JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	正中面における頭部伝達関数の個人化のための許容範囲に関する研究
Author(s)	久恒，英己
Citation	
Issue Date	2013-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/11333
Rights	
Description	Supervisor:赤木正人，情報科学研究科，修士

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

修 士 論 文

正中面における頭部伝達関数の個人化のための許容範囲に関する研究

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報科学専攻

久恒 英己

2013 年 3 月

修 士 論 文

正中面における頭部伝達関数の個人化のための許容範囲に関する研究

指導教員　赤木 正人 教授

審査委員主査　赤木 正人 教授
審査委員　党 建武 教授
審査委員　鵜木 祐史 准教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報科学専攻

1110050 久恒 英己

提出年月: 2013 年 2 月

Copyright © 2013 by Hideki HISATSUNE

概 要

頭部伝達関数 (HRTF: Head-Related Transfer Function) とは，音源から聴取者の鼓膜までの音の伝達特性を表す関数である．HRTF を音信号に畳み込むことで聴取者に 3 次元音像の呈示が可能となる．しかし，HRTF には一般に聴取者ごとの頭部，胴体，耳介の影響を強く受けるため，HRTF を正しく模擬できなければ音像の誤った方向定位や，臨場感の低下といった問題が生じる．従って，HRTF の実用化のためには聴取者に適合する HRTF の提供，個人化方法が必要となる．

HRTF の個人化には，聴取者本人の HRTF を測定することが最善であるが，その測定には大掛りな設備や多大な時間を要する．そのため，HRTF に含まれる音像定位の手掛りを聴取者ごとに適合させる個人化方法の研究が進められている．HRTF の音像定位の手掛りとして，左右方向には両耳間時間差 (ITD: Interaural Time Difference) と両耳間強度差 (ILD: Interaural Level Difference)，上下・前後にはスペクトラルキューと呼ばれる HRTF のスペクトル形状そのものが手掛りであると知られている．正中面における音像の制御には，水平面に比べ ITD や ILD の情報がほとんど含まれないため困難とされている．よって，HRTF の個人化にはスペクトラルキューの議論が必要となる．

Iida らは，HRTF の振幅スペクトル中に存在するピークやノッチをその周波数の低いものからそれぞれ，P1, P2,…, および N1, N2,…, とし，P1, N1, N2 のみを用いることで正中面の音像定位が可能であることを示した．この仮説は，聴取者の耳介の窪みを塞ぐことにより，N1 と N2 が消え仰角知覚の精度が低下するという報告や，耳介内の共鳴がピークとノッチの成因に関係するという報告により補強されている．Iida らの主張に基づき，P1, N1, N2 の個人化について萌芽的な研究が行われているが，P1, N1, N2 の個人差が要因となり解決には至っていない．一方で，特定の周波数帯域の平均が音像定位に重要であり，平均化した HRTF でも音像定位する という報告がある．本報告から，P1, N1, N2 には多少変動しても音像定位するという許容範囲が存在すると考えられる．

本論文では，正中面における HRTF の個人化のために基礎資料を得ることを目的として，正中面における音像定位の重要な手掛りである P1, N1, N2 について，それぞれ多少変動しても音像定位できる許容範囲の検討を行う．そのために，HRTF データベースを用いた聴取実験により選択・分析することで許容範囲の検討を行った．結果，聴取者はいづれの仰角においても N1 の周波数が近いものを選択し，P1 および N2 の周波数はばらつきがあるものを選択された．すなわち，許容範囲について N1 は狭く，P1 および N2 は広いということがわかった．以上のことから，正中面における HRTF の個人化には，特に N1 を聴取者に適合させる必要があることが示唆された．

目 次

第 1 章　序論 **2**
1.1 はじめに 2
1.2 本研究の背景 2
1.2.1 頭部伝達関数 3
1.2.2 頭部伝達関数の個人化 3
1.2.3 頭部伝達関数の方向知覚の手がかり 4
1.2.4 スペクトラルキュー 4
1.3 本研究の目的 6
1.4 本論文の構成 6

第 2 章　スペクトラルピークおよびスペクトラルノッチの個人差 **8**
2.1 背景と目的 8
2.2 P1, N1, N2 の分析 8
2.2.1 スペクトラルキューの周波数帯域 8
2.2.2 スペクトラルキューと音源方向との関係 9
2.2.3 聴覚フィルタ 9
2.2.4 分析方法と条件 10
2.3 分析結果 10
2.4 まとめ 11

第 3 章　P1, N1, N2 の許容範囲 **18**
3.1 目的 18
3.2 許容範囲の検証 18
3.2.1 実験方法 18
3.2.2 実験条件 19
3.2.3 実験結果 19
3.3 まとめ 20

第 4 章　許容範囲の評価 **26**
4.1 目的 26
4.2 許容範囲の評価および仰角上昇における N1 の傾きが正中面定位に与える影響の検証 26

4.2.1 評価および検証方法 26
4.2.2 条件に基づいた HRTF の作成 26
4.2.3 実験方法および条件 26
4.2.4 実験結果 27
4.2.5 考察 27
4.3 まとめ 28

第 5 章 結論 **33**
5.1 本研究で明らかになったことの要約 33
5.2 今後の展望 34

謝辞 **35**

参考文献 **36**

図 目 次

1.1 HRTF のスペクトラルピークとノッチ (正面方向) 5

2.1 正中面における P1, N1, N2 周波数と入射仰角の関係 9
2.2 上半球正中面における P1 の周波数分布 12
2.3 上半球正中面における N1, N2 の周波数分布：(a) N1，(b) N2 13
2.4 上半球正中面における P1, N1,N2 周波数の標準偏差と平均値 14
2.5 上半球正中面における P1 の ERB_N–number 分布 15
2.6 上半球正中面における N1, N2 の ERB_N–number 分布：(a) N1，(b) N2 . . 16
2.7 上半球正中面における P1, N1,N2 の ERB_N–number の標準偏差と平均値 . . 17

3.1 実験システム 19
3.2 定位感の良い HRTF5 個の P1, N1 N2 (被験者 1) 22
3.3 全被験者の定位感の良い HRTF5 個の P1, N1 N2 23
3.4 定位感の良い HRTF5 個の P1, N1 N2 の標準偏差と平均値 (被験者 1) . . . 24
3.5 定位感の良い HRTF5 個の P1, N1 N2 の標準偏差と平均値 25

4.1 被験者 1 の音像定位結果 29
4.2 被験者 2，3 の音像定位結果 30
4.3 被験者 4，5 の音像定位結果 31
4.4 全被験者の音像定位誤差率 32

表 目 次

2.1 P1, N1, N2 の標準偏差 11

3.1 被験者 1 の P1, N1, N2 の標準偏差 20
3.2 全被験者の P1, N1, N2 の標準偏差 21

第1章　序論

1.1　はじめに

ヒトは，両耳より受聴する“音”を頼りに多くの情報を得ている．例えば，人の話し声，スピーカや楽器から奏でられる音楽，風や川・海など自然の音，あるいは車や工事といった騒音など様々な例が挙げられる．これらの音には，その音がどの方向，どれほど遠くから鳴ったのかといった情報が含まれており，我々の認知および判断の助けとなっている．さらに，視覚で捉えることのできない方向についても，空間的に音を知覚可能であることから，広範囲のセンサとしての役割が備っていると言える．このように，音は我々の生活に欠くことの出来ない重要な情報である．

音響学は日々進化を続けている．多種多様な楽器から奏でられる繊細な音色や，コンサートホールや映画館で聴くことのできる豊かで迫力のある音楽は音響学の進化の賜物である．さらに，近年において音は身近なエンターテイメントになっている．ラジオを始めとして携帯音楽プレーヤーやスマートフォンの普及により，時間や場所を選ばず気軽に個人の嗜好に合った様々な音を楽しむことができる．しかし，これらの機器を通してイヤホン・ヘッドホンで再生される音は実環境で聴く音とは全く異なり，すべての音は両耳にへばりつくか頭の中で鳴り響いており臨場感に欠けている．耳装着型ではない，例えばスピーカシステムで再生したとしても，音は頭の外で鳴るものの音像は二つのスピーカー内にしか生じず，実環境とはかけ離れた音である．

医療分野においても音響学は多くの貢献をしている．高齢者や難聴者のコミュニケーションの支援をしている補聴器や，視覚障害者に適切な音情報を提供する様々な試みにも音響学の技術が活きている．これらの医療機器には身体障害者の生活を支えるためにも高水準かつ正確な音像の提供が欠かせない．このように，実環境と遜色無い臨場感のある音像の実現，忠実な音像の提供は，音響学において重要なテーマの一つである．

1.2　本研究の背景

ヒトは，両耳で受け取った音響信号から，その音源の到来方向や距離を正しく知覚する音像定位能力を有している．音源定位が可能であるのは，主として両耳間における音の到達時間差である両耳間時間差 (ITD: Interaural Time Difference) や音圧差である両耳間強度差 (ILD: Interaural Level Difference)，頭部や耳介で音波が反射や回折するこどで生じる周波数特性の変化などを手がかりとしているためと言われる．定位の手がかりと

して代表的な音響特性を表すものとして，頭部伝達関数 (HRTF: Head-Related Transfer Function) と呼ばれる伝達関数がある．

1.2.1 頭部伝達関数

HRTF は，反射音の無い自由音場における音源から聴取者の鼓膜近傍までの音の伝達関数として求められる [1]．自由音場において，音源信号 $s[n]$ が任意の方向 θ から聴取者の耳介道入口へ到来する状況は，任意の方向 θ にて測定された HRTF $h_\theta[n]$ と音源信号との畳込み演算 $s[n] * h_\theta[n]$ により表すことができる．すなわち，HRTF を音響信号に畳み込み処理することで，2 チャンネル再生デバイスにおいて臨場感のある 3 次元音像を再現することができる [2, 3, 4, 5]．HRTF を応用した技術として，聴覚バーチャルリアリティシステム [6] や，ヘッドホンで 5.1ch，7.1ch サラウンドを再現するシステムなど挙げられる．このように，HRTF は臨場感のある音響信号を聴取者に呈示できるため，工学的有用性が高い．しかし，HRTF には一般に聴取者ごとの頭部や胴体，耳介による反射や回析の影響を含むため，音源方向や個人によってその特性が大きく異なる．聴取者本人とは異なる他人の HRTF を用いた場合には，音像が誤った方向へ定位したり，臨場感の低下といった問題が生じる [2, 7]．よって，HRTF を用いて音像制御や音場再生の実用化のためには，HRTF の個人性を配慮し，聴取者ごとに最適な HRTF を提供する方法，つまり個人化が必要となる．

1.2.2 頭部伝達関数の個人化

高精度な 3 次元音像の実現のためには，聴取者ごとに HRTF を測定し，それを用いることが最善とされている．しかし，聴取者本人の HRTF の測定には，無響室や球状スピーカアレイといった大掛かりな測定施設や設備が必要であり，さらに，水平角と仰角のあらゆる方向を測定しなければならないため，非常に多大な時間を要する．そのため，聴取者本人の HRTF の測定を必要としない様々な検討が行われてきた．

最も代表的な方法として，前述したような施設により予め多人数の聴取者の HRTF を測定してデータベースを作成し，そこから聴取者に適合する HRTF を聞き比べにより探索する方法である．その探索方法の一例として，データベース中からトーナメント方式で適合する HRTF を求める方法が提案されている [8]．音像の定位精度は，実測による個人化と同等の精度であると報告されいるが [9]，この方法では，聴取者に合う HRTF がデータベースにない可能性があり，またデータベースの個数を多くすると探索に多大な時間が必要となってしまう．そこで，多くの聴取者に適用できるような HRTF の検討も行われきた [10, 11]．しかし，頭部や耳介形状の平均値を用いているため，平均から大きく離れた聴取者には適合しない．

数値計算で HRTF を推定する方法も提案されている．頭部や外耳といった身体的特徴を MRI や光学装置により計測してデータを数値化し重回帰分析による推定 [12] や，境

