

2022 年度（令和 4 年度）  
学位（課程博士）審査用論文

異なる残響量における  
空間同一性知覚の許容範囲に関する研究

音楽研究科 音楽文化学専攻 音楽音響創造研究領域

伊藤彰教

# 目次

<b>第1章 序論</b> .....	<b>1</b>
1.1 研究背景および着想 .....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 本論文の構成 .....	3
<b>第2章 研究手法の検討</b> .....	<b>4</b>
2.1 空間印象に関連する主要な室内音響指標 .....	4
2.1.1 残響の知覚現象に対応する客観尺度 .....	4
2.1.2 残響の知覚的属性.....	6
2.1.3 本研究の立脚点 .....	9
2.2 異なる DR 比を混在させた際の知覚現象に関する検討.....	10
2.3 本研究におけるロジスティック回帰分析の応用 .....	11
2.4 まとめ .....	17
<b>第3章 実験 I：2チャンネル・ヘッドフォン聴</b> .....	<b>18</b>
3.1 実験刺激.....	18
3.1.1 音楽素材 .....	18
3.1.2 インパルス応答 .....	18
3.1.3 ヘッドフォン呈示用 2チャンネル刺激の作成.....	19
3.2 実験手続き .....	20
3.2.1 実験環境 .....	20
3.2.2 被験者への教示方法 .....	20
3.3 被験者 .....	21
3.4 ヴァイオリン二重奏の実験結果.....	21
3.4.1 ロジスティック回帰分析の基礎統計量.....	22
3.4.2 空間同一性知覚の許容範囲の推定 .....	23
3.5 リコーダーとハーブの二重奏の実験結果 .....	24
3.5.1 ロジスティック回帰分析：基礎統計量.....	24
3.5.2 空間同一性知覚の許容範囲の推定 .....	24
3.6 考察.....	25
3.7 まとめ .....	28
<b>第4章 実験 II：3チャンネルスピーカ聴</b> .....	<b>30</b>
4.1 実験刺激.....	30

4.1.1	音楽素材 .....	30
4.1.2	インパルス応答 .....	30
4.1.3	スピーカ呈示用3チャンネル刺激の作成 .....	30
4.2	実験手続き .....	31
4.2.1	実験環境 .....	31
4.2.2	被験者への教示方法 .....	32
4.3	被験者 .....	32
4.4	室内音響指標測定による2実験環境の比較 .....	32
4.4.1	測定手法 .....	33
4.4.2	$C_{80}$ .....	33
4.4.3	$T_{30}$ .....	35
4.5	ヴァイオリン二重奏の実験結果 .....	39
4.5.1	ロジスティック回帰分析：基礎統計量 .....	39
4.5.2	空間同一性知覚の許容範囲の推定 .....	40
4.6	リコーダーとハーブの二重奏の実験結果 .....	42
4.6.1	ロジスティック回帰分析：基礎統計量 .....	42
4.6.2	空間同一性知覚の許容範囲の推定 .....	42
4.7	まとめ .....	43
<b>第5章 実験 III：オクターブバンドノイズを用いたリズムパターン呈示 .....</b>		<b>45</b>
5.1	実験刺激 .....	45
5.1.1	オクターブバンドノイズによるリズム素材用単音の作成 .....	45
5.1.2	2パートによるリズムパターン .....	46
5.1.3	インパルス応答畳み込みによる DR 比変動刺激作成 .....	47
5.2	実験手続き .....	48
5.3	実験結果 .....	48
5.3.1	実験参加者 .....	48
5.3.2	Wald 統計量・AUC・Nagelkerke $R^2$ .....	48
5.3.3	bootstrap 法を通じたロジスティック回帰式係数算出 .....	51
5.4	考察 .....	53
5.4.1	過検出の可能性の排除を通じた許容範囲 DR 比の算出 .....	53
5.4.2	実験 III における推定許容範囲 DR 比の全体的な傾向 .....	54
5.4.3	正負逆転箇所できている印象評価についての検討 .....	59
<b>第6章 総合考察 .....</b>		<b>63</b>
6.1	全体の結果のまとめ .....	63
6.2	周波数特性からみた実験 I・実験 II の考察 .....	68

6.3 課題と展望.....	69
参考文献.....	71
附録 実験 III ロジスティック回帰曲線一覧.....	75

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景および着想

西欧藝術音楽では歴史的に、音楽の種類や規模に応じて上演する室内環境を選択してきた。オペラハウス、コンサートホールなどでは、既存の一般的な建築物では実現できない、音楽作品の上演に適した音響環境が建築技術によって実現されるようになった。合唱・合奏の規模が大きくなるほど、特定の受音点からの音源の距離や方向はばらつきが増えてしまう。聴衆の数が多ければ多いほど、受音点の位置が増え、聴取者によって音楽の聞こえ方は変わってしまう。これを「1つの音響環境」によって包み込むことにより、作品は音響体としても同一性を確保でき、多くの聴衆が「同じ作品を聴き、同じ体験をする」という欲求に応えてきたのではないかと考えられる。こうした営みは「ひとつの音楽作品は、ひとつの環境の中で奏することにより生み出される」ということを無条件のうちによしとしてきた、西欧の伝統的な音楽音響に対する価値観の顕れとして捉えることもできるであろう。

20世紀以降の録音技術の発展と成熟につれ、合奏・合唱収録では大きく2つの方向性が生まれた。ひとつは生放送やライブ収録を中心に想定した手法であり、少ないマイク数によって直接音・間接音をバランスよく一度に収録する方法である。数々のマイクツリーが開発され、立体音響の隆盛による今日も日々発展を続けている。もうひとつの手法は、楽器からの直接音を中心に収録する近接マイクと、室内環境により生成される間接音を収録するマイクを別々に準備し、事後的にバランスをとって混在させる方法である。良好な間接音を収録できないような収録会場では近接マイクのみで収録を行い、事後的に電氣的あるいはデジタル信号処理にて特定の室内音響環境を想定した残響を付与することも珍しくない。特に後者の手法では複数の演奏者・歌唱者のそばに個別にマイクを置き、残響の質・量ともに個別に付与することが技術的に可能となった。空間的忠実度を無視したような「演出」といえる音響空間表現も、ポピュラー音楽を中心に聞かれるようになって久しい[1]。

「コンサートホールで合奏・合唱を聞くような一体的な響き」「テクノロジーを用い

て複合的な響きを混在させた音響演出」いずれを実現するにしても、音楽演奏による直接音と空間が生成する間接音が渾然一体となってもたらされる「複数の演奏者が同じ空間で演奏している」という感覚について、聴覚的・工学的に熟知する必要があると考えられる。長年の実務経験およびこれを基盤とした教育により、一定以上の感覚を養うことは可能と考えられるものの、一般的な音楽聴取体験の中では、直接音と間接音を完全に分離して聴取・確認することは極めて困難であり、自然と養われる感覚とは言い難い。こうした背景から、多種多様な音楽素材、室内音響環境の組み合わせにより実現される「複数演奏者が同じ空間で演奏している」という感覚は、許容範囲や閾値といった数値的な一般化が難しいとされ「暗黙知による職人芸」のような位置づけであったといえる。しかし近年ではデジタル信号処理の発達により、直接音・間接音の精緻な個別制御が容易になり、音響による空間印象の洗練された測定方法が年を追うごとに新規に提案されている。こうした研究環境を背景として、合奏時に異なる間接音の量が混在する場合、「複数演奏者が同じ空間で演奏している」という知覚に対してどのような影響を与えうるかを数値的に探究したいという着想に至った。

## 1.2 研究目的

音楽演奏の録音には、直接音と間接音のエネルギー比が 1:1 となる臨界距離にあたる位置にマイクをセッティングし、バランスのよい音響を収録することが適切とされる[2]。直接音・間接音のバランスを表す指標として Direct-to-Reverberance energy ratio[3] (以下 DR 比) が広く用いられており、直接音・間接音のエネルギー比を dB で表す。現実的な音響制作環境の場合、特定のパートの直接音をより大きく収録できる近接マイクや、演奏全体の間接音を広く集音するアンビエンスマイクなど、多数のマイクを組み合わせで収録し、録音時および事後的に整音するなどの作業を施しながら、楽曲全体として適切な DR 比を目指すこととなる。こうした多数のマイクによる合奏・合唱の録音・整音の際に、音響制作者は「演奏全体として音がうまくまとまっている」「あるパートが浮いてしまっている」などと評することがある。この経験的事実は、異なる DR 比を素材とした 1 つの音響制作物の空間印象を知覚的に評価する際に、なんらかの許容範囲や閾値のようなものが存在することを意味すると考えられる

が、数値的な詳細は明らかになっていない。そこで本研究では「同じ空間で演奏していると感じられる状態」という感覚を「空間同一性知覚」として定義し、複数の DR 比が混在した音楽刺激と「同一空間／異空間での演奏」という印象の関係につき、実験を通じて数値的に明らかにすることを目的とする。

音響に起因する空間印象の研究では、2章にて後述するように建築音響や室内音響指標の研究が多い。演奏・収録・整音という一連の音楽音響創造工程においても、特定の楽曲の収録に適した室内環境の選択は重要な要素のひとつである。しかし一度環境が確定したあとは、建築に起因する音響要因は、事後的には容易に変化させることができない。リハーサルや演奏当日の状況に応じて対応できる主要な可変要因としては、マイクおよび位置の調整、ミキサーの操作子群による調整などが挙げられる。本研究ではこうした、演奏・収録環境の決定後でも調整可能な主要音響パラメータ、特に直接音・間接音のエネルギー比である DR 比と、必要に応じてイコライザーで操作可能な周波数帯域に焦点をあてて研究を行う。

### 1.3 本論文の構成

2章では、本研究課題に対応する適切な研究手法立案のため、音響による空間知覚の既往研究の調査を通じ、知覚実験手法、統計分析手法について検討を行う。

3章では、2章で立案したロジスティック回帰分析による空間同一性知覚の印象評価実験につき、手法の実用性を予備的に確認するため、2チャンネルの実験刺激による実験およびロジスティック回帰分析の結果について報告する。

4章では、予備実験で実施したヘッドフォン聴を拡張し、3チャンネルの実験刺激によるスピーカ聴実験につき報告する。この実験と分析に際し、交絡作用の影響が検出されたため、要因のひとつとして考えられる実験環境の室内音響の比較測定を通じて、周波数帯域の影響を考慮すべき結果になった経緯についても述べる。

5章では新たな実験刺激として、周波数帯を考慮すべく、オクターブバンドノイズを素材としたリズムパターン呈示による実験の経緯と分析結果について述べる。

最終章の6章では、3つの実験と1つの音響測定の結果を通じて、空間同一性知覚の許容範囲につき総合的な結論を示し、今後の展望について考察を行う。

## 第2章 研究手法の検討

本研究では、合奏内の複数演奏者ごとに異なる DR 比となるような残響量を付与し、個別の残響量を演奏者ごとに個別に変化させることによって起きうる空間同一性知覚の範囲あるいは閾値を探索的に調査する。これを実証的に明らかにするためには、合奏演奏を音楽刺激とし、特定の室内環境から得られる残響量の DR 比の変化を物理量として説明変数、「複数演奏者が同じ空間で演奏しているか否か」という 2 値の感覚的判断を応答変数に設定した実験・分析計画が必要となる。具体的な実験・分析手法の立案に際し、以下 3 点について詳細な検討が必要になると考えられる。

- 既往の空間印象研究に対する空間同一性知覚研究の位置付け
- 合奏中に異なる DR 比を混在させた際の知覚現象およびその実験手法
- 2 値の印象回答と物理量の対応に関する統計手法および許容範囲の推定法

本章では、既往研究の調査を通じて上記 3 点につき検討した経緯につき報告する。

### 2.1 空間印象に関連する主要な室内音響指標

音楽の実演を聴取する際、作曲家の意図の有無に関わらず、物理的音響が空間印象に影響する。受音点である聴取者の位置を固定して考えると、音源の方向・音源との距離など「音源位置に関する要因」と、空間容積・空間形状・吸音率など「受音点をとりまく物理的反射要因」に大別できる。Rumsey[1]によれば、音響に起因する空間印象の研究は、音源までの距離・方向の知覚に関する研究と、反響・遅延・周波数応答等に起因する部屋全体の印象に関連する知覚研究の 2 種類に大別される。本研究は残響量に対応する空間の広さや響き全体の印象を対象とするため、後者の研究として位置づけることができる。

#### 2.1.1 残響の知覚現象に対応する客観尺度

コンサートホール全体の品質評価に関わる指標としての Sabine の基礎研究[4]は、



音圧レベルが初期レベルから 60dB 減少するのに必要な時間である  $RT_{60}$  の重要性を示し、 $RT$  の「最適値」としての地位を確立した。これによりコンサートホールの品質の概略は  $RT_{60}$  で示すことが可能になったものの、より詳細な空間に関する印象属性は、上記の物理指標が複合的・相互に関連していることが徐々に解明された。Lothar Cremer [5] は、残響音場では、反射音の特性（到達距離、密度、大域的な減衰特性）が重要であることを説明した。同様に、多くの研究がこの考え方を支持しており [6-7]、残響の初期段階は音場の空間的特性に関連する [8-9] ことも明らかになっている。

これと並行して、音楽を素材音として反響を付加することで得られるより広範な知覚現象とその物理指標対応は、Barron[8]により 1970 年代には image shift, equal spatial impression, tone coloration, localization effect, echo disturbance 等に関する指標が整備され、特に spatial impression は 10-80msec の反射音で顕著に現れる知覚現象であることが明らかにされた。

この両者の知見を総合しつつ、空間音響研究は残響の知覚メカニズムとそのパラメータを理解することに焦点をあてるようになり [10-12]、残響音場の物理的側面や数学的説明が数多く研究され、インパルス応答の測定とその計算で算出可能な残響時間 ( $RT$ )、初期減衰時間 ( $EDT$ )、音響強度 ( $G$ )、初期エネルギー ( $J_{LF}$ )、後期側方反射音レベル ( $J_j$ )、両耳間相互相関 ( $IACC$ )、明瞭度指数 ( $C_{50/80}$ ) などの一般的な音響測定値が確立した [13-15]。これらの指標を用いた残響の知覚的側面とその特性を評価する主な手法としては、コンサートホールの実地での印象評価 [16-19]、ホール音響の再現を目的とした実験室での実験 [20-26]、残響・空間場の録音・再生技術に注目したもの [27-31] などが開発されている。こうした研究手法が確立されて以降、近年では、ホールの特徴識別の研究 [32] や、ホール内の壁材を変更することで反射特性を変化させた環境での識別実験 [33] などが行われるに至った。

いずれの研究手法にも共通している点は、実験刺激が単独の音素材か合奏かにかかわらず「1つの」音源としてみなされ、それを「1つの環境でのインパルス応答」による物理指標との比較や、畳み込み演算による残響音を生成して実験に利用している点である。

## 2.1.2 残響の知覚的属性

客観指標の詳細化と計算技術の発達により、残響の全体的な経験をより細かい印象属性へと細分化する研究が促進した。Rumsey[1]およびKaplanis[34]の議論をもとに、本研究に関連が強いと考えられる、空間印象の主要な知覚的属性について、既往研究を元に述べる。

### 部屋の広さの感覚(Room Size)

音響から知覚しうる仮想的な部屋の広さの感覚は、空間を特定するための基本的感覚のひとつとして経験的に知られている。ただしその感覚は、物理量で算出されるほど厳密なものではなく、感覚入力期待と一致した際に限定されるという研究[13]もある。部屋の大きさは空間音響における重要な属性として認識される一方で、空間再生の多次元評価における総合的評価から導かれる感覚であるとされる。具体的には部屋の物理的な大きさ[35]、初期反射による音響的支持(ST)[36-37]と残響音場の減衰(RT)が仮想的な部屋の広さ知覚に最も影響を与えるとされる。これらの結果は国際標準規格のひとつである EBU Rec.562-3 にも利用されている[38]。

ただしこの感覚は、物理計算された値のように厳密なものではなく、より細かい知覚属性に分割可能であることが示唆されている。Lokkiら[39]は、Envelopment(残響につつまれている感覚)と Room Size(仮想的な部屋の広さの感覚)は独立して引き出されることを示唆し、音場に包まれる感覚と仮想的な部屋の広さ知覚を明確に分離した。同様に被験者は Room Size(仮想的な部屋の広さ感覚)と Room Width(仮想的な部屋の横幅の知覚)を区別し、個別に判断することができたとする研究[30]もある。加えてこの感覚は、知覚距離視差に相当する[40]ような不連続なものであることも示唆[35]されている。

このため現時点では、物理量変化が残響量の多寡のみで、日常的な感覚における「ある部屋はよく響く／別の部屋は響かない」という仮想的な部屋の広さや響き具合の変化を特定できる要因であると断定することは困難といえる。ただし、音響学者と音楽家の両者が音響空間を記述する際の相互の属性であるという報告もあり[41]、属性の細分化や詳細な物理量対応という実験計画の方向性だけではなく、この感覚を不

連続な感覚として新たに捉え直すような実験立案も有用であると考えられる。

### 広がり感 (Spaciousness)

仮想的な部屋の大きさ知覚とは別の意味で、空間的な広がり感覚もまた広く研究されてきた。特定の残響に含まれている感覚として定義される研究が広く取り組まれてきたが[42-46]、他の感覚語彙としては *Spatial Impression* (空間的印象) [22, 24, 28, 47-49] や *Spatial Responsiveness* (空間的反応性) [7] などとも称され、言語的なあいまいさに起因する感覚的厳密さの欠如のために、単独の指標としては有用性が薄いという立場[1]が現在は主流となっている。広がり感をより詳細に検討した森本・前田の研究[49]を端緒として、AWS (みかけの音像幅) と LEV (包まれ感) の2つに大別[24]され、物理指標との関連をもとに標準化された[15]。

広がり感に対応する物理指標としては反射音の時間、レベル、入射角、スペクトル、および反射音と直接音の合計音圧レベルの影響を受けるとというのが文献上の共通認識である[47, 50]。IACC に基づく物理指標である Binaural Quality Index (BQI) [19]は広がり感と直線的な関係を持つことが明らかにされて[51-52]おり、Okano, Beranek, Hidaka[53]は、特定の周波数帯域が Spaciousness に異なる寄与をすることを明らかにした。

これらを総合すると、広がり感研究でも、多様な物理指標の複合的効果を通じて1つの印象に対する影響を明らかにすることを企図していることが分かる。本研究への応用を考えた場合、インパルス応答から上記に列挙されている物理指標を算出し、ホール1つの特性を明らかにすることは、理論上は可能と考えられる。しかし、この感覚と物理指標の関連については研究者間でも一様の見解が得られておらず、さらに異なる残響量が混在する場合についての有効な手法については詳細に検討されていない。

### Room Presence -Intimacy-

室内音響の知覚属性として、特定の空間に居る感覚として広く用いられているものの、翻訳が難しい感覚の一つにこの Room Presence がある。研究分野では、閉じられた空間の中においてその境界を感じる知覚を表す用語として用いられており[1]、制作分

野では主に録音・放送技師によって、コンサートホール音響の直感的評価に使用される Intimacy(インティマシー)に相当すると考えられている[1, 19, 54]。この上位概念である Presence を「特定の閉じた空間に居る感覚」として位置付け、音源と自分が同一空間に存在する感覚を Room Presence、音源が聴取者の近くにいる感覚を Source Presence として区分する立場をとる研究者[32]もいる。Room Presence に対応する物理指標として有力な候補として研究されているのは、直接音と初期反射音の時間的遅延であり ITDG と呼称されている[19,55]。

「同じ空間に居る」という知覚は、本研究である空間同一性知覚に近い概念であるが同一ではない。空間同一性知覚は、上記概念を応用するとすれば「異なる物理指標が混在した場合の Room Presence の許容範囲の研究」と換言できる。本研究で説明変数として想定している残響量の変動が、複数音源の空間同一性に対応する候補になるかは未知であるが、確立された物理指標の対応が存在しないため、探索的研究として可能性は残されている。さらにこちらも、既往研究では異なる物理指標による閾値や許容範囲の研究はなされておらず、実験を通じて調査する価値はあると考えられる。

### 空間印象属性の詳細化・階層化

部屋の大きさ推定、広がり感、Presence のいずれも、物理指標の対応を考慮すると、その概念や用語は曖昧すぎるということから、印象属性の詳細化と概念の階層性の研究も取り組まれてきた。

Letowski の研究[43]では、中心に空間印象を据え、19 種の評価語彙を放射状に 4 階層に分類された円環状の概念階層構造を図式化し、その図を”MURAL”と命名した。Lindau ら[56]は空間印象の語彙抽出研究をもとに、8 群 47 種を用いた空間音響評価語彙集である Spatial Audio Quality Inventory (SAQI)としてまとめた。後年、SAQI の共同研究者の 1 名である Weinzierl を中心とした別の研究者らは、SAQI を拡張するとともに、実際のホール音響の印象評価に用いて妥当性・信頼性を印象評価を通じて検証し、コンサートホールに寄与度の高い語彙群として 10 群 33 語彙を用いた評価語群である The Room Acoustical Quality Inventory (RAQI)[57]としてまとめた。こうした詳細な概念は、特定の 1 つのホールにて測定される多様な物理指標を、より精緻な

空間印象に関連づける試みとして推進されていると考えられる。

しかし、こうした詳細な指標においても「複数演奏者が同じ空間で演奏しているという感覚」に対応する語彙は見当たらない。複数演奏者で異なる残響量が混在する場合の空間同一性知覚が、これら語彙に対して(1)別次元に位置する、(2)複合的な上位概念、(3)どれかの感覚をさらに詳細化・分割化したもののいずれかかについてはこの時点では特定できない。このため本研究での主たる研究対象を前述(1)として位置付け、新規に実験計画を進める。

### 2.1.3 本研究の立脚点

前項で概観してきたように、コンサートホールにおける印象評価は、所与の建築物の音響特性と、それに起因するさまざまな印象や、空間が織りなす音響の好ましき (preference) の研究が多い。特定印象と、それを想起させる物理指標の関連については、精神物理学 (psychophysics) の手法を基盤として、弁別域の研究や丁度可聴差異 (just noticeable differentiation) の研究が多数実施されており、その成果は、国際規格にも採用されている。建築済みである既存のコンサートホールでは現地 (in-situ) での測定および印象評価で、建築予定のホールではシミュレーションにて行うことができる。これは任意の1つのホールがどのような印象を与えるかについて知見を与えてくれる。別の観点からの研究としては、ホールの特徴の認識に関する研究がある。上記で明らかになった個別ホールの物理指標および印象評価の成果を応用し、ホールの比較を行うものである。

本研究で主として追究したい点は、上記とはいずれも立脚点が異なる。直接音音源である演奏音と反射音を生成する環境を固定し、可変パラメータをマイク位置やミキシングでできることに限定した場合、直接音・間接音の比率や、一部の周波数帯域の調整が主な物理変動要因となる。こうした物理要因がどの程度変動すると、演奏空間そのものが別の空間になったように聞こえてしまうのかについては、既往研究では詳細に検討は行われてこなかった。このため本研究では、既往のコンサートホールの音響特徴の測定分析や、ホールの響きについての言語的な印象評価研究とは異なる、新規の研究手法を立案する。

特に既往研究の多くは、いずれも合奏・合唱曲を単一の音響体とみなし、これを素材音として単一の反射音を付与した研究が大半であり、本研究の対象である単一楽曲内での複数の演奏者に個別の反射要因を加えた際の印象については詳しく調査されている例はほぼ見当たらない。本実験では後者に着目し、パートごとに異なった反射要因が施された音楽素材が同時にアンサンブルとして呈示された場合の空間印象について研究を行う。

## 2.2 異なる DR 比を混在させた際の知覚現象に関する検討

残響音の増減に伴う残響時間 (RT)、初期減衰時間 (EDT)、音響強度 (G)、初期エネルギー ( $J_{LF}$ )、後期側方反射音レベル ( $J_j$ )、両耳間相互相関 (IACC)、明瞭度指数 ( $C_{50/80}$ ) の変化は、複合的に組み合わせられ、前節で述べた、聴取者を取り囲む空間全体を表す多様な印象の要因となりうる。他方、DR 比の変化によって音源までの距離の知覚も変化する [3, 58]。同一の建築物内に複数の演奏者が 1 つの楽曲を演奏している場合、人間の耳であれマイクであれ、1 つの受信点までの距離は演奏家ごとに異なる。これに伴い、DR 比も厳密には各々が異なる値になるはずである。こうした DR 比の変動が距離感・奥行き感知覚に与える影響は音源定位、特に距離感や奥行き感に着目した研究といえる。ただし、直接音の音圧レベル自体が距離感に与える印象を軽減するように計画された実験であっても、距離の知覚に関しては直接音・間接音合計の音圧レベルによる錯覚や個人差の方が大きく、視覚情報と組み合わせたクロスモーダルな現象であるとする立場の研究者もいる [34]。

この知覚現象に対し亀川は、合奏を素材として複数の演奏者に異なる DR 比の残響を付与し、さらに音圧レベルの変動や演奏映像の有無など、多くの説明変数を用いて距離感・奥行き感の研究 [59] を行なった。映像付与という条件はあるものの、距離感・奥行き感に対して、直接音を固定し DR 比のみが変動する音楽刺激が線形に対応することを明らかにし、複数の演奏音に異なる間接音を付与した音響刺激の印象を測定する手法を確立した。映像との印象適合性およびマルチチャンネル再生による影響を主眼とした研究のため、被験者にとって単一空間での演奏という印象を与えることを前提としたパラメータ調整がなされており、DR 比が  $\pm 6\text{dB}$  程度の範囲内で調査され

ている。

本研究では、DR 比の変動が「距離感・奥行き感のみに影響する」「空間同一性知覚のみに影響する」という排他的な考え方は行わない。特定のコンサートホールにおいて、複数の演奏者がステージ上で演奏している場合、「2名の演奏者は距離や奥行きの違いはあるものの、1つの空間で演奏されている」という感覚は経験的にも自然なことであり、距離感や奥行き感に相応の差が出現したとしても、空間同一性知覚の判断自体は可能であると考え。逆の例として、録音時に演奏者によって極端に間接音のバランスを変化させると、距離感はそのほど変化がないにもかかわらず、響きの量・質から総合して同じ空間での演奏という判断がしにくくなることも経験的に知られている。このため DR 比の変動によって音源の距離感・奥行き感に影響する範囲の変動幅と、演奏者を包み込む空間自体が変化する感覚がどこかに存在すると考えられる。この DR 比変動幅を、本研究では「許容範囲」「閾値」と捉えることとする。

また、亀川の研究では、映像が付与されている際の距離感・奥行き感との相関が高く、音響のみの刺激は相対的にばらつきが多いことも述べられている。こうした知覚現象と物理量の関係をさらに詳細に調査するため、本研究では音響のみの刺激を用い、亀川の協力のもとで同様の音楽素材、インパルス応答を用いるとともに、DR 比の変動幅は亀川の研究よりもさらに極端に広げることで、比較をしやすい形での研究を予備的な実験として計画する。探索的に研究を行うため、本研究独自の実験刺激については、研究を進めながら必要に応じて独自に作成を行う。

## 2.3 本研究におけるロジスティック回帰分析の応用

印象評価分析に対する統計手法として、説明変数が連続的物理量、応答変数が5から100段階におよブリッカート尺度で表現されるカテゴリカルデータに対する回帰分析・重回帰分析・多次元尺度構成法などが多く用いられている。本研究では、残響量を数デシベルごとに変動させた説明変数と「同じ空間での演奏」「異なる空間での演奏」という2値の応答変数であり、その対応が直線上に回帰できるとは限らない。単独または複数の要因を説明変数として、ある事象が起きる確率を応答変数として算出する手法である。具体的な応用事例としては「罹患する／しない」「合格する／しな

い」などの2値の発生を応答変数の観測値とし、どちらかが発生する確率を予測する手法として、ロジスティック回帰分析が適していると考えられるため、これを用いる。ただし、本研究の目的である「空間同一性の許容範囲」をDR比に対応させるためには、ロジスティック回帰分析によってロジスティック曲線を得るだけでは、DR比との対応が算出できない。このため本研究では、以下の手法にて推定を進める。

### ロジスティック回帰分析から得られる結果による逆推定

ロジスティック回帰分析は、説明変数が単独の場合、説明変数を  $x$ 、応答変数である発生確率を  $p$  とすると、ロジスティック回帰曲線を導出する一般式は以下のように表される。

$$p = \frac{1}{1 + e^{-(b_0 + b_1 x)}} \dots\dots\dots (式1)$$

$b_0$  はいずれも、説明変数  $x$  の変動によって  $p$  を予測するための係数であり、 $b_1$  は  $x$  に関する係数、 $b_0$  は切片値として、ロジスティック回帰分析により算出される。一般的な発生確率予測では、変動観測値  $x$  から事象発生確率  $p$  を求めることが主たる目的として分析を行う。

