。また初期反射音の到来方位と IACC または LF の関係を図 2-5 に示す。

作成した IR に対して楽音ドライソース「水上の音楽」(作曲：ヘンデル、DENON オーディオチェック CD より)を畳み込み、聴覚刺激を作成した。作成した聴覚刺激についての名称を表 2-4 に示す。

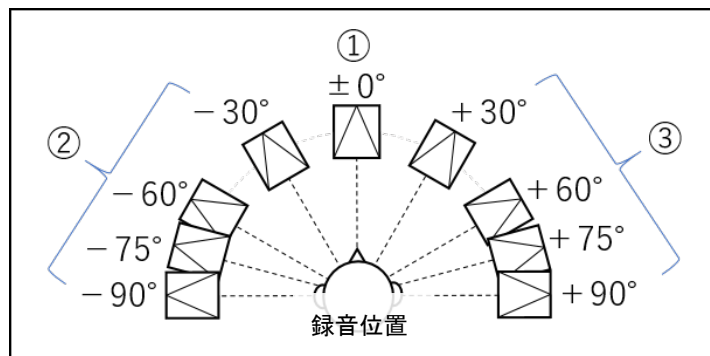


図 2-3 刺激作成におけるスピーカ配置図



図 2-4 刺激作成の写真 ($\pm 30^\circ$)

表 2-2 初期反射音の到来方向と IACC の関係

	$\pm 0^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 60^\circ$	$\pm 75^\circ$	$\pm 90^\circ$
A	0.94	0.60	0.57	0.55	0.50
B	0.93	0.73	0.66	0.67	0.68

表 2-3 初期反射音の到来方向と LF の関係

	$\pm 0^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 60^\circ$	$\pm 75^\circ$	$\pm 90^\circ$
A	0	0.38	0.69	0.73	0.63
B	0	0.41	0.69	0.80	0.78

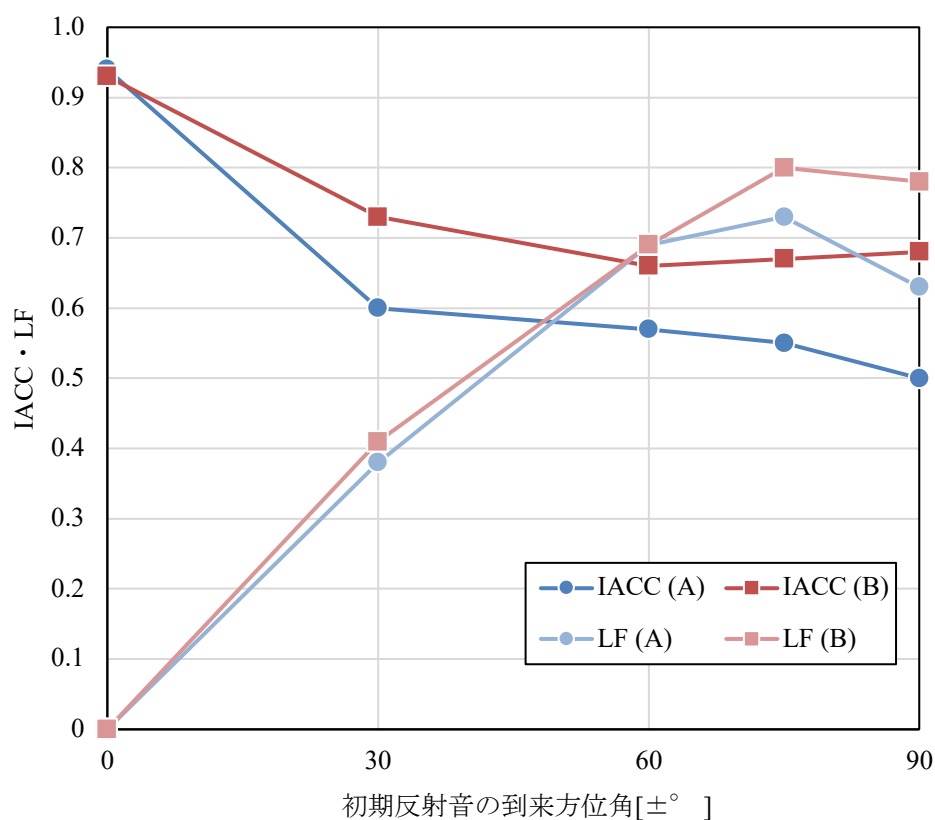


図 2-5 初期反射音の到来方位角と IACC · LF の関係

表 2-4 実験における聴覚刺激の名称

視覚刺激	±0°	±30°	±60°	±75°	±90°
A	a2_0	a2_30	a2_60	a2_75	a2_90
B	b2_0	b2_30	b2_60	b2_75	b2_90

2-2-4 実験手順

主観評価の方法は一対比較法および評定尺度法の二通りで行われた。一対比較法では、視聴覚刺激のすべての刺激対それぞれに対して広がり感の大きいと感じた刺激を被験者に口頭で回答させた。視覚刺激は A、B、聴覚刺激は a2_0、a2_30、a2_90、b2_0、b2_30、b2_90 を使用した。これらの刺激のうち、シングルモードとマルチモードから 2 つを組み合わせランダムな順で提示する。組み合わせの回数はシングルモードについて、A と B それぞれ 3 つずつの 6 つ、マルチモードについても同様に 6 つの計 12 個の刺激を総当りで組み合わせるため合計 66 回行う。

評定尺度法では、全ての視聴覚刺激をランダムな順に提示し、刺激についての主観印象を 7 段階（見かけの音源の幅が小さい (0) ～見かけの音源の幅が大きい (6)）で口頭で

回答させた。VR 画面にスーパーインポーズして提示した評価スケールを図 2-6 に示す。視覚刺激は A,B、聴覚刺激は a_{2_0} 、 a_{2_30} 、 a_{2_60} 、 a_{2_75} 、 a_{2_90} 、 b_{2_0} 、 b_{2_30} 、 b_{2_60} 、 b_{2_75} 、 b_{2_90} の計 10 個を全て使用する。回答の回数はシングルモード 10 個・マルチモード 10 個の計 20 回となる。

音源の見かけの幅						
0	1	2	3	4	5	6
幅が 小さい (低い)	—	—	幅が 中程度	—	—	幅が 大きい (高い)

図 2-6 評価スケール

2-3 実験結果と分析

2-3-1 一対比較法

測定された比較評定値から Thurstone の比較判断の「ケース V の仮定」により算出した刺激間の相対距離を示す。図 2-7 には両空間・両モードにおける全ての聴覚刺激の評定を相対距離で数直線上に示している。この図からはシングルモードにおける b_{2_0} の広がり感が最も小さく、マルチモードにおける b_{2_90} の広がり感が最も大きく評価された。また図 2-8 に横軸にシングルモード、縦軸にマルチモードの値をとってプロットされた点を示す。図 2-8 において空間 B に対する測定値に対応する点は概ね対角線よりも上側に位置し、シングルモードよりもマルチモードの方が高い評価を得られているのがわかる。また、空間 B に対応する点是对角線とほぼ平行に位置していることからシングルモードとマルチモードの印象差は初期反射音の到来方位に関わらず同程度に評価されていることがわかる。空間 A についてはマルチモードにおいて a_{2_90} よりも a_{2_30} に対する評定値が高くなっており、側方エネルギー率や IACC の大小関係から予想される大小関係とは異なっているが、これらの平均値間には統計的な有意差はみられなかった。

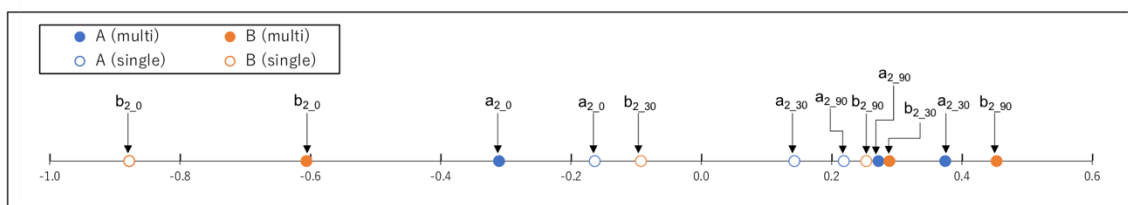


図 2-7 一対比較法による広がり感の評価結果

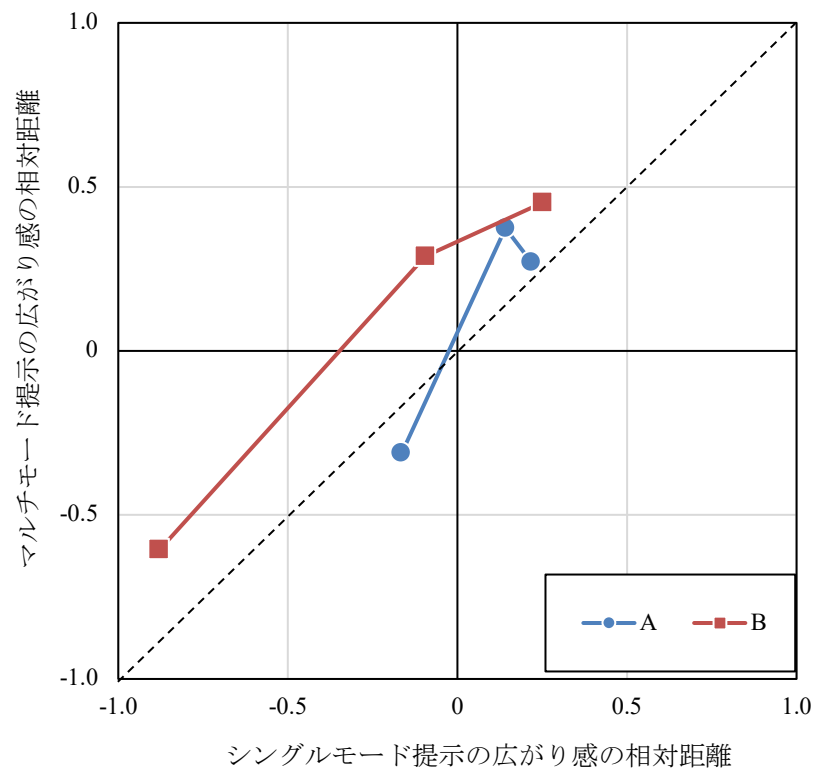


図 2-8 広がり感の相対距離における
シングルモード提示とマルチモード提示の関係

図 2-9 はすべての刺激に対する広がり感の相対距離と IACC の関係、図 2-10 は LF との関係を示している。これらの図より、空間 A, B 共にほとんどの刺激についてマルチモードの方がシングルモードよりも大きな値を示している。また、図 2-9 について IACC が大きくなるほど広がり感の相対距離は小さくなり、図 2-10 について LF が大きくなるほど広がり感の相対距離は大きくなることが示された。

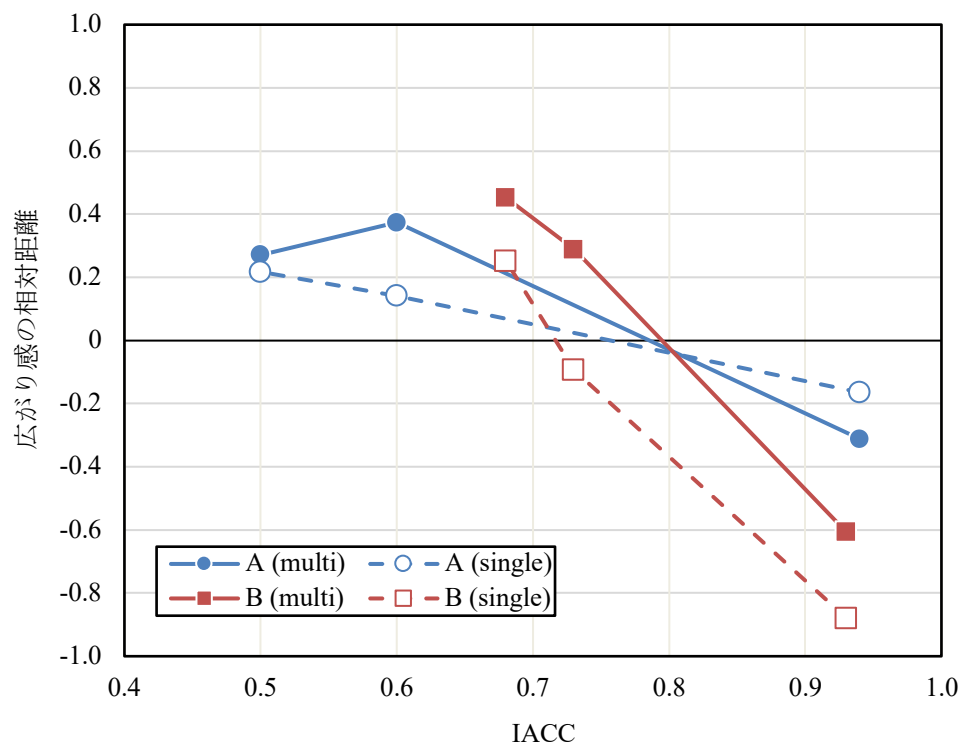


図 2-9 広がり感の相対距離と IACC の関係

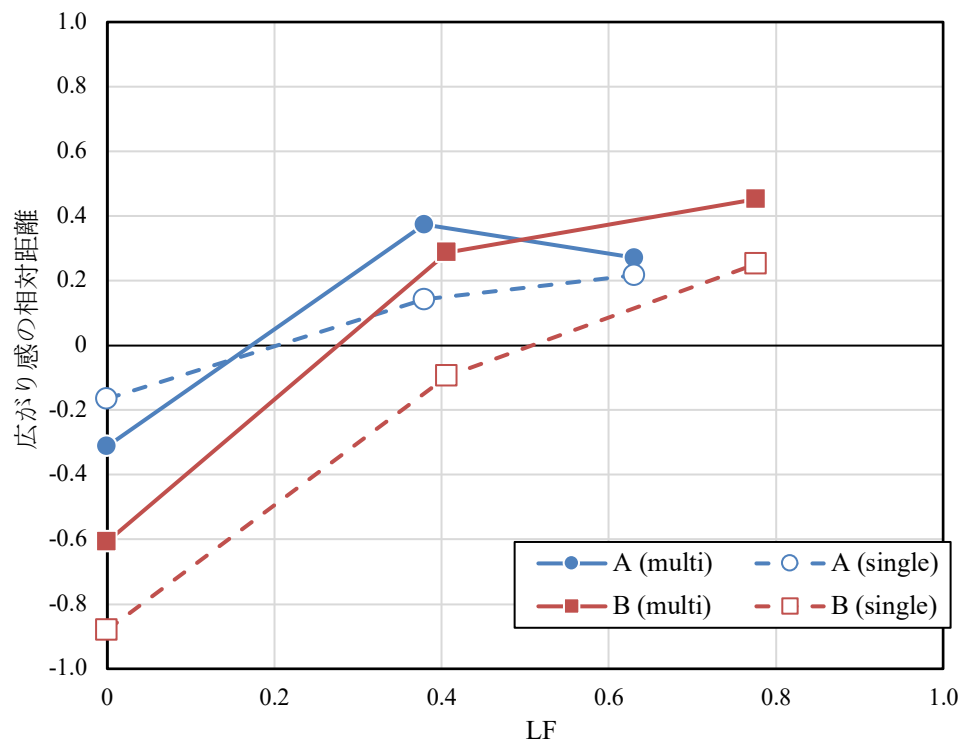


図 2-10 広がり感の相対距離と LF の関係

2-3-2 評価尺度法

評価尺度法による実験の結果を図 2-11 および 2-12 に示す。図 2-11 は空間 A における各聴覚刺激に対する広がり感のカテゴリ尺度評価平均値と標準偏差、図 2-12 は空間 B におけるそれらを、初期反射音の到来方位角による変化に応じて示している。一対比較法実験とは異なり、全体的に評価平均値の到来方位角の変化に対する変動が少ない。一対比較法では刺激同士の相対比較であったため被験者にとって判断しやすかったが、評価尺度法では刺激を単独絶対判断をするために被験者の評価にばらつきが大きく表れたのではないかと考えられる。このことは標準偏差が大きいことから示されている。図 2-11 では、A に対する広がり感は、シングルモードにおいては、到来方位角が $\pm 60^\circ$ で最大となり、マルチモードにおいては、 75° が最大となる山型を描く傾向を示した。初期反射音の到来方位角に対する広がり感の変動には有意性がみられた。また、 $\pm 30^\circ$ と $\pm 60^\circ$ を除きマルチモードの評価平均値がシングルモードのそれを上回り、A の $\pm 0^\circ$ 、 $\pm 75^\circ$ において 5% 水準で有意差が検出された。図 2-12 では、シングルモードにおいて初期反射音の到来方位角が大きくなるにつれて、B に対する広がり感は大きくなる傾向がうかがえるが、マルチモードにおいては到来方位角によらずほとんど一定値となっている。また、図 2-12 において、 $\pm 90^\circ$ を除くいずれの到来方位角もマルチモードの評価平均値は、シングルモードのそれを上回っていた。ただし、到来方位角 $\pm 0^\circ$ の場合を除き両者の平均値間に有意な差は見られなかった。さらに到来方位角の変化に対する評価平均値の変動において分散分析を行ったところ、A のマルチモード、B のシングルモードにおいて有意な変動は見られた。

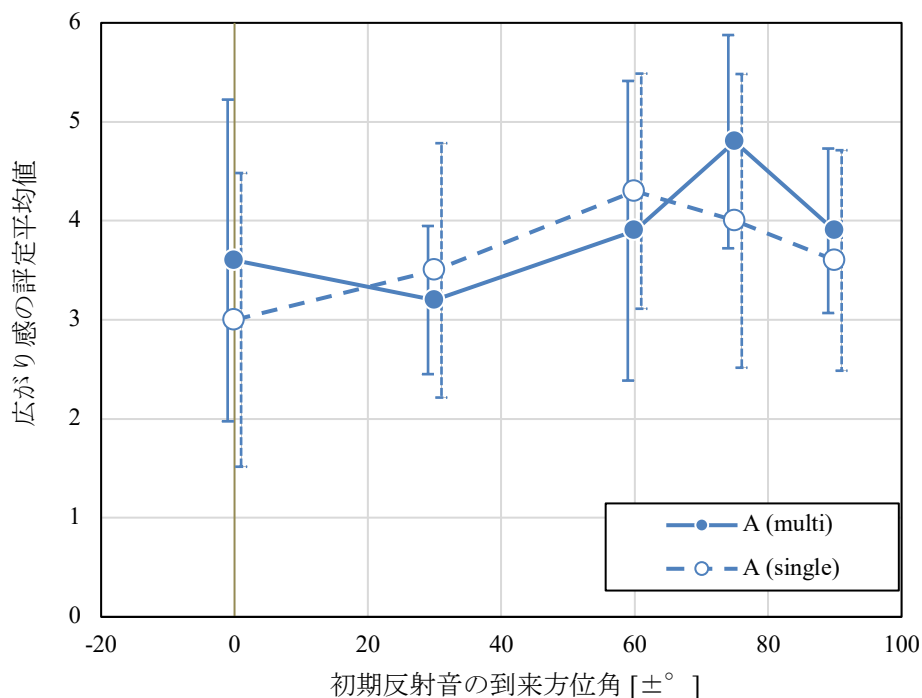


図 2-11 広がり感の評定平均値と標準偏差 (A)

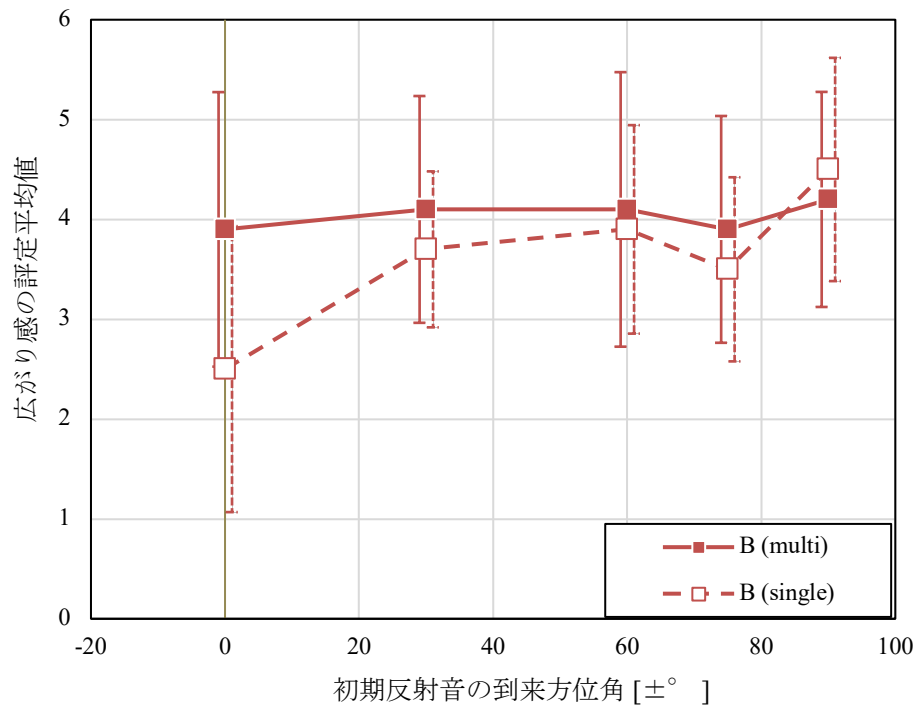


図 2-12 広がり感の評定平均値と標準偏差 (B)

図 2-13 は広がり感のマルチモードにおける評定平均値からシングルモードにおける値を差し引いた差の、初期反射音の到来方位角に対する変化を示している。図中にプロットされた値の大半は、0 より上部に位置し、概ねマルチモードの評定値がシングルモードよりも大きい事を示している。また、A の $\pm 0^\circ$ と $\pm 75^\circ$ 、および B の $\pm 0^\circ$ における評定平均値のモード間の有意差が 1%水準で認められた。また、B に対しては到来方位角が大きくなるほど評定平均の差が小さくなる傾向がうかがえる。

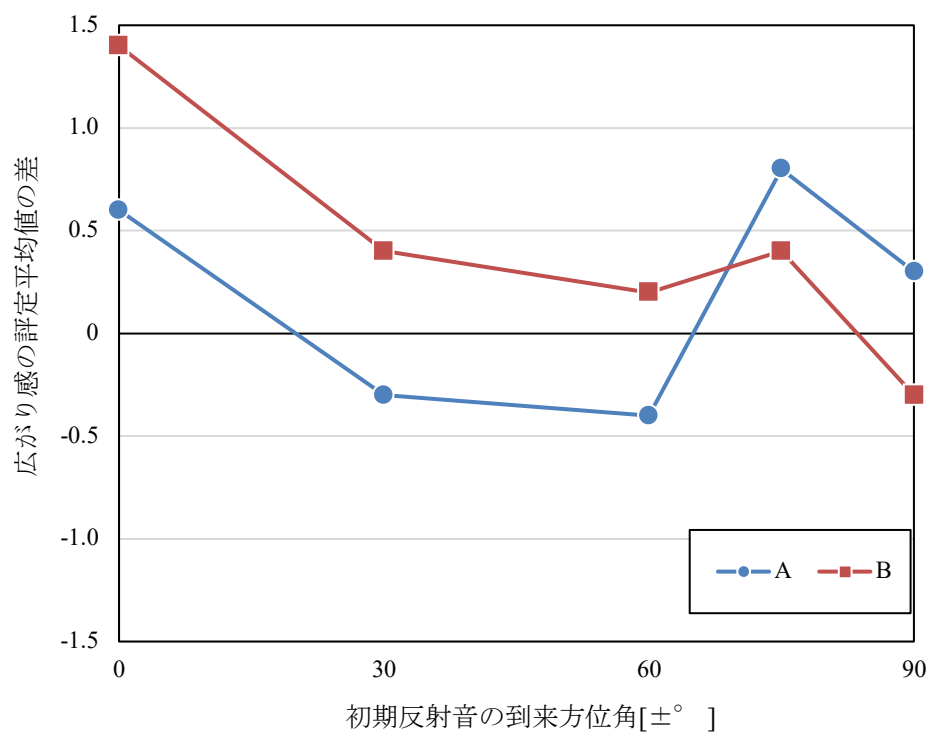


図 2-13 マルチモードとシングルモードの
 評価平均値の差の推移

図 2-14 は広がり感の評価平均値と IACC の関係、図 2-15 は LF との関係を示している。IACC、LF の推移と比較して広がり感の評価平均値はほとんど変化がなく、推移との整合は取れないグラフとなった。

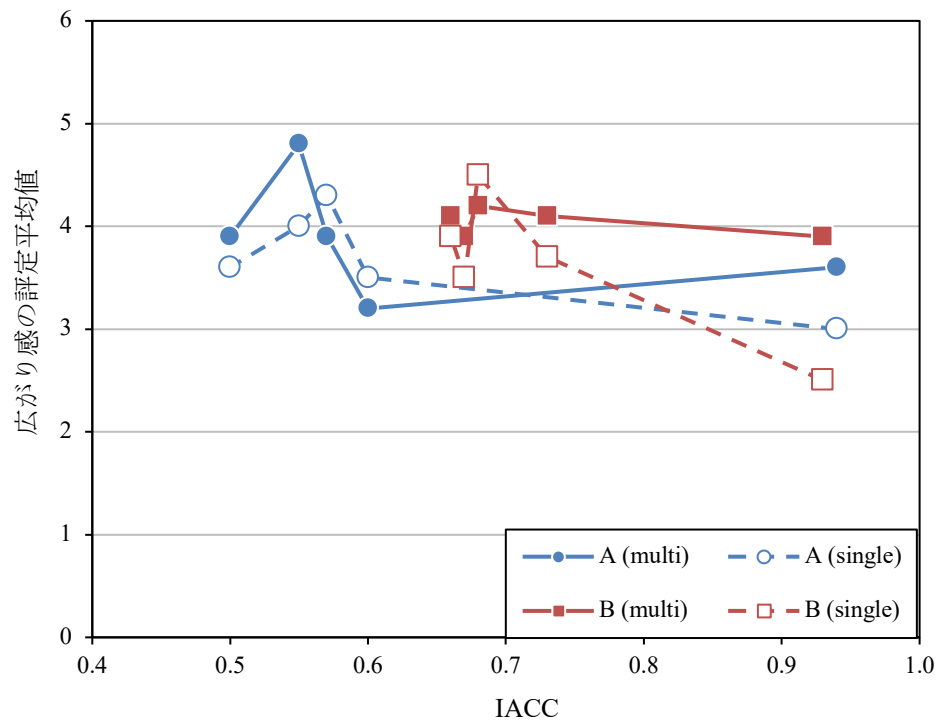


図 2-14 広がり感の評定平均値と IACC の関係

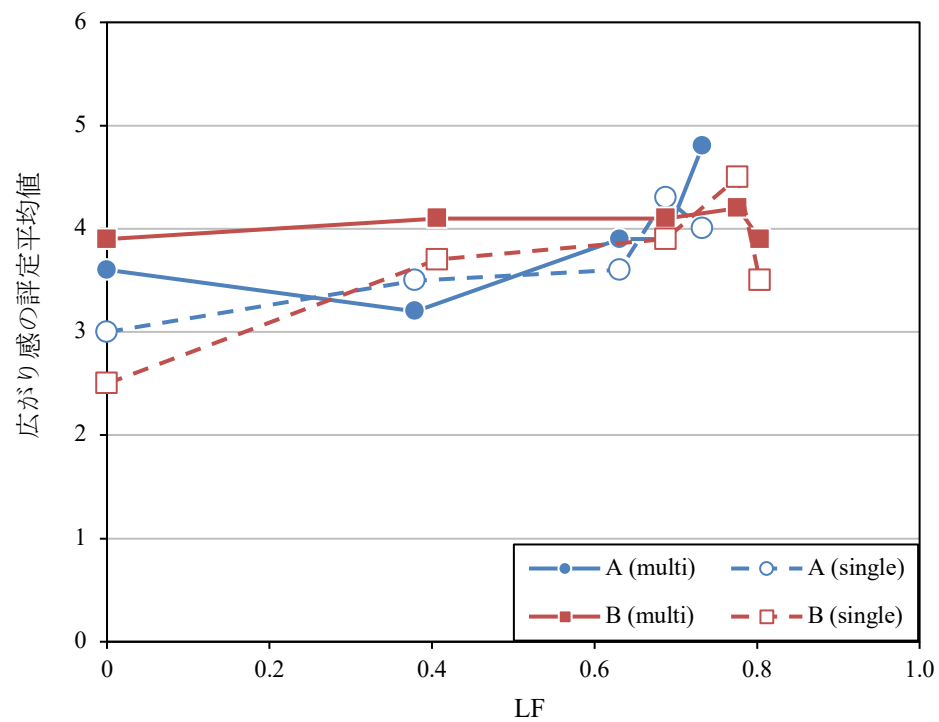


図 2-15 広がり感の評定平均値と LF の関係

2-3-3 一対比較法と評定尺度法の比較

広がり感に関連する今回行なった2つの実験の結果を比較する。図 2-16 は一対比較法の相対距離と評定尺度法の評定平均値の関係を示したグラフである。空間 A のマルチモードでは広がり感の相対距離と評定平均値の大小関係が対応しなかったが、他の条件においては概ね対応が取れている。また、空間 A よりも B の方が、相対距離および評定平均値の分布の幅が大きい。全体的に相対距離の差に比して、評定平均値の分布は小さかった。