界要素法 (BEM: boundry element method) [13] や FTDT (Finite-difference time-domain method) 法 [14] を用いた推定法が提案されている．推定された HRTF の定位精度は十分に期待できるが，演算時間や境界条件の設定など課題が残されておりまだ十分ではない．

以上のことから，聴取者に最適な HRTF を提供する場合，上記の問題を解決し，かつ簡便な個人化方法が望まれる．そのためには，HRTF に含まれる方向知覚の手がかりとなる情報に的を絞り個人ごとに適合させれば簡便化に繋がると考えれる．

1.2.3 頭部伝達関数の方向知覚の手がかり

HRTF の方向知覚の手がかりは，左右 (水平面) 方向と上下・前後 (正中面) 方向で異なることが明らかとなっている．水平面の音像定位には，両耳間差情報である ITD と ILD を手がかりとしており [1]，正中面の定位にはスペクトラルキューと呼ばれる HRTF の振幅スペクトルが手がかりとされている [1, 15, 16, 17]．両耳間差情報は頭部寸法 (頭幅，頭長) との相関が高く，両耳間差に多少の誤差が生じたとしても側方角において大きな誤差は生じない [18]．しかし，上下・前後方向の定位精度は左右方向に比べ両耳間差情報がほとんど含まれないため定位精度が低く，日常生活においてもしばしば上下・前後方向は誤判定が生じる．また，上下・前後方向の知覚の手掛りは，左右方向のように単純ではなく，また頑健でもない．HRTF の個人化においても，左右方向の個人化は容易ではあるが，上下・前後方向の個人化は困難である．つまり，高精度な 3 次元音像の実現に向けて，HRTF の個人化を行うためには，スペクトラルキューの個人化を議論する必要がある．

1.2.4 スペクトラルキュー

正中面の音像定位の手掛りについて様々な研究が行われ，HRTF の振幅スペクトルつまりスペクトラルキューが重要という点は一致している．Blauert [19] は，1/3 オクターブバンドノイズを用いた音像定位実験により，どの方向から呈示しても，特定の方向に知覚する帯域があるという方向決定帯域について報告した．特定の方向に知覚する帯域のエネルギーが卓越していることから，HRTF のエネルギーの大きい帯域が知覚方向を決定するという仮説を設定した．しかし，方向決定帯域は 1/3 オクターブバンドや 1/6 オクターブバンドのような狭帯域信号では生じるが，広帯域信号では方向決定帯域に相当するスペクトルのエネルギーを卓越させても，その方向に音像を知覚することがないことが報告されている [20].

Asano ら [21] は，低次数の ARMA モデルにより HRTF の概形を求め，これを用いて音像定位実験を行ったところ，2〜3 [kHz] 以上においては大局的な周波数特性が音像定位に重要であることを示したが，その上で 5〜10 [kHz] 付近の帯域とその前後の帯域との相対レベルが仰角知覚の手掛りとなる可能性があると報告している．

一方で，Iida らは，HRTF のスペクトルに存在するスペクトラルピークとノッチを図 1.1 のようにその周波数の低いものからそれぞれ，P1, P2,…, および N1, N2,…, とし，そ

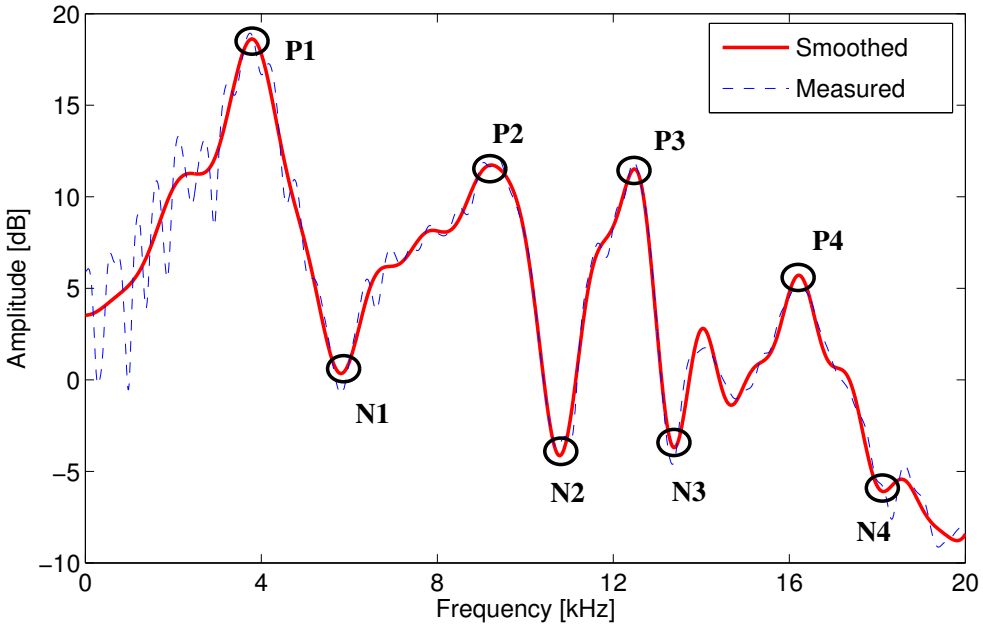


図 1.1: HRTF のスペクトラルピークとノッチ (正面方向)

の全部または一部のピークとノッチで再構成したパラメトリック HRTF を用いた音像定位実験行った．その結果，4 [kHz] 以上の周波数帯域で最も低い周波数のノッチ (N1) とその次のノッチ (N2)，および 4 [kHz] 付近のピーク (P1) のみを用いることで正中面の音像定位が可能であることを示した [22].

この仮説は，スペクトラルキューの生成メカニズムが耳介に起因するという報告により補強されている．耳介の主要な 3 つの窪みである scapha, fossa, concha を塞ぐことにより，音像定位誤差が生じるという報告 [23] や，外耳道入口周辺の concha を塞ぐだけで定位誤差は顕著に増大し，3 つのくぼみすべてを塞いだ場合と同程度になり，また，concha を塞ぐことにより，4 [kHz] 付近のピークや 8 [kHz] 以上のノッチが消滅するという報告 [24] がある．さらに，耳介のヒダによって形成される舟状窩 (しゅうじょうか) や耳甲介腔 (じこうかいくう) の深さが N1, N2 の周波数の変化に影響を与えるという報告 [25] や，耳介の 3 つの窪みの共鳴によりピークやノッチが生成されるという報告 [26] がある．これらの報告は Iida の仮説を支持するものであり，特定の帯域の相対レベルが音像定位に影響を与えるという仮説より，その帯域内の特定のピークやノッチが音像定位の手掛りあると考えられる．以上より，高精度な 3 次元音像の実現に向けて正中面における HRTF の個人化をするためには，スペクトラルキューである P1, N1, N2 を聴取者ごとに適合させることが最適であると考えられる．

Iida らの主張に基づき，P1, N1, N2 の個人化について萌芽的な研究 [27, 28, 29, 30] が進みつつある．しかし，P1, N1, N2 の個人差が要因となり解決には至っていない．一方

で，Langendijk らは，4〜8 [kHz] の帯域を平坦にしても定位への影響が少ないと報告しており [31]，さらに，定位に重要と考えられる 4 [kHz] 以上の帯域を 3 帯域に分けて平均，単純化した HRTF を用いても音像定位が出来るという報告がある [32]．これらの報告により，P1, N1, N2 それぞれに多少の変動が生じても音像定位するという許容範囲があると考えられる．以上のことを踏まえて，本研究の目的を次節に述べる．

1.3 本研究の目的

HRTF を用いた音像制御や音場再生を実用化するには，HRTF の個人化が必要不可欠である．しかし，HRTF の個人化を行う上で問題となるのが，その個人化にかかる多大な時間やコストである．Iida らによる正中面の HRTF の音像定位の手掛りは P1, N1, N2 であるという主張は強く支持されているが，個人化のためには P1, N1, N2 についての新たな知見が必要である．そこで本研究では，正中面における HRTF の個人化のために基礎資料を得ることを目的として，正中面における音像定位の重要な手掛りである P1, N1, N2 について，それぞれ多少変動しても音像定位できる許容範囲の検討を行う．P1, N1, N2 の許容範囲が明らかになれば HRTF を制御する際の一つの尺度となり，HRTF の個人化の簡便化に繋がると考えられる．

1.4 本論文の構成

本論文は 5 章で構成される．

第 1 章 本研究で対象とする研究分野の背景と問題点を述べ，本研究の目的を明らかにする．

第 2 章 音像定位の重要な手掛りである P1, N1, N2 の許容範囲について議論するため，P1, N1, N2 について元来どの程度の個人差があるのか HRTF データベースを用いることで求める．個人差を求めるためには P1, N1, N2 の正確な分析が必要となるため，その分析の背景を述べた上で分析方法の説明を行う．そして得られた結果を述べる．

第 3 章 P1, N1, N2 の許容範囲を明らかにするために，HRTF データベースを用いた音像定位実験を行う．音像定位実験により聴取者ごとに複数の定位感の良い HRTF を選定し，その選定された HRTF の P1, N1, N2 の標準偏差を求めることで許容範囲について議論する．

第 4 章 第 3 章で明らかとなった許容範囲の妥当性を検証するために，第 3 章で得られた最も定位感の良い HRTF とその結果を基に構成した HRTF を用いて音像定位実験を行い，その音像定位精度を確かめることで許容範囲の評価を行う．

第 5 章 本研究により明らかにされたことを要約し，今後の展望を述べる．

第2章　スペクトラルピークおよびスペクトラルノッチの個人差

2.1　背景と目的

HRTF には，頭部や耳介形状に起因する個人差があり，スペクトラルキューであるスペクトラルピーク P1 およびスペクトラルノッチ N1, N2 にもその個人差は顕著に現れる．また，音源方向により P1, N1, N2 の振る舞いも複雑である．そのため，HRTF の個人化を行うためには，P1, N1, N2 にどの程度の個人差があり，また音源方向によってどのような振る舞いかを確認する必要がある．しかし，P1, N1, N2 について，個人差がどの程度のものかを定量的に記述した報告はスペクトラルキューのうち N1, N2 については報告があるが [33]，P1 については報告がない．また，許容範囲の議論を行う上で用いる HRTF データベースについて報告通りの個人差が表れるのかどうか調査を行う必要がある．その上で，正中面における HRTF の音像定位の重要な手掛りである P1, N1, N2 には許容範囲の検討を行う．

本章の目的は，許容範囲を検討するための事前調査として，P1, N1, N2 について聴取者間でどの程度の個人差があるのか調査することである．

2.2　P1, N1, N2 の分析

2.2.1　スペクトラルキューの周波数帯域

正中面の音像定位に重要な周波数帯域についていくつか報告がある．森本ら [34] は，様々な帯域雑音を用いることでどの周波数帯域が正中面定位の精度に及ぼすかを詳細に検討を行った．その結果，正中面の音像定位に重要な周波数域は 4.8〜9.6 [kHz] と報告している．他にも，正中面の音像定位には 13 [kHz] 以下の周波数帯域が重要という報告 [35] や，4〜16 [kHz] の周波数帯域が重要という報告 [36] がある．正中面については，実験によって多少のばらつきがあるが，これらの報告を総括すると，P1, N1, N2 は 4〜16 [kHz] に潜在していると考えられる．

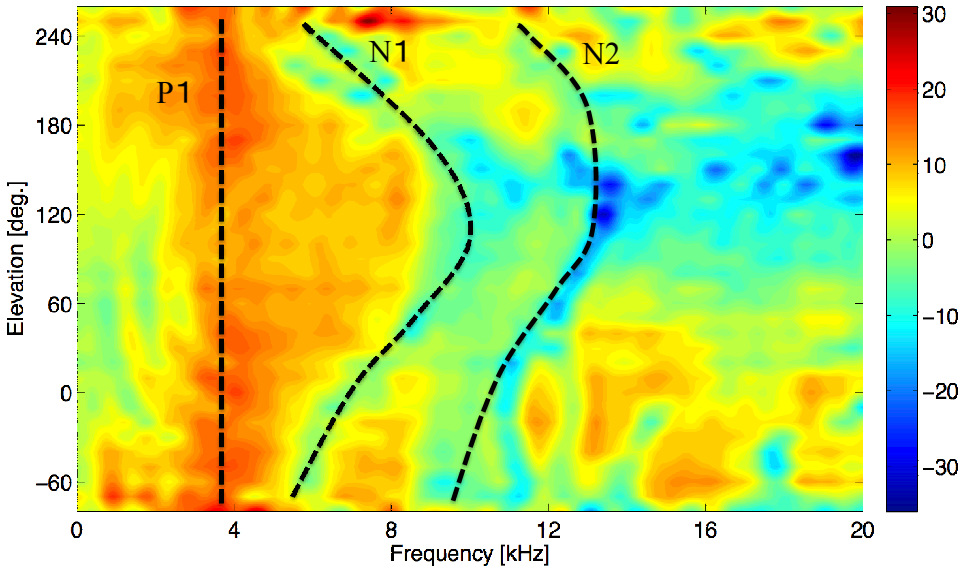


図 2.1: 正中面における P1, N1, N2 周波数と入射仰角の関係

2.2.2 スペクトラルキューと音源方向との関係

正中面における HRTF の音源方向とスペクトラルキューとの関係について，N1, N2 は図 2.1 に示すように音源の仰角が 0 ° (正面) から 120 ° 付近まで増加するに従ってその周波数が高くなり，180 ° (後方) になると低くなることが報告されおり，一方，P1 については，仰角に関係なく一定であることが報告されている [22].