これをもとに本研究の研究対象である空間同一性印象への応用を検討する。「同じ空間で演奏されている」という印象が発生する確率を  $p$  とする。説明変数  $x$  であるDR比を±数dBごとに変動する刺激と想定すると、 $x$  はカテゴリカルデータとなり、予測確率  $p$  については不連続な  $x$  の値に対応する確率しか対応できない。このため、連続値として考察するには何らかの補間手段が必要となる。加えて、1つの楽曲に異なる残響量が混在する場合の印象については既往研究が少なく、丁度可聴差異研究のような弁別閾値が求まるか事前に保証できない。許容範囲を明らかにするための空間同一性印象の発生確率については、その数値的な目安は実験結果から探索的に考察せざるを得ない。

こうした問題を解決するためには、観測値のロジスティック回帰分析から得られた発生確率  $p$  の報告だけでは不十分であり、 $p$  を任意の値として固定した場合、数式か



ら  $x$  を連続的な値として算出する必要がある。このため本研究では、ロジスティック回帰式を  $x$  について解く形に変換して利用する。前述の式 1 を  $e$  について整理する。

$$\begin{aligned}
 p &= \frac{1}{1 + e^{-(b_0 + b_1 x)}} \\
 &= \frac{1}{1 + \frac{1}{e^{b_0 + b_1 x}}} \\
 \frac{1}{p} &= 1 + \frac{1}{e^{b_0 + b_1 x}} \\
 \frac{1}{p} - 1 &= \frac{1}{e^{b_0 + b_1 x}} \\
 \frac{1}{\frac{1}{p} - 1} &= e^{b_0 + b_1 x} \\
 \ln \left( \frac{1}{\frac{1}{p} - 1} \right) &= b_0 + b_1 x \\
 -\ln \left( \frac{1}{p} - 1 \right) &= b_0 + b_1 x
 \end{aligned}$$

これを  $x$  について解くと以下の式 n が導出できる。

$$\begin{aligned}
 b_0 + b_1 x &= -\ln \left( \frac{1}{p} - 1 \right) \\
 x &= \frac{-b_0 - \ln \left( \frac{1}{p} - 1 \right)}{b_1} \dots\dots\dots (式 2)
 \end{aligned}$$

田原の研究[60-62]をもとに、2 値による強制選択法における印象転換発生の確率を  $p=0.5$  とすると、式 2 は部分的に以下のように整理できる。

$$-\ln\left(\frac{1}{p}-1\right) = -\ln 1$$

$$= 0$$

ここから  $p=0.5$  の際の式 n は以下のように整理できる。

$$x = -\frac{b_0}{b_1} \dots\dots\dots (式 3)$$

式 3 により、ロジスティック回帰分析によって算出される説明変数の係数  $b_1$  および切片  $b_0$  を用いて、任意の発生確率  $p$  における  $x$  の算出が可能となる。

これらを踏まえ本研究では、印象評価実験によって得られる値によりロジスティック回帰分析を行い、回帰曲線および係数  $b_0$ ,  $b_1$  を算出する。この係数を上記の式 n に代入し、任意の発生確率  $p$  に対応する DR 比である  $x$  を求める。ただし、この算出方法により許容範囲を推定するには、観測値に対するロジスティック回帰曲線の統計的有意性および尤度を確認する必要がある。これらの指標となる値は多数あるため、次項にて検討を行う。また、統計的有意性や尤度が低いデータについても無条件に捨象せず、係数および曲線の形を目視しつつ、空間同一性印象の許容範囲の増大・減少について考察を行うこととする。

### ロジスティック回帰曲線の精度に関する指標

ロジスティック回帰分析では、曲線の係数のみならず、その曲線が想定モデルに対してどの程度当てはまりが良いかについて、さまざまな指標の算出が可能である。

尤度に関する代表的な指標では赤池情報基準量（以下 AIC）、ベイズ情報基準量（以下 BIC）が挙げられる。直線回帰における決定係数  $R^2$  に類似する指標としては、擬似決定係数（psuedo R-squared）では McFadden  $R^2$ , Cox&Snell  $R^2$ , Nagelkerke  $R^2$  などがある。得られた回帰曲線により説明変数による確率推定の説明力に関する指標は ROC 曲線や Area Under Curve（以下 AUC）などがある。回帰曲線の統計的有意性および複数の説明変数による交絡作用の判断等については Wald 統計量による  $p$  および信頼区間による検証が必要となる。これらの多種多様な指標は、実験に用いる説明

変数の数、交絡作用の判断、得られた回帰曲線によるモデル同士の比較検討など様々な用途により使い分けされ、単純な  $p$  値による統計的有意性の判別や、 $R^2$  による回帰直線のあてはまりのよさの判定のような一律な基準を設定しにくい。そこで本研究において妥当と考えられる指標の選定および各指標値の基準設定が必要となる。

ロジスティック回帰分析における AIC および BIC は、データ分析の実践において、複数の未知の説明変数による事象発生確率をモデル化する際の指標として、パラメータ数の多寡によるモデル間比較に活用される。説明変数を原則として DR 比に限定する本研究ではこの指標は参考値として活用するにとどめる。

McFadden  $R^2$ , Cox&Snell  $R^2$ , Nagelkerke  $R^2$  など各種の擬似決定係数については、広く普及しているような使い分けや一律の数値的基準は存在しないものの、以下のような性質が知られている。McFadden  $R^2$  は直線回帰における  $R^2$  と比べると算出される値が著しく小さくなる傾向にあり、解釈が困難となる。これを補正した算出法による値が Cox&Snell  $R^2$  である。ただし Cox&Snell  $R^2$  は計算上、1 を超過する性質があり、これを正規化補正した値が Nagelkerke  $R^2$  によって導出可能である。それぞれが補正を加えられた関係であるため、本研究においては複数の擬似決定係数を比較する必然性は乏しく、解釈が比較的容易で正規化済みである Nagelkerke  $R^2$  を主たる指標として考察を進める。数値としては直線回帰分析を参考として、相関係数 0.7 の二乗である 0.49 程度が極めて良好な値と考えられるものの、現時点では丁度可聴差異のような良好なロジスティック回帰曲線が描けるかは未知であり、0.6 の二乗である 0.36 から 0.49 の間で基準値を決め、他の指標や曲線の目視などを含めて総合的に判断材料のひとつとする。

ROC 曲線および AUC は連動した値であり、AUC はロジスティック回帰曲線によるデータ全体の説明力を、ROC 曲線は事象確率算出における正答率を確認し、考察に利用される。本研究では、DR 比の変動による印象の変化そのものを予断なく観測し、許容範囲をある程度の幅をもって探索的に分析することを目的とし、空間同一性知覚が発生する確率が高いことを無条件に是とすることはしない。ROC 曲線は最終的に目視での判断となる一方で、AUC は 0 から 1 の間で数値的に算出が可能であり、実質的に ROC 曲線の結果も含む。本研究では真陽性率の算出は必須ではなく、回帰曲

線の全体的な説明力を概観するには AUC の値のみでも十分と判断した。AUC の基準値についても説明力の高さについて一律の基準はなく、他の指標値が低い場合でも 0.6 程度が算出されてしまうことも少なくない。このため本研究では、他の指標と比較しつつ 0.7 以上、場合によってはさらに厳しく 0.8 以上の値が良好な説明力として仮定する。

ロジスティック回帰分析では、統計量として広く普及している  $p$  値は、 $\chi^2$  検定の  $p$  と Wald 統計量を用いた  $p$  の 2 種が算出される。Wald 統計量による  $p$  は、説明変数が多変量となる場合の交絡作用の確認で利用されることが多いが、単独の説明変数においても信頼区間を確認することでモデルの有用性の指標となりうる。 $p$  値としては良好であっても、信頼区間が正負をまたいでしまうと事象発生確率の算出で偽陽性、偽陰性になる可能性を否定しきれないため、 $\chi^2$  検定による単独の  $p$  値に比べてより厳密な検証が可能となる。本研究では交絡作用の有無については現時点で想定できないものの、検証精度と応用性の高さから Wald 統計量による  $p$  および信頼区間の確認をもってロジスティック回帰曲線の精度を検証する。

以上を総合して、本研究では以下の指標を総合的に判断し、許容範囲を数値的に算出可能と判断できるロジスティック回帰分析の結果を選出する。

- AUC : 0.7~0.8 以上
- Wald 統計量および  $p$  値 : 95% 信頼区間
- Nagelkerke  $R^2$  : 0.36~0.49 以上

上記の基準を満たしていたとしても、被験者が少ない場合は分析精度が低くなってしまうおそれがある。被験者数が少ないロジスティック回帰分析による係数算出に関しては、bootstrap 法を用いる例がある。本研究でも、被験者数が十分でないとは判断された場合は bootstrap 法を用いてより精度の高い係数算出を行う。

なお、AUC、Wald 統計量、Nagelkerke  $R^2$  の指標が不十分であり、許容範囲と考えられる DR 比が計算によって算出できない観測・分析結果に関しても、得られた曲線を目視によって傾向を判断し、許容範囲の拡大・縮小傾向や、音楽刺激や被験者属性

など他の要因についても考察を行う。必要に応じて交絡作用の確認も行う。

## 2.4 まとめ

実験刺激となる音楽については、ソロ演奏から大規模アンサンブルまで多種多様な規模が考えられるものの、既往研究では規模にかかわらず1つの音源・1つの反射環境として捉える実験が大多数である。1つの楽曲に2つの異なる残響量が混在する音源の呈示による印象評価という研究自体が少なく、その手法が一般的に確立されたとは言いがたい。そこで本研究では、合奏形態として最小である二重奏に限定して実験を進める。

コンサートホールに限らず、室内の反射音による物理的・知覚的影響は多岐にわたる。全ての要因を考慮する実験は包括的な結果が得られる一方で、特定の音響的要因を統制しての結果を得ることが困難になる。本研究ではDR比の変動による影響の調査が主眼であるため、間接音を生成するためのインパルス応答は1つの会場に限定し、その量の変動による実験手法を採用する。特に、亀川による異なるDR比を混在させた実験刺激に対する印象評価手法を参考として、距離感・奥行き感よりさらに大きな空間印象の変化と想定される「同じ空間での演奏」「異なる空間での演奏」の印象につき、DR比を±6dB以上まで変動させる実験を計画する。

統計手法については、本研究で得られる説明変数と応答変数が線形関係であることは事前に保証できない。このため、残響量を数デシベルごとに変動させた説明変数と「同じ空間での演奏」「異なる空間での演奏」という2値の応答変数であることから、ロジスティック回帰分析を採用する。

## 第3章 実験I：2チャンネル・ヘッドフォン聴

既往研究の調査により、同一楽曲の異なるパートに対し、異なるエネルギー比による単一インパルス応答を混在させる形で付与した実験刺激による空間同一性知覚の研究は、多くは重ねられてこないことが明らかとなった。ロジスティック回帰分析によって得られる結果も、丁度可聴差異 (Just-noticeable difference 以下 JND) のように明確な区切りとなる説明変数の対応が得られるかについても保証の限りではない。こうした状況をふまえ、本研究課題の遂行に際して新規に計画した実験刺激・手法・統計手法を検証するため、予備実験としてヘッドフォン聴による実験を実施する。

### 3.1 実験刺激

#### 3.1.1 音楽素材

旋律パートと伴奏パートが別の楽器で演奏されている刺激として、Tarquinio Merula 作曲のリコーダーとハープの二重奏曲 *Folle ben è che si crede* (邦訳《それを信じる愚か者》) より約 110 秒の抜粋を利用した。旋律パートと伴奏パートが同じ楽器で演奏されている刺激として、ヴァイオリン二重奏曲 *Home Sweet Home* (イングランド民謡) を用いた。リコーダーとハープの演奏は東京藝術大学千住キャンパススタジオ B (床面積 = 68m<sup>2</sup> / 高さ = 5m) で収録された。いずれの刺激も同スタジオ内に吸音材を設置し、半無響空間(残響時間 0.13 秒:500Hz)にて収録された。2曲いずれもサンプリング周波数 48kHz・ビット深度 24bit にて収録した。これらのデータを以下「ドライ音源」とする。

#### 3.1.2 インパルス応答

残響付与用インパルス応答データは東京藝術大学奏楽堂にて、サンプリング周波数 48kHz・ビット深度 24bit にて収録されたものを用いた。舞台頭上の右・中央・左に前後 2 列で舞台頭上に吊られた無指向性マイクのうち、客席からみて前方のマイク 3 本で収録されたインパルス応答データを利用した。2章で述べたように、音楽ホール設計の分野では、反射音が多様な空間知覚に影響することが知られており、初期到達時

間は 5-80msec という範囲[15]で、さまざまな印象との関連指標として利用される。本実験は反射音全体の影響を可能な限り広く考慮に入れるため、各種指標の中から最速の到達時間である 5msec を採用し、反射音のみのインパルス応答データを作成した。具体的には、収録インパルス応答データの先頭部を最初の最大音量時点となるようデータ先頭部を削除し、データ先頭部から 5msec までをゼロ埋めすることで、直接音のインパルス応答を含まず、かつ 5msec の初期反射音以降のみのインパルス応答とみなした。

### 3.1.3 ヘッドフォン呈示用 2 チャンネル刺激の作成

ドライ音源と IR データを畳み込むことにより間接音のみの演奏音を作成した上で、DR 比が 0dB となるよう、臨界距離を想定した計算を施した。まず 1 つのドライ音源に対して右・中央・左の IR データを個別に畳み込み、3 種の間接音のみのデータを作成する。次に一般的なサラウンドミックスにおけるダウンミックスの手法[63]を用いて、中央の間接音のみの演奏音を 3dB 下げた上で、左の間接音、右の間接音にそれぞれ加算し、左右 2 チャンネルで呈示する間接音演奏データ作成した。これにより 1 パートにつき「ドライ音源が 1 種、間接音のみの演奏データが左・右の 2 種」が生成される。次に DR 比の調整として直接音・間接音それぞれの二乗平均平方根を算出してその比を係数として求め、間接音側の振幅に係数を乗算することで DR 比=0dB の左右個別の間接音演奏データを作成した。刺激音呈示にはヘッドフォンを想定したため、左右チャンネルに同一のドライ音源を配置した上で左右個別の間接音演奏データを加算することにより、2 チャンネル、サンプリング周波数 48kHz、24bit の刺激データを完成させた。

上記の手順にて、DR 比 0dB として作成した演奏データを基準とし、同データの振幅に計算処理を施し、DR 比を変動させた間接音データ群の作成を行った。DR 比の検知限が 2dB[64]から 5~6dB[3]であることから、DR 比 0dB に調整した間接音から -12dB, -9dB, -6dB, -3dB, +3dB, +6dB, +9dB, +12dB に調整した 8 種の間接音演奏データを追加作成し、上記と同様の手順で直接音・間接音を加算し、サンプリング周波数 48kHz・ビット深度 24bit のファイルとして保存した。本実験はパートごとに付与され

た DR 比 0dB からの間接音の変動に着目しているため、総当たり比較をする必要がないと判断できる。これにより、1 曲あたりの実験刺激数は、パート A を DR 比=0dB の演奏データで固定した上でパート B に 9 種 (-12dB, -9dB, -6dB, -3dB, +3dB,+6dB, +9dB, +12dB, 間接音無し) の間接音を付して制作した実験刺激と、パート AB を逆の組み合わせにて生成した実験刺激 9 種、DR 比=0dB の音源および両パートとも直接音の計 20 種とした。全ての作業は MacOS 版 Matlab R2020(64bit)上にて計算を実施した。

## 3.2 実験手続き

### 3.2.1 実験環境

実験は 2021 年 8 月 1 日から 7 日にかけて、東京工科大学メディア学部の音響制作演習スタジオ「MA-ROOM」内にて行われた。刺激音の再生機器として Sennheiser 社製 HD600 ヘッドフォンを用いた。刺激音再生装置は MacBookPro2014 に RME 社製のオーディオ I/F Babyface を使用した。周囲の騒音の影響を軽減するため、一般的な音楽スタジオのモニタールーム程度の十分に静かな環境にて実施した。

### 3.2.2 被験者への教示方法

実験開始時に質問紙にて以下の説明文を呈示した。

『2 名で演奏されている音楽を聴いていただきます。2 名とも<同じ空間で演奏している>と感じたら「0」を、2 名が<別々の空間で演奏している>と感じたら「1」をご記入ください。1 セッションにつき、音楽は 20 回連続して流れます。いったん記入したものを後から修正しないようにお願いします。』

回答事項である「0」「1」は呈示順序のバイアス低減を目的として、上記とは逆の「<同じ空間で演奏していると感じたら「1」><別々の空間で演奏していると感じたら「0」>」とした質問紙も準備し、両方の質問紙による回答数がおよそ半数程度になるよう調整した。次いで実験者より「クイズのような正解があるものではなく、聴覚



検査のように能力を測定する実験でもありません。感じたままをお書きください。」

「全体で 60 分ほどかかります。気分が悪くなるなどの不調を感じた際にはいつでも実験を中断することができます。」「リラックスした状態で始められそうでしたら声をかけてください。」「同じ空間／別々の空間の意味が分からなければ実験が始まる前に遠慮なく確認してください。」という旨の指示を与えた。なお、実験前での「同じ空間／別々の空間」についての事前質問は無かった。被験者が説明文、口頭指示に納得し、被験者自身がリラックスした状態である自覚があることを確認ののちに実験を開始した。実験は連続した 2 セッションとして実施した。1 セッション目として *Folle ben è che si crede* 20 刺激の印象測定を進め、一度被験者に「このまま続けますか。それとも一度休憩を入れますか。」と口頭で尋ねた上で、被験者の準備が整い次第 2 セッション目として *Home Sweet Home* 20 刺激の印象測定に入った。セッション間で休憩を希望した被験者はいなかった。1 曲あたり 20 刺激は、間接音レベル変動の絶対値 (0,3,6,9,12) と増加・減少が隣接しないよう、順序をランダム化して Audacity 3.0.2 にてプロジェクトファイルとして作成し、Audacity の再生によって呈示した。ダミー刺激として、各セッション冒頭の刺激は「両パートともドライ音源によって構成された刺激」を配置した。ダミー音源であるため、回答データは本研究では直接の分析対象とはしなかった。

### 3.3 被験者

正常な聴力を持つ東京工科大学の学生および研究者 14 名 (age : Mean=22.86, SD =4.17 / gender : F=3, M=11) が被験者として参加した。

### 3.4 ヴァイオリン二重奏の実験結果

本実験で得られるデータは 19 レベルの DR 比の変動による同一空間／異空間を判断した 0,1 の 2 値データであることからロジスティック回帰分析を実施した。ロジスティック回帰分析の計算特性上、線形変化の傾斜は 1 方向であることから応答変数の値が上下する値を 1 つの回帰式で表現できない。本分析では DR 比を減少させていった際の回答と増加させていった際の回答を分け、個別に分析を行った。DR 比を 1 に揃

えた刺激は同じ空間で演奏していると感じる保証はないためアンカー刺激としては明示しなかったが、分析時の判断指標として利便性があると考えられるため間接アンカー法[65]として想定し分析と考察を進めた。数値計算および基礎的な可視化は JASP ver. 0.16 の logistic regression 機能を用いた。以下に分析結果を示す。

### 3.4.1 ロジスティック回帰分析の基礎統計量

ヴァイオリン二重奏による刺激である *Home Sweet Home* に対する回答に対してロジスティック回帰分析を実施した。2章にて計画した手法により、基礎統計量として Wald 検定による  $p$  値、AUC および Nagelkerle  $R^2$  により総合的に統計的有意性を判断する。

旋律パートである 1st ヴァイオリンパートの DR 比を減少させた範囲の基礎統計量は  $p=0.001$ , AUC=0.805, Nagelkerle  $R^2=0.307$  となった。同パートの DR 比を増加させた範囲では  $p=0.005$ , AUC=0.751, Nagelkerle  $R^2=0.160$  が算出された。いずれも回帰曲線に対する尤度を示す Nagelkerle  $R^2$  の値が低いもの、Wald 検定、AUC は良好な値が認められた。伴奏パートである 2nd ヴァイオリンパートの DR 比を減少させた範囲の基礎統計量は  $p=0.001$ , AUC=0.821, Nagelkerle  $R^2=0.402$  となり、同パートの DR 比を増加させた範囲では  $p=0.001$ , AUC=0.812, Nagelkerle  $R^2=0.232$  という結果となった。こちらも Wald 検定、AUC にて良好な値が確認できた。表 1 に基礎統計量一覧を示す。

表 1. *Home Sweet Home* における Wald 検定  $p$  値, AUC および Nagelkerle  $R^2$

DR ratio	1st Vn.(melody)		2nd Vn.(accomp.)	
	minus	plus	minus	plus
Wald test $p$	0.001*	0.005*	0.001*	0.001*
AUC	0.805*	0.751*	0.821*	0.812*
Nagelkerle $R^2$	0.307	0.160	0.402	0.232

### 3.4.2 空間同一性知覚の許容範囲の推定

1st ヴァイオリンパートの DR 比減少・増加、2nd ヴァイオリンパートの DR 比減少・増加のいずれの部分でも、ロジスティック回帰分析の結果として良好な統計値が算出されたことから、算出された係数を用いて、式 3 による許容範囲推定を行う。

係数算出にあたっては bootstrap 法を用いて 5000 回の計算を実施した。この結果、1st ヴァイオリンパートの DR 比減少部では  $b_0=3.817$ ,  $b_1=0.341$  が、DR 比増加部では  $b_0=0.692$ ,  $b_1=-0.039$  が算出された。2nd ヴァイオリンパートの DR 比減少部では  $b_0=2.263$ ,  $b_1=0.350$  が、DR 比増加部では  $b_0=1.140$ ,  $b_1=-0.048$  が算出された。表 2 に係数一覧を示す。

表 2. *Home Sweet Home* におけるロジスティック回帰係数

coefficients	DRr minus		DRr minus	
	$b_0$	$b_1$	$b_0$	$b_1$
1st Vn.	3.817	0.341	0.692	-0.039
2nd Vn.	2.263	0.350	1.140	-0.048

この値を式 3 に代入することで、約半数の被験者が「異なる空間」という印象を感じると推定される DR 比を算出する。この結果、1st ヴァイオリンパートの DR 比減少部では -11.2dB、増加部では 17.7dB が算出された。2nd ヴァイオリンパートの DR 比減少部では -6.5dB、増加部では 23.8dB という結果を得た。表 3 に推定された DR 比 (単位: dB) の一覧を示す。

表 3. *Home Sweet Home* において推定される空間同一性知覚の許容範囲 DR 比(単位:dB)

DR ratio	$p = 0.5$	
	minus	plus
1st Vn.	-11.2	17.7
2nd Vn.	-6.5	23.8

## 3.5 リコーダーとハーブの二重奏の実験結果

### 3.5.1 ロジスティック回帰分析：基礎統計量

リコーダーとハーブによる刺激である *Folle ben è che si crede* に対する回答に対しても同様の分析を実施した。

旋律パートであるリコーダーパートの DR 比を減少させた範囲の基礎統計量は  $p=0.001$ ,  $AUC=0.745$ , Nagelkerle  $R^2=0.231$  となった。同パートの DR 比を増加させた範囲では  $p=0.005$ ,  $AUC=0.798$ , Nagelkerle  $R^2=0.209$  が算出された。いずれも回帰曲線に対する尤度を示す Nagelkerle  $R^2$  の値が低いもの、Wald 検定、AUC は良好な値が認められた。伴奏パートであるハーブパートの DR 比を減少させた範囲の基礎統計量は  $p=0.099$ ,  $AUC=0.659$ , Nagelkerle  $R^2=0.027$  となり、この部分は 3 統計指標とも良好な値は認められなかった。ハーブパートの DR 比を増加させた範囲では  $p=0.013$ ,  $AUC=0.765$ , Nagelkerle  $R^2=0.152$  という結果となった。こちらも Wald 検定、AUC にて良好な値が確認できた。表 4 に基礎統計量一覧を示す。

表 4. *Folle ben è che si crede* における Wald 検定  $p$  値, AUC および Nagelkerle  $R^2$

DR ratio	Recorder(melody)		Harp(accomp.)	
	minus	plus	minus	plus
Wald test $p$	0.001*	0.005*	0.099	0.013*
AUC	0.745*	0.798*	0.659	0.765*
Nagelkerle $R^2$	0.231	0.209	0.027	0.152

### 3.5.2 空間同一性知覚の許容範囲の推定

ハーブパートの DR 比減少部をのぞき、リコーダーパートの DR 比減少・増加部、ハーブパートの DR 比増加部で、ロジスティック回帰分析の結果として良好な統計値が算出されたことから、ハーブパートの DR 比減少部を除いて空間同一性知覚の許容範囲の推定を進める。ロジスティック曲線の形状との対応を確認するため、計算はいずれの箇所でも実施する。

係数算出にあたっては bootstrap 法を用いて 5000 回の計算を実施した。この結果、

リコーダーパートの DR 比減少部では  $b_0=0.743$ ,  $b_1=0.231$  が、DR 比増加部では  $b_0=0.692$ ,  $b_1=-0.055$  が算出された。ハープパートの DR 比増加部では  $b_0=0.204$ ,  $b_1=-0.045$  が算出された。参考値として DR 比減少部を算出したところ  $b_0=0.204$ ,  $b_1=-0.045$  であることが確認された。表 5 に係数一覧を示す。

表 5. *Folle ben è che si crede* におけるロジスティック回帰係数

coefficients	DRr minus		DRr minus	
	$b_0$	$b_1$	$b_0$	$b_1$
Recorder	0.743	0.231	0.692	-0.055
Harp	1.406	0.139	0.204	-0.045

この値を式 3 に代入することで、約半数の被験者が「異なる空間」という印象を感じると推定される DR 比を算出する。この結果、リコーダーパートの DR 比減少部では -3.2dB、増加部では 12.6dB が算出された。ハープパートの DR 比増加部では 4.5dB であった。ハープパートの DR 比減少部は参考値であり、統計的有意性は保証されない。表 6 に推定された DR 比(単位：dB)の一覧を示す。

表 6. *Folle ben è che si crede* おいて推定される空間同一性知覚の許容範囲 DR 比(単位: dB)

DR ratio	$p = 0.5$	
	minus	plus
Recorder	-3.2	12.6
Harp	-10.1	4.5

### 3.6 考察

分析対象 8set のうち 7set で統計的有意性が認められたことを受け、空間同一性の許容範囲と考えられる DR 比変動値の算出を行なった。さらに詳細に確認を行うため、描画されたロジスティック回帰曲線の目視も含めて考察を行う。図 1 に 1st ヴァイオリンパートの DR 比が変動した際のロジスティック回帰曲線を示す。図 2 に 1st ヴァイオリンパートの DR 比が変動した際のロジスティック回帰曲線を示す。

