

Title	調波複合音のスペクトル包絡に応じて変化する音の高さに関する研究
Author(s)	石田, 舞
Citation	
Issue Date	2010-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/8956
Rights	
Description	Supervisor: 赤木正人, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

調波複合音のスペクトル包絡に応じて変化する
音の高さに関する研究

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

石田 舞

2010年3月

修 士 論 文

調波複合音のスペクトル包絡に応じて変化する
音の高さに関する研究

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 鵜木祐史 准教授
審査委員 徳田功 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

0810004 石田 舞

提出年月: 2010年2月

概要

音の高さは基本周波数あるいは基本周期に応じて変化する（本研究では周波数に着目するため、基本周期は割愛する。）が、基本周波数に応じて変化する音の高さ以外に、調波複合音の周波数成分強度（スペクトル包絡）に応じて変化する音の高さの存在が知られている。本研究では、この知覚要因を検討するために、「スペクトル包絡は同じであるが、基本周波数が異なる」音と、「基本周波数は同じであるが、スペクトル包絡が異なる」音という2つの条件の刺激音について音の高さに関する検討を行った。各条件の刺激音の音の高さが異なることを確かめ、それらの刺激音を音の高さの順に並べるために、まず「スペクトル包絡は同じであるが、基本周波数が異なる」条件の刺激音を作成し、音の高さに関するシェッフェの一対比較実験を行った。その結果、基本周波数が昇順に変化した刺激音は音の高さが昇順になるように並べられることを確認した。これらの刺激音の音に対する高さの知覚は、基本周波数に強く関係していることがわかった。また「基本周波数は同じであるが、スペクトル包絡が異なる」条件の刺激音を作成し、音の高さに関するシェッフェの一対比較実験を行った。その結果、スペクトル包絡が異なる刺激音は、スペクトル包絡の形状によって、音の高さが変化することを確認した。この音の高さはスペクトル包絡のピークの周波数、スペクトル包絡の傾き、スペクトル包絡の重心に応じて音の高さが変化しているように考えられた。次に、これら二つの条件の刺激音全てを用いて、対比較実験を行い音の高さの順に並べられるか検討した。しかし、実験参加者によって実験結果にばらつきがあり、また音の高さの比較ができなかった刺激音があった。このように異なる条件の刺激音の音の高さを比べることは非常に困難であったため、各条件の音の高さに関する知覚要因が異なる可能性が示唆された。そこで各条件の音の高さの知覚に関する要因が異なるかどうかを調べるために、全ての刺激音に対し、心理距離をもとにMDS分析を行い、心理距離空間を構築した。それぞれの条件のシェッフェの一対比較実験の結果に関して重回帰分析を行い、MDSで構築した心理距離空間に当てはめた。その結果、それぞれの刺激音の、音の高さの知覚要因が異なる可能性が示唆された。また、「基本周波数は同じであるが、スペクトル包絡が異なる」条件での音の高さの知覚要因に関して、重回帰分析を行うことにより、スペクトル包絡の重心が、スペクトル包絡に応じて変化する音の高さに強く関係している可能性が示唆された。

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	背景	1
1.3	本研究の目的	2
1.4	研究方法	2
1.5	本論文の構成	4
第2章	基本周波数の変化による音の高さの変化	5
2.1	実験Iの目的	5
2.2	実験方法	5
2.2.1	実験システムの周波数特性	5
2.2.2	刺激音	6
2.2.3	刺激音の補正	7
2.2.4	実験概要	15
2.3	結果と考察	15
2.3.1	シェップエの対比較による実験結果	15
2.3.2	考察	17
第3章	スペクトル包絡の違いによる音の高さの変化	18
3.1	実験IIの目的	18
3.2	実験方法	18
3.2.1	刺激音	18
3.2.2	実験概要	22
3.3	結果と考察	22
3.3.1	シェップエの対比較による実験結果	22
3.3.2	考察	22
第4章	全刺激音を用いた音の高さの対比較実験	24
4.1	目的	24
4.2	音の高さ知覚の要因	24
4.2.1	全刺激音を用いた音の高さの比較	24
4.2.2	音の高さに関する比較が困難であった例	25

第 5 章	多次元尺度構成法 (MDS) による心理距離空間の構築	27
5.1	実験 III の目的	27
5.2	実験方法	27
5.2.1	刺激音	27
5.2.2	実験概要	27
5.3	MDS 分析による心理距離空間	28
第 6 章	音の高さ知覚に関係する要因	33
6.1	音の高さの知覚要因	33
6.2	音の高さ知覚に関連する物理量	35
第 7 章	結論	37
7.1	本論文のまとめ	37
7.2	今後の展望	37
付 録 A	場所説と時間説による音の高さに関する調査	39
A.1	目的	39
A.2	実験概要	39
A.2.1	刺激音	39
A.2.2	実験方法	40
A.3	結果と考察	40
付 録 B	スペクトル包絡が異なる調波複合音と同じ音の高さに感じられる純音の周波数に関する調査	42
B.1	目的	42
B.2	実験概要	42
B.2.1	刺激音	42
B.2.2	純音	43
B.2.3	実験方法	43
B.3	結果と考察	44

目次

1.1	スペクトル包絡の形状が異なる調波複合音の振幅スペクトル	2
1.2	本研究の流れ	3
2.1	実験システム	7
2.2	周波数特性の調査で用いた機器	8
2.3	TSP 信号	8
2.4	TSP 信号の周波数特性	9
2.5	実験系と人工耳を経由して観測された TSP 信号	10
2.6	時間を反転した TSP 信号 (逆 TSP)	11
2.7	実験系の周波数特性	12
2.8	図 2.2 によって録音した補正前のスペクトル包絡が平坦な刺激音	13
2.9	刺激音 G の振幅スペクトル	14
2.10	聴取実験の様子	15
2.11	刺激音呈示のタイムパターン	16
2.12	聴取実験での評価尺度	16
2.13	実験 I の結果	17
3.1	実験 II で用いた刺激音の例	19
3.2	実験 II で用いた刺激音 (刺激音 D, H, I, J)	20
3.3	実験 II で用いた刺激音 (刺激音 K, L, M, N)	21
3.4	実験 II の結果	23
4.1	音の高さに関する実験 I で用いた刺激音と実験 II で用いた刺激音の比較	26
5.1	次元数とストレス値の関係	29
5.2	MDS 分析の結果: 次元 1 と次元 3	30
5.3	MDS 分析の結果: 次元 2 と次元 3	31
5.4	MDS 分析の結果: 次元 2 と次元 4	32
6.1	MDS 分析の結果: Dimension 2 と Dimension 3 における音の高さの軸 (実験 I の音の高さ: 実線, 実験 II の音の高さ: 点線)	34

6.2	MDS 分析の結果: Dimension 2 と Dimension 3 における, スペクトル包絡のピークの周波数 (紅紫色), スペクトル包絡の傾き (緑), スペクトル包絡の重心 (赤) の軸	36
B.1	刺激音 S の振幅スペクトル	43
B.2	刺激音 T の振幅スペクトル	44
B.3	刺激音 U の振幅スペクトル	45
B.4	149 Hz の純音を再生したときの周波数特性	45
B.5	150 Hz の純音を再生したときの周波数特性	46
B.6	151 Hz の純音を再生したときの周波数特性	46

表 目 次

2.1	実験 I の刺激音	7
2.2	95 % もしくは 99 % 区間でシェッフェの一対比較の結果 (実験 I) における差が有意でなかった刺激音の組み合わせ	17
3.1	シェッフェの一対比較の結果 (実験 II) における差が有意でなかった刺激音の組み合わせ	22
5.1	実験 III の評価尺度	28
5.2	ストレスの評価	28
6.1	MD S 分析結果と実験 I, II の結果に関する重回帰分析の調整済み R ² 乗	35
6.2	MD S 分析結果と物理相関量に関する重回帰分析の調整済み R ² 乗	36
A.1	実験で使用した刺激音	40

第1章 序論

1.1 はじめに

音の知覚には、音の感覚的性質を表す「大きさ」、「高さ」と「音色」の三つの属性がある。感覚量である大きさ、高さに対応する物理量はそれぞれ振幅、周波数と言われている。大きさと高さが同じ二つの音が、違う音として聞こえるとき、その違いが音色であるとされている。しかし、異なる楽器で同じ基本周波数の音を出したとき、異なる音の高さに聞こえることがある。このことから、音の高さは基本周波数のみでは決まらず、基本周波数によらない音の高さが存在する可能性が考えられる。本研究では、聴覚の知覚特性の一つである「音の高さ」に着目する。基本周波数によらない音の高さの知覚について、すなわち、音色に区分される音の特徴が音の高さに及ぼす影響についての調査を行う。この調査を行い、基本周波数以外の、音の高さに影響を及ぼす物理量を検討する。

1.2 背景

基本周波数によらない音の高さに関する過去の研究として、Zwicker[1]らは、第2高調波の強度により音の高さが増加することを示した。また、Ritsma[2]は、基本周波数 100 から 400 Hz の複合音において、第3から第5高調波の周波数帯域が 10 dBSL 以上である場合、それらの高調波が高さの感覚を支配する傾向があることを示した。このことから低次の高調波成分が音の高さに影響を及ぼしていることが考えられる。

これらの研究より、基本周波数によらない音の高さは、調波複合音の低次の周波数成分強度に関係していると考えられる。しかしこれらの研究では調波複合音における、周波数成分強度（スペクトル包絡）と音の高さの関係についての詳細はわからない。そこで本研究では調波複合音におけるスペクトル包絡の形状と音の高さの関係に関する調査を行うことで、基本周波数以外の、音の高さに影響を及ぼす物理量を検討する。

スペクトル包絡に応じて変化する音の高さの存在と、その音の高さに強く影響を及ぼしている物理量が明らかになれば、音の高さに関する聴覚の特性がより明らかになる可能性が考えられる。音の高さに関する聴覚の特性がより明らかになることで、スペクトル包絡から、音の高さがどのように聞こえるのかを分析することができる可能性がある。スペクトル包絡による音の高さに関する聴覚の特性を考慮して音を作ること、より高く（低く）感じられる音を作ることができると考えられ、より高く（低く）感じられる音を再生する装置を開発することが出来る可能性も考えられる。

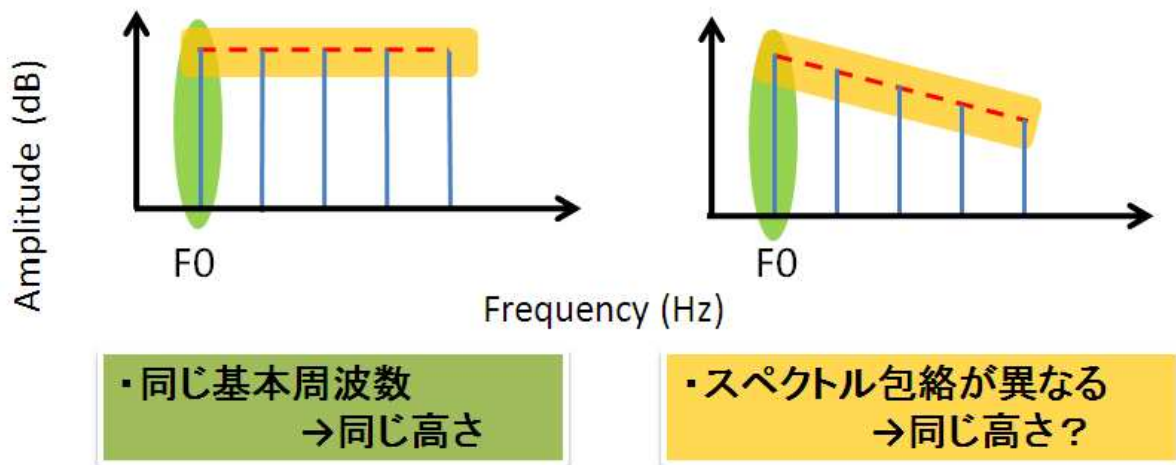


図 1.1: スペクトル包絡の形状が異なる調波複合音の振幅スペクトル

1.3 本研究の目的

本研究の目的は、調波複合音のスペクトル包絡に応じて変化する音の高さの存在を確かめることと、その音の高さの知覚要因について、基本周波数以外の音の高さに影響を及ぼす物理量を検討することである。

調波複合音の基本周波数によらない音の高さは、スペクトル包絡に関係していると考えられた。そこで本研究では、スペクトル包絡が様々な刺激音を作成し、スペクトル包絡に応じて変化する音の高さに関して調査を行う。図 1.1 に示す 2 つの音は、基本周波数が同じであるが、スペクトル包絡は異なっている。このように各倍音の周波数成分強度を変化させることで、様々なスペクトル包絡からなる調波複合音を作成し、スペクトル包絡と音の高さの関係について調査する。

1.4 研究方法

本研究では、基本周波数に応じて変化する音の高さ以外に、調波複合音のスペクトル包絡に応じて変化する音の高さの存在と、その音の高さの知覚要因を検討し、基本周波数以外の音の高さに影響を及ぼす物理量を調査するために、聴取実験を行う。図 1.2 に示すように三種類の実験を行い、スペクトル包絡に応じて変化する音の高さに関して検討する。

実験 I, II の目的は、各条件の刺激音の音の高さが異なることを確かめ、それら刺激音を音の高さの順に並べることである (図 1.2 (A))。実験 I では「スペクトル包絡は同じであるが、基本周波数が異なる」条件のいくつかの刺激音を用いて、これらの刺激音を音の高さの順に並べる。実験 II では「基本周波数は同じであるが、スペクトル包絡は異なる」条件のいくつかの刺激音を用いて、これらの刺激音を音の高さの順に並べる。