スペクトラルキューの周波数帯域と本報告を併せることで，正確にスペクトラルキューの分析が可能と考えられる．

2.2.3 聴覚フィルタ

人間は内耳の基底膜振動により周波数を分析しており，それにより周波数の違いを聞き分けができている．この周波数分析機能の概念として聴覚フィルタがある．聴覚フィルタは，

(1) 中心周波数が連続的に変化する帯域フィルタ群であり，音響信号の周波数に近い中心周波数をもつ帯域フィルタによって音響信号を周波数分析する

(2) 信号音のマスキングに影響を及ぼす雑音成分はこの帯域フィルタ内の周波数成分に限られる

という性質をもつとされる．聴覚フィルタの帯域幅を等価方形幅 ($\mathrm{ERB_N}$: equivalent rectangular bandwidth) と呼ばれ，中心周波数との関係が次式により表される．

$$\mathrm{ERB_N} = 24.7(4.37f/1000 + 1)[\mathrm{Hz}]$$

この値は，周波数帯域幅の高精度な近似式として広く用いられている．また，$\mathrm{ERB_N}$ を幅 1 として周波数軸を変形したものを $\mathrm{ERB_N}$–number と呼ばれ次式て表される．

$$\mathrm{ERB_N} - \mathrm{number} = 21.4\log_{10}(4.37f/1000 + 1)$$

$\mathrm{ERB_N}$–number は，周波数と基底膜上の最大振幅の対応関係が良いとされている．スペクトルキューの分析結果を本式の f に当てはめて，その個人差の検証を行う．これにより，人間の聴覚特性を加味できる．

2.2.4 分析方法と条件

P1, N1, N2 の分析について，P1 は HRTF スペクトルにケプストラムスムージングをかけることで分析する．しかし，N1, N2 については聴取者や音源方向によってはその振る舞いが複雑で明確でない場合がある．そこで，N1, N2 については，耳介の影響を強く受けて形成されることから，耳介入り口で測定した頭部インパルス応答の初期応答部分 (約 1 - 2 [ms]) に含まれていると考えられ，その部分を時間窓で切り出し，それをフーリエ変換する方法 [37] で分析する．

HRTF データベースは，東北大学電気通信研究所にある無響室で測定された 114 名分の右耳 114 耳分を用いる．右耳のみの HRTF を用いる理由として，左耳と右耳の周波数特性には僅かな差異しかないため片耳のみで十分議論できると判断したためである．

2.3 分析結果

P1, N1, N2 の分析結果について，P1 を図 2.2，N1, N2 を図 2.3 に示す．さらに，各仰角における P1, N1, N2 の平均値および標準偏差を図 2.4 に示す．いづれの図も，横軸は仰角，縦軸は周波数を表しており，図 2.2，2.3 において，プロットは HRTF データベースより分析した 114 名分のそれぞれ P1, N1, N2 である．図 2.4 はその 114 名分の P1, N1, N2 それぞれの標準偏差であり，グラフ上の 3 つの線は下から P1, N1, N2 をそれぞれを表している．グラフのドットは，各仰角についての P1, N1, N2 それぞれの平均値を示しており，エラーバーは標準偏差を表している．各図より P1, N1, N2 の個人差について以下のことが分かる．

1. P1 は，いづれの仰角においても約 1000 [Hz] の個人差がある
2. N1, N2 ともに，いずれの仰角においても約 4000 - 6000 [Hz] に亘る個人差がある

3. P1 は，仰角が上昇しても一定である

4. N1 は，仰角が 0 °から 120 °になるにつれて高くなり，そこから 180 °に向かって低くなる傾向がある

5. N2 は，仰角が 0 °から 120 °になるにつれて高くなるが，120 °から 180 °の間の変化は小さい

これらは，スペクトラルキューと音源方向との関係についての報告 [22] および N1, N2 の個人差の報告 [33] と同様の結果が得られた．

次に，ERB_N–number に当てはめた結果について，P1 を図 2.5，N1, N2 を図 2.6 に示す．また，ERB_N–number に当てはめた P1, N1, N2 の平均値および標準偏差を図 2.7 に示す．図の見方は先の図と同様である．先に述べた個人差についての結果と同様の結果である．また，P1, N1, N2 の標準偏差を表 2.1 に示す．

表 2.1: P1, N1, N2 の標準偏差

	標準偏差 [ERB]
P1	0.98
N1	0.91
N2	0.89

表 2.1 より，P1, N1, N2 の個人差はいづれも同程度であることが分かる．

2.4 まとめ

第 2 章では，正中面における HRTF の音像定位の重要な手掛りである P1, N1, N2 について議論するための事前調査を行った．そのために，HRTF データベースの P1, N1, N2 を正確に分析するための指標となる先行研究をいくつか取り入れることで分析精度を向上し，分析を行った．その結果，P1, N1, N2 の個人差について以下のことがわかった．

- P1, N1, N2 の個人差はいづれも同程度である
- P1 は，仰角が上昇しても一定である
- N1 は，仰角が 0 °から 120 °になるにつれて高くなり，そこから 180 °に向かって低くなる傾向がある
- N2 は，仰角が 0 °から 120 °になるにつれて高くなるが，120 °から 180 °の間の変化は小さい