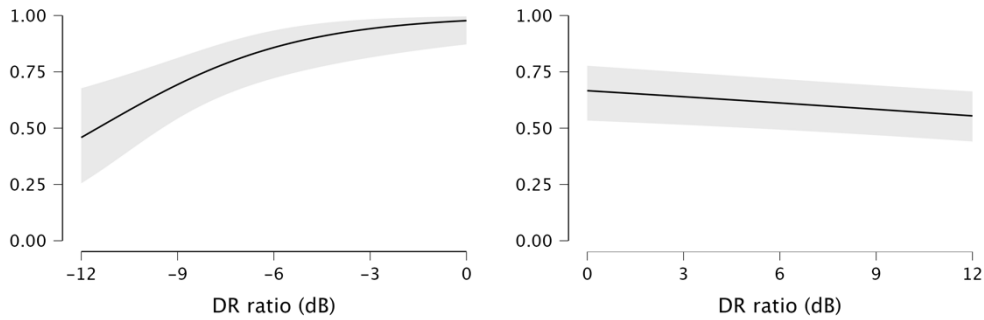


図 1. 1st Vn. (旋律) の回帰曲線：(左図) DR 比率減少部 (右図) DR 比増加部

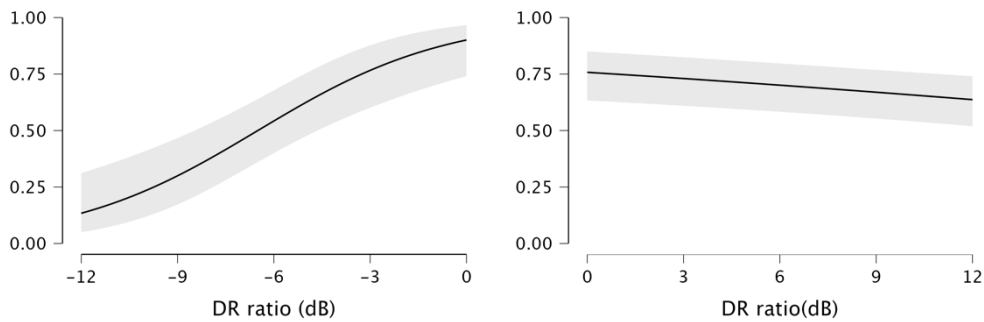


図 2. 2nd Vn. (伴奏) の回帰曲線：(左図) DR 比率減少部 (右図) DR 比増加部

丁度可聴差異を明確にするような急峻な傾斜はみられず、DR 比増加部では 1st ヴァイオリン、2nd ヴァイオリン共にほぼ傾斜がみられない。回帰計算の指標は良好な値を算出しているが、空間印象の同異判定確率が 50% にあたると推定される DR 比の推定値は、1st ヴァイオリンが 17.7dB、2nd ヴァイオリンが 23.8dB と、グラフの範囲である 12dB を超過しているため、こうした描画結果が得られたと考えられる。この結果は全体として、DR 比の変動が距離感・奥行き感に与える影響を  $\pm 6$ dB 程度の範囲で調査した亀川の研究と矛盾することなく、DR 比の変動が「同じ空間／異なる空間による演奏」という印象を与えると同時に、その許容範囲が存在することを示唆すると考えられる。1st ヴァイオリンの DR 比減少パートでは、曲線にはなっているものの -12dB 付近でも縦軸の値は 0.5 近辺であり、こちらも DR 比の変動に対して同一空間での演奏という印象の許容範囲の広さがうかがえる。この結果は、持続系音源の伴奏に支えられた持続系音源による旋律は、聴取者により「多くの余韻が付与されていても同じ空間による演奏」という印象を保持する場合があると解釈できる。ただしこうした傾向の詳細に関しては、被験者個人の音楽聴取経験、特に普段から多く聴取している音楽

の旋律部の間接音の多寡などの影響を調査する必要がある。音響面としては、同一楽器による二重奏だけではなく、トランペットとオルガンによる組み合わせなど、異なる持続系楽器による刺激での実験なども必要と考えられる。

続いて図3にリコーダーパートのDR比が変動した際のロジスティック回帰曲線を、図4にはハーブパートのDR比が変動した際のロジスティック回帰曲線を示す。

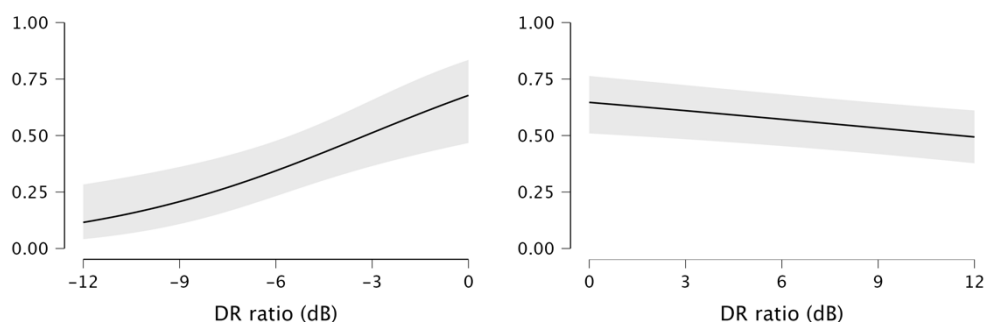


図3. リコーダー（旋律）の回帰曲線：(左図) DR 比率減少部 (右図) DR 比増加部

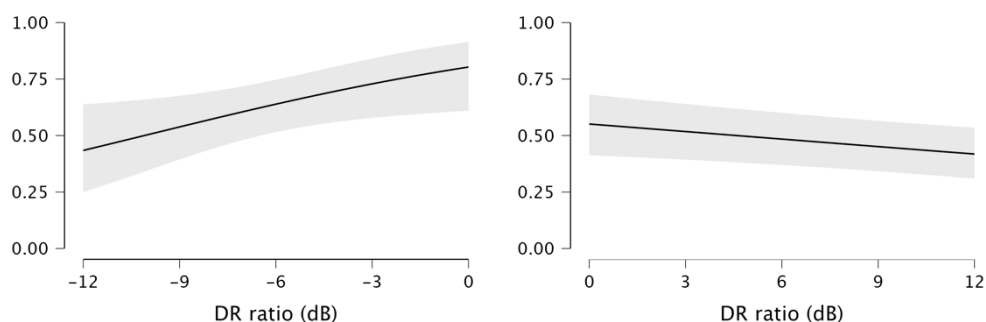


図4. ハープ（伴奏）の回帰曲線：(左図) DR 比率減少部 (右図) DR 比増加部

リコーダーとハーブの二重奏においては、伴奏であるハーブのDR比減少部では他の刺激に比べて空間印象が判別しにくいことがうかがえる。旋律・伴奏というパートの種別ではなく、持続系・減衰系の別によって空間印象判別の精度および傾向に影響をおよぼす可能性が示唆された。ハーブは減衰系の楽器であり、音源自体に知覚可能な減衰時間が存在する。残響付与は減衰時間の付与とも考えられるため、音源の減衰時間とインパルス応答の減衰時間の比較や関係については今後のさらなる調査が必要と考えられる。

### 3.7 まとめ

本実験では予備実験として、同一楽曲の異なるパートに対し、異なるエネルギー比による単一インパルス応答を混在させる形で付与した実験刺激による空間同一性知覚に関してヘッドフォン聴環境において検証を行った。説明変数を DR 比の 3dB ごとの変動、応答変数を「同じ／異なる空間での演奏」の判断とするロジスティック回帰分析の結果、ヘッドフォン聴、2種の二重奏という限られた条件ではあるものの、ロジスティック回帰分析の結果、Wald 統計量による  $p$  値はヴァイオリン二重奏曲では DR 比増加・減少いずれにおいても両パートで 0.05 以下となり、AUC は 0.7 以上となった。リコーダーとハーブの二重奏では、リコーダーパートにおいて DR 比増加・減少いずれにおいても 0.05 以下となり、AUC は 0.7 以上となった。許容範囲として 50% の被験者が空間同一性を知覚する DR 比とすると、ヴァイオリン二重奏曲では、1st Vn. の DR 比減少部では -11.2dB、DR 比増加部では 17.8dB となり、2nd Vn. の DR 減少部では -6.5dB、DR 比増加部では 23.8dB となった。リコーダーとハーブの二重奏曲では、リコーダーの DR 減少部で -3.1dB、DR 増加部で 23.8dB となった。

本実験を通じて、実験手法の有用性に関しては一定の成果を得たものの課題も多く残る。呈示機器としてヘッドフォンを使用したため、ヘッドフォン聴特有の知覚現象である可能性は否定できず、一般的な聴覚現象が確認できたとは言い難い。本研究は定位の影響を極力排除するように計画したが、ヘッドフォンでは頭内定位の影響も想定される。このためスピーカ聴の実験が必要である。

さらにヘッドフォン聴であることから、呈示音源は左右 2 チャンネルとして作成した。直接音は仮想点音源となり、前方 3 チャンネルのインパルス応答は 2 チャンネルへとミックスダウンされて直接音と混合される。実験結果はこうした 2 チャンネル音源再生時下における限定的な知覚現象である可能性も懸念される。このためスピーカ聴実験での呈示方法としては、被験者の前方に 3 チャンネルを準備し、直接音を中央スピーカから、インパルス応答はミックスダウンせずにそのまま左・中央・右として布置させることが望ましい。

このような実験環境および実験刺激を想定した場合、呈示環境自体の反射音の考慮



も必要になる。厳密な知覚実験に適した環境であるか否かで発生した知覚許容範囲の差異を精査すれば、本実験の堅牢性や一般化可能性、室内音響指標の差異がもたらす詳細な音響要因について検証ができる。さらに3チャンネル呈示という特殊な環境を考慮すると、3チャンネル呈示音への慣れや、反射音への感受性の違いといった被験者属性の差異に関しても検討が必要である。

こうした検討をふまえ、次章では3チャンネルスピーカ聴環境における実験について報告する。

## 第4章 実験II：3チャンネルスピーカ聴

前章で報告したヘッドフォン聴の結果をふまえ、3チャンネルスピーカ聴による実験について報告する。実験刺激の作成手法を新たに検討するとともに、二つの会場にて実験を実施し、各会場での室内音響指標の測定を通じて、音響特徴と印象評価の比較や被験者属性との関連についても検討を行う。

### 4.1 実験刺激

#### 4.1.1 音楽素材

旋律パートと伴奏パートが同じ楽器で演奏されている刺激として、ヴァイオリン二重奏曲 *Home Sweet Home* (イングランド民謡) を、旋律パートと伴奏パートが別の楽器で演奏されている刺激として、Tarquinio Merula 作曲のリコーダーとハーブの二重奏曲 *Folle ben è che si crede* より約110秒の抜粋を利用した。いずれの刺激も東京藝術大学千住キャンパススタジオBで収録した。同スタジオ内に吸音材を設置し、半無響空間(残響時間 0.13 秒:500Hz)にてサンプリング周波数 48kHz・ビット深度 24 bit にて収録した。これらのデータを以下「ドライ音源」とする。

#### 4.1.2 インパルス応答

残響付与用インパルス応答データは東京藝術大学奏楽堂にて、サンプリング周波数 48kHz・ビット深度 24bit にて収録されたものを用いた。舞台頭上の右・中央・左に前後2列で舞台頭上に吊られた無指向性マイクのうち、客席からみて前方のマイク3本で収録されたインパルス応答データを利用した。音楽ホール設計の分野では、ISO338 2-1 にて 5-80msec という範囲初期反射到達時間が考慮されている。本実験は可能な限り多くの反射音の影響を考慮するため、規格内における最速到達時間である 5msec を採用し、間接音のみを生成する IR データを作成した。

#### 4.1.3 スピーカ呈示用3チャンネル刺激の作成

ドライ音源と IR データを畳み込むことにより間接音のみの演奏音を作成した上で、DR 比が 0dB となるよう、臨界距離を想定した計算を施した。まず1つのドライ音源

に対して右・中央・左の IR データを個別に畳み込み、3 種の間接音のみのデータを作成する。次に DR 比の調整として直接音・間接音それぞれの二乗平均平方根を算出してその比を係数として求め、間接音側の振幅に係数を乗算することで DR 比=0dB となるフロント 3ch 用の間接音演奏データを作成した。直接音は中央スピーカに固定し、L,C,R 個別に作成した間接音データを加算することにより、3 チャンネルの刺激データをサンプリング周波数 48kHz, 24bit で作成した。

上記の手順にて DR 比 0dB として作成した演奏データを基準として、同データの間接音の振幅に計算処理を施し、DR 比を変動させた間接音データ群の作成を行った。DR 比の検知限が 2dB[4]から 5~6dB[5]であることから、DR 比 0dB に調整した間接音から -12dB, -9dB, -6dB, -3dB, +3dB,+6dB, +9dB, +12dB に調整した 8 種の間接音演奏データを追加作成し、上記と同様の手順で直接音・間接音を加算した。本実験は演奏パートごとに付与された DR 比 0dB からの間接音の変動に着目しているため、総当たり比較をする必要がないと判断できる。これにより 1 曲あたりの実験刺激数は、パート A を DR 比=0dB の演奏データで固定した上でパート B に 9 種 (-12dB, -9dB, -6dB, -3dB, +3dB,+6dB, +9dB, +12dB, 間接音無し) の間接音を付して制作した実験刺激と、パート AB を逆の組み合わせにて生成した実験刺激 9 種、DR 比=0dB の音源の計 19 種とした。全てのデータ Matlab R2020(64bit)により作成した。

## 4.2 実験手続き

### 4.2.1 実験環境

実験は 2 会場で実施した。会場 1 は東京藝術大学千住キャンパス内音響制作スタジオである。モニタスピーカは Genelec 社製 8050B を用い、ProTools HDX システムにより実験刺激を再生した。会場 2 は東京工科大学八王子キャンパスの MA-ROOM である。モニタスピーカは YAMAHA 社製 HS80M を利用し、RME Fireface UFX システムにより実験刺激を再生した。両会場共にモニタスピーカは ITU-R BS.775-1 規格に準拠して配置した上で、フロント 3ch のみから再生した。再生には ProTools2021.6 を使用した。

#### 4.2.2 被験者への教示方法

実験開始時に質問紙にて以下の説明文を呈示した。

『2名で演奏されている音楽を聴いていただきます。2名とも<同じ空間で演奏している>と感じたら「同じ」に、2名が<別々の空間で演奏している>と感じたら「異なる」に○をつけてください。いったん記入したものを後から修正しないようにお願いします。』

回答事項である「同じ」「異なる」は呈示順序のバイアス低減を目的として、表記として「同じ／異なる」「異なる／同じ」という2種の質問紙を準備し、回答数がおよそ半数程度になるよう調整した。

実験は連続した2セッションとして実施した。1セッション目として *Folle ben è che si crede* 19 刺激の印象測定を進め、一度被験者に「このまま続けますか。それとも一度休憩を入れますか。」と口頭で尋ねた上で、被験者の準備が整い次第2セッション目として *Home Sweet Home* 19 刺激の印象測定に入った。セッション間で休憩を希望した被験者はいなかった。1曲あたり19刺激は、間接音レベル変動の絶対値(0,3,6,9,12)と増加・減少が隣接しないよう、順序をランダムイズした。

#### 4.3 被験者

2会場合計として30名 (age: Mean=21.87, SD=2.05) の被験者が参加した。会場1では東京藝術大学音楽学部音楽環境創造学科の学生10名 (age: Mean=22.50, SD=3.31) が参加した。会場2では東京工科大学メディア学部の学生20名 (age: Mean=21.55, SD=0.94) が参加した。

#### 4.4 室内音響指標測定による2実験環境の比較

実験会場による交絡作用をWald検定により確認した。ヴァイオリン二重奏では、1stヴァイオリンのDR比増加部(Wald統計量=7.361,  $p=0.007$ )および減少部(Wald統計量=6.512,  $p=0.011$ )双方に交絡作用が認められ、旋律パートの空間印象に会場に起

因する影響がみとめられた。リコーダーとハーブの二重奏では、リコーダーパートの DR 比減少部. (Wald 統計量=4.894,  $p=0.027$ )およびハーブパートの DR 比増加部 (Wald 統計量=5.526,  $p=0.022$ )に認められた。いずれも東京藝術大学の会場の方が、より厳密に印象の同異判断が下される傾向がみられた。この要因が被験者属性に起因するものか、実験環境の物理的な音響特性に起因するものかを推定するため、両実験環境の主要な室内音響指標として、 $C_{80}$ ,  $T_{30}$  の測定を実施した。

#### 4.4.1 測定手法

室内音響指標に用いるインパルス応答の収録は swept-sine を用いた手法[66]を採用して実施した。SN 比の問題を避けるため、複数回の swept-sine 信号を 5 回反復して再生し、2 回目から 4 回目の信号を平均する手法[67-69]を用いた。専用の測定器を保有しておらず、Matlab R2022a を用いて算術的に音響指標を求める都合から、オクターブバンドフィルタの設計および直接音の分離手法については日本建築学会室内音響小委員会が公開する情報[70-71]を参考として実装を進めた。

#### 4.4.2 $C_{80}$

$C_{80}$  は初期反射と後期反射のエネルギー比率を dB で表し、音楽ではこの値によって明瞭性を示す指標として広く活用されている。算出方法は ISO3382-1[15]では以下の式 4 として示されている。

$$C_{t_e} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{t_e} p^2(t) dt}{\int_{t_e}^{\infty} p^2(t) dt} \text{ dB} \dots\dots\dots \text{(式 4)}$$

80 は初期反射と後期反射の区切りの時間として広く用いられており、80msec.を意味する。上記に示した式 4 に代入すると以下ようになる。

$$C_{80} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \text{dB} \quad \dots\dots\dots \text{(式 5)}$$

この計算式により、二つの実験会場で得られたインパルス応答から  $C_{80}$  を算出したところ表 7 の値が得られた。東京藝術大学の会場では帯域ごとに大きな変化がなく平準な結果が得られたが、東京工科大学会場では帯域ごとに大きな違いがみられた。

表 7. 東京藝術大会場・東京工科大学会場の  $C_{80}$  比較 (単位: dB)

	125	250	500	1k	2k	4k	8k
東京藝術大学音響制作スタジオ	27.009	25.49	28.522	28.946	29.36	28.273	31.044
東京工科大学 MA-ROOM	13.572	13.556	25.975	36.342	38.984	43.586	47.975

上記の数値をグラフ化したものを以下の図 5 に示す。

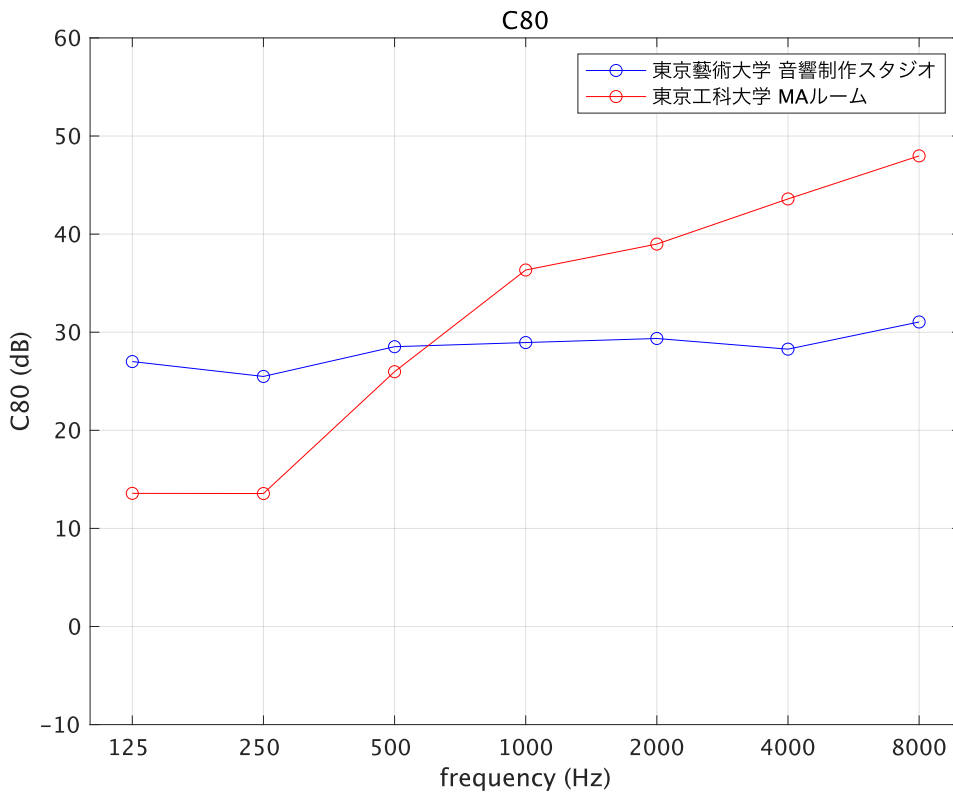


図 5. 2つの実験環境における  $C_{80}$  の比較

ISO3382-1 では、500Hz と 1kHz 帯域の値を算術平均し代表値として用いると規定されており、JND は 1dB である。500Hz, 1kHz 帯いずれも 1dB 以上乖離しており、両会場には明瞭性に違いがあるといえる。他の帯域については明確な JND は規定されていないものの、低域、高域いずれも差が拡大することが確認でき、空間印象の違いに影響を与えることが想定できる。

#### 4.4.3 T<sub>30</sub>

T<sub>30</sub> は RT<sub>60</sub>, T<sub>20</sub> などとともに残響時間を表す指標のひとつである。原理としては、シュレーダー積分式[72]として知られる式 6 を用いて算出することが知られている。

$$\langle s^2(t) \rangle = N \int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (式 6)$$

コンサートホールのように暗騒音が厳密に管理され、S/N 比が良好な環境では RT<sub>60</sub> から T<sub>20</sub>, T<sub>30</sub> などを併せて算出可能であるが、暗騒音レベルを十分に抑制できない環境ではシュレーダー積分式をそのまま適用できないことが知られている。このため ISO3382-1 では、暗騒音対策をふまえて A.5.3.3 にて下記の式 n.により算出することが規定されている。

$$E(t) = \int_{t_1}^t p^2(\tau) d(-\tau) + C \quad \dots\dots\dots (式 7)$$

この計算式に基づき、両会場の T<sub>30</sub> を算出した。結果を表 8 に示す。

表 8. 東京藝術大学会場・東京工科大学会場の T<sub>30</sub> 比較 (単位: 秒)

	125	250	500	1k	2k	4k	8k
東京藝術大学音響制作スタジオ	0.164	0.168	0.176	0.176	0.177	0.177	0.165
東京工科大学 MA-ROOM	0.545	0.376	0.248	0.247	0.141	0.139	0.112

ISO3382-1 をはじめとして、ITU-R などの国際規格においても  $RT_{60}$ ,  $T_{30}$  など残響時間に関する JND は規定されていないものの、両会場の残響時間は周波数帯域ごとに違いがみられ、空間印象の違いへの影響の一因であることが想定される。特に 1kHz 以下の残響時間について、東京藝術大学会場に比べて東京工科大学会場では長くなる傾向が確認できた。250Hz 帯域では 0.2 秒程度、125Hz 帯域では 0.4 秒近くもの差が確認できた。ISO3382-1 では 8kHz 帯についての測定は必須とはなっていないものの、確認のため測定したところ、低域ほどの差異はないものの 4kHz 帯に比して残響時間が短くなっており、低音の残響時間が長く、高音の残響は早く減衰する様子が確認できた。東京工科大学会場のスタジオは簡易的な防音・反射防止策しか施されておらず、インパルス応答収録時の S/N 比も良好ではなかった。このため  $T_{30}$  を計算する際の線形当てはめに不具合が発生している可能性もあるため、確認のため帯域ごとの減衰曲線をグラフ化し、目視にて再確認を行った。以下の図 6 に東京藝術大学の、図 7 に東京工科大学での帯域ごとの減衰曲線を示す。



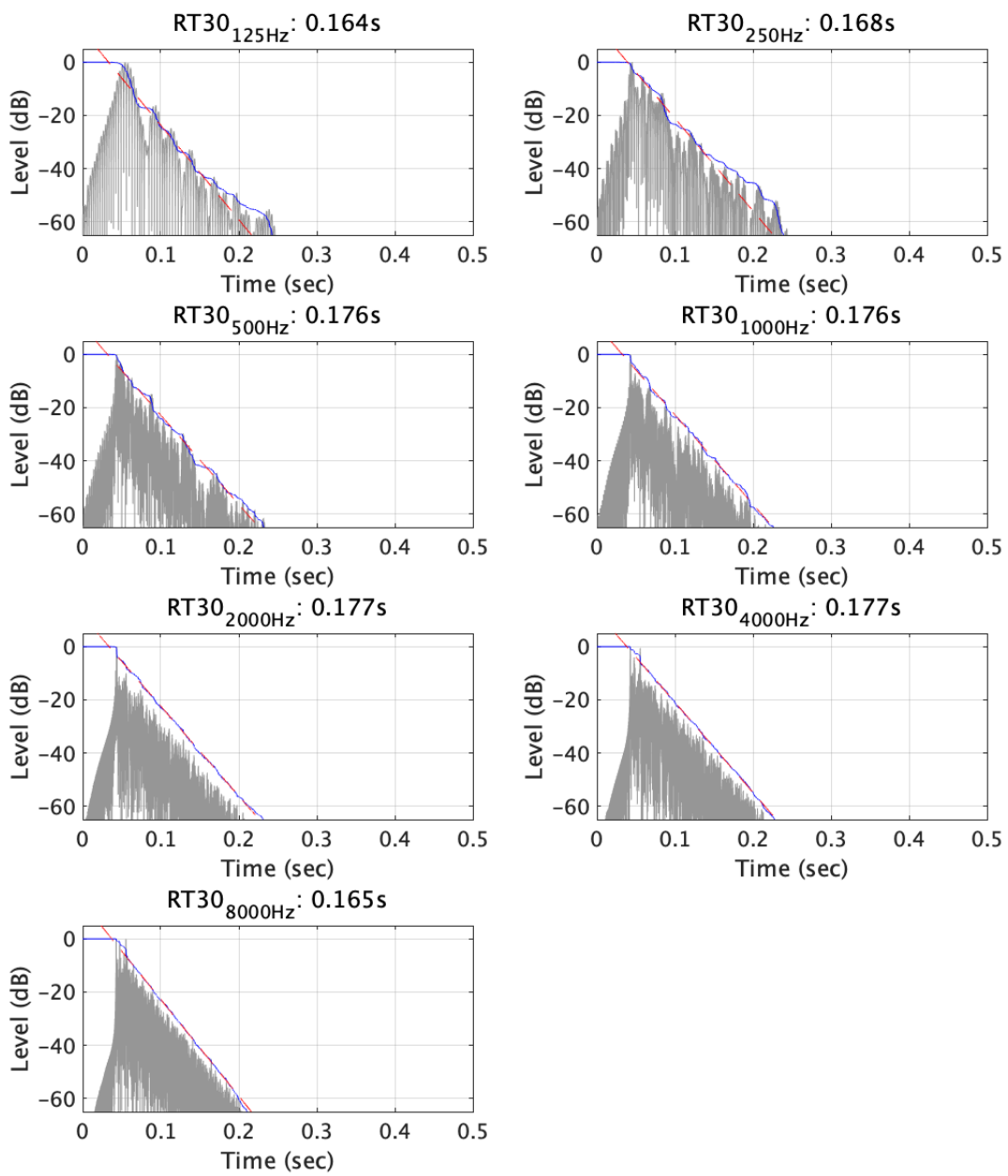


図 6. 東京藝術大学千住キャンパス音響制作スタジオにおける帯域ごとの減衰曲線

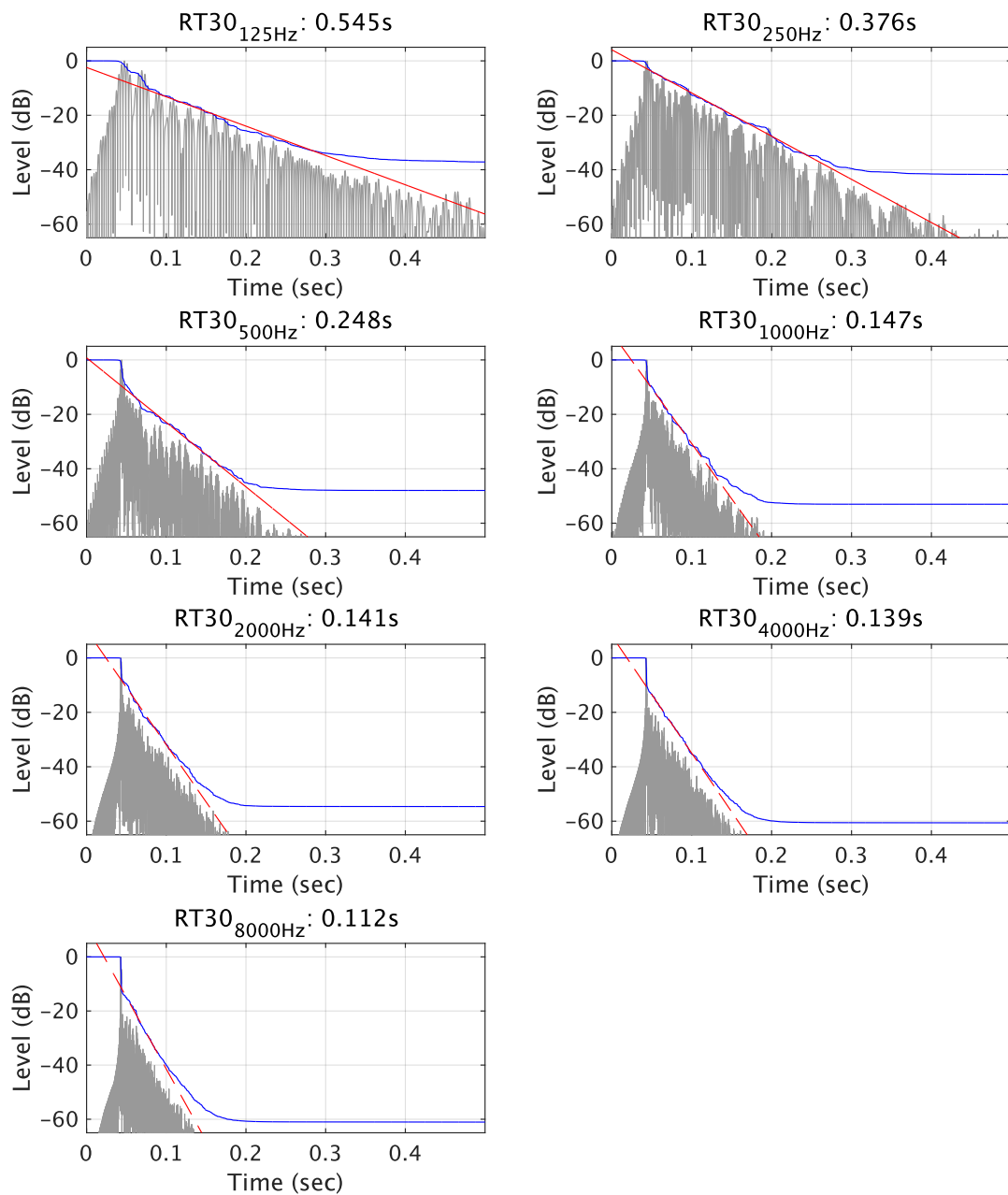


図7. 東京工科大学八王子キャンパス MA Room における帯域ごとの減衰曲線

東京藝術大学会場では、全帯域にわたり均一な  $T_{30}$  の値が算出された一方で、東京工科大学会場はやはり低音域の残響時間が長く、高音域の残響減衰が早い傾向が確認できる。この結果より、インパルス応答の測定法・算出法いずれも妥当な結果であることが確認できた。これを踏まえて両会場の  $T_{30}$  の結果をグラフ化したものを以下の図8に示す。

