

音に包まれた感じに対する独立指標の研究

平成 25 年度入学
学籍番号 2313915
氏名 石田舞

目次

1. 序論	4
1.1. はじめに	4
1.2. 背景	5
1.3. 本研究の目的.....	8
1.4. 本論文の構成.....	8
2. 実験 I	10
2.1. 評価語抽出の目的.....	10
2.2. 実験方法	11
2.2.1. 音刺激	11
2.2.2. 実験概要.....	13
2.2.3. 評価語の抽出方法.....	14
2.3. 評価語の抽出結果.....	15
3. 実験 II	18
3.1. 比較実験の目的	18
3.2. 実験方法	18
3.2.1. 音刺激	18
3.2.2. 比較方法.....	20
3.2.3. 実験概要.....	21
3.3. シェッフエの一対比較による実験結果.....	23
3.4. 考察	29
4. 実験 III	32
4.1. 実験の目的.....	32
4.2. 実験に用いたインパルス応答.....	32
4.3. 実験方法	37
4.3.1. 音刺激	37
4.3.2. 評価方法.....	41
4.3.3. 実験概要.....	42
4.4. 実験結果	44

4.5. 考察	49
4.5.1. T_s	50
4.5.2. LF	51
4.5.3. IACC	52
4.5.4. LFL_E , LFL_L	54
4.5.5. 実験Ⅲにおける評価語と物理量の相関	56
4.5.6. 楽器音による音に包まれた感じと部屋の響きによる音に包まれた感じ....	63
4.5.7. ASW と楽器音による包まれ感との違い	64
5. 結論	66
5.1. 本論文のまとめ	66
5.2. 今後の展望	70
参考文献	71
謝辞	73

1. 序論

1.1. はじめに

人は音を聞いた時、その音源の方向や音源までの距離、また音の奥行き感や拡がり感を感じることができる。これらの空間音響知覚の中の拡がり感はさらに2つに分けることができると考えられている。ひとつは見かけの音源の幅（ASW: auditory source width, apparent source width）であり、もうひとつは音に包まれた感じ（LEV: listener envelopment）である。見かけの音源の幅とは、先行音（直接音）の到来方向に先行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であり、音に包まれた感じとは、見かけの音源以外の音像によって聞き手の周りが満たされている感じのことである[1]。また、この2つの性質の違いを理解していれば、見かけの音源の幅と音に包まれた感じを区別して知覚できることが示されている[8]。コンサートホールでの演奏やスピーカを用いたホームシアター等において、音に包まれた感じという感覚は重要であると考えられる。聴取者にとっても演奏者や製作者にとっても、どのような音の性質が音に包まれた感じに影響を及ぼすかがわかれば、意図的に望む音を楽しむことができるはずである。そこで本研究は、音に包まれた感じに着目し、音に包まれた感じに影響を与えている物理的要因について調査を行った。

1.2. 背景

音に包まれた感じとその物理的な要因に関する研究は様々なものがある。これまでに、後期側方反射音、反射音の到来方向[7][12]、前方及び後方から到達する反射音の前後エネルギー比[9]、受聴音圧レベル[6][17]等の物理的要因が音に包まれた感じに影響を与えていると考えられている。音楽に関しては、一般に、主に直接音が到達した後 80ms 以降のエネルギーである後期反射音あるいは後期残響音が音に包まれた感じに影響を与えていると考えられている。このように、直接音到達後にくる反射音を、初期反射音（後期反射音以前に到達した反射音）と後期反射音に分け、調査を行った研究も多く存在する。

インパルスと呼ばれる非常に短い信号を入力した時のシステムの出力をインパルス応答と呼ぶが、これは空間に発せられた音とその空間でどのように響くかを表すことができる。このインパルス応答を用いて求められる C 値(式(1))も初期反射音と後期反射音に分けて計算される値である。C 値は初期と後期のエネルギーの比を表した物理指標である[22]。

$$C_{t_e} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{t_e} p^2(t) dt}{\int_{t_e}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (1.)$$

音楽の場合は一般に、直接音到達後 80ms を初期と後期の境界とした C 値 (C_{80} , Clarity) (式(2)) が用いられる[22]。

$$C_{80} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.)$$

この C_{80} も音に包まれた感じに関係があるとされている[11][15][17]。

C_{80} と高い相関を示す物理指標に T_s (時間重心 : center time) がある。 T_s が大きいほど残響感が増し、 T_s が小さいほど音楽の明瞭性は大きくなるとされている[3]。 T_s は、式(3) で表される。

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} [s] \quad (3.)$$

また、両耳へ入る音の波形がどの程度両耳の間で相関が高いかを示す IACC (両耳間相互相関度) という物理指標がある (式 (5))。IACC は IACF (基準化両耳間相互相関関数) (式 (4)) の絶対値の最大値である。

$$\text{IACF}_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt}} \quad (4.)$$

$$\text{IACC}_{t_1, t_2} = \max |\text{IACF}_{t_1, t_2}| \text{ for } -1\text{ms} < \tau < +1\text{ms} \quad (5.)$$

$p_l(t)$ は時間 t に左耳に入るインパルス応答を、 $p_r(t)$ は時間 t に右耳に入るインパルス応答を表す [22]。後期反射音の IACC は音に包まれた感じに対応すると考えられている [8]。

その他に、拡がり感 (spatial impression) の物理評価指標として、 LF (初期側方エネルギー率: early lateral energy fraction) がある [1]。 LF は全初期反射音に対する初期側方反射音のエネルギー比率で ASW と正の相関がある [3]。 LF は式 (6) で表される。

$$LF = \frac{\int_{5\text{ms}}^{80\text{ms}} p^2(t) \cos \theta dt}{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt} \quad (6.)$$

$p(t)$ は、受音点で測定されたインパルス応答の瞬時音圧である。

Soulodre らは、後期エネルギーの到達時間と到来角度を変化させ Listener envelopment について主観テストを行った。この研究の中では複数の実験が行われており、実験によって相応しい後期反射音の到達時間が異なった。そこで、相応しい後期反射音の到達時間は周波数に依存すると考え、新しい Listener envelopment の客観尺度を提案している [15]。このように、後期反射音の開始

時間を 80 ms とすることが必ずしもふさわしいわけではないことが明らかにされている。

また、一般に C 値が低ければ音に包まれた感じが増すとされているが [11][15][17]、初期のエネルギーに比べて後期反射音のエネルギーの割合がとても大きい場合、音に包まれた感じが強く感じられない可能性も示されている [14]。

これらのことから、音に包まれた感じに関係していると考えられる、後期反射音の開始時間や、初期反射音のエネルギーと後期反射音のエネルギーの割合について、より詳しい調査を行う必要があると考えられる。

1.3. 本研究の目的

前章で述べたように、音に包まれた感じに対応すると考えられる物理量については、まだ明らかになっていない。特に、後期反射音の開始時間が音に包まれた感じに与える影響や、初期反射音のエネルギーと後期反射音のエネルギーの割合が音に包まれた感じに与える影響について、より詳しく調査されるべきであると考えた。そこで、本研究では、まずこれらの物理量に着目し、音に包まれた感じに関する実験を行うことによって、音に包まれた感じに影響を及ぼす物理的要因についてより詳しく調査を行う。

1.4. 本論文の構成

まず第1章の序論では、本研究の背景や本研究の目的について説明する。

第2章では、本研究で行った実験Ⅰについて説明する。音に包まれた感じを含む音の印象を調査するために、本研究ではいくつかの音刺激を作成した。このいくつかの音刺激は、音に包まれた感じの印象が異なるよう意図して作られたが、実際に音に包まれた感じが刺激間で異なって感じられるかどうかは明らかではなかった。そこで実験Ⅰでは、評価語抽出を行うことで、作成した音刺激を使って音に包まれた感じの比較ができるかどうかを確かめた。

第3章では、本研究で行った実験Ⅱについて説明する。実験Ⅰにおいて、作成したいくつかの音刺激を用いて音に包まれた感じを調査できることが示された。そこで、作成した音刺激を用いて、音に包まれた感じという評価語に実験Ⅰで抽出されたいくつかの評価語を加え、音の印象についてシェッフエの対比較実験を行った。

第4章では、実験Ⅲについて説明する。実験Ⅱでは、直接音のレベルに応じて音に包まれた感じが変化する事が明らかになった。しかし、この結果は従来の研究の結果とは異なるものであった。本研究で行った実験の範囲は、従来の音に包まれた感じに関する実験範囲とは異なると仮定し、本研究と従来の研究の範囲を両方含むと考えられる音刺激を作成した。これらの新たに作成された

音刺激を用いて、音に包まれた感じを含むいくつかの音の印象についてシェッフェの一対比較実験を行った。また実験Ⅲの結果から音に包まれた感じに影響を与えていると考えられる物理量について検討した。

第5章では、本研究のまとめと今後の展望について述べる。

2. 実験 I

2.1. 評価語抽出の目的

本研究では、音に包まれた感じという音の印象について調査するために、実験で用いる音刺激をいくつか作成した。図1はインパルス応答を簡単に示したものである。この図は、直接音と初期反射音そして後期残響音（後期反射音）が受音点に到達する様子を表す。本研究では、初期のエネルギーと後期のエネルギーの境界すなわち後期残響音の開始時間を残響音開始時間と呼ぶ。本研究では、この残響音開始時間と直接音のレベルを操作し、いくつかの音の響き方が異なる楽器音を作成した。これらの音刺激は音に包まれた感じの印象がそれぞれの音刺激間で異なることを意図して作られた。しかし、実際に音に包まれた感じが異なって知覚されるかどうかはわからなかった。そこでもし作成した音刺激に対して評価語抽出を行い、音に包まれた感じという評価語が抽出されれば、作成した音刺激を使って音に包まれた感じの比較ができると考えた。そこで、本研究では音に包まれた感じを含む音の印象を比較する前に、作成した音刺激に対し評価語抽出を行った[2]。

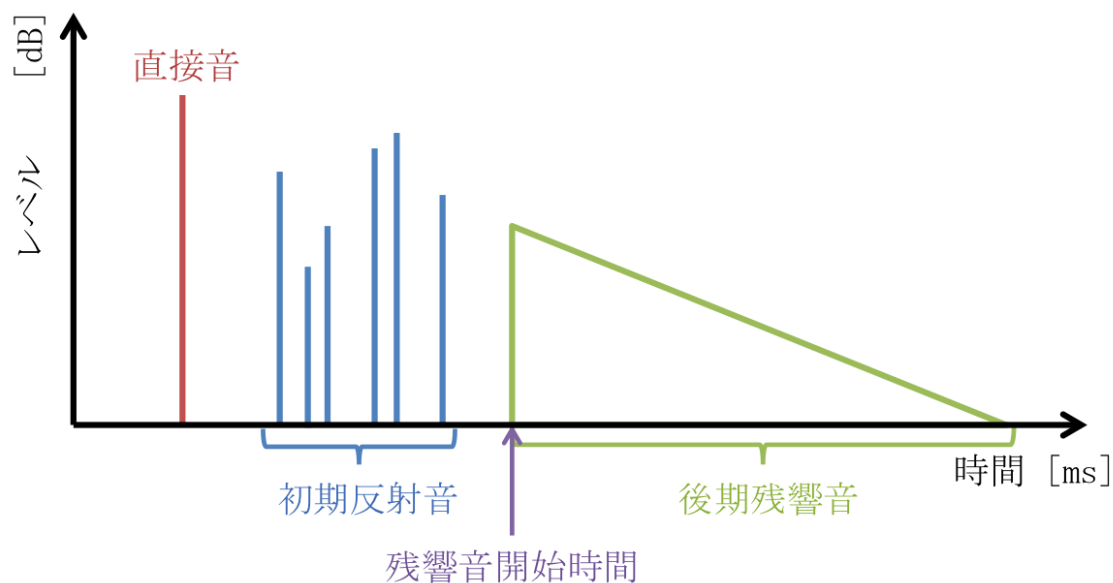


図 1 インパルス応答を簡単に表した図
直接音と初期反射音そして後期残響音が受音点に到達する様子を表す。

2.2. 実験方法

2.2.1. 音刺激

評価語抽出で用いられた音刺激は、本学の音楽ホール（奏楽堂）でサラウンド録音された L（左）、R（右）、C（中央）、Ls（左後方）、Rs（右後方）の 5 チャンネル分のインパルス応答[4]をもとに作成された。たとえば、奏楽堂のインパルス応答と無響室で録音された音源を畳み込むと、奏楽堂で演奏されたような音の響きを再現することができる。本研究では、奏楽堂のインパルス応答を操作し、様々な響きの音刺激を作成した。

図 2、図 3 に本研究で用いるインパルス応答を簡単に示す。本研究では異なる残響音開始時間のインパルス応答を用いる。奏楽堂のインパルス応答は、図 1 のように直接音、初期反射音そして後期残響音の全てを含んでいる。もし、残響音開始時間を変化させた場合、同時に初期反射音も変化することになる。

そこで、音の印象に対する初期反射音の変化による影響を避けるため、図2に示すように初期反射音の部分を無音とした。一般に直接音到達後 80 ms 以降のエネルギーが後期反射音と言われていることから、奏楽堂のインパルス応答の直接音到達後 80 ms 以降を後期残響音とした。インパルス応答の条件を変化させた様子を図3に示す。直接音は録音したままのレベルを 0 dB とし、0 dB、-4 dB、-10 dB、-18 dB、-26 dB と変化させた5種類の条件であった。また、残響音開始時間は 80 ms と 100 ms の2種類であり、100 ms の残響音は 80 ms 以降の後期残響音を時間的に後方へ 20 ms ずらしたものである。この異なる残響音開始時間と直接音のレベルは、著者自身がそれぞれの音刺激に対し異なる印象を知覚できたものであった。これらの条件の変更は、5チャンネル分のインパルス応答全てに対して行った。その後、5チャンネル分それぞれ10種類のインパルス応答に、NHK 放送技術研究所にある無響室で録音されたオーボエの音源を畳み込み、異なる音の響きである10種類の音刺激を作成した。オーボエの音源はソロでモーツァルトのオーボエ四重奏 K370 第一楽章から約19秒であった。

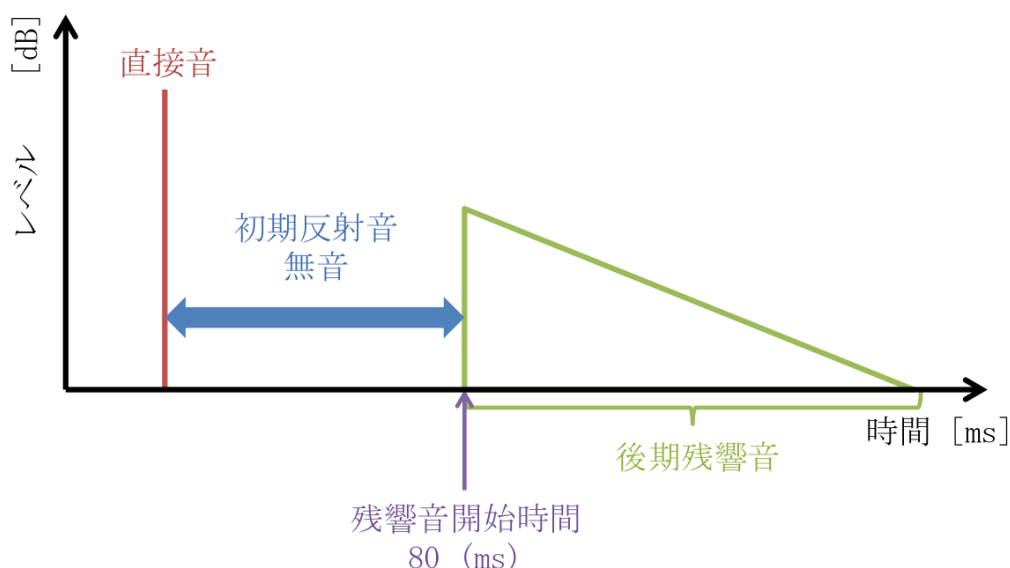


図2 本研究で用いるインパルス応答

初期反射音の区間を無音とし、直接音到達後 80 ms 以降を後期残響音としている。

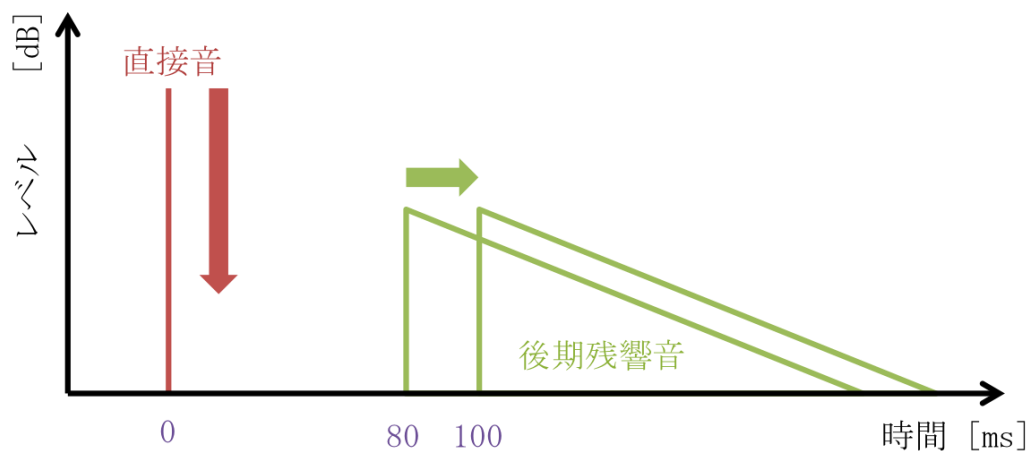


図 3 実験 I における残響音開始時間と直接音のレベルの変化

直接音は録音したままのレベルを 0 dB とし、-4 dB、-10 dB、-18 dB、-26 dB のように変化させた。残響音開始時間の条件は 80 ms と 100 ms の 2 種類で、100 ms の残響音は 80 ms 以降の後期残響音を時間的に後方へ 20 ms ずらしたものである。

2.2.2. 実験概要

実験は、ITU-R BS.1116 に準拠した東京藝術大学千住校地音響制作スタジオで行われ、音刺激は ITU-R BS.775 に準拠した 5 チャンネルサラウンドのスピーカ (GENELEC 8050A[24]) 配置で再生した (図 4)。また、残響音開始時間 80 ms 直接音のレベル 0 dB の音刺激は、受聴位置で、音刺激開始から 15 秒間が 77.4 dB (LAeq) であった。直接音を変化させたことによる聴感上の音の大きさは変わらなかった。実験参加者は全員が 5 チャンネルサラウンドのスピーカ環境で音を聴くことに比較的慣れていると考えられる、本学の音楽音響創造に所属する修士の学生 3 名である。

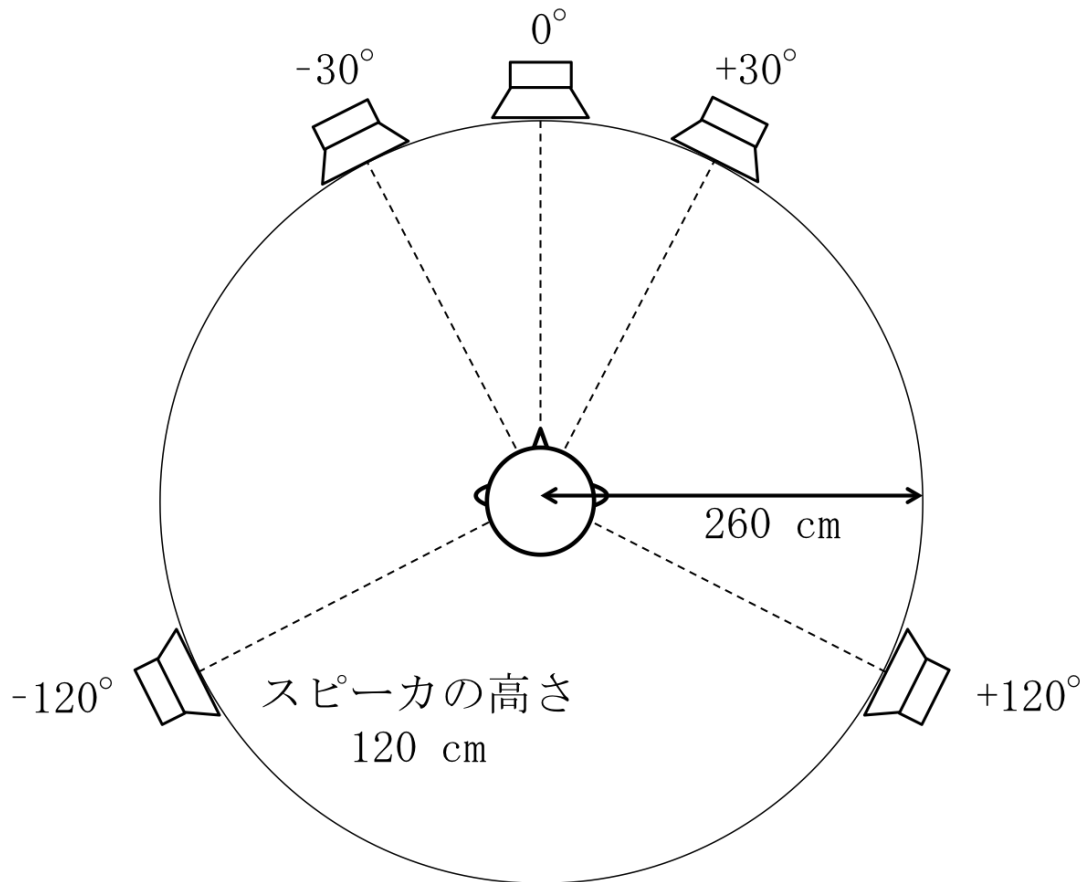


図 4 スピーカ配置

ITU-R BS.775 に準拠した 5 チャンネルサラウンドのスピーカの配置

2.2.3. 評価語の抽出方法

10 種類のオーボエの音刺激に対し、レパトリートグリッド法[18]を参考に評価語抽出を行った。実験参加者には、まず 3 つの音刺激が 1 組になった音刺激を聴いてもらい、その音刺激のうち最も異なる刺激を選択してもらった。次に最も異なる音刺激が他の音刺激とは異なる理由を解答用紙に記述してもらった。最後に選ばれなかった 2 つの刺激について、似ている理由を解答用紙に記述してもらった。