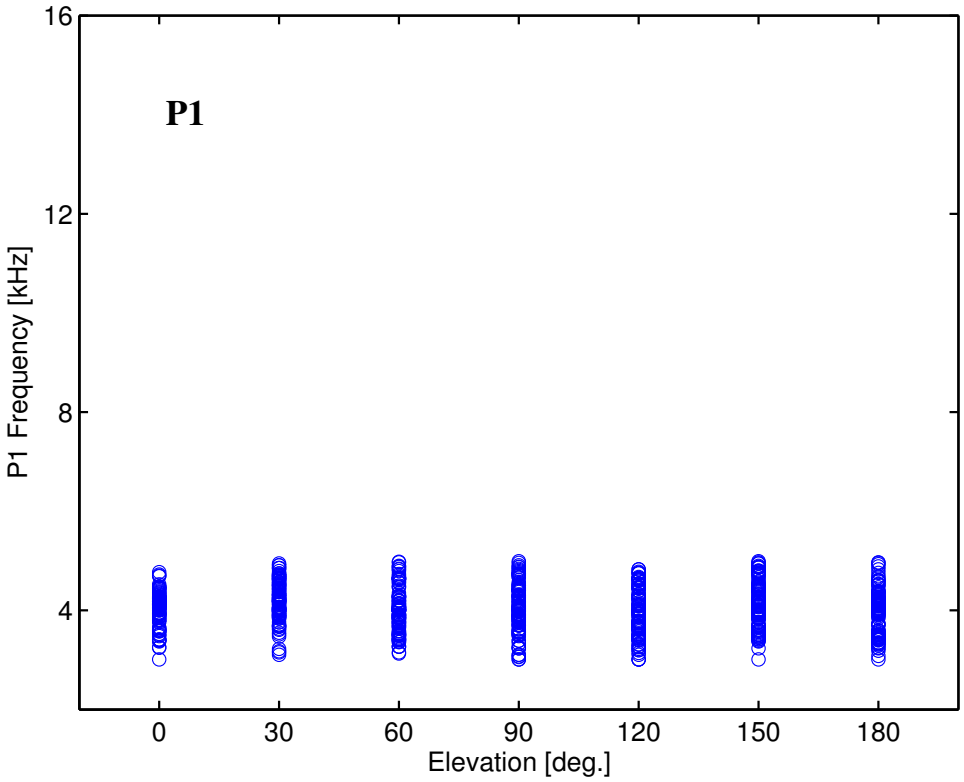


図 2.2: 上半球正中面における P1 の周波数分布

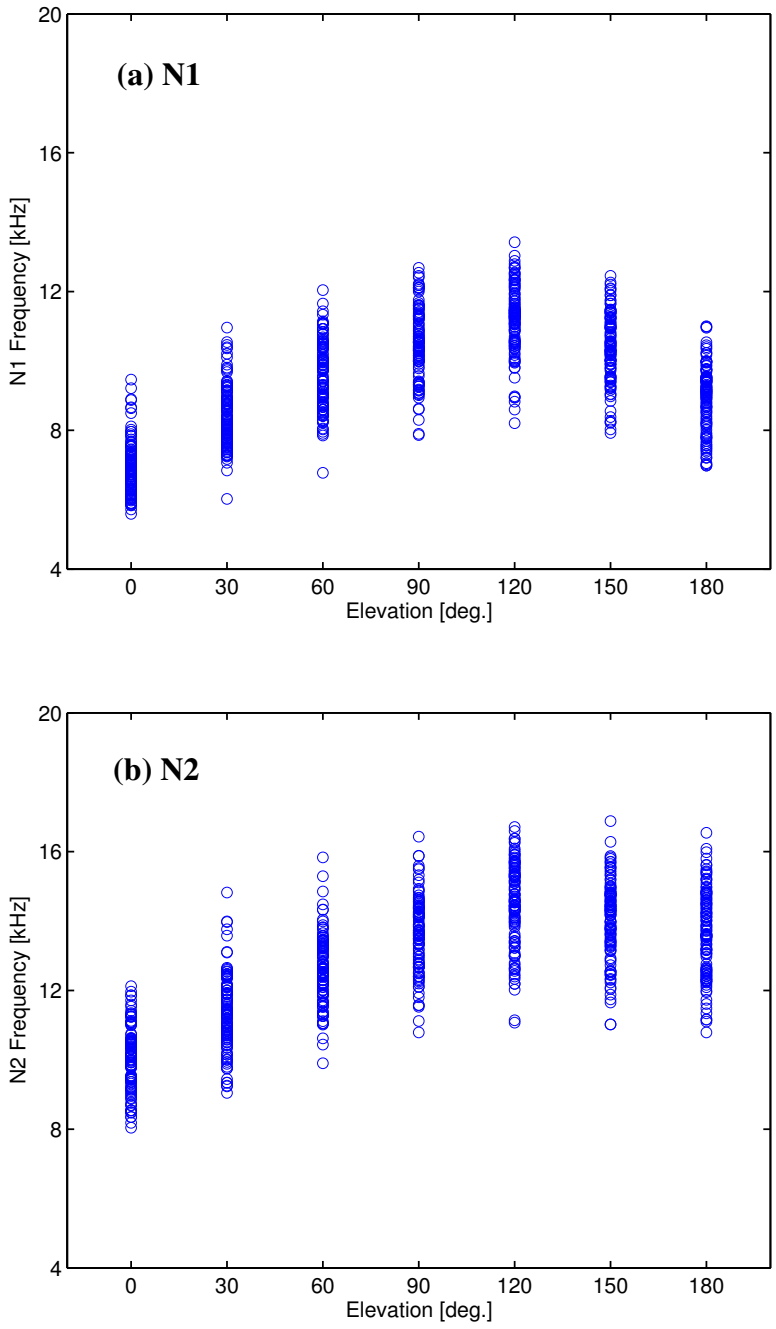


図 2.3: 上半球正中面における N1, N2 の周波数分布：(a) N1，(b) N2

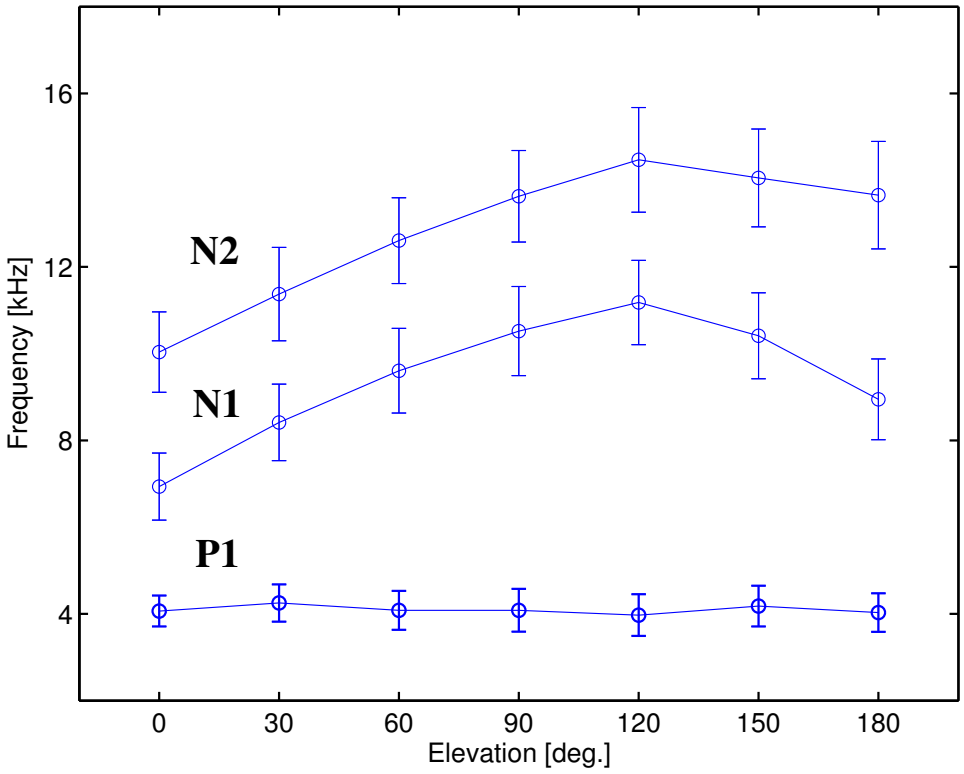


図 2.4: 上半球正中面における P1, N1,N2 周波数の標準偏差と平均値

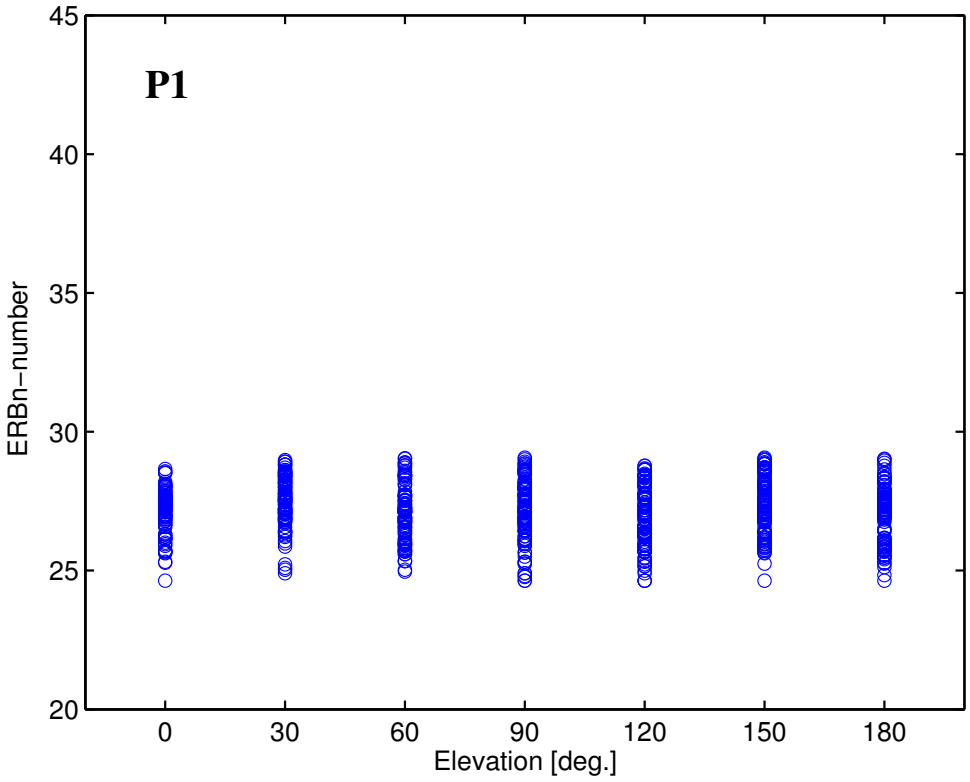


図 2.5: 上半球正中面における P1 の ERB_N–number 分布

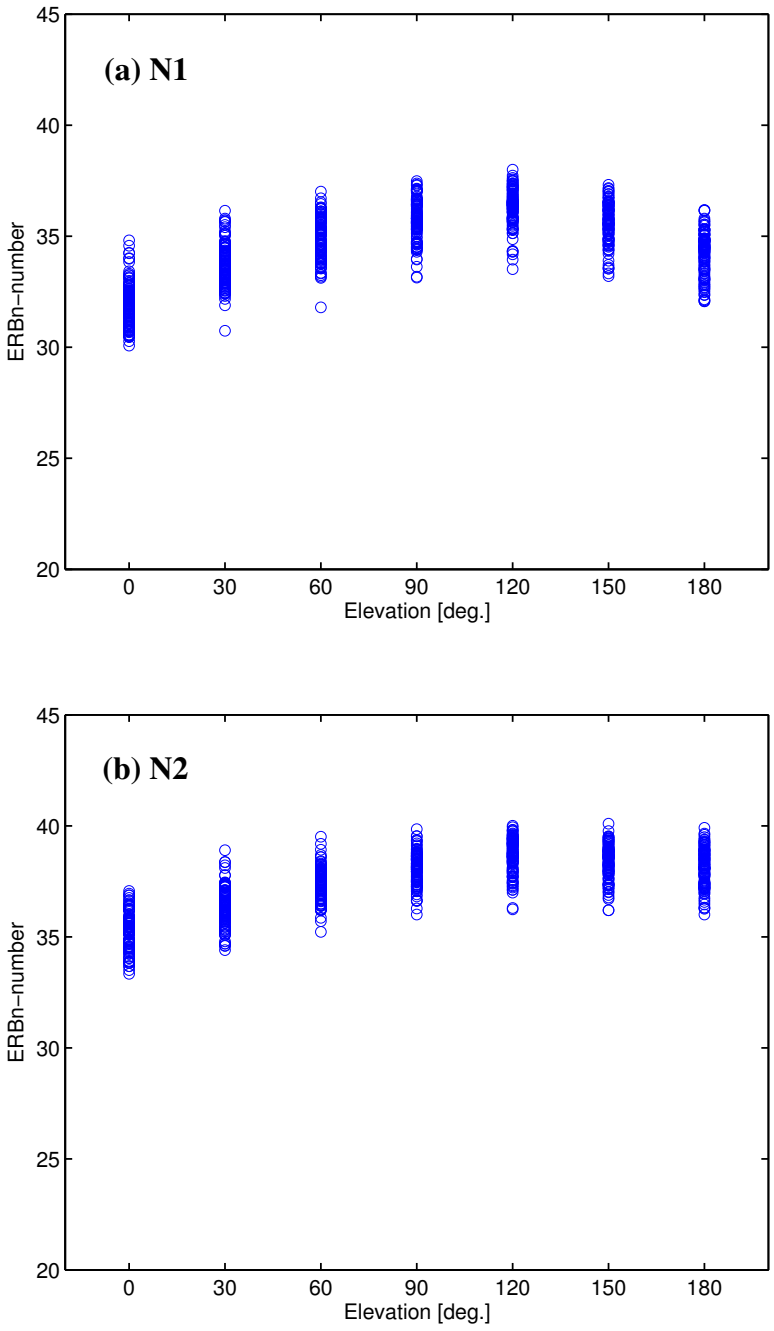


図 2.6: 上半球正中面における N1, N2 の $\mathrm{ERB_N}$–number 分布：(a) N1，(b) N2

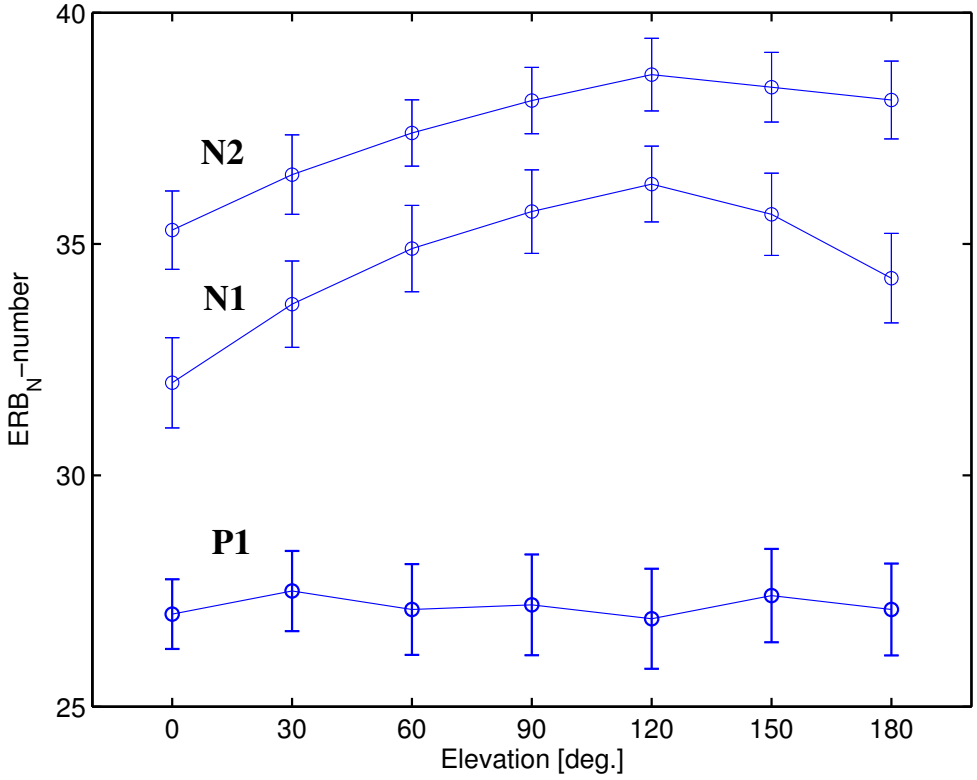


図 2.7: 上半球正中面における P1, N1,N2 の ERB_N–number の標準偏差と平均値

第3章　P1, N1, N2の許容範囲

3.1　目的

前章での分析により，P1, N1, N2 についてそれぞれの振る舞い，特に個人差が明確になった．そこで本章では，HRTF の個人化に向けて，P1, N1, N2 の許容範囲を求めることを目的とする．

3.2　許容範囲の検証

P1, N1, N2 の許容範囲を求めるため，聴取実験により HRTF データベースから定位感の良い HRTF を複数選択し，選択された複数の HRTF についての傾向を分析することで P1, N1, N2 の許容範囲について検証を行う．

3.2.1　実験方法

HRTF データベースより定位感の良い HRTF を正確に選択する必要がある．そこで，音像の高い定位精度が期待できる，聞き比べにより定位感の良い HRTF を探索する方法を採用する．聴取実験は以下の 3 段階構成で行う．