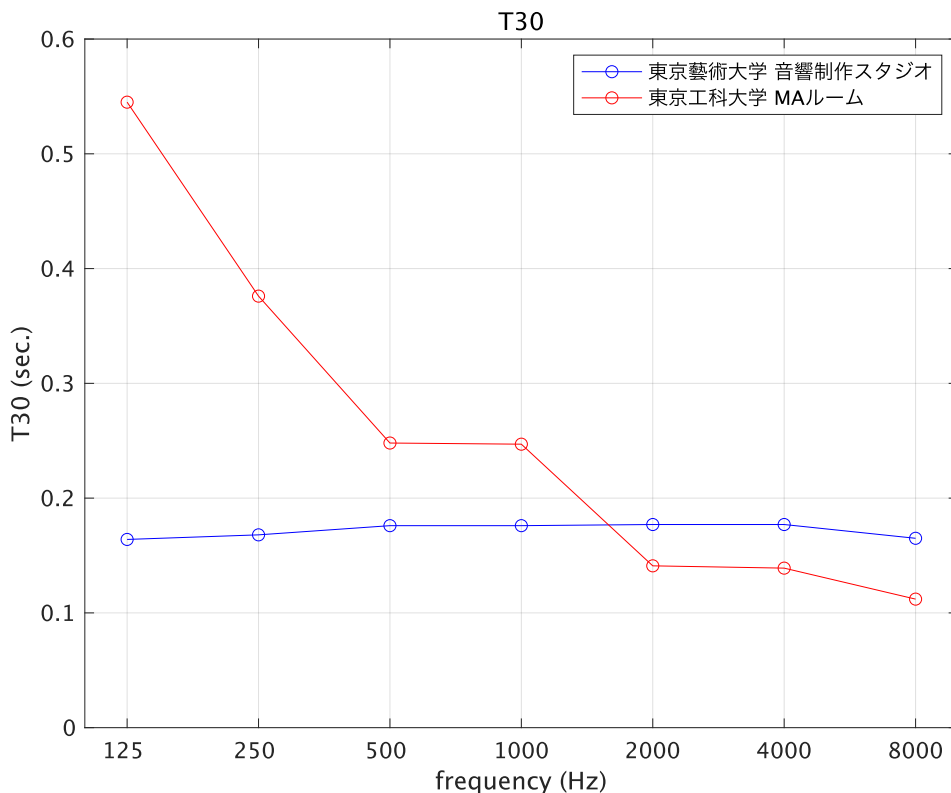


図 8. 2つの実験環境における T<sub>30</sub> の比較

測定分析を経て、2会場間での室内音響の物理特性には差が認められ、空間印象に影響する可能性が高いことが示唆された。しかし、全ての実験刺激に対して交絡作用が認められたわけではないため、3章で実施したヘッドフォン聴と同様に、統計指標の確認を行い、統計的に良好な値の刺激セットについては空間同一性知覚の許容範囲について算出を試みる。併せてロジスティック回帰曲線の目視を通じて考察を行う。

## 4.5 ヴァイオリン二重奏の実験結果

### 4.5.1 ロジスティック回帰分析：基礎統計量

ヴァイオリン二重奏による刺激である *Home Sweet Home* に対する回答に対し、3章と同様の手法により、基礎統計量として Wald 検定による  $p$  値、AUC および Nagelkerle  $R^2$  により総合的に統計的有意性を判断する。旋律パートである 1st ヴァイオリンパートの DR 比を減少させた範囲の基礎統計量は  $p=0.001$ , AUC=0.766, Nagelkerle  $R^2=0.252$  となった。同パートの DR 比を増加させた範囲では  $p=0.001$ , AUC=0.

788, Nagelkerle  $R^2=0.244$  が算出された。いずれも回帰曲線に対する尤度を示す Nagelkerle  $R^2$  の値が低いもの、Wald 検定、AUC は良好な値が認められた。ただし DR 減少部では交絡作用が確認された。伴奏パートである 2nd ヴァイオリンパートの DR 比を減少させた範囲の基礎統計量は  $p=0.001$ , AUC=0.811, Nagelkerle  $R^2=0.222$  となり、同パートの DR 比を増加させた範囲では  $p=0.001$ , AUC=0.772, Nagelkerle  $R^2=0.238$  という結果となった。こちらも Wald 検定、AUC にて良好な値が確認できた。表 9 に基礎統計量一覧を示す。

表 9. *Home Sweet Home* における Wald 検定  $p$  値, AUC および Nagelkerle  $R^2$

DR ratio	1st Vn.(melody)		2nd Vn.(accomp.)	
	minus	plus	minus	plus
Wald test $p$	0.001*	0.001*	0.001*	0.001*
AUC	0.766*	0.788*	0.738*	0.722*
Nagelkerle $R^2$	0.252	0.244	0.222	0.238

#### 4.5.2 空間同一性知覚の許容範囲の推定

1st ヴァイオリンパートの DR 比増加部、2nd ヴァイオリンパートの DR 比減少・増加のいずれの部分でも、ロジスティック回帰分析の結果として良好な統計値が算出されたことから、算出された係数を用いて、式 3 による許容範囲推定を行う。

係数算出にあたっては bootstrap 法を用いて 5000 回の計算を実施した。この結果、1st ヴァイオリンパートの DR 比増加部では  $b_0=1.058$ ,  $b_1=-0.052$  が算出された。2nd ヴァイオリンパートの DR 比減少部では  $b_0=1.810$ ,  $b_1=0.225$  が、DR 比増加部では  $b_0=0.696$ ,  $b_1=-0.059$  が算出された。表 10 に係数一覧を示す。

表 10. *Home Sweet Home* におけるロジスティック回帰係数

coefficients	DRr minus		DRr minus	
	$b_0$	$b_1$	$b_0$	$b_1$
1st Vn.	NaN	NaN	1.058	-0.052
2nd Vn.	1.810	0.225	0.696	-0.059

交絡作用がある刺激セットを除き係数から許容範囲を推定した結果、1st ヴァイオリンパートの増加部では 20.3dB が算出された。2nd ヴァイオリンパートの DR 比減少部では-8.0dB、増加部では 11.8dB という結果を得た。表 11 に推定された DR 比(単位：dB)の一覧を示す。

表 11. *Home Sweet Home* において推定される空間同一性知覚の許容範囲 DR 比(単位:dB)

DR ratio	$p = 0.5$	
	minus	plus
1st Vn.		20.3
2nd Vn.	-8.0	11.8

以下、図 9 に 1st ヴァイオリンパート、図 10 に 2nd ヴァイオリンパートの DR 比変動でのロジスティック回帰曲線を示す。

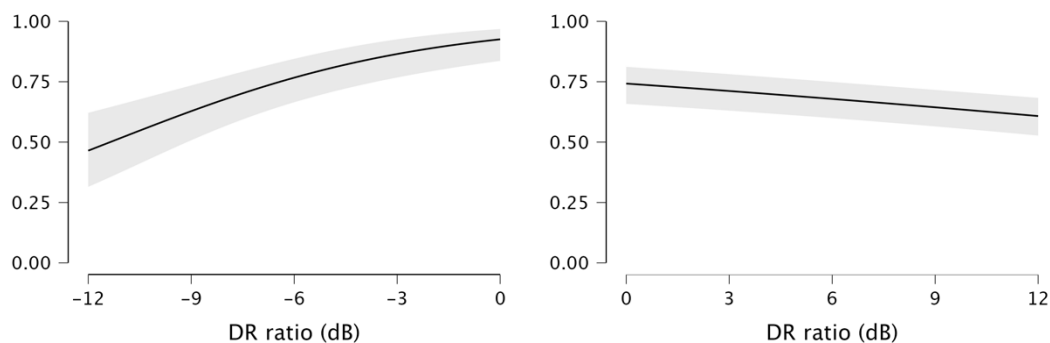


図 9. 1st Vn. (旋律) の回帰曲線：(左)DR 比減少刺激／(右)DR 比増加刺激

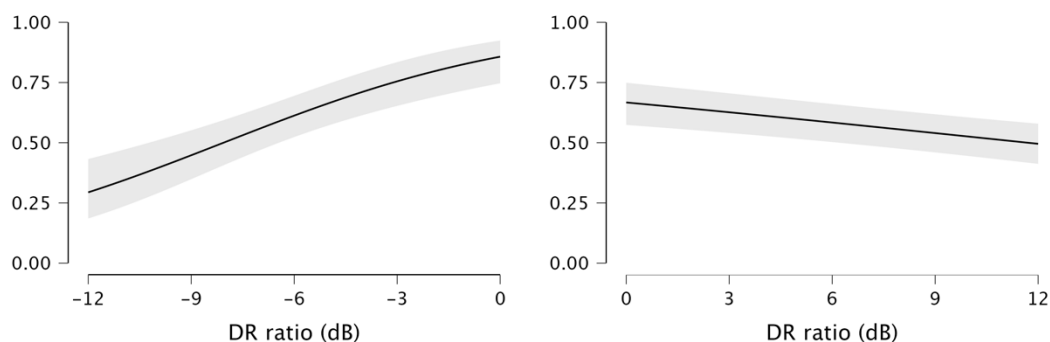


図 10. 2nd Vn. (旋律) の回帰曲線：(左)DR 比減少刺激／(右)DR 比増加刺激

## 4.6 リコーダーとハーブの二重奏の実験結果

### 4.6.1 ロジスティック回帰分析：基礎統計量

リコーダーとハーブによる刺激である *Folle ben è che si crede* に対する回答に対しても同様の分析を実施した。

旋律パートであるリコーダーパートの DR 比を減少させた範囲の基礎統計量は  $p=0.001$ ,  $AUC=0.811$ , Nagelkerle  $R^2=0.320$  となった。同パートの DR 比を増加させた範囲では  $p=0.001$ ,  $AUC=0.769$ , Nagelkerle  $R^2=0.300$  が算出された。いずれも回帰曲線に対する尤度を示す Nagelkerle  $R^2$  の値が低いもの、Wald 検定、AUC は良好な値が認められた。伴奏パートであるハーブパートの DR 比を減少させた範囲の基礎統計量は  $p=0.073$ ,  $AUC=0.658$ , Nagelkerle  $R^2=0.083$  となり、この部分は 3 統計指標とも良好な値は認められなかった。ハーブパートの DR 比を増加させた範囲では  $p=0.039$ ,  $AUC=0.697$ , Nagelkerle  $R^2=0.089$  という結果を得た。Wald 検定のみ、検討に値する数値を得たが AUC および Nagelkerle  $R^2$  の値は低くなった。表 12 に基礎統計量一覧を示す。

表 12. *Folle ben è che si crede* における Wald 検定  $p$  値, AUC および Nagelkerle  $R^2$

DR ratio	Recorder(melody)		Harp(accomp.)	
	minus	plus	minus	plus
Wald test $p$	0.001*	0.001*	0.073	0.039*
AUC	0.811*	0.769*	0.658	0.697
Nagelkerle $R^2$	0.320	0.300	0.083	0.089

交絡作用がリコーダーパートの DR 比減少部、ハーブパートは DR 比減少・増加いずれにも確認され、回答のばらつきが大きいことを示している。

### 4.6.2 空間同一性知覚の許容範囲の推定

この刺激に対する回答はばらつきが大きいいため、リコーダーパートの DR 比増加部についてのみ報告を行う。

リコーダーパートの DR 比増加部では  $b_0=0.822$ ,  $b_1=-0.092$  であり、この係数から

得られる許容範囲は 8.9dB であった。

得られた回帰曲線を図 11, 12 に示す。

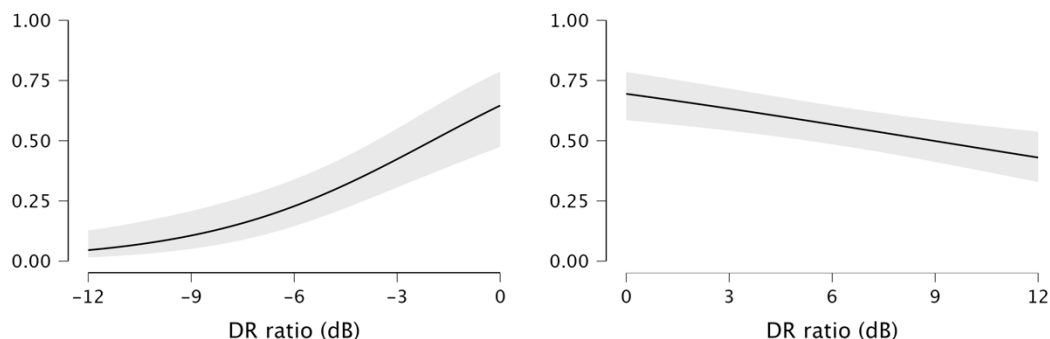


図 11. リコーダー(旋律)の回帰曲線：(左)DR 比減少刺激／(右)DR 比増加刺激

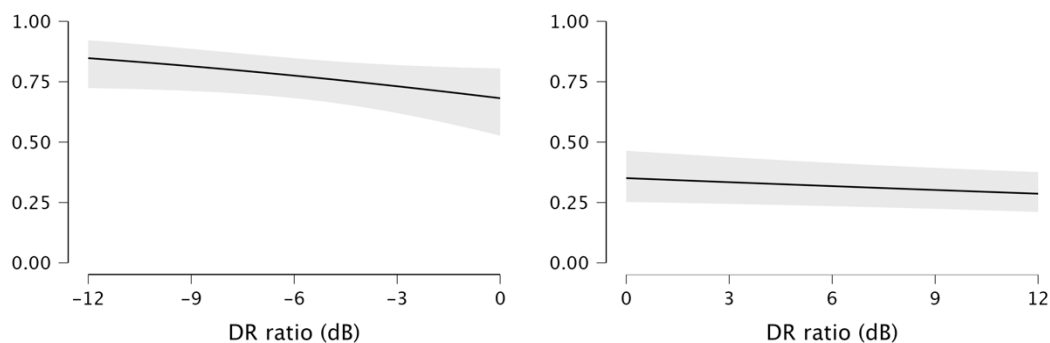


図 12. ハープ (伴奏)の回帰曲線：(左)DR 比減少刺激／(右)DR 比増加刺激

## 4.7 まとめ

予備実験であるヘッドフォン聴実験の結果を踏まえ、複数会場・異なる属性による被験者によるスピーカ聴実験を実施した。ヘッドフォン聴に向けて準備した 2 チャンネル刺激は、直接音を両耳聴で中央に定位する仮想音像として準備し、間接音は左・中央・右で個別に生成した 3 チャンネルの音声を 2 チャンネルにダウンミックスして作成した。DR 比の変動による印象測定の刺激としては、DR 比処理工程が多くなり、呈示方法としても改善の余地があった。このためスピーカ聴では前面 3 チャンネルを用いて、直接音は中央スピーカのみ配置し、反射音はインパルス応答収録のマイク配置に応じて左・中央・右に個別に配置する刺激を作成した。この刺激により、直接音と間接音を呈示するスピーカを別にする事で、DR 比の変動の影響をより精緻に

測定できると考えた。

交絡作用については、想定される主な要因として、被験者属性および会場の音響特性の違いの2点が考えられる。実験計画の時点では、被験者のどのような属性が空間同一性知覚の鋭敏さに影響するかは未知であったため、対応する属性に関する回答項目については準備に至らなかった。そこでスピーカ聴実験の事後検証として、2会場の音響特性測定し、客観指標にて差分を検証することで交絡作用の要因である可能性を確認した。測定の結果、 $C_{80}$ についてはISO3382-1に規定されるJNDである1dB以上の乖離がみられ、明瞭性について2会場には違いがあると考えられる。 $T_{30}$ については国際規格にて数値的なJNDは規定されていないもの、東京藝術大学会場が全帯域にわたりおよそ0.164から0.177秒のほぼ均一な残響時間が得られる一方で、東京工科大学会場は東京藝術大学会場に比べて低域の残響時間は長く、高域は早く減衰するという値が得られた。会場の物理的音響特性、特に周波数帯域ごとに違いが確認できたことから、交絡作用について何らかの影響をおよぼしている可能性は無視できない。交絡作用を考慮したロジスティック回帰分析の結果は、東京工科大学会場の結果の方が空間同一性知覚の確率が高いことを示しており、空間同一性知覚について許容範囲を広げる方向に作用しているという可能性が示唆されることから、周波数特性をより精緻に確認できる刺激の必要性が明確となった。



## 第5章 実験III：オクターブバンドノイズを用いたリズムパターン呈示

実験I, IIを通じて、ヴァイオリン二重奏曲、リコーダーとハープの二重奏曲を実験素材とする実験は概ね一定の数値的な範囲を明らかにすることができたものの、より広範な楽器の組み合わせについての発展性については未検証に止まっている。実験IIではさらに、空間同一性知覚に関して周波数帯域の影響が示唆された。これを踏まえ本章では、新たな実験刺激として、短いパルス状の音長を持ち、特定の音高は持たないものの周波数帯域としては明確な打楽器を想定し、演奏の録音物ではなく、より厳密に周波数帯域を制御できるオクターブバンドノイズを用いた実験の手法および結果について報告する。

### 5.1 実験刺激

#### 5.1.1 オクターブバンドノイズによるリズム素材用単音の作成

リズムの素材音は7種のオクターブバンドノイズを用いた。音響指標測定に用いられるオクターブバンドノイズの一般的な中心周波数は125Hz・250Hz・500Hz・1kHz・2kHz・4kHzの6種だが、楽器音の周波数成分に関する影響を考慮し、さらにオクターブ上の8kHzまでを準備した。なおこの中心周波数表記は一般的な測定器などに用いられるが、本研究ではJIS規格C1315[72]で推奨値とされる10乗乗系によって算出した。このため厳密には、中心周波数は125.892Hz・251.189Hz・501.187Hz・1000Hz・1995.262Hz・3981.071Hz・7943.282Hzの7種類である。

帯域通過フィルタは4096サンプルのFIRフィルタを用いた。通過特性はIIRフィルタでは4次のフィルタ(-24dB/oct)に相当する[71]。白色雑音にデジタルフィルタ処理を施す際に、低域において音の立ち上がりが緩やかになり、聴感上打楽器を模したように聴こえない場合がある。これを補正するため、各帯域の初期ピーク時点を基準として時間長0.1秒になるよう切り出し、指数状の減衰曲線を乗算した。さらに全体に約0.002秒のテーパーをかけ、連続再生する際のデジタルノイズ対策を施した。

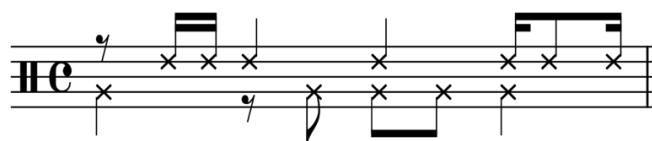
各素材音が直接音として合奏する際に距離感に差が出ないように、ITU-R[74]を参考として算術的にLKFS補正を行なった。ターゲットとなるLKFSを-40dBとし、演算の反復による数値収束を用いて、7種の素材音のLKFS値の範囲を-39.998dBから-40dBの間に収めた。

### 5.1.2 2パートによるリズムパターン

前項の方法により生成した、音長約0.1秒の減衰するオクターブバンドノイズを打楽器に見立て、高域パート・低域パートの2パート合奏を想定した短いリズムパターンを検討した。

- 両者が同時に奏される拍点と片方のみが奏される拍点が存在すること
- 音価の種類がバランスよく混在していること
- 8分音符・16分音符の拍点や連続するリズムの位置に適度な変化があること
- 休符やシンコペーションが混在していること
- 被験者に合奏であることを想起させやすいよう、1名が2つの楽器を奏しているようにも、2名が個別楽器で合奏しているようにも聞こえること

これらを条件として複数のリズムパターンを考案し、下記を選定した。



譜例1 実験に用いた高音域・低音域2パートによるリズムパターン

このリズムパターンを、低域パート 125Hz・250Hz・500Hz・1kHz・2kHz・4kHz、高域パート 250Hz・500Hz・1kHz・2kHz・4kHz・8kHzにて組み合わせ、 $7C_2$ にて21種の合奏リズムパターンを作成した。テンポは4分音符=120に設定した。

### 5.1.3 インパルス応答畳み込みによる DR 比変動刺激作成

ドライ音源として準備した7種のオクターブバンドノイズとIRデータを畳み込むことにより、間接音のみの演奏音を作成した上で、DR比が0dBとなるよう、臨界距離を想定した計算を施した。まず1つのドライ音源に対して右・中央・左のIRデータを個別に畳み込み、3種の間接音のみのデータを作成する。次にDR比の調整として直接音・間接音それぞれの二乗平均平方根を算出してその比を係数として求め、間接音側の振幅に係数を乗算することでDR比=0dBとなるフロント3ch用の間接音演奏データを作成した。直接音は中央スピーカに固定し、L,C,R個別に作成した間接音データを加算することにより、3チャンネルの刺激データをサンプリング周波数48kHz, 24bitで作成した。

上記の手順にてDR比0dBとして作成した演奏データを基準として、同データの間接音の振幅に計算処理を施し、DR比を変動させた間接音データ群の作成を行った。DR比の検知限が2dB[4]から5~6dB[5]であることから、DR比0dBに調整した間接音から-12dB, -9dB, -6dB, -3dB, +3dB, +6dB, +9dB, +12dBに調整した8種の間接音演奏データを追加作成し、上記と同様の手順で直接音・間接音を加算した。本実験は演奏パートごとに付与されたDR比0dBからの間接音の変動に着目しているため、総当たり比較をする必要がないと判断できる。これにより1曲あたりの実験刺激数は、パートAをDR比=0dBの演奏データで固定した上でパートBに9種(-12dB, -9dB, -6dB, -3dB, +3dB, +6dB, +9dB, +12dB, 間接音無し)の間接音を付して制作した実験刺激と、パートABを逆の組み合わせにて生成した実験刺激9種、DR比=0dBの音源の計19種とした。全てのデータはMatlab R2020(64bit)により作成した。

上記の手続きにより、1対のオクターブバンドノイズによるリズムパターンでDR比変動19種、これを21種の周波数帯域の組み合わせ全てに施し、計399種の刺激を作成した。19種のDR比変動は繰り返しの認識を低減するため5種のランダムイズを施し、さらに周波数帯域の組み合わせの呈示順でも規則性知覚を低減するためランダムイズを施した。

## 5.2 実験手続き

4.6 以降で検証したとおり、呈示刺激の周波数帯域について厳密に調査するため、音響環境がより良好な東京藝術大学千住キャンパス音響制作スタジオにて実施した。

実験に先立ち、付加した残響音の DR 比変動による聴感上の変化が楽器音色の変化と捉えられないようにするため、実験刺激内からランダムに 3 種を選び事前に被験者に呈示し「これは楽器が変わったわけではなく、空間が生み出す反響の違いによる変化だとお考えください」と口頭で伝達し、被験者の納得を得た上で実験主旨および回答紙の指示を行なった。その後、質問紙にて以下の説明文を呈示した。質問紙は 2 種用意し、被験者数をほぼ同一にするよう調整した。

『2 名で演奏されている短いリズム合奏を聴いていただきます。最初にアルファベットが読み上げられ、次に連続してリズム合奏が 19 回再生されます。2 名とも<同じ空間で演奏している>と感じたら対応するボックスの中に✓をつけてください。』

『2 名で演奏されている短いリズム合奏を聴いていただきます。最初にアルファベットが読み上げられ、次に連続してリズム合奏が 19 回再生されます。2 名とも<別々の空間で演奏している>と感じたら対応するボックスの中に✓をつけてください。』

## 5.3 実験結果

### 5.3.1 実験参加者

被験者は東京藝術大学および東京工科大学の学生 7 名が参加した。東京藝術大学から 4 名、東京工科大学から 3 名であり、実験 I, II を経験した参加者は東京藝術大学の学生 2 名である。

### 5.3.2 Wald 統計量・AUC・Nagelkerke $R^2$

2.3 で検討した手法により、Wald 統計量による  $p$ 、AUC および Nagelkerke  $R^2$  の結果を確認し、係数による予測 DR 比算出の採用基準を検討する。低域高域パートの組

み合わせおよび DR 比の変動を±で分割してロジスティック回帰分析を施すため、全 84 種の分析結果を得た。表 13 に Wald 統計量による  $p$  値の結果を示す。基準として  $p < 0.05$  が算出された組み合わせにつき色で示す。

表 13. Wald 統計量による  $p$  値

	DR ratio	250		500		1k		2k		4k		8k	
		-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
125	High chg. / Low fix	0.182	0.010	0.333	0.467	0.327	0.249	0.626	0.203	0.416	0.214	0.146	0.003
	Low chg. / high fix	0.319	0.034	0.045	0.035	0.003	0.069	0.003	0.061	0.012	0.035	0.005	0.009
250	High chg. / Low fix			0.809	0.336	0.571	0.997	0.608	0.012	0.296	0.024	0.431	0.036
	Low chg. / high fix			0.342	0.036	0.014	0.100	0.057	0.107	0.057	0.088	0.008	0.026
500	High chg. / Low fix					0.036	0.005	0.765	0.030	0.398	0.182	0.791	0.119
	Low chg. / high fix					0.633	0.014	0.020	0.081	0.003	0.090	0.022	0.092
1k	High chg. / Low fix							0.167	0.005	0.797	0.158	0.471	0.201
	Low chg. / high fix							0.011	0.005	0.023	0.090	0.038	0.022
2k	High chg. / Low fix									0.608	0.165	0.088	0.022
	Low chg. / high fix									0.063	0.034	0.003	0.107
4k	High chg. / Low fix											0.215	0.005
	Low chg. / high fix											0.002	0.070

なお事前に被験者属性による交絡作用を確認したところ、全 84 分析中交絡作用が認められたのは 2 種のみであり、特定の傾向がみられないことから、本表では交絡作用要因を考慮せずに計算した結果に統一して示す。

続いて表 14 に Nagelkerke  $R^2$  の結果を示す。0.65<sup>2</sup>=0.4225 を基準とし、この値を上回った組み合わせにつき色で示す。基準を超えた箇所はいずれも、関連する  $\chi^2$  検定の  $p$  値は 0.05 以下であった。

表 14. Nagelkerke  $R^2$  の結果

	DR ratio	250		500		1k		2k		4k		8k	
		-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
125	High chg. / Low fix	0.078	0.480	0.037	0.024	0.038	0.079	0.009	0.079	0.028	0.081	0.085	0.517
	Low chg. / high fix	0.040	0.233	0.181	0.301	0.412	0.439	0.412	0.346	0.278	0.301	0.802	0.715
250	High chg. / Low fix			0.002	0.042	0.014	0.885	0.011	0.547	0.046	0.337	0.026	0.330
	Low chg. / high fix			0.035	0.183	0.253	0.413	0.150	0.324	0.150	0.424	0.307	0.389
500	High chg. / Low fix					0.181	0.486	0.004	0.322	0.032	0.084	0.003	0.279
	Low chg. / high fix					0.009	0.418	0.231	0.380	0.425	0.297	0.223	0.350
1k	High chg. / Low fix							0.088	0.502	0.003	0.225	0.020	0.157
	Low chg. / high fix							0.293	0.529	0.211	0.453	0.176	0.203
2k	High chg. / Low fix									0.011	0.215	0.121	0.368
	Low chg. / high fix									0.138	0.190	0.443	0.523
4k	High chg. / Low fix											0.062	0.486
	Low chg. / high fix											0.461	0.478