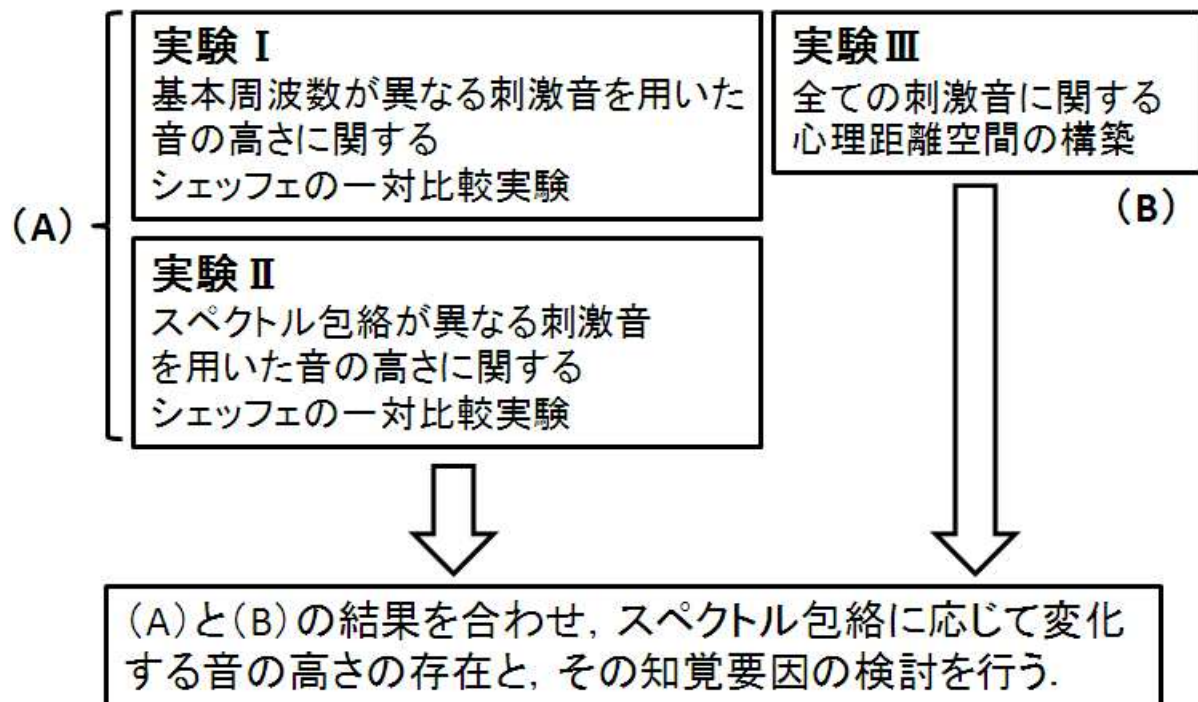


図 1.2: 本研究の流れ

次に、「基本周波数は同じであるが、スペクトル包絡は異なる」条件の刺激音の高さが、「スペクトル包絡は同じであるが、基本周波数は異なる」条件の、どの刺激音の高さに対応するかを調べるために、両条件全ての刺激音に関して、音の高さを比較する聴取実験を行うことを試みた。しかし、異なる条件の刺激音の音の高さを同時に比較することは困難であった。

そこで実験Ⅲとして、両条件全ての刺激音に関して、心理距離を調査する。この心理距離をもとに、MDS分析を行い心理距離空間を構築する（図 1.2 (B)）。重回帰分析を用いて、両条件それぞれの音の高さに関する実験Ⅰ、Ⅱの結果をMDSで構築した心理距離空間に当てはめることにより、2つの条件では知覚要因が異なるという可能性を検討する。また、「基本周波数は同じであるが、スペクトル包絡が異なる」刺激音に関して、重回帰分析を用いて、刺激音のいくつかの物理量をMDSで構築した心理距離空間に当てはめる。これにより、スペクトル包絡に応じて変化する音の高さに強く影響を及ぼしている物理量を検討する。

1.5 本論文の構成

本論文は7章で構成される

第1章

本論文が対象としている研究の背景と本研究の目的を述べ、本研究の構成を示す。

第2章

「スペクトル包絡は同じであるが、基本周波数が異なる」条件の刺激音について、音の高さに関するシェッフェの対比較実験を行った結果を示す。

第3章

「基本周波数は同じであるが、スペクトル包絡が異なる」条件の刺激音について、音の高さに関するシェッフェの対比較実験を行った結果を示す。

第4章

全刺激音を用いた音の高さに関する対比較実験について述べる。

第5章

スペクトル包絡によって変化する音の高さに対応する物理量を検討するために行った多次元尺度構成法（MDS）による心理距離空間の構築について述べる。

第6章

各条件の音の高さに関する知覚要因が異なる可能性に関して検討する。また、スペクトル包絡により異なる音の高さに強く関係している物理量に関して検討する。

第7章

本論文で得られた結果のまとめと、今後の展望を述べる。

第2章 基本周波数の変化による音の高さの変化

2.1 実験Iの目的

実験Iでは調波複合音の基本周波数に応じて変化する音の高さが判別できるかどうかについて調査を行う。基本周波数と音の高さに関する聴取実験を行うことで、スペクトル包絡は同じであるが基本周波数が異なる刺激音を、音の高さの順に並べることが目的である。

2.2 実験方法

2.2.1 実験システムの周波数特性

本研究では、スペクトル包絡の形状が重要であるため、意図したスペクトル包絡がヘッドホンから呈示されるように、実験系の周波数特性を測定し、刺激音の補正を行う。本研究で使用した実験機器を図2.1に示す。本研究ではTSP信号を用いて、実験機器の周波数特性を調べた。実験機器の周波数特性を調べる際、図2.2に示す機器を使用して録音を行った。

実験系の周波数特性を調べるためには、実験系のインパルス応答を計測するが、持続時間の短いパルス波を用いてインパルス応答を測定する場合、パルス派のエネルギーが小さく、外乱の影響を受けやすい。そのため、信号 (Signal) と雑音 (Noise) のエネルギー比である S/N 比が小さくなってしまふ。そこで本研究では、持続時間の短いパルス波の代わりに、TSP信号を用い、実験系のインパルス応答を計測した。

TSP信号とは持続時間の短いパルス波へ、周波数に比例した遅延を与えた信号である (図2.3, 2.4)。この遅延により、ある時刻に集中していたエネルギーを、時間軸上に分散することができる。そのため、信号のエネルギーを高めることができ、S/N比を大きくすることができる。また、TSP信号は、TSP信号を時間軸上で逆転した波形 (逆TSP) とたたみこみを行うことにより、インパルスになるように設計されている。

本実験で使用する実験系の周波数特性を得るために、実験系から再生されたTSP信号を人工耳を通し録音した (図2.5)。録音されたTSP信号と逆TSP (図2.6) のたたみこ

みによって、図 2.7 に示すような実験系の周波数特性を得た（周波数特性は実験ごとに異なる）。

図 2.7 より、およそ 0 から 150 Hz の周波数帯域の音は、意図した通りにヘッドホンから音を呈示することが困難であると考えられる。およそ 150 Hz 以上の周波数成分を含む刺激音ならば、周波数特性の逆特性を用いて刺激音の補正を行うことで、意図したスペクトル包絡からなる音を再生することができる可能性が高いと考えられる。

2.2.2 刺激音

E. Zwicker[1] らは、第 2 高調波の強度により音の高さが変化することを示した。この第 2 高調波の強度による音の高さ変化は、基本周波数が 100 から 500 Hz の音についての結果であり、基本周波数が低いものほど高調波成分が音の高さに影響を及ぼしているという結果が示されていた。そのため、本研究では、高調波成分が音の高さに影響を及ぼすと考えられる 100 から 500 Hz の基本周波数からなる刺激音を用い、基本周波数が低いものほど高調波成分が音の高さに影響を及ぼす可能性が高いと考えられるため、より低い基本周波数からなる刺激音を用いることとした。また、本研究の実験システムの周波数特性より、およそ 150 Hz 以上の周波数成分を含む刺激音ならば、意図したスペクトル包絡からなる音を再生することができる可能性が高いと考えられるため、実験 I で用いる刺激音の基本周波数は、150 Hz を中心とする 144 から 156 Hz の基本周波数からなる調波複合音とした。

また、Ritsma[2] は、基本周波数 100 から 400 Hz の複合音において、第 3 から第 5 高調波の周波数帯域が 10 dBSL 以上である場合、それらの高調波が高さの感覚を支配する傾向があることを示した。この研究結果から、低次の高調波成分が音の高さに影響を及ぼしていることが考えられる。そこで、本研究で用いる刺激音の高調波成分について、低次であると考えられる第 7 高調波成分までを含む調波複合音を刺激音とすることとした。

また、純音の周波数弁別に関して、周波数が 140 から 160 Hz の範囲である純音は、その純音の周波数との差が 0.4 から 1 Hz あった場合、それらの純音を異なる高さで弁別できる可能性が高いことが示された [3]。このことから、本研究で用いる刺激音に関して、調波複合音の基本周波数が 2 Hz ずつ異なれば、それらの刺激音は異なる高さで弁別出来ると考えた。

これらを受けて実験で用いる刺激音は、基本周波数が 144 から 156 Hz の範囲で 2 Hz ずつ異なる、基音から第 7 高調波までを含む調波複合音、計 7 種類とした。これらの刺激音はスペクトル包絡が平坦な音である（表 2.1）。また基本周波数の順に刺激音 A から刺激音 G とした。刺激音のサンプリング周波数は 44100 Hz である。

表 2.1: 実験 I の刺激音

刺激音名	基本周波数 (Hz)	スペクトル包絡の形状
A	144	平たん (傾き: 0 dB/Hz)
B	146	
C	148	
D	150	
E	152	
F	154	
G	156	

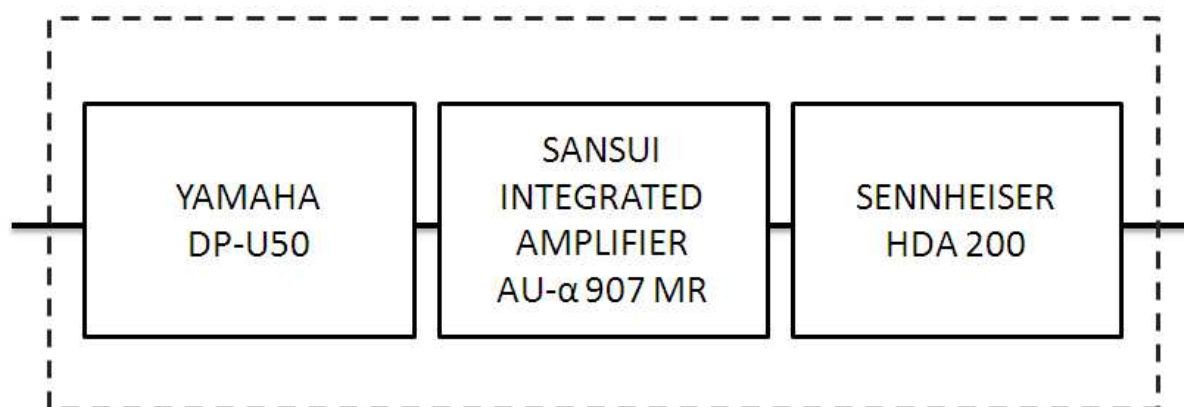


図 2.1: 実験システム

2.2.3 刺激音の補正

図 2.8 に示した刺激音は、実験系と人工耳から再生された、スペクトル包絡が平坦な補正前の刺激音である（図 2.2 に示す機器を用いて録音を行った.）。本実験では、スペクトル包絡の形状が重要であるため、ヘッドホンを含む耳までの伝達特性を考慮し、刺激音を実験系の周波数特性の逆特性で補正した。図 2.9 に示した刺激音は、補正後のスペクトル包絡が平坦な刺激音である。この図から、意図通りの刺激音が呈示できたことがわかる。