実験 I: HRTF データベース 114 名分すべての聞き比べを行う．評価は意図した方向に頭外定位したかどうかで行う．試行回数は 2 回である．2 回行った結果を総合評価することで定位感の良い HRTF の候補を複数決定する．

実験 II: 実験 I で選択された定位感の良い HRTF の候補について聞き比べを行う．評価は実験 I と同様である．候補の HRTF の数が多い被験者に対しては試行回数は 2 回，少ない被験者に対しては試行回数は 3 回である．そして，定位感の良い HRTF を 5 個決定する．

実験 III: 実験 III で決定された 5 個の定位感の良い HRTF から最も定位感の良い HRTF をサーストンの一対比較法にて決定する．試行回数は 2 回である．

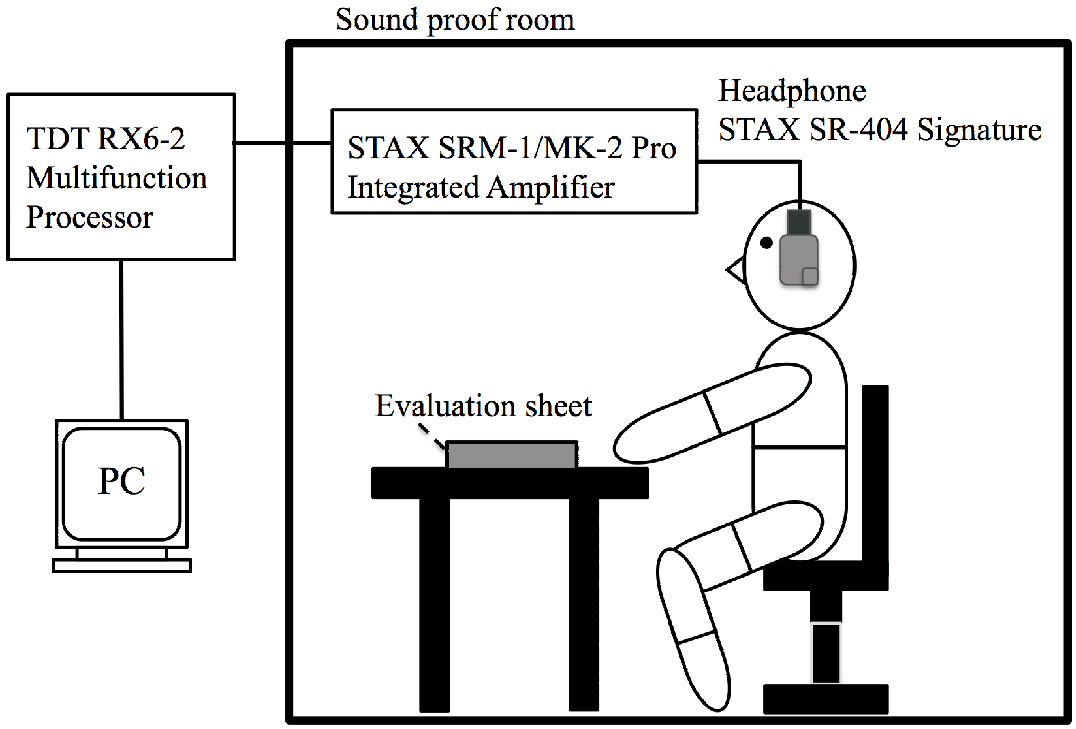


図 3.1: 実験システム

3.2.2 実験条件

図 3.1 に本実験で行う実験システムを示す．実験は，Tucker-Davis Technologies (TDT) SystemIII を用いて，防音室内で行われた．刺激音はヘッドフォン (STAX SR-404) を介して聴取者に呈示された．実験参加者は正常な聴力を有する 20 代の大学院性 8 名である．呈示音は，広帯域雑音が正中面音像定位に適しているという報告 [34] により白色雑音を用い，白色雑音に HRTF データベース中の 114 人分の HRTF を畳み込んだ刺激音を用いた．刺激音のサンプリング周波数は 48 [kHz] である．呈示方向は上半球正中面における 30 °間隔・全 7 方向とし，呈示時間は実験 I・II では各角度 3 [s]，実験 III では各角度 1.5 [s] とした．実験 I・II において，聴取者には 7 方向の角度それぞれについて定位の有無の回答を評価シートへ記述をしてもらう．全方向で意図した方向に頭外定位したものを定位感の良い HRTF とした．

3.2.3 実験結果

実験 I では，一人あたり 8〜13 個の定位感の良い HRTF の候補が決定された．また，仮想音場に対応できない聴取者が 3 名おり，実験 II 以降は 5 名で行った．よって，5 名の結果を示す．結果はすべて聴覚特性を加味するため ERB_N–number で示す．

被験者 1 の定位感の良い HRTF5 個の P1, N1 N2 を示したグラフを図 3.2 に，他 4 名の聴取者の定位感の良い HRTF5 個の P1, N1 N2 のグラフを図 3.3 に示す．図 3.2, 3.3 では，横軸が仰角，縦軸が ERB_N–number であり，グラフ上の 3 つの集合体は定位感の良い HRTF5 個の P1, N1, N2 を下からそれぞれ表している．グラフの太線は聴取者に最も適合する HRTF である．各集合体において太線に集中しているほど似た P1, N1, N2 をそれぞれ選択していることを表す．これらを見ると，全被験者に共通しているのが，P1 はいづれの仰角においてもその値に分散があることがわかる．また被験者 YN を除く他の被験者は，N2 もいづれの仰角においてもその値に分散があることが読み取れる，特に被験者 MA，HN においては，N1 は後方の仰角を除くどの仰角においても分散がなく，他の被験者についても，N1 については P1 および N2 と比較してもその分散がない結果となった．さらに，全被験者に共通しているのが，選択された HRTF の N1 についてその仰角上昇における分布の傾きが似たものが選択されたことである．

これらの結果を平均値と標準偏差で表したグラフを図 3.4 に，他 4 名の聴取者の定位感の良い HRTF5 個の P1, N1 N2 の標準偏差と平均値のグラフを図 3.5 に示す．図 3.4, 3.5 について，横軸が仰角，縦軸が ERB_N–number であり，グラフ上の 3 つの線は下から P1, N1, N2 をそれぞれを表している．グラフのドットは，各仰角について P1, N1, N2 それぞれの平均値を示している，エラーバーは標準偏差を表している．図 3.4, 3.5 から，P1 は全被験者において標準偏差が大きく，被験者 HK，YN を除く他の被験者からは N2 の標準偏差は大きいことがわかる．そして，全被験者に共通するのが N1 の標準偏差は小さいという結果である．

また，被験者 1 の P1, N1, N2 の標準偏差を表 3.1，全被験者の標準偏差の平均を表 3.2 に示す．前章で求まった HRTF データベース 114 名分の P1, N1, N2 の標準偏差はそれぞれ，P1 は 0.98，N1 は 0.91，N2 は 0.89 であった．これらより，N1 は P1, N2 より標準偏差が小さいという結果が得られた．

表 3.1: 被験者 1 の P1, N1, N2 の標準偏差

	標準偏差 [ERB]
P1	0.57
N1	0.35
N2	0.56

3.3 まとめ

第 3 章では，正中面における HRTF の音像定位の重要な手掛りである P1, N1, N2 の許容範囲を求めるために聴取実験を行った．聴取実験を行った結果，選択された複数の定位

表 3.2: 全被験者の P1, N1, N2 の標準偏差

	標準偏差 [ERB]
P1	0.66
N1	0.41
N2	0.51

感の良い HRTF の P1 および N2 には分散があり，その標準偏差は大きい．N1 については分散があまりなく，標準偏差は小さいということが分かった．

以上より，N1 の許容範囲は狭く，P1 および N2 は広いということが求まった．

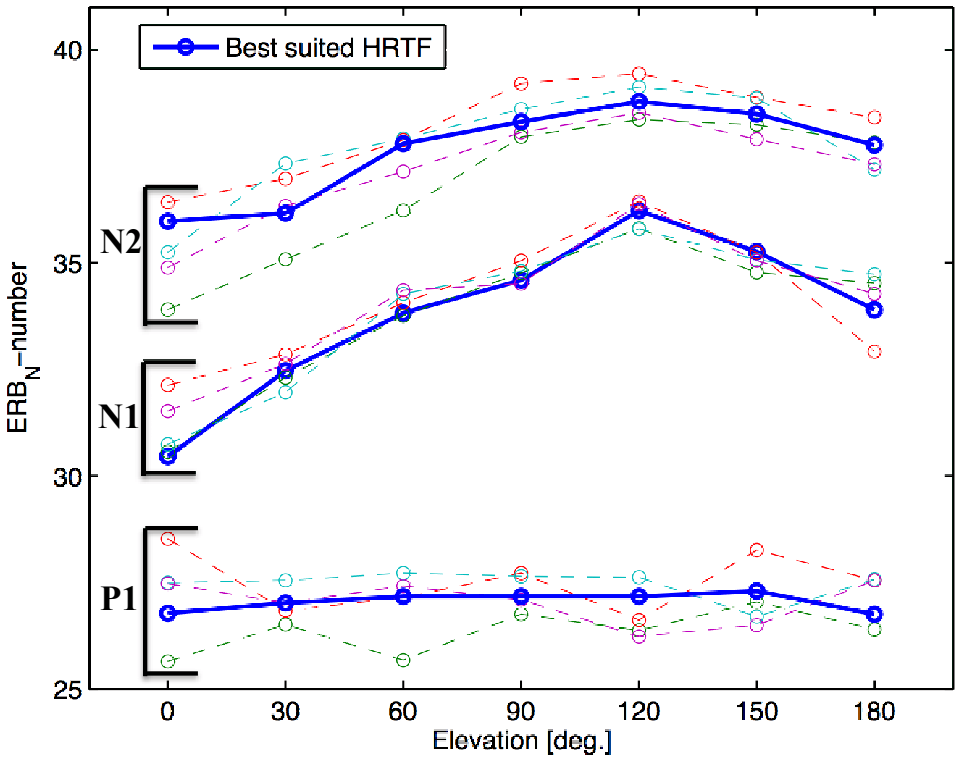
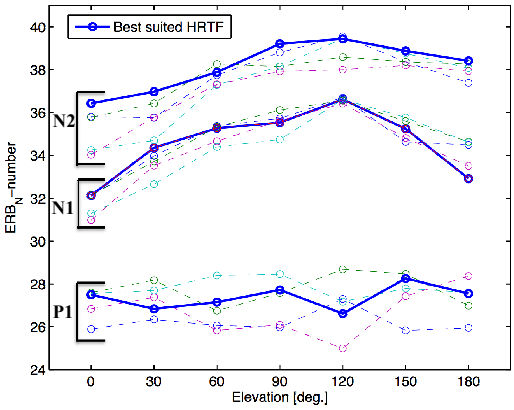
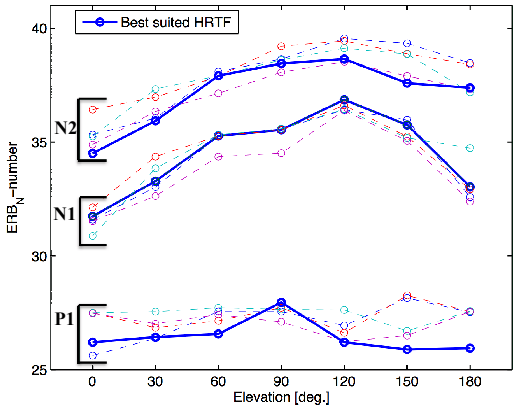


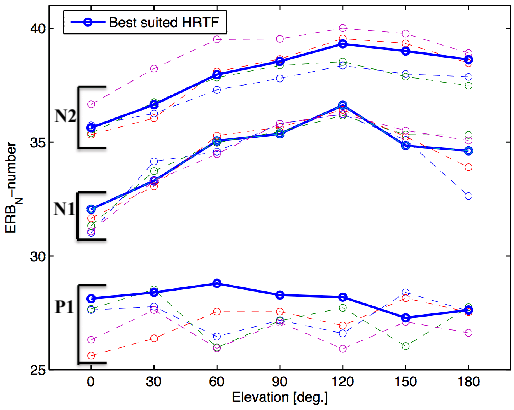
図 3.2: 定位感の良い HRTF5 個の P1, N1 N2 (被験者 1)