評価語抽出を行う間、音刺激はループ再生されており、実験参加者はいつでも 3 種類の音刺激をボタンで切り替える事ができた。評価語抽出は 1 名ずつ行

表 1 評価語抽出を行った音刺激の条件

残響音 開始時間 [ms]	直接音のレベル [dB]				
	80	0	-4	-10	-18
100	0	-4			

残響音 開始時間 [ms]	直接音のレベル [dB]				
	100	0	-4	-10	-18
80	0	-4			

った。所要時間はおよそ 2 時間であった。後日、実験参加者全員の回答から、最も異なる刺激の選択が共通した組についてのみ、実験参加者全員で話し合いを行うことで、記述された全ての評価語から、誰もが使えてその感覚を誰もが知覚することができると考えられる評価語のみを残した。また複数の異なる評価語が同義であると判断された場合はひとつの評価語にまとめられた。

実験時間を考慮し、10 種類すべての音刺激の組み合わせで評価語抽出は行わなかった。しかし、異なる残響音開始時間と異なる直接音のレベルの条件を総合して評価できるように音刺激の組み合わせを行った。組み合わせを表 1 に示す。7C₃=35 通りの組み合わせを 2 通りで行った。

2.3. 評価語の抽出結果

評価語抽出の結果を表 2 に示す。合計 24 種類の評価語が抽出された。表 2 の「二極化できる評価語」とは、評価語に関する感覚において対義語が存在する評価語である（例：音源が近いに対して音源が遠い）。一方、「二極化できない評価語」とは、音源に対して程度を評価することができない評価語である。

評価語抽出の際、最も記述回数が多かった評価語は「音源が近い（遠い）」であった。今回使用した刺激間の印象の違いは、音源の距離感が最も知覚されやすかったと考えられる。「明瞭である」「音色が明るい」「定位がはっきりしている」も比較的多く回答されていた。評価語抽出で記述された回答によると、これらの評価語については、直接音のレベルに応じて変化することが予測できた。

評価語抽出での記述回数は多くはなかったが「包まれ感が高い」も評価語として採用された。評価語抽出で記述された回答によると、残響音開始時間が 100 ms で直接音のレベルが 0 dB や -4 dB の時、包まれ感が高いと評価される可能性が予測できた。このことから、残響音開始時間や直接音のレベルが異なる音刺激を比較することにより、「包まれ感が高い」程度を調査することができると考えられる。

表 2 評価語抽出の結果

「二極化できる評価語」とは、評価語に関する感覚において対義語が存在する評価語である。「二極化できない評価語」とは、音源に対して程度を評価することができない評価語である。

【二極化できる評価語】	【二極化できない評価語】
1. 音源が近い	1. 響きが似ている
2. 明瞭である	2. 響きの量が似ている
3. 自然	3. 響きの質が似ている
4. 響きが自然	4. 響きの広がり似ている
5. 響きの量が多い	5. 音色が似ている
6. 後方の響きが豊か	6. 音像が後方（前方）に定位している
7. 前方のリバースが大きい	7. 定位が後方（前方）に聴こえる
8. 音が固い	8. 空間の広さが似ている
9. 音色が固い	9. 空間の広がりが似ている
10. 音色が明るい	
11. 音色がこもっている	
12. <u>包まれ感が高い</u>	
13. 響きの音色が明るい	
14. 定位感がはっきりしている	
15. 空間が狭い	

3. 実験Ⅱ

3.1. 比較実験の目的

評価語抽出により、残響音開始時間や直接音のレベルを変化させることで、音に包まれた感じを含む音の印象が変化することが示された。そこで、この物理量の変化が音に包まれた感じを含む音の印象にどのような影響を与えているかを明らかにするために、シェッフエの一対比較実験[5]を行った。

3.2. 実験方法

3.2.1. 音刺激

実験Ⅰと同様に、残響音開始時間と直接音のレベルが異なる音刺激を作成した。実験Ⅱでは、インパルス応答の残響音開始時間は、50 ms、80 ms、100 ms の3種類とした。残響音開始時間 50 ms の後期残響音は 80 ms 以降の後期残響音を時間的に前へ 30 ms ずらしたものである。残響音開始時間 100 ms の場合は評価語抽出の際と同様に 80 ms に開始される後期残響部分を時間的に後ろへ 20 ms ずらして作成している。直接音のレベルはもとのレベルを 0 dB としたとき、0 dB、-2 dB、-4 dB、-6 dB の4種類とした。実験Ⅱで操作したインパルス応答を簡単に表した図を図5に示す。合計12種類の異なる条件を表3に、また、それぞれの C_{80} を表4に示す。 C_{80} 値は音刺激作成に使用した5チャンネル全てのインパルス応答を足し合わせた信号に対して2秒間の長さで求めた値である。また、音源による違いを見るために、無響室で録音された音源は2種類とした。ひとつは評価語抽出の際に用いたオーボエであり、もうひとつは木琴 (Sabre Dance, MUSIC FOR ARCHIMEDES) である。3種類の残

表 3 実験Ⅱにおける音刺激の条件

残響音 開始時間 [ms]	直接音のレベル [dB]			
	0	-2	-4	-6
50	0	-2	-4	-6
80	0	-2	-4	-6
100	0	-2	-4	-6

表 4 実験Ⅱにおける C_{80}

残響音 開始時間 [ms]	直接音のレベル [dB]				
		0	-2	-4	-6
50		-0.62	-2.23	-3.67	-5.15
80		-2.27	-4.28	-6.27	-8.27
100		-1.97	-3.97	-5.97	-8.27

響音開始時間と 4 種類の直接音のレベルは、各条件を変化させた音刺激を聴き比べた際、全ての音刺激間で異なる印象を著者自身が知覚できるものを選んだ。作成された音刺激は、オーボエが約 17 秒、木琴が約 9 秒であった。

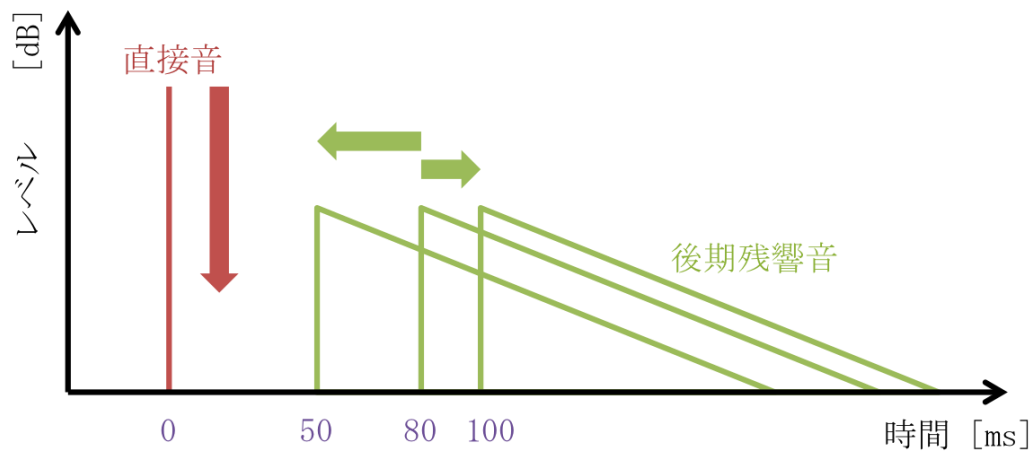


図 5 実験Ⅱで操作したインパルス応答の図

直接音のレベルはもとのレベルを 0 dB としたとき、0 dB、-2 dB、-4 dB、-6 dB と
なるよう操作した。80 ms 以降の後期残響音を時間的に前後に移動させ、50 ms、80 ms、
100 ms とするよう操作した。

3.2.2. 比較方法

実験Ⅱに用いる評価語は、実験Ⅰの結果から「音源が近い」「明瞭である」「空間が広い」「包まれ感が高い」の4つを採用した。この評価語について、2種類の音刺激（A と B）を聴き比べ「A is much better than B」「A is better than B」「A is the same as B」「B is better than A」「B is much better than A」の5段階評価でシェッフェの一対比較実験を行った。異なる種類の楽器間には比較せず、同じ楽器の音刺激同士のみで比較した。また比較は各評価語ごとに別々に行った。すなわち、2種類の音源×4種類の評価語の合計8回に分けて行った。8回それぞれの実験では ${}_{12}C_2=66$ 組の比較を行った。すべての実験参加者は8回分すべての比較を行った。実験参加者は本学の音楽音響創造に所属する学部と修士、博士の学生7名で、実験は1名ずつ行った。所要時間は実験参加者により異なったが、最短で2時間であった。

3.2.3. 実験概要

比較実験は評価語抽出の際と同様に東京藝術大学千住校地音響制作スタジオで行い、音刺激は ITU-R BS.775 に準拠した 5 チャンネルサラウンドのスピーカ配置で再生した (図 4)。残響音開始時間 80 ms、直接音のレベル 0 dB のオーボエの音刺激の音量は、受音位置で音刺激開始から 15 秒間が 70.1 dB (LAeq) であった。また、奏楽堂のインパルス応答の残響時間 (RT_{20}) は、L、R、C、Ls、Rs それぞれ、2.21、2.21、1.98、2.44、2.38 (sec) であった。実験が行われたスタジオにおいてダミーヘッドを用いて録音された 5 チャンネル分のインパルス応答を、各条件の対応するチャンネルのインパルス応答に畳み込み、足しあわせてステレオにした信号、すなわち、実験参加者が各条件のインパルス応答を聴いた場合の残響時間 (RT_{20}) は、12 種類のそれぞれの条件において、2.27~2.46 (sec) であった。

音刺激の比較は評価実験用ソフト STEP [20] を用いて行った。評価語「明瞭である」について比較する STEP の表示画面を図 6 に示す。音刺激は STEP のシステムによりランダムに提示された。実験中、実験参加者は再生ボタン (▶) を押すことにより何度でも音刺激を再生することができる。またループボタン (LOOP) をおすことによって音刺激は何度でも繰り返し再生される。音刺激の再生中に「A」もしくは「B」ボタンを押すことで、2 種類の音刺激を切り替えることができた。実験参加者には、音刺激を比較する際、音刺激のどこの部分を聴いて判断してもよいと伝えた。実験参加者は、「Position」により音刺激の再生位置を移動することができ、「Start」と「Stop」により音刺激の任意の区間を再生することができた。

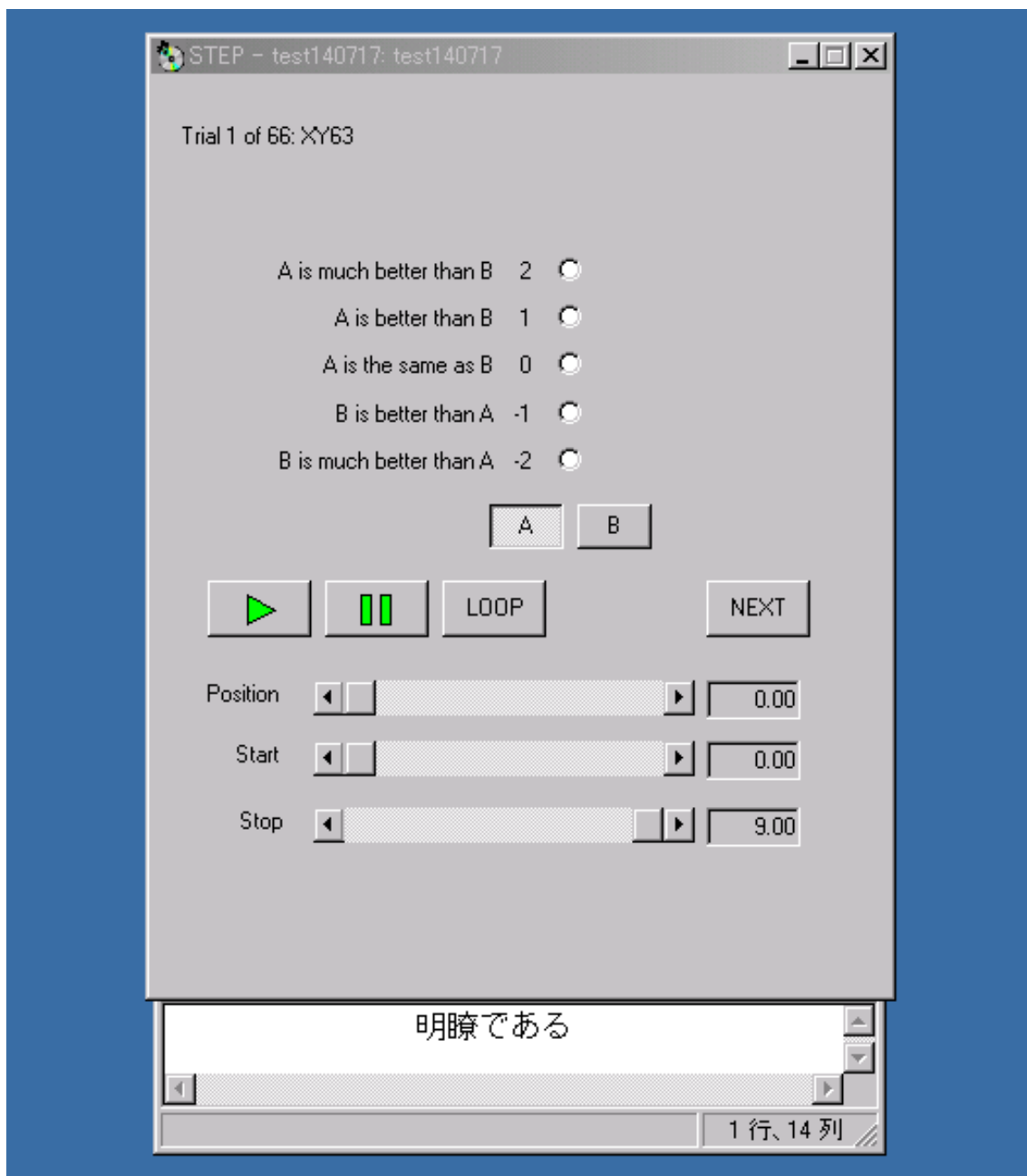


図 6 「明瞭である」を比較する STEP の表示画面

ボタン「A」「B」を押すことで、再生される 2 種類の音刺激を切り替えられる。「▶」を押すことで何度でも音刺激は再生される。「LOOP」を押すことで音刺激は繰り返し再生される。「Position」により再生位置を移動することができ、「Start」と「Stop」により音刺激の任意の区間を再生することができる。

3.3. シェッフェの一対比較による実験結果

図 7～14 にシェッフェの一対比較による実験結果を示す。図中の記号（●、▲、■）の位置は、それぞれの評価語に対する音刺激の程度を示す。記号の位置が右であるほど（横軸に示すシェッフェの一対比較の数値が高いほど）評価語が表す程度が高く感じられ、逆に左であるほどその程度が低く感じられている。それぞれの評価語について右に位置する刺激ほど「明瞭である」「音源が近い」「包まれ感が高い」「空間が広い」と感じられている。記号の種類について、●は残響音開始時間 100 ms、▲は残響音開始時間 80 ms、■は残響音開始時間 50 ms を表す（図の左側にも残響音開始時間を表記した。）また直接音のレベルについては各記号の上に表記した。図中のエラーバーは 95 % 信頼区間を表し、95 % の確率で、この信頼区間内にそれぞれのポイントに対する真の平均があることを示している。すべての評価語において、シェッフェの一対比較の際の分散分析において直接音のレベルの違いによる主効果の p 値は 0.000 であった。

評価語「音源が近い」「明瞭である」では、オーボエ、木琴ともに、直接音のレベルが大きくなるにつれ音源が近くに感じられ、明瞭に感じられる可能性が示された。しかし残響音開始時間が異なることによって、音源の距離感や明瞭度に変化は見られなかった。残響時間開始時間の違いについて、実験に用いた音刺激は、全ての音刺激間で異なる印象を自身が知覚できるものを選んでいため、残響音開始時間が異なることによって音の印象は変化しているはずである。このことから、残響音開始時間は、音源の距離感や明瞭度以外の感覚に影響を与えている可能性が考えられる。

評価語「空間が広い」については、オーボエ、木琴ともに、直接音のレベルが小さくなるほど、空間が広いと感じられる可能性が示された。また、残響音開始時間による空間の広さへの傾向は見られなかった。

評価語「音に包まれた感じ」について、オーボエは信頼区間からそれぞれの音刺激に大きな違いはないものの、直接音のレベルが大きいほど包まれ感が高いと感じられている可能性がみられた。木琴に関しても、残響音開始時間 50 ms の場合を除き、同様に直接音のレベルが大きいほど包まれ感が高いと感じられている可能性がみられた。残響音開始時間 50 ms の場合については、残響音開

始時間 50 ms から 80 ms の間のどこかに、印象が異なって感じられはじめる境界がある可能性も考えられる。残響音開始時間の変化による音に包まれた感じへの影響は他の評価語と同様に見られなかった。

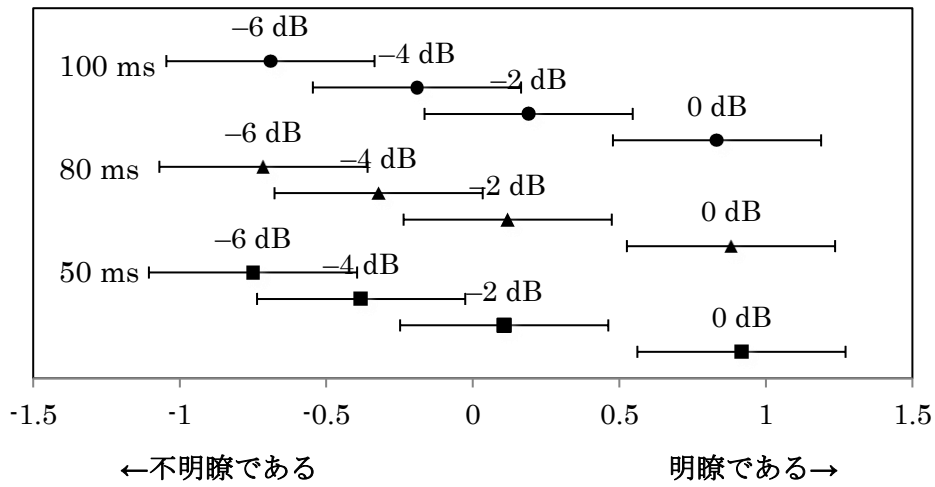


図 7 明瞭である (オーボエ)

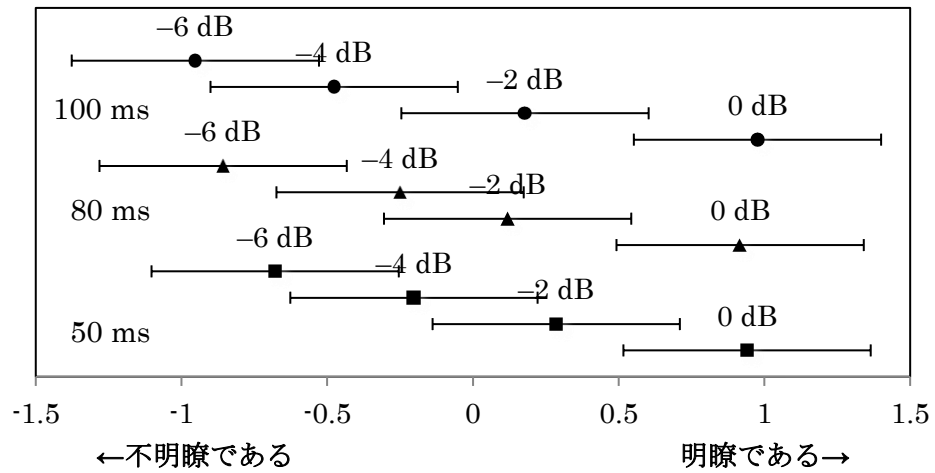


図 8 明瞭である (木琴)

図中の記号 (●、▲、■) の位置は、それぞれの評価語に対する音刺激の程度を示す。記号の位置が右であるほど明瞭であり、左であるほど不明瞭と感じられている。●は残響音開始時間 100 ms、▲は残響音開始時間 80 ms、■は残響音開始時間 50 ms を表す。各記号の上に直接音のレベルを示した。図中のエラーバーは 95% 信頼区間である。