周波数特性の測定と刺激音の補正は、実験ごとに行った。音圧レベルは、A 特性、騒音計の時間重み付け特性は Fast で測定した。

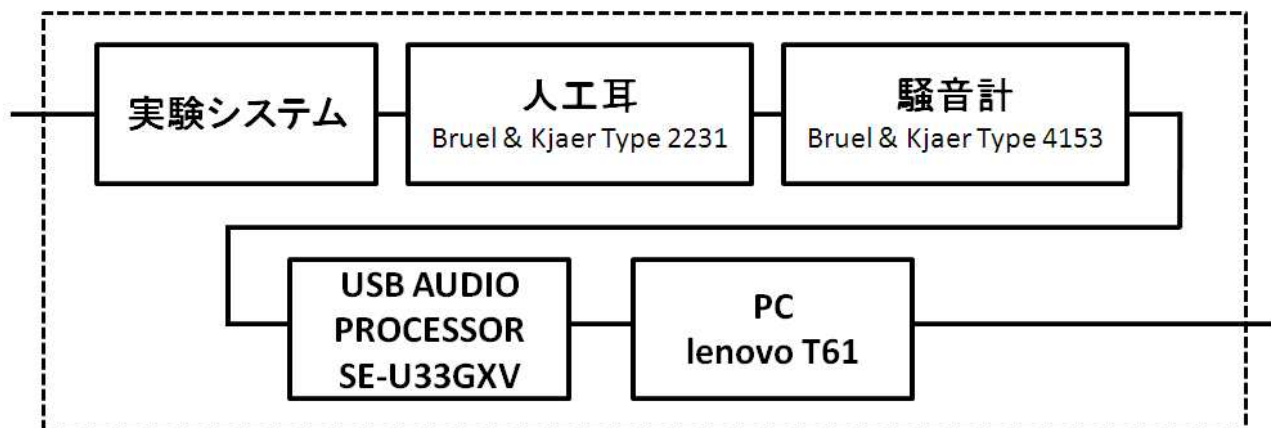


図 2.2: 周波数特性の調査で用いた機器

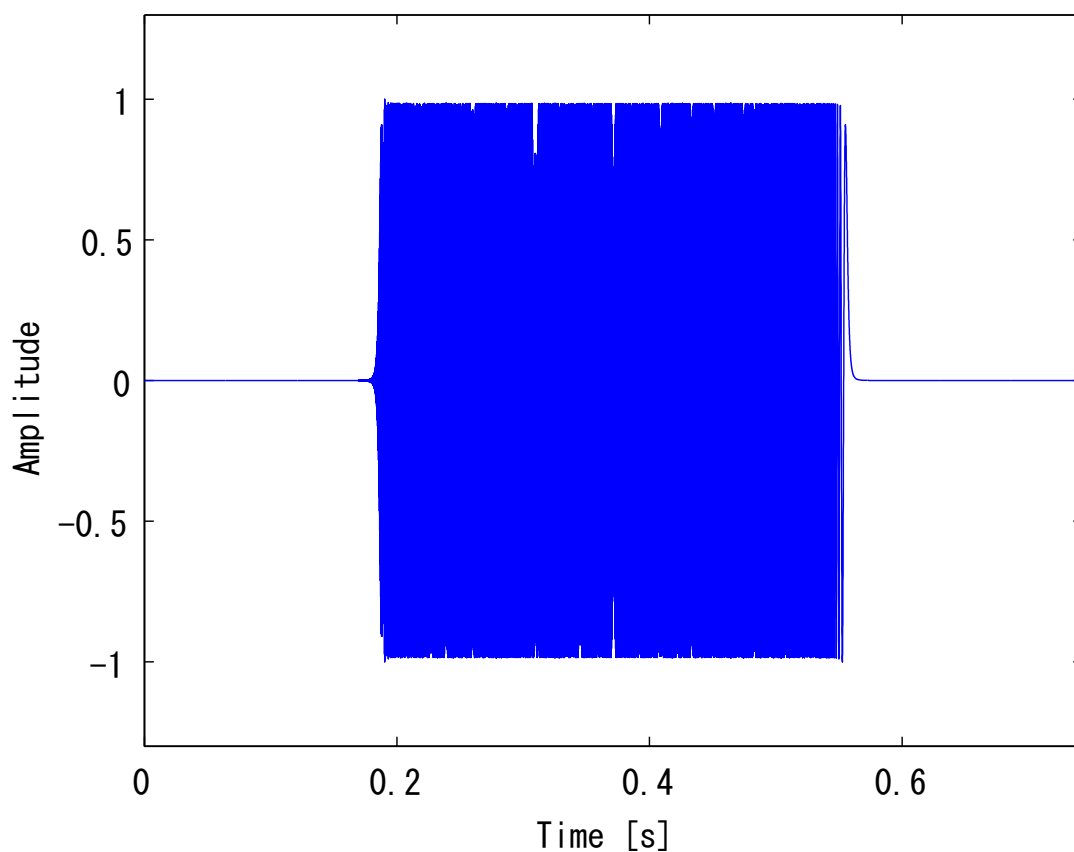


図 2.3: TSP 信号

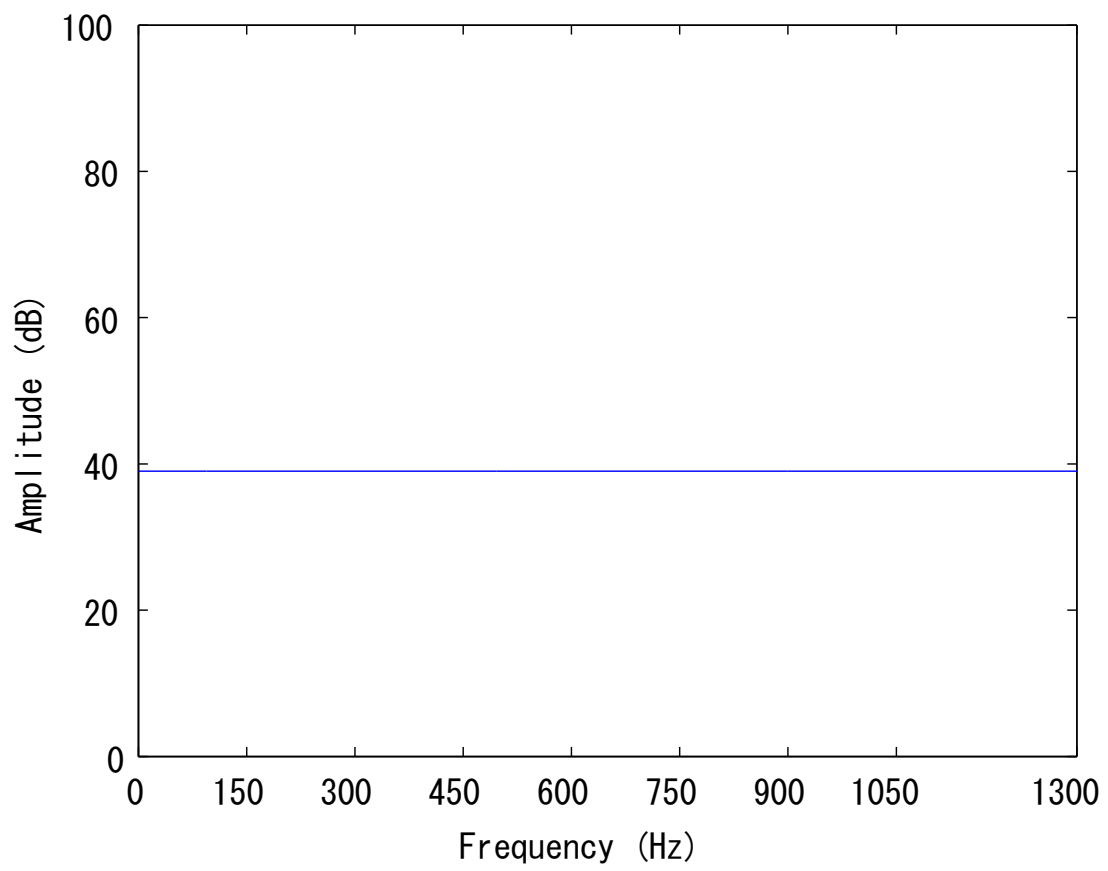


図 2.4: TSP 信号の周波数特性

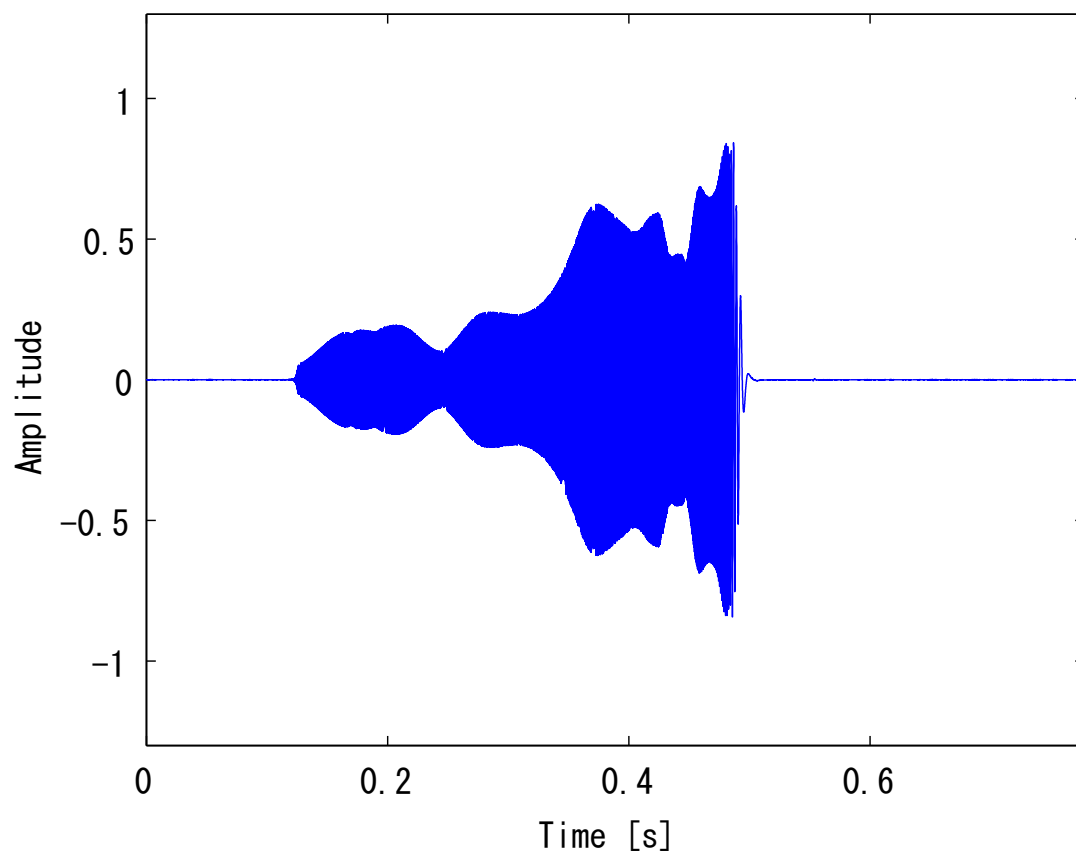


図 2.5: 実験系と人工耳を經由して観測された TSP 信号

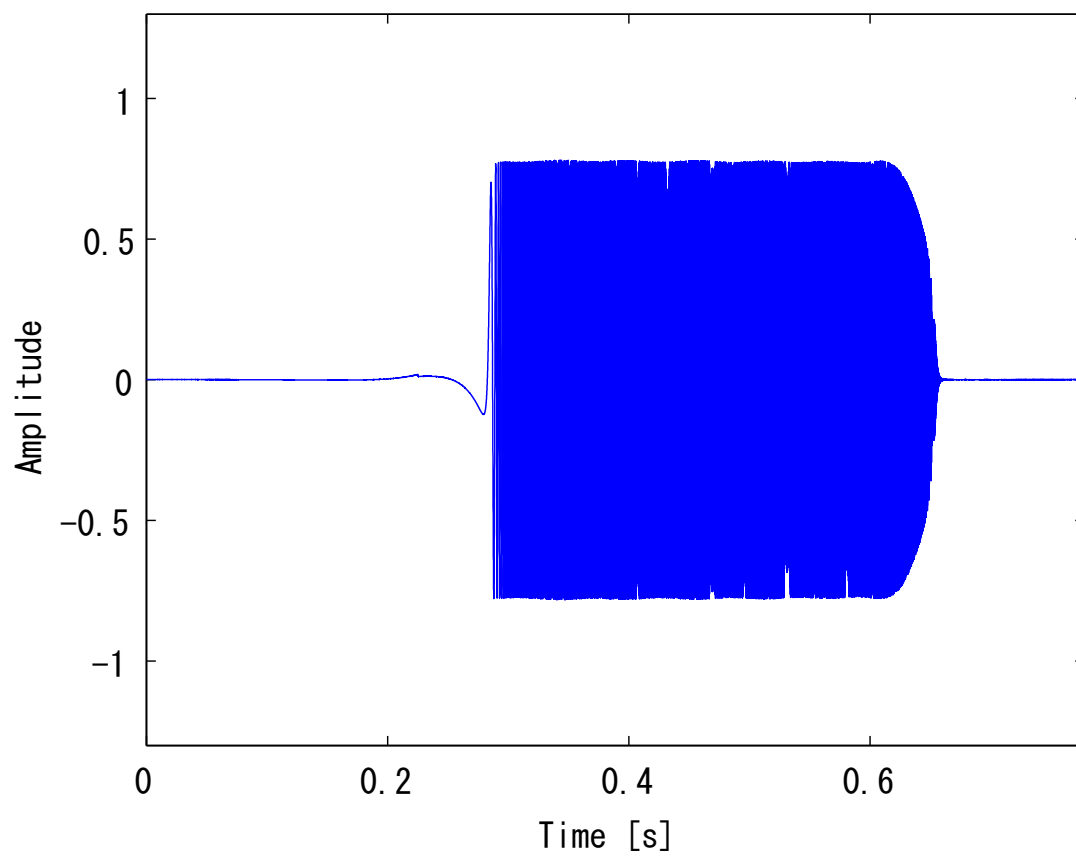


図 2.6: 時間を反転した TSP 信号 (逆 TSP)