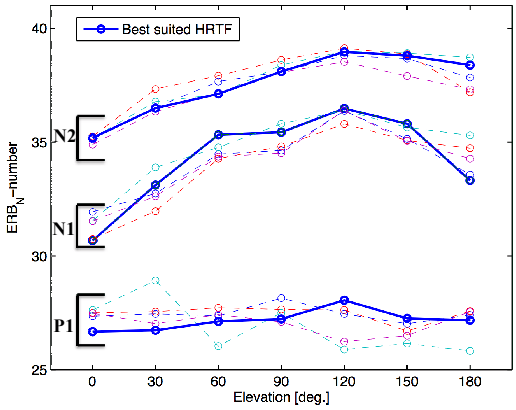
(a) 被験者 2



(b) 被験者 3



(c) 被験者 4



(d) 被験者 5

図 3.3: 全被験者の定位感の良い HRTF5 個の P1, N1 N2

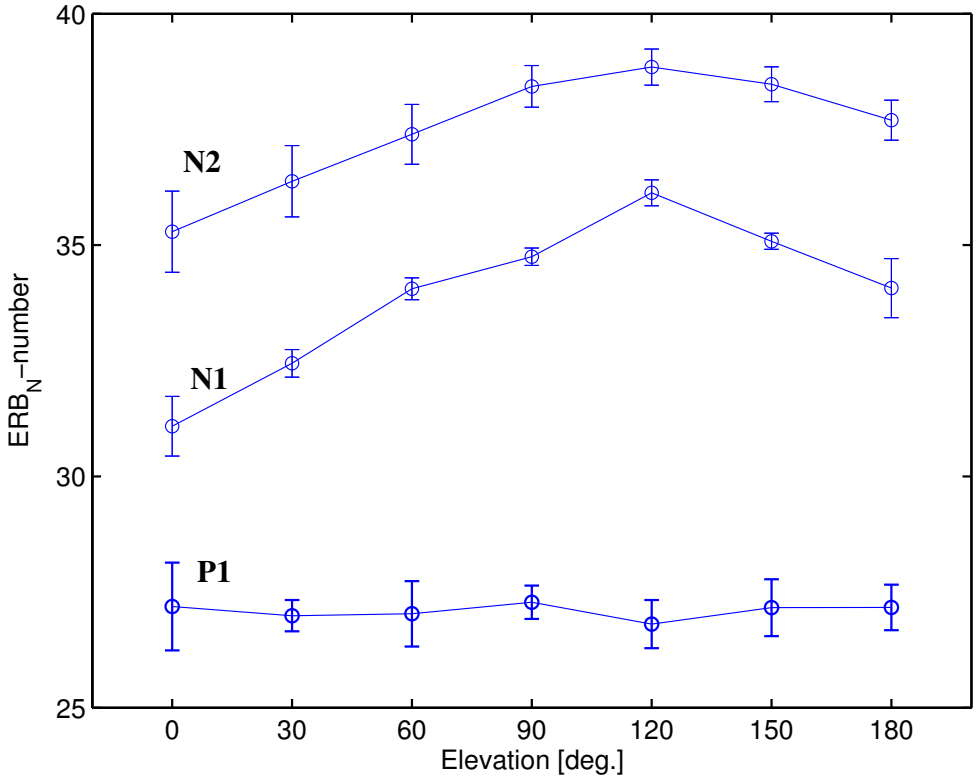
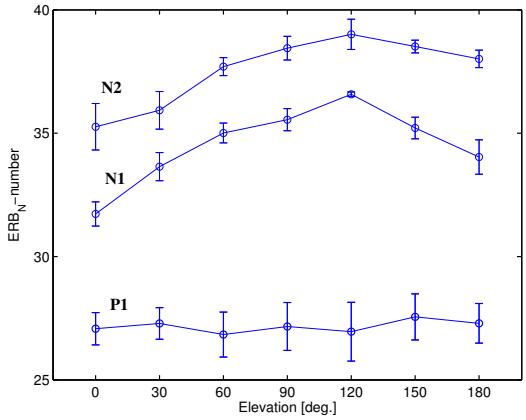
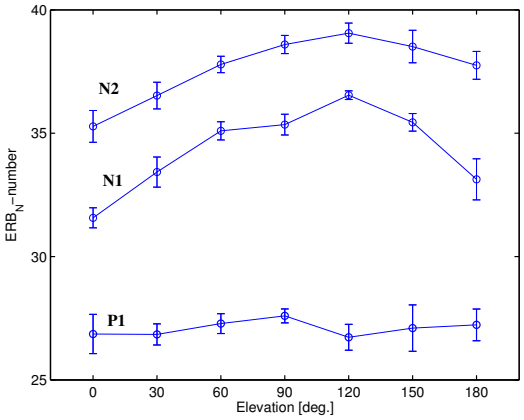


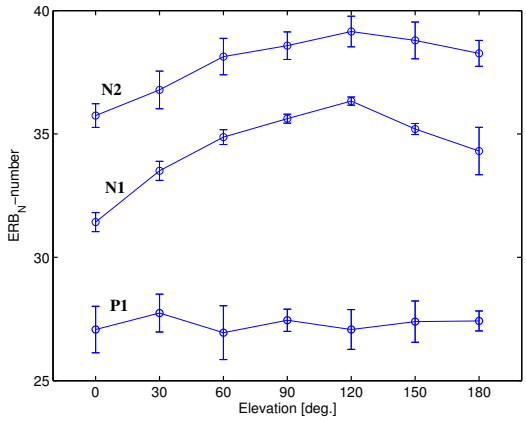
図 3.4: 定位感の良い HRTF5 個の P1, N1 N2 の標準偏差と平均値 (被験者 1)



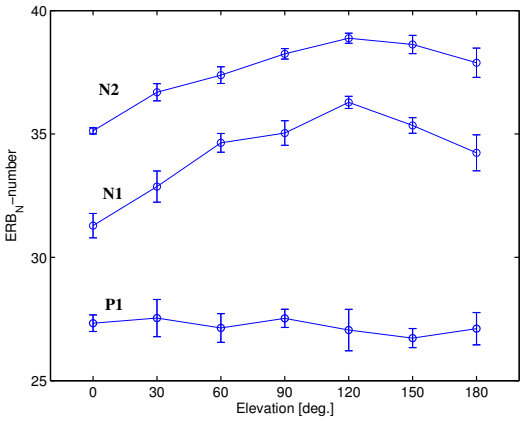
(a) 被験者 2



(b) 被験者 3



(c) 被験者 4



(d) 被験者 5

図 3.5: 定位感の良い HRTF5 個の P1, N1 N2 の標準偏差と平均値

第4章　許容範囲の評価

4.1　目的

前章では，正中面における HRTF の個人化に向けて，スペクトラルキューである P1, N1, N2 の許容範囲を求めた．P1, N1, N2 の許容範囲について，N1 は狭く，P1, N2 は広いという結果であった．しかし，P1, N1, N2 の許容範囲に従い N1 を個人に正確に適合させたとしても十分な定位精度が得られるかどうか分からない．そこで本章では，求めた P1, N1, N2 の許容範囲の妥当性を検証することを目的とする．

4.2　許容範囲の評価および仰角上昇における N1 の傾きが正中面定位に与える影響の検証

4.2.1　評価および検証方法

第 3 章により被験者それぞれに最も適合する HRTF が決定した．その個人化した HRTF と P1, N1, N2 の許容範囲に従い N1 を正確に聴取者に適合させた HRTF の定位実験を行い，それぞれの HRTF の音像精度を比較して同等の精度が得られるか検証する．同等の精度であれば許容範囲は妥当といえる．

4.2.2　条件に基づいた HRTF の作成

P1, N1, N2 の許容範囲に従い N1 を正確に聴取者に適合させた HRTF の作成方法を述べる．第 3 章にて個人化した聴取者ごとの HRTF (以下，individualized HRTF) の許容範囲を参考に，HRTF データベースから許容範囲に収まるような任意の HRTF の任意の仰角の P1, N1, N2 を持ってきて適当に組み合わせることで各聴取者に適合する HRTF (以下，produced HRTF) を作成する．

4.2.3　実験方法および条件

実験は第 3 章と同様で，Tucker-Davis Technologies (TDT) SystemIII を用いて，防音室内で行われた．刺激音はヘッドフォン (STAX SR-404) を介して聴取者に呈示された．

実験参加者は第 3 章で仮想音場に適応できた正常な聴力を有する 20 代の大学院性 5 名である．刺激音には，白色雑音を用いる．刺激音のサンプリング周波数は 48 [kHz] である．呈示方向は上半球正中面における 30 °間隔・全 7 方向をランダムに呈示し，呈示時間は各角度 5 [s] とする．聴取者には，呈示された角度を正しく判断できるかどうか評価シートへの記述を求めた．individualized HRTF と produced HRTF いづれも試行回数は 70 回 (7 方向× 10) である．

4.2.4 実験結果

聴取者 1 の刺激上条件に対する回答角の分布を示したグラフを図 4.1 に，他 4 名の聴取者の定位角度の分布を示したグラフを図 4.2, 4.3 に示す．図 4.1, 4.2 ,4.3 では横軸が呈示した角度，縦軸が聴取者が回答した角度であり，グラフ上のプロット面積は回答数に比例して表示してある．より多くの回答が右上がりの対角線上に乗っていれば，より正しく定位できているといえる．これらより，聴取者 1, 2, 4 においては individualized HRTF，produced HRTF ともにドットが概ね対角線上に乗っており，individualized HRTF と produced HRTF は近い定位精度が得られていることが分かる．聴取者 3, 5 はいづれの HRTF においても対角線上からかけ離れた角度に多く定位しており，定位精度が悪いことがわかる．

4.2.5 考察

５名中３名は produced HRTF の定位精度が individualized HRTF の定位精度に近い結果が得られた．これは，許容範囲および仰角上昇における N1 の傾きが正中面定位に重要であることを示唆する結果である．音像定位精度が良好ではなかった被験者 3，5 については，produced HRTF の参考となった individualized HRTF の定位精度も悪かったため，produced HRTF に影響が出たと考えられる．

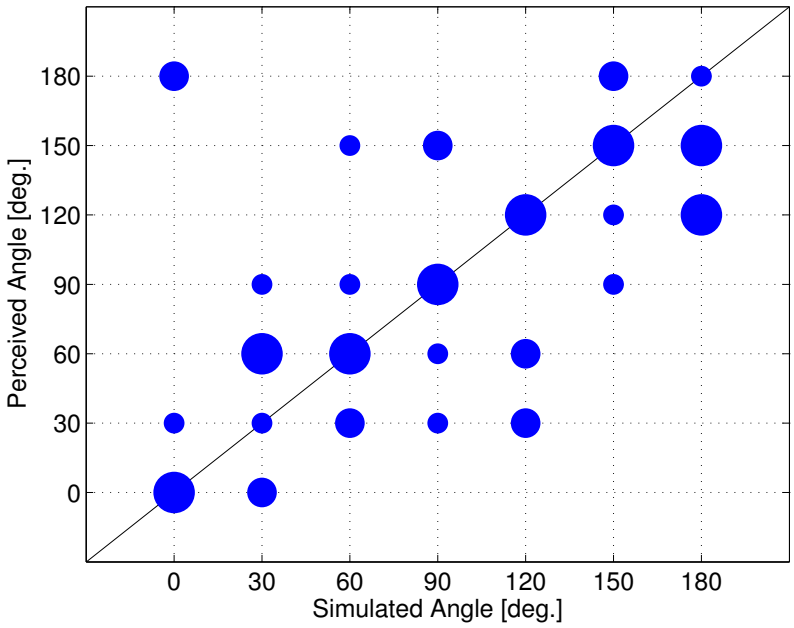
次に，全被験者の音像定位誤差率を図 4.4 に示す．図について，横軸は仰角，縦軸は定位誤差を示している．各仰角について，定位誤差が大きいほど縦軸の値が大きくなる．エラーバーは定位誤差の標準偏差を表している．青色の棒グラフは individualized HRTF，赤色は produced HRTF である．individualized HRTF は produced HRTF を参考に，特に N1 については P1, N2 より正確に適合させ作成した HRTF であるから，定位誤差が同程度であればあるほど P1, N1, N2 の許容範囲は妥当であることを表す．ここで，各 HRTF の全仰角の定位誤差を足して，その produced HRTF の定位誤差の合計を individualized HRTF の定位誤差の合計で割った．