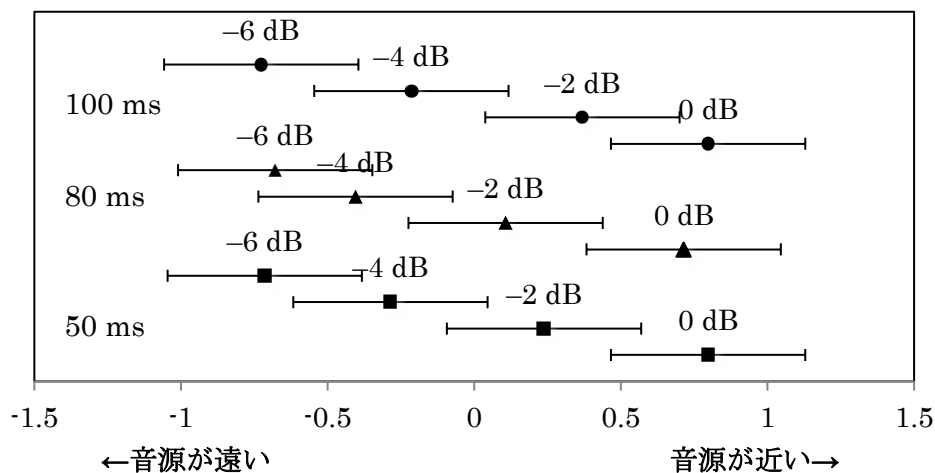


図 8 音源が近い (オーボエ)

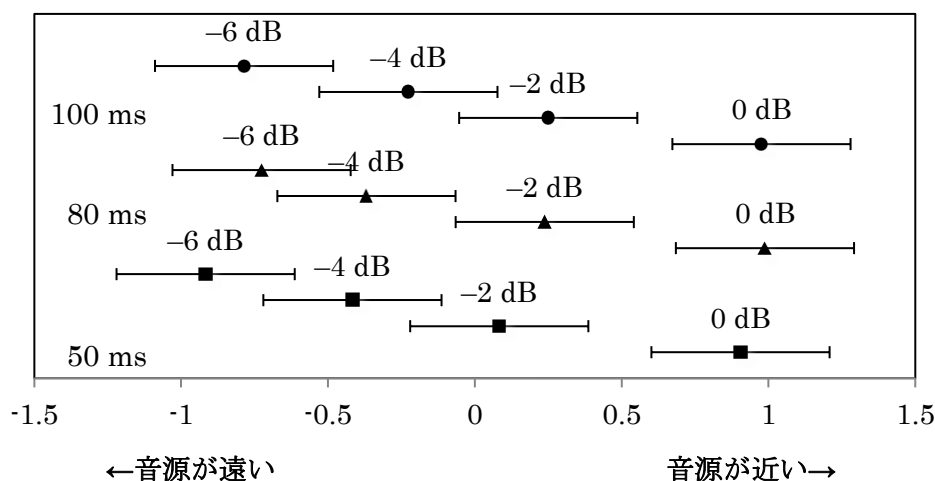


図 9 音源が近い (木琴)

図中の記号 (●、▲、■) の位置は、それぞれの評価語に対する音刺激の程度を示す。記号の位置が右であるほど音源が近く、左であるほど音源が遠く感じられている。●は残響音開始時間 100 ms、▲は残響音開始時間 80 ms、■は残響音開始時間 50 ms を表す。各記号の上に直接音のレベルを示した。図中のエラーバーは 95 % 信頼区間である。

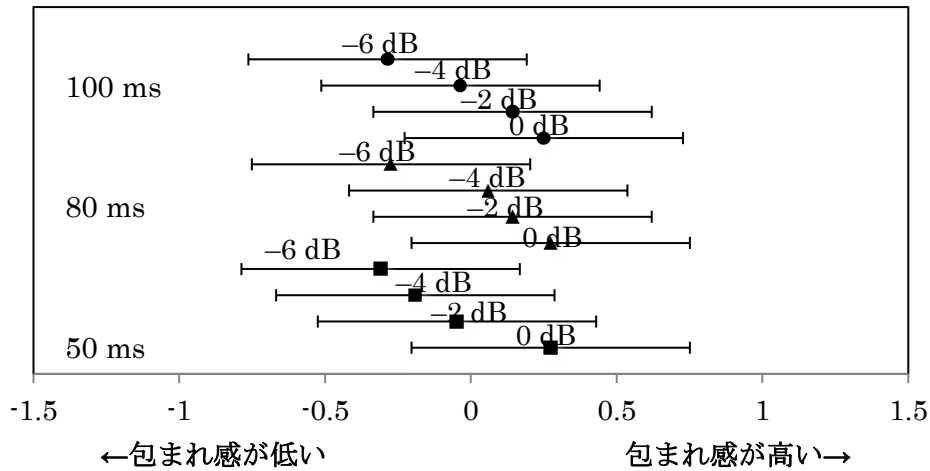


図 10 包まれ感が高い (オーボエ)

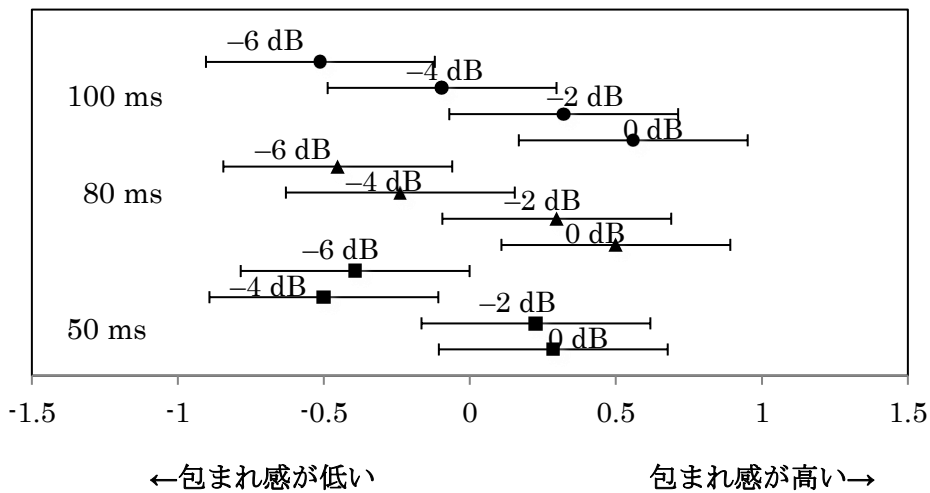


図 11 包まれ感が高い (木琴)

図中の記号 (●、▲、■) の位置は、それぞれの評価語に対する音刺激の程度を示す。記号の位置が右であるほど包まれ感が高く、左であるほど包まれ感は低く感じられている。●は残響音開始時間 100 ms、▲は残響音開始時間 80 ms、■は残響音開始時間 50 ms を表す。各記号の上に直接音のレベルを示した。図中のエラーバーは 95 % 信頼区間である。

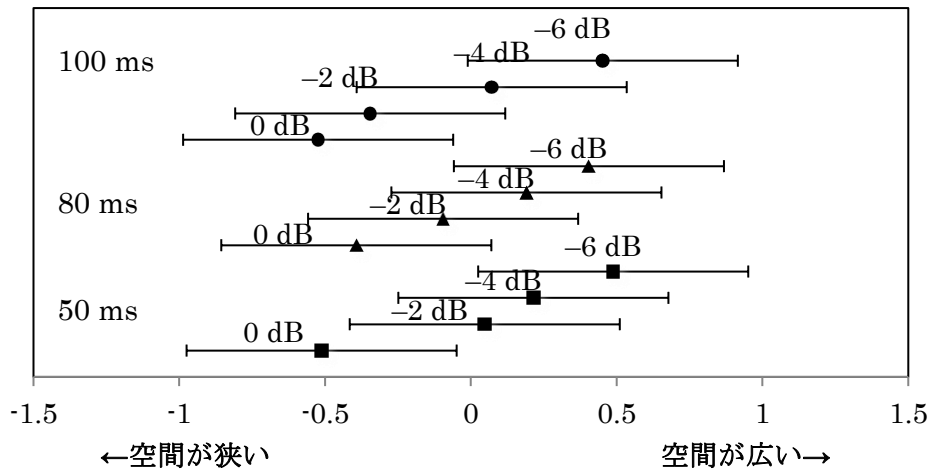


図 12 空間が広い (オーボエ)

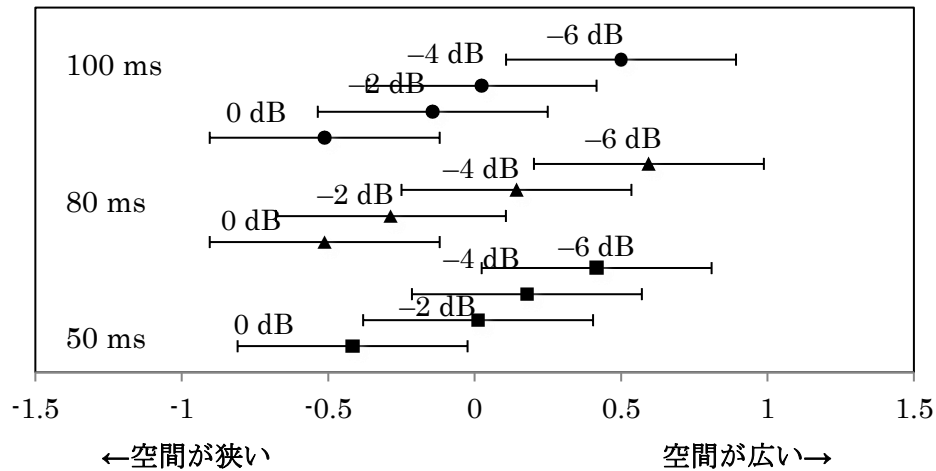


図 14 空間が広い (木琴)

図中の記号 (●、▲、■) の位置は、それぞれの評価語に対する音刺激の程度を示す。記号の位置が右であるほど空間が広く、左であるほど空間が狭く感じられている。●は残響音開始時間 100 ms、▲は残響音開始時間 80 ms、■は残響音開始時間 50 ms を表す。各記号の上に直接音のレベルを示した。図中のエラーバーは 95 % 信頼区間である。

3.4. 考察

それぞれの評価語に対する物理的要因は複数存在すると考えられるが、音の印象に関する今回の比較実験から、直接音のレベルは音源の距離感や明瞭さに対する物理的要因のひとつであることが示された。また、評価語「音に包まれた感じ」についても同様に、直接音のレベルが音に包まれた感じに対する物理的要因のひとつである可能性が考えられる。このことから、直接的に、「音源が近くに感じられるほど包まれ感が高い」や「明瞭であるほど、音に包まれた感じが高い」ことは示せないが、評価語「音源の距離感」「明瞭さ」「音に包まれた感じ」の3つの評価語には何らかの共通した関係があると考えられる。

評価語「空間が広い」について、シェッフェの一対比較の結果では、直接音のレベルが小さくなるに応じて、すなわち、直接音に比べ残響音のエネルギーが大きくなるに連れて、空間が広いと感じられている。実験Ⅱの結果からは、空間の広さの印象は、直接音と残響音の相対的なエネルギーの大きさを手がかりにして評価されていると考えられる。

一方、評価語「音に包まれた感じ」は、直接音の存在（音源の存在）が印象評価の際に重要であることが示された。「音に包まれた感じ」には聴こえる残響が何による残響なのかが知覚できなければ音に包まれた感じは低くなることが示唆された。

従来の研究では、 C_{80} が低ければ音に包まれた感じが増すと考えられている。すなわち、時間的に後期の残響のエネルギーが初期の音のエネルギーに比べて大きくなるほど音に包まれた感じが増す。しかし、実験Ⅱの結果では、時間的に後期の残響のエネルギーが初期の音のエネルギーに比べ大きくなるに連れ、音に包まれた感じが減少した。

従来の研究と実験Ⅱの結果が異なる要因として、音刺激作成の際の操作の違いが考えられる。従来の研究では一般に、直接音のレベルは変えず、後期残響音のレベルを変化させている。一方、実験Ⅱでは初期反射の部分は無音とし、かつ、直接音のレベルを徐々に小さくしていった。直接音と残響部分のエネルギーの比を表す物理量として C_{10} (DR 比) がある。 C_{10} は式 (7) で表される。

$$C_{10} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{10\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{10\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (7.)$$

本研究の C_{10} を表 5 に示す。また、従来の研究と実験 II の C_{10} の違いを図 15 に示す。特に実験 II の直接音のレベルが低い音刺激は、従来の研究で用いられた音刺激に比べ C_{10} は小さくなっていると考えられる。従来の研究では、直接音と初期反射音のエネルギーがある程度存在しているために、後期残響音のレベルが増幅されたとしても、直接音がしっかりと聴こえており、聴こえてくる残響が何による残響なのかが知覚できていると予想される。一方、実験 II の条件のように、直接音のレベルが小さくなっていく場合、聴こえてくる残響が何による残響なのかが知覚しづらくなる可能性が考えられる。すなわち、直接音の存在（音源の存在）が明瞭に知覚出来る条件では、残響音のエネルギーが直接音のエネルギーに比べて大きくなるにしたがって音に包まれた感じが増加するが、直接音の存在（音源の存在）が知覚しづらい状態の時は、残響音のエネルギーが直接音のエネルギーに比べて大きくなるにしたがって音に包まれた感じが逆に減少すると予測される。この予測を確かめるために次章では、直接音が明瞭に知覚される場合から、直接音の存在が知覚しづらい場合までを含む範囲で音に包まれた感じを含む音の印象評価を行った。

表 5 各条件における C_{10} [dB]

		直接音のレベル [dB]			
		0	-2	-4	-6
残響音 開始時間 [ms]	50	-2.27	-4.27	-6.27	-8.26
	80	-3.19	-5.07	-7.00	-8.95
	100	-2.90	-4.78	-6.70	-8.95

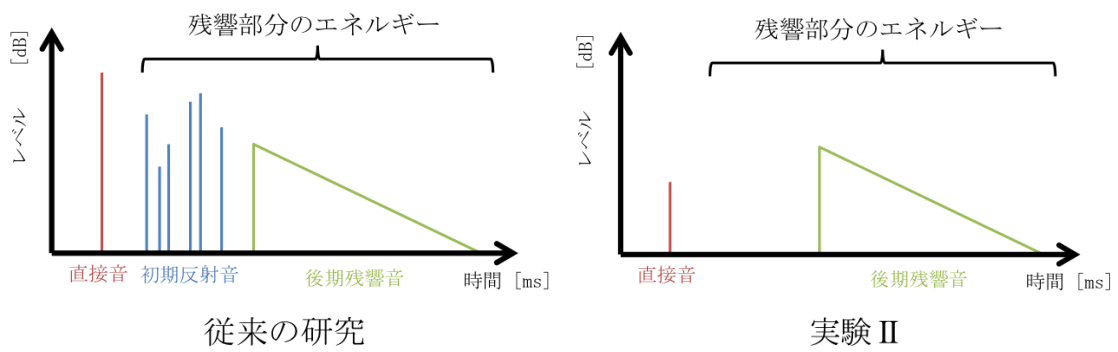


図 15 従来と実験IIの C_{10} (DR 比) の違い

特に実験IIの直接音のレベルが低い音刺激は従来で用いられた音刺激に比べ C_{10} は小さくなっていると考えられる。

4. 実験Ⅲ

4.1. 実験の目的

実験Ⅱの結果を受け、直接音が明瞭に知覚される場合から直接音の存在が知覚しづらい場合までを含む範囲の音刺激を用いて、音に包まれた感じを含む音の印象評価を行う。実験Ⅲの結果から、 C_{10} のような物理量と音に包まれた感じに関係があるかどうか、またあるのならばどのような傾向が見られるのかを調査する。

4.2. 実験に用いたインパルス応答

実験Ⅲでは、直接音が明瞭に知覚される音刺激から直接音の存在が知覚しづらい音刺激までを段階的に作成できると考えられる条件でインパルス応答を作成した。インパルス応答は、パルス信号を時間方向に引き延ばした TSP (Time Stretched Pulse) 信号を奏楽堂で再生し、スピーカとマイクロホンの距離を変えてサラウンド録音した音源を用いて求めた。録音の際のマイクロホンは、C に SCHOEPS CCM8[25]を、L、R、Ls、Rs には DPA4006[21]を用いた。また、インパルス応答は GENELEC 8260A[24]で再生した場合と B&K OmniSource Type 4295[23] で再生した場合の2種類を録音した。これらのスピーカは指向性の違いを比べるために使用した。GENELEC 8260A は指向性があるスピーカで、B&K OmniSource Type 4295 は全指向性のスピーカである。どちらの場合も TSP 再生時には1つのスピーカで再生した。TSP 信号録音時の奏楽堂の様子を図 16 に示す。

例えば音の大きさなど人の聴覚の感覚は指数的に変化する[19]ため、音源からマイクロホンの距離を等間隔で離し録音した TSP 信号よりも、指数的に離し録音した TSP 信号を用いたほうが、音の印象を評価する実験材料として相応しい

と考えられる。また、奏楽堂の座席（床）の角度は、図 16 の「A」を堺に舞台側と客席後方で異なる。すなわち「A」より客席後方で録音された場合と「A」より舞台側で録音された場合では、音の反射の様子が大きく異なる可能性がある。そこで今回は 5 チャンネル全てのマイクロホンの位置が「A」で示された位置より舞台側に収まるようにした。これらのことを考慮して決定したマイクロホンの位置を表 6 に示す。TSP 信号を録音した際の、最もスピーカに近い（最も舞台側である）マイクロホンを Position1 とし、最もスピーカから遠い位置を Position9 とする。また、Position1 のマイクロホンの位置を図 17 に示す。スピーカとマイクロホン (C) の位置は、横幅に対し中央の位置に設定した。スピーカから最も近いマイクロホン (C) までの距離は 2 m であり (Position1)、Ls と Rs チャンネルの位置は常に C チャンネルから客席後方へ 7 m であった。Position1 のスピーカとマイクロホンの高さは舞台から 1.5m であり、舞台下から 2.3 m であった。客席に立てられたマイクロホンの高さは客席から 2.3 m の高さであった。図 16 にあるように、奏楽堂の天井は、オーケストラ等のコンサートで使用される状態で録音された。図 18 は TSP 録音時のスピーカとマイクロホンの様子である。

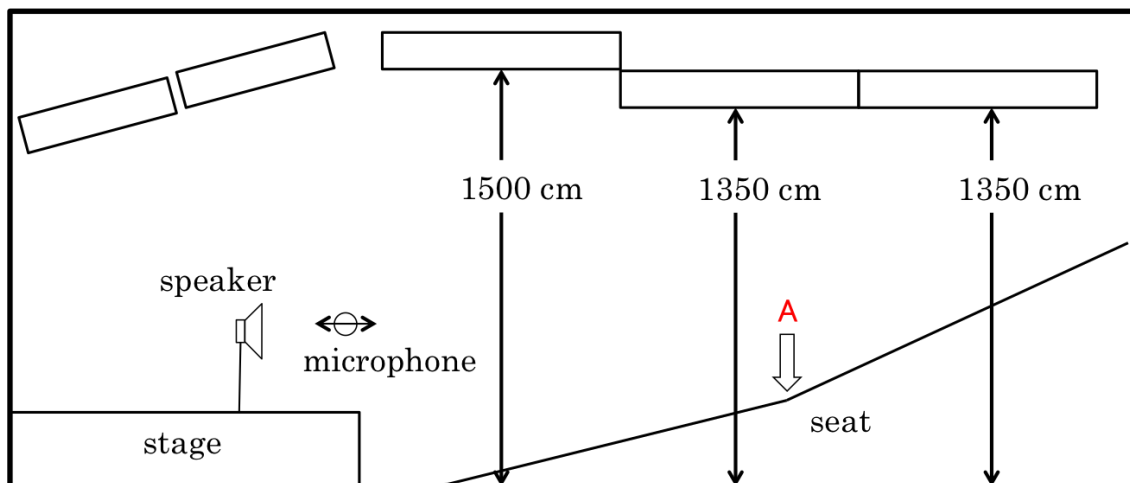


図 16 TSP 信号録音時の奏楽堂の様子

図の上方にある長方形は天井を表し、オーケストラ等のコンサートで使用される状態である。客席は A 点を堺に斜面の角度が変わる。

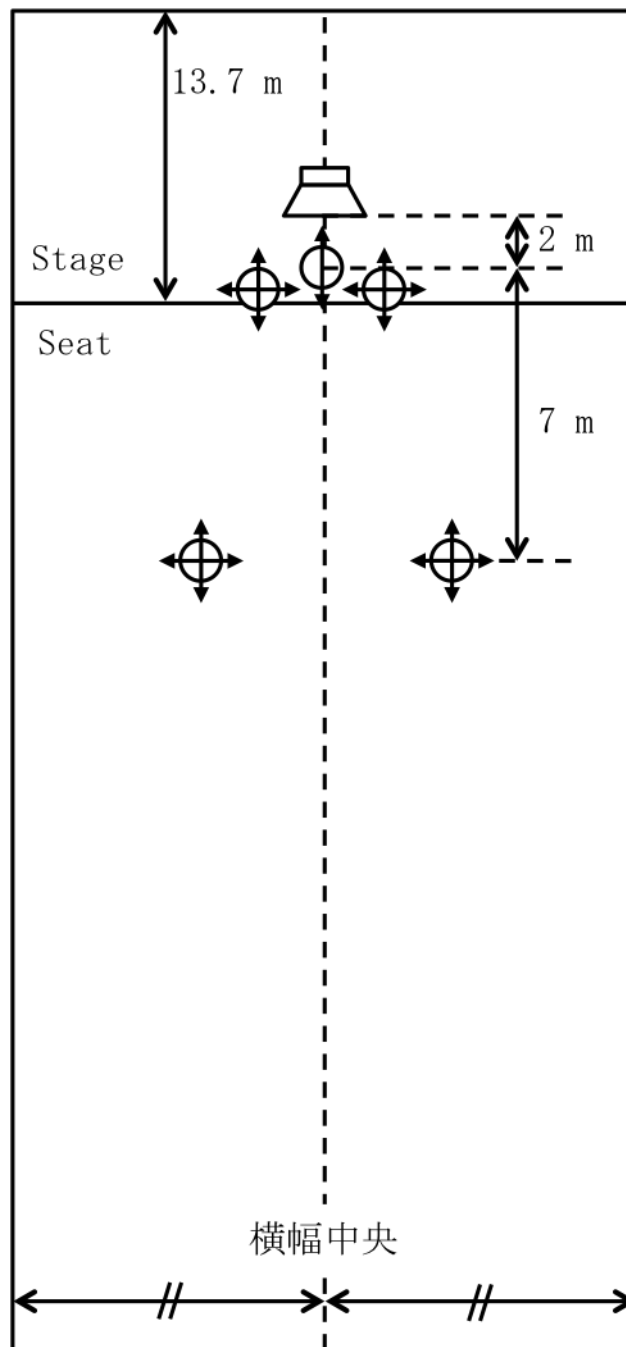


図 17 Position1 のマイクロホンの位置

スピーカとマイクロホン (C) は横幅に対し中央の位置に設定した。スピーカから最も近いマイクロホン (C) までの距離は 2 m (Position1)、Ls と Rs チャンネルの位置は常に C チャンネルから客席後方へ 7 m である。