次に AUC の結果につき表 15 に示す。こちらは AUC>0.8 となった組み合わせを色で示す。

表 15. AUC 結果一覧

	DR ratio	250		500		1k		2k		4k		8k	
		-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
125	High chg. / Low fix	0.650	0.886	0.595	0.706	0.598	0.806	0.548	0.753	0.590	0.798	0.647	0.875
	Low chg. / high fix	0.601	0.802	0.724	0.652	0.827	0.769	0.827	0.716	0.769	0.652	0.961	0.842
250	High chg. / Low fix			0.523	0.697	0.565	0.986	0.553	0.914	0.612	0.818	0.584	0.786
	Low chg. / high fix			0.592	0.668	0.752	0.775	0.696	0.748	0.696	0.772	0.780	0.702
500	High chg. / Low fix					0.714	0.869	0.536	0.798	0.597	0.732	0.528	0.736
	Low chg. / high fix					0.546	0.821	0.745	0.778	0.833	0.707	0.738	0.739
1k	High chg. / Low fix							0.662	0.880	0.527	0.714	0.570	0.654
	Low chg. / high fix							0.779	0.866	0.729	0.786	0.710	0.601
2k	High chg. / Low fix									0.533	0.714	0.678	0.802
	Low chg. / high fix									0.684	0.684	0.843	0.821
4k	High chg. / Low fix											0.627	0.869
	Low chg. / high fix											0.845	0.821

この3指標の結果を俯瞰すると、必ずしも全ての値が連動するとは限らないことが分かる。ロジスティック回帰曲線の係数を用いた計算に利用可能かを検討、選定するため、表 16 に上記3指標を総合した結果を示す。表中の **w** は Wald 検定の  $p < 0.05$  を、**a** は  $AUC > 0.8$  を、**n** は Nagelkerke  $R^2 > 0.4225$  を意味する。Nagelkerke  $R^2$  および AUC は単独では説明力が低いと考えられるため、下記の一覧表ではそれぞれが単独で基準値以上が検出された箇所に関しては色を付していない。略記のアルファベットが1つの箇所は例外なく Wald 統計量の  $p$  値が 0.05 を下回った箇所である。

表 16. Wald 統計量による  $p$  値・Nagelkerke  $R^2$ ・AUC の基準値以上の総合的結果

	DR ratio	250		500		1k		2k		4k		8k	
		-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
125	High chg. / Low fix		wna				a						wna
	Low chg. / high fix		wa	w	w	w	n	wa		w	w	wna	wna
250	High chg. / Low fix						na		wna		wa		w
	Low chg. / high fix				w	w					n	w	w
500	High chg. / Low fix					w	wna		w				
	Low chg. / high fix						wa	w		wna		w	
1k	High chg. / Low fix								wa				
	Low chg. / high fix							w	wna	w	n	w	w
2k	High chg. / Low fix												wa
	Low chg. / high fix										w	wna	na
4k	High chg. / Low fix												wna
	Low chg. / high fix											wna	na

この結果を踏まえて、算出された係数から DR 比の算出を行う。

なお、ここまでのロジスティック曲線分析で得られた全てのグラフは、巻末附録に列挙する。

### 5.3.3 bootstrap 法を通じたロジスティック回帰式係数算出

ロジスティック回帰分析では、統計的有意性にかかわらず係数は算出される。被験者数が7名と少ないことから、bootstrap 法により 5000 回の計算を施した上で算出した係数一覧を表 17 に示す。

表 17. 全 84 分析により算出された係数一覧

		DR r minus		DR r plus	
		intept (b0)	DRr (b1)	intept (b0)	DRr (b1)
125250	H chg	0.356	-0.135	0.764	-0.468
	L chg	1.199	0.090	0.992	-0.058
125500	H chg	-0.054	-0.082	-1.040	-0.021
	L chg	0.223	0.226	1.076	-0.071
125_1k	H chg	1.114	0.089	-0.533	-0.037
	L chg	1.775	0.366	1.852	-0.110
125_2k	H chg	0.658	0.044	-0.337	-0.035
	L chg	1.748	0.368	1.253	-0.091
125_4k	H chg	0.603	-0.085	-0.384	-0.040
	L chg	0.970	0.279	1.064	-0.071
125_8k	H chg	1.359	0.132	1.686	-0.391
	L chg	5.439	1.018	3.546	-0.121
250500	H chg	-0.163	0.023	-0.695	-0.026
	L chg	0.404	0.080	0.841	-0.046
250_1k	H chg	0.917	-0.058	1.946	-7.408
	L chg	1.568	0.252	1.672	-0.127
250_2k	H chg	1.071	0.045	0.798	-0.611
	L chg	0.491	0.185	1.009	-0.129
250_4k	H chg	0.370	-0.105	0.316	-0.286
	L chg	0.505	0.186	1.773	-0.119
250_8k	H chg	1.376	0.172	0.770	-0.205
	L chg	1.309	0.290	1.592	-0.084
500_1k	H chg	1.722	0.208	1.254	-0.382
	L chg	0.201	0.041	1.426	-0.250
500_2k	H chg	1.608	0.034	0.444	-0.234
	L chg	0.799	0.231	1.432	-0.155
500_4k	H chg	0.743	-0.086	-0.231	-0.036
	L chg	1.641	0.385	0.893	-0.091
500_8k	H chg	1.053	0.022	0.620	-0.125
	L chg	0.900	0.234	1.263	-0.106
1k_2k	H chg	2.239	0.149	1.257	-0.419
	L chg	2.549	0.289	2.381	-0.327
1k_4k	H chg	0.908	0.022	0.196	-0.114
	L chg	1.397	0.223	1.997	-0.124
1k_8k	H chg	0.690	0.064	-0.292	-0.074
	L chg	0.868	0.201	1.156	-0.045
2k_4k	H chg	0.518	-0.050	0.070	-0.117
	L chg	1.230	0.174	0.884	-0.048
2k_8k	H chg	1.731	0.169	1.035	-0.229
	L chg	1.610	0.413	2.491	-0.147
4k_8k	H chg	1.369	0.112	1.248	-0.377
	L chg	2.093	0.402	2.212	-0.185

空間同一性の許容範囲として、事象確率の値を 0.5 とした場合、2.3.1 で検討した数式に代入することで、各分析結果における印象転換がおきる DR 比の値を算出できる。この計算結果に、前項で検討した結果を加えた一覧表を以下の表 18 に示す。

表 18. 同じ空間・異なる空間という印象が 50%となる DR 比に選定基準を付した一覧

		High Part												
		250		500		1k		2k		4k		8k		
DR ratio		-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	
Low Part	125	High chg. / Low fix	2.637	-1.632	-0.659	-49.524	-12.517	-14.405	-14.955	-9.629	7.094	-9.600	-10.295	4.312
		Low chg. / high fix	-13.322	-17.103	-0.987	15.155	-4.850	16.836	-4.750	13.769	-3.477	14.986	-5.343	29.306
	250	High chg. / Low fix			7.087	-26.731	15.810	0.263	-23.800	1.306	3.524	1.105	-8.000	3.756
		Low chg. / high fix			-5.050	18.283	-6.222	13.165	-2.654	7.822	-2.715	14.899	-4.514	18.952
	500	High chg. / Low fix					-8.279	3.283	-47.294	1.897	8.640	-6.417	-47.864	4.960
		Low chg. / high fix					-4.902	5.704	-3.459	9.239	-4.262	9.813	-3.846	11.915
	1k	High chg. / Low fix							-15.027	3.000	-41.273	1.719	-10.781	-3.946
		Low chg. / high fix							-8.820	7.281	-6.265	16.105	-4.318	25.689
	2k	High chg. / Low fix									10.360	0.598	-10.243	4.520
		Low chg. / high fix									-7.069	18.417	-3.898	16.946
	4k	High chg. / Low fix											-12.223	3.310
		Low chg. / high fix											-5.206	11.957

上記の結果を踏まえ、この時点での全体的な傾向についてまとめる。ロジスティック回帰分析の高い箇所の数と比べると、高域パート変動部が全 42 箇所中 12 箇所（約 28.6%）であるのに対し、低域パート変動分が全 42 箇所中 27 箇所（約 64.3%）となり、全体として相対的に低周波数帯域パートの DR 比が変動した場合に統計的有意性が確認できる比率が多い。さらに DR 比変動の正負で比較すると、高域パートは DR 比が正の変動をした場合に精度が高い分析結果が得られた。高域パートの DR 比がプラスに変動した際には 12 箇所中 11 箇所検出されており約 91.7%である。一方で低域パートの DR 比変動に関しては、プラスへの変動箇所が 27 箇所中 15 箇所（約 55.6%）、マイナスへの変動箇所が 27 箇所中 15 箇所（約 44.4%）となり、正負ともに統計的有意性が確認できた。



## 5.4 考察

### 5.4.1 過検出の可能性の排除を通じた許容範囲 DR 比の算出

本研究では、実験 I, II を通じて、ロジスティック回帰分析の対象となるデータとして、直接音のみの刺激に対する回答も含んで計算を実施した。この結果、Wald 検定による  $p$  値、Nagelkerke  $R^2$ 、AUC などを用いて回帰曲線および係数の精度を確認の上で許容範囲 DR 比の逆推定を行なってきたが、DR 比増加部に関しては推定精度について精査すべき点もある。直接音のみの刺激は正確には DR 比 $=\infty$ になることから、逆推定算出が困難であるため、残響音が実質的に消失するとされる  $RT_{60}$  を参考に DR 比 $=60\text{dB}$  として逆推定を行なってきた。この場合、DR 比 $=12\text{dB}$  までは実際の刺激に対する印象回答として認められるものの、逆推定値が  $12\text{dB}$  以上の値は計算上の外挿値であり、 $12\text{dB}$  以下の推定値とは精度が異なると考えられる。表 18 では、DR 比変動が  $\pm 12\text{dB}$  を大きく超えた箇所が許容範囲として算出され、かつロジスティック回帰分析の精度として比較的良好という結果となっている。これはロジスティック回帰分析が、尤度を下げるため過度にフィッティングしてしまう過検出の症状が発生している可能性がある。

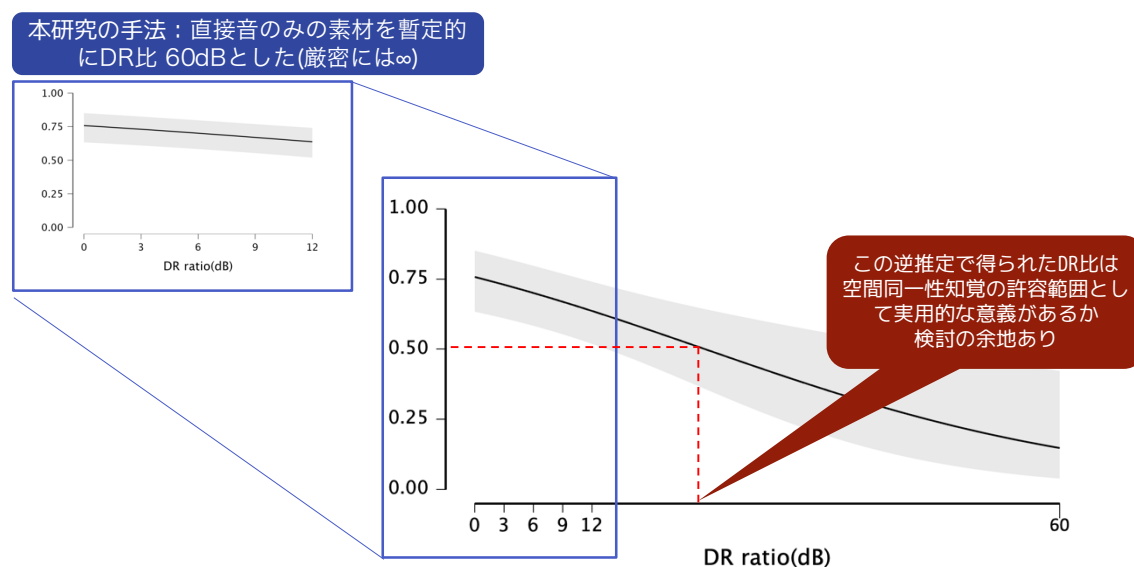


図 13. ロジスティック回帰曲線から逆推定した DR 比の実用上の検討

これを踏まえ実験 III の分析においては、より正確な値のみを対象とするため、逆推定によって得られた推定許容範囲 DR 比の中で、 $12\text{dB}$  以上となる値を分析対象から削

除することにより、分析対象をさらに限定する処理を施した。具体的には以下の表 19 に示す赤枠の値を分析対象から削除することとした。

表 19. 逆推定された DR 比から正負 12dB 以上の部分を除去

		High Part													
		250		500		1k		2k		4k		8k			
		DR ratio		minus		plus		minus		plus		minus		plus	
Low Part	125	高域パート変動	2.637	-1.632	-0.659	-49.524	-12.517	-14.405	-14.955	-9.629	7.094	-9.600	-10.295	4.312	
		低域パート変動	-13.322	-17.103	-0.987	15.155	-4.850	16.836	-4.750	13.769	-3.477	14.986	-5.343	29.306	
	250	高域パート変動			7.087	-26.731	15.810	0.263	-23.800	1.306	3.524	1.105	-8.000	3.756	
		低域パート変動			-5.050	18.283	-6.222	13.165	-2.654	7.822	-2.715	14.899	-4.514	18.952	
	500	高域パート変動					-8.279	3.283	-47.294	1.897	8.640	-6.417	-47.864	4.960	
		低域パート変動					-4.902	5.704	-3.459	9.239	-4.262	9.813	-3.846	11.915	
	1k	高域パート変動							-15.027	3.000	-41.273	1.719	-10.781	-3.946	
		低域パート変動							-8.820	7.281	-6.265	16.105	-4.318	25.689	
	2k	高域パート変動									10.360	0.598	-10.243	4.520	
		低域パート変動									-7.069	18.417	-3.898	16.946	
	4k	高域パート変動											-12.223	3.310	
		低域パート変動											-5.206	11.957	

これにより選出した分析対象を、以下の表 20 に示す。このように算出結果に限定することにより、推定許容範囲 DR 比の精度を高めることとした。

表 20. 過検出が予想される対象を除外後の実験 III における分析対象

		High Part													
		250		500		1k		2k		4k		8k			
		DR ratio		minus		plus		minus		plus		minus		plus	
Low Part	125	高域パート変動	2.637	-1.632	-0.659	-49.524	-12.517	-14.405	-14.955	-9.629	7.094	-9.600	-10.295	4.312	
		低域パート変動	-13.322	17.103	-0.987	15.155	-4.850	16.836	-4.750	13.769	-3.477	14.986	-5.343	29.306	
	250	高域パート変動			7.087	-26.731	15.810	0.263	-23.800	1.306	3.524	1.105	-8.000	3.756	
		低域パート変動			-5.050	18.283	-6.222	13.165	-2.654	7.822	-2.715	14.899	-4.514	18.952	
	500	高域パート変動					-8.279	3.283	-47.294	1.897	8.640	-6.417	-47.864	4.960	
		低域パート変動					-4.902	5.704	-3.459	9.239	-4.262	9.813	-3.846	11.915	
	1k	高域パート変動							-15.027	3.000	-41.273	1.719	-10.781	-3.946	
		低域パート変動							-8.820	7.281	-6.265	16.105	-4.318	25.689	
	2k	高域パート変動									10.360	0.598	-10.243	4.520	
		低域パート変動									-7.069	18.417	-3.898	16.946	
	4k	高域パート変動											-12.223	3.310	
		低域パート変動											-5.206	11.957	

#### 5.4.2 実験 III における推定許容範囲 DR 比の全体的な傾向

高域パートの DR 比が変動する刺激 42set において、DR 比増加にて統計的有意性が確認された箇所は 9set (約 21.4%) であり、低域パートの DR 比が変動する刺激 42set において DR 比増加にて統計的有意性が確認された箇所は 15set (約 35.7%) であった。この結果、高域パートは DR 比増加部で、低域パートは DR 比減少部で空間の同

異判定が敏感になるという傾向がみられた。

印象反転が起きる確率を 50% として対応する DR 比を算出すると、高域パート DR 比増加部の推定許容範囲 DR 比は  $mean=2.9dB$ ,  $SD=1.2$ 、低域パート DR 減少部では  $mean=-4.7dB$ ,  $SD=1.7$  となった。8kHz 帯では、高域パート DR 比増加部で 6set 中 4 set (約 66.7%)、高域パートが 8kHz 帯である刺激に対する他周波数帯の DR 比減少部で 6set 中 6set (100%) で統計的有意性が確認され、1kHz 帯, 2kHz 帯と同様に、空間同異判定の聴覚の手がかりとして有力であることが示唆された。

表 21. 実験 III における推定許容範囲 DR 比の全体的な傾向

		High Part											
		250		500		1k		2k		4k		8k	
Low Part	DR ratio	minus	plus	minus	plus	minus	plus	minus	plus	minus	plus	minus	plus
		高域パート変動	2.637	-1.632	-0.659	-49.524	-12.517	-14.405	-14.955	-9.629	7.094	-9.600	-10.295
125	低域パート変動	-13.322	17.103	-0.987	15.155	-4.850	16.836	-4.750	13.769	-3.477	14.986	-5.343	29.306
	高域パート変動			7.087	-26.731	15.810	0.263	-23.800	1.306	3.524	1.105	-8.000	3.756
250	低域パート変動			-5.050	18.283	-6.222	13.165	-2.654	-7.822	-2.715	14.899	-4.514	18.952
	高域パート変動					-8.279	3.283	-47.294	1.897	8.640	-6.417	-17.864	4.960
500	低域パート変動					4.099	5.704	-3.459	9.239	-4.262	9.813	-3.846	11.915
	高域パート変動							15.027	3.000	-11.273	1.719	10.781	-3.946
1k	低域パート変動								-8.820	7.281	-6.265	16.105	-4.318
	高域パート変動									10.360	0.598	-10.243	4.520
2k	低域パート変動										-7.069	18.417	-3.898
	高域パート変動												16.946
4k	低域パート変動												-12.223
	高域パート変動												-5.206
	低域パート変動												11.957

高域パート変動部  
DR比増加部で9set検出  
平均 2.9dB (SD=1.2)

低域パート変動部  
DR比減少部で15set検出  
平均 -4.7dB (SD=1.7)

その他パターン  
1k, 2kHz周波数帯で顕著

高域パート DR 比減少部は 1set、低域パート DR 比増加部では 2set と、統計的有意性が確認できた刺激は少ないものの、いずれも 1kHz, 2kHz の組み合わせで出現し、当該周波数帯が空間同異判定において重要な聴覚の手がかりとなる可能性が示唆された。

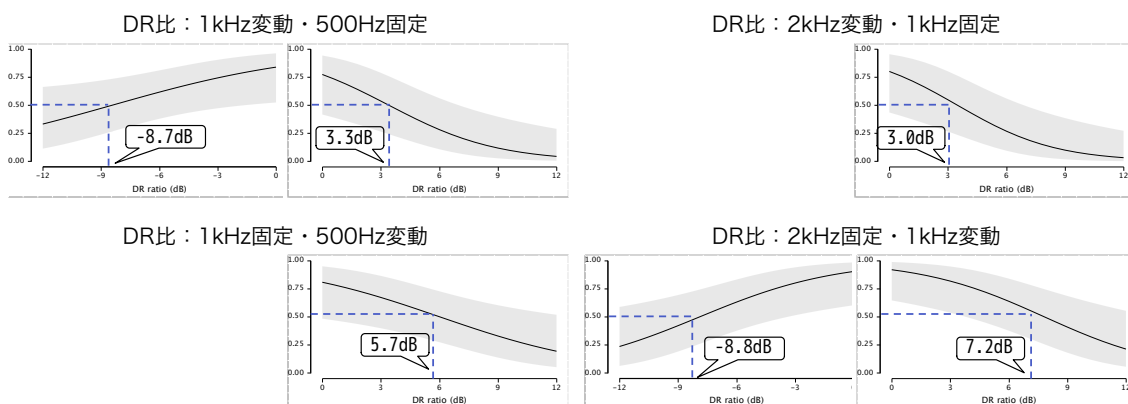


図 14. 1kHz 帯・2kHz 帯を含む刺激のロジスティック回帰曲線および推定許容 DR 比

## DR 比変動パート別 統計的パフォーマンス 総覧

ここまで実験 III の全結果を一覧しつつ、全体的な傾向について結果を確認してきたが、さらに周波数帯域ごとの傾向につき詳細に確認を行うため、高域パートの DR 比が変動する刺激に対する結果と、低域パートの DR 比が変動する刺激に対する結果を分けて考察を進める。最初に統計的パフォーマンスにつき、表 22 および表 23 に分割して示す。いずれも DR 比増加部における推定許容範囲 DR 比が 12dB を超過する結果を削除したものである。

高域パートの DR 比が変動する刺激に対する回答 42set に対し 10set (約 23.8%)が統計的に良好なパフォーマンスを示した。一方、低域パートの DR 比が変動する刺激に対する回答 42set に対し、17set (約 40.5%)が統計的に良好なパフォーマンスが確認できた。

表 22. 高域パートの DR 比が変動する刺激に対する統計的パフォーマンス

		High Part (DRr change)											
		250		500		1k		2k		4k		8k	
		minus	plus	minus	plus	minus	plus	minus	plus	minus	plus	minus	plus
Low Part (DRr 0dB fixed)	125		wna				a						wna
	250						na		wna		wa		w
	500					w	wna		w				
	1k								wa				
	2k												wa
	4k												wna

表 23. 低域パートの DR 比が変動する刺激に対する統計的パフォーマンス

		High Part (DRr 0dB fixed)											
		250		500		1k		2k		4k		8k	
		DR r	minus	plus	minus	plus	minus	plus	minus	plus	minus	plus	minus
Low Part (DRr change)	125		wa	w	w	w	n	wa		w	w	wna	wna
	250				w	w					n	w	w
	500						wa	w		wna		w	
	1k							w	wna	w	n	w	w
	2k										w	wna	na
	4k											wna	na

## DR 比変動パート別 推定許容範囲 DR 比

上記の選出手順を経て、分析対象が絞り込まれた刺激に対応する推定許容範囲 DR 比を示す。高域パート DR 比変動部は 10set 中 9set が DR 比増加部で有意性が検出され、推定許容範囲 DR 比は  $mean=2.9\text{dB}$ ,  $SD=1.2$  となった。8kHz 帯が高音パートを担当する際の推定許容範囲 DR 比は  $mean=4.0\text{dB}$ ,  $SD=0.5$  という結果となった。

表 24. 高域パート DR 比変動部の推定許容範囲 DR 比

		High Part (DRr change)											
		250		500		1k		2k		4k		8k	
		minus	plus	minus	plus	minus	plus	minus	plus	minus	plus	minus	plus
Low Part (DRr 0dB fixed)	125												4.3
	250							1.3		1.1			3.8
	500					-8.3	3.3	1.9					
	1k							3.0					
	2k												4.5
	4k												3.3

低域パート DR 比変動部は、17set 中 15set が DR 比減少部で有意性が検出され、推定許容範囲 DR 比は  $mean=-4.7\text{dB}$ ,  $SD=1.7$  となった。8kHz 帯が高音パートを担当する際の、対応する低域パート全てに統計的有意性が認められ、推定許容範囲 DR 比は  $mean=-4.5\text{dB}$ ,  $SD=0.6$  という結果を得た。

表 25. 低域パート DR 比変動部の推定許容範囲 DR 比

		High Part (DRr 0dB fixed)											
		250		500		1k		2k		4k		8k	
		minus	plus	minus	plus	minus	plus	minus	plus	minus	plus	minus	plus
Low Part (DRr change)	125			-1.0		-4.8		-4.8		-3.5		-5.3	
	250					-6.2						-4.5	
	500						5.7	-3.5		-4.3		-3.8	
	1k							-8.8	7.3	-6.3		-4.3	
	2k											-3.9	
	4k											-5.2	

1kHz帯が高域パートを担当する際の対応する低域パートにおける推定許容範囲 DR 比は  $mean=-5.5dB$ ,  $SD=0.7$  となり、同様に 2kHz帯が高域パートを担当する際の対応する低域パートにおける推定許容範囲 DR 比は  $mean=-5.7dB$ ,  $SD=2.3$  となった。この帯域は、対応する低域パートの空間同異判定の鋭敏さにも影響を与えると共に、空間同一性知覚の許容範囲 DR 比を約-5.5dB 近辺に安定させる効果が強く示唆された。

表 26. 1kHz帯および2kHz帯が高域パートを担当する際の対応する低域パート DR 比変動部における推定許容範囲 DR 比

		High Part (DRr 0dB fixed)											
		250		500		1k		2k		4k		8k	
		minus	plus	minus	plus	minus	plus	minus	plus	minus	plus	minus	plus
Low Part (DRr change)	125			-1.0		-4.8		-4.8		-3.5		-5.3	
	250					-6.2						-4.5	
	500						5.7	-3.5		-4.3		-3.8	
	1k							-8.8	7.3	-6.3		-4.3	
	2k											-3.9	
	4k												-5.2

DR比減少部  
平均 -5.5dB (SD=0.7)

DR比減少部  
平均 -5.7dB (SD=2.3)

このように厳密化すると全体の傾向がより明確化する。空間同異判定が頻繁に認められる周波数帯域の組み合わせは、1kHz, 2kHz, 8kHz であり、いずれも高域パートは DR 比プラスで、低域パートは DR 比マイナスで空間の同異判定が敏感になるという傾向がみられる。

高域パートの DR 増加部が 9set、低域パートの DR 減少部が 15 パートであった。印象反転が起きる確率を 50%として対応する DR 比を算出すると、高域パート DR 増加部では  $mean=2.9dB$ ,  $SD=1.2$ 、低域パート DR 減少部では  $mean=-4.7dB$ ,  $SD=1.7$  となった。8kHz帯が高域パートのリズムを担当したパターンでは 10set で良好な結果が得られ、8kHzの DR 比増加部で  $mean=4.0dB$ ,  $SD=0.5$  が得られた。8kHz帯に組み合わせられた低域パートでは、全ての帯域にて DR 比減少部で統計的有意性が確認で

き、 $mean=-4.5dB$ ,  $SD=0.6$ であった。

8kHz 以外の 17set においては、500Hz-1kHz の組み合わせ、1kHz-2kHz の組み合わせで統計的に良好な値を得た set が多く、描かれる曲線も空間同異判定が明確に行われることを示唆した。この組み合わせのみならず、1kHz が高域パートを担当している際の低域パートの DR 比減少部では  $mean=-5.5dB$ ,  $SD=0.7$  となり、2kHz が高域パートを担当している際の低域パート DR 比減少部では  $mean=-5.7dB$ ,  $SD=2.3$  が算出された。この結果より、DR 比 0dB の 1kHz, 2kHz が合奏として高音部に存在する際に、低域パートの DR 比減少部における空間同意判定の鋭敏さに寄与し、知覚的な許容範囲を -5.5dB 程度に安定させる効果があることが示唆される。

例外としては、高域パートの DR 比マイナス変動では 500Hz-1kHz ペア 1 対のみであり、低域パートの DR 比プラス変動では 500Hz-1kHz ペア、1kHz-2kHz ペアの 2 対のみである。空間同一性知覚の聴覚的手がかり (auditory cue) として敏感に察知している可能性が考えられる。

#### 5.4.3 正負逆転箇所できている印象評価についての検討

ロジスティック回帰分析の結果、回帰の精度が高くない箇所に関する種々の傾向がうかがえる。着目する基準として、DR 比が正変動している箇所でも負値の DR 比が算出されるか、あるいはその逆の正負逆転が発生している箇所である。これらの結果が確認できる周波数帯は、空間同異判定という観点からは攪乱要因として予想される。他方、空間同一性知覚という観点からは同一性保持要因と捉えることもできる。全体傾向を捉えるため、正負逆転現象が発生する刺激について、再度全体の一覧表を元に確認を行う。次頁の示す表 27 において背景に着色した部分が、正負逆転現象が確認できた刺激である。