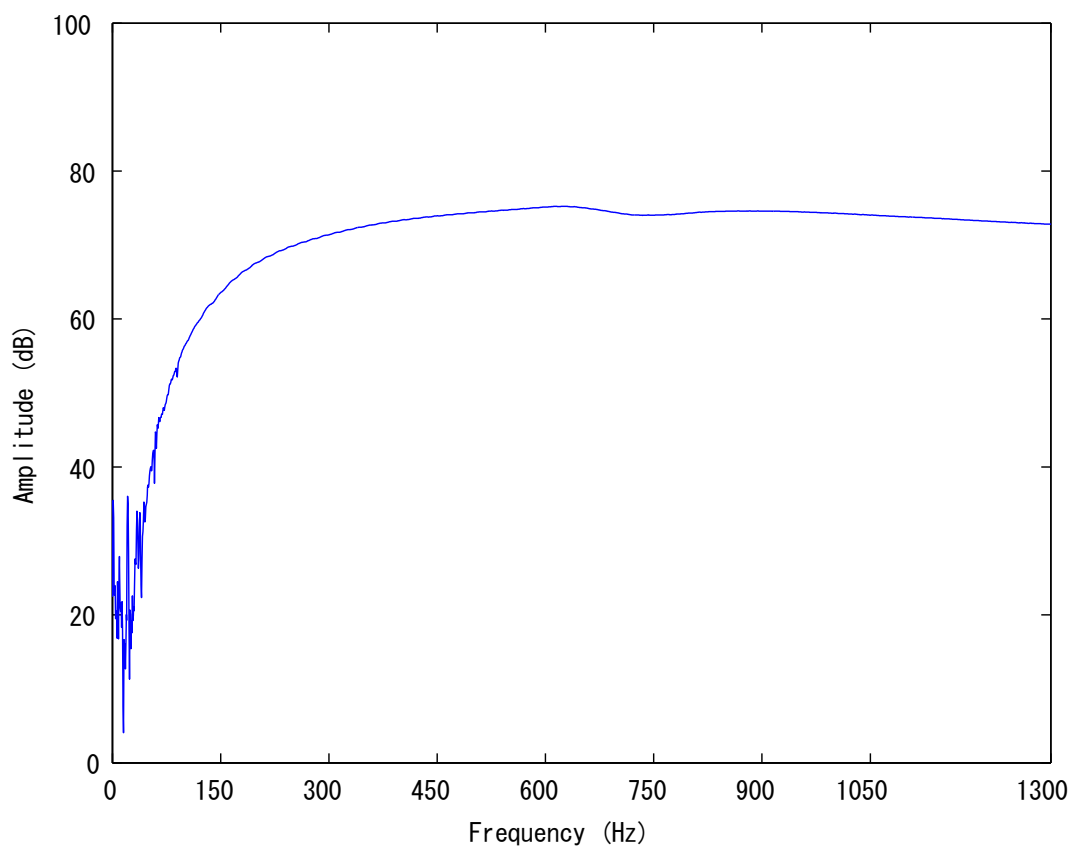


図 2.7: 実験系の周波数特性

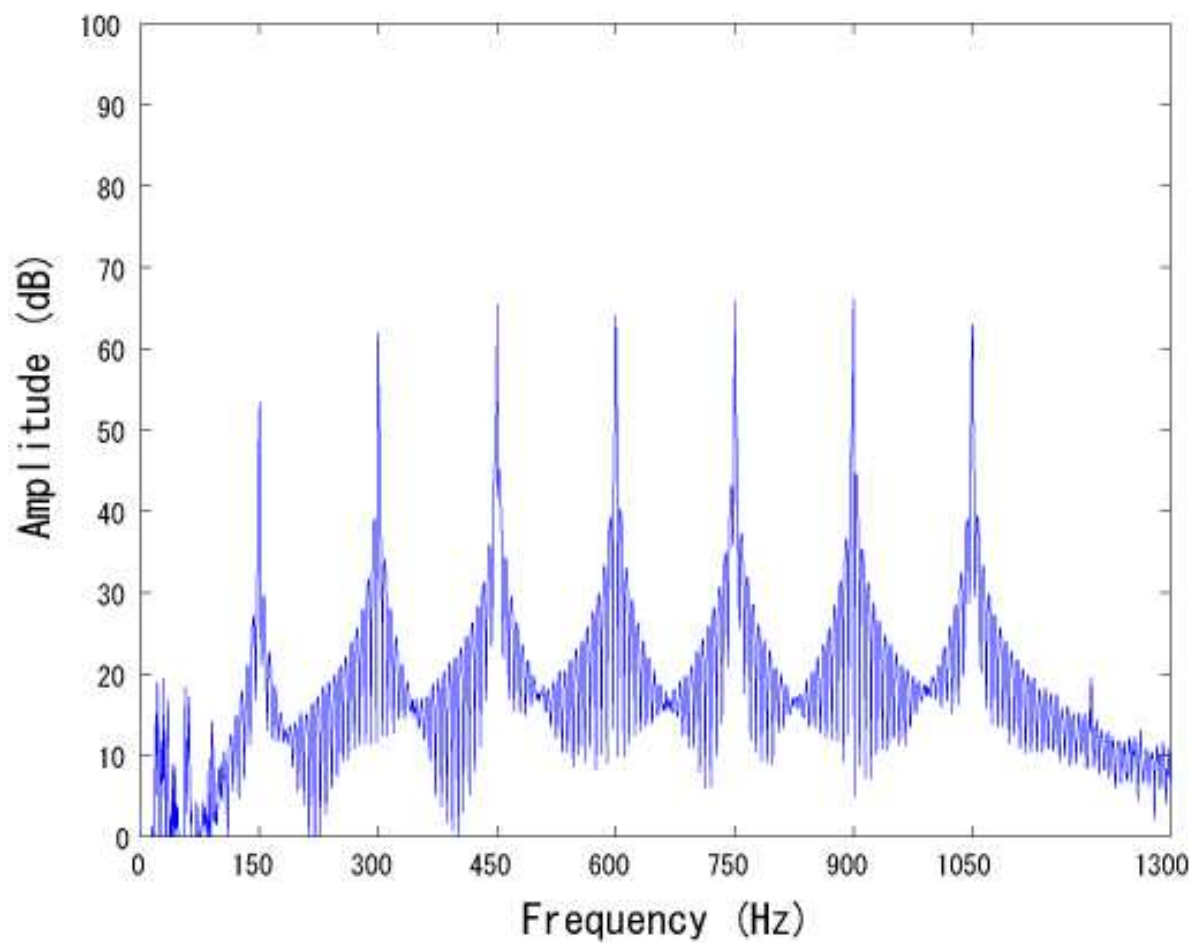


図 2.8: 図 2.2 によって録音した補正前のスペクトル包絡が平坦な刺激音

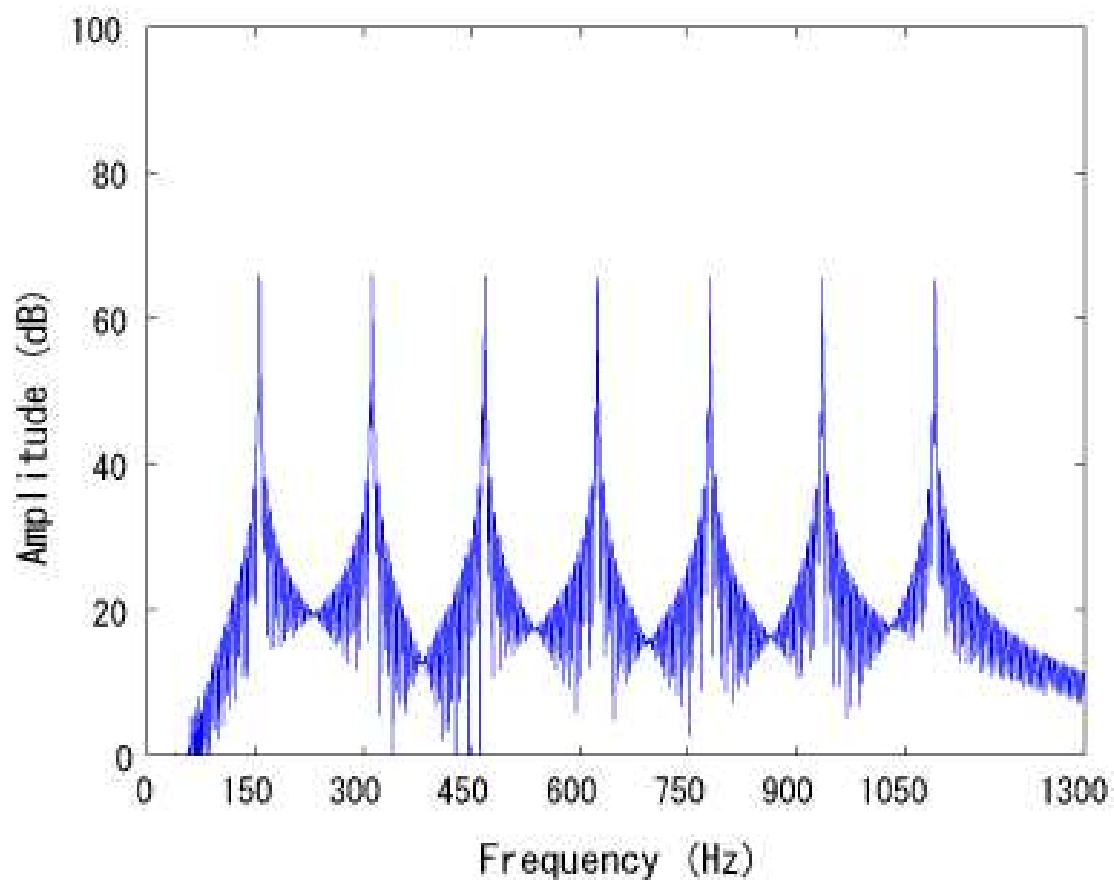


図 2.9: 刺激音 G の振幅スペクトル

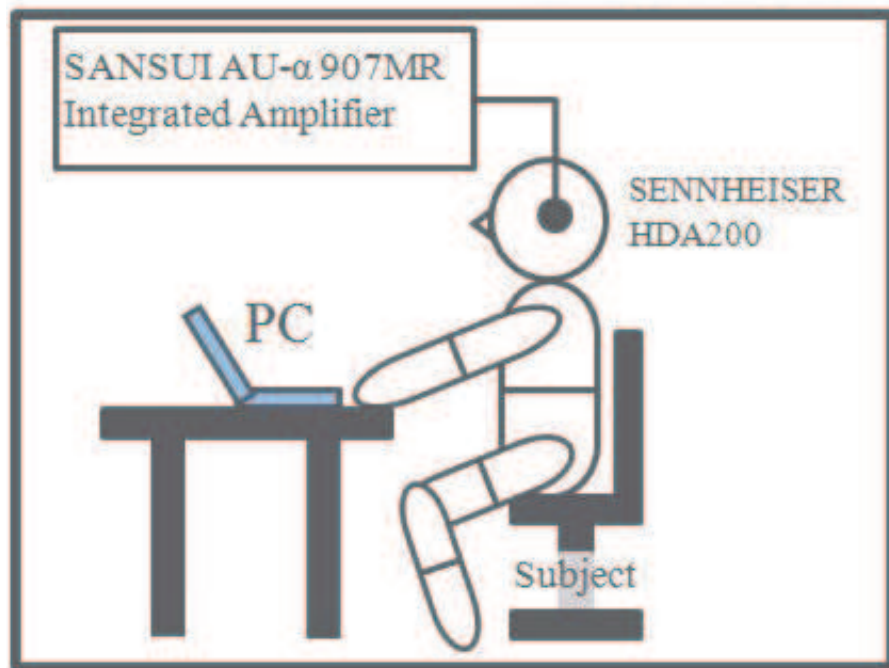


図 2.10: 聴取実験の様子

2.2.4 実験概要

9名の実験参加者に対し図 2.10 に示す防音室内で音の高さに関するシェッフェの一对比較 [4] 実験を行った。実験機器は図 2.1 に示す。刺激音はヘッドホンから音圧レベル 65 dB SPL で呈示される。音圧レベルは A 特性、騒音計の時間重み付け特性は Fast で測定した。聴取実験ではヘッドホンから、図 2.11 に示すように 2 つの刺激音を対にして呈示する。同じ対の刺激音は合計 3 回聴き比べられる。対にされた刺激音はランダムに呈示される。

この対にした刺激音の前の音と後ろの音を聴き比べ、どちらが低く感じられたかを判断する。評価尺度は図 2.12 に示す 5 段階評価である。実験参加者は、対にされた刺激音を聴いた後、PC に評価尺度に対応する数字を入力する。

2.3 結果と考察

2.3.1 シェッフェの一对比較による実験結果

シェッフェの一对比較による実験結果を図 2.13 に示す。図 2.13 のアルファベットは刺激音の種類を表す。各刺激音の値が -2 に近いほど、音の高さは低く感じられ、2 に近いほ

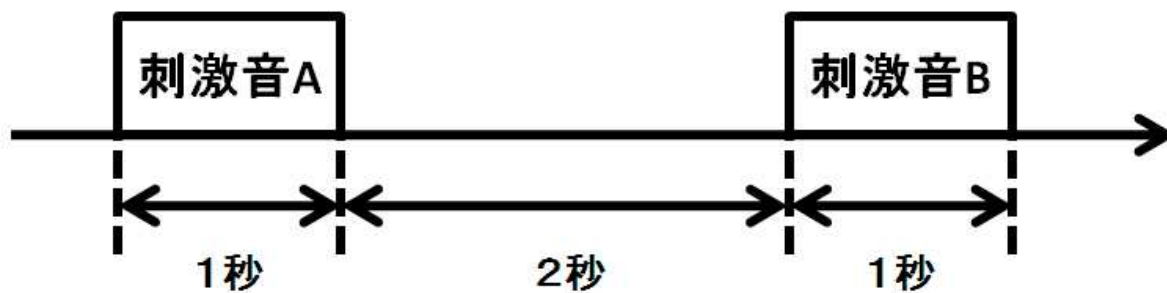


図 2.11: 刺激音呈示のタイムパターン



図 2.12: 聴取実験での評価尺度

表 2.2: 95 % もしくは 99 % 区間でシェッフェの一対比較の結果 (実験 I) における差が有意でなかった刺激音の組み合わせ

刺激音名	95 % 区間	99 % 区間
A, B	有意ではない	有意ではない
B, C	有意	有意ではない
F, G	有意ではない	有意ではない

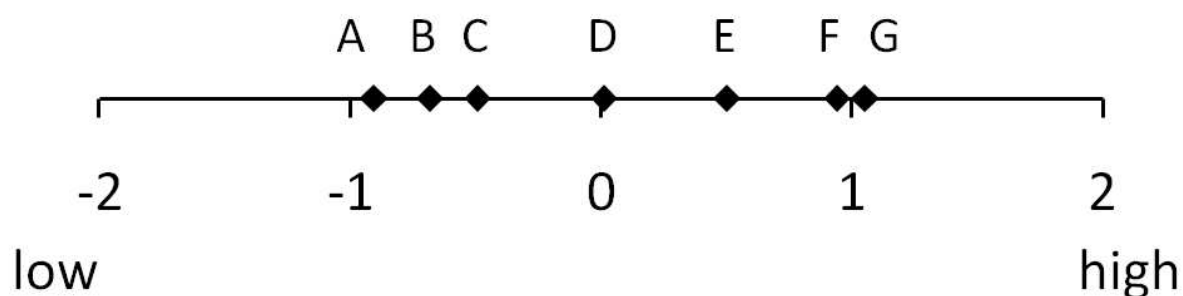


図 2.13: 実験 I の結果

ど音の高さは高く感じられている。それぞれの刺激音の差が有意でなかったものを表 2.2 に示す。その他の刺激音の組み合わせは、99 % 区間で全て差が有意であった。

図 2.13 より、刺激音の音の高さは、基本周波数の順に並べられており、実験 I で用いた刺激音の音の高さは、基本周波数に強く影響されていることがわかる。また図 2.13 より、刺激音 A, B, C や刺激音 F, G の距離は近いのに対し、刺激音 C, D, E, F の距離は離れている。

2.3.2 考察

刺激音 D は他の刺激音の基本周波数の中で、ちょうど中間の基本周波数からなる調波複合音である。この刺激音 D がほぼ 0 の値であり、全ての刺激音の中で、中間の音の高さであることがわかる。

第3章 スペクトル包絡の違いによる音の高さの変化

3.1 実験Ⅱの目的

実験Ⅱの目的はスペクトル包絡によって音の高さが変化すること、および、スペクトル包絡が異なる刺激音を音の高さの順に並べることができることを確かめることである。

実験Ⅰでは、基本周波数が異なる刺激音を、音の高さの順に並べることができた。実験Ⅱにおいて、スペクトル包絡が異なる音の高さに関しても、実験Ⅰと同様にシェッフェの一対比較実験を行うことで、刺激音を音の高さの順に並べることができれば、スペクトル包絡に応じて変化する音の高さの存在を確認することができる。また、シェッフェの一対比較による結果から、どのようなスペクトル包絡からなる調波複合音がどのような高さに感じられているかを検討することができる。

3.2 実験方法

3.2.1 刺激音

刺激音は、基本周波数が 150 Hz である、スペクトル包絡が異なる、基音から第 7 高調波までを含む調波複合音である。サンプリング周波数は 44100 Hz である。

実験Ⅱで用いる刺激音のうち 1 つを例として図 3.1 に示す。この刺激音の傾きは、基音から第 2 高調波までが、150 Hz ごとに音圧レベルが 7 dB 増している。また、第 2 高調波から第 7 高調波までは、150 Hz ごとに音圧レベルが 5 dB ずつ減少している。このように、刺激音の周波数成分強度を、倍音ごとに変化させることで、いくつかのスペクトル包絡の形状（傾き）が異なる刺激音を作成した。実験Ⅱで用いた 8 種類の刺激音を図 3.2, 3.3 に示す。図 3.2, 3.3 示すように、これらの刺激音を、刺激音 H から刺激音 N とする。

刺激音 D は実験Ⅰで用いた刺激音のうちの一つで、スペクトル包絡が平坦な音である。刺激音 H, I のスペクトル包絡は右下がり、基音の周波数成分強度が最も強く、高い周波数の高調波成分ほど周波数成分強度が弱くなる刺激音である。刺激音 M, N のスペクトル包絡の特徴は、刺激音 H, I の特徴と対照的である。高い周波数の高調波成分ほど周波数成分強度が強くなる刺激音である。刺激音 J, K, L は、山形のスペクトル包絡である。これら 3 つの刺激音の主な違いは、スペクトル包絡のピークがどの高調波成分で