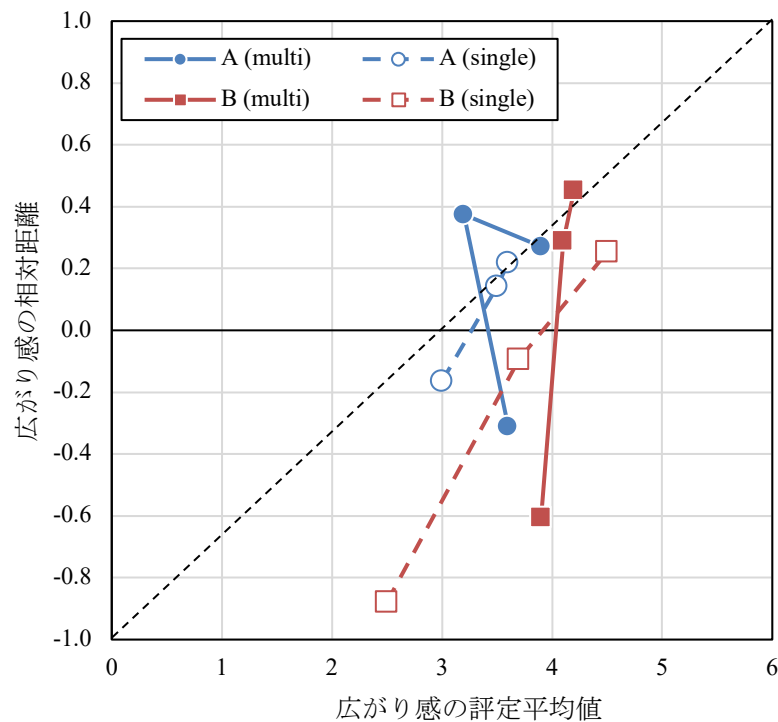


図 2-16 広がり感の相対距離と評定平均値の関係

2-4 小括

今回の実験より概ねシングルモードの評定平均値よりもマルチモードの方が高い値を示し、視覚情報の聴覚印象への影響が認められた。しかし、評定尺度法では一対比較法と比べて刺激の弁別が難しくなるため被験者の回答のばらつきが大きく明確な評価の傾向は得られなかった。また、今回の実験での作成方法による聴覚刺激のバイノーラル提示では、被験者によって音像定位が異なる可能性が示され、これも被験者の回答のばらつきの要因であると考えられる。

第3章

スピーカー再生提示による ASW の主観評価実験

3-1 研究概要

前章のヘッドホン再生の実験における結果のばらつきや不整合の原因の一つとして、被験者によって頭部伝達関数が異なるため、一部の被験者は正しく音像の認識が出来なかった可能性が考えられる。本章では聴覚刺激を無響室での複数スピーカーによる提示に変更し、音像の誤認識が生じない実験システムにおいて、再び広がり感に対する視覚刺激の影響を検証した。被験者は正常な視覚と聴覚をもつ男女 10 名である。

3-2 実験概要

3-2-1 実験システム

被験者は無響室内において着席した状態で、視覚刺激が HMD、聴覚刺激が複数のスピーカー再生によって提示される。実験の様子を図 3-1 に示す。



図 3-1 実験の様子

3-2-2 対象空間と視覚刺激

対象空間は第 2 章と同じ 2 空間である。再度空間概要を表 3-1 に示す。また、視覚刺激の VR 映像スクリーンショットを図 3-2 に示す。

マルチモードにおいて視覚刺激として空間 A、B の内観に評価項目を載せた VR 映像を使用した。シングルモードにおいては無地の灰色の画像に同様に評価スケールを載せた VR 映像を提示した。

表 3-1 対象空間概要及び音響特性(500Hz 基準)

刺激名	空間名称	容積 [m ³]	座席数 [席]	T_{30} [s]
A	大学講堂(多目的ホール)	12000	1650	1.4
B	多目的ホール	5200	604	1.8

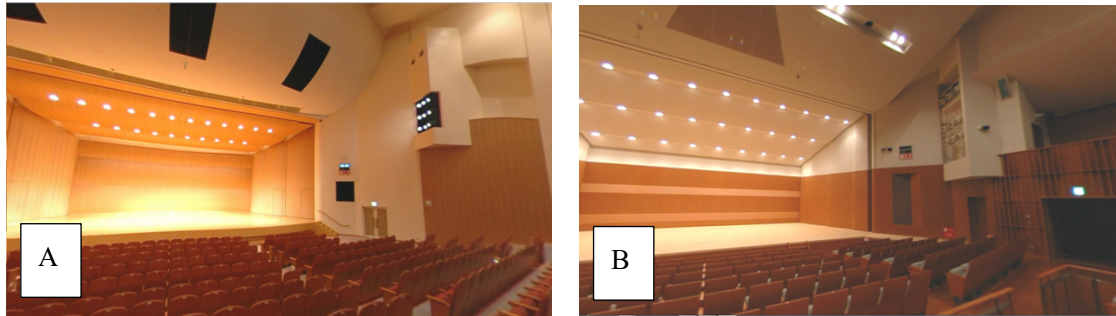


図 3-2 視覚刺激の VR 映像のスクリーンショット

3-2-3 聴覚刺激

聴覚刺激は対象空間の実測 IR を①直接音 (0~10ms) と残響音 (80ms~)、②第一初期反射音 (10~45ms)、③第二初期反射音 (45~80ms) の 3 つに分離させた信号を使用した。それぞれにドライソース音源を畳み込んだ信号として無響室内に配置されたスピーカーから被験者に同時に提示された。スピーカーの配置図を図 3-3 に示す。初期反射音の到来方向は聴覚刺激によって方位角 $\pm 0^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 75^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$ と切り替えられ、異なる広がり感を被験者に与える。ただし、方位角 $\pm 0^\circ$ に相当する聴覚刺激の場合、信号全てを正面のスピーカーから提示する。スピーカーの高さは被験者の耳の位置に、放射軸は被験者頭部の中心を向くように調整した。音場の IACC や LF の計算値は表 3-2、表 3-3 の通りであった。また、初期反射音の到来方向と各聴覚刺激の IACC 及び LF の実測値との関係を図 3-4 に示す。

録音した IR に対して楽音のドライソース「水上の音楽」(作曲：ヘンデル、DENON オーディオチェック CD)を畳み込み、聴覚刺激を作成した。作成した聴覚刺激についての名称を表 3-4 に示す。

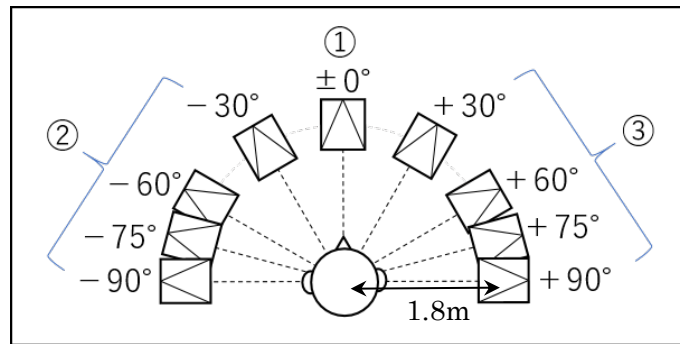


図 3-3 聴覚刺激提示方法

表 3-2 初期反射音の到来方位角と IACC の関係

	$\pm 0^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 60^\circ$	$\pm 75^\circ$	$\pm 90^\circ$
A	0.94	0.60	0.30	0.36	0.31
B	0.91	0.53	0.25	0.31	0.29

表 3-3 初期反射音の到来方位角と LF の関係

	$\pm 0^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 60^\circ$	$\pm 75^\circ$	$\pm 90^\circ$
A	0.04	0.13	0.41	0.38	0.69
B	0.02	0.16	0.46	0.66	0.79

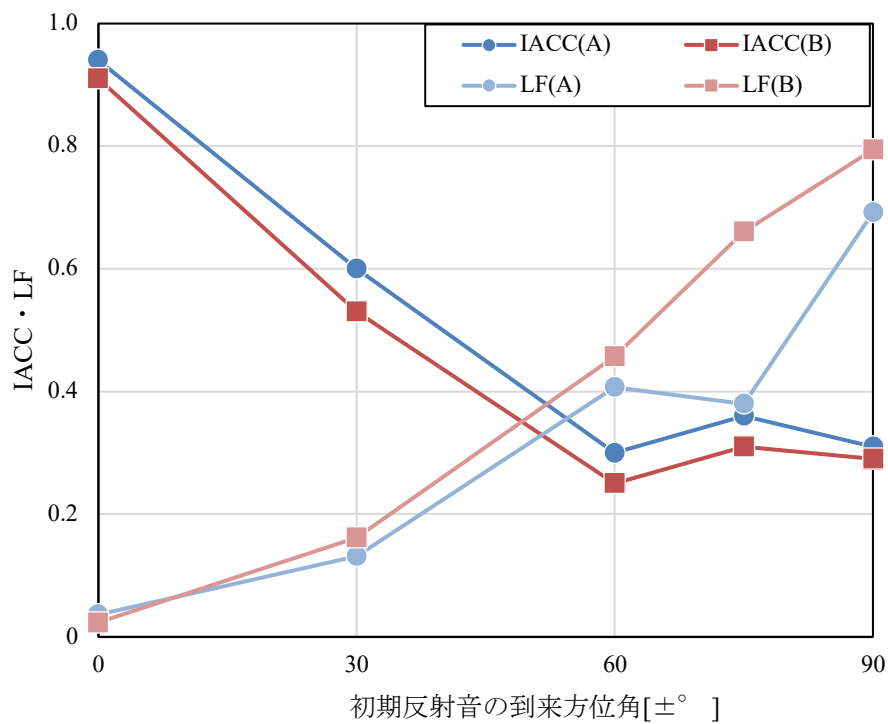


図 3-4 初期反射音の到来方位角と IACC · LF の関係

表 3-4 実験における聴覚刺激の名称

視覚刺激	$\pm 0^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 60^\circ$	$\pm 75^\circ$	$\pm 90^\circ$
A	a _{3_0}	a _{3_30}	a _{3_60}	a _{3_75}	a _{3_90}
B	b _{3_0}	b _{3_30}	b _{3_60}	b _{3_75}	b _{3_90}

3-2-4 実験手順

実験Ⅰ～Ⅲの3種類の実験が行われた。実験Ⅰ、Ⅲでは一対比較法を用い、実験Ⅱは評定尺度法を用いて実験を行った。実験Ⅰでは視覚刺激はA、B、聴覚刺激はa_{3_0}、a_{3_30}、a_{3_90}、b_{3_0}、b_{3_30}、b_{3_90}の6つを使用した。組み合わせの回数はマルチモード、シングルモードのそれぞれ6つの計12個の刺激を総当りで組み合わせるため合計66回行う。

実験Ⅰの空間Bにおいて聴覚刺激のスピーカー②、③の間で音のレベル差が生じていることがわかった。そのため実験Ⅲとして再度一対比較法での実験を視覚刺激はB、聴覚刺激はb_{3_0}、b_{3_30}、b_{3_60}、b_{3_75}、b_{3_90}を使用して行った。組み合わせの回数はマルチモードとシングルモードそれぞれ5個の合計10個の刺激を総当りで組み合わせるため合計45回行う。Bの結果については実験Ⅲを採用した。

実験Ⅱは評定尺度法で行った。シングルモードとマルチモードの刺激をランダムに単独提示し、刺激についての主観印象を7段階（見かけの音源の幅が小さい（0）～見かけの音源の幅が大きい（6））で回答してもらう。主観評価項目は第2章と同様の評価スケールを提示した（図3-5）。視覚刺激はA、B、聴覚刺激は各空間a_{3_0}、a_{3_30}、a_{3_60}、a_{3_75}、a_{3_90}、b_{3_0}、b_{3_30}、b_{3_60}、b_{3_75}、b_{3_90}の計10個を全て使用する。組み合わせの回数はシングルモード、マルチモードのそれぞれ10個の合計20回行う。

音源の見かけの幅						
0	1	2	3	4	5	6
幅が 小さい (低い)	—	—	幅が 中程度	—	—	幅が 大きい (高い)

図 3-5 評価スケール

3-3 実験結果と分析

3-3-1 実験Ⅰ・実験Ⅲ

実験Ⅰ・Ⅲで求められた結果を第2章と同様にThurstoneの比較判断の「ケースⅤの仮定」により刺激間の広がり感の相対距離を算出した。なお、結果には実験Ⅰの空間A、実験Ⅲの空間Bの相対距離を示し、相対距離はそれぞれの空間内での値を求めた。図3-6に

両空間・両モードにおける全ての聴覚刺激の評定を相対距離で数直線上に示している。この図からはシングルモードにおける b_{3_0} の広がり感が最も小さく、シングルモードにおける a_{3_90} の広がり感が最も大きく評価された。また、各聴覚刺激に対する相対距離のシングルモード値とマルチモード値の関係を図 3-7 に示す。この図において各刺激の点は、横軸にシングルモード、縦軸にマルチモードの値をとってプロットされている。対角線よりも上の点はマルチモードの方が高い値であったことを示しており、 a_{3_90} 以外の点においてマルチモードの方がシングルモードよりも高い広がり感の評価が得られた。しかし、これらの平均値間には統計的な有意差はみられなかった。

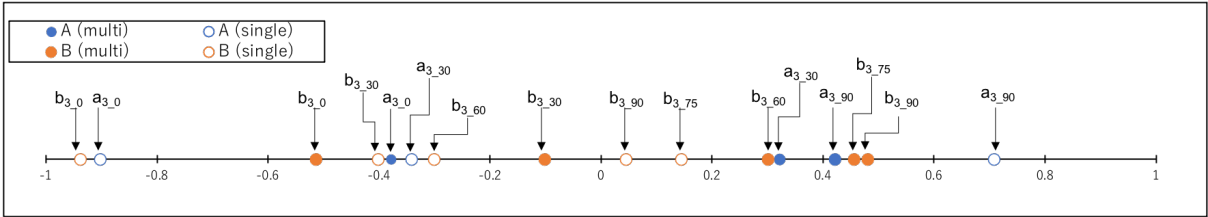


図 3-6 一対比較法による広がり感の相対距離

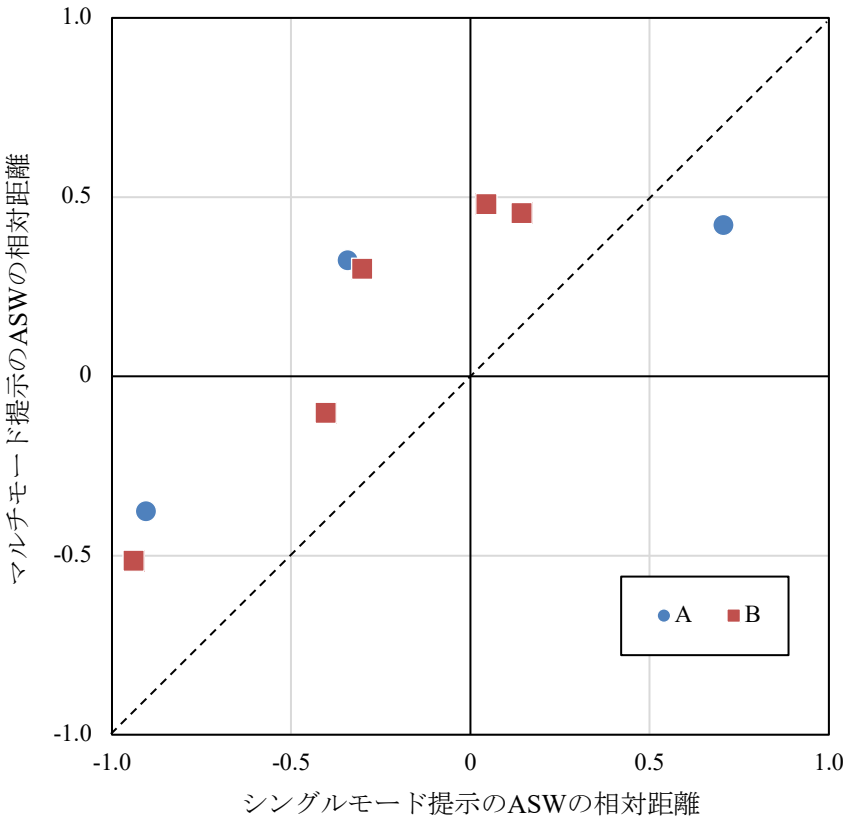


図 3-7 広がり感の相対距離における
シングルモード提示とマルチモード提示の関係

図 3-8 は全ての刺激に対する広がり感の相対距離と IACC の関係、図 3-9 は LF との関係を示したグラフである。これらの図より、空間 A、B ともにほとんどの刺激においてマルチモードの方がシングルモードよりも大きい値を示している。図 3-8 の空間 A においては概ね右下がりのグラフとなっている。空間 A においてはマルチモード。シングルモードともに a_{3_90} で広がり感の相対距離が最大となった。一方で、空間 B ではマルチモードは b_{3_75} 、シングルモードでは b_{3_60} での相対距離が最大となった。図 3-9 においても概ね右上がりのグラフとなっており、LF が大きくなるほど広がり感の相対距離は大きくなることが示された。しかし、空間 B のシングルモードにおいては LF の値に沿った相対距離を示さなかった。

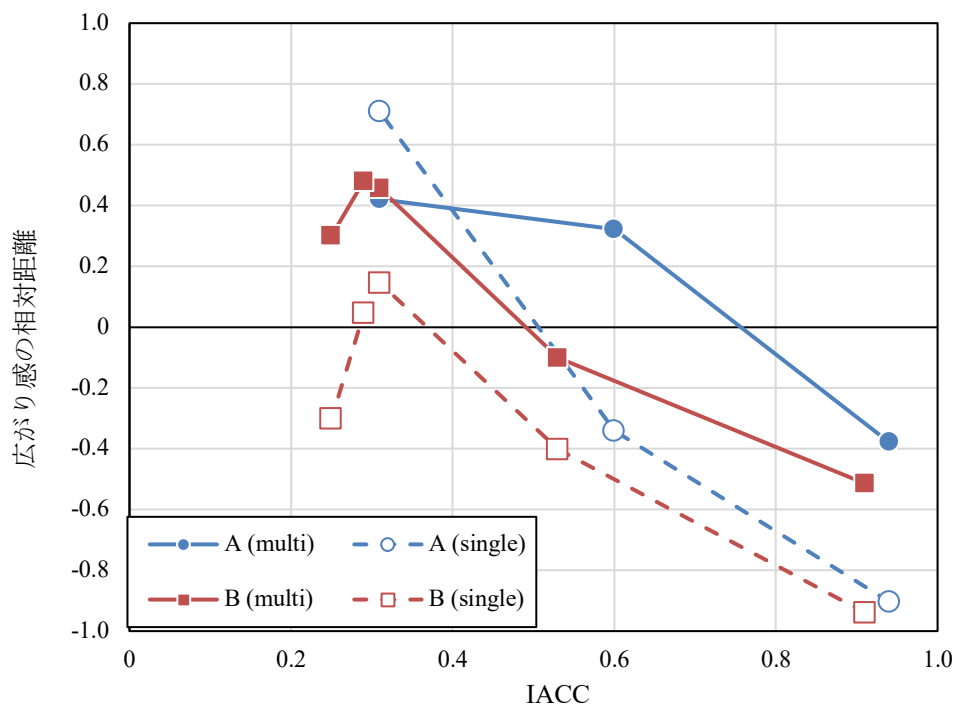


図 3-8 広がり感の相対距離と IACC の関係

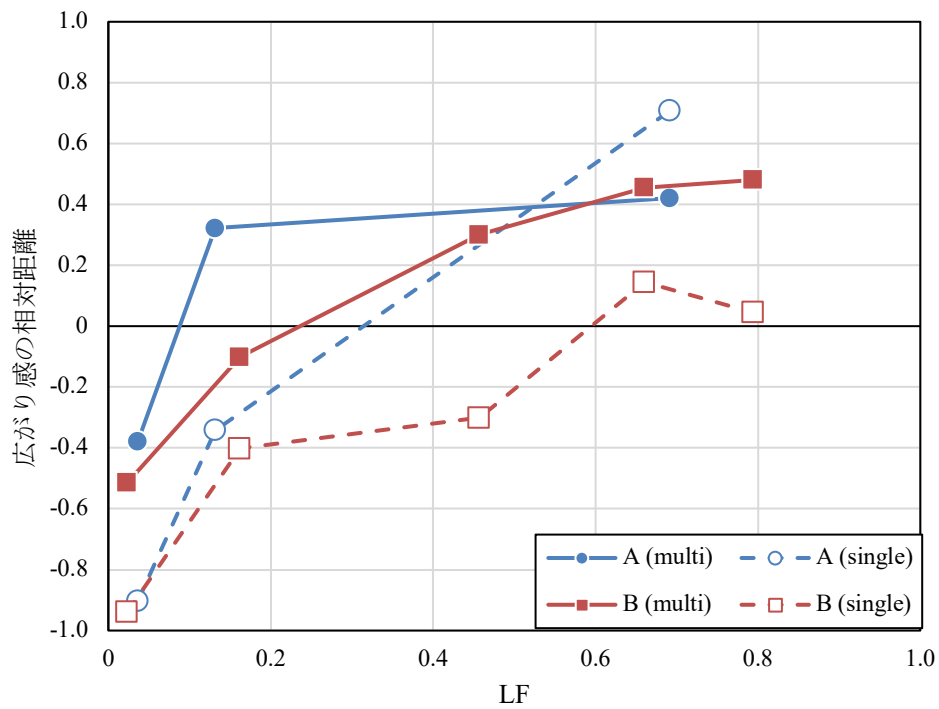


図 3-9 広がり感の相対距離と LF の関係

3-3-2 実験 II

実験 II における各聴覚刺激に対する評定平均値のシングルモードとマルチモードの関係を図 3-10 に示す。実験 I の結果と同様に同一の聴覚刺激に対する広がり感はシングルモードよりもマルチモードが高くなる場合は多いが、評定平均値のモード間で有意差が検出されたのは b_{3_0} のみであった。また、到来方位角に関わらずマルチモードとシングルモードの評定値をそれぞれ集計し、これらの平均値間で有意差検定を行ったところ、空間 A において 5% の水準で有意となった。

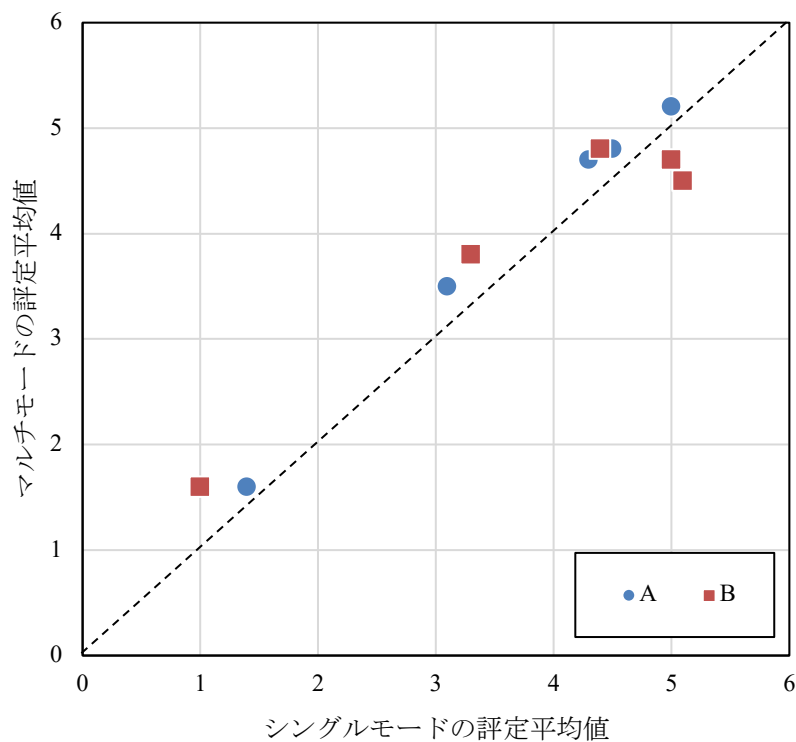


図 3-10 広がり感の評定平均値における
シングルモード提示とマルチモード提示の関係

図 3-11 は空間 A, B における各聴覚刺激に対する広がり感のカテゴリー尺度評定平均値を初期反射音の到来方向による変化に応じて示している。概ねマルチモードがシングルモードを上回っている。右上がりの傾向が見られるが、到来方位角 $\pm 60^\circ \sim \pm 90^\circ$ においては横ばいになっている。空間 A では $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 75^\circ$ においてシングルモードの主観評価がマルチモードを上回っている。空間 A のマルチモード、シングルモード、空間 B のマルチモードにおいて評定平均値は $\pm 90^\circ$ が最大となっている。一方で空間 B のシングルモードでは $\pm 75^\circ$ で最大となっている。どの空間でも初期反射音の到来方位角に対する広がり感の変動には有意性がみられた。