表 27. 正負逆転現象が確認できた刺激

		High Part												
		250		500		1k		2k		4k		8k		
		DR ratio	minus	plus	minus	plus	minus	plus	minus	plus	minus	plus		
Low Part	125	高域パート変動	2.637	-1.632	-0.659	-49.524	-12.517	-14.405	-14.955	-9.629	7.094	-9.600	-10.295	4.312
		低域パート変動	-13.322	-17.103	-0.987	15.155	-4.850	16.836	-4.750	13.769	-3.477	14.986	-5.343	29.306
	250	高域パート変動			7.087	-26.731	15.810	0.263	-23.800	1.306	3.524	1.105	-8.000	-3.756
		低域パート変動			-5.050	18.283	-6.222	13.165	-2.654	7.822	-2.715	14.899	-4.514	18.952
	500	高域パート変動					-8.279	3.283	-47.294	1.897	8.640	-6.417	-47.864	4.960
		低域パート変動					-4.902	5.704	-3.459	9.239	-4.262	9.813	-3.846	11.915
	1k	高域パート変動							-15.027	3.000	-41.273	1.719	-10.781	-3.946
		低域パート変動							-8.820	7.281	-6.265	16.105	-4.318	25.689
	2k	高域パート変動									10.360	0.598	-10.243	4.520
		低域パート変動									-7.069	18.417	-3.898	16.946
	4k	高域パート変動											-12.223	3.310
		低域パート変動											-5.206	11.957

この中で特に4kHz帯については、高域パートを担当する際のDR比減少部で5set中4setにて発生していることが確認できる。この部分のロジスティック回帰曲線につき、以下の図15にまとめる。

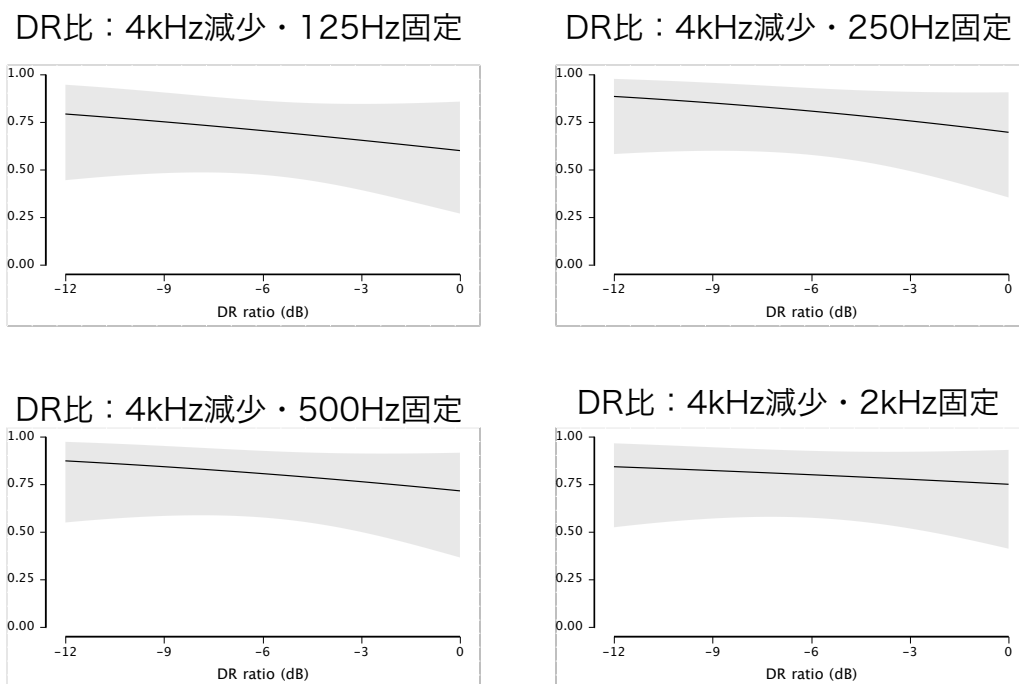


図 15. 高域パートを4kHz帯が担当する際のDR比減少部のロジスティック回帰曲線一覧

いずれもDR比がマイナスになるにつれて空間同一性が強く感知され、許容範囲が大きく広がる結果となった。他の周波数帯のDR比変動が空間同一性の判定に対する聴覚的手掛かりになったとしても、4kHz帯に関しては物理的に不自然な残響量が付与



されたとしても空間同一性が保持され、合奏の一部として自然であると判定される可能性が高いことが示唆された。

125Hz 帯が低域パートを担当する際の、対応する高域パートにもいくつか正負逆転現象が発生するが、DR 比増加部・減少部で統一するような傾向は把握しにくいものの、近接する 250Hz 帯の DR 比減少部では、4kHz 帯と同様に空間同一性知覚の許容範囲が広がる傾向が確認できた。

DR比：250Hz減少・125Hz固定

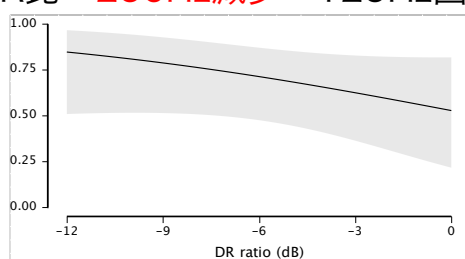


図 16. 低域パート 125Hz 帯の際の 250Hz 帯 DR 比減少部のロジスティック回帰曲線

その他の刺激については、総じて空間同一性知覚は低く、DR 比変動に応じた傾向についても確認は困難であった。統計的有意性が認められない部分でもあるため、4k Hz 帯とは違い、一様な傾向もなく、被験者ごとの回答に大きなばらつきが生まれてしまっていることも考えられる。このため、一種の攪乱要因と捉えることもできるが、この結果が強い論拠になるとは言い難い状況であることが確認できた。

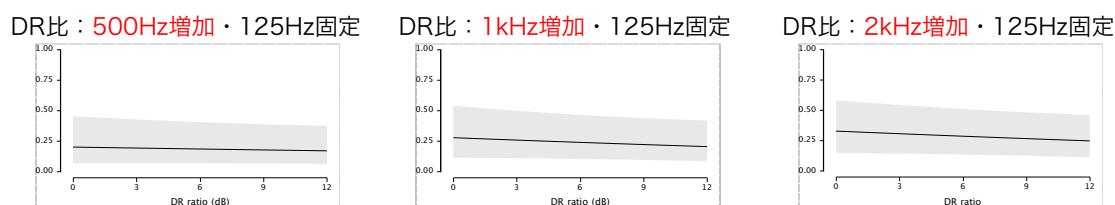


図 17. 低域パートを 125Hz 帯が担当する際の 500Hz 帯, 1kHz 帯, 2kHz 帯 DR 比増加部のロジスティック回帰曲線

以上から、回帰の精度が高くない箇所に関する種々の傾向がうかがえる。着目する基準として、DR 比が正変動している箇所で負値の DR 比が算出されるか、あるいはその逆の正負逆転が発生している箇所である。顕著な周波数帯としては 125

Hz に対する各種周波数帯と、4kHz が高域パートを奏する際の DR 比マイナスへの変動である。

いずれもグラフの形状を確認してみると、125Hz に対する高域パートは傾きがほぼ認められないか、想定する曲線と逆の傾きをしている。この結果より、125Hz が DR 比 0dB で呈示されている場合、合奏の相手となる別パートの DR 比変動はある程度キャンセルされ、空間印象の同異判定という観点からすると攪乱要因となる可能性が考えられる。

4kHz の場合は、いずれも DR 比がマイナスになるにつれて空間同一性が強く感知され、許容範囲が大きく広がる結果となった。他の周波数帯の DR 比変動が空間同一性の判定に対する聴覚的手掛かりになったとしても、4kHz 帯に関しては物理的に不自然な残響量が付与されたとしても空間同一性が保持され、合奏の一部として自然であると判定される可能性が高いことが示唆された。

## 第6章 総合考察

異なる残響量が混在する状況における空間同一性知覚の許容範囲の調査を行うために、直接音と間接音のバランス（DR比）を変化させる実験を、3種の知覚実験および1つの音響指標の測定を通じて比較した。ここまで得られた成果を踏まえ、総合的な考察を行い、本研究の結論を示す。

### 6.1 全体の結果のまとめ

本研究では、異なる残響量が混在する環境下における空間同一性知覚の調査を目的として設定した。本論における空間同一性知覚を「複数演奏者が同じ空間で演奏しているように聞こえる感覚」として定義し、空間印象を想起させる主要な音響指標として残響量の変動を想定した。本論では残響量を客観的に示す指標として、直接音と間接音のエネルギー比であるDR比を用いることとした。

既往研究により、DR比の変動は距離感に影響することが知られている。これらの研究の多くで直接音として想定されている演奏音源は、演奏規模の大小を問わず単一のまとまった音源として扱われており、その1つの音源に対して畳み込みに用いられるインパルス応答も合奏曲一つに対して単一の室内環境で収録されたものが使用される。これに対し、合奏の個別パートに異なる残響量を付与する亀川の研究では、距離感・奥行き感について詳細に調査するため、音源と受音点の距離に対応するよう直接音の音圧を変化させた上で間接音を付与する実験が行われた。

本研究では空間同一性知覚について調査するため、DR比変動に距離感の違いの判断の範囲を越えたDR比の変動を用いた。具体的には合奏を構成するパートを最小である二重奏に限定して各パートの直接音の音圧を固定し、インパルス応答の畳み込みによって付与する残響量のみを変動させた。

DR比の変動による複数の実験刺激から得られる評価値は「二重奏の2名の奏者が同じ空間で演奏している」「二重奏の2名の奏者が異なる空間で演奏している」という2値の評価値となる。デシベルで表現されるDR比の変動を説明変数、2値の空間同異判定を応答変数とする場合、実験計画時では応答変数に対して説明変数が丁度可聴

差異の閾値のように明確に表されるか未知であった。このような研究対象に対する統計的分析手法として、説明変数の変動による2値の事象発生を確率的に表現可能であり、数式の変換操作により、任意の発生確率に対応する説明変数の具体的数値も算出できることが利点であるロジスティック回帰分析を用いることとした。

立案した実験分析手続きにより、空間同異判定の測定可能性と得られる結果に一定の傾向がみられるかを予備的に検証するため、ヘッドフォン聴による実験を実施した。ヴァイオリン二重奏、リコーダーとハープの二重奏の2曲を素材とし、東京藝術大学奏楽堂ステージ奥上部で得られた3チャンネルのインパルス応答を反射音作成に利用した。ロジスティック回帰分析の結果、Wald統計量による $p$ 値はヴァイオリン二重奏曲ではDR比増加・減少いずれにおいても両パートで0.05以下となり、AUCは0.7以上となった。リコーダーとハープの二重奏では、リコーダーパートにおいてDR比増加・減少いずれにおいても0.05以下となり、AUCは0.7以上となった。許容範囲として50%の被験者が空間同一性を知覚するDR比とすると、ヴァイオリン二重奏曲では、1st Vn.のDR比減少部では-11.2dB、DR比増加部では17.8dBとなり、2nd Vn.のDR減少部では-6.5dB、DR比増加部では23.8dBとなった。リコーダーとハープの二重奏曲では、リコーダーのDR減少部で-3.1dB、DR増加部で23.8dBとなった。

いずれも統計的には一定の成果は得られ、空間同異の印象が反転すると推定されるDR比の値も算出可能であり、距離感・奥行き感での研究で用いられる $\pm 6$ dB以上の値となった。この結果により、空間同一性が知覚されている範囲でのDR比変動は距離感・奥行き感として知覚され、それ以上の変動値によって空間同一性の感覚自体が失われるという可能性が示唆された。ただしこの結果はヘッドフォンによる2チャンネル呈示環境に限定されたものである可能性は否定できず、スピーカ聴で実施された既往研究との関係については、明確な判断はこの時点では困難であると判断した。Nagelkerke  $R^2$ の値は、2nd Vn.のDR減少部で得られた0.402を除いてはそれほど良好な値とは言えず、グラフの傾きも明確に閾値として解釈可能なほど急峻なものではなかった。これは被験者ごとの回答のばらつきを示し、被験者によっては空間同異判定がDR比の増減に対して必ずしも線形に対応しない可能性も考えられる。

予備実験であるヘッドフォン聴実験の結果を踏まえ、複数会場・異なる属性による被験者によるスピーカ聴実験を実施した。ヘッドフォン聴に向けて準備した2チャンネル刺激は、直接音を両耳聴で中央に定位する仮想音像として準備し、間接音は左・中央・右で個別に生成した3チャンネルの音声を2チャンネルにダウンミックスして作成した。DR比の変動による印象測定の刺激としては、DR比処理工程が多くなり、呈示方法としても改善の余地があった。このためスピーカ聴では前面3チャンネルを用いて、直接音は中央スピーカのみ配置し、反射音はインパルス応答収録のマイク配置に応じて左・中央・右に個別に配置する刺激を作成した。この刺激により、直接音と間接音を呈示するスピーカを別にすることで、DR比の変動の影響をより精緻に測定できると考えた。

得られた回答を応答変数、DR比の変動と会場の違いを説明変数としてロジスティック回帰分析を行ったところ、1st Vn. のDR比減少部、リコーダーのDR比減少部、ハープのDR比減少・増加部双方に会場の違いとの交絡作用が確認できた。これは会場による回答の差を示し、結果はいずれも東京工科大学会場で「同じ空間での演奏」という回答が多いという点で有意差が検出された。交絡作用がみられなかった部分の統計量としては、1st Vn.のDR比増加部、2nd Vn.のDR比減少・増加部、リコーダーのDR比増加部いずれも、Wald統計量による $p$ はいずれも0.001以下となり、AUCも0.7以上が検出された。印象反転が起きる確率を50%として対応するDR比を算出すると、1st Vn. のDR比増加部では20.3dB、2nd Vn. のDR減少部では-8.0dB、増加部では11.8dB、リコーダーのDR比増加部では8.9dBとなった。

交絡作用については、想定される主な要因として、被験者属性および会場の音響特性の違いの2点が考えられる。実験計画の時点では、被験者のどのような属性が空間同一性知覚の鋭敏さに影響するかは未知であったため、対応する属性に関する回答項目については準備に至らなかった。そこでスピーカ聴実験の事後検証として、2会場の音響特性を測定し、客観指標にて差分を検証することで交絡作用の要因である可能性を確認した。測定の結果、 $C_{80}$ についてはISO3382-1に規定されるJNDである1dB以上の乖離がみられ、明瞭性について2会場には違いがあると考えられる。 $T_{30}$ については国際規格にて数値的なJNDは規定されていないもの、東京藝術大学会場が全帯域

にわたりおよそ 0.164 から 0.177 秒のほぼ均一な残響時間が得られる一方で、東京工科大学会場は東京藝術大学会場に比べて低域の残響時間は長く、高域は早く減衰するという値が得られた。会場の物理的音響特性、特に周波数帯域ごとに違いが確認できたことから、交絡作用について何らかの影響をおよぼしている可能性は無視できない。交絡作用を考慮したロジスティック回帰分析の結果は、東京工科大学会場の結果の方が空間同一性知覚の確率が高いこと示しており、空間同一性知覚について許容範囲を広げる方向に作用しているという可能性が示唆されることから、周波数特性をより精緻に確認できる刺激の必要性が明確となった。

これを受け、周波数帯域ごとに刺激を分離しつつ、2パートの合奏であることを被験者に示すため、短時間の時間長を持つオクターブバンドノイズを用いて打楽器を模した単音を素材とした実験を行った。125Hz から 8kHz までの全 7 種の帯域による単音を打楽器音に見立て、高音部と低音部の 2 パートを想定した打楽器合奏のフレーズとして組み合わせたリズムパターンを作成した。この刺激を用いて 3 チャンネルスピーカによるスピーカ聴実験を実施した。帯域の組み合わせ 21 種全てに、DR 比変動 19 種の刺激を準備し、合計 399 刺激を用いた実験により、84 のロジスティック曲線および係数を得た。会場は良好な音響環境が得られる東京藝術大学会場に固定し、被験者は東京藝術大学・東京工科大学の学生に協力を得て被験者属性による交絡作用の確認を行った。得られた 8set の結果中、交絡作用が検出されたのは 2set のみであり、考察が可能になるほどの一様な傾向は確認できなかった。

Wald 統計量による  $p$  値、AUC、Nagelkerke  $R^2$  によるスクリーニングおよび外挿の過大評価の確認により、実験 III から得られた総合的な空間同一性の推定許容範囲 DR 比は、およそ以下のような結果が得られた。

良好な分析結果として選出できたのは 27set であり、高域パートの DR 増加部が 9set、低域パートの DR 減少部が 15 パートであった。印象反転が起きる確率を 50% として対応する DR 比を算出すると、高域パート DR 増加部では  $mean=2.9\text{dB}$ ,  $SD=1.2$ 、低域パート DR 減少部では  $mean=-4.7\text{dB}$ ,  $SD=1.7$  となった。8kHz 帯が高域パートのリズムを担当したパターンでは 10set で良好な結果が得られ、8kHz の DR 比増加部で  $mean=4.0\text{dB}$ ,  $SD=0.5$  が得られ、8kHz 帯に組み合わされた低域パートでは、全

ての帯域にて DR 比減少部で統計的有意性が確認でき、 $mean=-4.5dB$ ,  $SD=0.6$  であった。

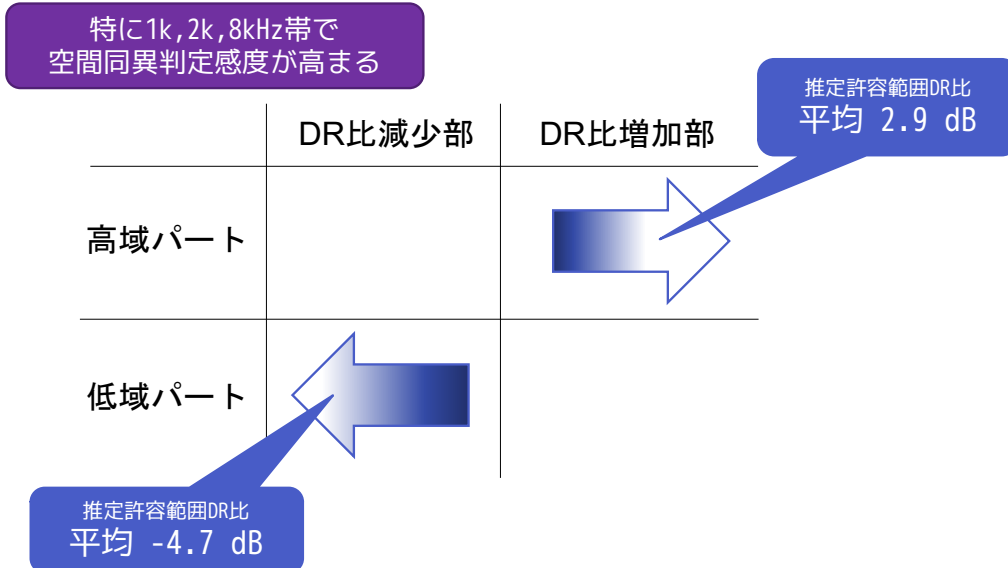


図 18. 実験 III から得られた空間同一性知覚の許容範囲 DR 比まとめ

8kHz 以外の 17set においては、500Hz-1kHz の組み合わせ、1kHz-2kHz の組み合わせで統計的に良好な値を得た set が多く、描かれる曲線も空間同異判定が明確に行われることを示唆した。この組み合わせのみならず、1kHz が高域パートを担当している際の低域パートの DR 比減少部では  $mean=-5.5dB$ ,  $SD=0.7$  となり、2kHz が高域パートを担当している際の低域パート DR 比減少部では  $mean=-5.7dB$ ,  $SD=2.3$  が算出された。この結果より、DR 比 0dB の 1kHz, 2kHz が合奏として高音部に存在する際に、低域パートの DR 比減少部における空間同意判定の鋭敏さに寄与し、知覚的な許容範囲を -5.5dB 程度に安定させる効果があることが示唆される。3チャンネルのスピーカ呈示により実験の追加検証である 2 会場の音響特性比較では、500Hz, 1kHz, 2kHz いずれも差が発生していることから、この帯域が聴覚の手がかりとして鋭敏に同異判定に寄与していると考えられる。

統計的には良好な値が得られなかった周波数帯であっても、他の刺激セットに対してロジスティック回帰曲線で逆の傾きが発生している組み合わせのグラフに着目すると、傾向として興味深い帯域が現れた。高周波帯域では、4kHz 帯が高域パートを担当

する際の DR 比減少部では、一貫して「同じ空間で演奏している」という印象が継続している。4kHz 帯が合奏の高音部に存在する際に、残響量が多く付与されていたとしても、合奏の一部としての空間同一性が高く保持され続ける要因の一つとなることが考えられる。低周波帯域では 125Hz が低域パートを担当する際に、125Hz の DR 比増加部にて比較的高い空間同一性が保持される一方、125Hz に対する高域パートでは 250Hz, 500Hz, 4kHz の DR 比減少部で高い空間同一性が保持される結果となった。他方、高域パートの DR 比増加部では空間同一性が一貫して低い値となっており、合奏中に DR 比 0dB の 125Hz 帯域が存在している場合、組み合わせられる高域パートの DR 比は 0dB よりも少ない方が、空間同一性がより高く知覚される可能性が考えられる。

## 6.2 周波数特性からみた実験 I・実験 II の考察

一連の知覚実験および音響指標測定で得られた結果を通じ、二重奏の収録において異なる残響量が混在する際の空間同一性知覚の許容範囲につき、以下のような結論に至った。

持続系楽器同士であるヴァイオリン二重奏に関しては、ロジスティック回帰曲線による推定の精度が比較的高く、DR 比増加部で約 11dB 以上、DR 比減少部で約 -8dB 以下で 50%の被験者が「異なる空間で演奏している」という印象の転換が発生する。ただし旋律である高域パートの DR 減少部では、DR 比にかかわらず高い空間同一性知覚が保持される傾向にあり、その許容範囲は大きく広がる。持続系楽器による主旋律・減衰系楽器による伴奏による編成であるリコーダーとハープの二重奏曲では、持続系楽器で旋律を担当するリコーダーの DR 増加部で約 8dB 以上で 50%の被験者が「異なる空間で演奏している」という印象の転換が発生する。減衰系楽器であるハープによる伴奏では空間の同異判断に大きなばらつきがみられるものの、DR 比減少部において高い空間同一性が保持され、その許容範囲は大きく広がる。被験者 50%で推定した DR 比はいずれも、DR 比変動による距離感・奥行き感で調査された変動範囲である  $\pm 6$ dB からさらに大きな変動値であり、一定の DR 比までは距離感・奥行き感に、それ以上の変動が空間同一性の判断に影響することが示唆された。音響特徴をより詳細に検討するため、周波数帯域ごとの音響素材を打楽器に見立てた 2 パートの合



奏を想定したリズムパターンによる知覚実験により、ロジスティック回帰分析で良好な結果が得られた範囲に限り、高域パート DR 増加部では  $mean=2.943\text{dB}$ ,  $SD=1.18$ 、低域パート DR 減少部では  $mean=-4.681\text{dB}$ ,  $SD=1.653$  が算出された。一般的な合奏に比べ、許容範囲は狭まる結果となった。空間同異判定にて主要な聴覚的てがかりとなる帯域は 1kHz, 2kHz, 8kHz であり、この帯域の DR 比変動はもとより、この帯域に組み合わされる帯域の DR 比変動も併せて、空間同異判定に影響を与える可能性が高い。他方、空間同一性知覚の許容範囲を広げる可能性がある帯域は 4kHz と 125Hz であり、4kHz は高域パートでの DR 比減少部で、125Hz は上に組み合わされる帯域での DR 比減少部で許容範囲が大きく広がる結果となった。

### 6.3 課題と展望

本研究を通じて、空間同一性知覚という心理的現象を DR 比の変動という客観指標によって説明することが一定程度は達成できた。ただし、楽器の種別・音響特徴および編成規模、楽曲の違いによる楽想・テンポ・音域など、多種多様な音楽にそのまま本研究の結果が転用可能かは未検証であり、さらなる検証が必要である。この問題に部分的にでも対応するため、実験 III ではリズムパターンという音楽的要素は保持しつつ、より抽象的で、楽器音よりは算術的に操作がしやすいオクターブバンドノイズによる実験を行った。周波数帯ごとの影響について一定の調査は完了したものの、この結果を可逆的に実験 I, II の刺激に適応するためには、単一の楽器音を持つ周波数帯ごとの減衰時間や、合奏全体の時間的な周波数成分の変化など、楽器音響・音楽音響の物理特性を加味したさらなるモデル化と併せて考慮する必要があると考えられる。

音楽的コンテキストの影響については、亀川の研究と同じ刺激材料を活用することで、先行研究との対応が容易になり、距離感・奥行き感と空間同異判定双方の関連性について DR 比の変動に絞って考察ができ、音楽的コンテキストの差は低減できたと考えられる。双方の研究成果により、今後はさらなる楽器の組み合わせや楽曲様式、合奏規模に対して、DR 比変動がもたらす総合的な空間印象の研究につなげることが可能になったと考えられる。実験 III では、高域パート、低域パートのリズムパターンを固定したが、これは比較的音価が長いリズムを低域が、音価が短いリズムを高域が

担当するという西欧藝術音楽の通例を用いた。この範囲において、一定の成果が確認できたが、高域・低域の音楽的な役割として、古典的な通例にとらわれない自由な様式の音楽に対応するため、高域・低域を逆転させた音楽刺激を利用した実験などについても検討を進めたい。

空間同一性知覚の許容範囲が広がると推定される 4kHz 帯については、実験 II の 2 会場の音響特性比較では、東京工科大学会場の  $C_{80}$  が 4kHz, 8kHz 帯で相対的に高く、 $T_{30}$  が 4kHz, 8kHz 帯で相対的に短くなったが、こうした環境下において空間同一性知覚も高まったという結果についての解釈は、現時点では決定的な結論には至っていない。4kHz 帯の影響だけではなく、相対的に空間同一性知覚の手てがかりと考えられる 1kHz, 2kHz 帯の差の影響の方が大きいとも考えられ、 $C_{80}$  と  $T_{30}$  では  $C_{80}$ 、すなわち明瞭性の方が強く感じ取られ 4kHz 帯が強調されたことから空間同一性知覚の許容範囲が相対的に広がった可能性があるとも考えられる。こうした課題に対しては、周波数帯域ごとの知覚への寄与度、音響指標ごとの寄与度など、多変量を想定したモデル化へ拡張することで対応可能であると考えられる。

両会場で音響指標として大きく差が検出された 125Hz 帯、250Hz 帯についても、同様の課題が浮上したと考えられる。特に 125Hz 帯はそれ自体ではなく、相対的に高域に組み合わせられる帯域への印象の影響が大きいことが示唆された。これを検証するためには、125Hz の DR 比も複数準備し、組み合わせる帯域も DR 比を変動させた新たな実験が必要となると考えられ、これについても今後検討を進めたい。250Hz 帯ではほとんどの帯域との組み合わせや DR 比変動で、統計的有意性をもった傾向や結果を得ることができなかった。空間同一性知覚に対して判別要因となるのか、攪乱要因となるのか自体が不明なままである。音楽的には C4 近辺の音高であり出現頻度が高い音域でもあるため、音楽音響研究として、この帯域が空間印象に与える影響ついて、さらなる検証を進めたい。

## 参考文献

- [1] F. Rumsey, "Spatial Quality Evaluation for Reproduced Sound: Terminology, Meaning, and a Scene-Based Paradigm," *Journal of Audio Engineering Society*, 50(9), 651–666 (2002).
- [2] 亀川徹, 「サラウンドの収録方法」, 沢口真生・中原雅考・亀川徹『サラウンド入門』 東京藝術大学出版会, 151-174 (2010).
- [3] P. Zahorik, "Direct-to-reverberant energy ratio sensitivity," *Journal of Acoustic Society of America*, 112(5), 2110–2117 (2002).
- [4] W. C. Sabine. *The Collected Papers on Acoustics*, volume 33. University of California, Los Angeles, 1922.
- [5] L. Cremer. *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik: Band I, Geometrische Raumakustik*. Hirzel-Velgard, Stuttgart, 1948.
- [6] R. Thiele. Directional Distribution of Reflections in Rooms (In German). *Acustica*, 3(1):291–302, 1953.
- [7] A. Marshall. A note on the importance of room cross-section in concert halls. *Journal of Sound and Vibration*, 1967.
- [8] M. Barron, "The subjective effects of first reflections in concert halls – The need for lateral reflections," *Journal of Sound and Vibration*, 15(4), 475–494 (1971).
- [9] P. Damaske and Y. Ando. Interaural cross correlation for multichannel loudspeaker reproduction. *Acta Acustica united with Acustica*, 1972.
- [10] J. Bradley. Review of objective room acoustics measures and future needs. *Applied Acoustics*, 72(10):713–720, Oct. 2011.
- [11] C. Guastavino and B. F. G. Katz. Perceptual evaluation of multi-dimensional spatial audio reproduction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(2):1105, 2004.
- [12] D. Dubois. Categories as acts of meaning: The case of categories in olfaction and audition. *Cognitive Science Quarterly*, 1(4):35–38, 2000.
- [13] A. H. Marshall and M. Barron. Spatial responsiveness in concert halls and the origins of spatial impression. *Applied Acoustics*, 62(2):91–108, Feb. 2001.
- [14] L. Beranek. Concert hall acoustics 2008. *Journal of the Audio Engineering Society*, 56(7), 2008.
- [15] ISO 3382-1:2009, *Acoustics Measurement of Room Acoustic Parameters Part 1: Performance Spaces* (International Standards Organization, Geneva, Switzerland, 2009). 3, 2009.
- [16] R. Hawkes and H. Douglas. Subjective acoustic experience in concert auditoria. *Acta Acustica united with Acustica*, 1971.
- [17] M. Barron. Subjective study of British symphony concert halls. *Acta Acustica united with Acustica*, 66(1), 1988.
- [18] A. Sotiropoulou. Concert hall acoustic evaluations by ordinary concert-goers: I, Multi-dimensional description of evaluations. *Acta Acustica united with Acustica*, 81(1):10–19, 1995.
- [19] L. Beranek. *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*. Springer, New York, 2004.
- [20] R. Kurer, G. Plenge, and H. Wilkens. Correct Spatial Sound Perception Rendered by a Special 2-Channel Recording Method. In *Audio Engineering Society Convention 37*, Berlin, Germany, Oct. 1969. Audio Engineering Society.