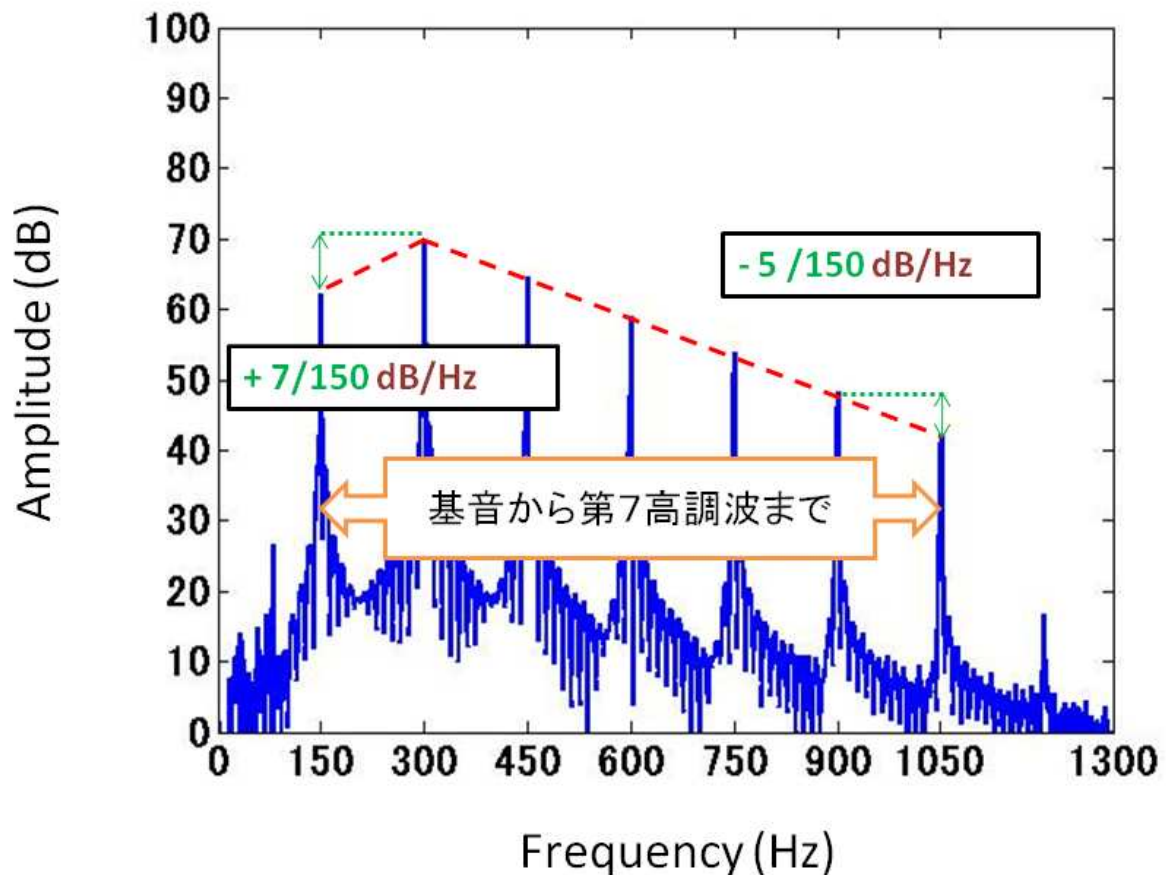


図 3.1: 実験 II で用いた刺激音の例

あるかという点である。また、刺激音 J と刺激音 L のスペクトル包絡の特徴も対照的である。

刺激音 H, I と刺激音 M, N の音の高さを比較することで、高い周波数の高調波成分をより多く含むものと低い周波数の高調波成分（または基音の成分）をより多く含むものの、音の高さの違いを調査することができると考えられる。また、刺激音 H, I と刺激音 M, N それぞれに関して、スペクトル包絡の傾きが、なだらかな音と急な音とでは、音の高さが異なるかどうかを調査することができると考えられる。刺激音 J, K, L に関しては、スペクトル包絡の形状が似ていることから、音の高さも似ている可能性が考えられる。しかし、スペクトル包絡のピークの位置により音の高さが変化する可能性も考えられる。また、すべての刺激音のピークの位置から、特に音の高さに影響を及ぼしている高調波成分が示される可能性も考えられる。これらの理由から刺激音 8 個を作成し、実験 II に使用した。

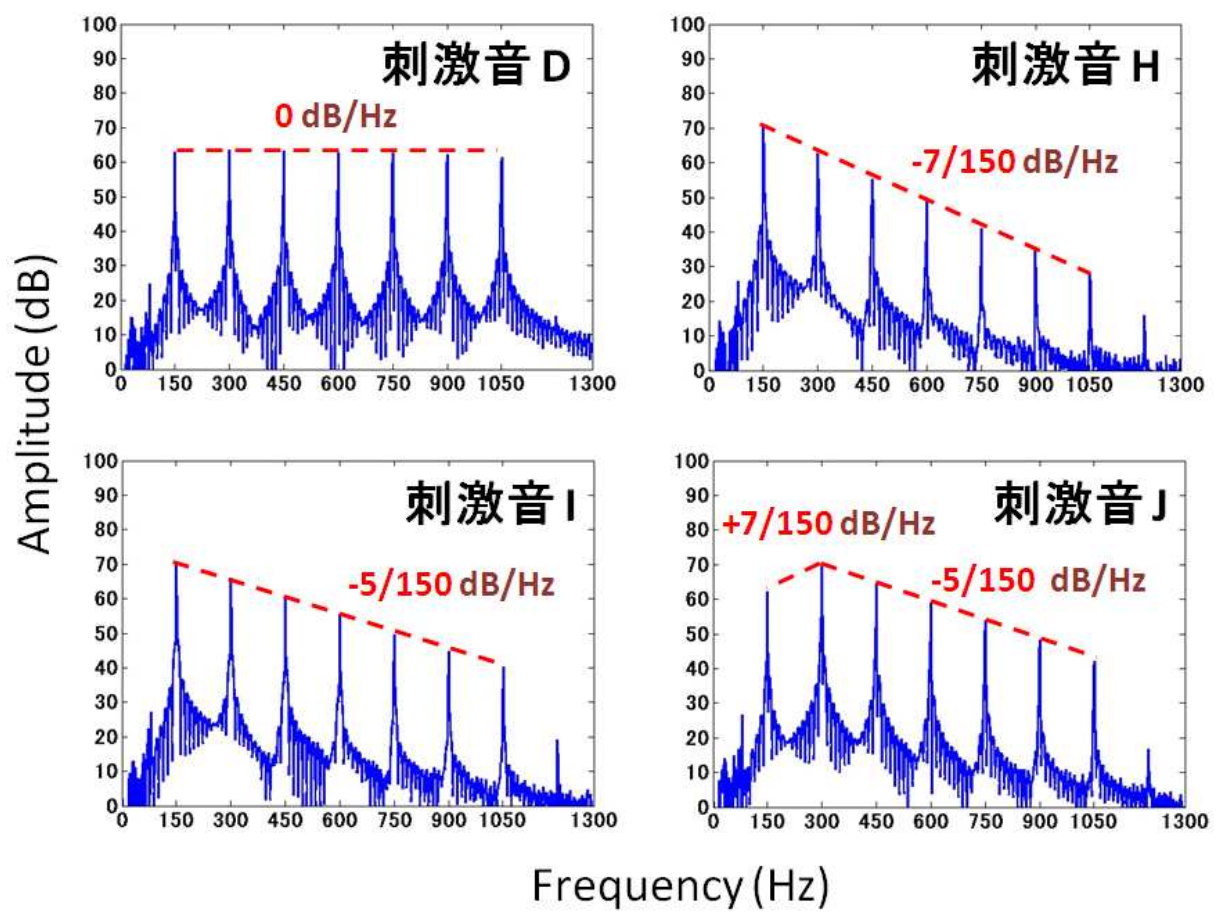


図 3.2: 実験 II で用いた刺激音 (刺激音D, H, I, J)

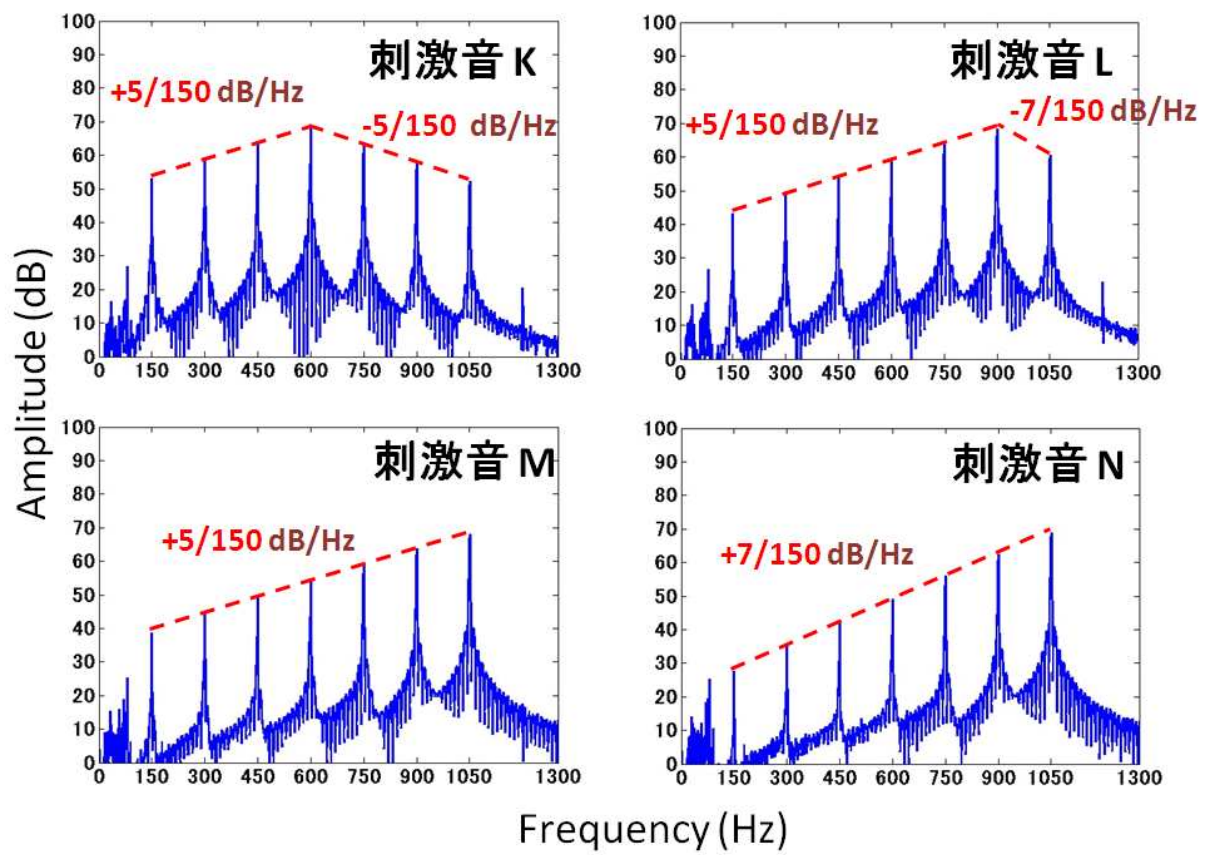


図 3.3: 実験 II で用いた刺激音 (刺激音 K, L, M, N)

表 3.1: シェツフェの一对比較の結果 (実験 II) における差が有意でなかった刺激音の組み合わせ

刺激音名	95 % 区間	99 % 区間
H, I	有意ではない	有意ではない
D, K	有意ではない	有意ではない
L, M	有意ではない	有意ではない
M, N	有意ではない	有意ではない

3.2.2 実験概要

実験 I の実験参加者と同じ 9 名と、実験 I の実験参加者とは異なる 1 名の、合計 10 名の実験参加者に対し防音室内で実験を行った。実験系と刺激音の呈示、評価方法、評価尺度は実験 I と同じである。

3.3 結果と考察

3.3.1 シェツフェの一对比較による実験結果

シェツフェの一对比較による実験結果を図 3.4 に示す。それぞれの刺激音の差が有意でなかったものを表 3.1 に示す。その他の刺激音の組み合わせは、99 % 区間で全て差が有意であった。図 3.4 のアルファベットは刺激音名を示し、点線は刺激音のスペクトル包絡を表す。実験 I と同様に、各刺激音の値が -2 に近づくほど音の高さは低く感じられ 2 に近づくほど音の高さは高く感じられている。シェツフェの一对比較により、スペクトル包絡が異なる刺激音を、音の高さの順に並べることができた。

3.3.2 考察

刺激音 H, I に関して、スペクトル包絡の傾きが急である刺激音 H が傾きがなだらかである刺激音 I より音の高さは低い可能性が示された。このことから、基音または周波数が低い高調波成分強度がより強い音ほど音の高さは低く感じられる可能性が示唆された。同様に、刺激音 M, N に関して、スペクトル包絡の傾きが急である刺激音 N が傾きがなだらかである刺激音 M より音の高さは高い可能性が示された。このことから、高い周波数の高調波成分強度がより強いものほど音の高さは高く感じられる可能性が示唆された。

またシェツフェの一对比較による結果において、「刺激音 H, I」, 「刺激音刺激音 J, K, L」, 「刺激音 M, N」の分布は似た場所に集まっている。このことから、調波複合音のスペクトル包絡の形状が似ていると音の高さも似ている可能性が示唆された。また全ての刺

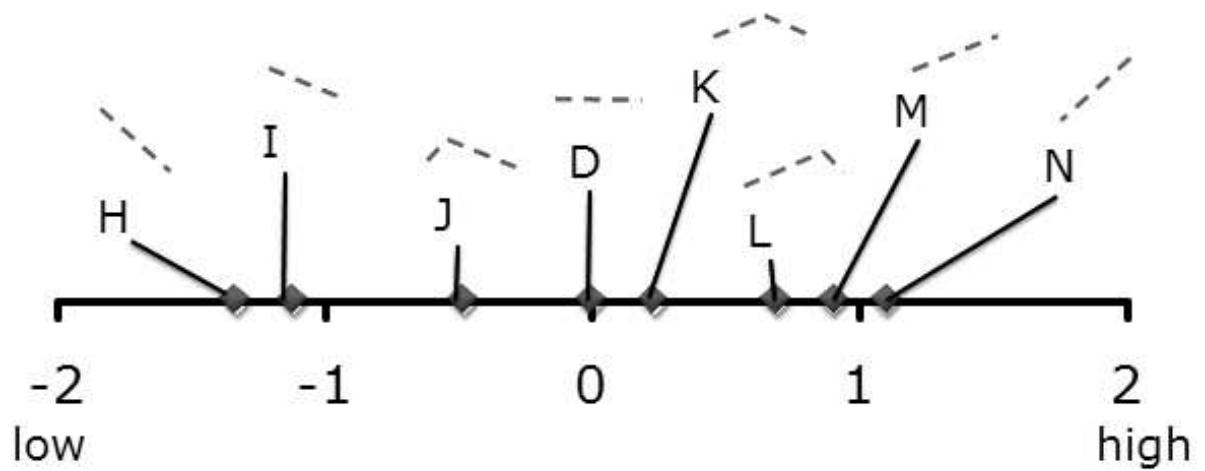


図 3.4: 実験 II の結果

激音の並びより、それぞれの刺激音において、周波数成分強度が最も強い周波数の順に音の高さが変化している。スペクトル包絡に応じて変化する音の高さは、最も周波数成分強度が強い周波数と強く関係している可能性が示唆された。このことから、スペクトル包絡に応じて変化する音の高さは、周波数成分強度が最も強い周波数（スペクトル包絡のピークの周波数）、スペクトル包絡の傾き、あるいはスペクトル包絡の重心に関係が強い可能性が考えられる。