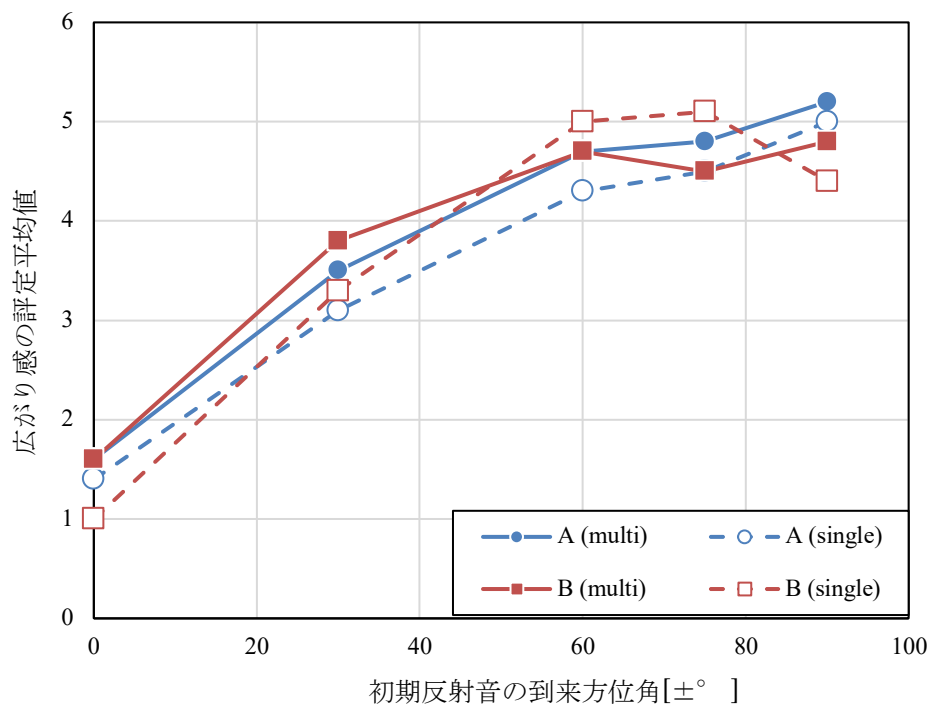


図 3-11 初期反射音の到来方位角に伴う広がり感の評定平均値

図 3-12 は、広がり感のマルチモードにおける評定平均値からシングルモードにおける値を差し引いた差の、初期反射音の到来方位角に対する変化を示している。図中に示された値は概ね縦軸の 0 より上に位置しており、マルチモードの評定値がシングルモードの評定値よりも大きいことを示している。空間 A では評定平均値の差は到来方位角によってほぼ一定であった。到来方位角による差分の変化に対して分散分析を行ったところ、今回の実験における B の結果において 5% の水準で有意性が検出された。

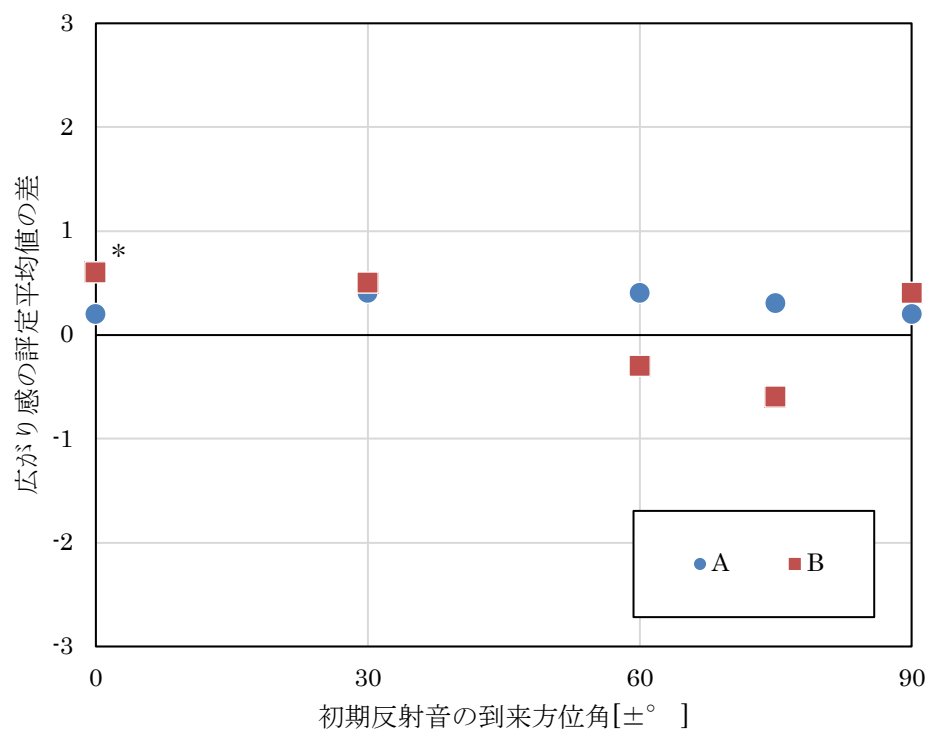


図 3-12 広がり感の評定平均値の差の推移

図 3-13 は広がり感の評定平均値と IACC の関係、図 3-14 は LF との関係を示している。図 3-13 では全ての結果でほぼ対角線状となるグラフとなった。つまり IACC の変化と同程度に評価されていることがわかる。図 3-14 では LF の値が 0.4 以下は右上がりのグラフとなっているが、0.4～0.8 の範囲にあたってはどの空間でも横ばいのグラフとなっている。

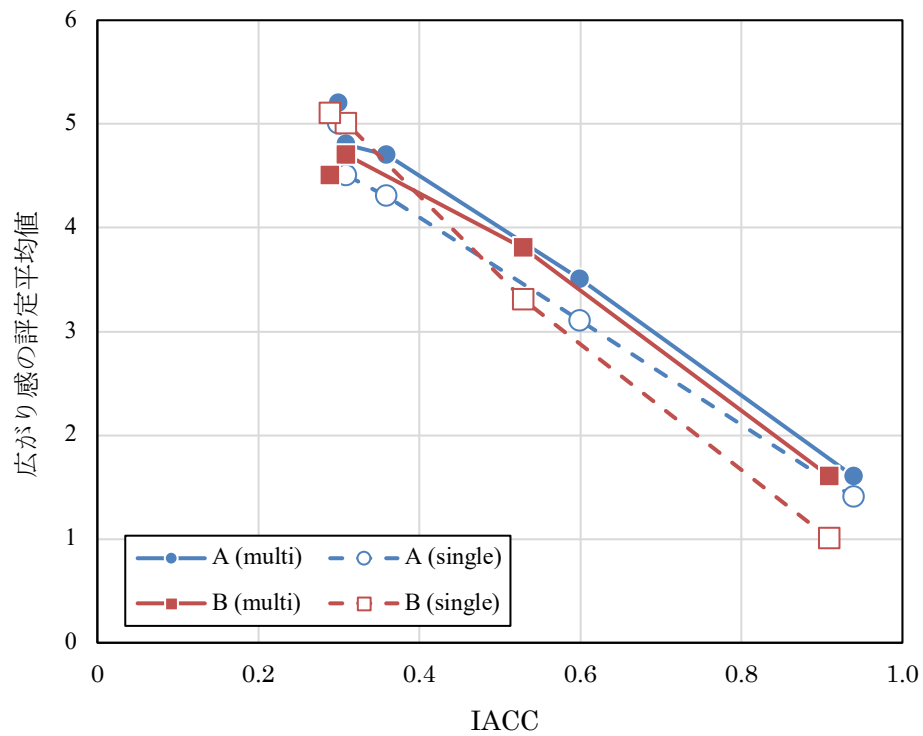


図 3-13 広がり感の評定平均値と IACC の関係

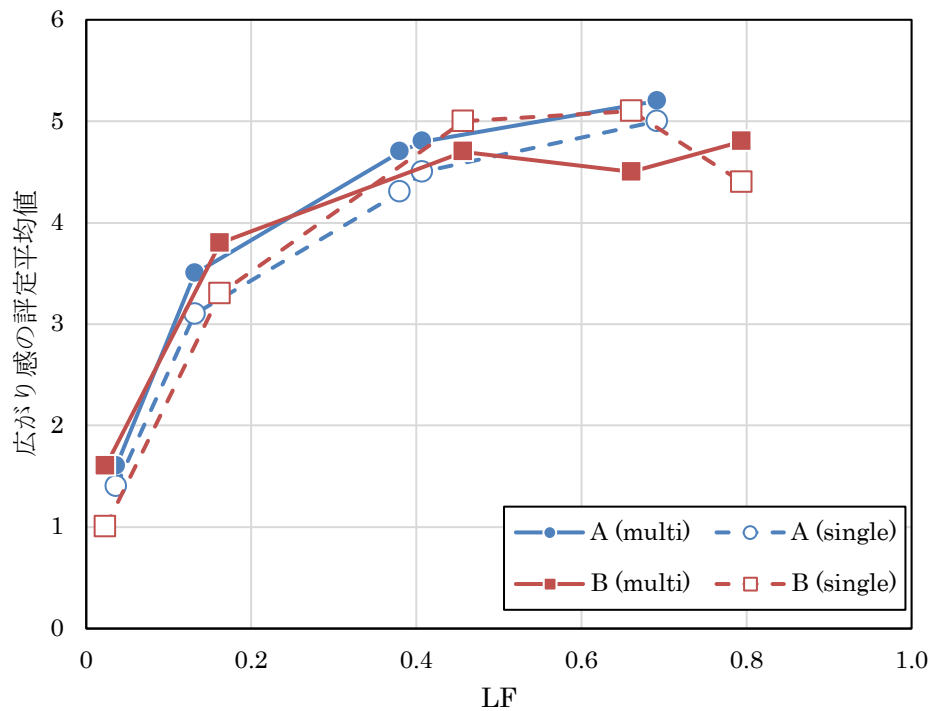


図 3-14 広がり感の評定平均値と LF の関係

3-3-3 一対比較法と評定尺度法の比較

広がり感に関連する今回行なった2つの実験の結果を比較する。図 3-15 は実験 I・IIIの相対距離と実験 II の評定平均値の関係を示したグラフである。グラフの線は対角線上付近を通っており、2 条件の対応が取れていることがわかる。空間 A のマルチモードの $\pm 90^\circ$ では広がり感の評定平均値と比べて広がり感の評定平均値の変化が小さかった。

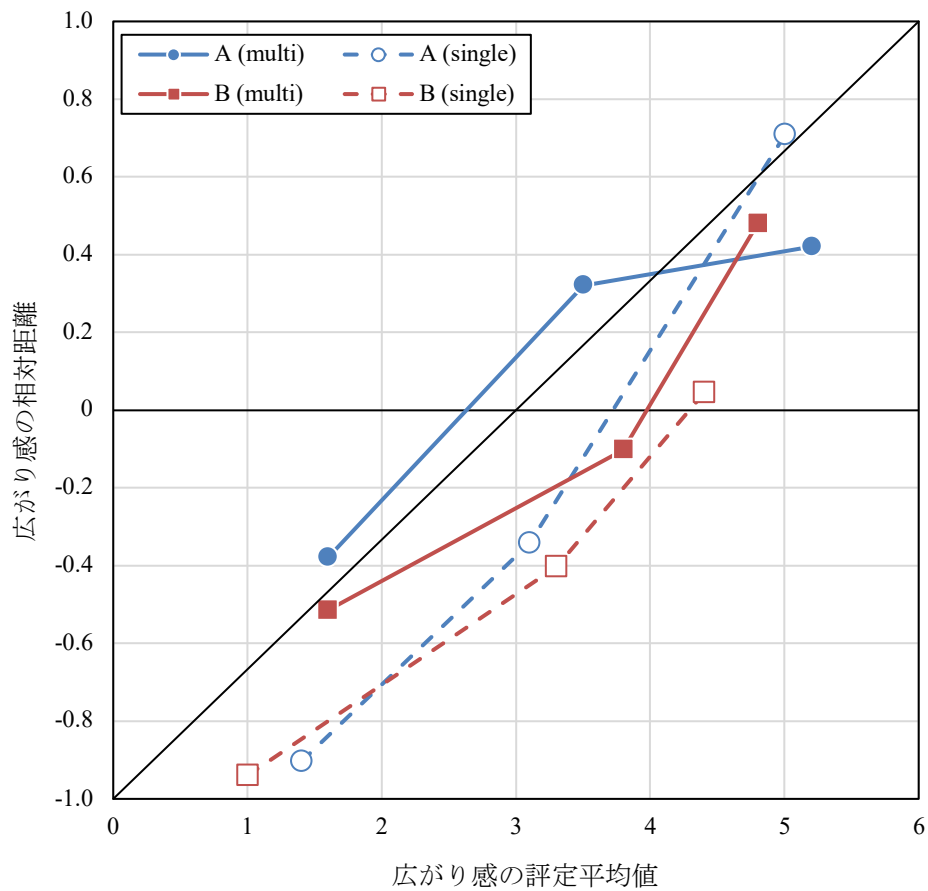


図 3-15 広がり感の相対距離と評定平均値の関係

3-4 聴覚刺激の提示方法の違いによる比較・分析

3-4-1 一対比較法実験での結果比較

図 3-16 に一対比較法によるヘッドホン提示（第 2 章）とスピーカー提示（第 3 章）の初期反射音の到来方位角に対する広がり感の評定平均値の変化を示す。ヘッドホン提示の結果と比較するとマルチモードとシングルモードの差がより大きくなっていることがわかる。またスピーカー提示の結果の方が広く分布しており、聴覚刺激の提示方法を変更したことで刺激間の差が明確になったため刺激間の相対距離が大きくなったと考えられる。

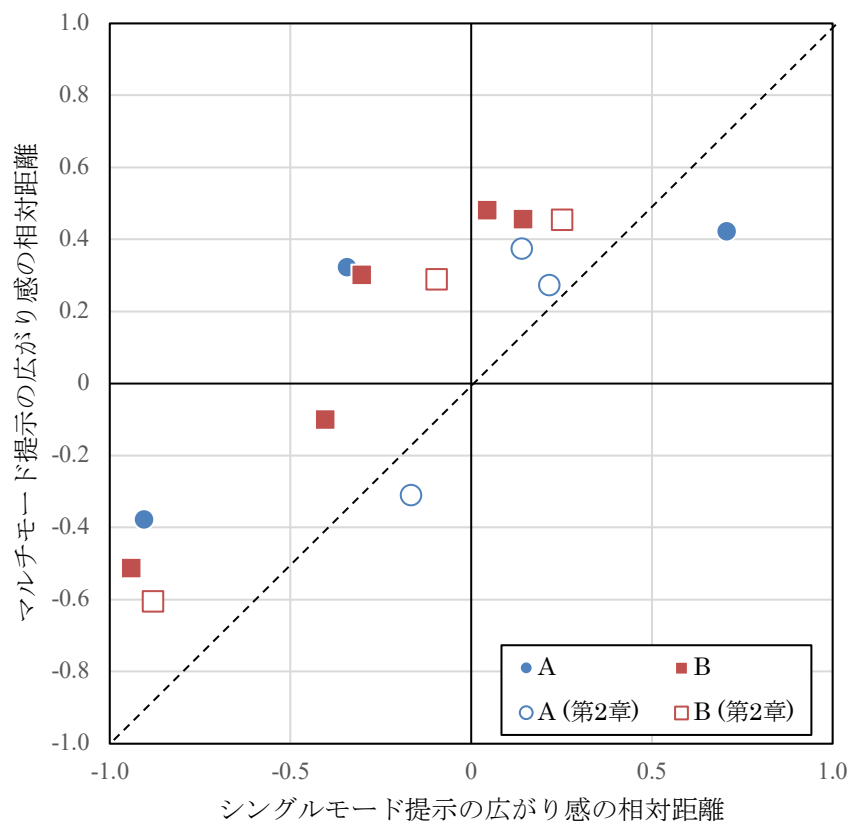


図 3-16 初期反射音の到来方位角に伴う広がり感の評定平均値

図 3-17 は全ての刺激に対する広がり感の相対距離と IACC の関係、図 3-18 は LF との関係を示したグラフである。図 3-17 ではまず実測 IACC の分布に差があり、グラフに差が見られる。図 3-18 では提示方法による大きな分布の違いはなかった。

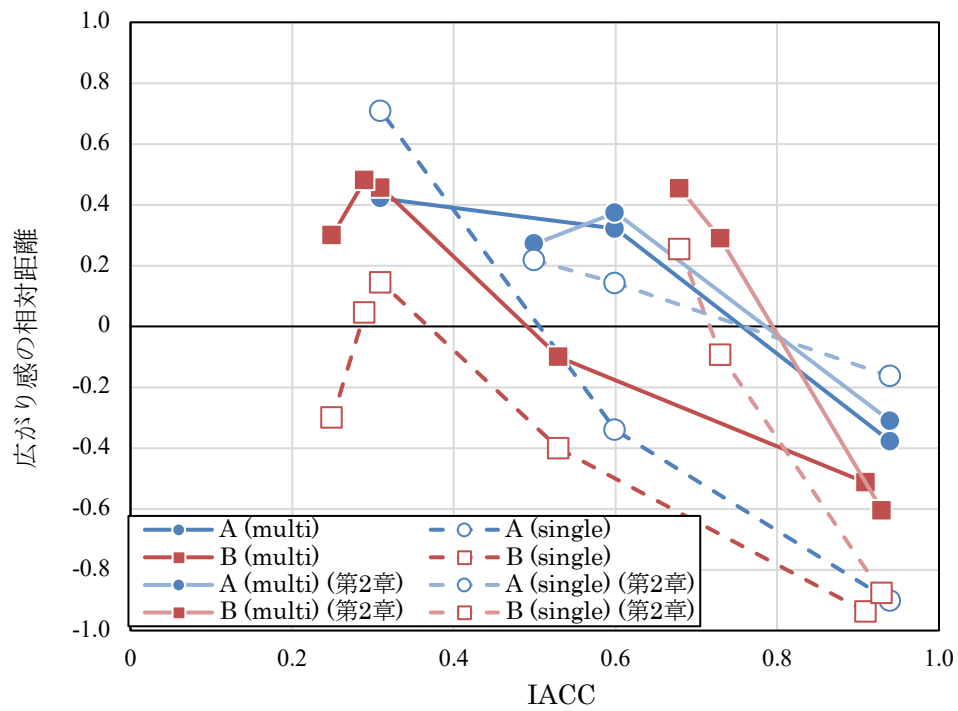


図 3-17 広がり感の相対距離と IACC の関係

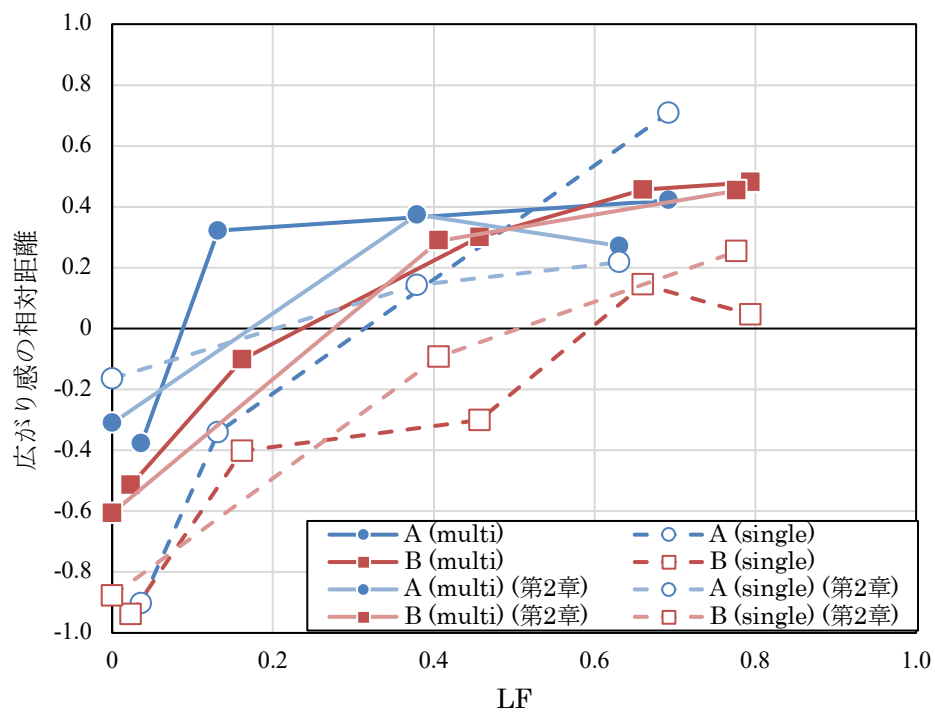


図 3-18 広がり感の相対距離と LF の関係

3-4-2 評価尺度法実験での比較

図 3-19 に評価尺度法によるヘッドホン提示（第 2 章）とスピーカー提示（第 3 章）の初期反射音の到来方位角に対する広がり感の評定平均値の変化を示す。ヘッドホン提示時の評定平均値が方位角に対してほぼ横ばいであるのに対し、スピーカー提示では方位角による評定値の変化が大きくなっており、特に $\pm 0^\circ$ で大きく差が出ている。一対比較法での結果と同様に聴覚刺激の提示方法をスピーカー提示に変更したことにより、単独提示でも各刺激の広がり感が評価しやすくなったと考えられる。また、分散分析を行った所、ヘッドホン提示時は評定平均値の変動において一部しか有意差が検出されなかったのに対し、スピーカー提示時では全てにおいて変動に有意差が検出された。

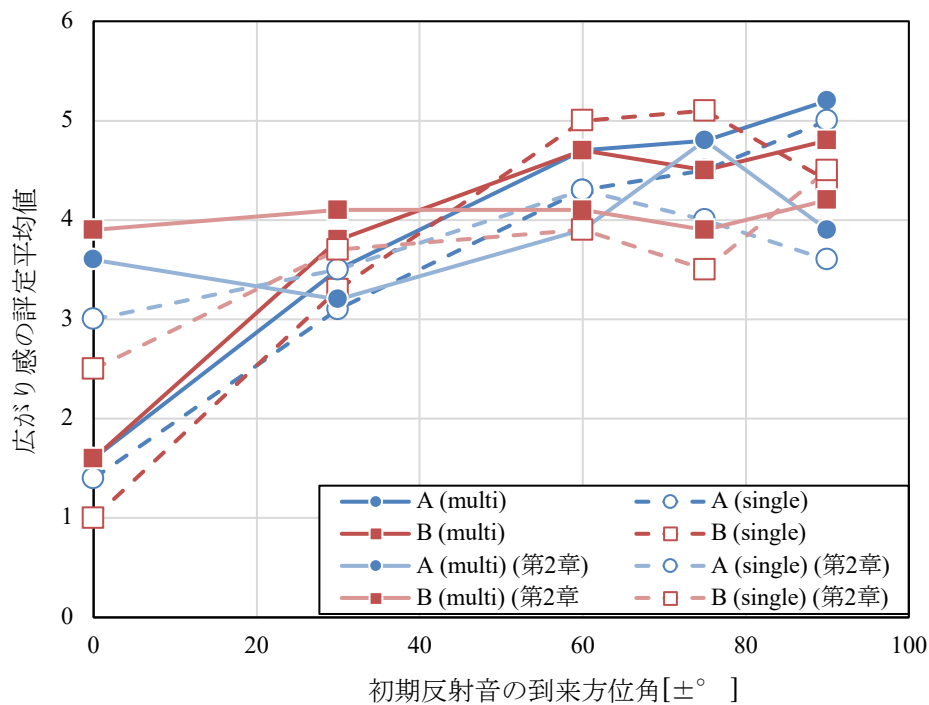


図 3-19 初期反射音の到来方位角に伴う広がり感の評定平均値の変化

図 3-20 は評価尺度法におけるヘッドホン提示とスピーカー提示の初期反射音の到来方位角に対する広がり感の評定平均値の差の変化を示したグラフである。 $\pm 60^\circ \sim \pm 90^\circ$ でそれぞれ評定平均値の差にばらつきが見られる。

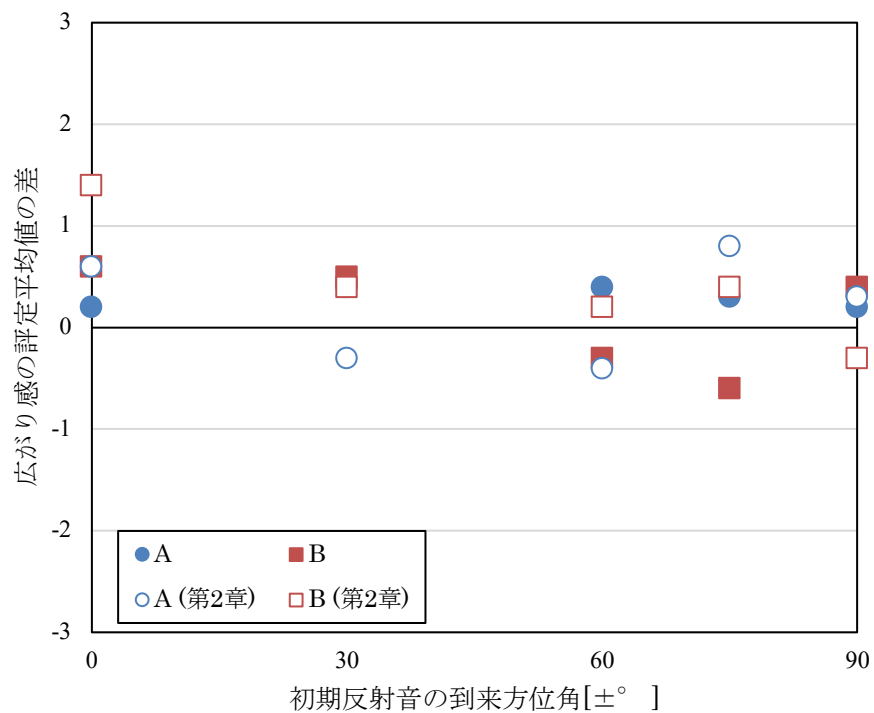


図 3-20 広がり感の評定平均値の差の推移

3-4-3 一対比較法と評定尺度法の比較

図 3-21 に一対比較法による相対距離と評定尺度法による評定平均値の関係を示したグラフを示す。特に空間 A においてグラフの線の長さが大きく異なっている。スピーカー実験の結果において長さが大きくなっている。また、ヘッドホン実験の結果が傾きが急であるのに対し、スピーカー実験の結果は対角線上に引かれた線と平行に近い線を描いており、刺激の間の判別がしやすく評定平均値間に差が出たものと考えられる。