表 6 TSP 信号録音時のマイクロホンの位置

最もスピーカから近い（最も舞台側である）マイクロホンの位置を Position1、最もスピーカから遠いマイクロホンの位置を Position9 とする。

Position	Position1 からの マイクロホン (C) の位置 [cm]
1	0
2	14
3	25
4	46
5	83
6	150
7	295
8	497
9	880

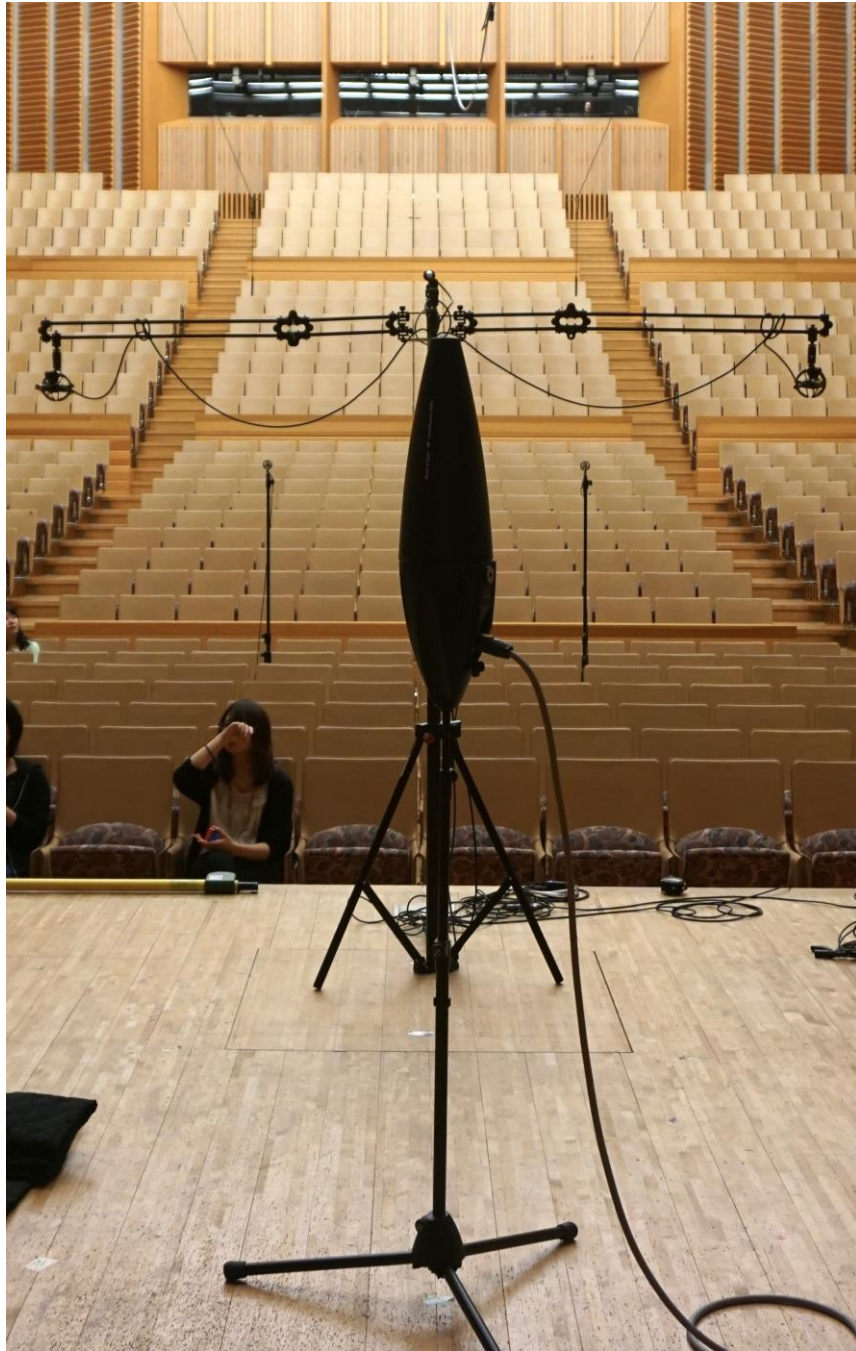


図 18 TSP 録音時のスピーカとマイクロホンの様子

4.3. 実験方法

4.3.1. 音刺激

奏楽堂で録音した TSP 信号から求めた Position1～Position 9 の 9 種類のインパルス応答と、無響室で録音されたオーボエの音源 (実験 I II で用いたもの) を畳み込み 9 つの異なる響き方をするオーボエの音刺激を作成した。9 種類の音源を聴き比べた時、Position1 と Position2 の印象はとても似ていた。また、Position8 と Position9 の違いはあまりに極端に違っていたことから、Position2～Position8 までのインパルス応答を実験に採用した。本論文では Position2～Position8 に対応するインパルス応答を IR1～IR7 と呼ぶ。

実験Ⅲを行う前に、2 種類のスピーカによる音刺激を著者が聴き比べたところ、B&K OmniSource Type 4295 による音刺激は GENELEC 8260A による音刺激に比べ、IR1～IR7 全体にかけて音に包まれた感じが高く感じられ、音に包まれた感じを評価しやすいように感じられた。分析には全指向性である B&K OmniSource Type 4295 で再生されたインパルス応答を用いた。B&K OmniSource Type 4295 で再生されたインパルス応答の残響時間を表 7 に示す。また式 (8) により臨界距離 (D_c : critical distance) を求めた。

$$D_c = 0.057 \times \sqrt{\frac{V}{T}} \text{ [m]} \quad (8.)$$

V は室の容積、 T は残響時間である [3]。奏楽堂の質の容積を 10000m^3 [13]、残響時間を約 2 秒とすると、臨界距離はおよそスピーカの位置から客席側に 4 m であった。この位置は Position6 と Position7 の間である。

実験に用いたインパルス応答の C_{10} を図 19 に示す。IR1 (Position2) から IR7 (Position8) へマイクロホンとスピーカの距離が離れるほど反射音に対する直接音の割合が低くなっている。 C_{80} を図 20 に示す。IR1 と IR2 の C_{80} は殆ど変

わらないが、IR1 から IR7 の順に C_{80} の値は減少していることがわかる。 C_{10} と C_{80} は、IR1～IR7 それぞれにおいて、5チャンネル (L、R、C、Ls、Rs) 分の信号を足し合わせて、Cチャンネルの直接音開始を 0 ms として求めた値である。

IR1～IR7 のインパルス応答と無響室で録音されたオーボエの音源を畳み込んだ音源は、実際にホールで聴いた時の様な距離による音の大きさの違いが再現される。本論文ではこの音源を「インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激」と呼ぶ。

IR1 と IR7 から作成した音刺激を比較すると、音の大きさに明らかな違いがあった。そこで、音に包まれた感じへの音の大きさによる影響考慮し、音の大きさを揃えた音刺激も作成した。本論文ではこのような音源を「音の大きさを考慮して作成した音刺激」と呼ぶ。「音の大きさを考慮して作成された音刺激」は、インパルス応答とオーボエの無響室録音された音源を畳み込むことで作成した音源が、音刺激開始から 15 秒間で 73.0 dB (LAeq) になるよう信号を調整した。すなわちエネルギーがもともと大きい IR1 や IR2 を用いた音源は殆ど操作されずに 73.0 dB (LAeq) で再生されるが、エネルギーが小さい IR6 や IR7 を用いた音源は他の音源より増幅された状態で再生される。エネルギーの増幅は 5チャンネル全ての信号に対して同様に行った。音の大きさは、実際に実験Ⅲを行った環境で、マイクロホンを受聴位置 (5チャンネルスピーカの中央、高さ 120 cm) に設置し、NTI XL2 により測定した。

表 7 実験Ⅲにおける奏楽堂のインパルス応答の残響時間

B&K OmniSource Type 4295 で再生された TSP 信号によるインパルス応答の残響時間。

Position	残響時間 [s]
1	2.03
2	1.99
3	1.98
4	1.95
5	2.04
6	2.11
7	2.12
8	2.10
9	2.00

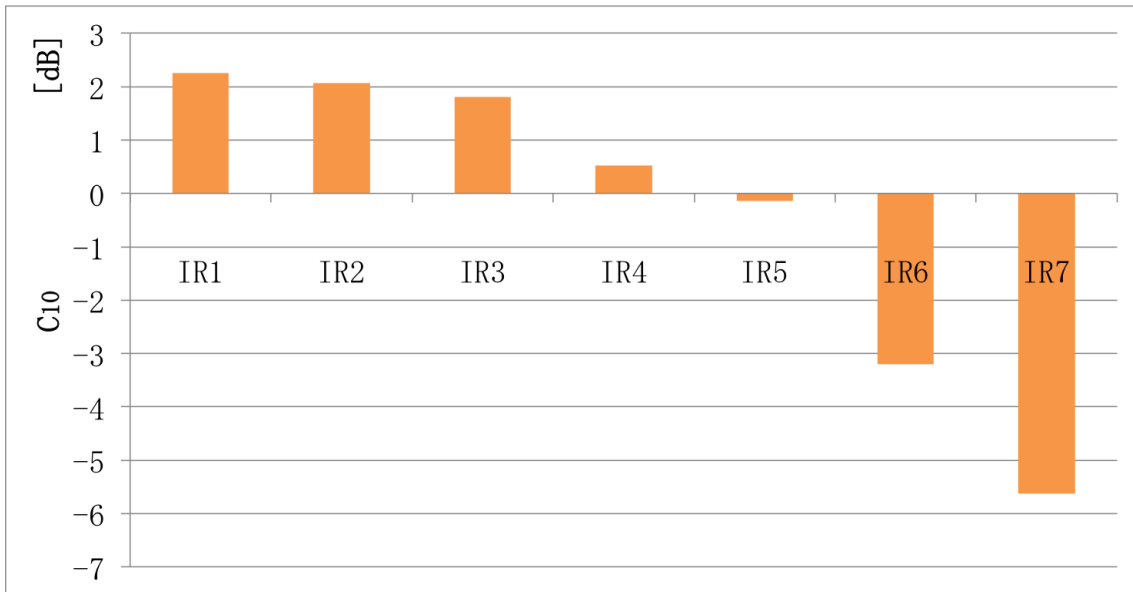


図 19 実験Ⅲで用いた IR1 から IR7 までの C_{10}

IR1 から IR7 へマイクロホンとスピーカの距離が離れるほど反射音に対する直接音の割合が低くなっている。

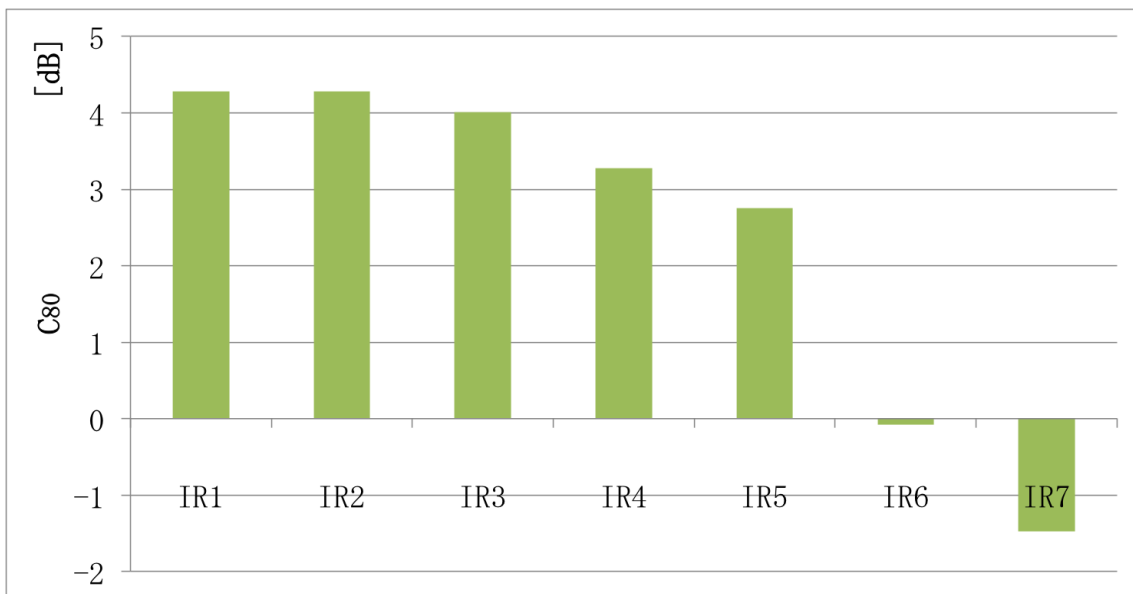


図 20 実験Ⅲで用いた IR1 から IR7 までの C_{80}

IR1 と IR2 の C_{80} は殆ど変わらないが、IR1 から IR7 の順に C_{80} の値は減少している。

4.3.2. 評価方法

実験Ⅲで採用した4つの評価語を図21に示す。「楽器音の明瞭度」は実験Ⅱの結果から音に包まれた感じに何らかの関係があると考えられたため実験Ⅲでも採用した。「音に包まれた感じ」という評価語については、その印象や言葉の意味は理解できるが、どのようなものであるかを明確に定義することはできなかった。従来の研究では、主に壁などに反射した後耳へ到達するような後期のエネルギーが「音に包まれた感じ」に影響を与えている事が明らかにされてきた。すなわち、部屋の響きを手がかりに知覚される「音に包まれた感じ」があると考えられる。しかし、実験Ⅱでは直接音のレベルに応じて「音に包まれた感じ」が変化していた。このことから、部屋の響きの他に楽器音（もしくは楽器音の響き）を手がかりに知覚する「音に包まれた感じ」があると考えた。そこで、この楽器音を手がかりに知覚する音に包まれた感じを「楽器音による音に包まれた感じ」と呼ぶことにして、実験Ⅲでは「部屋の響きによる音に包まれた感じ」とは別の評価語として用いることにした。「楽器音による音に包まれた感じ」は「見かけの音源の幅」と印象が似ている可能性があるため「見かけの音源の幅」も実験Ⅲの評価語に加えた。

これら4つの評価語について、7段階評価でシェッフェの対比較実験を行った。実験は2種類の音源（「インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激」と「音の大きさを考慮して作成した音刺激」）×4種類の評価語の合計8回に分けて行った。8回それぞれの実験では $7C_2=21$ 組の比較を行った。すべての実験参加者は8回分すべての比較を行った。

IR1～IR7により作成されたオーボエの音刺激について、IR1による音刺激はとも明瞭で直接音のエネルギーが強い一方、IR7による音刺激は直接音が極端に小さくなる。そこで、「見かけの音源の幅」や「楽器音による音に包まれた感じ」が知覚できない可能性を考え、もし知覚できなかった音刺激があった場合はその刺激対の番号を記述するよう実験参加者に説明した。また実験参加者には、たとえ知覚できない音刺激があったとしても、再生されている刺激対に対し7段階で評価するように伝えた。刺激対の番号からはどのような音刺激が再生されているのかを実験参加者は予想することができなかったと考えられる。

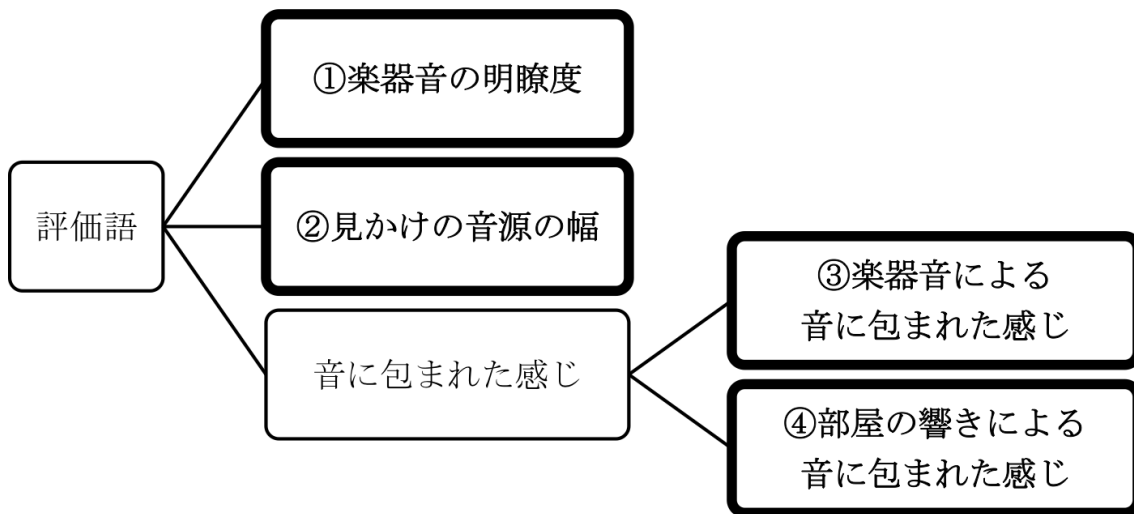


図 21 比較実験Ⅲで用いた4種類の評価語

4.3.3. 実験概要

実験参加者は音に関する評価の経験がある本学の学部と修士、博士の学生 11 名で、実験は 1 名ずつ行った。所要時間は実験参加者により異なったが、最短で 1 時間弱であった。

比較実験は実験Ⅰ、Ⅱと同様に東京藝術大学千住校地音響制作スタジオで行い、音刺激は ITU-R BS.775 に準拠した 5 チャンネルサラウンドのスピーカ配置で再生した (図 4)。実験参加者には音刺激を比較する際、音刺激のどこの部分を聴いて判断してもよいと伝えた。実験Ⅲも STEP を用いて評価を行い、操作方法は実験Ⅱと同様であった。実験Ⅲの STEP の表示画面を図 22 に示す。

今回の一対比較実験では、実際の一対比較実験の前にそれぞれの評価語の感覚を掴んでもらうためにトレーニングを行った。トレーニングではオーボエの代わりに無響室で録音された 20 秒間のチェロの音源を畳み込んだ音刺激を用いた。

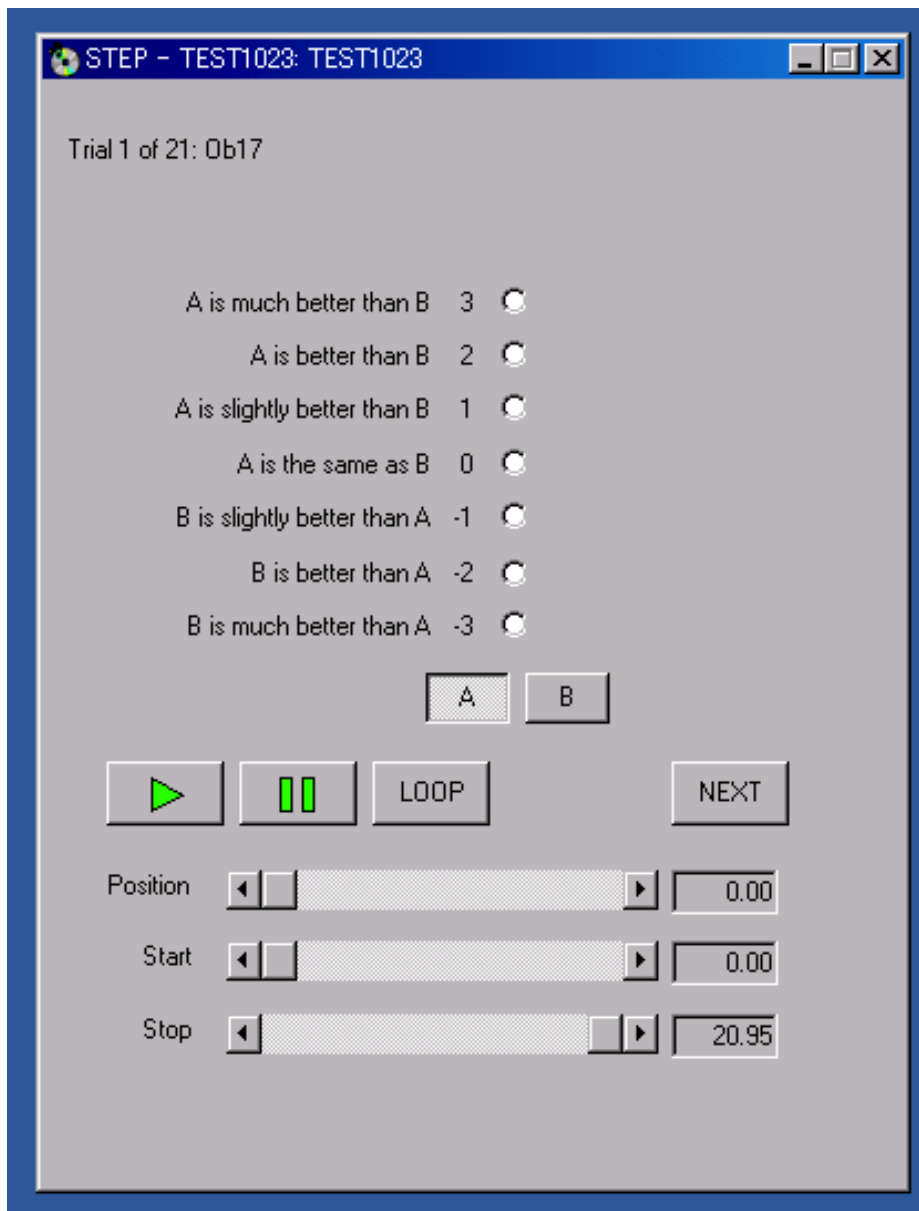


図 22 実験Ⅲの STEP の表示画面

ボタン「A」「B」を押すことで、再生される 2 種類の音刺激を切り替えられる。「▶」を押すことで何度でも音刺激は再生される。「LOOP」を押すことで音刺激は繰り返し再生される。「Position」により再生位置を移動することができ、「Start」と「Stop」により音刺激の任意の区間を再生することができる。