第4章 全刺激音を用いた音の高さの対比較実験

4.1 目的

全刺激音を用いた音の高さの対比較実験は、スペクトル包絡が異なることで、どの程度音の高さが異なるかを定量的に調べるために行う。図4.1のように、「スペクトル包絡が異なる刺激音（刺激音HからN）」の音の高さは、「スペクトル包絡が平たんで基本周波数が異なる刺激音」のどれに対応するのかを調査することが目的である。

実験I, IIより、それぞれの刺激音集合について音の高さ判断が可能であることが示され、それぞれの刺激音集合の音の高さを定性的に調査することができた。実験Iに関しては、刺激音の音の高さの違いは、基本周波数によって表すことができ、基本周波数が2 Hzずつ異なるために感じられた音の高さの差であると考えられる。しかし、実験IIに関する音の高さは、それぞれの刺激音がどの程度異なるのかを表すことが出来ない。そこで、スペクトル包絡が異なる刺激音の音の高さを定量的に調べるために、全ての刺激音を用いて対比較実験を行い、音の高さを比較しようとした。

4.2 音の高さ知覚の要因

4.2.1 全刺激音を用いた音の高さの比較

刺激音は、実験I, IIで用いた14種類を用いた。YAMAHA DP-U50, SENNHEISER HDA 200 から刺激音を再生し、両条件の刺激音の音の高さを比較しようとした。しかし、両条件の刺激音の音の高さを比較することは困難であった。同じピッチに合わせようとする、調波複合音の基音を重点的に聴くこととなり、刺激音HからNの音の高さは、刺激音Dと同じであると判断されやすい。また、音色を重点的に聴くと、刺激音HからNの音の高さは、刺激音D以外が同じ音の高さであると判断されやすい。後者の場合、同じ音の高さであると判断されたスペクトル包絡が平たんな刺激音は決定的ではなかった。そのため、全刺激音を用いた音の高さの対比較実験を行うことはできないと考えた。しかし、実験I, II各条件の刺激音の音の高さを比較することが困難であったことから、実験I, II各条件の刺激音は比較できないものであり、すなわち各条件で音の高さ知覚の要因が異なる可能性が示唆された。

4.2.2 音の高さに関する比較が困難であった例

音の高さの比較実験で、比較が困難であった例として、付録に挙げた「場所説と時間説による音の高さに関する調査」がある。この調査の目的は、調波複合音のスペクトル包絡が異なることで音の高さが変化する原因に調波複合音の時間情報や場所情報が関係していると考え、場所情報の影響による音の高さの変化を調べることであった。

2名の実験参加者に対し、実験 I, II と同じ実験環境、実験機器で実験を行った。実験参加者は、場所情報が異なる刺激音と、周波数が異なる純音を交互に聴き、刺激音と同じ音の高さであると感じられる純音の周波数を回答する。

この調査では、場所情報による音の高さの変化を調べることが出来なかった。刺激音の音の高さを、基音に注意して聴いたと考えられる実験参加者と、音色も含めた音の高さとして聴いた実験参加者では、調査の結果にばらつきがでた。この音の高さの聴き方の違いが、場所情報による音の高さの変化を調査することが出来なかった原因であったと考えられる。

また、同じような例が付録にあげた、「スペクトル包絡が異なる調波複合音と同じ音の高さを感じられる純音の周波数に関する調査」である。この調査の目的は、スペクトル包絡が異なるいくつかの刺激音と同じ高さと感じられる純音の周波数を調査することであった。

1名の実験参加者は、スペクトル包絡が異なる刺激音と同じ高さを感じられる純音の周波数を回答した。実験環境、実験機器は実験 I, II と同じである。

しかし、刺激音と同じ音の高さと感じられた純音の周波数は、全ての刺激音に対してほぼ同じ周波数であった。この結果は、実験参加者が刺激音の基音を重点的に聴いたためと考えられる。このように、スペクトル包絡が異なる刺激音を、周波数の違いとして評価することは困難であった。

これらの調査より、スペクトル包絡に応じて変化する音の高さと、基本周波数に応じて変化する音の高さを聴き比べる場合、音の聴き方（何を重点的に聴くか）によって、両条件の音の高さの違いに大きな差が表れる可能性が示唆された。スペクトル包絡すなわち音色に関係する音の高さと、基音すなわち周波数に関係する音の高さは比べられないもので、これらは異なる知覚要因である可能性が示唆された。

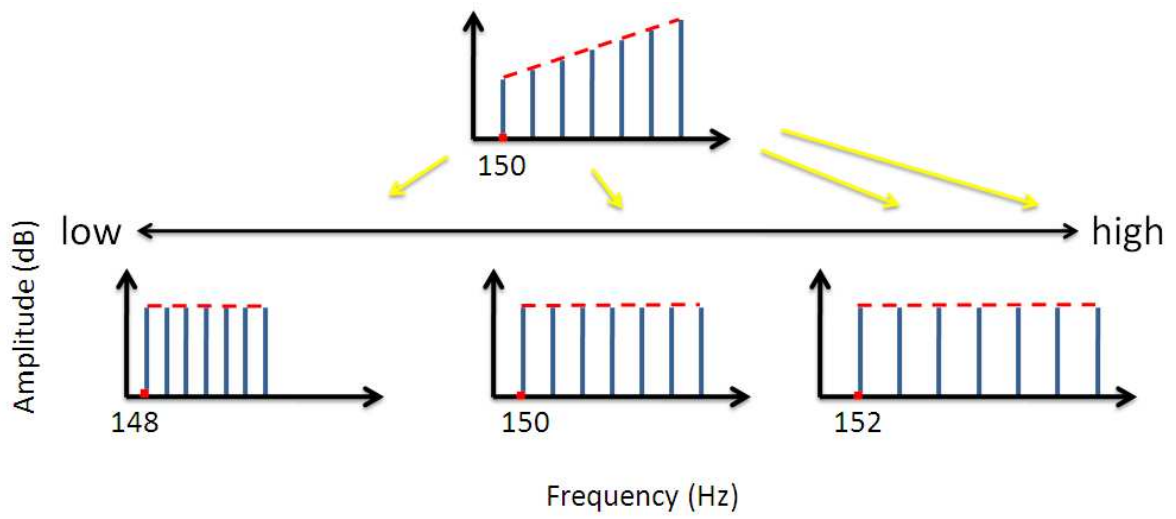


図 4.1: 音の高さに関する実験 I で用いた刺激音と実験 II で用いた刺激音の比較

第5章 多次元尺度構成法（MDS）による心理距離空間の構築

5.1 実験Ⅲの目的

実験Ⅲの目的は、実験Ⅰ、Ⅱで用いた全刺激音の心理距離空間を構築するために、全刺激音の心理距離を調査することである。

実験Ⅰ、Ⅱでは、それぞれの条件からなる刺激音集合を、音の高さの順に並べることができた。実験Ⅱでは、スペクトル包絡に応じて変化する音の高さの存在を確認することができたと考えられる。しかし実験Ⅰ、Ⅱ全刺激音を用いて音の高さの対比較実験を試みたが、各条件の刺激音を比較することは困難であった。各条件の、刺激音の音の高さに関する知覚要因が異なる可能性が示唆された。

そこで、全刺激音の、MDSによる心理距離空間を構築することとした。この心理距離空間から、各条件での音の高さの知覚要因が異なる可能性を確かめることが出来ると考えられる。また、この心理距離空間から、スペクトル包絡に応じて変化する音の高さに影響を及ぼしている物理量を検討することが出来ると考えられる。実験Ⅲでは、この心理距離空間を構築するために、刺激音の心理距離を調査する。

5.2 実験方法

5.2.1 刺激音

実験Ⅰ、Ⅱで用いた、刺激音 A から N までを用いる。

5.2.2 実験概要

実験参加者は、対にして呈示された2つの刺激音を聴き比べ、どの程度似ているかを判断する。評価尺度は表5.1に示す6段階である。実験参加者、実験環境、実験機器、刺激音の呈示等は実験Ⅱと同じである。

表 5.1: 実験 III の評価尺度

- 1 非常に似ている
- 2 似ている
- 3 どちらかといえば似ている
- 4 どちらかといえば似ていない
- 5 似ていない
- 6 非常に似ていない

表 5.2: ストレスの評価

ストレス	適合の度合
0.2	あまりよくない
0.1	まあまあ適合している
0.05	良く適合している
0.025	非常に良く適合している
0	完全に適合している

5.3 MDS 分析による心理距離空間

実験 III の結果に対して MDS 分析を行い刺激音の心理距離空間を構築した。

MDS 分析を行った際のストレスと次元の関係を図 5.1 に示す。ストレスは、適合度のこと、データと空間布置がどの程度適合しているかを示す。ストレスが少なければ少ない程より良く適合している。本研究では、Kruskal のストレス値を用いた [5]。Kruskal のストレスの評価を表 5.2 に示す。

本研究では、ストレスは 10 % を超えているが変化が少なくなる 4 次元解を採用する。

MDS で構築した心理距離空間を図 5.2, 5.3, 5.4 に示す。図の「o」は基本周波数が異なるスペクトル包絡が平坦な刺激音を表しており、「*」は基本周波数が 150 Hz のスペクトル包絡が異なる刺激音を表している。アルファベットは刺激音名である。

図 5.2 は「o」と「*」の分布が分離している。「o」と「*」の心理距離が離れているからである。刺激音 H, I および刺激音 M, N はそれぞれ非常に近くに分布している。このことから、スペクトル包絡の形状が同じ特徴である刺激音 H, I と刺激音 M, N の心理距離はとて近い可能性が考えられる。

また基本周波数が同じ刺激音のみ（刺激音 D と刺激音 H から N）において、刺激音 J, K, L から刺激音 D までの距離が比較的近く、刺激音 D から刺激音 H, I と刺激音 M, N までの距離が比較的遠い。このことから、スペクトル包絡が山形の形状である刺激音とスペクトル包絡が平坦な刺激音の心理距離は比較的近い可能性があるということと、スペ