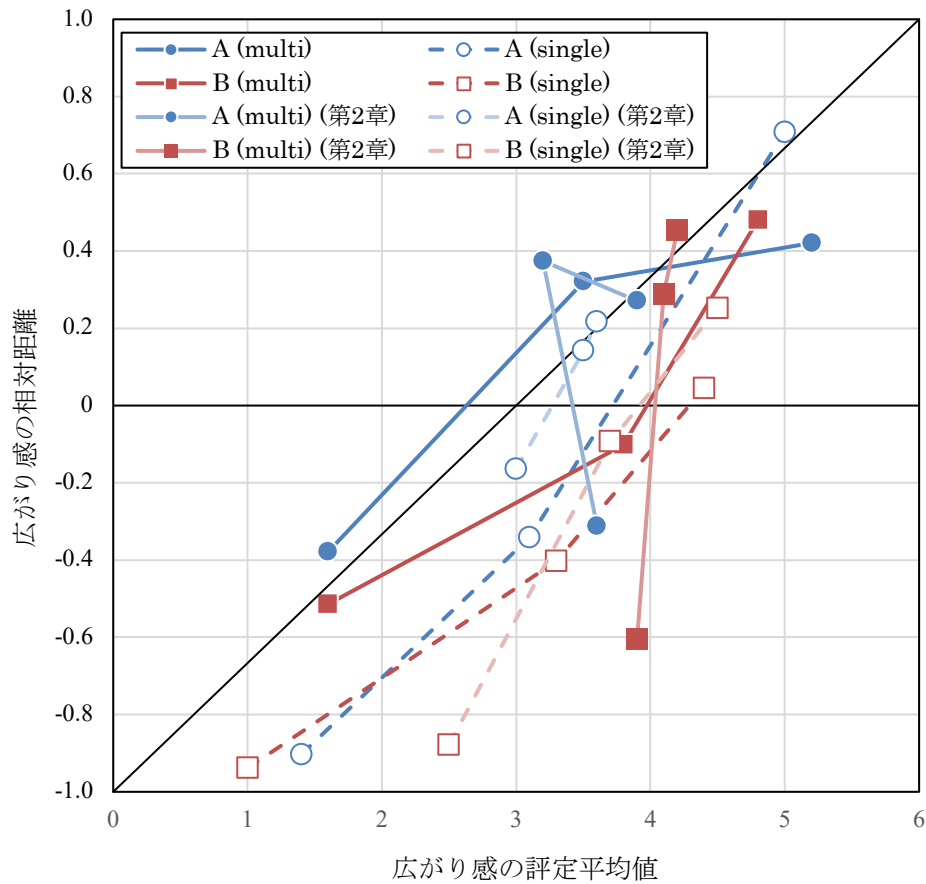


図 3-21 広がり感の相対距離と評定平均値の関係

3-5 小括

本章での実験において概ねマルチモードの方がシングルモードより評価の高い結果が得られた。さらに一部の刺激においてはモード間に有意差が検出され、視覚情報の聴覚印象への影響が確認された。

聴覚刺激の提示方法をスピーカー提示に切り替えたことにより広がり感の判別がわかりやすくなったため、より刺激間の差が明確に判断されたと考えられる。

第4章

仮想環境（VR）におけるヘッドホン提示による ASWの主観評価実験

4-1 研究概要

第2章・第3章の実験結果からは、概ね音の広がり感に対して、視覚情報の影響が認められた。また空間によって影響の発現に特徴が見られたため、広がり感は、残響感に見られるよう（石川らが提案した心理モデル）に、視覚的に予測される音場印象との相対的な関係性によって変化を起こすと考えた。

本章では、仕様の異なる多数の空間のそれぞれに対して、視覚刺激から被験者が予測する広がり感の同定及び広がり感の主観評価を行い、広がり感の予測値と主観印象の関係を検証した。被験者は正常な視覚と聴覚をもつ男女9名である。

4-2 実験概要

広がり感の同定と広がり感の主観評価の2種類の実験を行った。広がり感の同定実験では、仮想空間において被験者に視覚刺激のみを提示し、視覚刺激から予測される広がり感になるように聴覚刺激の音場パラメータをコントロールさせた。また、広がり感の主観評価実験では、仮想空間において被験者に視聴覚刺激を提示した時の広がり感を回答させた。この時、広がり感の異なる聴覚刺激は、後述するように仮想空間内での音場パラメータを用いて実現している。

4-2-1 実験システム

本章の実験では実験室内において視覚刺激を HMD、聴覚刺激をヘッドホン再生によって提示する。実験システムには Unity Technologies 社からフリーの開発環境としてリリースされているゲームエンジン「unity」を使用し構築した仮想環境上で実験を行う。



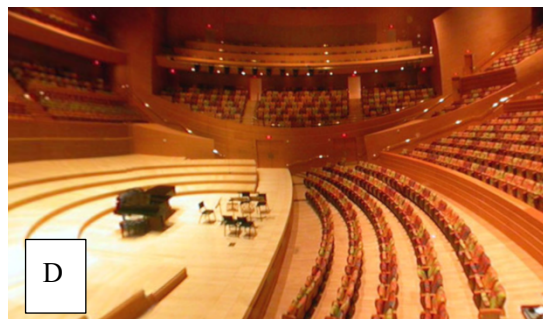
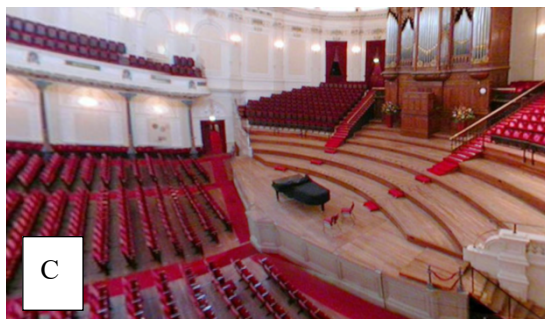
図 4-1 実験器具装着の様子

4-2-2 対象空間と視覚刺激

実験に使用した空間の概要および音響特性を表 4-1 に示す。また、視覚刺激に用いた VR 映像を図 4-2 に示す。各空間の VR 映像の中にはスライダー（図 4-4）が表示されており、被験者は仮想空間内で手元のコントローラーを使ってハンドルを移動させることによって、パラメーターを変化させたり、評価値を回答することができる

表 4-1 対象空間の概要及び音響特性(500Hz 基準)

空間名	用途	容積 [m ³]	座席数 [席]	T ₃₀ [s]	C ₈₀ [dB]	形状
A	大学講堂 (多目的ホール)	12000	1650	1.4	2.2	扇形
B	多目的ホール	5200	604	1.8	-2.0	扇形
C	コンサートホール	18700	2037	2.4	-1.9	シューボックス
D	コンサートホール	30600	2265	1.9	2.7	ワインヤード
E	コンサートホール	26000	1180	2.1	1.8	ワインヤード
F	大聖堂	-	-	4.2	2.0	バシリカ



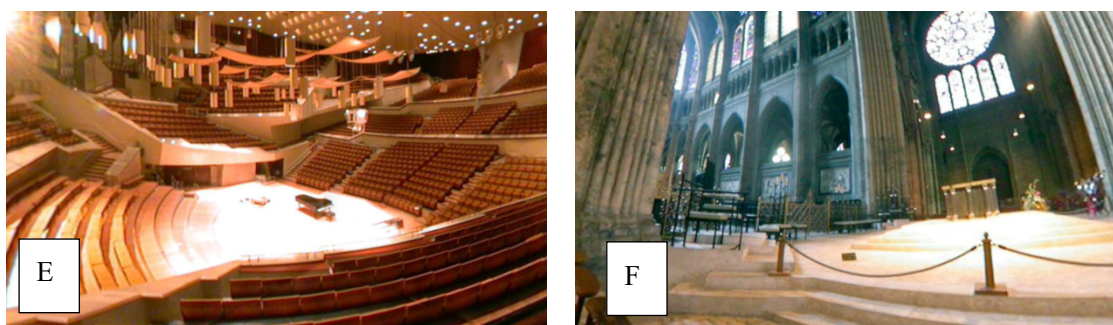


図 4-2 視覚刺激の VR 映像のスクリーンショット

4-2-3 聴覚刺激

聴覚刺激は、第 1 章で示したように各空間で実測された IR を 3 つに分離し、それぞれにドライソース音源を畳み込んだ 3 つの信号を unity における 7.1ch サラウンド設定の Center チャンネルに①、Front Left チャンネルに②、Front right チャンネルに③の信号を割り当てて、被験者に立体的な音場として提示された。この時、unity の仮想環境上でのサラウンド設定におけるスピーカー配置（受音点から見た時の方位角）は、「spread」というパラメーターを変化させることで、制御することが可能である。すなわち unity 仮想環境において「spread」を制御することにより広がり感の異なる刺激を被験者に提示することができる。「spread」は 0-360 の値で制御可能であり、広がり感は 0 の時に最も小さく、360 の時に最も大きい。

畳み込んだドライソース音源は、「フィガロの結婚」（作曲：モーツァルト、DENON オーディオチェック CD より 以下、「音源 1」と表記）、「水上の音楽」(作曲：ヘンデル、DENON オーディオチェック CD より 以下、「音源 2」と表記)を使用した。

表 4-2 は spread と unity 上で測定された IR の IACC の値の関係を表し、図 4-3 はそれをグラフに示したものである。図中の空間毎の spread に対する IACC の変化の傾向によって、空間を 3 分類し、両者の関係の近似式をそれぞれ算出した。空間の分類と対応する近似式を表 4-3 に示す。これを用いることで、測定された広がり感を相当する客観的指標で表現することができる。刺激の名称を表 4-4 に示す

表 4-2 spread の値と IACC の対応

	spread				
空間	0	120	240	300	360
A	0.97	0.91	0.81	0.75	0.60
B	1.00	0.93	0.80	0.75	0.73
C	1.00	0.93	0.79	0.74	0.72
D	1.00	0.89	0.67	0.59	0.61
E	1.00	0.90	0.66	0.60	0.57
F	1.00	0.95	0.86	0.83	0.82

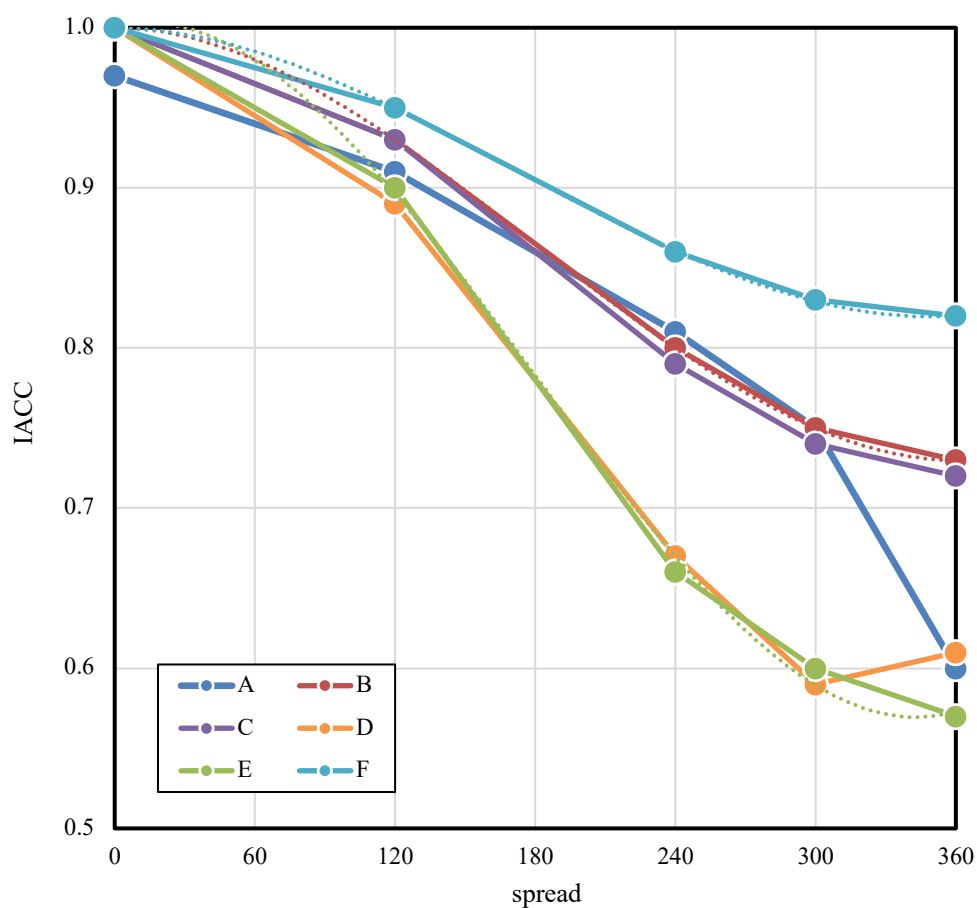


図 4-3 spread と IACC の関係

表 4-3 IACC による分類と近似式

空間	近似式
A・B・C	$y = 1 \times 10^{-8}x^3 - 6 \times 10^{-6}x^2 - 1 \times 10^{-16}x + 1$
D・E	$y = 2 \times 10^{-8}x^3 - 1 \times 10^{-5}x^2 + 0.0003x + 1.0007$
F	$y = 8 \times 10^{-9}x^3 - 4 \times 10^{-6}x^2 - 2 \times 10^{-5}x + 1.0001$

表 4-4 実験における聴覚刺激の名称

空間	0	120	240	300	360
A	a4_0	a4_120	a4_240	a4_300	a4_360
B	b4_0	b4_120	b4_240	b4_300	b4_360
C	c4_0	c4_120	c4_240	c4_300	c4_360
D	d4_0	d4_120	d4_240	d4_300	d4_360
E	e4_0	e4_120	e4_240	e4_300	e4_360
F	f4_0	f4_120	f4_240	f4_300	f4_360

4-2-4 実験手順

4-2-4-1 広がり感の同定実験

被験者には HMD を通じて提示された視覚刺激に対して予測される広がり感の程度を、仮想空間内に表示されたスライダーのハンドルをコントローラーで移動させて指定することによって回答させた。

提示した視覚刺激の例を図 4-4 に示す。ステージ上の黄色の球体は音源位置を示している。スライダーは spread と連動しており、常時スライダーの指示値に対応する広がり感の聴覚刺激が被験者に提示されるようになっている。被験者は、自身が視覚刺激から予測した広がり感の程度となるように逐次試行錯誤を繰り返し、最終的な指示値を決定した後、次の刺激に移行する。刺激は全空間の 6 つを使用した。それぞれの被験者によって刺激の提示順は任意に変更して行った。



図 4-4 VR 映像提示の例

4-2-4-2 広がり感の主観評価実験

HMD、ヘッドホンを通じて提示された視聴覚刺激または聴覚刺激に対しての広がり感の主観印象を、仮想空間に表示されたスライダーのハンドルを移動することによって回答させた。この場合、スライダーと **spread** パラメータは連動していないが、回答値は **spread** 相当と考え、0-360 の間の実数値をとるように設定した。視覚刺激は A～E、聴覚刺激は各空間 5 個ずつ（表 4-4）の計 30 個を全て使用する。試行はそれぞれの空間に対するマルチモード・シングルモード合わせて計 60 回行われた。被験者によって刺激の提示順は任意に変更して行った。

4-3 実験結果と分析

4-3-1 広がり感の同定実験

図 4-5、図 4-6 はそれぞれ音源 1 および 2 に対する空間ごとの被験者の広がり感の予測値とそれらの平均値を **spread** 値として示す。図 4-5 では多くの空間で予測値に大きいばらつきが見られた。図 4-6 においてもばらつきが見られる空間は多いが、空間 C、D ではある程度の範囲で被験者の予測値が集中している部分も見られる。音源の違いは判断のしやすさに影響があったと考えられる。

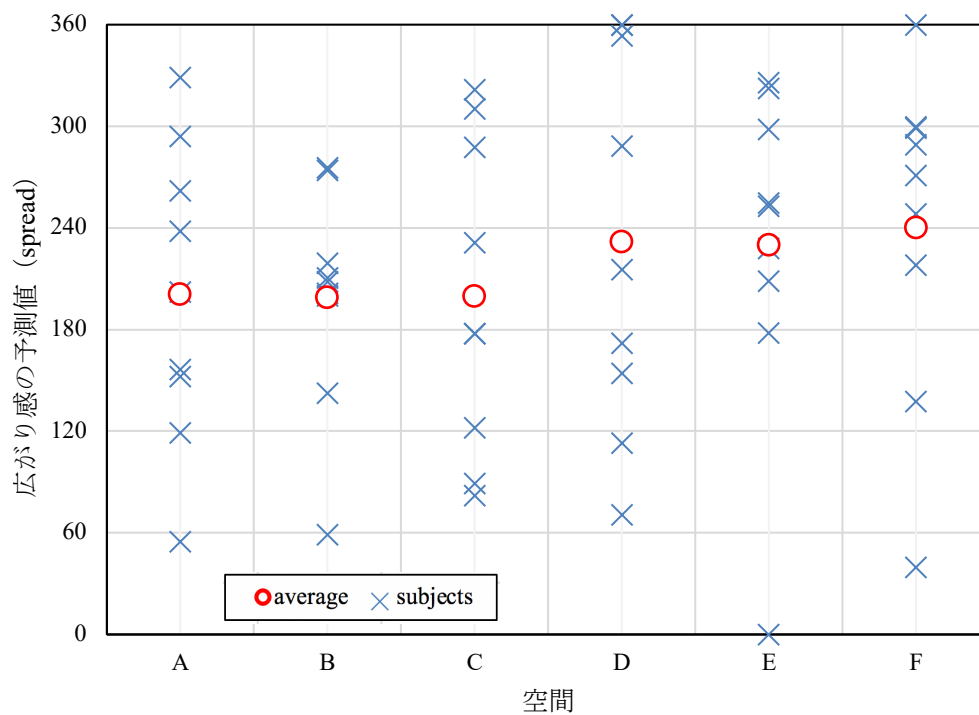


図 4-5 空間ごとの被験者の広がり感の予測値と平均 (spread) (音源 1)

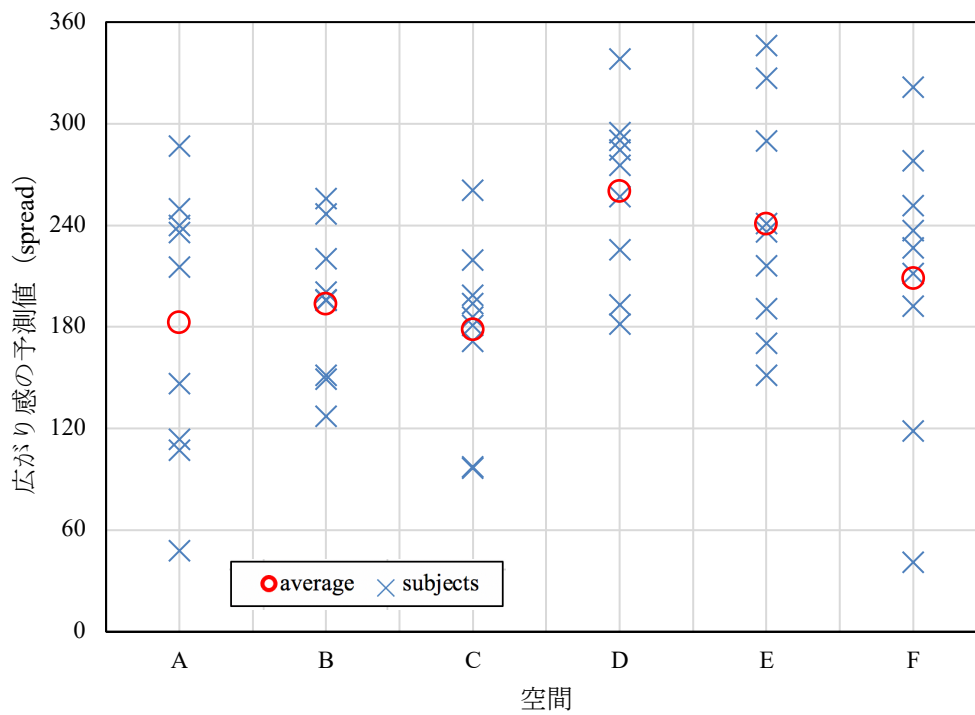


図 4-6 空間ごとの被験者の広がり感の予測値と平均 (spread) (音源 2)

図 4-7、図 4-8 はそれぞれ音源 1 および 2 に対する被験者ごとの予測値とそれらの平均値を IACC 値として示したグラフである。図 4-7 について IACC の平均予測値の大小関係は $F > A, B, C > D > E$ の順となった。すなわち音源 1 において空間 E は最も広がり感が大きいと予想され、空間 A は広がり感が小さいと予想された。A-E, B-E, C-D, C-E, D-F, E-F 間において 1%水準の有意差が検出され、A-D, B-D 間では 5%水準の有意差が検出された。しかし図 4-7 のグラフでは被験者の中でばらつきが大きい空間も見られた。図 4-8 では IACC の平均予測値の大小関係は $F > A, B, C > E > D$ の順となった。すなわち音源 2 において空間 D は最も広がり感が大きいと予想され、空間 F は広がり感が小さいと予想された。E-F, C-E, A-E, B-E, D-F, C-D, A-D, B-D 間において 1%水準の有意差が検出された。図 4-8 は図 4-7 比較するとばらつきが小さいように見えるが、有意差が検出されたのは図 4-7 と同じ空間間のみであった。

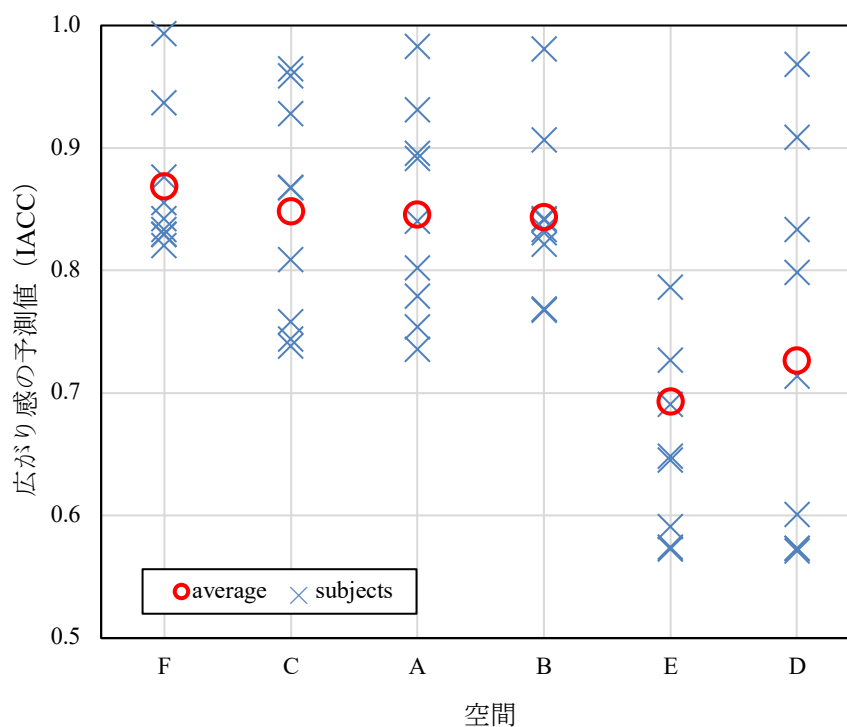


図 4-7 空間ごとの被験者の広がり感の予測値と平均 (IACC) (音源 1)

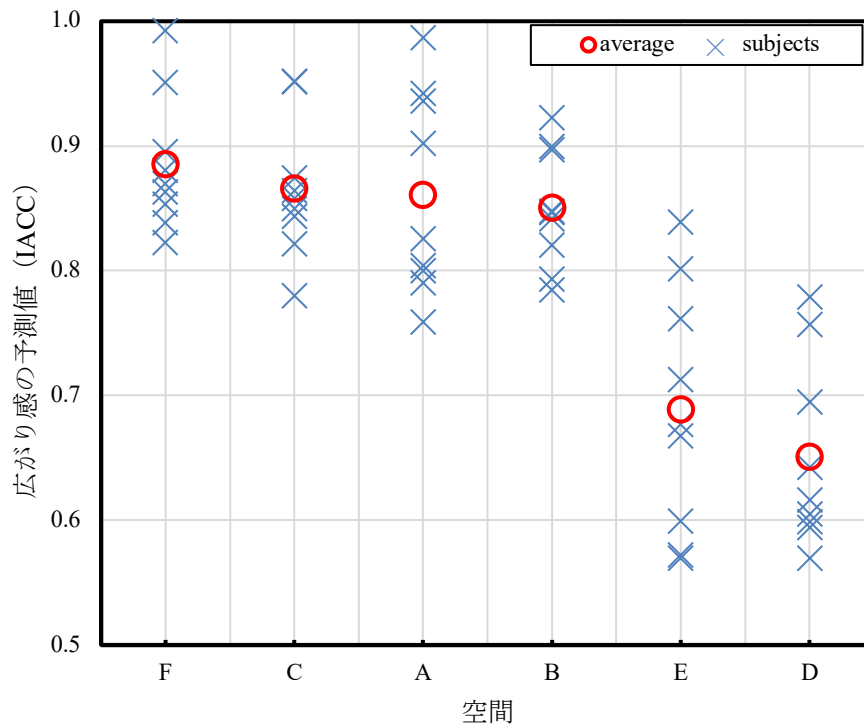


図 4-8 空間ごとの被験者の広がり感の予測値と平均 (IACC) (音源 2)

4-3-2 広がり感の主観評価実験

主観評価実験の結果を示す。音源 2 の結果において被験者によって評定平均値の推移に傾向の違いが見られたため、似た傾向を集めた内最も信頼の高い傾向を抽出して示す。図 4-9、4-10 は音源 1 及び音源 2 における **spread** に伴う評定平均値の変化を **spread** 値で示したグラフである。図 4-9 では空間 C が最も広がり感が大きく判断され、空間 D が最も小さく判断された。 c_{4_120} のシングルモードが最も広がり感が大きく、 d_{4_0} が最も小さく判断された。しかし、**spread** の変化による評定平均値の変化はほとんど見られなかった。図 4-10 でも空間 D の評定平均値が小さく、広がり感が最も小さいと判断された。図 4-10 ではシングルモードにおける f_{4_240} が最も広がり感が大きく、マルチモードにおける d_{4_0} が最も小さく判断された。また、右上がりに近いグラフが示された。同定実験と同様に、音源 1 よりも刺激の判断が容易であったと推定される。

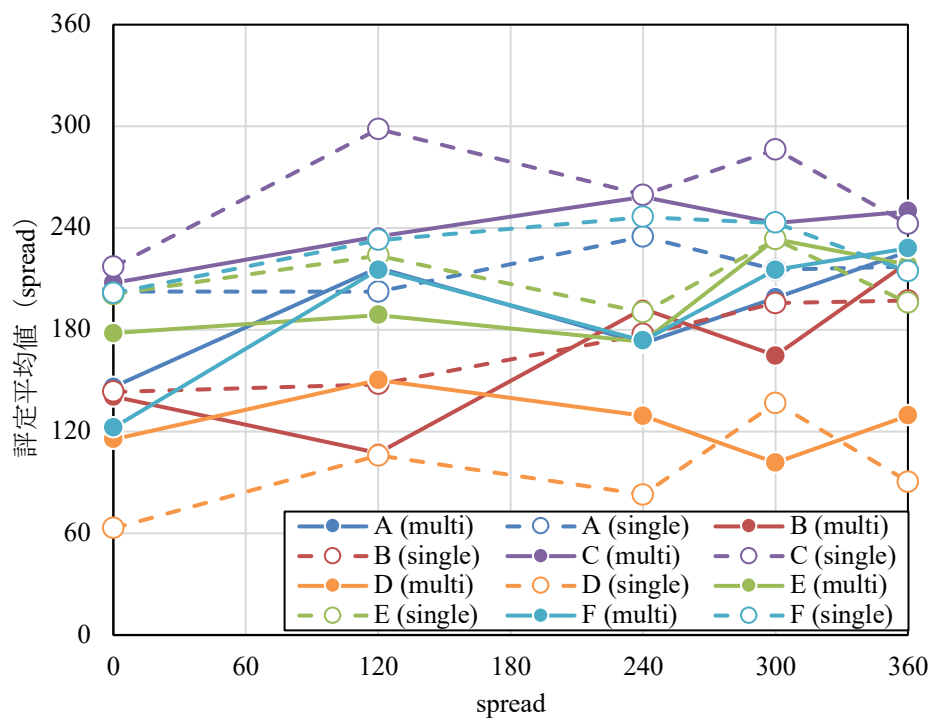


図 4-9 spread に伴う評価平均値 (spread) の推移 (音源 1)