4.4. 実験結果

シェッフェの一対比較による実験結果を図 23～図 30 に示す。図中の記号(●)の位置は、それぞれの評価語に対する音刺激の程度を示す。記号が右であるほど評価語が表す程度が高く感じられ、逆に左であるほどその程度が低く感じられる。それぞれの評価語について右に位置する刺激ほど「明瞭である」「見かけの音源の幅が広い」「楽器による音に包まれた感じが高い」「部屋の響きによる音に包まれた感じが高い」と感じられている。各記号の上に表記した IR1～IR7 は音刺激作成に用いたインパルス応答の種類を示す。図中のエラーバーは 95% 信頼区間を表しており、すべての評価語において、シェッフェの一対比較の際の分散分析において、距離による主効果の p 値は 0.000 であった。

シェッフェの一対比較による結果を全体的にみると「インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激」「音の大きさを考慮して作成した音刺激」ともに、「楽器音の明瞭度」はマイクロホンの位置がスピーカに近づくほど明瞭であると感じられている。「見かけの音源の幅」はマイクロホンの位置がスピーカに近づくほど広いと感じられている。「楽器音による音に包まれた感じ」はマイクロホンの位置がスピーカに近づくほど包まれ感が高く感じられている。「部屋の響きによる音に包まれた感じ」はマイクロホンの位置がスピーカから遠ざかるほど包まれ感が高く感じられている。

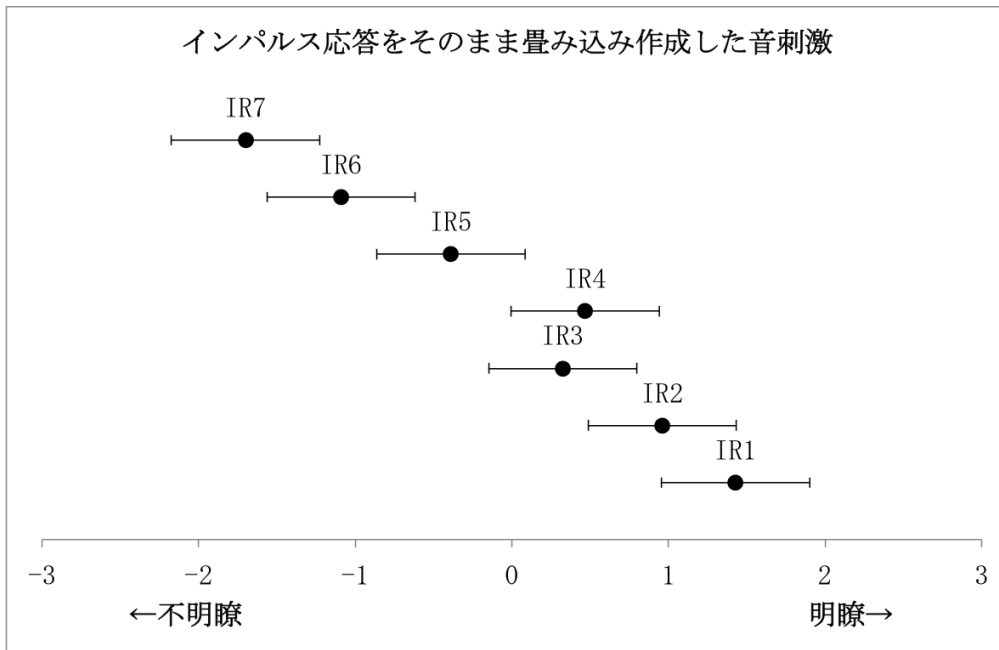


図 23 楽器音の明瞭度 (インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激)

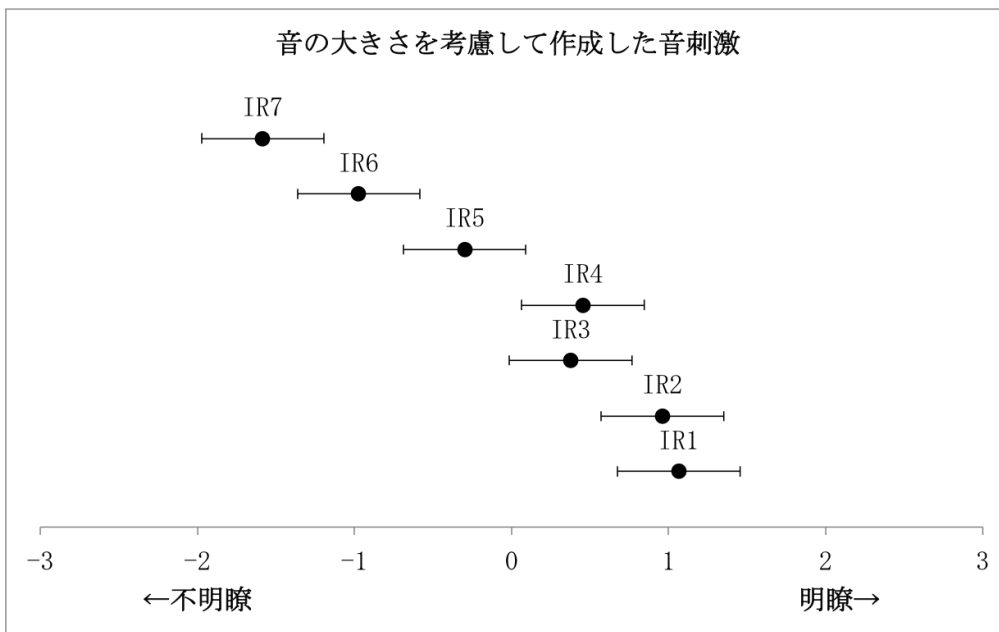


図 24 楽器音の明瞭度 (音の大きさを考慮して作成した音刺激)

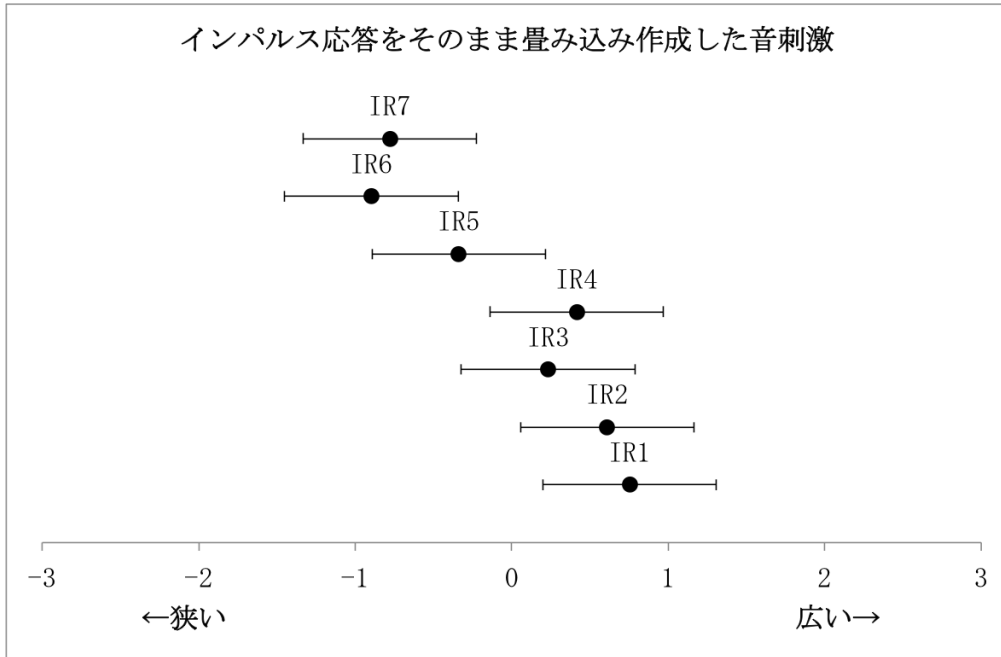


図 25 見かけの音源の幅 (インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激)

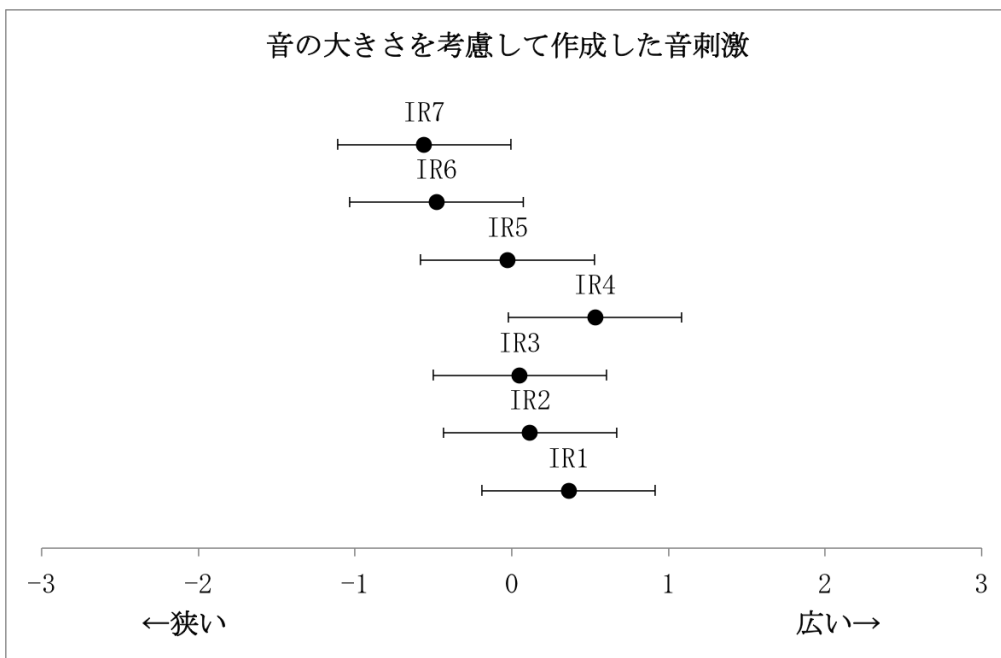


図 26 見かけの音源の幅 (音の大きさを考慮して作成した音刺激)

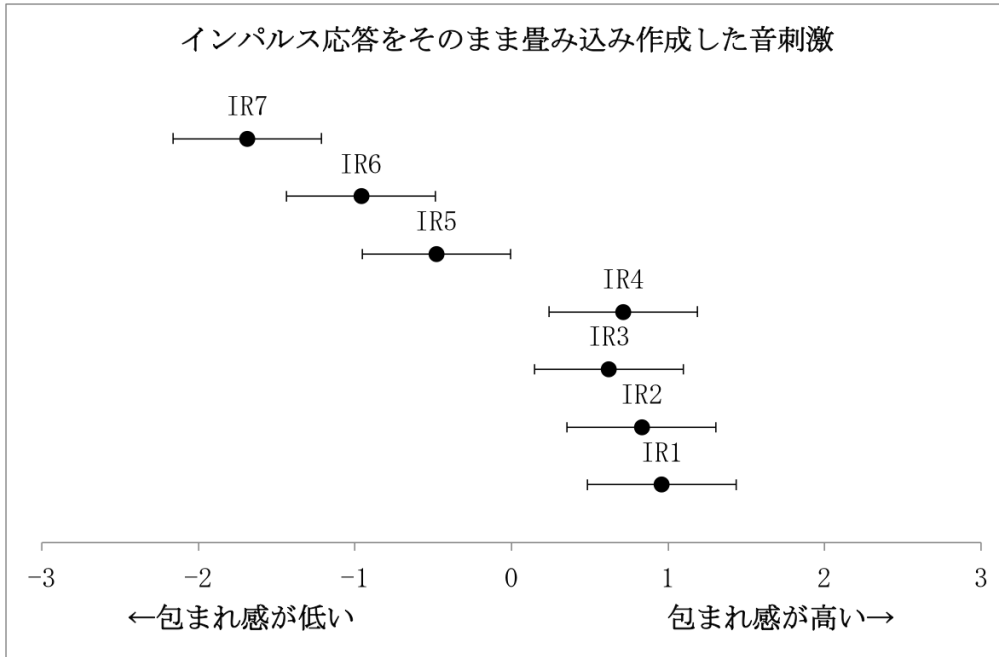


図 27 楽器音による音に包まれた感じ (インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激)

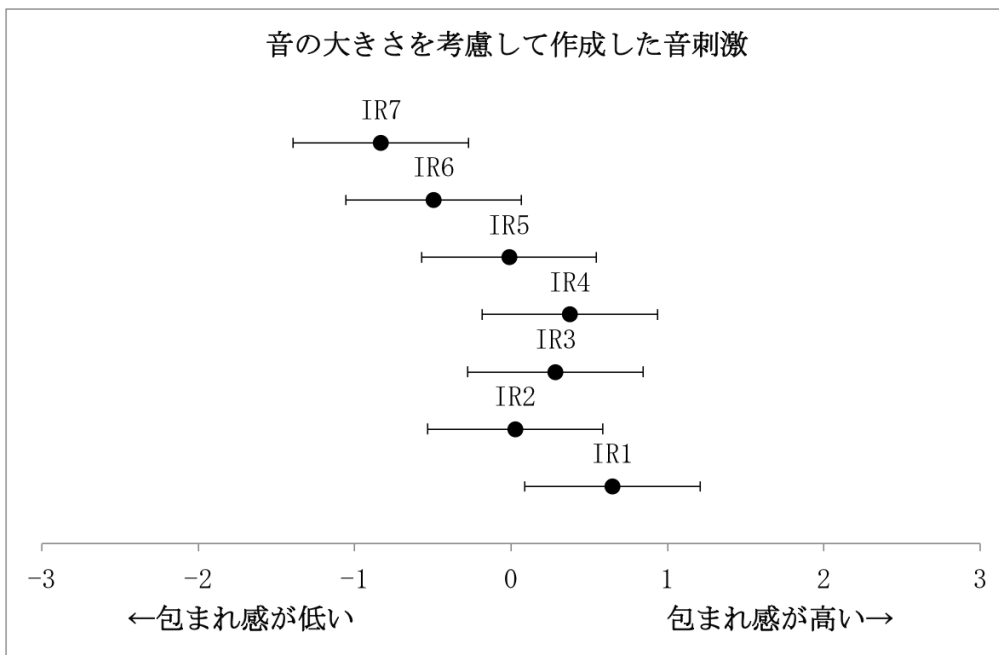


図 28 楽器音による音に包まれた感じ (音の大きさを考慮して作成した音刺激)

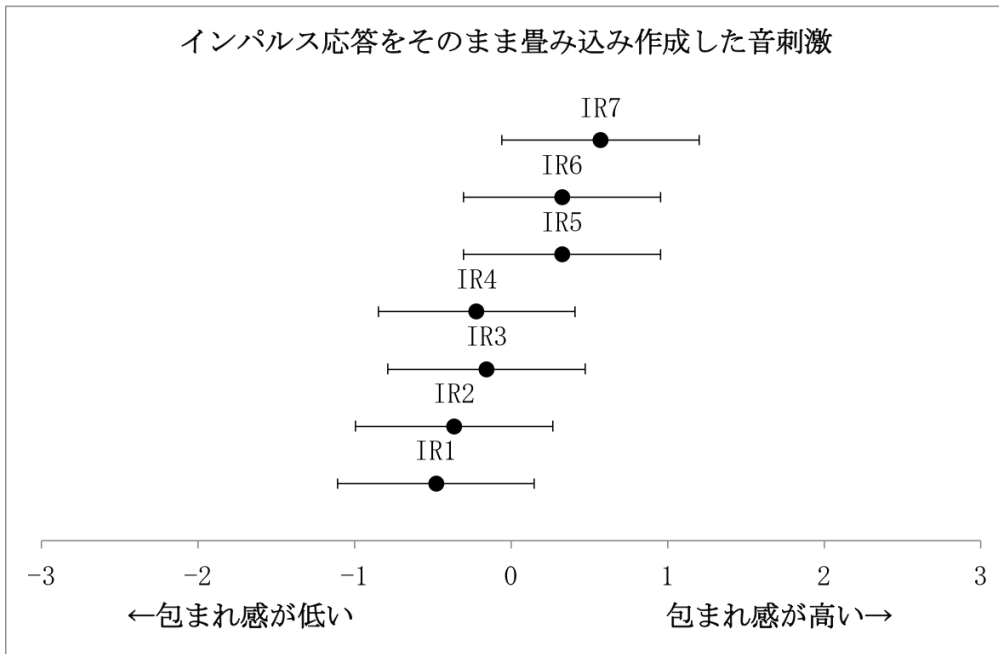


図 29 部屋の響きによる音に包まれた感じ (インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激)

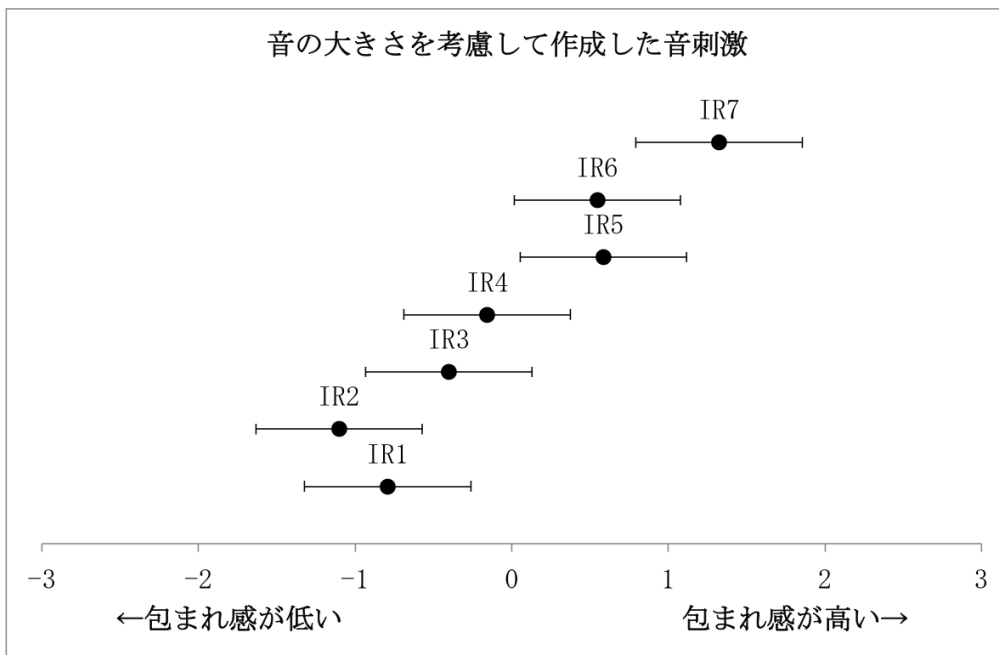


図 30 部屋の響きによる音に包まれた感じ (音の大きさを考慮して作成した音刺激)

4.5. 考察

「楽器による音に包まれた感じ」の実験結果では、インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激の結果と音の大きさを考慮して作成した音刺激の結果の両方において、似た傾向が見られた。IR1 から IR4 まではそれほど包まれ感に大きな変化は見られないが、全体的に奏楽堂で録音したマイクロホンの位置に応じて包まれ感が変化している。一方、「部屋の響きによる音に包まれた感じ」の実験結果については、インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激と音の大きさを考慮して作成した音刺激の間で異なる傾向が見られた。インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激は IR1 から IR7 までの音刺激全体で包まれ間の違いがそれほど見られなかったが、音の大きさを考慮して作成した音刺激では奏楽堂で録音したマイクロホンの位置に応じて包まれ感が変化している。