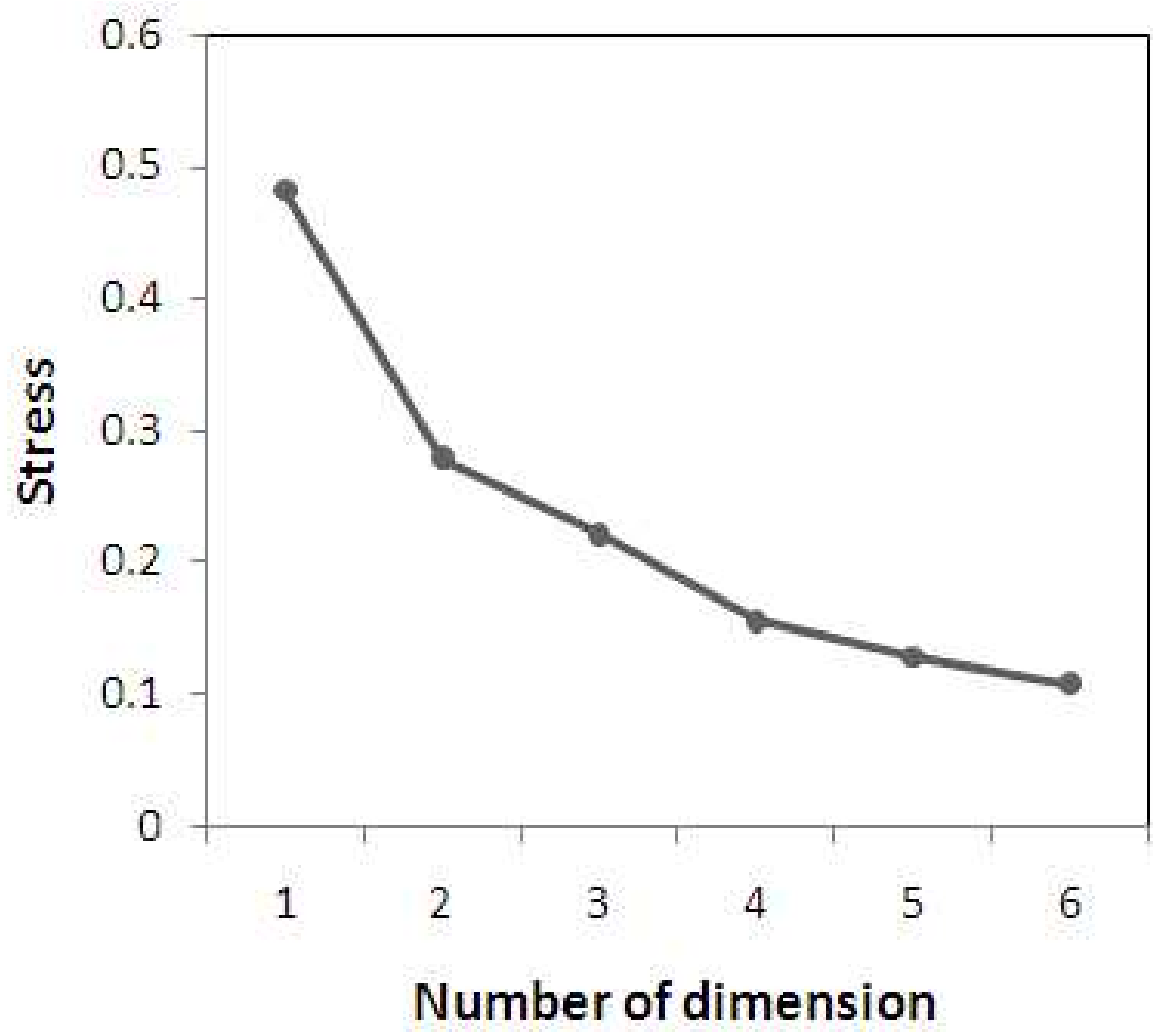


図 5.1: 次元数とストレス値の関係

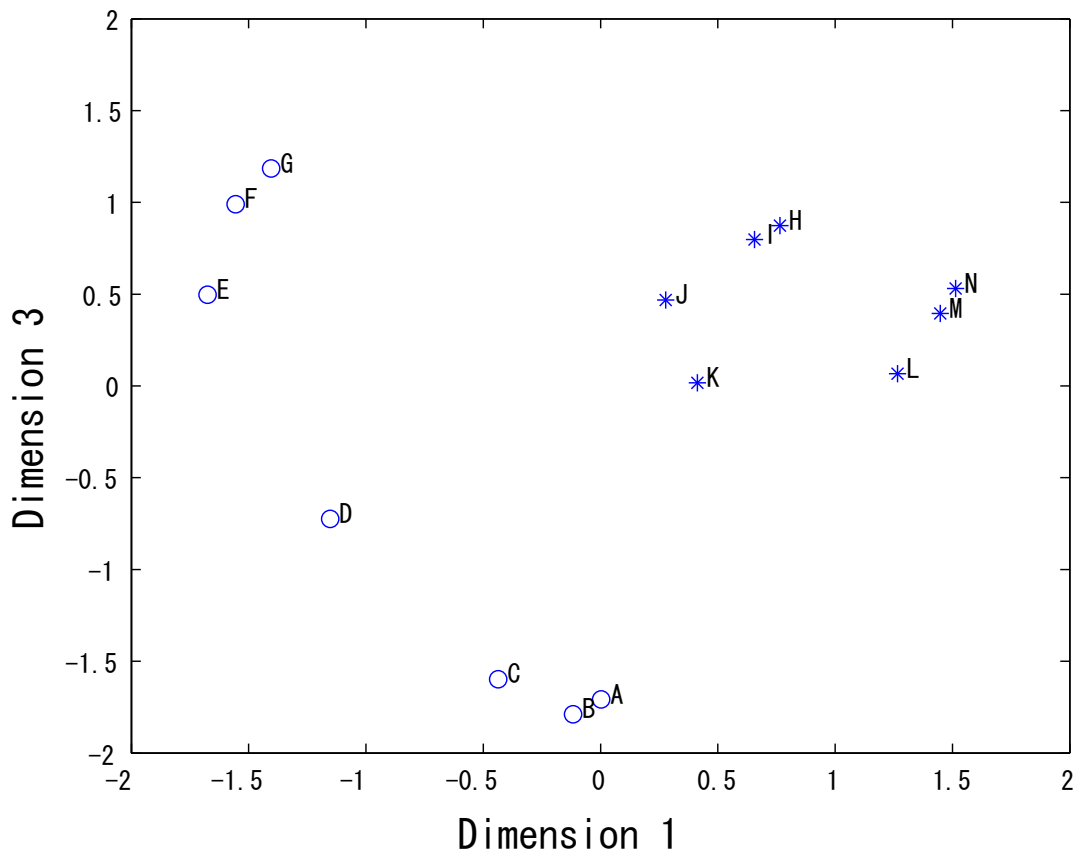


図 5.2: MDS 分析の結果 : 次元 1 と次元 3

クトル包絡が右下がり、右上がりの形状である刺激音とスペクトル包絡が平坦な刺激音の心理距離は比較的遠い可能性がある。

図 5.3 では、刺激音 H, I, J の位置と、刺激音 L, M, N の位置が似た場所に分布している。刺激音 H, I, J はスペクトル包絡が異なる刺激音のうち、右下がりの特徴を持つ刺激音である。また、刺激音 L, N, M は右上がりの特徴を持つ刺激音である。この分布からは、スペクトル包絡の傾斜が似ていれば、心理距離も近い可能性が考えられる。また、この図は「o」と「*」の分布が交差しているように見える。「o」の分布は、実験 I のシェッフェの一対比較による結果の順に良く似た並びのように見える。「*」の分布は、実験 II のシェッフェの一対比較による結果の順に良く似た並びのように見える。この図は 4 つの次元のうち 2 つの次元を選びプロットした図である。そのため正確な心理距離はわからないが、「o」の並びに沿って、基本周波数に応じて異なる音の高さに関する軸があり、「*」の並びに沿って、スペクトル包絡に応じて異なる音の高さに関する軸がある可能性が示唆された。

図 5.4 の「o」であらわされる刺激音は、山形を描いて分布しているように見える。刺激

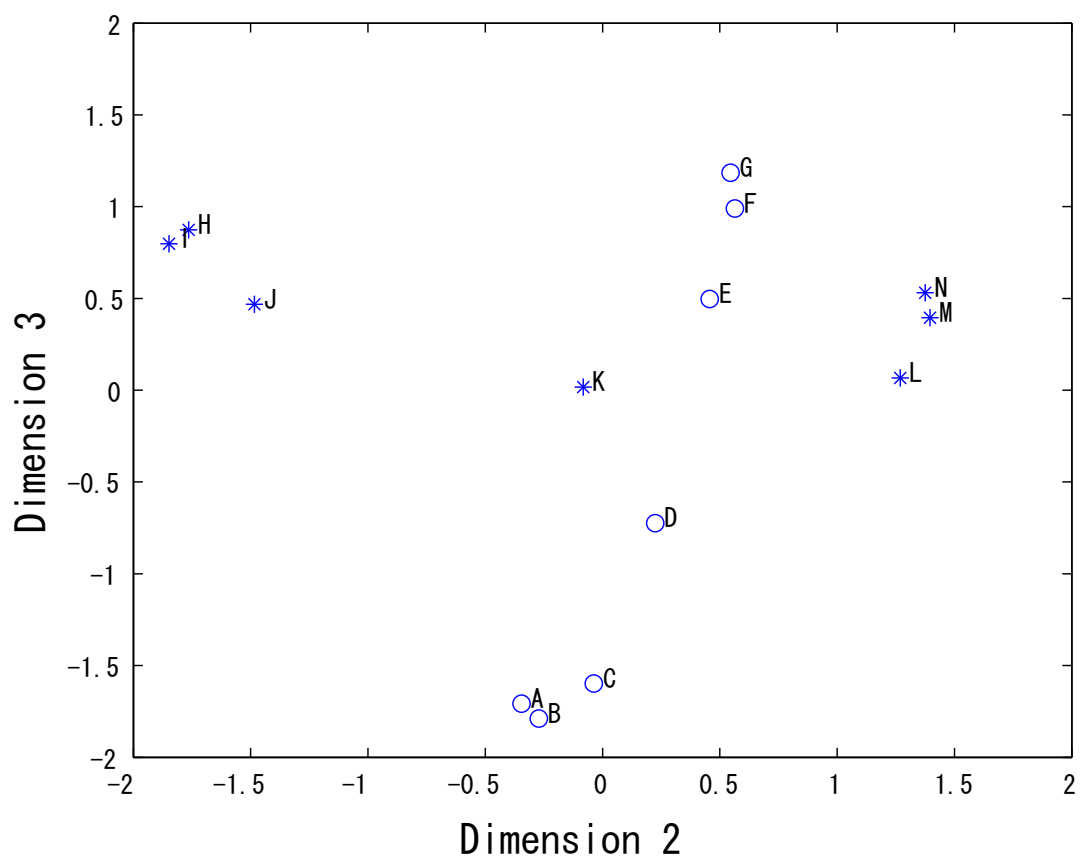


図 5.3: MDS 分析の結果 : 次元 2 と次元 3

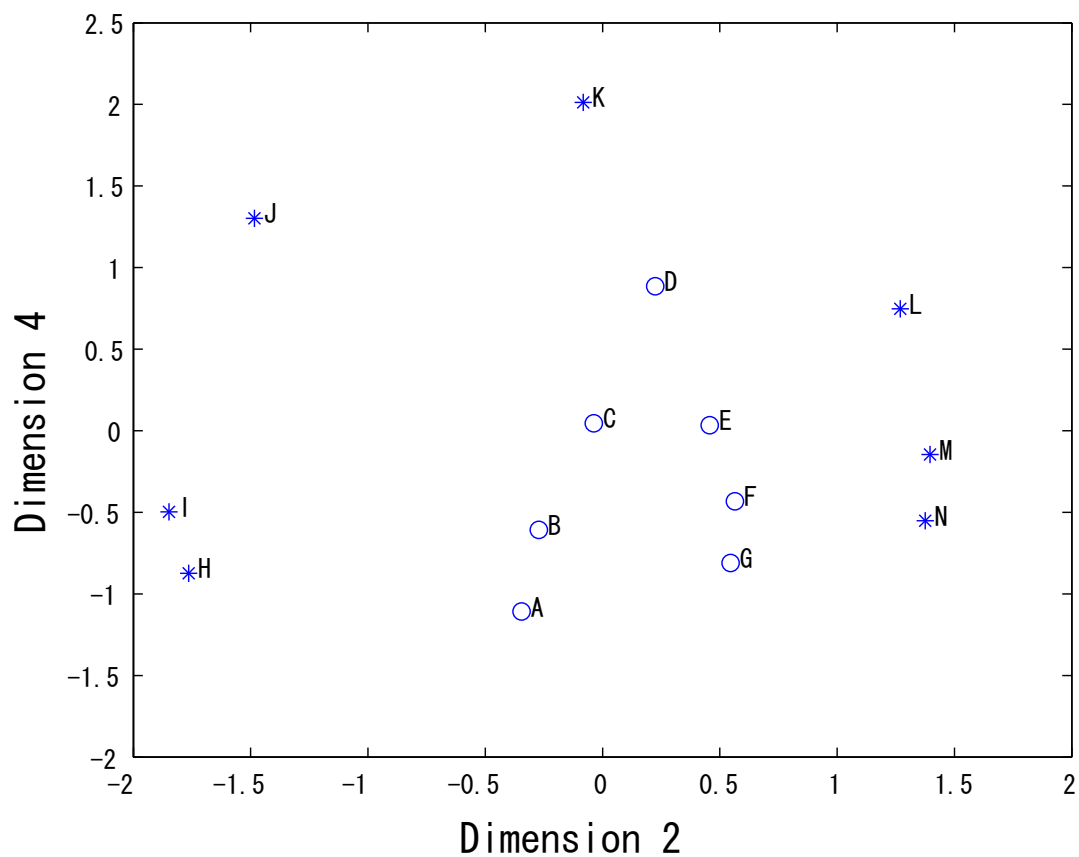


図 5.4: MDS 分析の結果：次元 2 と次元 4

音 D（基本周波数 150 Hz）を頂点に，刺激音 D と比べて基本周波数が異なるほど縦軸負の方向へ分布しているように見える．また，「*」であらわされる刺激音に関して見てみると，スペクトル包絡が山形で右上がりでも右下がりでもない形状を持つ刺激音 K を中心に，刺激音 K のスペクトル包絡のピーク的位置からずれる形状のものほど，刺激音 K との距離が離れて分布していると考えられる．図 5.4 では，刺激音 D を中心に見てみると，基本周波数とスペクトル包絡 2 つの特徴に関して，刺激音 D と比べて特徴が異なる刺激音ほど，刺激音 D との距離が離れているように見える．

第6章 音の高さ知覚に関係する要因

音の高さの知覚要因が異なるかどうかと、また、知覚要因が異なった場合、スペクトル包絡に応じて変化する音の高さに影響を及ぼす物理量を調査するために、実験 I, II で用いた全ての刺激音の心理距離から心理距離空間を構築した。この心理距離空間へ、シェッフェの対比較による音の高さに関する結果を当てはめることにより、実験 I と II の音の高さの知覚要因が異なるかどうかを調査する。

6.1 音の高さの知覚要因

刺激音 A から G と刺激音 H から N の音の高さに関する知覚要因が異なるかどうかを調査するために、実験 III に関する MDS 分析結果と、実験 I と実験 II のシェッフェの対比較の結果をもとに、重回帰分析を行った。刺激音の心理距離空間に、シェッフェの対比較による結果の音の高さの軸（回帰直線）を引いた結果を図 6.1 に示す。この図は、4つの次元から次元 2 と 3 の 2つの次元を選びプロットした図である。図 6.1 のアルファベットは刺激音名を表す。「o」で表される刺激音はスペクトル包絡が平たんで基本周波数が異なる刺激音であり、「*」で表される刺激音はスペクトル包絡が異なる基本周波数が 150 Hz の刺激音である。実線はシェッフェの対比較による結果（実験 I）の音の高さの軸、点線はシェッフェの対比較による結果（実験 II）の音の高さの軸である。重回帰分析の調整済み R² を表 6.1 に示す（調整済み R² の値が 1 に近いほどモデルのあてはまりが良いことを示す。）。

図 6.1 は「o」と「*」の分布が交差しているように見え、それぞれの刺激音集合の並びが、実験 I と II におけるシェッフェの対比較の結果の並びに似ていると考えた図である。「o」の並びと実線の角度は少しずれているように見えるが、「*」は点線に沿って並んでいるように見える。このことから、MDS 分析結果の次元 2 と 3 で表される図は「基本周波数に応じて変化する音の高さ」と「スペクトル包絡に応じて変化する音の高さ」の心理距離を表す図に近いことが考えられた。

二つの音の高さに関する軸の角度が直行していれば、完全に知覚要因が異なることとなるが、シェッフェの対比較の結果に関する、2本の直線の方法が異なれば、実験 I と実験 II の各条件において、音の高さの知覚要因は異なる可能性が示唆される。MDS 分析による次元 1 から 4 までの値と、実験 I, II のシェッフェの対比較の結果から重回帰分析を行ったそれぞれの実験に対する回帰式の内積より、2つの音の高さの軸に関して角度を求めた。その結果、2つの軸の角度は約 53 度であり、各条件の知覚要因は異なる可能性

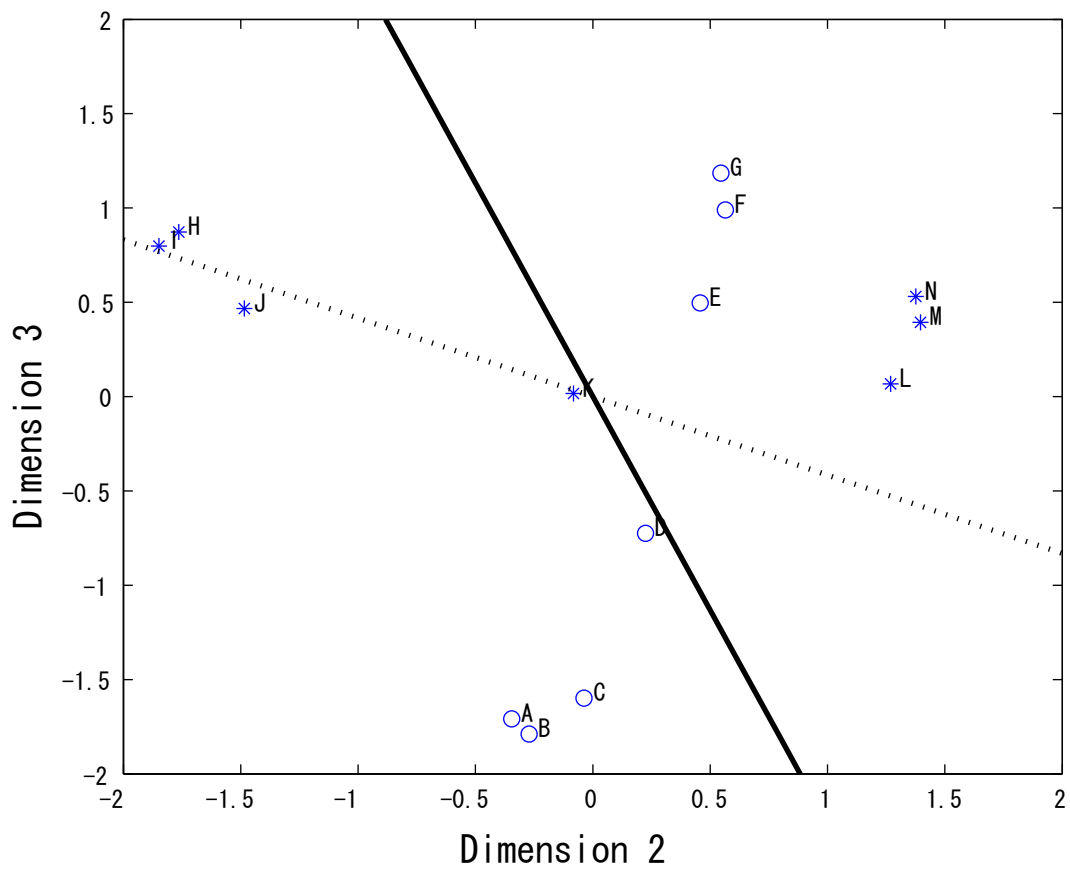


図 6.1: MDS 分析の結果 : Dimension 2 と Dimension 3 における音の高さの軸 (実験 I の音の高さ : 実線, 実験 II の音の高さ : 点線)