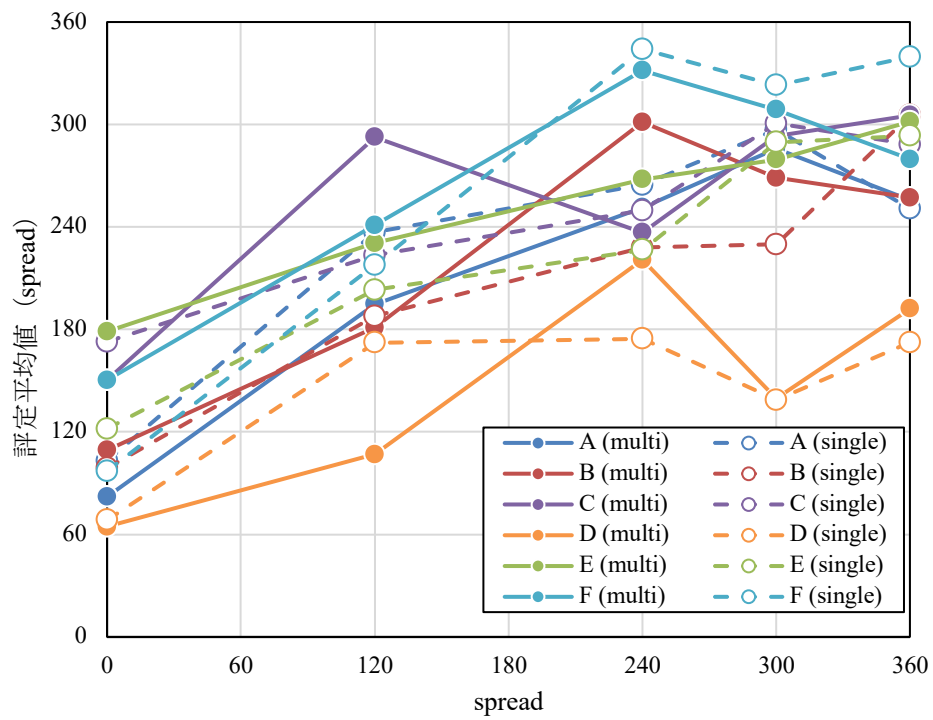


図 4-10 spread に伴う評価平均値 (spread) の推移 (音源 2)

図 4-11、図 4-13 は音源 1 および音源 2 に対する spread に伴う被験者の IACC の評定平均値の変化を示したグラフである。横軸は unity 上の spread の値を表し、縦軸は実験で得られた spread の評定値を表 4-3 の式を用いて求めた IACC の値である。

図 4-11 では spread の変化によってほとんど IACC が変化していないように見える。図 4-12 は音源 1 の空間ごとのグラフを示している。多くの空間で spread の変化によらず IACC の評価値が上下する傾向が見られる。分散分析を行なったところ、B、F のマルチモードで 5% の有意差が検出された。

図 4-13 のグラフでは全体的に概ね右下がりの傾向を示している。つまり spread の値が大きくなるほど IACC の値は小さくなり、広がり感は大きく判断されている。分散分析にて A のマルチモード、B のシングルモード、F のシングルモードに 1% 水準、A のシングルモード、B のマルチモード、C のマルチモード、D のマルチモード、E のシングルモードに 5% 水準で変動が有意であることが検出された。図 4-11 よりも多くのモードにおいて有意差が検出され、同定実験と同様音源 1 においてばらつきが大きいことから、提示される音楽によって判断のしやすさに差があったと考えられる。しかしどちらの結果においても同一刺激間のマルチモードとシングルモードの差に有意差は検出されなかった。図 4-14 は音源 2 の空間ごとのグラフを示している。音源 1 のグラフと比較して空間 D ではグラフにガタつきが見えるものの、多くの空間で右下がりの傾向が見られる。

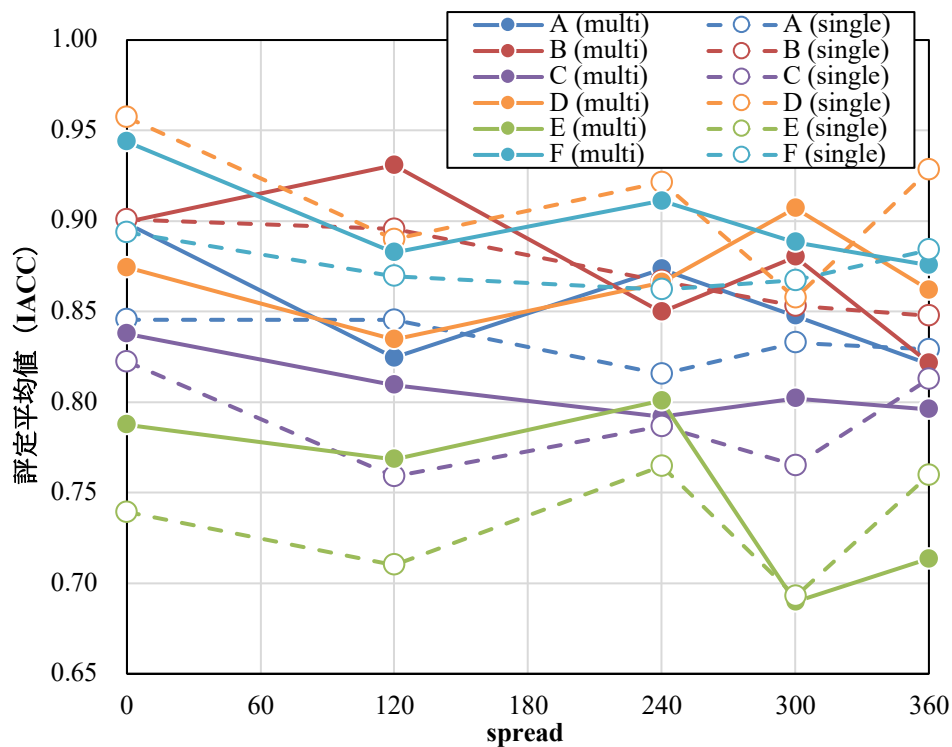
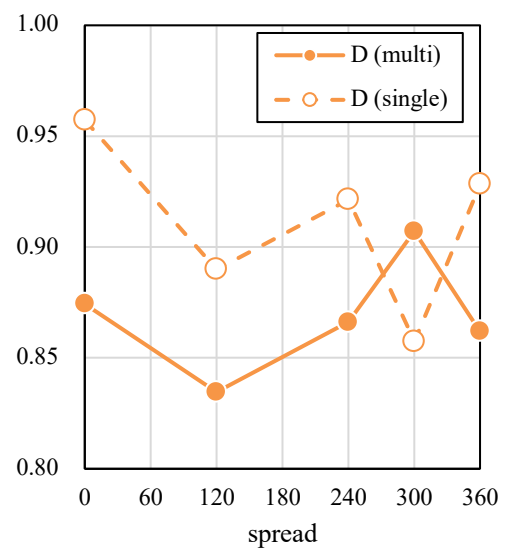
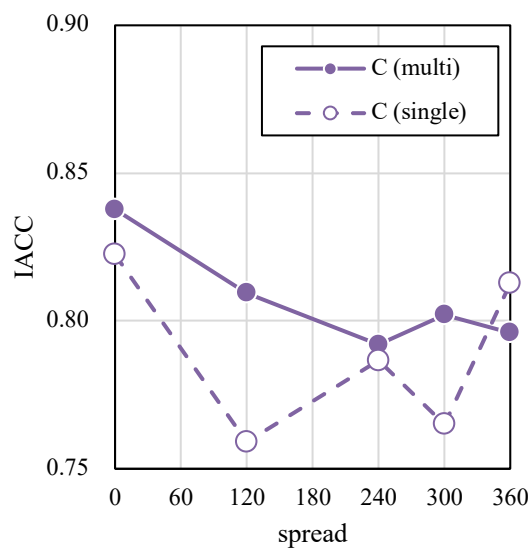
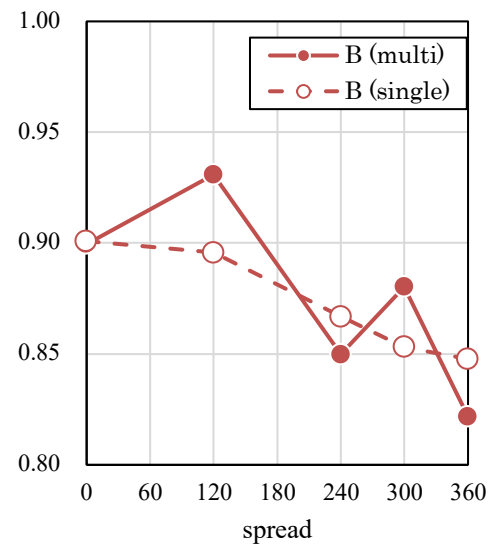
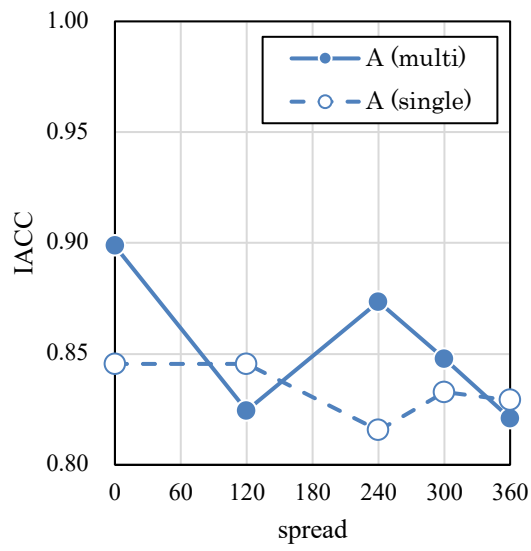


図 4-11 spread に伴う評定平均値 (IACC) の推移 (音源 1)



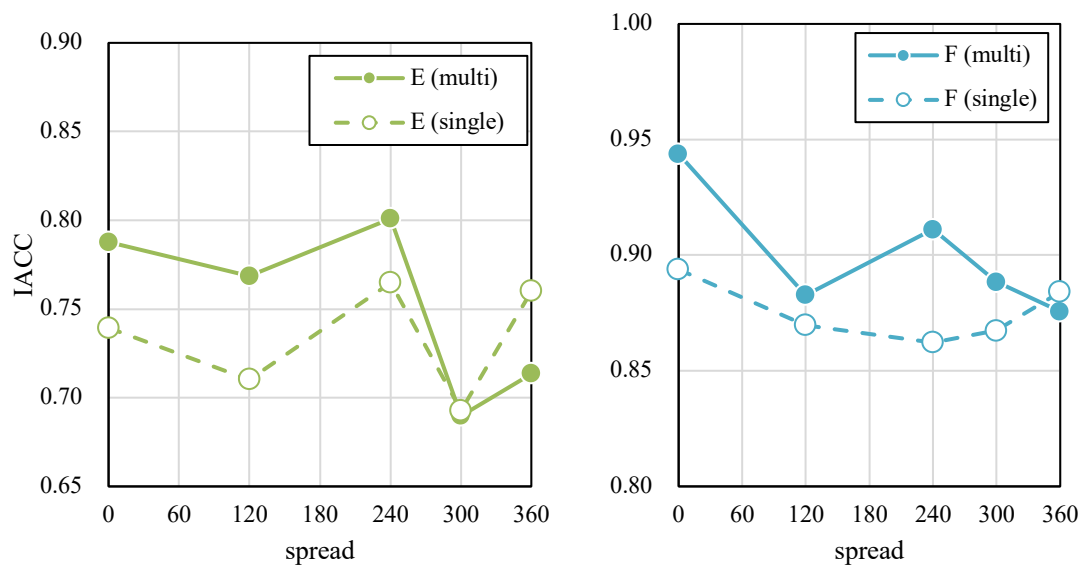


図 4-12 空間ごとの spread に伴う評価平均値 (IACC) の推移 (音源 1)

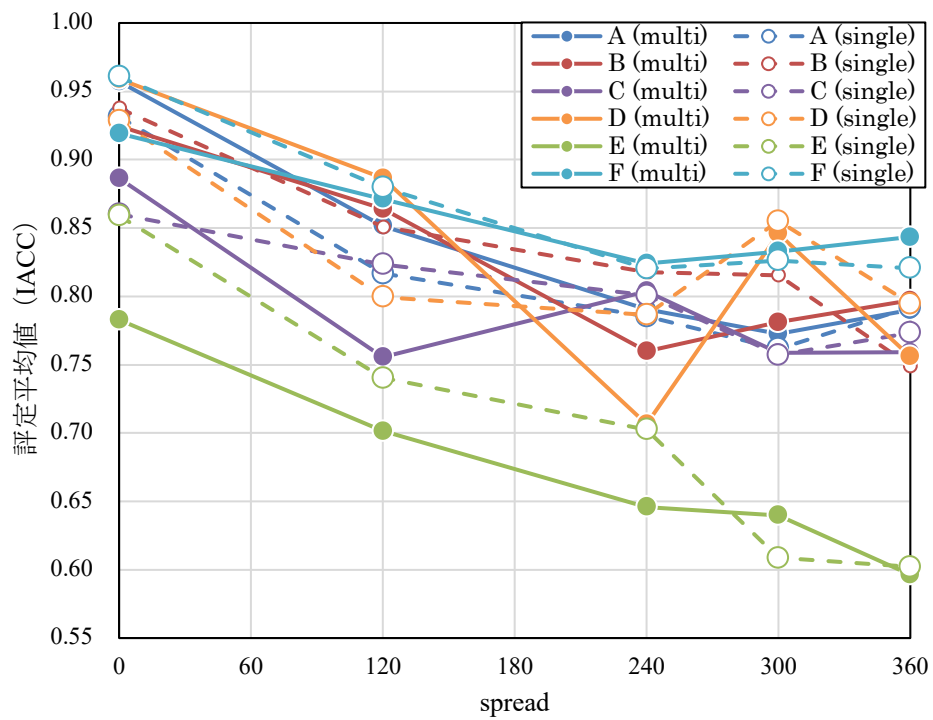


図 4-13 spread に伴う主観評価値 (IACC) の推移 (音源 2)

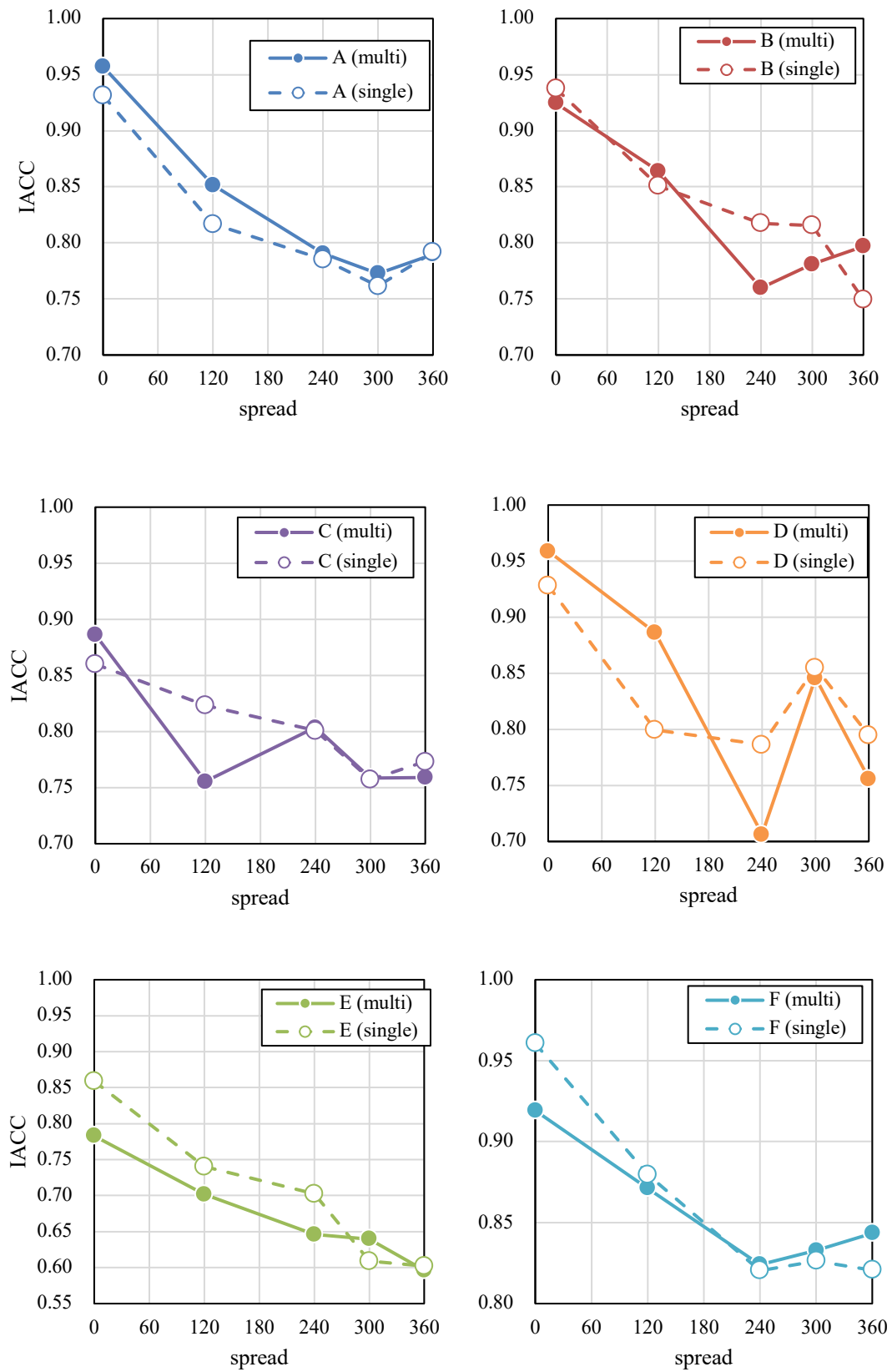


図 4-14 空間ごとの spread に伴う評価平均値 (IACC) の推移 (音源 2)

図 4-15、図 4-16 は音源 1、音源 2 の IACC の実測値に伴う被験者の IACC の評定値の平均を表すグラフである。双方の値が近いほどグラフ上の 45° の線に近い点を示す。図 4-15 ではグラフがほぼ横ばいになっている。このことより実測 IACC の変化に対して主観評価値がほぼ変化していない。図 4-16 では実測 IACC の 0.9~1.0 の範囲においては 45° の線から外れているが 0.9 以下において線付近を通過している点が多く、提示された IACC に対して同程度の IACC 値が回答されている。

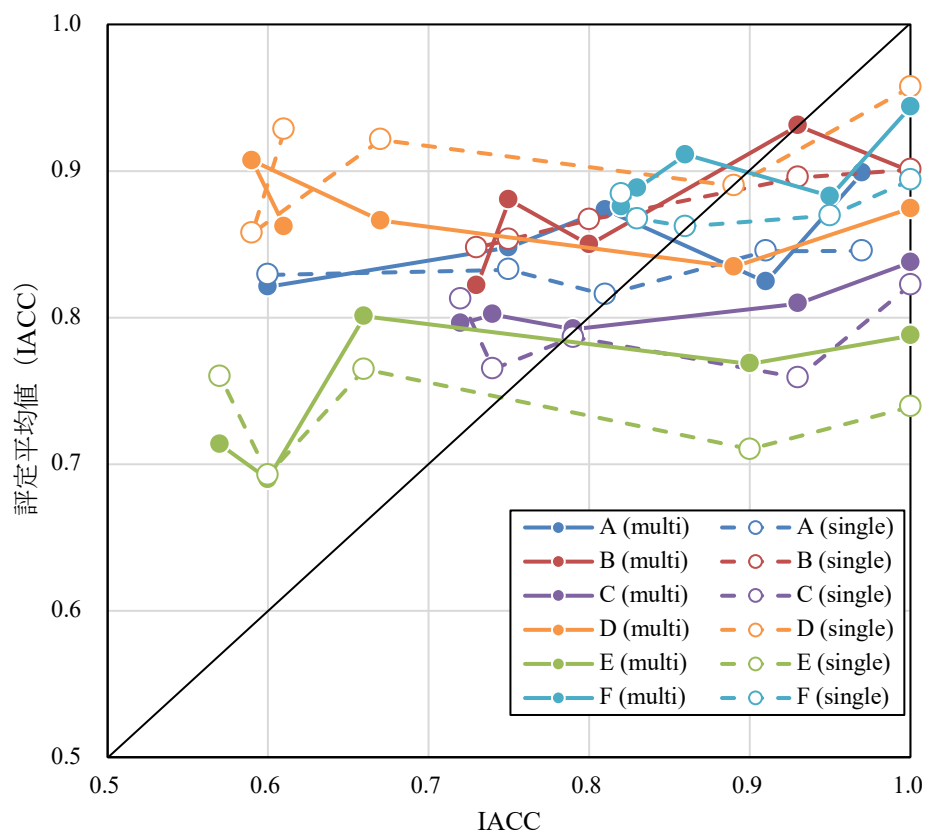


図 4-15 実測 IACC に伴う IACC の主観評価値の推移(音源 1)

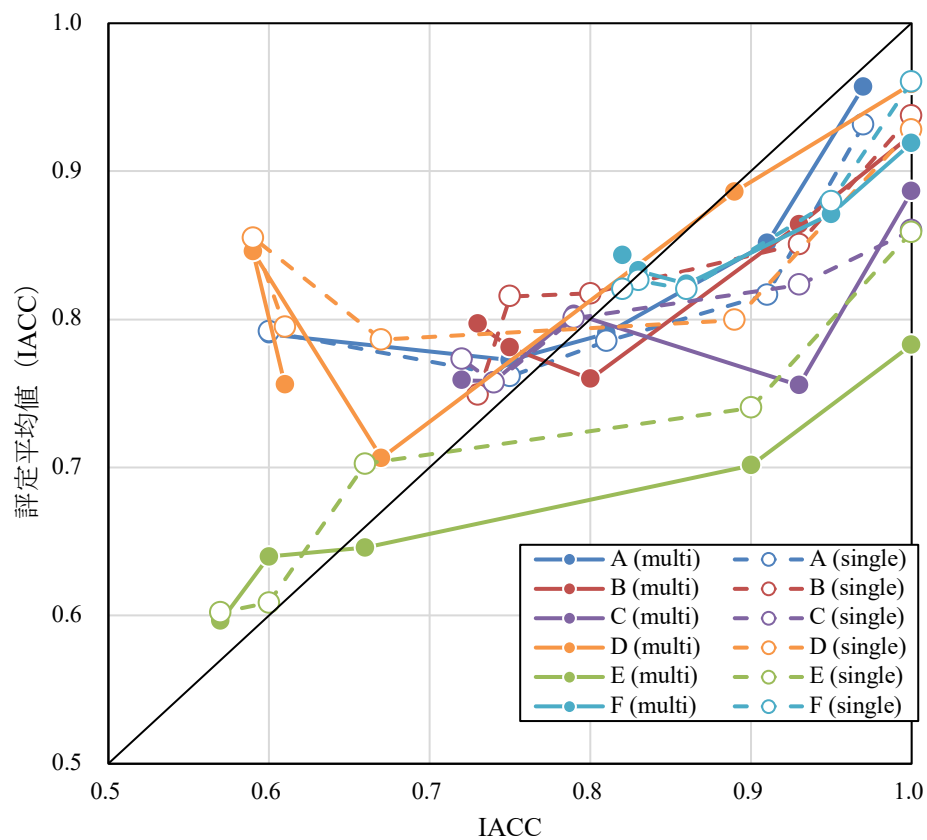


図 4-16 実測 IACC に伴う IACC の主観評価値の推移(音源 2)

図 4-17、図 4-18 に spread の値に伴うマルチモードとシングルモードの spread の評価平均値の差の推移を示した図を示す。図 4-17 では spread の推移に伴う変化は見られず、評価値が上下するグラフとなったが、300 から 360 にかけて評価平均値の差が高くなっている。図 4-18 でもにおいて空間 B、F 以外の空間で同様の傾向が見られたが、spread の推移による変動の明確な傾向は見られなかった。

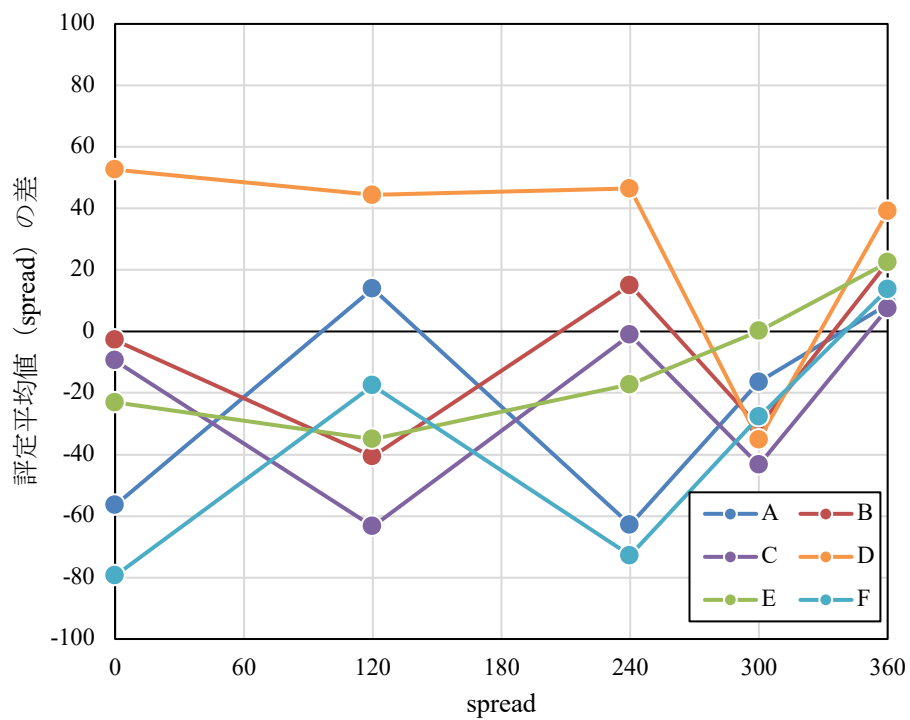


図 4-17 マルチモードとシングルモードの評定平均値 (spread) の差の推移 (音源 1)

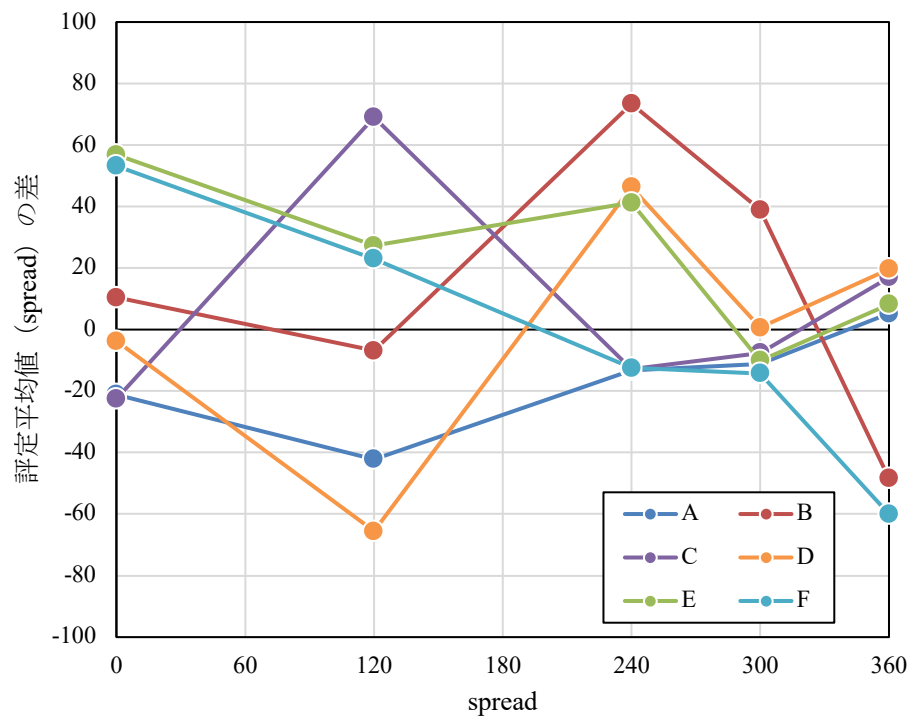


図 4-18 マルチモードとシングルモードの評定平均値 (spread) の差の推移 (音源 2)