- [21] M. R. Schroeder, D. Gottlob, and K. F. Siebrasse. Comparative Study of European Concert halls: correlation of Subjective preference with Geometric and Acoustic Parameters. *Journal of the Acoustical Society of America*, 56:1195–1201, 1974.
- [22] G. Soulodre and J. Bradley. Subjective evaluation of new room acoustic measures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98(1):294–301, 1995.
- [23] O. Warusfel, C. Lavandier, and J. Jullien. Perception of coloration and spatial effects in room acoustics of the 13th International Congress on Acoustics, 1989.
- [24] J. Bradley and G. Soulodre. Objective Measures of Listener Envelopment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98(5):2590–2597, 1995.
- [25] Y. Choi and F. Fricke. A comparison of subjective assessments of recorded music and computer simulated auralizations in two auditoria. *Acta acustica united with acustica*, 2006.
- [26] J. Pätynen and T. Lokki. Evaluation of concert hall auralization with virtual symphony orchestra. *Building Acoustics*, 18(3- 4):349–366, 2011.
- [27] F. Rumsey. Subjective assessment of the spatial attributes of reproduced sound. In 15th International Conference: Audio Engineering Society, 1998.
- [28] J. Berg and F. Rumsey. Spatial attribute identification and scaling by repertory grid technique and other methods. 16th International Conference: Spatial Audio, 1999.
- [29] J. Berg and F. Rumsey. Correlation between emotive, descriptive and naturalness attributes in subjective data relating to spatial sound reproduction. In Proceedings of the 109th Convention of the Audio Engineering Society, Pitea, 2000.
- [30] F. Rumsey and J. Berg. Verification and correlation of attributes used for describing the spatial quality of reproduced sound. In The 19th International Conference: Surround Sound, 2001.
- [31] N. Zacharov and K. Koivuniemi. Unravelling the perception of spatial sound reproduction: Language development, verbal protocol analysis and listener training. In Audio Engineering Society Convention 111, Tampere, Finland, 2001.
- [32] A. Haapaniemi, and T. Lokki, "Identifying concert halls from source presence vs room presence," *Journal of Acoustic Society of America*, 135, EL311 (2014); [https://doi: 10.1121/1.4879671](https://doi.org/10.1121/1.4879671)
- [33] L. Shtrepi, A. Astolfi, G. D'Antonio, and M. Guski, "Objective and perceptual evaluation of distance-dependent scattered sound effects in a small variable-acoustics hall," *Journal of Acoustic Society of America*, 108(2), 3651–3662 (2016).
- [34] N. Kaplanis, S. Bech, S. H. Jensen, and T. v. Waterschoot, "Perception of Reverberation in Small Rooms: A Literature Study," *Proc. AES 55th Int. Conf.: Spatial Audio*, P-3 (2014); Permalink: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=17348>
- [35] C. Pop and D. Cabrera. Auditory room size perception for real rooms. Proceedings of ACOUSTICS, Australia, (November), 2005.
- [36] T. Lokki, J. Pätynen, S. Tervo, S. Siltanen, and L. Savioja. Engaging concert hall acoustics is made up of temporal envelope preserving reflections. *Journal of the Acoustical Society of America - Express Letters*, 129(6):EL223–8, June 2011.
- [37] M. Yadav, D. Cabrera, L. Miranda, W. L. Martens, D. Lee, and R. Collins. Investigating Auditory Room Size Perception with Autophonic Stimuli. In The 135th Convention of the Audio Engineering Society, volume 39, pages 101–105, New York, USA, 2013. Audio Engineering Society.
- [38] EBU Rec.562-3, Subjective Assessment of Sound Quality, European Broadcasting Union, Geneva, Switzerland (1990). Technical report.
- [39] T. Lokki, J. Pätynen, A. Kuusinen, and S. Tervo. Disentangling preference ratings of concert hall acoustics using subjective sensory profiles. *Journal of the Acoustical Society of America*, 132(5):3148–3161, 2012.

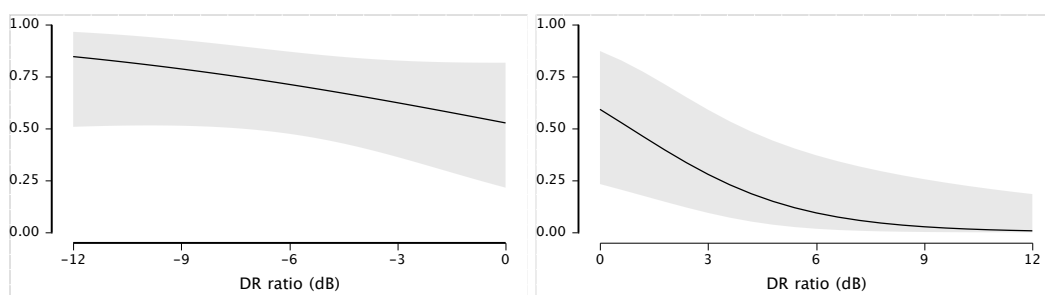
- [40] C. Mendonca, J. Lamas, T. Barker, G. Campos, P. Dias, V. Pulkki, C. Silva, and J. a. Santos. Reflection orders and auditory distance. *Proceedings of Meetings on Acoustics, ICA2013*, 19:050041–050041, 2013.
- [41] A. Giménez, R. M. Cibrián, and S. Cerdá. Subjective Assessment of Concert Halls: a Common Vocabulary for Music Lovers and Acousticians. *Archives of Acoustics*, 37(3):331–340, Jan. 2012.
- [42] B. Blesser and L. Salter. *Spaces Speak Are you Listening*. MIT Press, 2007.
- [43] T. Letowski. *Sound Quality Assessment: Cardinal Concepts*. 87th Convention of the Audio Engineering Society, 1989.
- [44] D. Griesinger. Objective Measures of Spaciousness and Envelopment. *Audio Engineering Society Conference 16th International Conference Spatial Sound Reproduction*, 1–15, 1999.
- [45] M. Barron. Using the standard on objective measures of concert auditoria, ISO 3382, to give reliable results. *Acoustical Science and Technology*, 26(2):162–169, 2005.
- [46] S. Kim, D. Ko, A. Nagendra, and W. Woszczyk. Subjective Evaluation of Multichannel Sound with Surround-Height Channels. In *Audio Engineering Society Convention 135*, pages 1–7. Audio Engineering Society, 2013.
- [47] M. Barron and a.H. Marshall. Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: The derivation of a physical measure. *Journal of Sound and Vibration*, 77(2):211–232, July 1981.
- [48] J. Blauert, W. Lindemann, R.-U. Bochum, and F. Republic. Auditory spaciousness: Some further psychoacoustic analyses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 533–542, 1986.
- [49] M. Morimoto and Z. Maekawa. Auditory spaciousness and envelopment. *Proc. 13th Int. Congr. on Acoustics*, 1989.
- [50] J. Blauert. *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*. MIT Press, Cambridge, revised ed edition, 1997.
- [51] F. Bilsen. Psychophysical observations on spaciousness. *10th International Congress of Acoustics*, Sydney, 1980.
- [52] F. H. Bilsen and van den Berg. Spaciousness and its(psycho-) acoustical parameters. In *Proceedings of the 12 International Congress on Acoustics*, Toronto, Canada, 1986.
- [53] T. Okano, L. L. Beranek, and T. Hidaka. Relations among in-teraural cross-correlation coefficient (IACCE), lateral fraction (LFE), and apparent source width (ASW) in concert halls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104(1):255–65, July 1998.
- [54] M. Barron. Late lateral energy fractions and the envelopment question in concert halls. *Applied Acoustics*, 62(2):185–202, Feb. 2001.
- [55] T. Hidaka and L. Beranek. Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan, and the Americas. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(1):368–83, Jan. 2000.
- [56] A. Lindau, V. Erbes, S. Lepa, H. Maempel, F. Brinkman, and S. Weinzierl, “A Spatial Audio Quality Inventory (SAQI),” *Acta Acustica united with Acustica*, 100, pp. 984–994 (2014).
- [57] S. Weinzierl, S. Lepa and D. Ackermann, "A measuring instrument for the auditory perception of rooms: The Room Acoustical Quality Inventory (RAQI)," *Journal of Acoustic Society of America*, 144 (3), 1245–1257 (2018); <https://doi.org/10.1121/1.5051453>
- [58] E. Larsen, N. Iyer, C. R. Lansing, and A. S. Feng, "On the minimum audible difference in direct-to-reverberant energy ratio," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(1): 450-461, 2013.
- [59] 亀川徹, "音楽再生における距離感・奥行き感に関する研究," 九州大学博士論文 (2016).
- [60] 田原靖彦, "残響時間弁別閾の数式モデル," *日本音響学会誌*, 42(9), 690-697 (1986).

- [61] 田原靖彦, "指数減衰残響の長さ感に及ぼす中心周波数及びダイナミックレンジの影響," 日本音響学会誌, 43(7), 467-477 (1987).
- [62] 田原靖彦, "聴覚の特性に基づく室内残響設計・評価法," 日本音響学会誌, 47(10), 711-722 (1991).
- [63] 中原雅考, 「サラウンド再生環境の構築」, 沢口真生・中原雅考・亀川徹『サラウンド入門』 東京芸術大学出版会, 26-112 (2010).
- [64] W.v. Reichardt, and W. Schmidt, "The audible steps of spatial impression in music performance," *Acta Acustica united with Acustica*, 17, 175-179 (1966).
- [65] Zieliński, S., Rumsey, F. and Bech, S. (2008) On Some Biases Encountered in Modern Audio Quality Listening Test - A Review. *Journal of Audio Engineering Society*, 56(6), 427-451.
- [66] A. Farina, "Advancements in impulse response measurements by sine sweeps," *In Proceedings of AES 122nd Convention*, convention paper 7121 (2007); Permalink: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14106>
- [67] 藤本卓也, "低域バンドでの SN 比改善を目的とした TSP 信号に関する検討." 日本音響学会研究発表会講演論文集, pp.433-432. 1999 年 9 月.
- [68] 藤本卓也, "低域バンドでの SN 比改善を目的とした TSP 信号に関する検討 -高調波歪の除去-." 日本音響学会研究発表会講演論文集, pp.555-556. 2000 年 3 月.
- [69] 守谷直也, 金田豊, "Logarithmic TSP 信号を用いた高調波歪の検討." 日本音響学会研究発表会講演論文集, pp.637-638. 2004 年 3 月.
- [70] インパルス応答予測・計測 WG, "室内音響指標ベンチマーク コラム 4 : フィルタリングが先か? 切断が先か? — エネルギー比を求める —," 日本建築学会 環境工学本委員会 音環境運営委員会 室内音響小委員会, [http://news-sv.aij.or.jp/kankyo/s24/benchmark/column4/column4\\_j.html](http://news-sv.aij.or.jp/kankyo/s24/benchmark/column4/column4_j.html) (最終確認日: 2022 年 8 月 31 日)
- [71] インパルス応答予測・計測 WG, "室内音響指標ベンチマーク コラム 5 : 音響指標の算出に用いるオクターブバンドフィルタの設計," 日本建築学会 環境工学本委員会 音環境運営委員会 室内音響小委員会, [http://news-sv.aij.or.jp/kankyo/s24/benchmark/column5/column5\\_j.html](http://news-sv.aij.or.jp/kankyo/s24/benchmark/column5/column5_j.html) (最終確認日: 2022 年 8 月 31 日)
- [72] M. R. Schroeder, "New Method of Measuring Reverberation Time," *Journal of Acoustic Society of America*, 409-412 (1965).
- [73] 日本規格協会, "JIS C 1513-1:2020 (IEC 61260-1)," (2020).
- [74] International Telecommunication Union, "Recommendation ITU-R BS.1770-4," (2015).