$$\mathrm{producedHRTF/individualizedHRTF} = 1.15$$

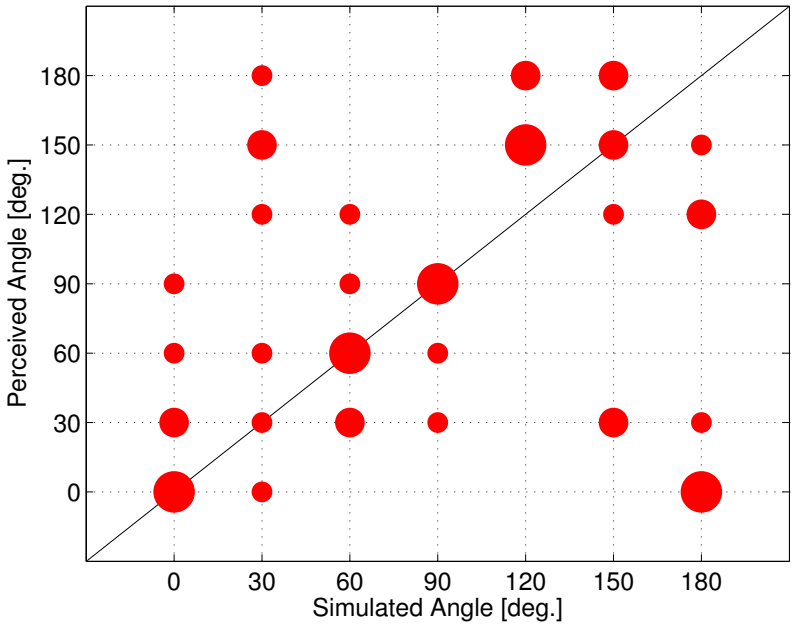
割った値は 1.15 であった．1 に近い値であれば同等の音像定位精度であることを表すので，同等の精度が得られたと言える．

4.3 まとめ

第４章では，第３章で求めた P1, N1, N2 の許容範囲の妥当性を示すために，individualized HRTF と produced HRTF の音像定位精度の比較を行った．５名中３名は produced HRTF の定位精度が individualized HRTF の定位精度に近い結果が得られた．よって，P1, N1, N2 の許容範囲について，N1 は狭く，P1 および N2 は広いという結果の妥当性を述べた．

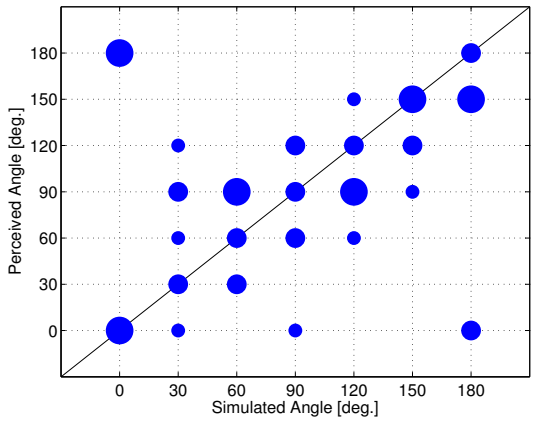


(a) individualized HRTF

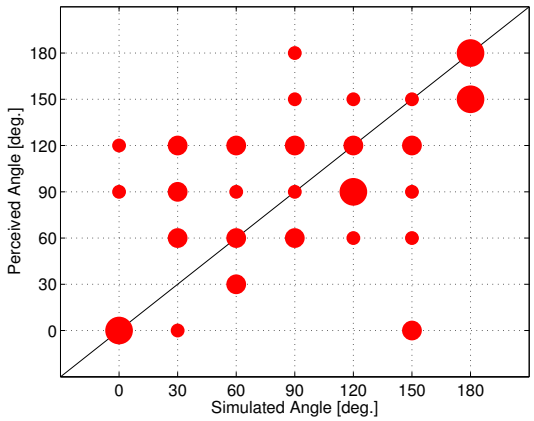


(b) produced HRTF

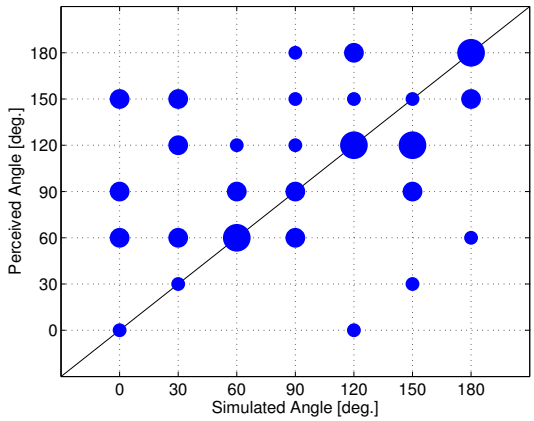
図 4.1: 被験者 1 の音像定位結果



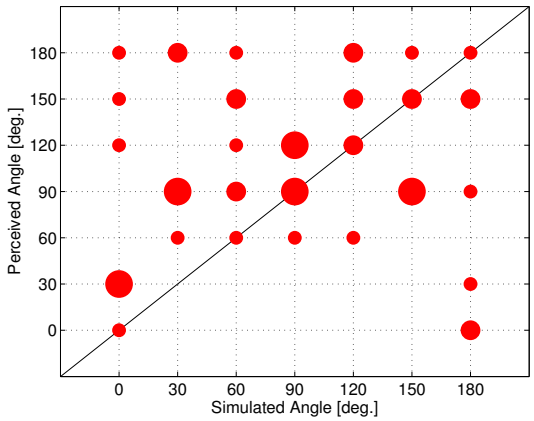
(a) individualized HRTF (被験者 2)



(b) produced HRTF (被験者 2)

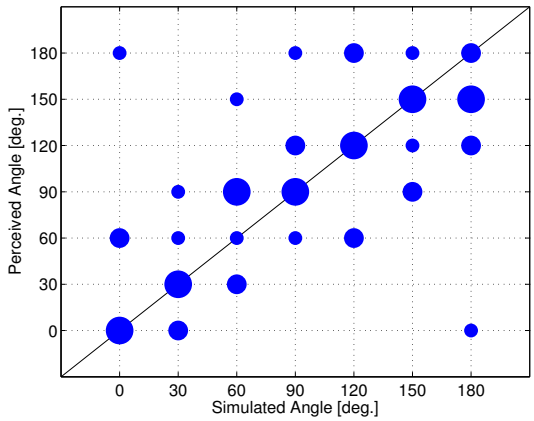


(c) individualized HRTF (被験者 3)

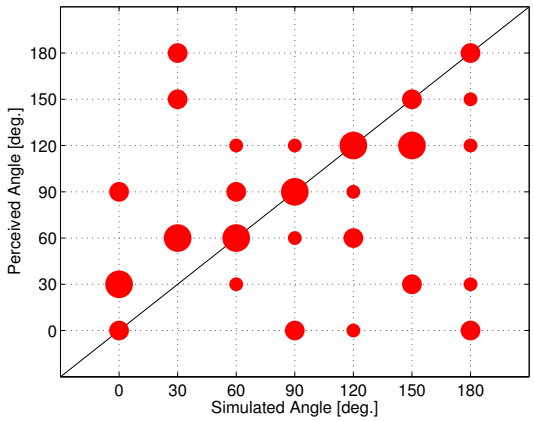


(d) produced HRTF (被験者 3)

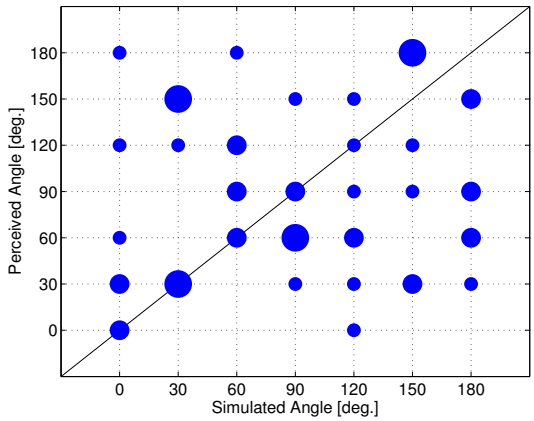
図 4.2: 被験者 2，3 の音像定位結果



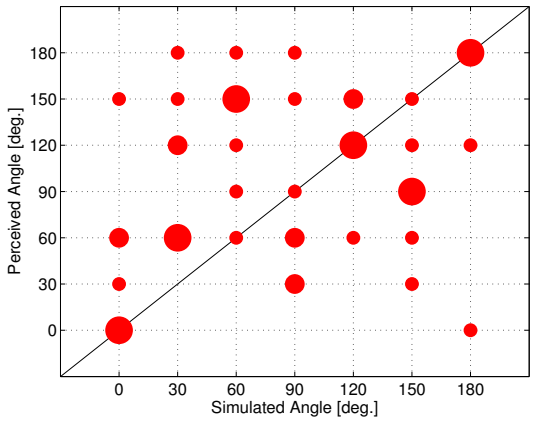
(a) individualized HRTF (被験者 4)



(b) produced HRTF (被験者 4)



(c) individualized HRTF (被験者 5)



(d) produced HRTF (被験者 5)

図 4.3: 被験者 4，5 の音像定位結果

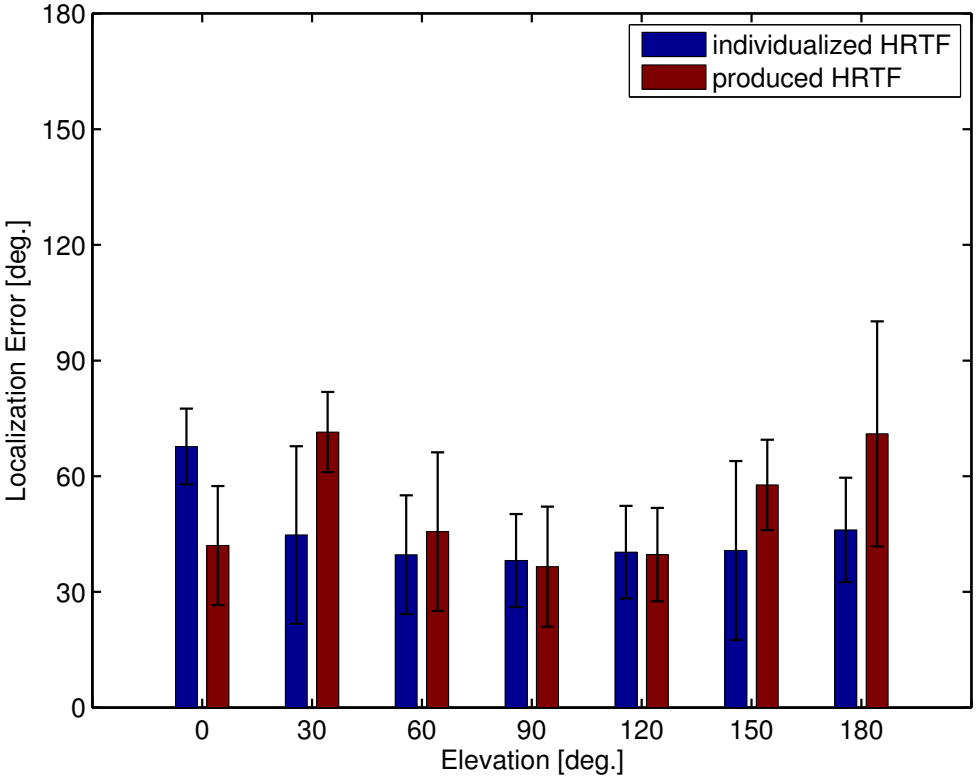


図 4.4: 全被験者の音像定位誤差率

第5章　結論

5.1　本研究で明らかになったことの要約

本研究は，正中面における HRTF の個人化に向けて，音像定位の重要な手掛りである P1, N1, N2 について基礎資料を得ることを目的として，多少の変動が生じても音像定位するという許容範囲を求めた．そのために，以下に示すように段階的に行った．