図 4-19、図 4-20 に spread の値に伴うマルチモードとシングルモードの IACC の評定平均値の差の推移を示した図を示す。図 4-19 では spread の値が 360 の時シングルモードよりマルチモードの IACC の方が小さくなった。つまり 360 の際に広がり感が大きく判断される傾向が見られた。また、多くの空間で 0~300 の間でマルチモードの IACC が大きいのに対し、空間 D はシングルモードの IACC が大きくなっている。しかし、全ての空間において分散分析を行ったが有意差は検出されなかった。図 4-20 では音源 1 ほど明確な傾向が見られなかったものの、分散分析を行ったところ、空間 F で 1 %水準、空間 A、C において 5%水準で有意差が検出された。

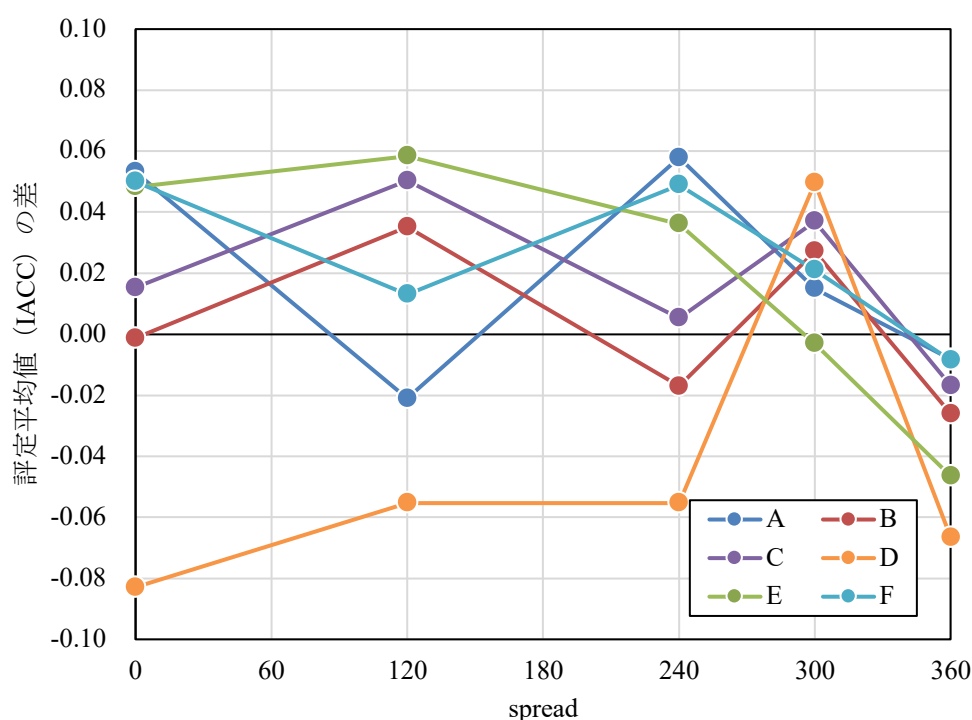


図 4-19 マルチモードとシングルモードの評定平均値 (IACC) の差の推移 (音源 1)

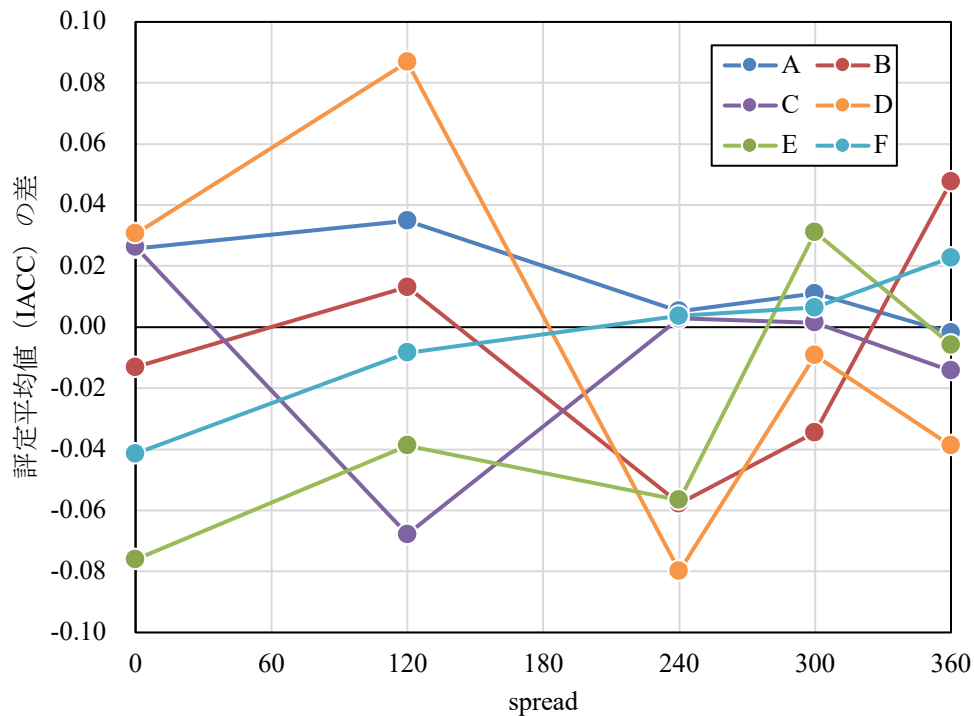


図 4-20 マルチモードとシングルモードの評定平均値 (IACC) の差の推移 (音源 2)

4-4 広がり感の予測値と評定値との関係

石川の博士論文で提案された、視覚情報の音場の主観印象に対する影響を表す心理モデルを用いて、広がり感の主観評価実験の結果と先に行われた同定実験で得られた予測値との関係を検証する。この心理モデルにおいては、視覚情報から予測した主観印象と比較し、与えられた音場の聴覚印象が異なる場合、聴覚印象は予測された印象に近づくよう補正されるとし、その補正量は両者の差に比例するというものである。

ここで、横軸に提示した聴覚刺激の IACC と被験者ごとの広がり感の IACC の予測値の差、縦軸にマルチモードとシングルモードの評定値の差を取った点をプロットしたグラフを作成した。(以下、「差分のグラフ」と称する) もし上述の心理モデルが音の広がり感にも適用できるとすれば、このグラフに対して以下のような分布が得られると考えられる。

・予測 IACC よりも提示 IACC が大きい時 (横軸が正の時)

予測 IACC よりも提示刺激の IACC が大きい時、つまり予測した広がり感よりも小さい広がり感の聴覚刺激が提示された時である。

シングルモードにおいては視覚刺激の影響がないため聴覚のみの評価が行われるが、マルチモードにおいては予測 IACC に近づけるよう (IACC が小さくなる方向)、つまり広がり感は大きくなるように聴覚印象が変化すると (図 4-21 の左図) 思われ、差分のグラフにプロットされる点は第四象限に分布すると考えられる。

・ 予測 IACC よりも提示 IACC が小さい時（横軸の値が負の時）

予測 IACC よりも提示刺激の IACC が小さい時、つまり予測した広がり感より大きい広がり感が提示された時である。

予測した IACC よりも小さい IACC の値の刺激が提示されるため、マルチモードにおいては予測 IACC に近づけるよう（IACC が大きくなる方向）、つまり広がり感は小さくなるように聴覚印象が変化すると考えられ（図 4-21 の左図）、差分のグラフにプロットされる点は第二象限に分布すると考えられる。

さらに予測 IACC と提示刺激の IACC が等しい場合は、印象変化が生じないため、差分のグラフにおいて点は原点付近に分布すると考えられる。これらを単純に表現すると図 4-21 の右図のようになる。

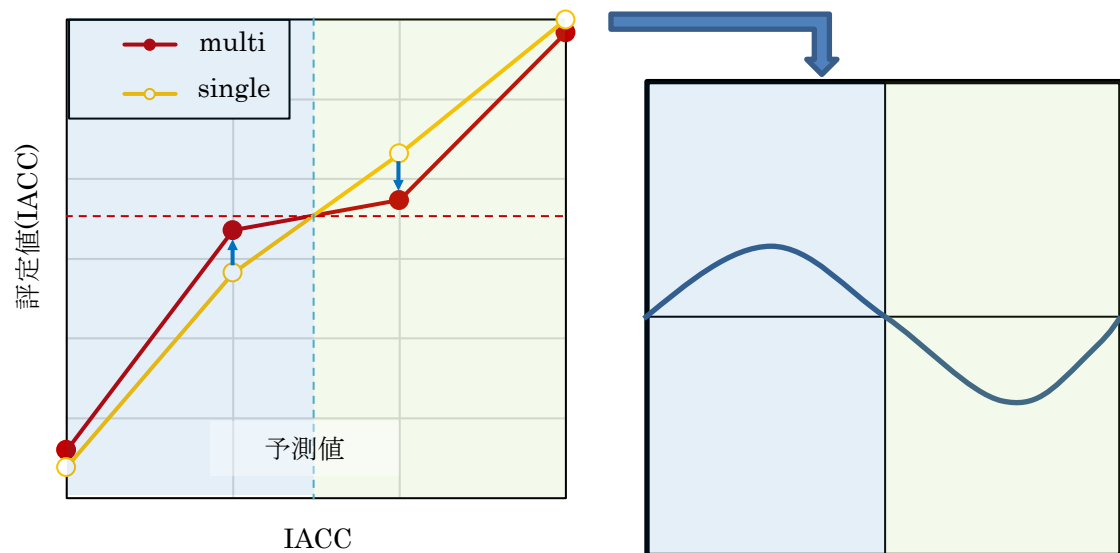


図 4-21 差分のグラフにおける実験結果と心理モデルの関係

図 4-22 に音源 1 に対する差分のグラフを示す。また、各空間の差分のグラフを図 4-23 に示す。図 4-22 では点は全体的に散らばっており、明確な分布傾向は把握できなかった。図 4-23 は空間毎に作成された差分のグラフであるが、心理モデルに合致する分布は得られなかった。

図 4-24 に音源 2 に対する差分のグラフを示す。また、各空間の差分のグラフを図 4-25 に示す。図 4-24 においても心理モデルに合致する分布は得られなかったものの、第二象限、第四象限にプロットされる点が多い。横軸の値が正の時、負の時と比較するとプロットされた点は大きくばらついている。

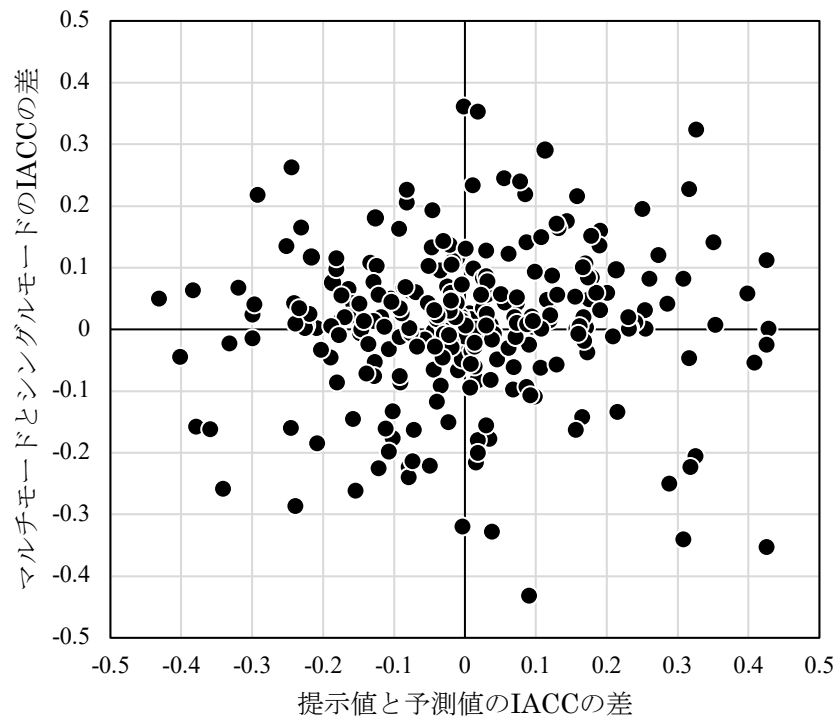
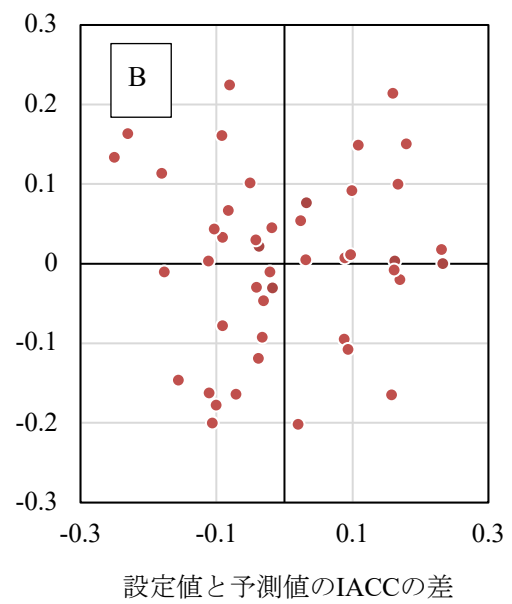
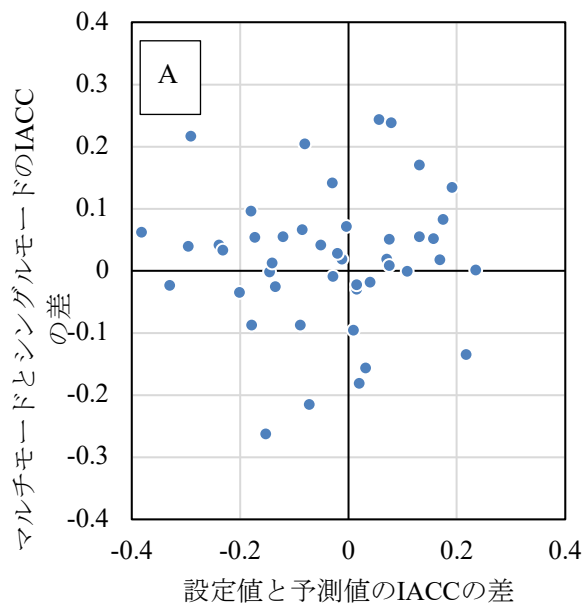


図 4-22 心理モデルに対する実験結果の適合性の確認
(同定実験から得られた予測値) (音源 1)



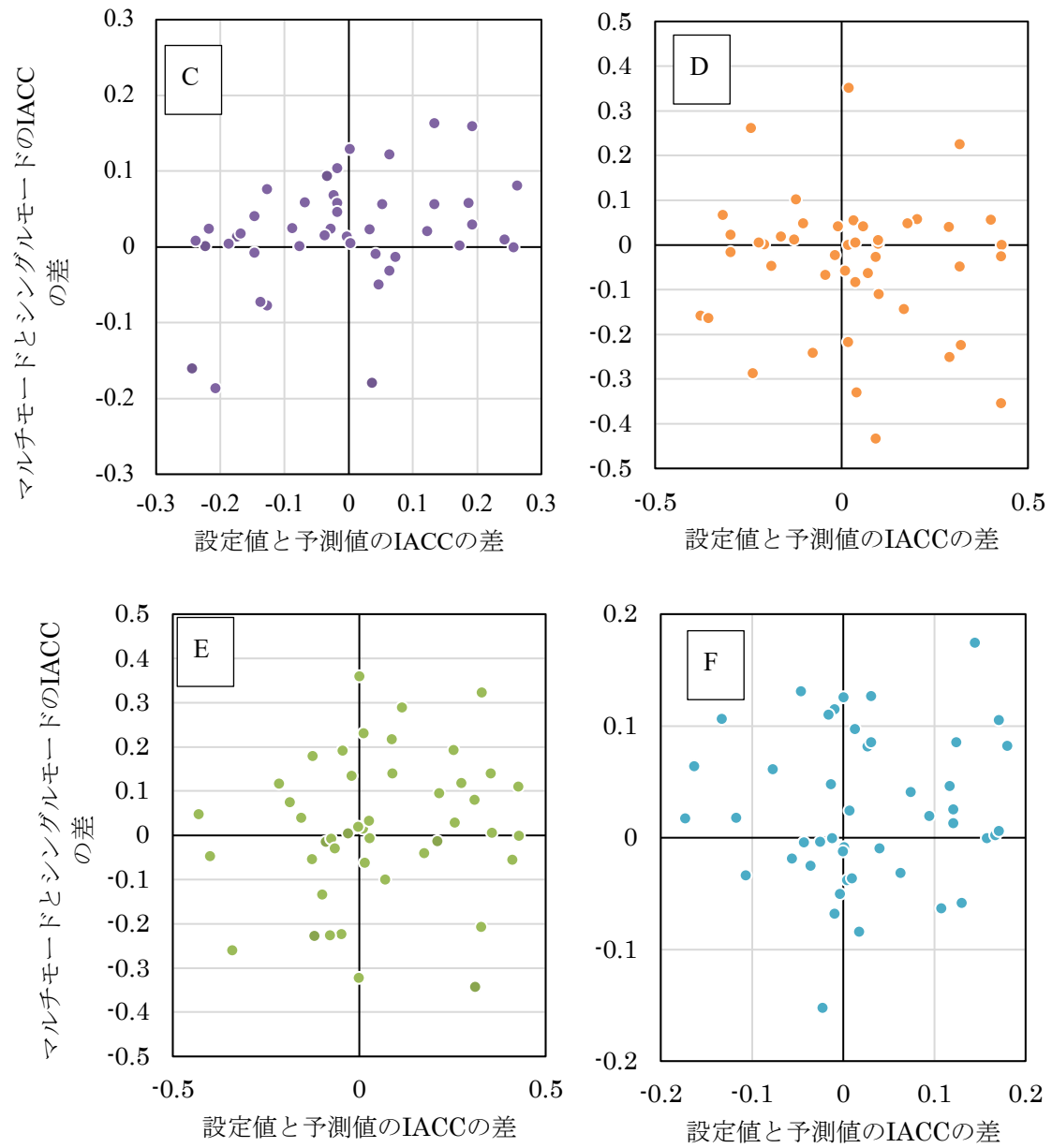


図 4-23 空間ごとの心理モデルに対する実験結果の適合性の確認
(同定実験から得られた予測値) (音源 1)

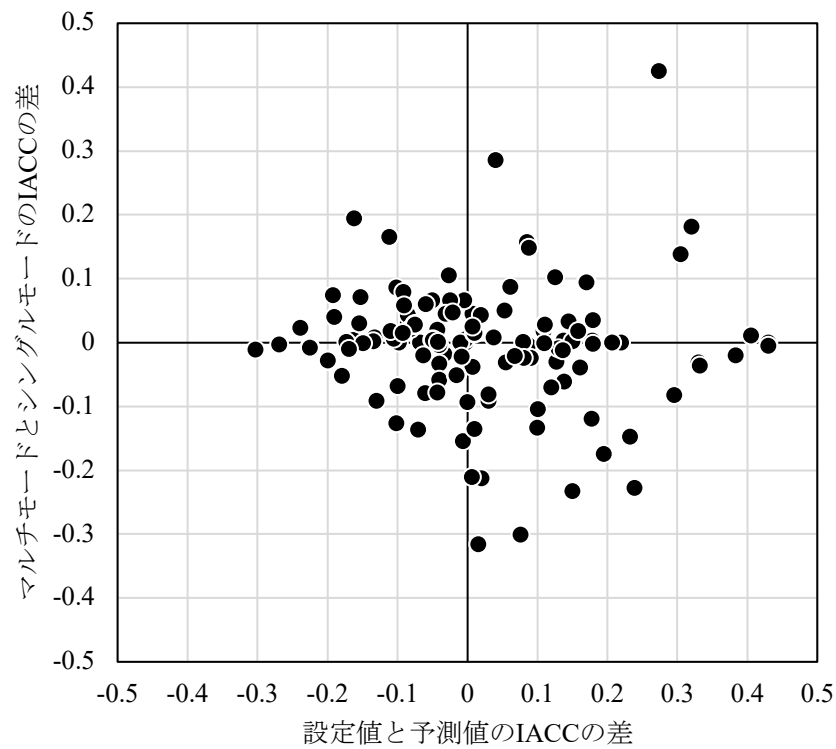
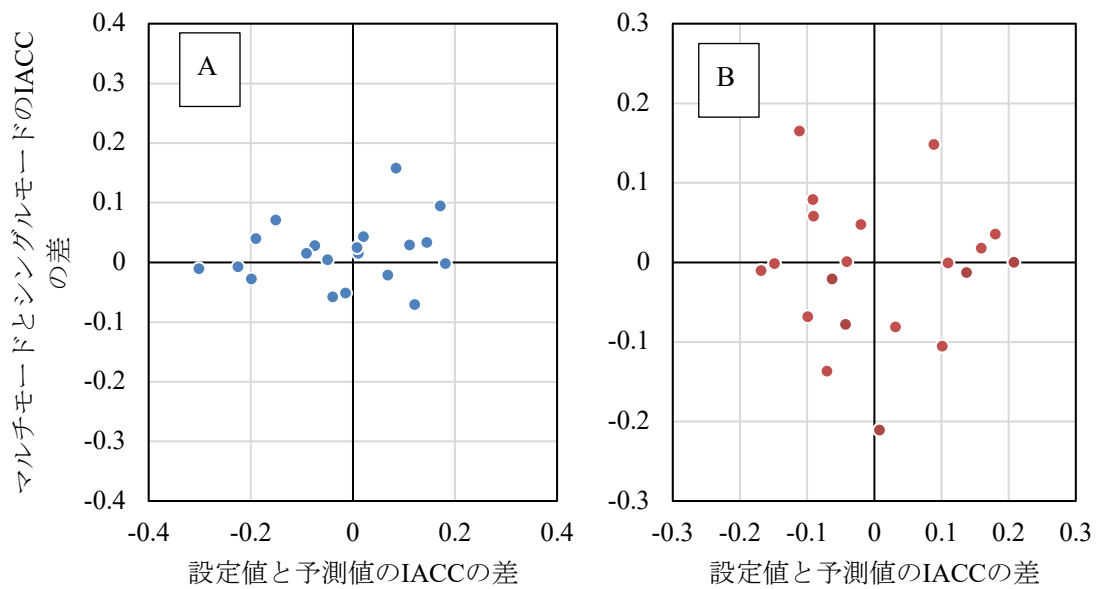


図 4-24 心理モデルに対する実験結果の適合性の確認
(同定実験から得られた予測値) (音源 2)



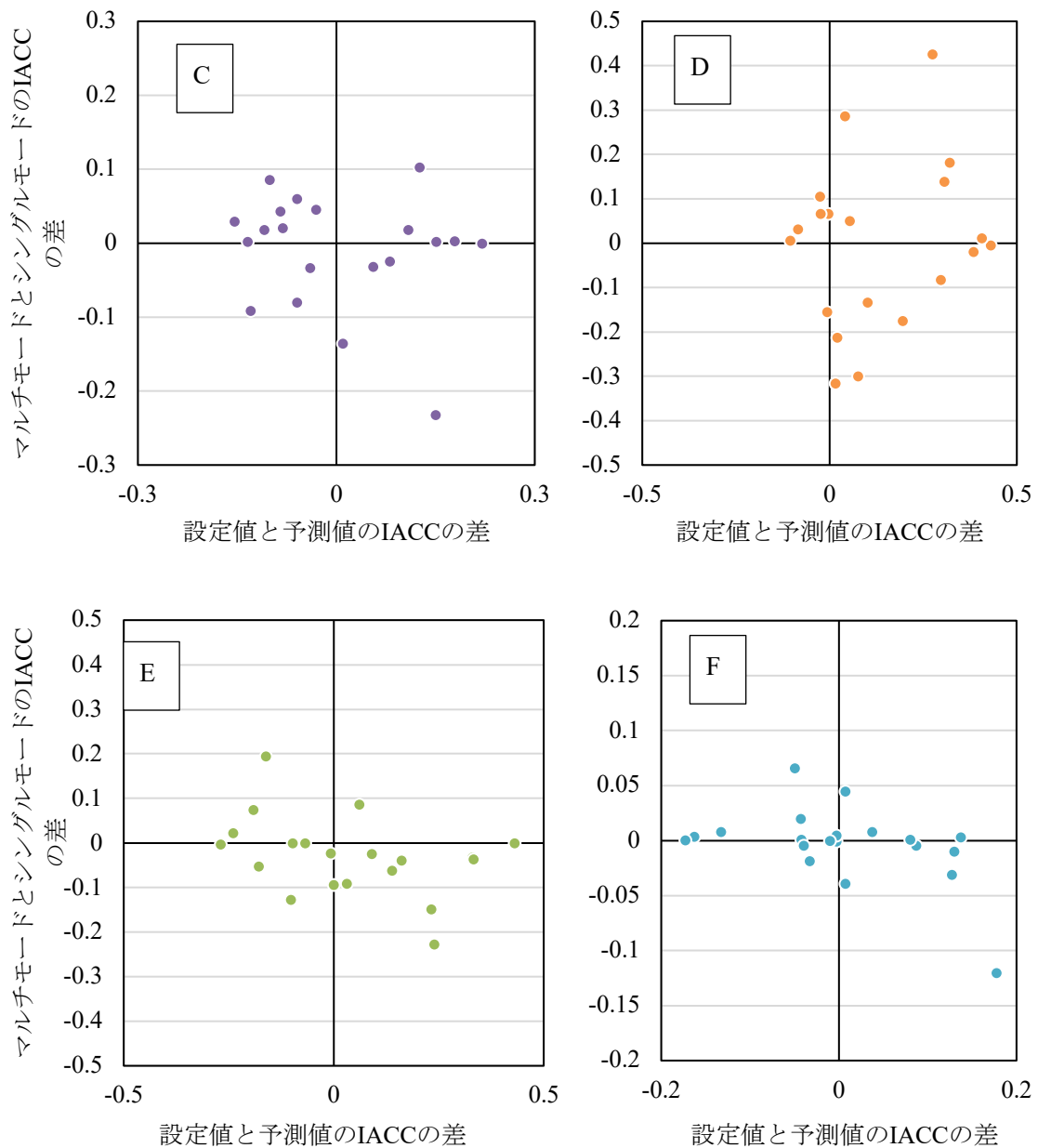


図 4-25 空間ごとの心理モデルに対する実験結果の適合性の確認
(同定実験から得られた予測値) (音源 2)