このように、実験Ⅲにおいて「楽器音による音に包まれた感じ」と「部屋の響きによる音に包まれた感じ」は異なる傾向を示した。このことから、音に包まれた感じは少なくとも「楽器音による音に包まれた感じ」と「部屋の響きによる音に包まれた感じ」がある可能性が示された。この 2 種類の包まれ感についてまずは「楽器音による音に包まれた感じ」から詳しく見ていく。実験Ⅲでは、「楽器音による音に包まれた感じ」の結果は評価語「楽器音の明瞭度」「見かけの音源の幅」の結果に似ていた。これら 3 種類の音の印象は、全く同じ物理的要因を手がかりにして知覚しているとは言い切れないが、いくつかの共通した物理的要因を手がかりにしている可能性がある。そこで、「楽器音の明瞭度」や「見かけの音源の幅」に影響を与えると考えられている物理量求めた。

4.5.1. T_s

明瞭度に関係しているとされる物理量に T_s (時間重心:center time) がある。そこで、実験Ⅲで用いたインパルス応答について T_s を求めた。実験Ⅲにおける T_s 値を図 31 に示す。 T_s 値は IR1~IR7 の順に大きくなっている。この値の順はほぼ実験Ⅲの「楽器音の明瞭度」「楽器音による音に包まれた感じ」の結果に対応している。

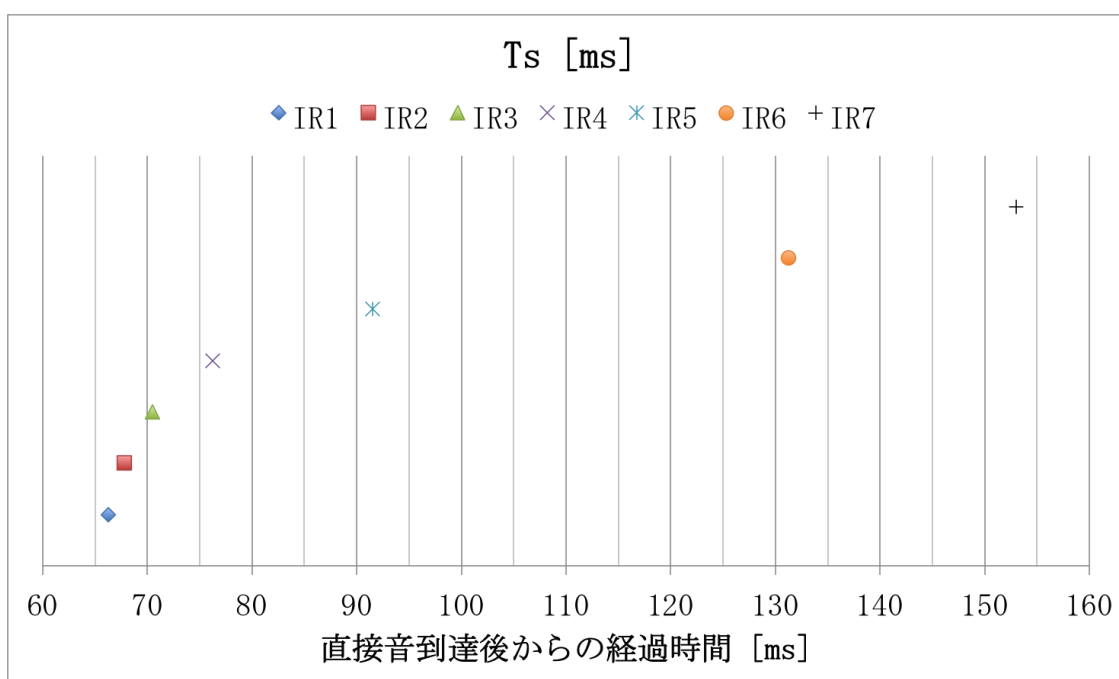


図 31 実験Ⅲにおける T_s 値

4.5.2. LF

次に、「見かけの音源の幅」に影響を与えていると考えられている物理量のひとつである LF (式6) を求めた。実験Ⅲにおける LF 値を図 32 に示す。全初期反射音と初期側方反射音は、実験Ⅲで用いた 5 チャンネル分のインパルス応答から求めた。

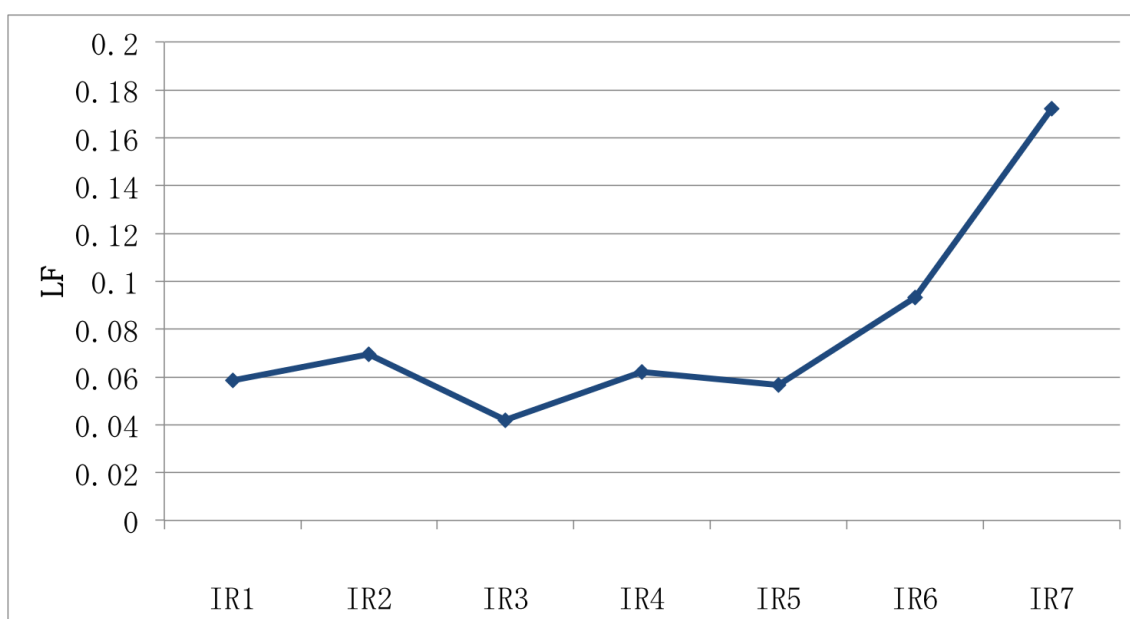


図 32 実験Ⅲにおける LF 値

IR1 から IR5 までは規則的ではないが、IR5 から IR7 にかけては LF 値が徐々に増加している。IR5 から IR7 までの LF 値は、「楽器音の明瞭度」「楽器音による音に包まれた感じ」の結果に対応しているように見える。全初期反射音に対する初期側方反射音の割合が大きくなるに従い、音刺激は不明瞭に感じられ、楽器音による音に包まれた感じは低く感じられている。

4.5.3. IACC

直接音到達後から 80 ms までの範囲で求められる $IACC_E$ (初期の IACC) は ASW に、直接音到達後 80 ms から 1000 ms までの範囲で求められる $IACC_L$ (後期反射音の IACC) は音に包まれた感じに対応するとされている[10] (本研究では $IACC_L$ を 80 ms から 750 ms の範囲で求めた。)。そこで実験Ⅲで用いたインパルス応答についても、 $IACC_E$ と $IACC_L$ を求めた。実験Ⅲにおける $IACC_E$ と $IACC_L$ の値を図 33 に示す。

見かけの音源の幅に関係があるとされている $IACC_E$ を実験Ⅲの結果と比較すると、IR1 から IR5 までの「見かけの音源の幅」と「楽器音による音に包まれた感じ (インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激)」の結果に対応するように見える。 $IACC_E$ の値が低くなると、見かけの音源の幅は狭くなり、音に包まれた感じも低くなる。一般に、両耳間の信号が異なるほど見かけの音源の幅は広くなると言われているが、実験Ⅲで用いた IR1 から IR5 の範囲では両耳間の信号が異なるほど見かけの音源の幅は狭く感じられていた。

「楽器音による音に包まれた感じ」が「楽器音の明瞭度」や「見かけの音源の幅」と共通する物理量を手がかりとしている可能性から、実験Ⅲにおける T_s 、 LF 、 $IACC$ を求めた。これらの物理量と「楽器音による音に包まれた感じ」は関係が有ることが示唆された。

次に、「部屋の響きによる音に包まれた感じ」に影響を与えていると考えられる物理量について見ていく。「部屋の響きによる音に包まれた感じ」はインパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激と音の大きさを考慮して作成した音刺激の間で結果が異なっていた。この 2 つの条件の違いとして音の大きさの他に残響の絶対的なエネルギーの量が考えられる。そこで、「部屋の響きによる音に包まれた感じ」に関して、絶対的な残響のエネルギーの量に着目して物理量を求めた。

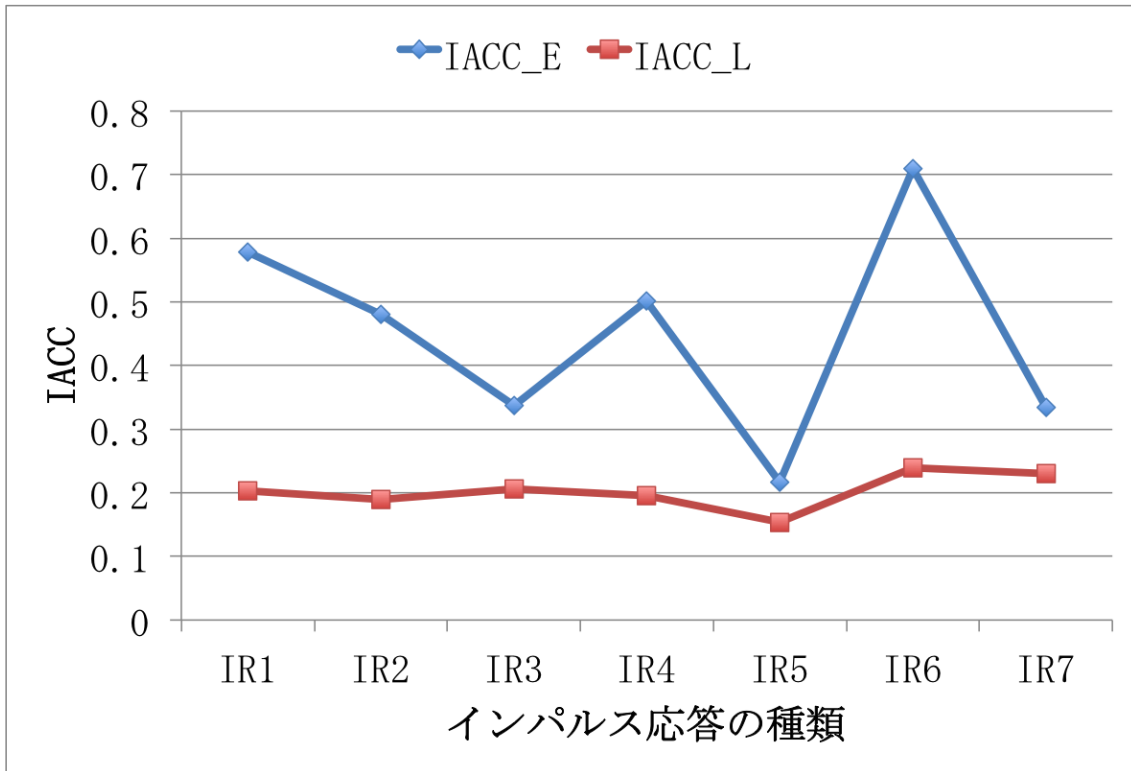


図 33 実験Ⅲにおける IACC 値

縦軸の IACC 値は数値が 1 に近いほど右耳と左耳に届いた信号の相関が高い事を表す。
 IACC_E は直接音到達後から 80 ms までの範囲で求められる $IACC_E$ を表し、IACC_L は
 直接音到達後 80 ms から 750 ms までの範囲で求められる $IACC_L$ を表している。

4.5.4. LFL_E 、 LFL_L

実験Ⅲの結果から、「部屋の響きによる音に包まれた感じ」には絶対的な残響のエネルギーが関係していると考えられる。今回、 $IACC$ や LF は初期と後期のエネルギーの境界を 80 ms としている。そこで 80 ms を初期と後期の境界とし、初期の側方エネルギーの合計と後期の側方エネルギーの合計を求めた。初期の側方エネルギーの合計を LFL_E ($t_1 = 0, t_2 = 80\text{ ms}$)、後期の側方エネルギーの合計を LFL_L ($t_1 = 80\text{ ms}, t_2 = \infty$) と呼び、それぞれの式を、式 (9) ~ (10) に示す。実験Ⅲにおける LFL 値を図 34~35 に示す。

図 34 のインパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激は、IR1 から IR7 の順に応じて全体的に LFL_E 値が減少している。一方、図 35 の音の大きさを考慮して作成された音刺激は、 LFL_E の値は不規則である。

また、図 34 のインパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激は、IR1 ~ IR7 にかけて LFL_L 値にあまり変化はなく、後期側方エネルギーは全ての音刺激において距離が変化してもあまり変わらない事がわかる。一方、図 35 の音の大きさを考慮して作成した音刺激は、IR1 から IR7 の順に応じて後期側方エネルギーが増加している。

$$LFL_E = \int_0^{80\text{ ms}} p^2(t) \cos \theta dt \quad (9.)$$

$$LFL_L = \int_{80\text{ ms}}^{\infty} p^2(t) \cos \theta dt \quad (10.)$$

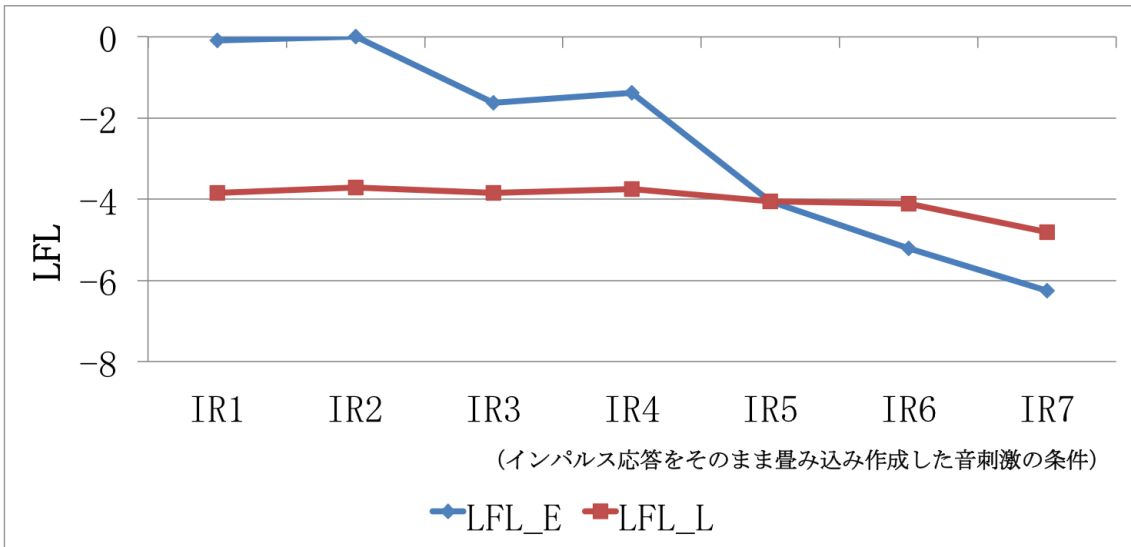


図 34 実験Ⅲにおける LFL(インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激の条件)

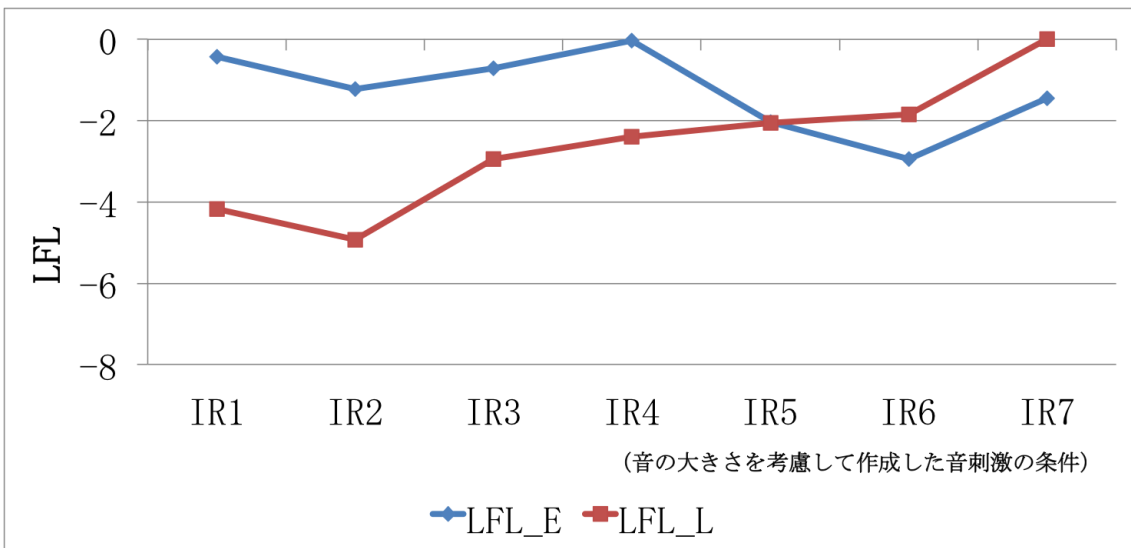


図 35 実験Ⅲにおける LFL (音の大きさを考慮して作成した音刺激の条件)

4.5.5. 実験Ⅲにおける評価語と物理量の相関

これまでに求めた物理量と、実験Ⅲの結果の間にどのような相関があるかを調べるために、物理量と実験結果に関する相関係数を求めた。

図 36～43 に示す様に各実験参加者の評点と各物理量の相関係数を求めた。横軸は実験参加者、縦軸は各実験参加者の評点と各物理量の相関係数である。横軸の最も右は実験参加者全員の平均値と物理量の相関係数である。図 36 の楽器音の明瞭度（インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激）、図 38 の楽器音による音に包まれた感じ（インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激）、図 40 の楽器音の明瞭度（音の大きさを考慮して作成した音刺激）、図 43 の部屋の響きによる音に包まれた感じ（音の大きさを考慮して作成した音刺激）は、実験参加者間で比較的相関係数が似ていたが、図 37 の見かけの音源の幅（インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激）、図 39 の部屋の響きによる音に包まれた感じ（インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激）、図 41 の見かけの音源の幅（音の大きさを考慮して作成した音刺激）、図 42 の楽器音による音に包まれた感じ（音の大きさを考慮して作成した音刺激）は、実験参加者間で相関係数にばらつきがあった（実験参加者によって相関係数が大きく異なった。）。そこで、実験参加者間のばらつきも考慮して、全実験参加者の評点と物理量の相関係数を求めた（表 8）。表 8 にある様に、実験参加者間で相関係数にばらつきがあったものは、相関が低い。

インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激と音の大きさを考慮して作成した音刺激の両方において、実験参加者間で相関係数にばらつきが少なかった「楽器音の明瞭度」（図 36、40）は、表 8 にある様に、インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激と音の大きさを考慮して作成した音刺激の両方において、 C 値、 T_s 、 LFL_L 、 LF に高い相関が見られた。インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激においては、 LFL_E にも高い相関が見られた。

「楽器音による音に包まれた感じ（音の大きさを考慮して作成した音刺激）」は実験参加者間で相関係数にばらつきがあった（図 42）が、「楽器音による音に包まれた感じ（インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激）」は実験参加者間で相関係数にばらつきが少なかった（図 38）。このため表 8 に示すように、「楽器音による音に包まれた感じ（音の大きさを考慮して作成した音刺激）」

では高い相関を示す物理量が無いのに対し、「楽器音による音に包まれた感じ（インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激）」には高い相関を示す物理量がいくつかある。表 8 にある様に、「楽器音による音に包まれた感じ（インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激）」において、C 値は正の相関が高く (0.88)、 T_s は負の相関が高い (-0.89)。LF とも負の相関がある (-0.75) ことが示された。側方エネルギーの合計 (LFL_E、LFL_L) とも相関があり、特に LFL_E に高い正の相関 (0.91) が見られた。

一方、「部屋の響きによる音に包まれた感じ（インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激）」は、実験参加者間で相関係数にばらつきがあった (図 39) が、「部屋の響きによる音に包まれた感じ（音の大きさを考慮して作成した音刺激）」は実験参加者間で相関係数にばらつきが少なかった (図 43)。このため、表 8 に示すように、「部屋の響きによる音に包まれた感じ（インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激）」には高い相関を示す物理量が無いのに対し、「部屋の響きによる音に包まれた感じ（音の大きさを考慮して作成した音刺激）」には高い相関を示す物理量がいくつかある。表 8 にある様に「部屋の響きによる音に包まれた感じ（音の大きさを考慮して作成した音刺激）」において、C 値は負の相関が高く (-0.78)、 T_s は高い正の相関 (0.76) がある事が示された。また、LFL_L に高い正の相関 (0.83) が見られた。

「見かけの音源の幅」は、実験参加者ごとの相関係数 (図 37、41) からわかるように、今回の実験条件では実験参加者間の評点にばらつきが多く、表 8 に示す相関係数においても強い相関関係は見られなかった。