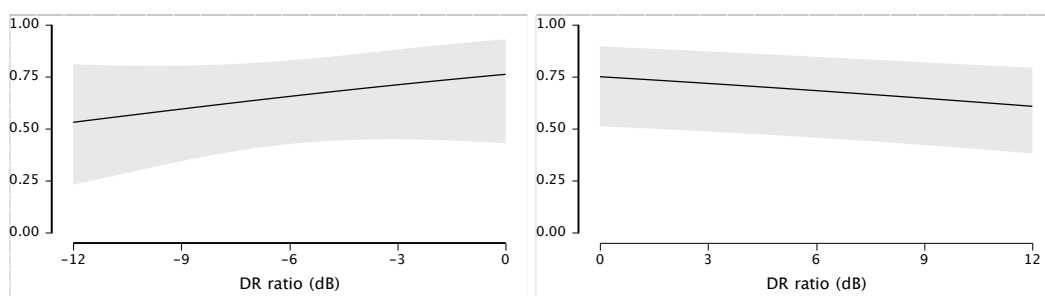
## 附録 実験 III ロジスティック回帰曲線一覧

125 Hz & 250 Hz

DR 比 : 125Hz 0dB 固定・250Hz 変動

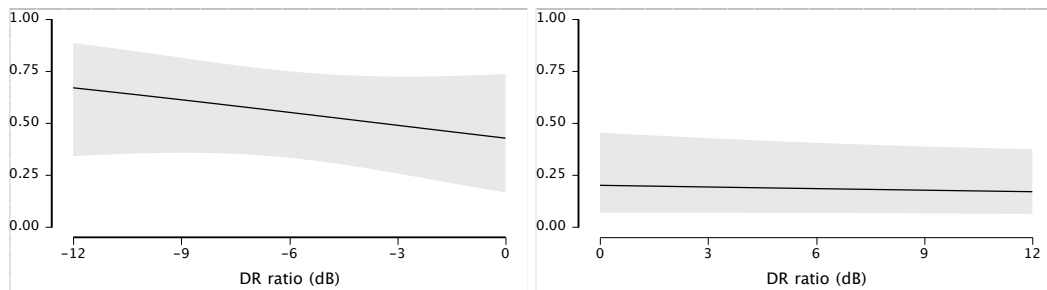


DR 比 : 125Hz 変動・250Hz 0dB 固定

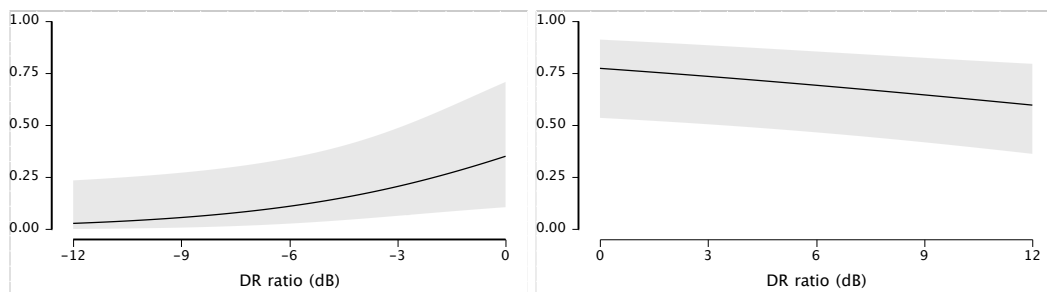


### 125 Hz & 500 Hz

DR 比：125Hz 0dB 固定・500Hz 変動

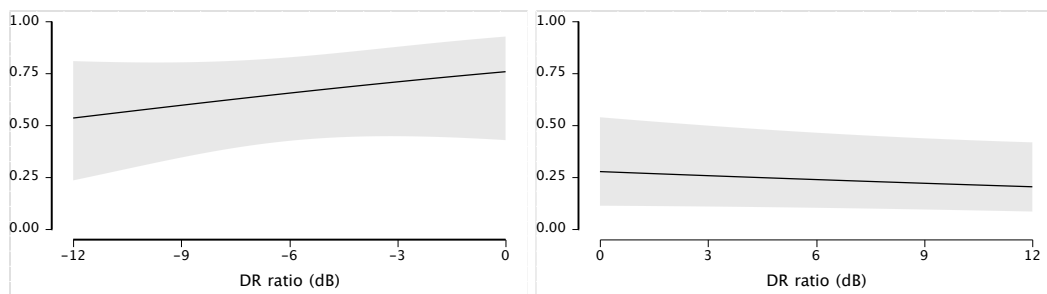


DR 比：125Hz 変動・500Hz 0dB 固定

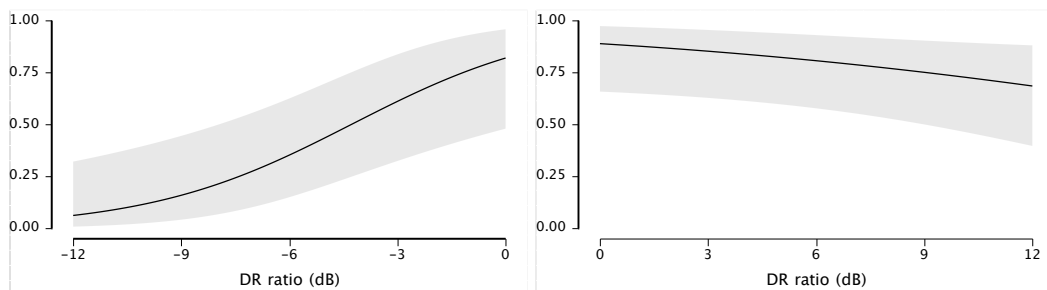


### 125 Hz & 1kHz

DR 比：125Hz 0dB 固定・1kHz 変動



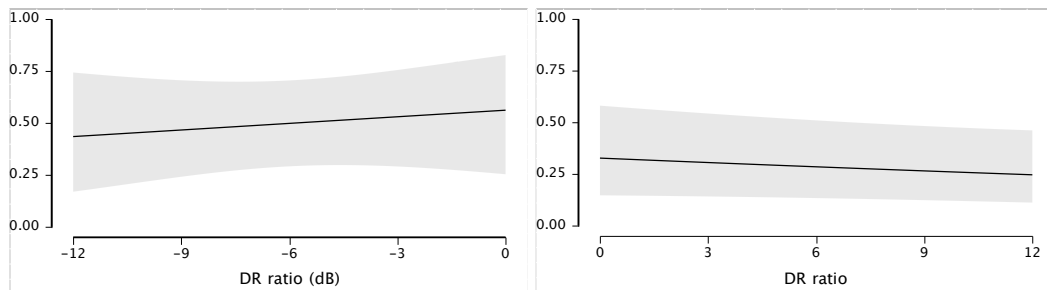
DR 比：125Hz 変動・1kHz 0dB 固定



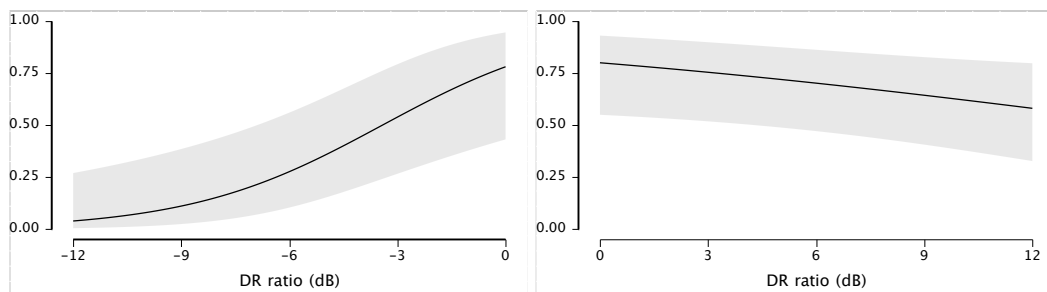


### 125 Hz & 2kHz

DR 比：125Hz 0dB 固定・2kHz 変動

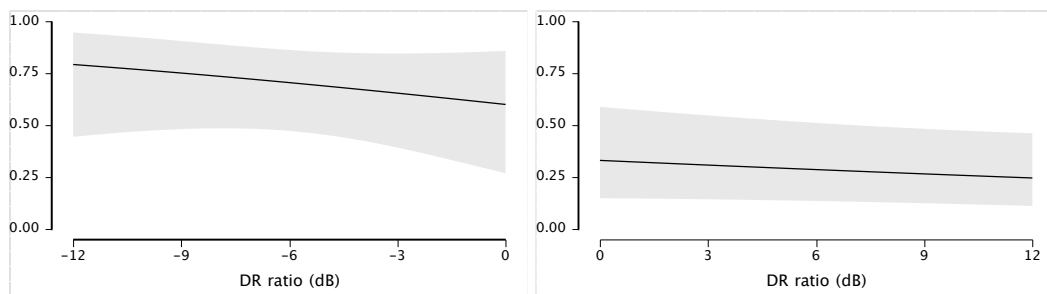


DR 比：125Hz 変動・2kHz 0dB 固定

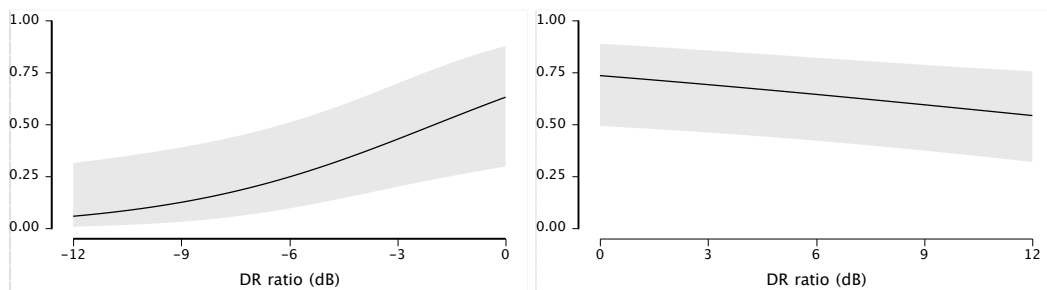


### 125 & 4k

DR 比：125Hz 0dB 固定・4kHz 変動

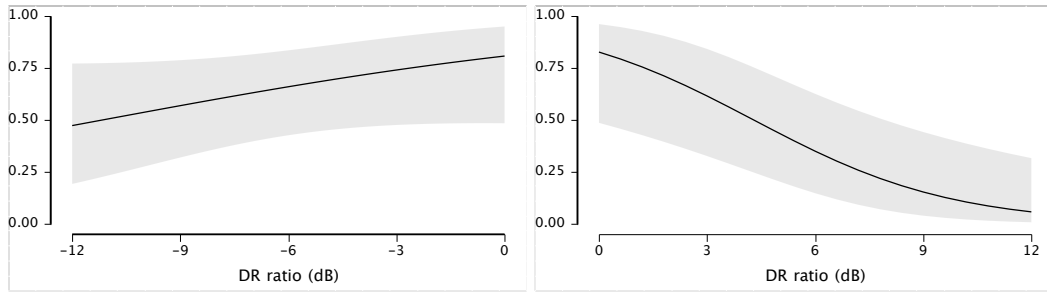


DR 比：125Hz 変動・4kHz 0dB 固定

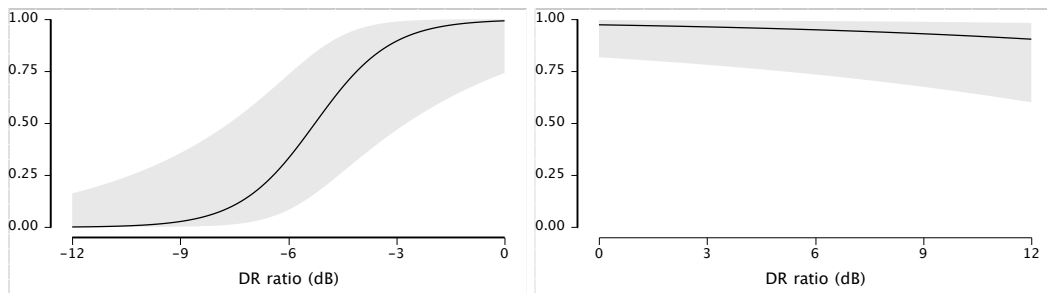


### 125 Hz & 8kHz

DR 比：125 Hz 0dB 固定・8kHz 変動

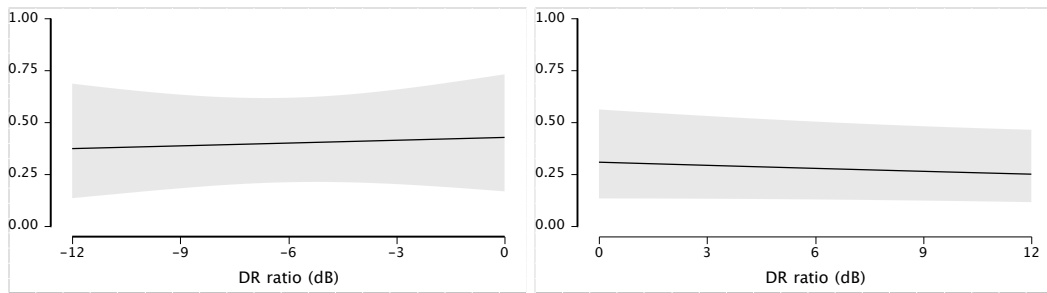


DR 比：125Hz 変動・8kHz 0dB 固定

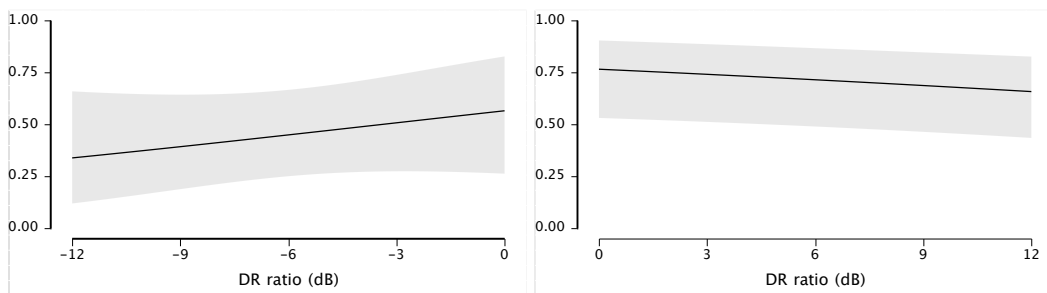


### 250 Hz & 500 Hz

DR 比：250 Hz 0dB 固定・500Hz 変動

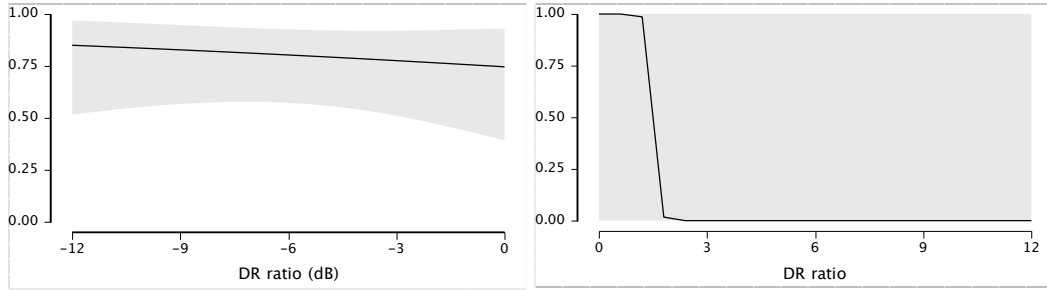


DR 比：250Hz 変動・500Hz 0dB 固定

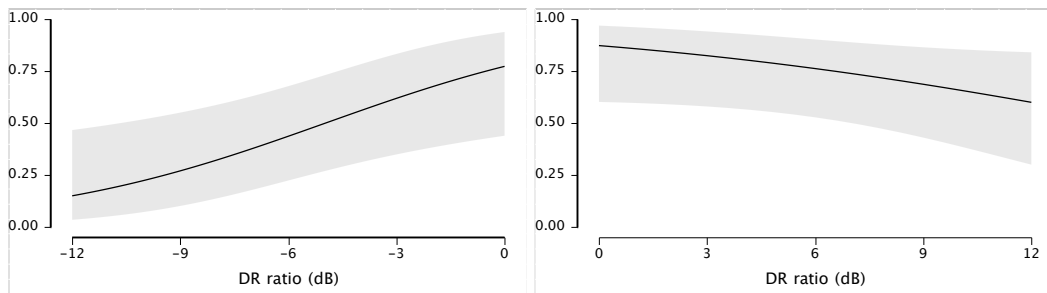


**250 Hz & 1kHz**

**DR 比：250 Hz 0dB 固定・1kHz 変動**

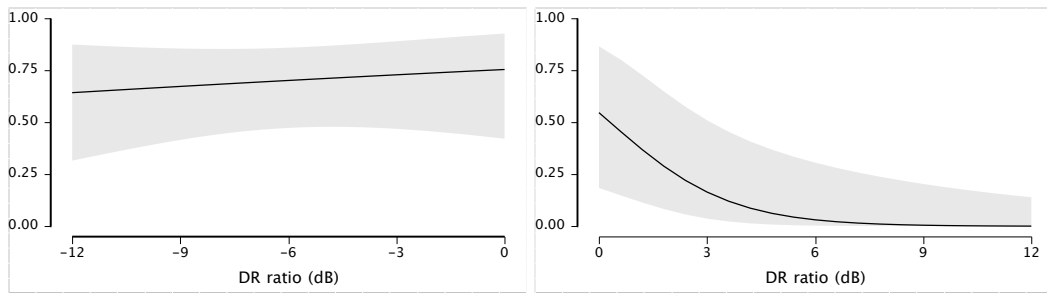


**DR 比：250Hz 変動・1kHz 0dB 固定**

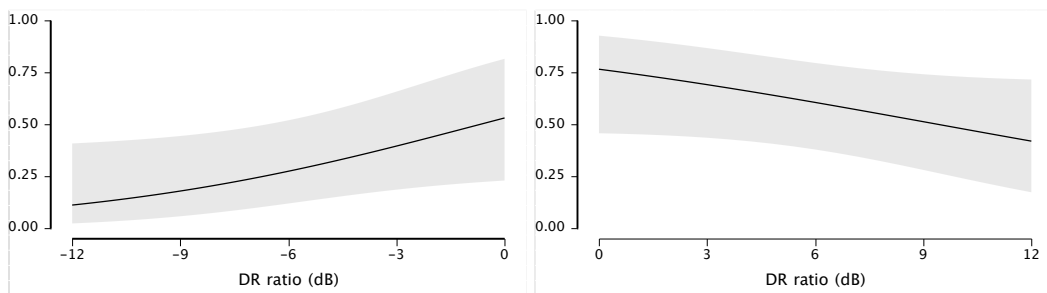


**250 Hz & 2kHz**

**DR 比：250 Hz 0dB 固定・2kHz 変動**

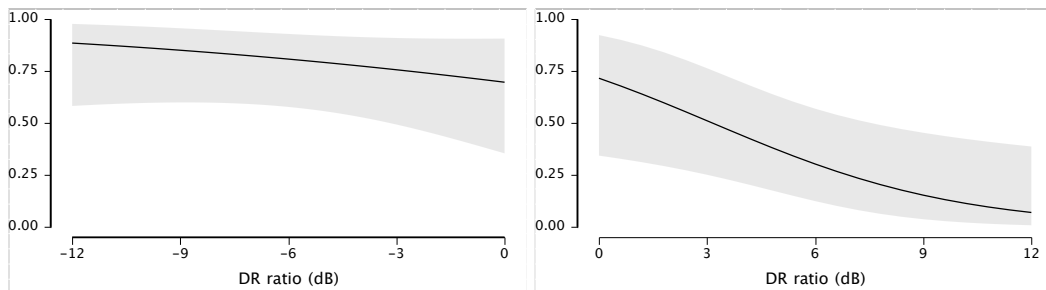


**DR 比：250Hz 変動・2kHz 0dB 固定**

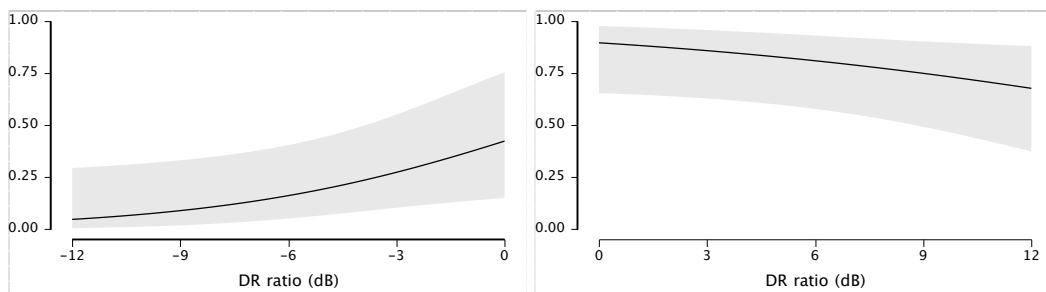


### 250 Hz & 4kHz

DR 比：250 Hz 0dB 固定・4kHz 変動

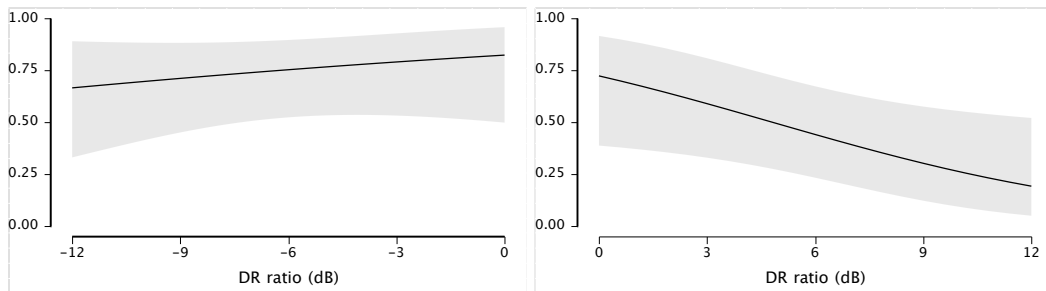


DR 比：250Hz 変動・4kHz 0dB 固定

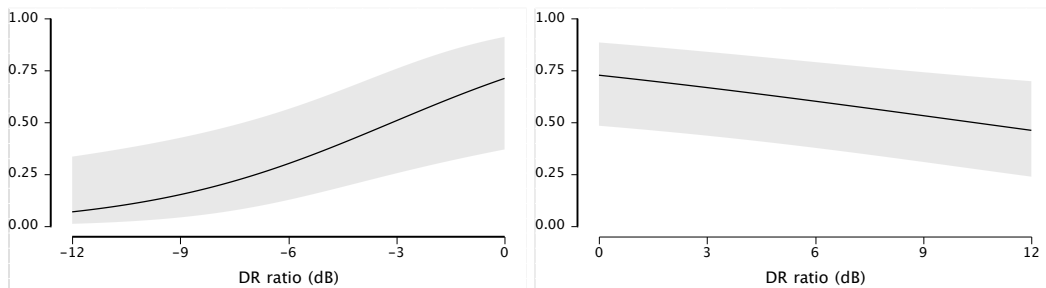


### 250 Hz & 8kHz

DR 比：250 Hz 0dB 固定・8kHz 変動

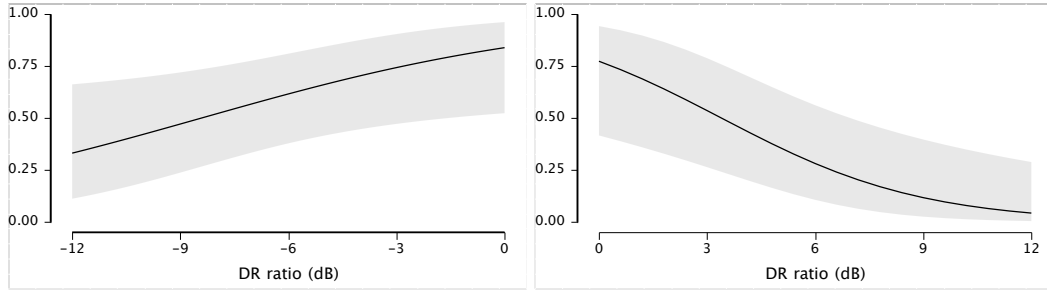


DR 比：250 Hz 変動・8kHz 0dB 固定

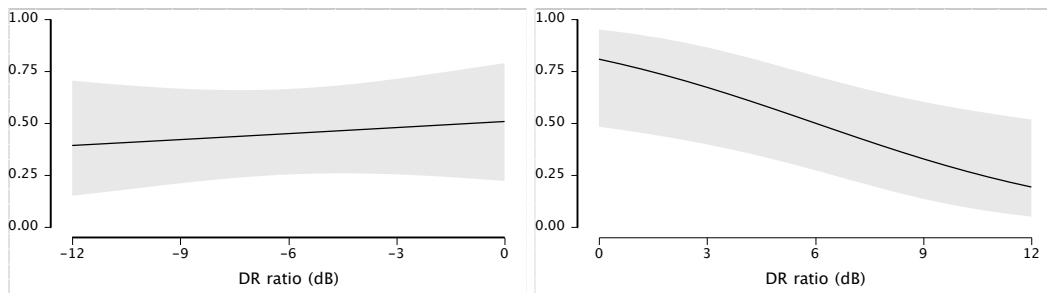


**500 Hz & 1kHz**

**DR 比 : 500 Hz 0dB 固定・1kHz 変動**

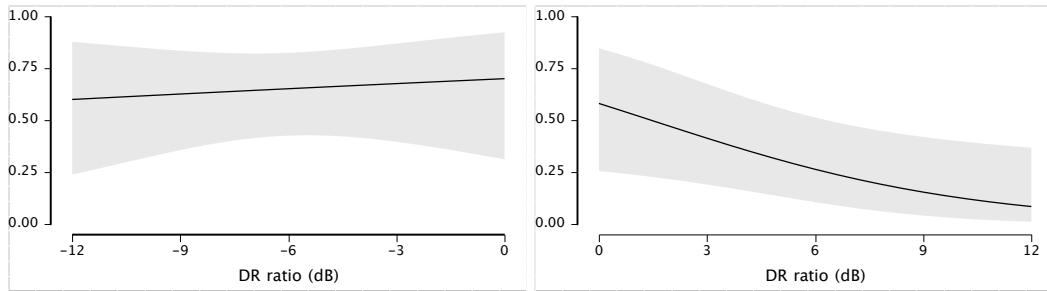


**DR 比 : 500 Hz 変動・1kHz 0dB 固定**

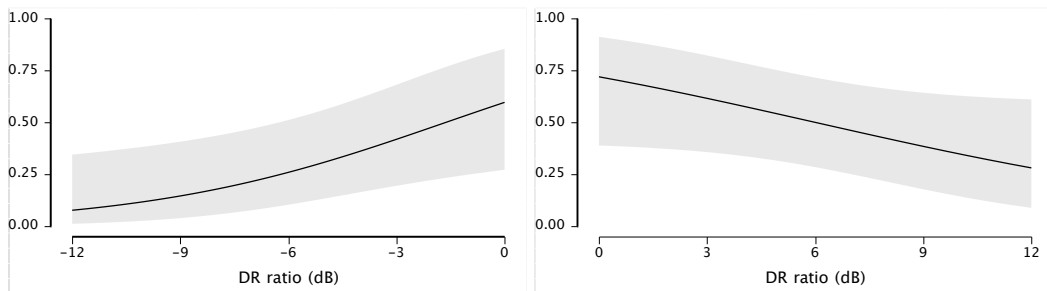


**500 Hz & 2kHz**

**DR 比 : 500 Hz 0dB 固定・2kHz 変動**

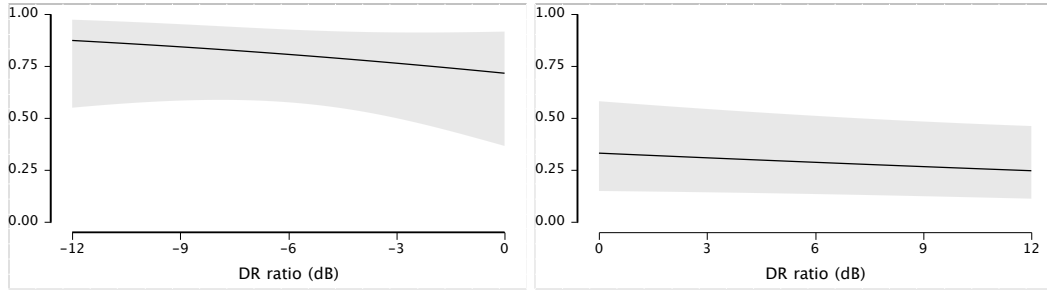


**DR 比 : 500Hz 変動・2kHz 0dB 固定**

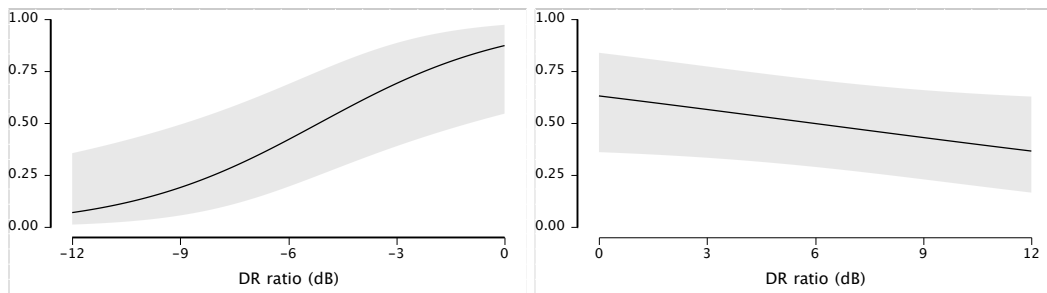


**500 Hz & 4kHz**

**DR 比：500 Hz 0dB 固定・4kHz 変動**

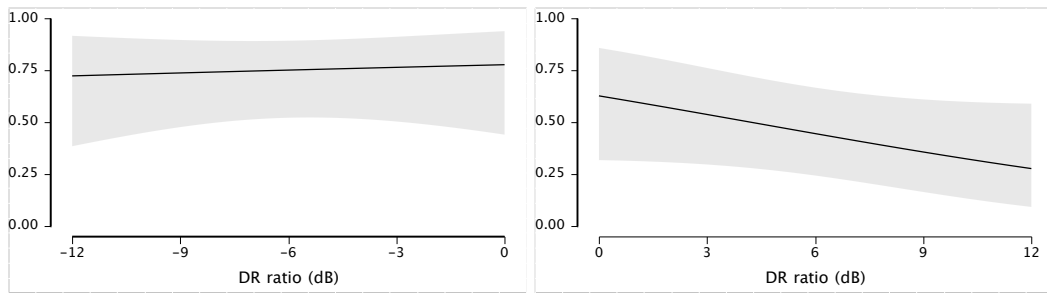


**DR 比：500 Hz 変動・4kHz 0dB 固定**

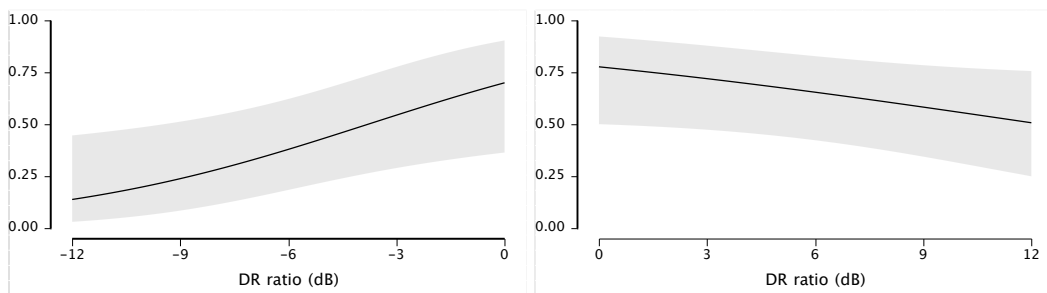


**500 Hz & 8kHz**

**DR 比：500 Hz 0dB 固定・8kHz 変動**

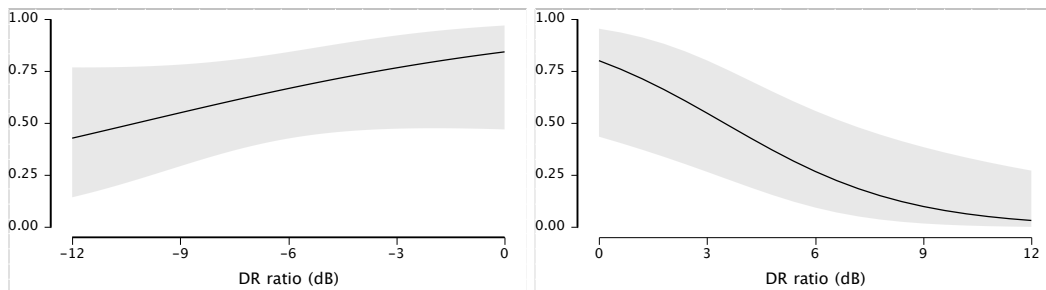


**DR 比：500 Hz 変動・8kHz 0dB 固定**

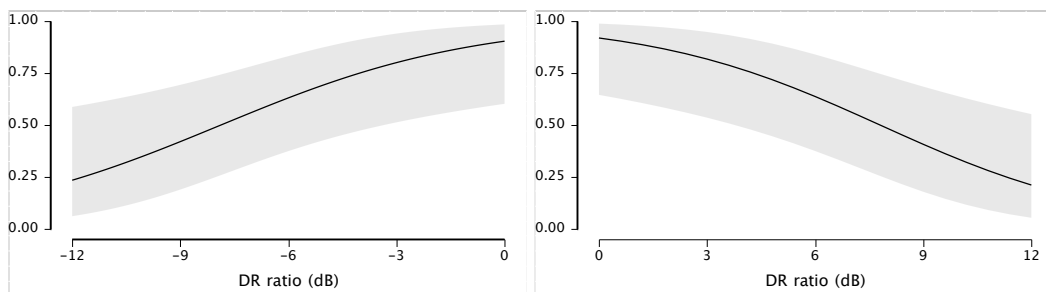


### 1kHz & 2kHz

DR 比 : 1kHz 0dB 固定・2kHz 変動

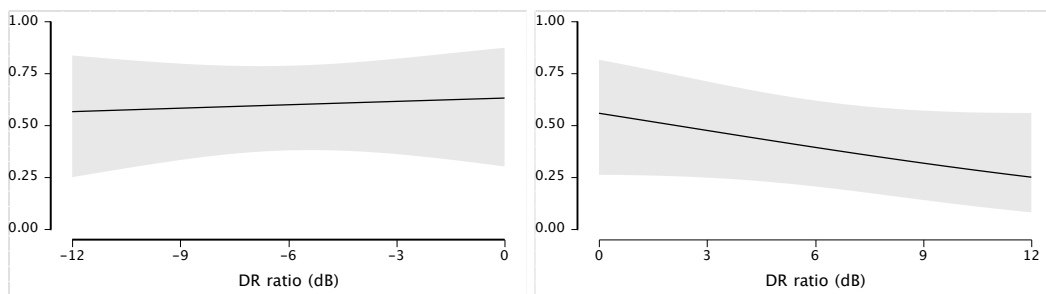


DR 比 : 1kHz 変動・2kHz 0dB 固定

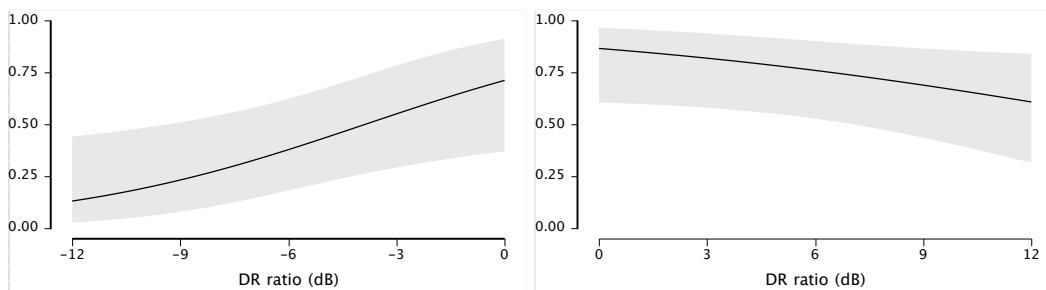


### 1kHz & 4kHz

DR 比 : 1kHz 0dB 固定・4kHz 変動

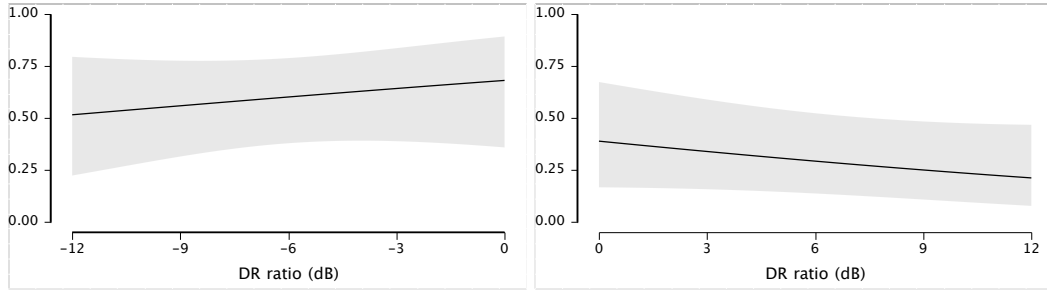


DR 比 : 1kHz 変動・4kHz 0dB 固定

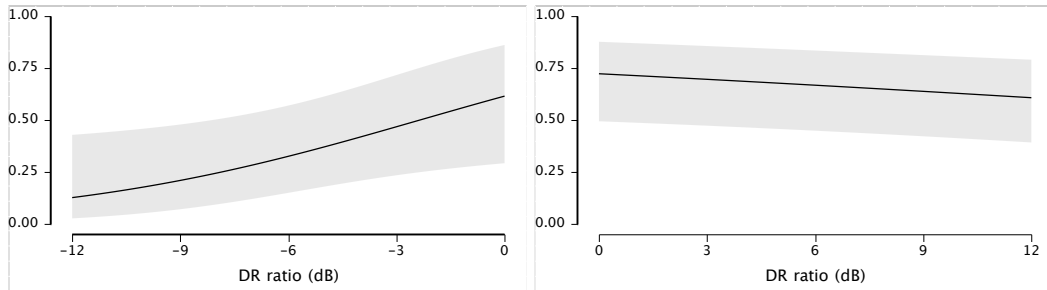


### 1kHz & 8kHz

DR 比：1kHz 0dB 固定・8kHz 変動

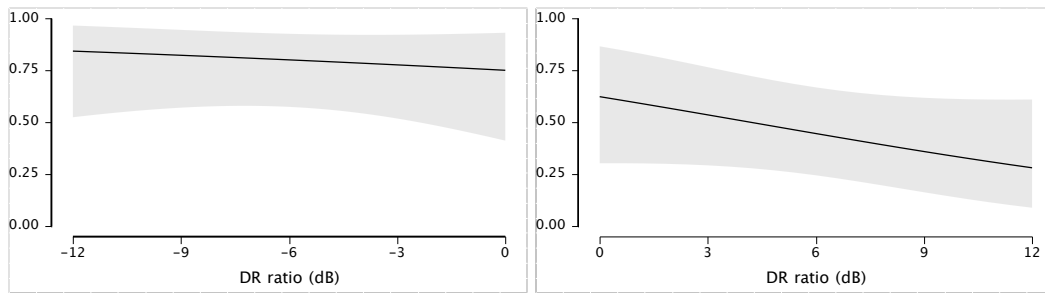


DR 比：1kHz 変動・8kHz 0dB 固定

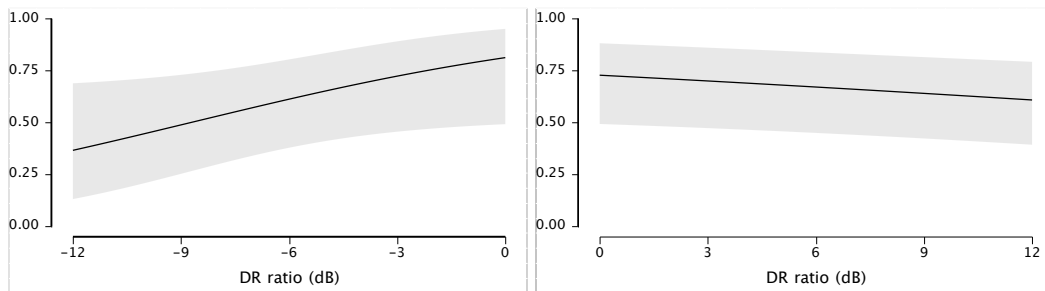


### 2kHz & 4kHz

DR 比：2kHz 0dB 固定・4kHz 変動



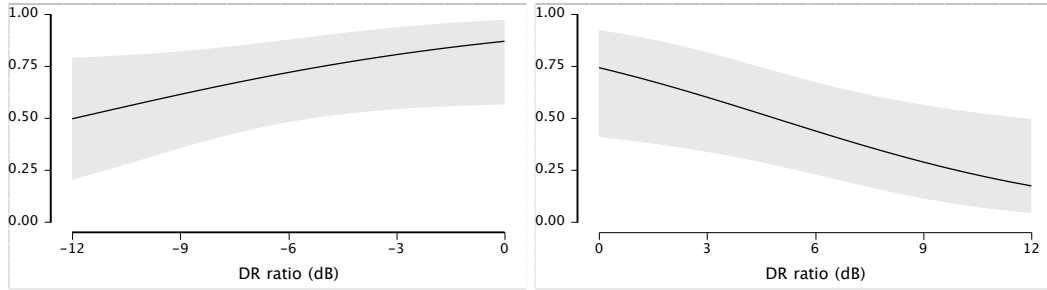
DR 比：2kHz 変動・4kHz 0dB 固定



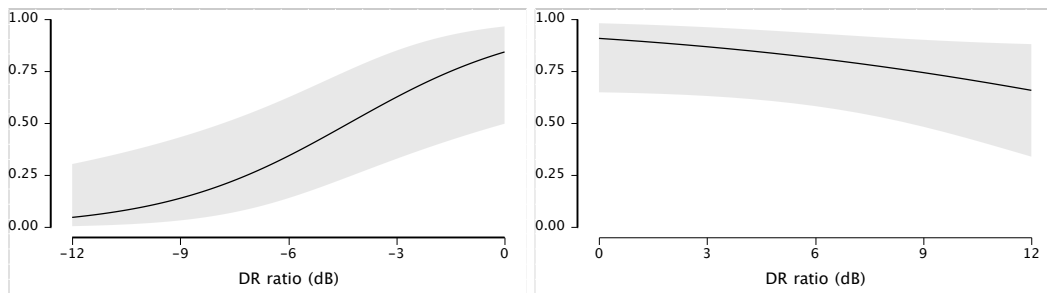


### 2kHz & 8kHz

DR 比：2kHz 0dB 固定・8kHz 変動

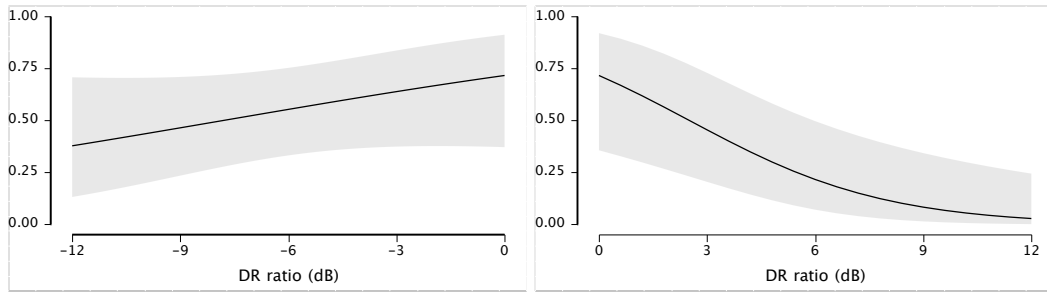


DR 比：2kHz 変動・8kHz 0dB 固定



### 4kHz & 8kHz

DR 比：4kHz 0dB 固定・8kHz 変動



DR 比：4kHz 変動・8kHz 0dB 固定