同定実験では直接広がり感の予測値を測定しているが、主観評価実験においてマルチモードとシングルモードの評定値の大小関係が切り替わる点（交点）の IACC 値を予測値と見なす事もできる。図 4-26、図 4-27 は、このような方法で算出した IACC 値を同定値の代わりに用いて、音源 1、音源 2 に対する差分のグラフである。交点が存在しないグラフについては除外した。図 4-27 では横軸が負の値の時、68%の点が第二象限にプロットされるグラフとなり、多くの点でマルチモードの方が IACC 値を大きく判断し、広がり感を小さく感じている。また横軸が正の値の時には、59%の点が第四象限にプロットされた。

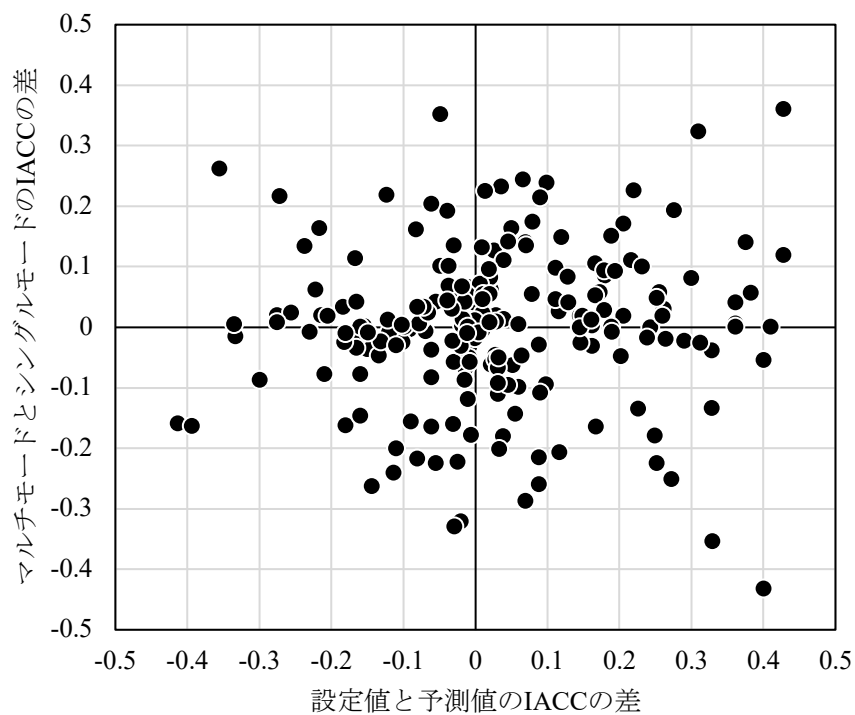


図 4-26 心理モデルに対する実験結果の適合の確認
(交点から得られた予測値) (音源 1)

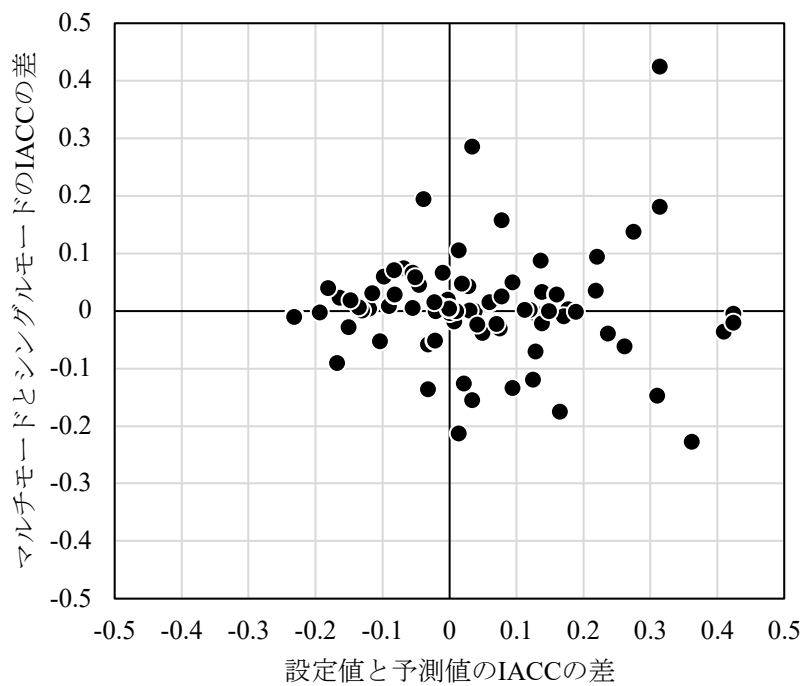


図 4-27 心理モデルに対する実験結果の適合の確認
(交点から得られた予測値) (音源 2)

4-5 同定実験による予測値と主観評価実験のモード間の大小関係から推定した予測値の関係

4-4 で示した主観評価実験で得られたグラフの交点から推定した予測値と、同定実験で得られた予測値との関係を検討した。交点が存在しないグラフについては除外した。

図 4-28、図 4-29 に縦軸に同定実験で得られた各被験者の予測値、横軸にそれぞれの被験者の主観評価実験における交点で予測値を取ったグラフを示す。

図 4-28 において全体の 74.3%が両者の差が ± 0.1 以内であった。また、図 4-29 でも全体の 75%で IACC の予測値の差が ± 0.1 以内であった。どちらの図においても被験者によって予測値に大きなばらつきのある空間があったにもかかわらず 2 つの実験間の予測値は大きく変わらない結果となり、各被験者の予測値とマルチモードとシングルモードの評価値の入れ替わり点には関係があると推測される。

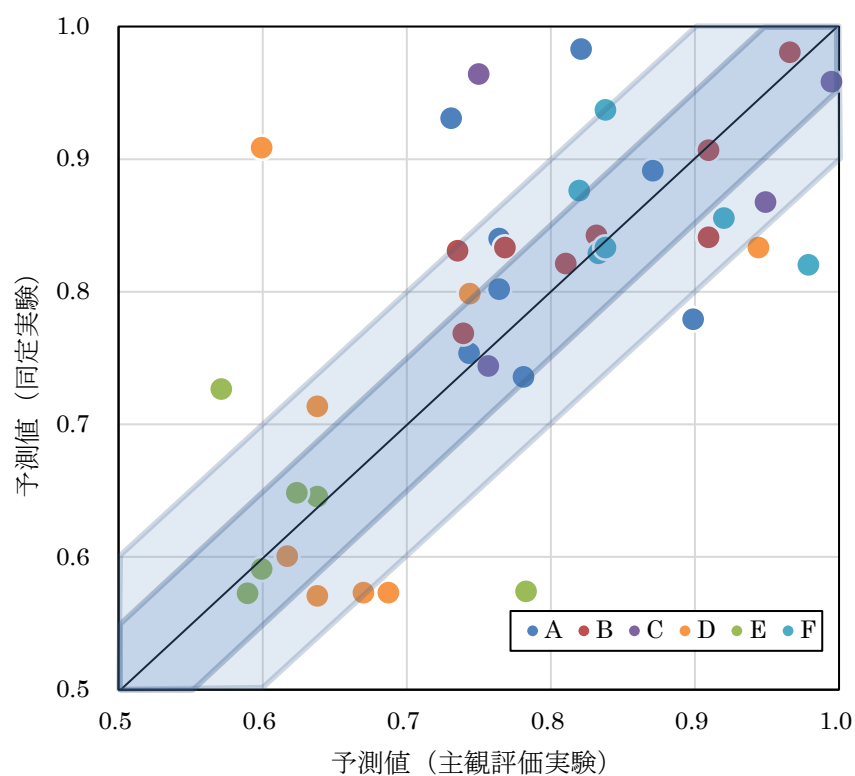


図 4-28 予測値の関係 (音源 1)

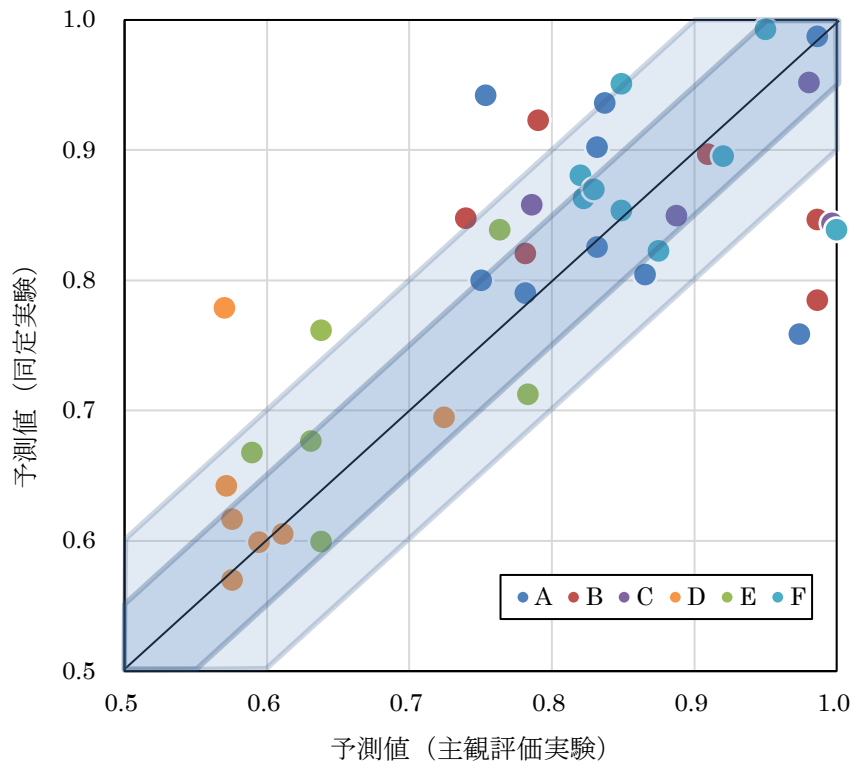


図 4-29 予測値の関係（音源 2）

4-6 小括

音の広がり感の予測値は空間の間に差が見られる結果となり、ホールの形状や広さなど視覚的な空間性状は広がり感の予測値に影響を有意に及ぼすと考えられる。また視聴覚刺激に対する広がり感を測定した主観評価実験では、**spread** の変化に伴う評定平均値は有意な変動を示したものの、空間 C や D では不自然な傾向を示し、被験者の評定値に大きなばらつきが見られた。実験結果を、心理モデルに照らし合わせてみると、モデルに沿ったデータプロットが得られなかった。これは、聴覚刺激をヘッドホン提示した場合、音像は頭内に生じるが、視覚刺激に示される音源は前方に存在し、これらの二つの関係がリンクされない、すなわち視聴覚統合されない状態の被験者が少なからずいたのではないかと原因を推察した。

一方で、被験者ごとに同定実験の予測値と主観評価実験のグラフの交点から求められる予測値を比較したところ、2 つの値は概ね同程度の値を示しており予測値の間には関係が見られた。

第 5 章

仮想環境（VR）でのスピーカー提示による ASW の主観評価実験

5-1 研究概要

第 4 章ではヘッドホン提示による広がり感の予測値の同定と主観評価実験を行なった。しかし、仮想環境における立体音場であっても、ヘッドホン提示では音像が頭内に生じ、視聴覚統合されない被験者がいたためか、被験者の回答には信頼性が見られなかった。そこで、聴覚刺激提示方法をスピーカー配列に変更し、改めて主観評価実験を行った。被験者は正常な視覚と聴覚をもつ男女 9 名である。

5-2 実験概要

5-2-1 実験システム

無響室内において視覚刺激を HMD、聴覚刺激をスピーカー再生によって提示する実験を行なった。実験システムの構築には Unity Technologies 社からフリーの開発環境としてリリースされているゲームエンジン「unity」を使用した。



図 5-1 無響室内での実験の様子

5-2-2 対象空間と視覚刺激

視覚刺激は第4章と同じものを使用した。再度空間概要を表5-1に示す。また、視覚刺激に用いたVR映像を図5-2に示す。

表5-1 視覚刺激の空間概要及び音響特性(500Hz 基準)

刺激名	用途	容積 [m ³]	座席数 [席]	T ₃₀ [s]	C ₈₀ [dB]	形状
A	大学講堂 (多目的ホール)	12000	1650	1.4	2.2	扇形
B	多目的ホール	5200	604	1.8	-2.0	扇形
C	コンサートホール	18700	2037	2.4	-1.9	シューボックス
D	コンサートホール	30600	2265	1.9	2.7	ワインヤード
E	コンサートホール	26000	1180	2.1	1.8	ワインヤード
F	大聖堂	-	-	4.2	2.0	バシリカ



図5-2 視覚刺激のVR映像

5-2-3 聴覚刺激

聴覚刺激は第 1 章で示したように実測 IR を 3 つに分離し、それぞれにドライソース音源を畳み込んだ信号を、unity の 7.1ch サラウンド設定の Center と Front L/R、Side L/R、Rear L/R のチャンネルに割り当て、無響室内に配置されたスピーカーから被験者に同時に提示した。スピーカーの配置を図 5-3 に示す。初期反射音の到来方向は $\pm 0^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$ と切り替え可能であり、聴覚刺激によって異なる広がり感を被験者に与える。ただし、方位角 $\pm 0^\circ$ に相当する聴覚刺激の場合、信号全てを正面のスピーカーから提示する。スピーカーの高さは被験者の耳の位置に、放射軸は被験者頭部の中心を向くように調整した。また、初期反射音の到来方向と各聴覚刺激の LF の実測値との関係を表 5-2、図 5-4 に示す。畳み込んだドライソース音源は、「水上の音楽」(作曲：ヘンデル、DENON オーディチェック CD より)を使用した。聴覚刺激の名称を表 5-3 に示す。

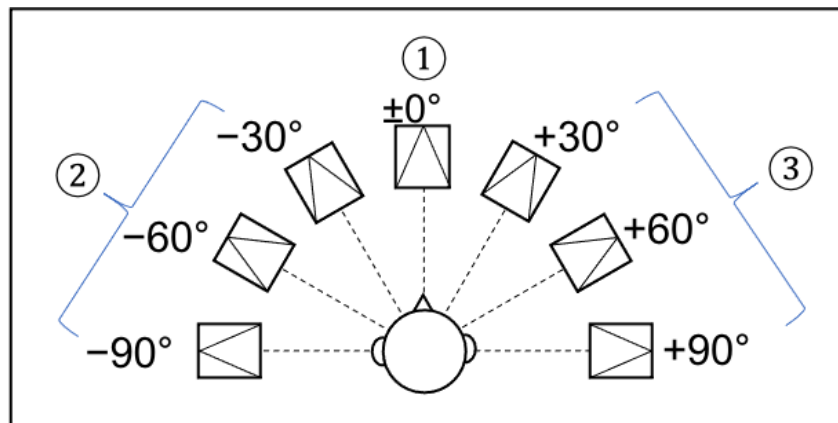


図 5-3 スピーカー配置図

表 5-2 初期反射音の到来方向と LF の対応

空間	方位角			
	$\pm 0^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 60^\circ$	$\pm 90^\circ$
A	0	0.40	0.69	0.80
B	0	0.47	0.82	0.95
C	0	0.31	0.53	0.61
D	0	0.22	0.38	0.43
E	0	0.32	0.55	0.63
F	0	0.22	0.38	0.44

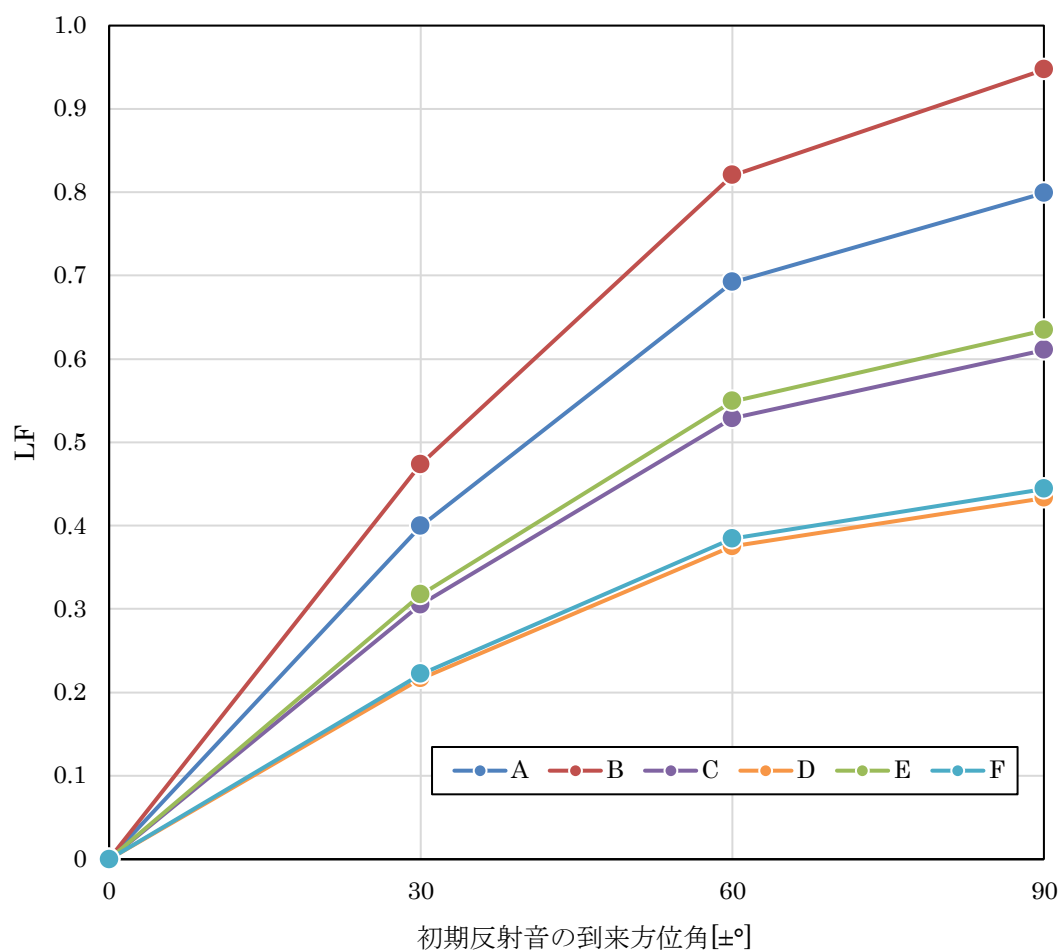


図 5-4 初期反射音の到来方位角と LF の関係

表 5-3 実験における聴覚刺激の名称

空間	$\pm 0^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 60^\circ$	$\pm 90^\circ$
A	a5_0	a5_30	a5_60	a5_90
B	b5_0	b5_30	b5_60	b5_90
C	c5_0	c5_30	c5_60	c5_90
D	d5_0	d5_30	d5_60	d5_90
E	e5_0	e5_30	e5_60	e5_90
F	f5_0	f5_30	f5_60	f5_90

5-2-4 実験手順

HMD とスピーカーを通じて提示された視聴覚刺激または聴覚刺激に対する広がり感の程度を、仮想空間に表示されたスライダーのハンドルをコントローラーで移動させ指示することによって回答させた。スライダーで回答できる評定値は 0 から 360 までの実数である。すべての視聴覚刺激はランダムな順で提示された。視覚刺激は A~F の 6 空間、聴覚刺激は各空間の $\pm 0^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$ の 4 個ずつの計 24 個を全て使用する。一人の被験者の回答回数はマルチモード・シングルモードの計 48 回行う。

5-3 実験結果と分析

図 5-5 は初期反射の到来方位角に伴う被験者の評定平均値の変化を示したグラフである。また、図 5-6 は LF に伴う被験者の評定平均値の変化を表している。予め被験者による回答傾向に偏りがみられた、回答の傾向によってクラスター分析によって被験者を分類し、最も信頼性のある傾向を示すクラスターを抽出しており、図のデータはこれらに基づいている。図 5-5 において横軸は初期反射音の到来方位角を表し、縦軸は実験で得られた主観評価値である。 $\pm 0^\circ$ において空間ごとに差は見られないが、到来方位角が大きくなるほど評定平均値に差が出ている。 d_{5_0} のシングルモードが最も広がり感が小さく、 e_{5_90} のシングルモードが最も大きく判断された。グラフの傾向はどの空間においても右上がりのグラフとなっており、到来方位角大きくなるほど **spread** の評定平均値は大きくなっている。また、分散分析を行ったところ、変動に有意な差が検出された。多くの空間でシングルモードの方が高く評価されたが、マルチモードとシングルモードの間に有意差は検出されなかった。図 5-6 では横軸は LF、縦軸は実験で得られた評定平均値である。図 5-5 では $\pm 0^\circ \sim \pm 60^\circ$ に対して $\pm 60^\circ \sim \pm 90^\circ$ の傾きは緩やかになっているが、図 5-6 では線形がリニアであり、LF の変化に対して同等に評価されているのがわかる。図 5-7 は空間ごとに LF に伴う評定平均値の推移を示したグラフである。 b_{5_90} 、 c_{5_90} 、 d_{5_90} 、 e_{5_90} 、 f_{5_90} でのマルチモードとシングルモードの評定平均値の差が大きくなっている。

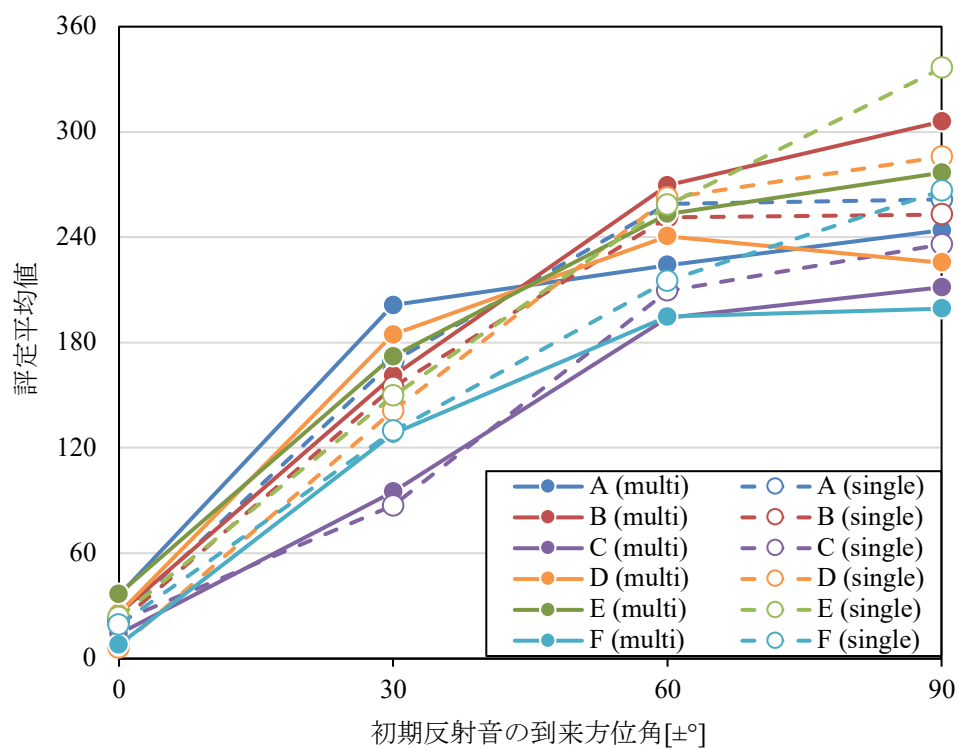


図 5-5 初期反射音の到来方位角に伴う評定平均値の推移

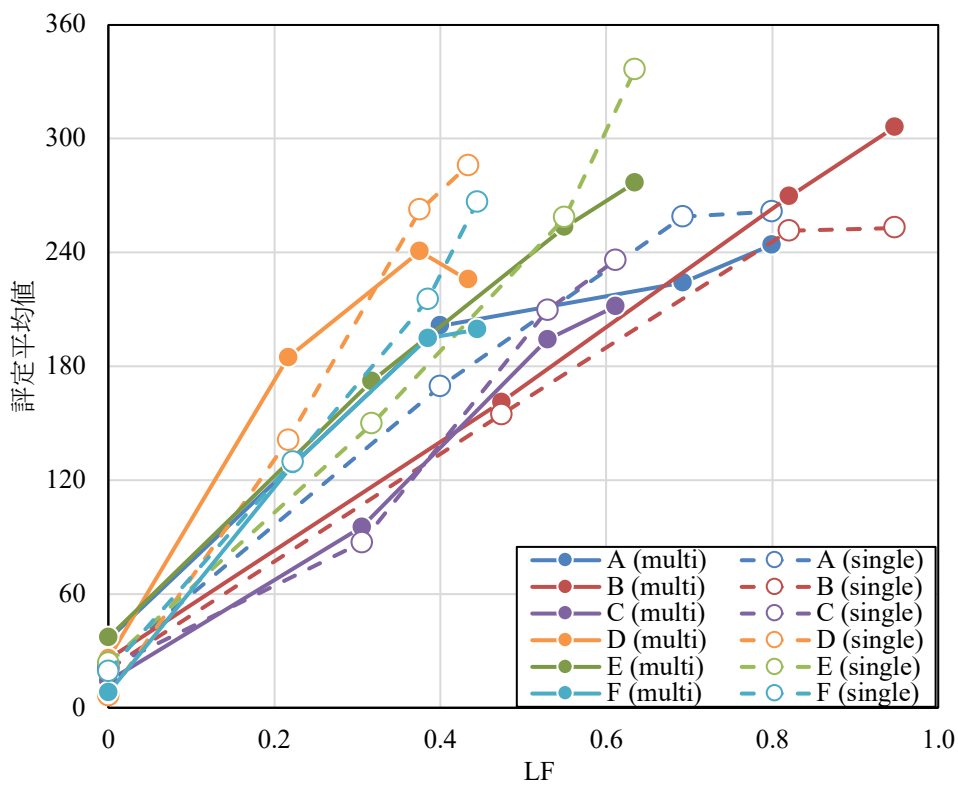
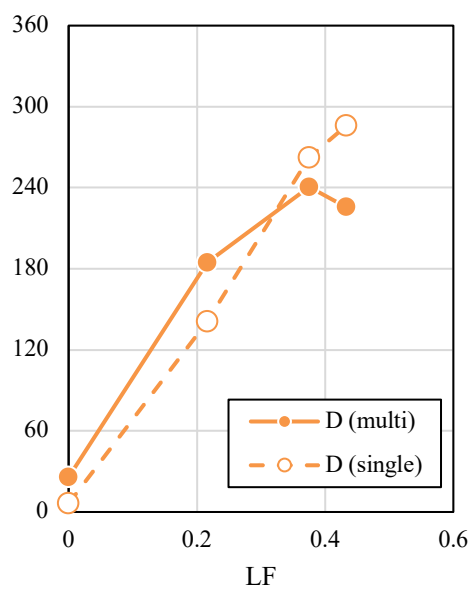
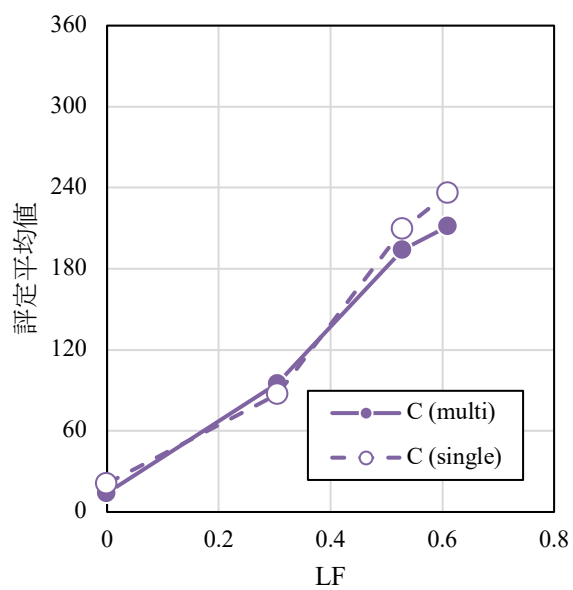
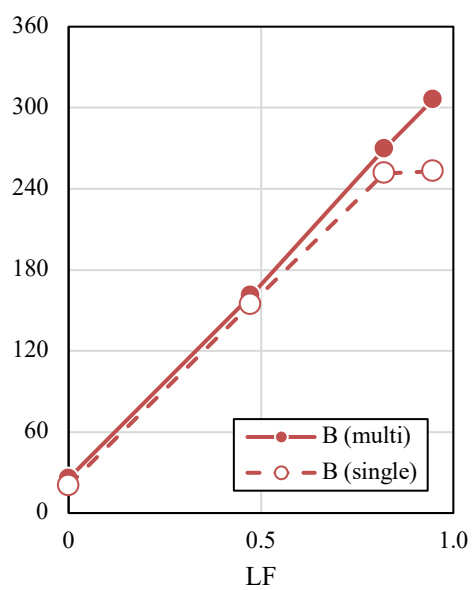
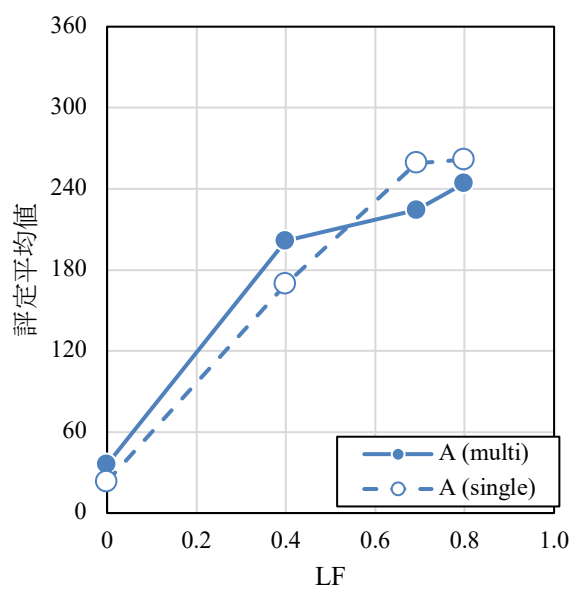