また、今回の音刺激の条件では、IACC については強い相関関係はみられなかった。

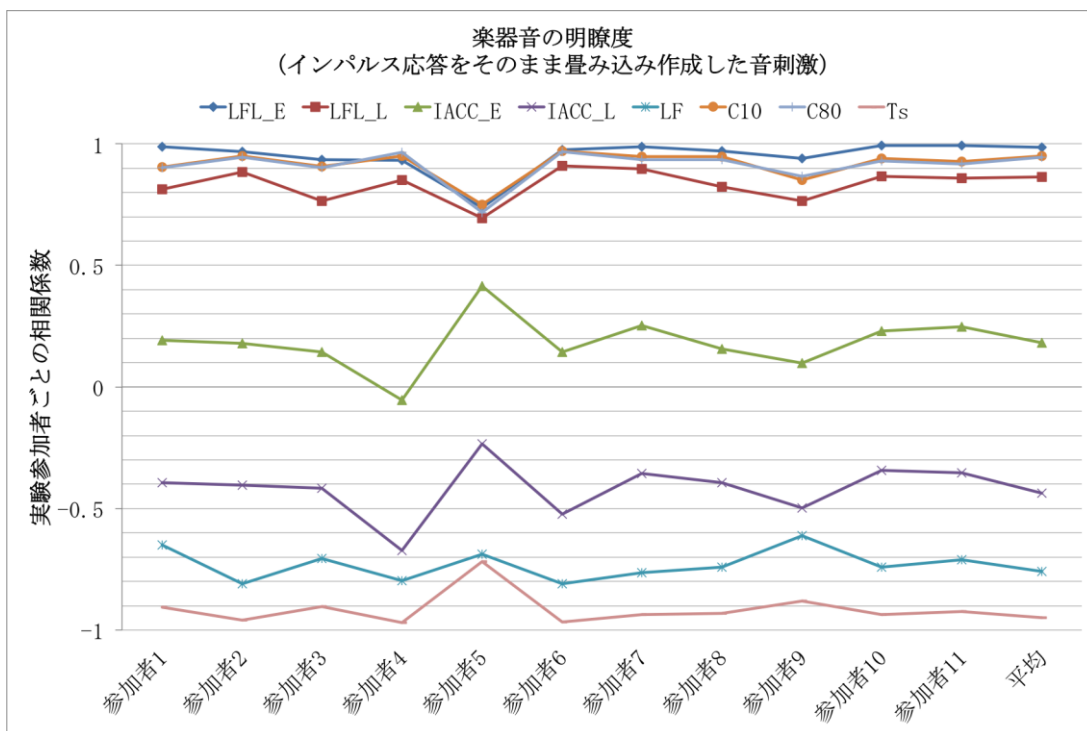


図 36 実験参加者ごとの相関係数 楽器音の明瞭度
(インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激)

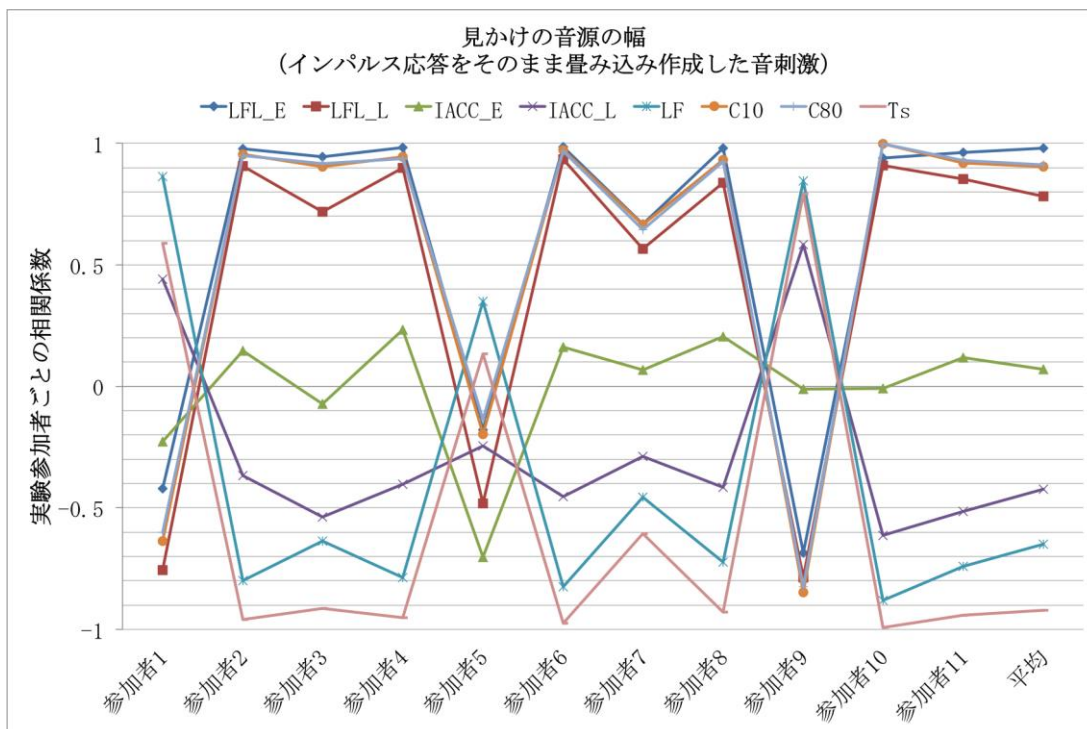


図 37 実験参加者ごとの相関係数 見かけの音源の幅
(インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激)

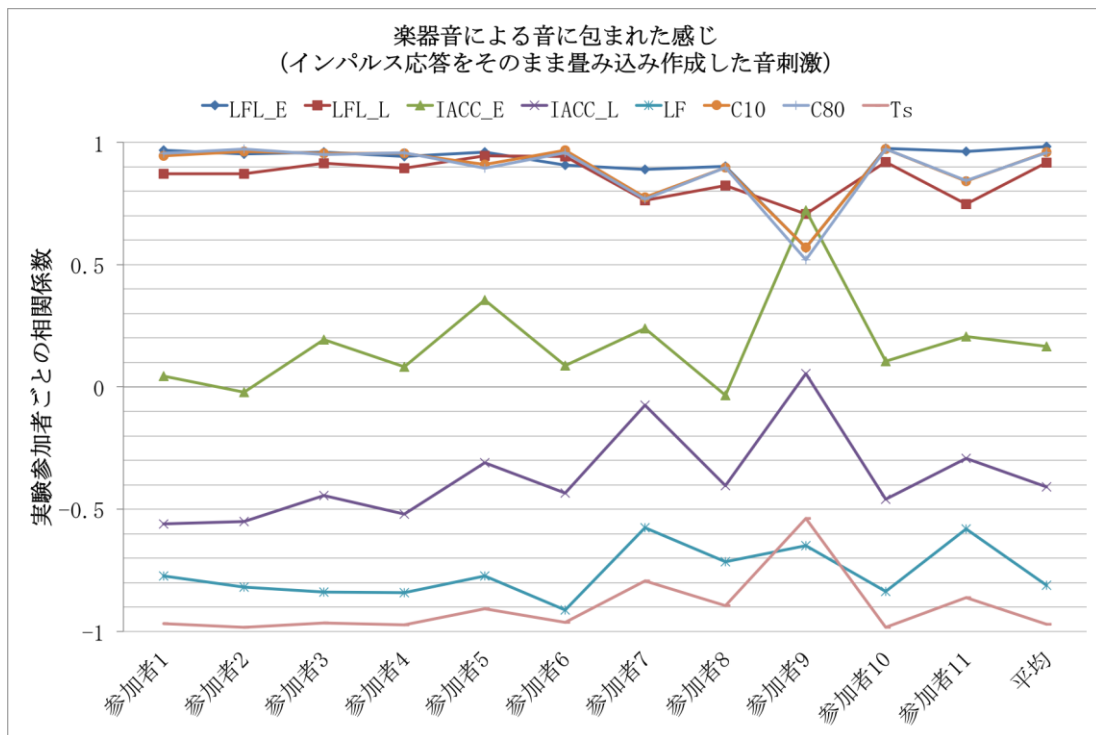


図 38 実験参加者ごとの相関係数 楽器音による音に包まれた感じ
(インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激)

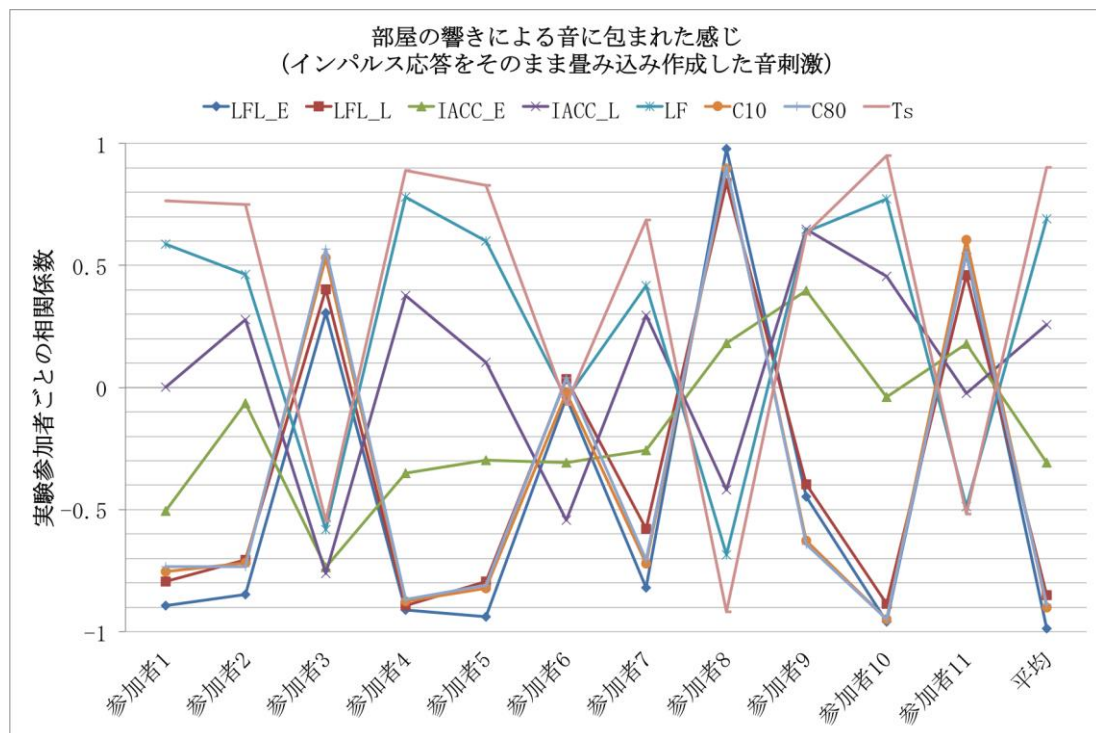


図 39 実験参加者ごとの相関係数 部屋の響きによる音に包まれた感じ
(インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激)

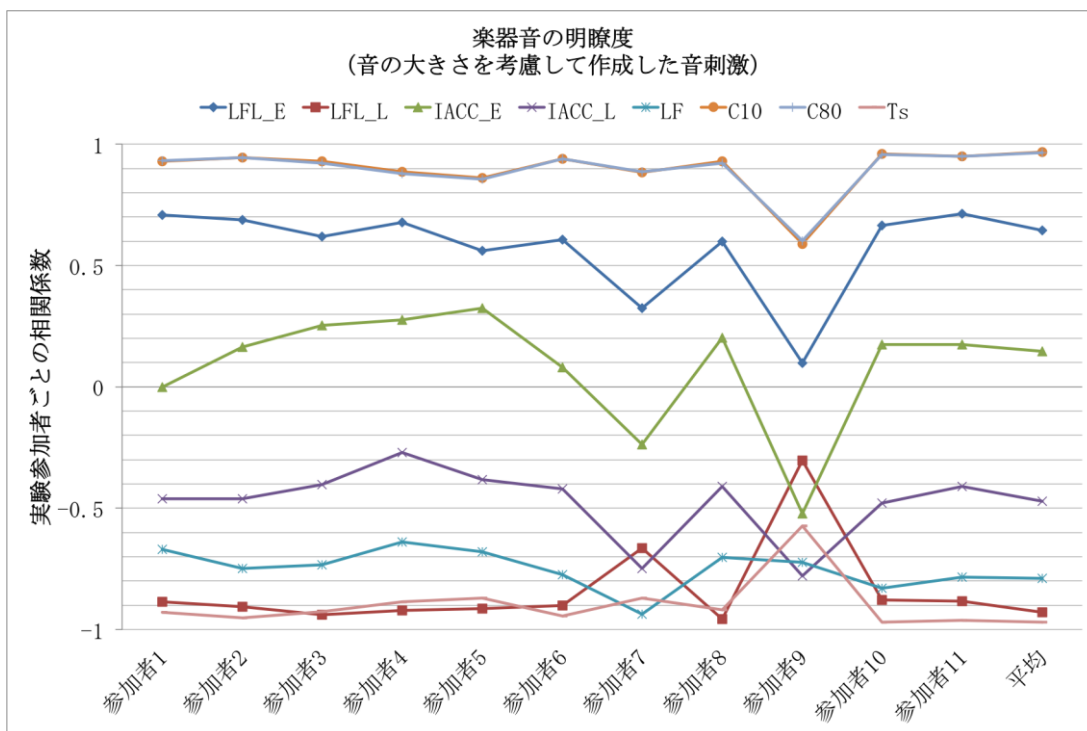


図 40 実験参加者ごとの相関係数 楽器音の明瞭度
(音の大きさを考慮して作成した音刺激)

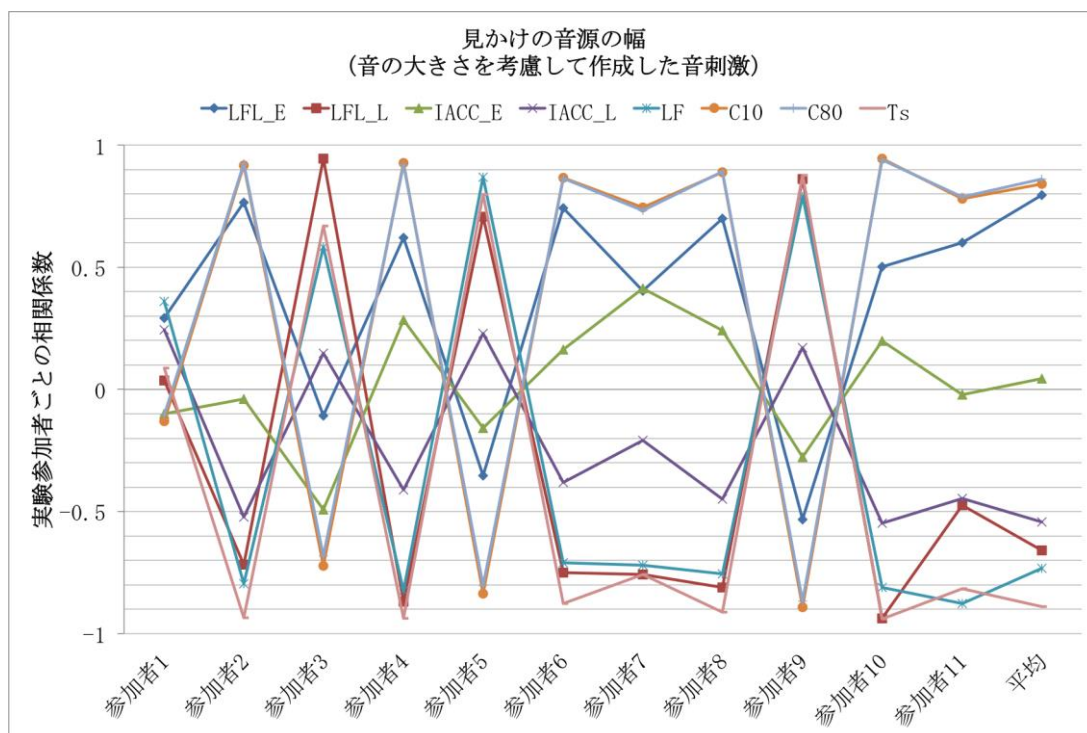


図 41 実験参加者ごとの相関係数 見かけの音源の幅
(音の大きさを考慮して作成した音刺激)

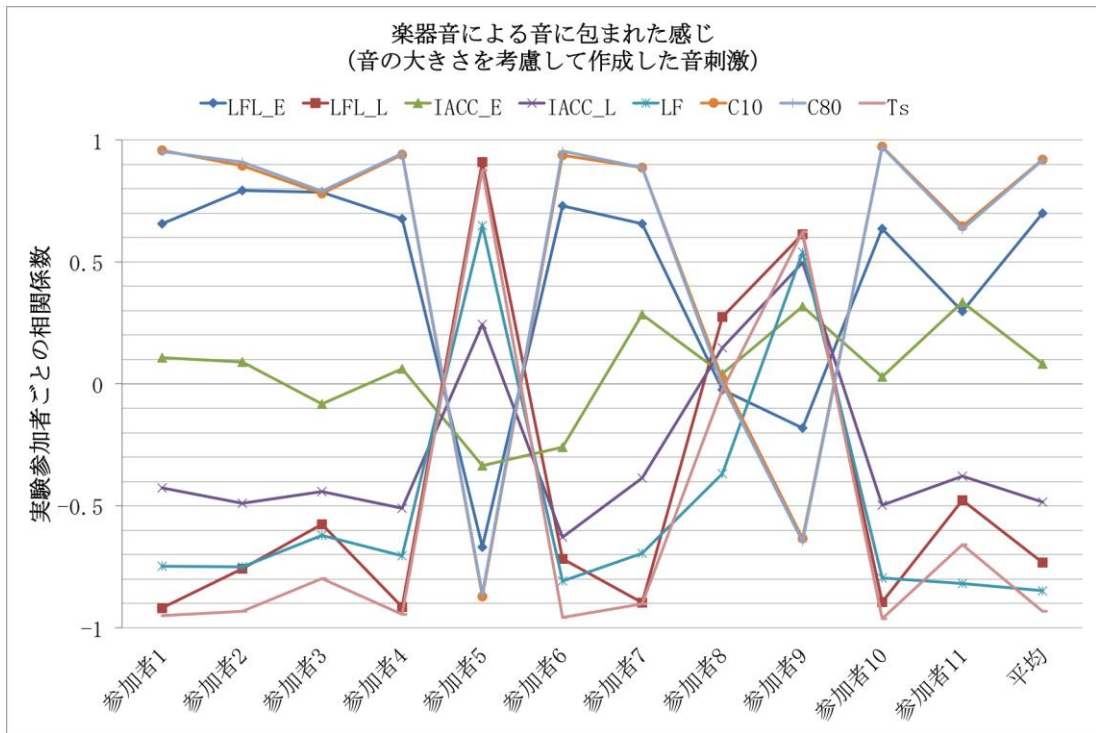


図 42 実験参加者ごとの相関係数 楽器音による音に包まれた感じ
(音の大きさを考慮して作成した音刺激)

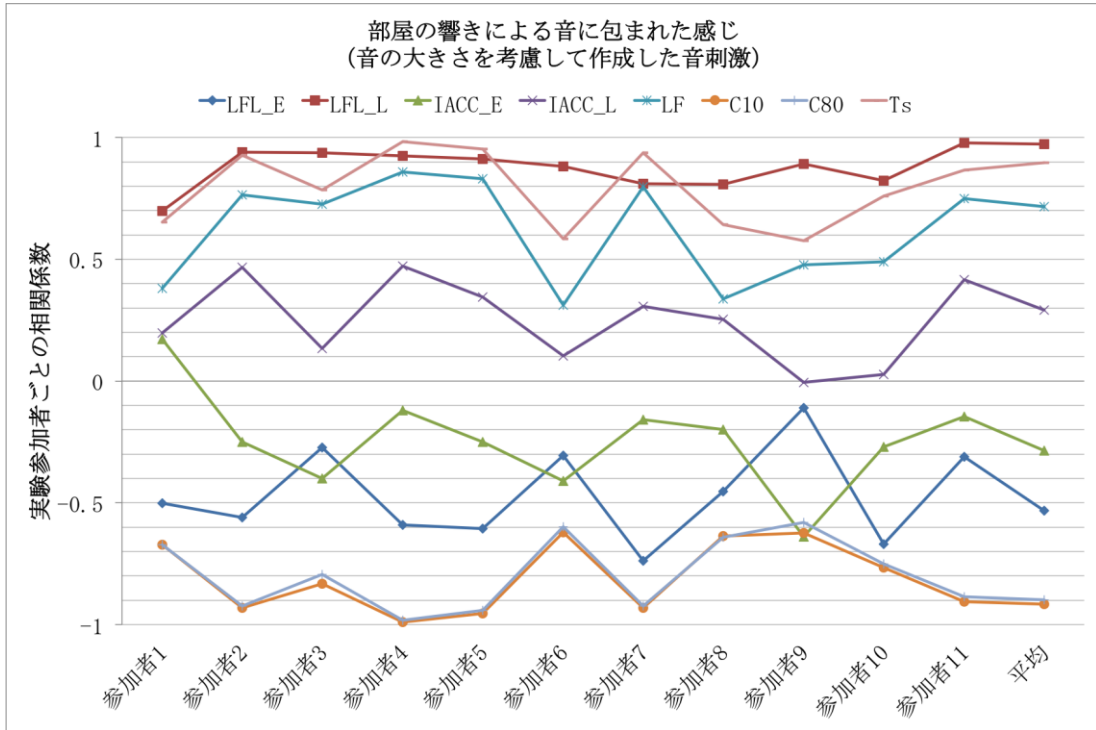


図 43 実験参加者ごとの相関係数 部屋の響きによる音に包まれた感じ
(音の大きさを考慮して作成した音刺激)