第 2 章：許容範囲を明らかにするための事前調査として，P1, N1, N2 について聴取者間でどの程度の個人差があり，また音源方向により P1, N1, N2 の振る舞いを分析した

- P1, N1, N2 について，音源方向によるその振る舞いを求め先行研究の知見通りの結果が得られた．P1, N1, N2 の個人差について，いづれも同程度であることがわかった

第 3 章：聴取実験により HRTF データベースから定位感の良い HRTF を複数選択し，選択された複数の HRTF についての傾向を分析することで P1, N1, N2 の許容範囲を求めた

- 許容範囲について，N1 の許容範囲は狭く，P1, N2 は広いということが明らかになった．

第 4 章：P1, N1, N2 の許容範囲の妥当性を述べるために音像定位実験を行った

- 5 人中 3 人に許容範囲の妥当性を示す結果が得られた

これらより，本研究で得られた知見は以下の通りである．

- P1, N1, N2 の許容範囲について，N1 の許容範囲は狭く，P1 および N2 は広い

これらの知見に基づくと，正中面における HRTF の個人化を行うには，N1 を聴取者に厳密に適合させることが特に重要であり，P1, N2 は厳密な制御でなくとも定位に影響が無いことが示唆できる．

5.2 今後の展望

本研究では，正中面の HRTF の個人化の基礎資料として P1, N1, N2 の許容範囲を求め，正中面における HRTF の個人化には N1 を聴取者に厳密に適合させる必要があることを示唆した．正中面の HRTF の個人化を行う上での基礎資料は得たが，本研究で得られた知見を活かせる個人化方法の確立には至っていない．そこで例として，Nguyen ら [38] が提案 している，Temporal Decomposition (TD) と Gaussian Mixture Model (GMM) を用いたモデルを HRTF の変形に適応すれば，P1, N1, N2 を直接制御できる新たなモデルが提案できる．これにより，正中面の HRTF の個人化に重要である N1 の直接制御が可能となるだけではなく，P1, N1, N2 の直接制御ができることから，任意の HRTF 一つあればどんな聴取者にも適合するような HRTF の作成が可能となると考えられる．このようなモデルが今後提案される中，本研究で得られた知見が役に立てば幸いである．

謝辞

本研究を進めるにあたり，多大なる御指導ならびに御鞭撻を賜りました北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科の赤木 正人 教授に深く感謝致します．また，折に触れて御指導，御討論いただきました，北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科の鵜木祐史 准教授，宮内 良太 助教に心より感謝致します．さらに，本研究を進めるにあたり，熱心に御討論頂き，また御助言を賜りました北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科の党 建武 教授，末光 厚夫 助教，川本 真一 助教に心より感謝致します．加えて，本研究の遂行にあたり，実験を行う貴重なデータをご提供していただきました，東北大学電気通信研究所 鈴木陽一 教授, 東北学院大学 工学部 電気情報工学科 岩谷幸雄 教授に深く感謝いたします．本研究を進めるにあたり，日頃から熱心な議論と激励をいただき，さらには，公私にわたり本学での生活を支えてくださった，研究員の木谷 俊介氏，博士後期課程の濱田 康弘氏，森田 翔太氏，久保 理恵子氏，西江 純教氏，金井 康昭氏に心より感謝致します．その他，本研究の遂行に際して，多忙な中，貴重な時間を割いて本研究の実験に参加していただいた赤木，鵜木研究室の皆さんに心より感謝いたします．また，本研究を進めるにあたり，日頃から熱心な議論と激励をいただきました，音情報処理分野の諸先輩方，及び諸氏に熱く御礼申し上げます．

最後に，本学での研究生活を支え温かく見守ってくれた両親ならびに，常に励ましたくださった多くの皆様に心から感謝致します．

参考文献

[1] J. Blauert, “Spatial Hearing : The Psychophysics of Human Sound Localization Revised Edition,” The MIT Press, Cambridge, MA, Chap. 2.4, pp. 137–177, 1997.

[2] M. Morimoto, and Y. Ando, “On the simulation of sound localization,” *J. Acoust. Soc. Jpn.*, 1, pp.167–174, 1980.

[3] F.L. Wightman and D. J. Kistler “Headphone simulation of free-field listening. I: Stimulus synthesis," *J. Acoust. Soc, Am,*, vol. 85, pp. 858–867, 1989.

[4] F.L. Wightman and D. J. Kistler “Headphone simulation of free-field listening. II: Phychophysical validation," *J. Acoust. Soc, Am,*, vol. 85, pp. 868–878, 1989.

[5] 川浦 淳一, 鈴木 陽一, 浅野 太, 曽根 敏夫, “頭部伝途関数の模擬によるヘッドホン再生音像の定位," 音響学会誌, vol.45, pp.756–766, 1989.

[6] 小泉宣夫, “バーチャル・リアリティと音響技術," 音饗学会誌, vol. 49, pp.497–501, 1993.

[7] E. M. Wenzel, M. Arruda, D. J. Kistler, and F. L. Wightman, “Localization using nonindividualized head-related transfer functions, ”*J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.94, no.1, pp.111–123, 1993.

[8] S. Yairi, Y. Iwaya, Y. Suzuki, “Individualization feature of head-related transfer functions based on subjective evaluation," *Proc. of the 14th ICAD, Paris*, pp. 24–27, 2008.

[9] Y. Iwaya, “Individualization of head-related transfer functions with tournament-style listening test: Listening with other ’s ears, ”*Acoust. Sci and Tech.*, Vol. 27, no. 6, pp. 340–343, 2006.

[10] M. D. Burkhard and R. M. Sachs, “Mesuring the Constants of Ear Simulators,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 58, No. 1, pp.214–222, 1975.

[11] 飯田 一博, 中村 一啓, “正中面の頭部伝達関数の非個人化に関する一考察,” 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp. 297–298, 2000.

[12] 西野 隆典, 中井 勇祐, 武田 一哉, 板倉 文忠, “重回帰分析に基づく頭部伝達関数の推定, ”電子情報通信学会論文誌, Vol. J84-A, No. 3, pp. 260–268, 2001.

[13] B. F. G. Katz, “Boundary element method calculation of individual head-related transfer function. I. Rigid model calculation.,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 110, pp.2440–2448, 2001.

[14] M. Parham, T. Hironori, N. Ryouichi, and K. Hiroaki, “Comparison of simulated and measured HRTFs: FDTD simulation using MRI head data, ”*Audio. Engineering Soc.*, pp. 7240–7251, 2007.

[15] D. Wright, J. H. Hebrank, and B. Wilson, “Pinna reflections as cues for localization, ” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 56, pp. 957–962, 1974.

[16] B. C. J. Moore, S. R. Oldfield, and G. Dooley, “Detection and discrimination of spectral peaks and notches at 1 and 8 kHz, ”*J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 85, pp. 820–836, 1989.

[17] P. Hofman, J. Van Riswick , A. Van Opstal, “Relearning sound localization with new ears, ”Nat Neurosci, 1, pp. 417–421, 1998.

[18] K. Watanabe, K. Ozawa, Y. Iwaya, Y. Suzuki and K. Aso, “Estimation of interaural level difference based on anthropometry and its effect on sound localization, ”*J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 122, pp.2832–2841, 2007.

[19] J. Blauert, “Sound localization in the median plane, ”ACUSTICA, 22, pp.206–213, 1969 / 70.

[20] M. Itoh, K. Iida, M. Morimoto, “Individual differences in directional bands in median plane localization, ”Applied Acoustics, Vol. 68, No. 8, pp.909–915, 2007.

[21] F. Asano, Y. Suzuki, T. Sone, “Role of spectral cues in median plane localization, ” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 88, pp. 159–168, 1990.

[22] K. Iida, M. Itoh, A. Itagaki, and M. Morimoto, “Median plane localization using parametric model of the head-related transfer function based on spectral cues, ”*Applied Acoustics.*, Vol. 68, No. 8, pp. 835–850, 2007.

[23] M. B. Gardner and R. S. Gardner, “Problem of localization in the median plane : effect of pinnae cavity occlusion, ”*J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 53, pp. 400–408, 1973.

[24] K. Iida, M. Yairi, and M. Morimoto, “Role of pinna cavities in median plane localization, ”*Proc.16th International Congress on Acoustics (Seattle)*, Vol.103, No.5, pp. 845–846, 1998.

[25] Y. Iwaya and Y. Suzuki, “Numerical analysis of the effects of pinna shape and position on the characteristics of head-related transfer functions, ”*J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 123, pp. 3297–3297, 2008.

[26] H. Takemoto, P. Mokhtari, H. Kato, R. Nishimura, and K. Iida, “Basic investigation for effects of pinna shapes on head related transfer functions, ”*Proc. Autum Meeting of the Acoustical Society of Japan*, pp. 1445–1448, 2009.

[27] 石井 要次, 和田 万正, 蒲生 直和, 飯田 一博, “個人に適合した頭部伝達関数の探索方法に関する一考察, ”日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp. 521–522, 2009.

[28] 石井 要次, 蒲生 直和, 飯田 一博, “スペクトラルキューに基づいた頭部伝達関数の個人化方法とその精度について, ”日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp. 581–584, 2010.

[29] 岡松 俊哉, 西岡 伸介, 石井 要次, 竹本 浩典, 飯田 一博, “3 つの直方体の窪みで構成した耳介モデルの伝達関数 – I : 耳介モデルの伸縮が伝達関数に及ぼす影響 –, ”日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp. 563–564, 2012.

[30] 土屋 宏樹, 坂口 慎治, 石井 要次, 竹本 浩典, 飯田 一博, “3 つの直方体の窪みで構成した耳介モデルの伝達関数 – II : 耳介モデルと実耳介の伝達関数の比較 –, ”日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp. 564–565, 2012.

[31] E. H. A. Langendijk, A. W. Bronkhorst, “Contribution of spectral cues to human sound localization, ”*J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 112, pp. 1583–1596, 2002.

[32] 曲谷地 哲, 岩谷 幸雄, 鈴木 陽一, “仰角依存性の強い帯域のレベルを模擬した頭部伝達関数による正中面定位, ”日本音響学会聴覚研究会資料, Vol. 42, No. 1, pp. 47–52, 2012.

[33] 石井 要次, 西岡 伸介, 飯田 一博, “正中面のスペクトラルノッチと耳介形状の個人差に関する考察 –定量的個人差情報を備えた頭部伝達関数データベースの構築–,” 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp. 463–466, 2012.

[34] 森本 政之, 斉藤 明博, “音の正中面定位について : 刺激の周波数範囲と強さの影響について,” 日本音響学会聴覚研究会資料, H–40–1, 1977.

[35] R. B. King and S. R. Oldfield, “The Impact of Signal Bandwidth on Auditory Localization: Implications for the Design of Three-Dimensional Audio Displays, ” *Human Factors*, Vol. 39, No. 2, 1997.

[36] J. Hebrank and D. Wright, “Spectral cues used in the localization of sound sources on the median plane, ” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 56, No. 6, pp. 1829–1834, 1974.

[37] 飯田 一博, 蒲生 直和, 石井 要次, “頭部伝達関数の第 1・第 2 ノッチの検出方法に関する一考察, ”日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp. 473–476, 2010.

[38] B. P. Nguyen and M. Akagi, “A flexible spectral modification metod based on temporal decomposition and Gaussian mixture model,” *Acoustical Science and Technology*, Vol. 30, No. 3, pp. 170–179, 2009.

本研究に関する研究業績

国際会議

- H. Hisatsune and M. Akagi, "A Study on individualization of Head-Related Transfer Function in the median plane," *Proc. 2013 RISP International Workshop on Nonliner Circuits, Communications and Signal Processing*, pp. 401–404, Hawaii, USA, March 2013 (to be appeared).