図 5-6 LF に伴う評定平均値の推移



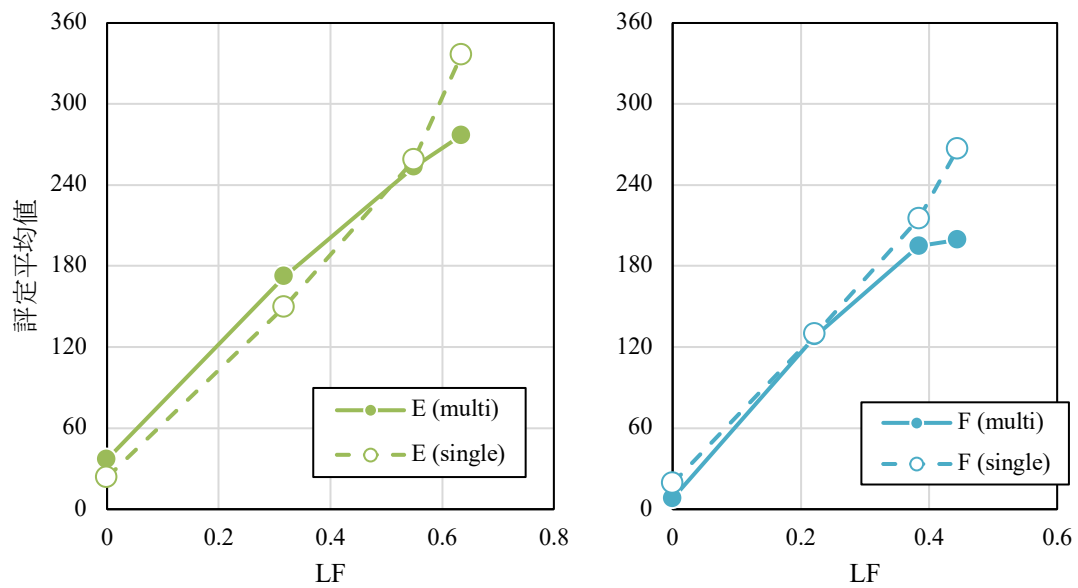


図 5-7 各空間の LF に伴う評定平均値の推移

図 5-8 に初期反射音の到来方位角に伴う評定平均値の差を示した図を示す。空間 B 以外の空間は似た傾向を示した。方位角 $\pm 0^\circ$ での値に対して方位角 $\pm 30^\circ$ 差の値が高くなり、その後角度が大きくなるほど差の値が小さくなる傾向がみられた。図 5-9 に LF に伴う評定平均値の差のグラフを示す。B を除く多くの空間で右下がりのグラフとなっている。LF の値が小さい範囲ではマルチモードの評定平均値がやや高い傾向が見られるが、LF の値が大きくなるとシングルモードの評定平均値が大きくなっている。

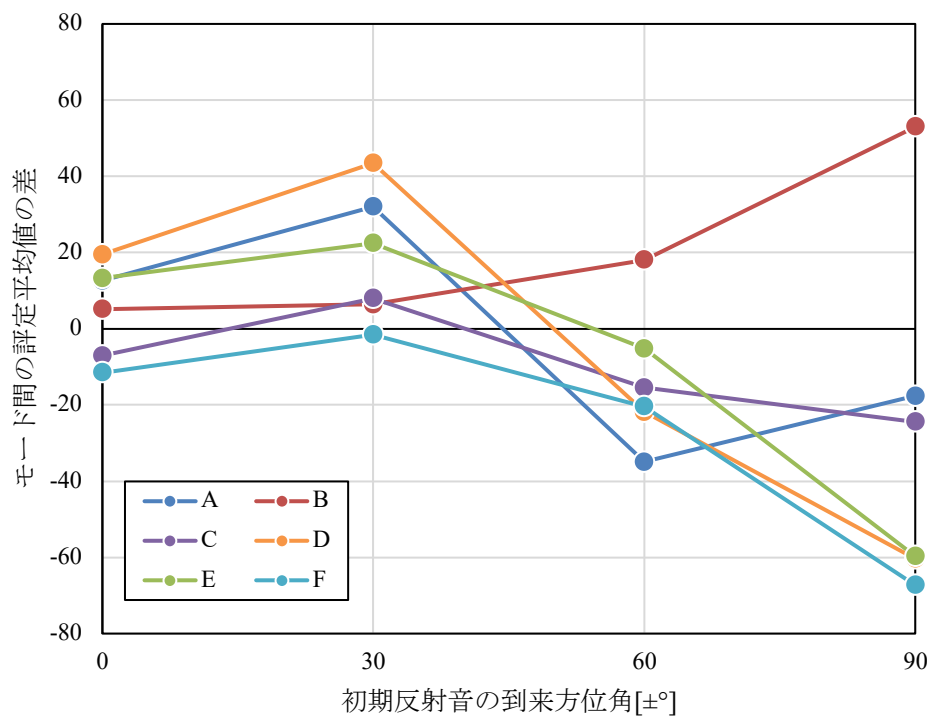


図 5-8 初期反射音の到来方位角に伴う提示モード間の評価平均値（spread）の差

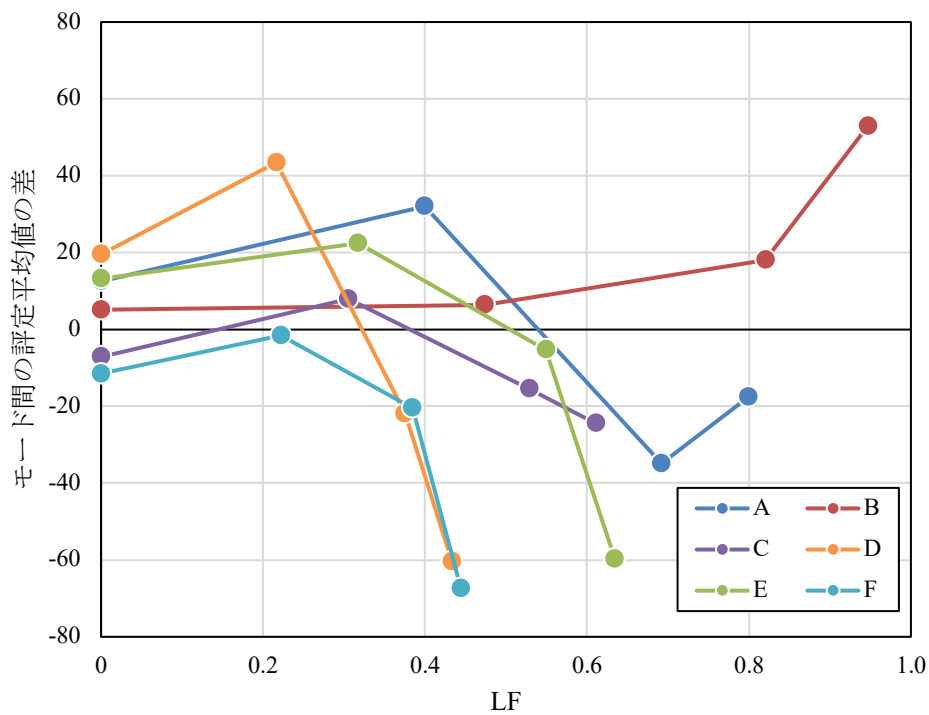


図 5-9 LF に伴う提示モード間の評価平均値の差

5-4 予測値と評定値の関係

本章における実験システムでは予測値を直接測定することは困難であるが、第4章で示したように同定実験で得られた予測値とグラフの交点から求められた予測値は同程度の値であると考えられる。そこで、今回の実験における両モードの評定平均値のグラフの交点から求められた点を予測値とみなし、差分のグラフを作成した。図5-10は横軸に提示した聴覚刺激のLFと被験者ごとの広がり感の予測LFの差を取り、縦軸にマルチモードとシングルモードの差の評定値を取ったグラフである。図5-10では第4章で示した心理モデルと概ね一致する傾向が見られた。第二象限には63%、第四象限では60%の点がプロットされ、近似線を引いたところ右下がりの線が引かれた。

図5-11は各空間の差分のグラフを示している。特に空間Aにおいては近似線を引いたところ概ね想定したグラフが描け、心理モデルと一致する傾向がよく表れていると思われる。

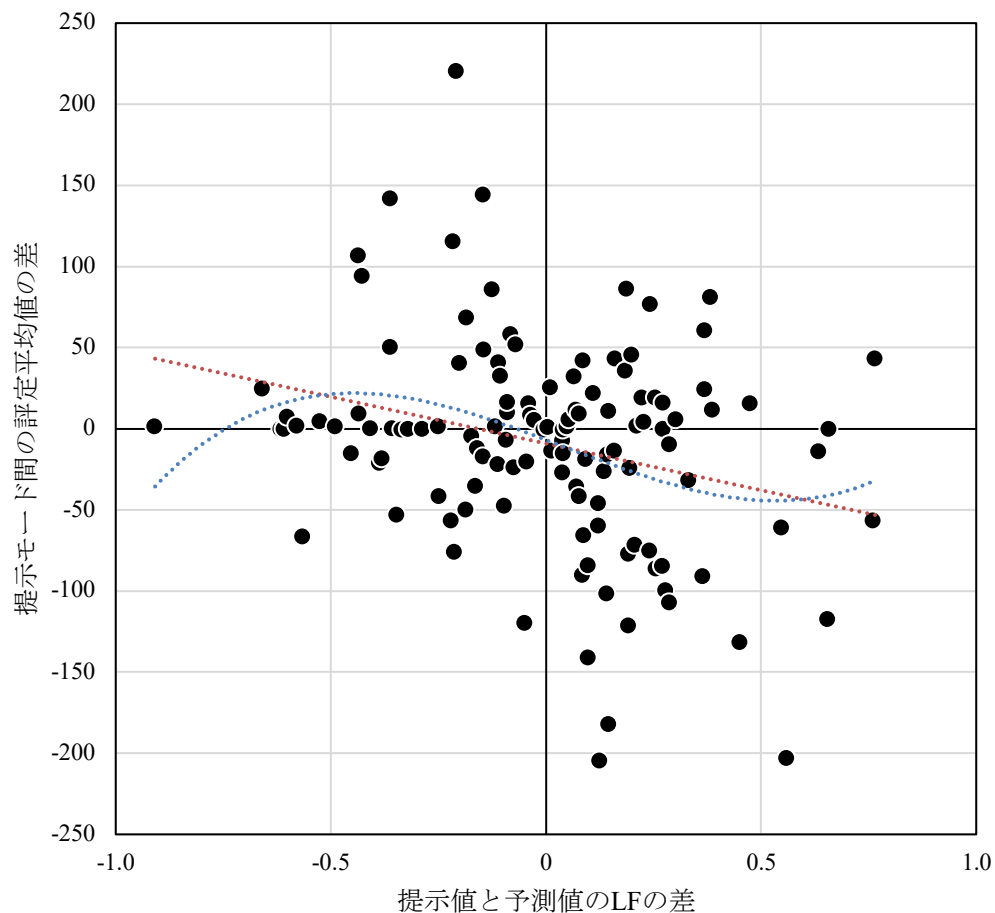
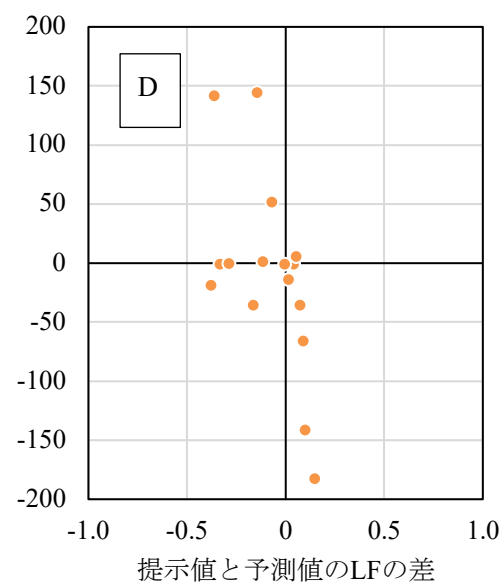
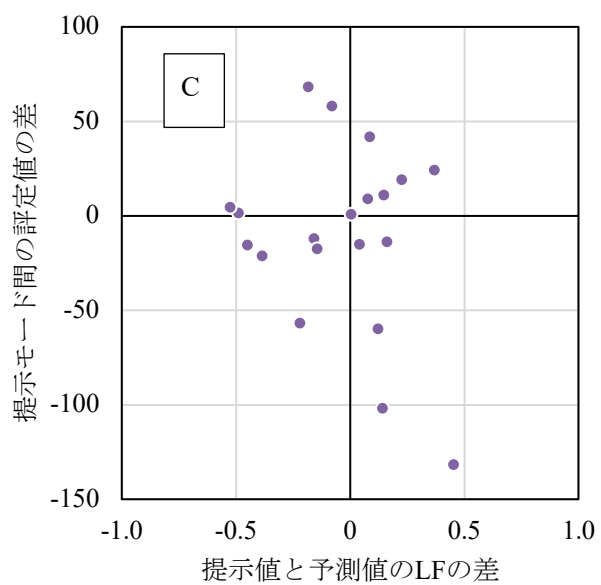
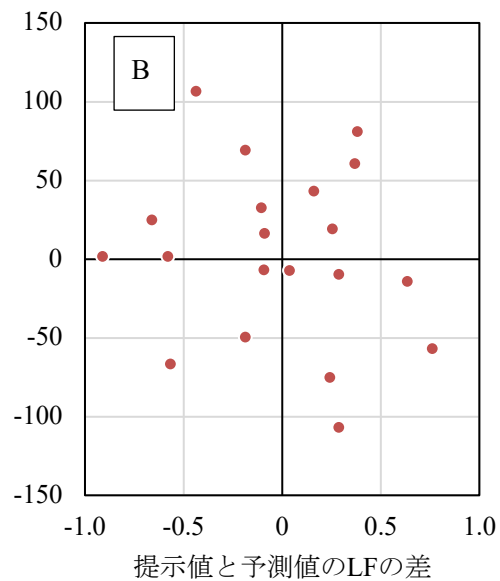
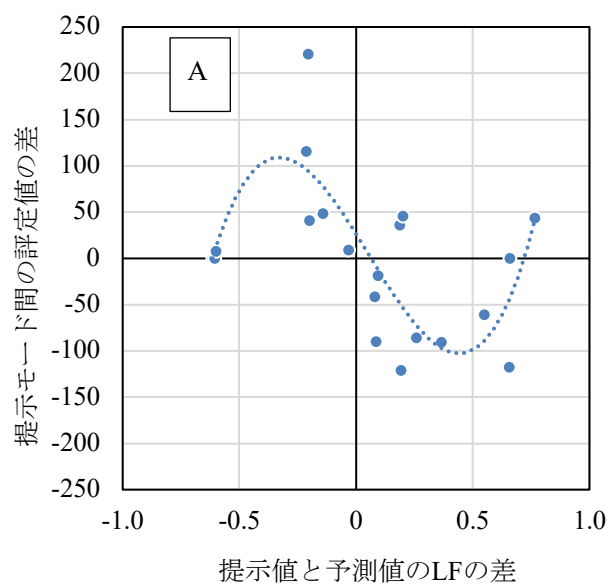


図 5-10 心理モデルに対する実験結果の適合の確認



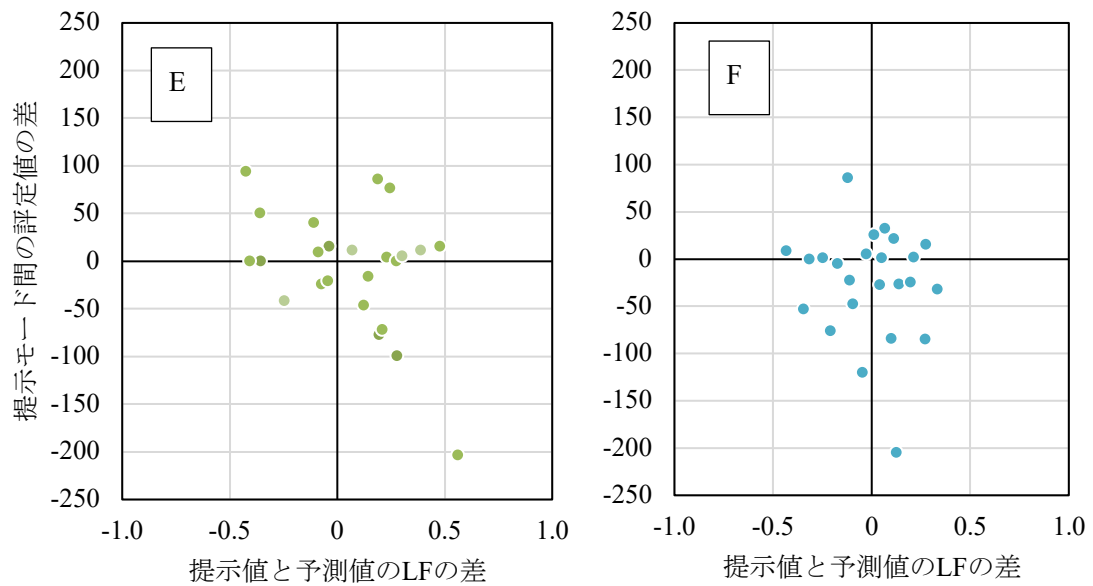


図 5-11 各空間の心理モデルに対する実験結果の適合の確認

5-5 小括

本章では聴覚刺激の提示方法をスピーカーに切り替えて評定尺度法による主観評価実験を再度行なった。実験結果は一部の被験者を除いて信頼性を示し、聴覚刺激の変化に対する視覚刺激の影響を示した。この実験システムにおいて予測値は直接測定出来ないが、モード間の大小関係が入れ替わる点を広がり感の予測値として、信頼性のある主観評価のデータを用いて検討した。その結果、評定平均値のモード間の差分は想定した心理モデルと良い整合性を示した。

第 6 章

結論

本研究は、建築空間の視覚情報（内観から読み取れる空間の大きさや形状、仕上げなど）が聴覚印象である「音の広がり感」に与える影響を、主観評価実験を通して明らかにするものである。

この研究において行われた様々な主観評価実験では、VR 環境を用いて建築空間の内観を3次元的に表現し、臨場感のある視覚刺激を被験者に提示して行われている。一方、実測された空間のインパルス応答を元に作成した様々な広がり感を持つ音場を聴覚刺激としてヘッドホンまたはスピーカによって被験者に提示している。これらの視聴覚刺激が同時に被験者に与えられた時、適切な条件の下であれば両者は脳内で統合され（視聴覚統合）、クロスモーダリティを呈すると思われる。特に、視覚情報から予測された音場印象から外れる聴覚刺激が与えられた場合、視聴覚統合の範囲内であれば、人は視覚情報の予測値を信頼し、これに近づくように印象を補正するメカニズムが有していると考えられる。広がり感もこれに従って、視聴覚の相互作用を発現すると考えられる。

第2章では、聴覚刺激は、無響室にて広がり感が異なるように配置された複数スピーカーから提示された IR をバイノーラルマイクロホンで録音した信号を被験者にヘッドホン提示する主観評価実験を行なった。一対比較法による実験において、被験者は概ね刺激間の違いが判断出来ていたが、評定尺度法では提示角度による評定値の変動はあまり見られなかった。そして、評定平均値は概ねマルチモード（視聴覚刺激の同時提示）の方が高かったものの、シングルモード（聴覚刺激のみの提示）の評定平均値との間での有意差は検出されなかった。評定尺度法では刺激単体を評価するため、2つを比べる一対比較法に比べて判断が難しかったと思われる。加えてバイノーラルマイクロホンで録音した信号を聴覚刺激としたが、耳の形などにより頭部伝達関数には個人差があるため被験者によって正しく音像を認識できなかった可能性が考えられた。

第3章では聴覚刺激の提示方法をスピーカーに変更し、初期反射音の異なる音場を直接被験者にスピーカーから提示して再度同じ実験を行なった。結果として第2章の実験よりも明確な結果が得られ、到来角度に伴う変動にも有意差が検出された。また、いくつかの刺激においてマルチモードとシングルモードの評定値の間に有意差が検出された。ここに広がり感において視覚情報が評定値に影響を与えることが明らかとなった。

第4章では、あらためて建築空間の VR 環境を unity を用いて構築して、unity の音響パラメーターである spread を変化させることで、バイノーラルではあるが、聴覚刺激の広がり感を無段階にコントロールできる実験システムを構築し、視覚情報から予測される広がり感を測定する実験を行なった。さらにこのシステムを用いて第2章と同様の主観評価実験を行った。得られた評価結果は、先に実測された予測値と合わせて、心理モデルに合致するか検討された。しかし、主観評価結果の分散は大きく、心理モデルに合致する結果は得られなかった。聴覚刺激をヘッドホン提示した場合、音像は頭内に生じるが、視覚刺激に示される音源は前方に存在し、これらの二つの関係がリンクされない、すなわち視聴覚統合されない状態の被験者が少なからずいたことが原因の一つと思われた。一方、主観

評価結果のマルチモードとシングルモードの評定平均値の大小関係が逆転する状態から推定した予測値は、直接測定した同定実験の結果と良い一致を示すことがわかった。

第5章では、第4章で用いた聴覚刺激の提示方法をスピーカーに変更して評定尺度法による主観評価実験を再度行なった。実験結果は一部の被験者を除いて信頼性を示し、聴覚刺激の変化に対する視覚刺激の影響を示した。この実験システムにおいて予測値は直接測定出来ないが、モード間の大小関係が入れ替わる点を広がり感の予測値として、信頼性のある主観評価のデータを用いて検討した。その結果、評定平均値のモード間の差分は想定した心理モデルと概ね一致する傾向が見られた。

本研究では、ゲームエンジン unity による VR 環境での実験システムの構築がなされ、実験の自由度が飛躍的に向上した。また心理量である広がり感の程度を、これに相当する IACC または LF 値などの客観的指標で表現することができるようになった。今後は、実験システムのさらなる発展をはかるとともに、視覚情報による広がり感に対する影響の定量化を進め、建築音響設計に資する具体的な知見が得られることを期待する。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々からご指導、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 寺島貴根准教授には、本研究を進めるにあたり大変手厚いご指導を賜りました。厚く御礼申し上げます。

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いただきました。厚く御礼申し上げます。

本研究における主観評価実験には、多くの方々に被験者としてご協力いただきました。記して感謝の意を申し上げます。

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。

記号一覧

- 初期側方エネルギー率 LF

式 (1) で表され、Spatial impression の物理評価指標として定義される。直接音から初期反射音までのエネルギーに対する側方初期反射音のエネルギーの比である。初期反射音の効果を定量化したもの。

$$LF = \frac{\int_{0.005}^{0.08} p^2(t) \cos \phi dt}{\int_0^{0.08} p^2(t) dt} \dots \dots \dots (1)$$

(p(t) : 受音点での音圧, t : 直接音の到達時間を 0 とした時間,

φ : 受聴者の耳軸に対する入射方向で、側方が 0 度、正面が 90 度)

- 両耳間相互相関度 IACC

Spatial impression の物理評価指標として定義される。0~1 の間の数値で表され、ASW と IACC は負の関係にある。

参考文献

1. 石川あゆみ・寺島貴根・徳永泰伸：“室内音場の主観的印象に対する視覚情報の影響及び視聴覚間の違和感との関連性”、日本建築学会環境系論文集、第 83 巻、第 745 号、pp.257-265、2018
2. 石川あゆみ：“建築空間の内観に対する視覚印象と音場による聴覚印象の相互作用に関する基礎的研究”、博士論文、三重大学、2018
3. 飯田一博・森本政之：日本音響学会編“空間音響学”、コロナ社、2010
4. 森本政之・前川純一：“音像の広がり感について”、日本音響学会聴覚研究会資料、H-87-31、1987.
5. 森本政之・藤本久嘉・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 46 巻 6 号、pp.449-457、1990.
6. M.Brron and A.H.Marshall：“Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls : the derivation of a physical measure”, J.Sound and Vib., pp.211-232, 1981
7. 安藤四一：“コンサートホールの音響と音楽表現”,アルテスパブリッシング, 2009.
8. 岩宮眞一郎：“音の生態学 ―音と人間のかかわり―”、コロナ社、2000.
9. 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.
10. 小島武男、中村洋：“現代建築環境計画”、オーム社、1983.
11. Chiharu HIRAOKA et al.: “Audio-visual mutual effect of spatial impression in architectural space”, Proc. of the 23rd International Congress on Acoustics (ICA2019), pp.4562-4569, 2019.
12. 平岡千春・寺島貴根：“音の広がり感（ASW）に対する視覚情報の影響”,日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）,環境工学I, pp.281-282, 2020.
13. Chiharu Hiraoka: “Relationship between spatial impression (ASW) recalled by

architectural space interior and audio-visual mutual effect”, Proceedings of 2020 International Symposium for Social Infrastructure and Production(G Field, Graduate School of Engineering, Mie University),p.193, 2020.