表 8 実験Ⅲの結果と物理量の相関係数

インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激の条件								
	LFL_E	LFL_L	$IACC_E$	$IACC_L$	LF	C_{10}	C_{80}	T_s
明瞭度	0.94	0.82	0.17	-0.42	-0.72	0.91	0.90	-0.90
ASW	0.61	0.49	0.04	-0.26	-0.41	0.56	0.57	-0.58
楽器 LEV	0.91	0.84	0.15	-0.38	-0.75	0.88	0.88	-0.89
部屋 LEV	-0.42	-0.36	-0.13	0.11	0.30	-0.39	-0.38	0.39

音の大きさを考慮して作成した音刺激の条件								
	LFL_E	LFL_L	$IACC_E$	$IACC_L$	LF	C_{10}	C_{80}	T_s
明瞭度	0.59	-0.84	0.13	-0.43	-0.72	0.88	0.88	-0.88
ASW	0.35	-0.29	0.02	-0.24	-0.32	0.37	0.38	-0.39
楽器 LEV	0.38	-0.40	0.04	-0.26	-0.46	0.50	0.50	-0.50
部屋 LEV	-0.45	0.83	-0.24	0.25	0.61	-0.78	-0.76	0.76

4.5.6. 楽器音による音に包まれた感じと部屋の響きによる音に包まれた感じ

インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激は、IR1～IR7の順に初期のエネルギーの絶対値が減少し、後期のエネルギーの絶対値はあまり変化しない音刺激である。一方、音の大きさを考慮して作成した音刺激は、IR1～IR7の順に初期と後期のエネルギーの比は変化する（後期に対する初期のエネルギーが減少する）が、初期のエネルギーの絶対値はあまり変化しない音刺激である。「楽器音による音に包まれた感じ」はインパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激では相関が高い物理量があったが、音の大きさを考慮して作成した音刺激では相関が高い物理量は無かった。このことから、「楽器音による音に包まれた感じ」は初期のエネルギーの絶対値の変化と関係がある可能性が考えられる。

実験Ⅲの結果と物理量との相関係数（表8）から、「楽器音による音に包まれた感じ（インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激）」は特にC値、 T_s 、 LFL_E と関係があることが示された。C値や T_s との相関関係からは、初期のエネルギーが後期のエネルギーに比べて大きいほど包まれ感は高くなると考えられる。これらはエネルギーが到達する方向は考慮せず、また相対的な関係である。これに対し、 LFL_E との相関係数が高い（表8）事から、「楽器音による音に包まれた感じ」は初期の側方の絶対的なエネルギーの量が関係していると考えられる。これはエネルギーが受音点へ到達する方向を考慮しており、また絶対的な値に対する関係である。

図34、35からわかるように「インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激は、IR1～IR7の順に初期の側方エネルギーの絶対値は減少するが、後期の側方エネルギーの絶対値はほぼ一定である。一方、音の大きさを考慮して作成した音刺激は、IR1～IR7の順に後期の側方エネルギーの絶対値が増加している。「部屋の響きによる音に包まれた感じ」は音の大きさを考慮して作成した音刺激では相関が高い物理量があったが、インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激では相関が高い物理量は無かった。表8より、「部屋の響きによる音に包まれた感じ」は LFL_L と最も相関が高かった。このことから、「部屋の響きによる音に包まれた感じ」は後期の側方エネルギーの絶対値の変化と関係があ

る可能性が考えられる。

従来の研究では、後期のエネルギーが増加することで音に包まれた感じが高くなるとされている。一方、本研究の実験Ⅱでは、直接音のレベルが小さくなるに連れ、すなわち後期のエネルギーが初期のエネルギーに比べ大きくなるに連れ、音に包まれた感じが減少した。実験Ⅲの結果から従来の研究で扱っていた包まれ感が「部屋の響きによる音に包まれた感じ」であり、実験Ⅱで扱っていた包まれ感が「楽器音による音に包まれた感じ」であったと考えられる。

4.5.7. ASW と楽器音による包まれ感との違い

「楽器音による音に包まれた感じ」には初期の側方の絶対的なエネルギーの量が関係していることから、包まれ感の評価の際に音源の響きを聴いている可能性があり、「見かけの音源の幅」と「楽器音による音に包まれた感じ」は関係していると考えられる。しかし、実験Ⅲを行う前に実験参加者に対し図 44[1]を用いて「見かけの音源の幅」と「音に包まれた感じ」の違いについて説明し、2種類の「音に包まれた感じ」である「楽器音による音に包まれた感じ」と「部屋の響きによる音に包まれた感じ」を評価してもらうことを説明した。その後、実験を行う前にトレーニングを行い「楽器音の明瞭度」「見かけの音源の幅」「楽器音による音に包まれた感じ」「部屋の響きによる音に包まれた感じ」それぞれの違いをつかんでもらった。また、実験結果と物理量の実験参加者ごとの相関係数（インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激）において、「見かけの音源の幅」（図 37）は実験参加者間で相関係数にばらつきが多く「楽器音による音に包まれた感じ」（図 38）はばらつきが殆ど無いという異なる結果を得た。これらのことから、本研究における「見かけの音源の幅」と「楽器音による音に包まれた感じ」の2つの感覚は異なるものである可能性が高いと考えられる。

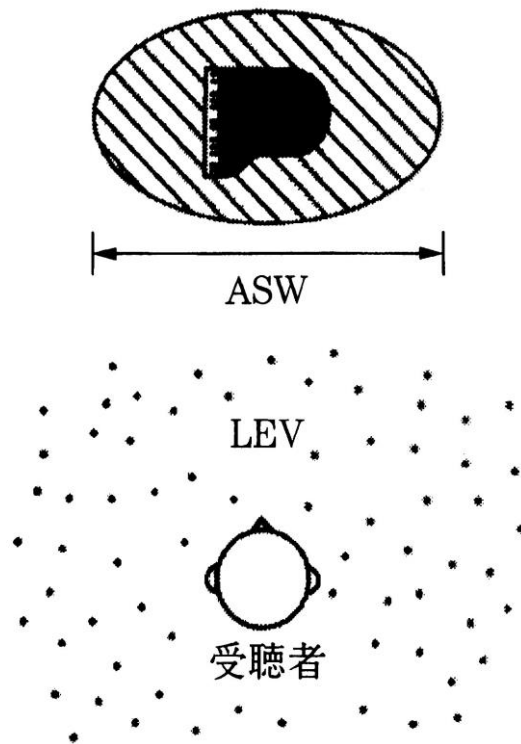


図 44 見かけの音源の幅 (ASW) と音に包まれた感じ (LEV) [1]
実験参加者に対し、実験Ⅲの説明で用いた図。

5. 結論

5.1. 本論文のまとめ

本研究は音に包まれた感じに影響を与えている物理的要因について調査を行った。本研究ではまず、音に包まれた感じに影響を与えている物理的要因として、直接音のレベルと、後期残響音開始時間に着目し、音に包まれた感じを含む音の印象評価（実験Ⅰ、Ⅱ）を行った。その結果、直接音のレベルが大きくなるに応じて音に包まれた感じは増加することが示された。今回の実験条件では、後期残響音開始時間の違いは音に包まれた感じには影響していなかった。

従来の音に包まれた感じに関する研究では、後期の残響のエネルギーが初期の音のエネルギーに比べて大きくなるほど、音に包まれた感じが増すことが示されている。しかし実験Ⅱでは、直接音のレベルが小さくなるに連れて、すなわち後期の残響のエネルギーが初期の音のエネルギーに比べ大きくなるに連れて、音に包まれた感じが減少した。これは従来の研究結果とは異なる。

次に、音に包まれた感じを含む音の印象評価（実験Ⅲ）を行うにあたり、部屋の響きを手がかりに知覚される「音に包まれた感じ」の他に、楽器音を手がかりに知覚する音に包まれた感じがあると考え、包まれ感について「楽器音による音に包まれた感じ」と「部屋の響きによる音に包まれた感じ」という 2 つの評価語を用いた。さらに「楽器音の明瞭度」「見かけの音源の幅」についても評価語に加えた。

また、音に包まれた感じに対する音量による影響を考慮するために、実験Ⅲではインパルス応答をそのまま畳み込み作成した 7 種類の音刺激と音の大きさを考慮して作成した 7 種類の音刺激を用いて実験を行った（インパルス応答をそのまま畳み込み作成した音刺激と音の大きさを考慮して作成した音刺激はそれぞれ別々に実験を行った）。

初期（ $0 \sim 80 \text{ ms}$ ）の側方エネルギーの合計（ LFL_E ）、後期（ $80 \sim \infty \text{ ms}$ ）の側方エネルギーの合計（ LFL_L ）、初期（ $0 \sim 80 \text{ ms}$ ）の IACC、後期（ 80

～ 750 ms) の IACC、初期側方エネルギー率、 C_{10} 、 C_{80} 、時間重心といった物理量と各実験参加者の評点との相関係数から、以下の傾向が示された。

- ① 「楽器音による音に包まれた感じ」は、 LFL_E が大きいほど包まれ感が高くなる事が示された。
- ② 「部屋の響きによる音に包まれた感じ」は LFL_L が大きいほど包まれ感が高くなる事が示された。

この様に、「楽器音による音に包まれた感じ」と「部屋の響きによる音に包まれた感じ」については異なる傾向が示された。従来の研究では、後期のエネルギーが増加することで音に包まれた感じが高くなるとされている。一方、本研究の実験Ⅱでは、直接音のレベルが大きくなるに連れて音に包まれた感じが増加した。このことや実験Ⅲの結果から従来の研究で扱っていた包まれ感が「部屋の響きによる音に包まれた感じ」であり、実験Ⅱで扱った包まれ感が「楽器音による音に包まれた感じ」であったと考えられる。

「楽器音による音に包まれた感じ」には初期の側方の絶対的なエネルギーの量が関係していることから、包まれ感の評価の際に音源の響きを聴いている可能性があり、「見かけの音源の幅」と関係していると考えられる。しかし、「見かけの音源の幅」と相関が高い物理量は見つからなかったことから「楽器音による音に包まれた感じ」とは異なる印象であると考えられる。

本研究では、「見かけの音源の幅」「楽器音による音に包まれた感じ」「部屋の響きによる音に包まれた感じ」の違いを図 45 のように考えた。図中に示される「音源」は知覚された音源の位置を表す。音場 A は音源と受音点が近い場合で、音場 B は音源と受音点が遠い場合である。被験者の周りにあるランダムな点は後期のエネルギーを表し、「部屋の響きによる音に包まれた感じ」に対応している。オレンジ色のグラデーションは初期のエネルギーを表し、「楽器音による音に包まれた感じ」に対応している。受音点において、音場 A と音場 B の後期のエネルギーは同じであるが、A の音場は B の音場より初期のエネルギーが大きい状態である。すなわち、音源が受音点に近い場合「楽器音による音に包まれた感じ」が大きくなり（音場 A）、音源が遠くなると「楽器音による音に包まれた感じ」が小さくなる（音場 B）。音場 A と B では、「部屋の響きによる音に包まれた感じ」は知覚されるが、2つの音場間でそれほど大きな包まれ感の差は感

じられない。

音場 A と B は音の大きさが異なると考えられるため、本研究の「音の大きさを考慮して作成した音刺激」で行ったように、音場 A と B の音量を揃えると、音場 B の後期のエネルギーが増加するため、「部屋の響きによる音に包まれた感じ」は音場 A に比べ音場 B の方が大きくなると考えられる。

図中のグリーンの矢印の幅は「見かけの音源の幅」を表す。見かけの音源の幅は実験参加者の周りではなく、知覚された音源の位置周辺で評価される幅であり、「楽器音による音に包まれた感じ」は実験参加者の周りで知覚される音の響きであるため、「見かけの音源の幅」と「楽器音による音に包まれた感じ」は異なるものと考えられる。

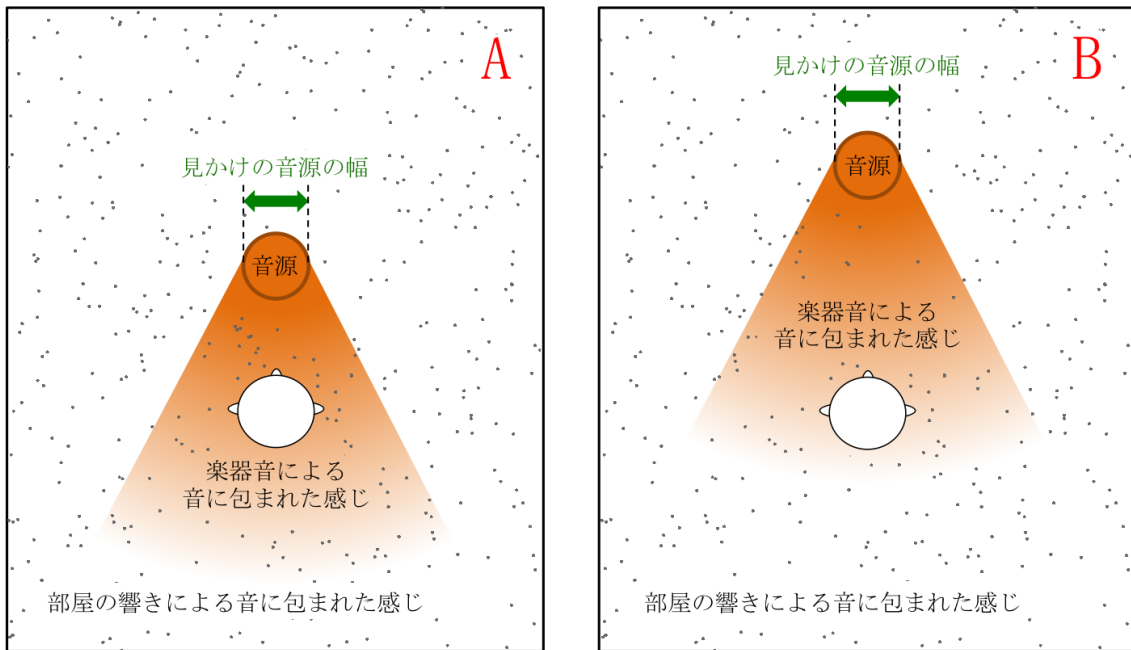


図 45 「見かけの音源の幅」、「楽器音による音に包まれた感じ」と「部屋の響きによる音に包まれた感じ」

図中に示される「音源」は知覚された音源の位置を表す。音場 A は音源と受音点が近い場合で、音場 B は音源と受音点が遠い場合である。被験者の周りにあるランダムな点は後期のエネルギーを表し、「部屋の響きによる音に包まれた感じ」に対応している。オレンジ色のグラデーションは初期のエネルギーを表し、「楽器音による音に包まれた感じ」に対応している。図中のグリーンの矢印の幅は「見かけの音源の幅」を表す。

5.2. 今後の展望

本研究では、音に包まれた感じは少なくとも「楽器音による音に包まれた感じ」と「部屋の響きによる音に包まれた感じ」の2種類がある可能性が示された。「楽器音による音に包まれた感じ」は、 LFL_E （初期の側方エネルギーの合計）が大きいほど包まれ感が高くなり、「部屋の響きによる音に包まれた感じ」は LFL_L （後期の側方エネルギーの合計）が大きいほど包まれ感が高くなる事が示された。また、従来の研究で扱っていた包まれ感が「部屋の響きによる音に包まれた感じ」であり、実験Ⅱで扱った包まれ感が「楽器音による音に包まれた感じ」であったと考えられた。

従来の研究における音に包まれた感じにおいて、側方だけでなく上方や後方から受音点へ到達する音のエネルギーも包まれ感に影響を及ぼす事が明らかにされている[7][9][11]。本研究においては、音に包まれた感じに影響をおよぼす物理的要因として側方のみを考慮しており、他の方向からくるエネルギーの影響は考慮していない。そこで、「楽器音による音に包まれた感じ」に対する側方以外からくるエネルギーの影響を調査が必要であると考えられる。

また、従来の研究において、音に包まれた感じはIACCと関係していることが明らかにされている[8]。しかし、本研究では音に包まれた感じとIACCに高い相関は見られなかった。この要因として、本研究で調査した音に包まれた感じ（「楽器音による音に包まれた感じ」と「部屋の響きによる音に包まれた感じ」両方）の評価において、包まれ感に対する LFL_E や LFL_L といったエネルギーの影響がIACCによる影響より大きかった事が考えられる。このことから、IACCに着目した実験条件で、「楽器音による音に包まれた感じ」がIACCに応じて変化するかどうかを調査する必要がある。

参考文献

- [1] 飯田一博, 森本政之, 『空間音響学』 コロナ社, pp.34-35 (2010)
- [2] 石田舞, 亀川徹, 丸井淳史, “直接音のレベルと残響音開始時間の変化による音の印象評価のための評価語抽出” 音楽音響研究会資料, Vol. 32, No.8, pp.25-28 (2014)
- [3] 上野佳奈子, 『コンサートホールの科学』 コロナ社 (2012)
- [4] 金井哲郎, “奏楽堂の可変天井による残響の変化と録音への影響について” 東京藝術大学大学院音楽研究科修士論文 (2008)
- [5] 佐藤 信, 『統計的官能検査法』 日科技連 (1985)
- [6] 羽入 敏樹, 木村 翔, 千葉 俊, “反射音の空間バランスに着目した音に包まれた感じの定量化方法,” 日本建築学会計画系論文集 第 520 号 pp.9-16 (1999)
- [7] 比嘉 規晶, 和久田 晃子, 古屋 浩, 藤本 一壽, “後期音の到来方向が「音に包まれた感じ」に与える影響(その 2),” 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.47-48 (2000)
- [8] 森本政之, 藤森久嘉, 前川純一, “みかけの音源の幅と音に包まれた感じの差異,” 音響学会誌, 46 卷 6 号 pp.449-457 (1990)
- [9] 森本 政之, “音場の前後エネルギー比が音に包まれた感じに及ぼす影響,” 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.29-32 (1991)
- [10] レオ・L.ベラネク, 日高 孝之, 永田 穂, 『コンサートホールとオペラハウス 音楽と空間の響きと建築』 シュプリングァー・フェアラー東京 (2005)
- [11] 和久田 晃子, 古屋 浩, 穴井 謙, 藤本 一壽, “後期音の方向性が音に包まれた感じに与える影響 その 3,” 日本建築学会九州支部研究報告, 第 42 号 pp.97-100 (2003)
- [12] 和久田 晃子, 中野 雄介, 古屋 浩, 藤本 一壽, “後期音の方向分布が音に包まれた感じに与える影響,” 都市・建築学研究 九州大学大学院人間環境学研究院紀要, 第 5 号, pp.87-92 (2004)
- [13] 『新奏楽堂におけるホール音響特性と聴取の諸問題』 東京藝術大学 (2001)
- [14] David H. Griesinger, “What is "clarity", and how it can be measured?,” *International Congress on Acoustics*, Vol. 19 (2013)

pp.25-28 (2014)

[15] Gilbert A. Souloudre, Michel C. Lavoie, and Scott G. Norcross, “Objective Measures of Listener Envelopment in Multichannel Surround Systems,” *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 51, Issue 9, pp. 826–840 (2003)

[16] John S. Bradley, Gilbert A. Souloudre, “The influence of late arriving energy on spatial impression,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 97, Issue 4, pp. 2263-2271 (1995)

[17] John S. Bradley, Gilbert A. Souloudre, “Objective measures of listener envelopment,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 98, Issue 5, pp. 2590-2597 (1995)

[18] Søren Bech and Nick Zacharov, *Perceptual Audio Evaluation — Theory, Method and Application*, Wiley (2006)

[19] S. S. STEVENS, “THE PSYCHOPHYSICS OF SENSORY FUNCTION,” *American Scientist*, Vol. 48, No. 2, pp. 226-253 (1960)

[20] Audio Research Labs, *Subjective Training and Evaluation Program (STEP)* (2008)

[21] DPA Microphones, *USER'S MANUAL* (2006)

[22] ISO 3382-1:2009, *Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance space* (2009)

[23] *Brüel & Kjær*, “PRODUCT DATA,” accessed December 1, 2015, <http://www.ee.bgu.ac.il/~acl/Equip/OMNI.pdf>.

[24] *GENELEC*, “8260A SAM™ Studio Monitor,” accessed December 1, 2015, <http://www.genelec.com/studio-monitors/sam-studio-monitors/8260a-sam-studio-monitor>.

[25] *SCHOEPS*, “Compact Microphone CCM 8,” accessed December 1, 2015, <http://www.schoeps.de/en/products/ccm8/>.

謝辞

本研究を行うにあたり、多大なる御指導ならびに御鞭撻賜りました東京藝術大学大学院音楽研究科の亀川徹教授に深く感謝いたします。

本研究を行うにあたり、有益な御助言をいただき、御指導いただいた東京藝術大学大学院音楽研究科の丸井淳史准教授に深く感謝いたします。

奏楽堂での録音の際には、奏楽堂の皆様や、中原雅考先生の協力を頂きました。心より感謝いたします。

本研究の遂行にあたり、貴重な時間を割いて本研究の実験に参加していただいた皆様に心より感謝いたします。

本研究を行うにあたり、貴重な御助言を賜りました亀川研究室の皆様と丸井研究室の皆様に厚く御礼申し上げます。