表 6.1: MDS 分析結果と実験 I, II の結果に関する重回帰分析の調整済み R² 乗

実験	調整済み R ² 乗
I	0.988
II	0.994

が高いことが示唆された。このため、全刺激音を用いた音の高さの対比較実験において、異なる条件の刺激音の音の高さを比べることが困難であったと考えられる。

6.2 音の高さ知覚に関連する物理量

実験 I では音の高さの知覚要因は基本周波数であると考えて差し支えないが、実験 II は基本周波数以外の物理量を知覚要因としている可能性がある。実験 II において、スペクトル包絡によって異なる音の高さは、スペクトル包絡のピークの周波数、スペクトル包絡の傾き、あるいはスペクトル包絡の重心に関係が強い可能性が考えられると予想した。そこで刺激音 H から N の、スペクトル包絡のピークの周波数、スペクトル包絡の傾き（スペクトル包絡の傾きの平均）、スペクトル包絡の重心に関して重回帰分析を行い、MDS で構築した心理距離空間に当てはめた。これらの物理量の軸（各物理量の回帰直線）を図 6.2 に示す。黒の点線はシェッフェの対比較による結果（実験 II）の音の高さに関する軸。スペクトル包絡のピークの周波数、スペクトル包絡の傾き、スペクトル包絡の重心の軸はそれぞれ、紅紫色、緑、赤である。シェッフェの対比較による結果（実験 II）の軸と、スペクトル包絡のピークの周波数、スペクトル包絡の傾き、スペクトル包絡の重心の軸との角度はそれぞれ、約 5 度、4 度、3 度であった。このことから、3 つの物理量全てが、スペクトル包絡により異なる音の高さに強く関係している可能性があると考えられる。

表 6.2 より、各物理量の重回帰分析に関して、スペクトル包絡のピークの周波数が最も当てはまりがよく、次にスペクトル包絡の傾き、スペクトル包絡の重心となっている。3 つの物理量の中ではスペクトル包絡の重心が最も当てはまりが良くないが、調整済み R² 乗の値より、3 つの物理量とも当てはまりが良いと考えられる。

シェッフェの対比較による結果（実験 II）の軸（表 6.1 より、この回帰直線の当てはまりはよい）との角度が最も小さいものはスペクトル包絡の重心に関する軸であった。このため、最もスペクトル包絡に応じて変化する音の高さに関係している物理量はスペクトル包絡の重心である可能性が示唆された。

表 6.2: MDS 分析結果と物理相関量に関する重回帰分析の調整済み R² 乗

物理量	調整済み R ² 乗
スペクトル包絡の重心	0.887
スペクトル包絡のピーク	1.000
スペクトル包絡の傾き	0.936

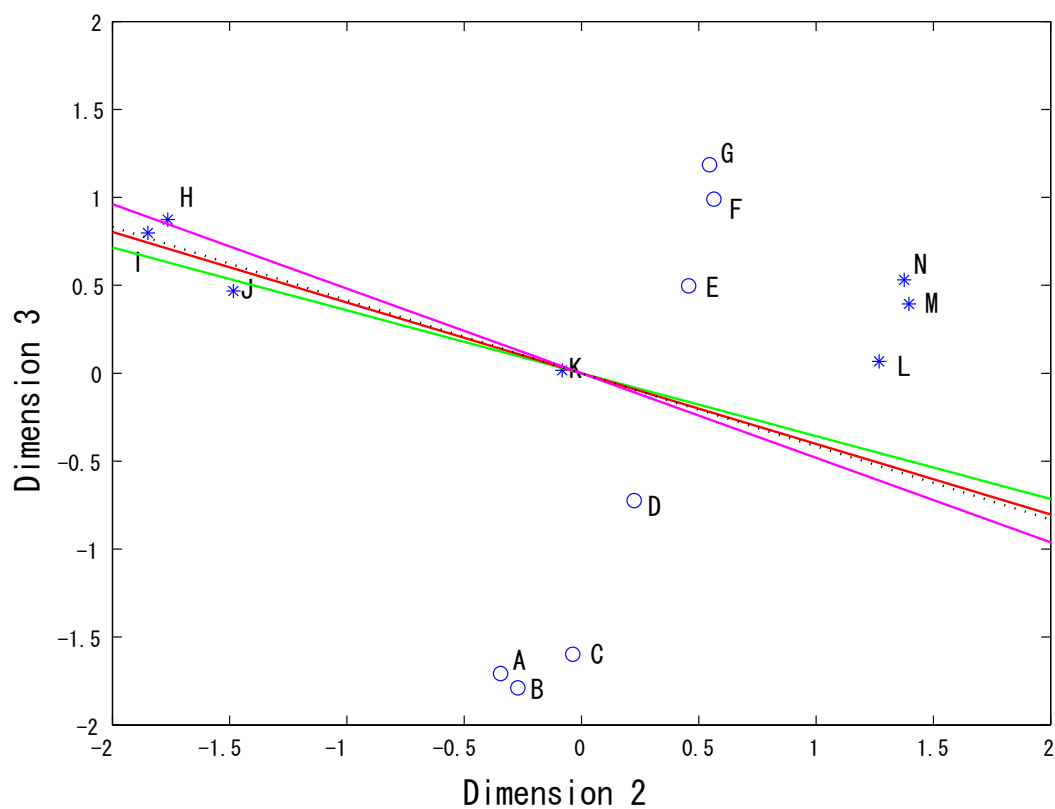


図 6.2: MDS 分析の結果: Dimension 2 と Dimension 3 における, スペクトル包絡のピークの周波数 (紅紫色), スペクトル包絡の傾き (緑), スペクトル包絡の重心 (赤) の軸

第7章 結論

7.1 本論文のまとめ

本稿では、「スペクトル包絡は同じであるが、基本周波数が異なる」音と「基本周波数は同じであるが、スペクトル包絡が異なる」音の知覚要因が異なる可能性と、スペクトル包絡により異なる音の高さに強く影響を与えている物理量に関して検討した。

「スペクトル包絡は同じであるが、基本周波数が異なる」音と「基本周波数は同じであるが、スペクトル包絡が異なる」音という2つの条件において、刺激音を作成し、それぞれの条件で、刺激音を音の高さの順に並べた。次に、作成した全ての刺激音に対し、心理距離をもとにMDS分析を行い心理距離空間を構築した。実験Ⅰ、実験Ⅱの結果に関して重回帰分析を行い、MDSで構築した心理距離空間へ当てはめた。その結果、実験Ⅰにおける音の高さの知覚要因と、実験Ⅱにおける音の高さの知覚要因は、異なる可能性が示唆された。

また、「基本周波数は同じであるが、スペクトル包絡が異なる」条件での音の高さの知覚要因に関して、重回帰分析を行うことにより、スペクトル包絡の重心が、スペクトル包絡により異なる音の高さに強く関係する可能性が示された。音の高さは基本周波数のみで知覚されているのではなく、スペクトル包絡の重心も音の高さの知覚に影響を及ぼしている可能性が示唆された。

7.2 今後の展望

本研究の実験Ⅱで使用したスペクトル包絡が異なる刺激音は全て基本周波数が150 Hzであった。しかし、第2高調波の影響を受けて音の高さが変化する研究では、基本周波数によって音の高さの変化も異なることが示されている[1]。そこで、基本周波数が150 Hz以外の条件で、本研究の実験を行うことで、スペクトル包絡に応じて変化する音の高さに強く影響を及ぼす物理量がより明らかになる可能性、または新たな物理量を推測できる可能性が考えられる。

また、本研究の実験Ⅱでは、スペクトル包絡が異なる刺激音を用いて、音の高さが高く感じられるか低く感じられるかという対比較実験を行い、刺激音を音の高さの順に並べることができたため、この結果は音の高さに関する結果であると考えられる。

しかし一般に、周波数は音の高さ（ピッチ）に対応していることに対し、スペクトル包絡は音色に属しているとされている。また、スペクトル包絡と音色の関係として、音色因

子というものがある [6]. いくつかの音色因子のなかで, 金属性因子は, スペクトル包絡が右上がりであると鋭い印象の音になり, 右下がりであると鈍い印象の音となると言われている. このスペクトル包絡の特徴は, 本研究で用いた刺激音に含まれている. 本研究では, 金属性因子における鋭い印象の音を高い音, また金属性因子における鈍い印象の音を低い音と感じているという結果が示された.

本研究では, 音の高さが高いか低いかという対比較実験を行い, 音の高さの順に並べたため, 音の高さに関する結果であると考えられるが, 金属性因子におけるスペクトル包絡と音の印象も, 本研究に関係がある可能性も考えられる. そこで, 金属性因子と, 本研究のスペクトル包絡に応じて変化する音の高さが似ている感覚であるのか, 全く異なる感覚であるのか調査することで, 音色及び音の高さにおける知覚の解明に貢献することができる可能性が考えられる.

付録A 場所説と時間説による音の高さに関する調査

音の高さの変化に関して意図していた調査をすることは出来なかったが、実験結果から基本周波数によって感じる音の高さの感覚と、それ以外の音の高さの感覚があることが示唆された調査を示す。

A.1 目的

調査の目的は、場所情報の影響による音の高さの変化を調べることである。

音の知覚に関して、場所説と時間説がある。Ohgushi[7]らは、複合音に場所情報が含まれるものとそうでないものでは、音の高さが異なることを示した。そこで、この研究を参考に作成した調波複合音を用いて、高さに関する調査を行った。

基本周波数成分強度が弱い調波複合音は場所情報が弱い。基音がない調波複合音は場所情報が無い、もしくは、差音の周波数が基本周波数の場合、場所情報は物理的に含まれないが、基本周波数の結合音が聞こえる可能性があることから、時間情報と同様に場所情報を提供する可能性も考えられる。このような複合音で、音の高さがどのように変わるかを調べる。

A.2 実験概要

A.2.1 刺激音

実験で使用した刺激音を表 A.1 に示す。

サンプリング周波数は 44100 Hz である。刺激音 O は純音である。刺激音 P は基音と第 2 高調波からなる調波複合音である。刺激音 Q は基音はないが、差音が基本周波数である調波複合音である。刺激音 R は基本周波数を含まない調波複合音である。刺激音 R, Q, P の順に場所情報が少ない。刺激音 p, q, r は強度が弱い基本周波数成分を含んだ刺激音であり、場所情報は少ないが含む刺激音である。また高調波成分強度が極端に強い調波複合音である。

表 A.1: 実験で使用した刺激音

刺激音名	周波数成分 (Hz)	周波数成分強度
O	300	等しい
P	300 600	
Q	600 900	
R	900 2100	
p	300 600	
q	300 600 900	基本周波数成分 (300 Hz) のみ 振幅が他の 0.01 倍
r	300 900 2100	

A.2.2 実験方法

刺激音と、純音を交互に聴き、刺激音と同じ高さであると感じられる純音の周波数を回答する。実験は防音室で行い、実験 I, II と同じ実験機器を用いた。実験参加者は 2 名である。

A.3 結果と考察

2 名（実験参加者 1, 2）の回答が一致した刺激音は刺激音 O のみであった。実験参加者 1 は、刺激音 p 以外の刺激音は刺激音 O と同じ高さであり、刺激音 p は 600 Hz の純音と同じ高さのように感じたと回答した。実験参加者 2 は、各刺激音に対して、同じ高さに聴こえる純音を 300 から 310 の範囲で回答した。

実験参加者によって刺激音の聴き方にばらつきがあることがわかった。刺激音の基音に注意して、刺激音と同じ高さであると感じられる純音の周波数を回答すると、実験参加者 1 のような回答になると考えた。刺激音の基音ではなく、周波数成分も含めた全体の音の高さを聴いて、刺激音と同じ高さであると感じられる純音の周波数を回答すると、実験参加者 2 のような回答になると考えた。この実験では、場所情報の有無や、スペクトル包絡

による音の高さの変化を調査することは出来なかったが，実験結果から基本周波数によって感じる音の高さの感覚と，それ以外の音の高さの感覚があることが示唆された。

付録B スペクトル包絡が異なる調波複合音と同じ音の高さに感じられる純音の周波数に関する調査

本研究の実験Ⅱにおいて、スペクトル包絡に応じて変化する音の高さを定性的に調査した。その結果、スペクトル包絡が異なることで、音の高さが変化する可能性が示唆された。これを受けて、スペクトル包絡が異なることで変化する音の高さを定量的に調査するために行われた調査である。

この調査では、スペクトル包絡に応じて異なる音の高さを、純音の音の高さの違いで表すことは出来なかった。しかし、この調査結果から、スペクトル包絡に応じて変化する音の高さと、周波数に応じて変化する音の高さは比較できないものである可能性が示唆された。

この調査結果を受け、「第4章 全刺激音を用いた音の高さの対比較実験」は行われた。

B.1 目的

本研究では実験Ⅱより、スペクトル包絡が異なることで、音の高さが変化する可能性が示唆された。また純音の音の高さは、周波数によって変化する。これを受けて、実験を行った。実験の目的は、スペクトル包絡が異なることで変化する音の高さを定量的に調査するために、スペクトル包絡が異なるいくつかの刺激音と同じ高さと感じられる純音の周波数を調査することである。

B.2 実験概要

B.2.1 刺激音

スペクトル包絡が異なる調波複合音として、図 B.1, B.2, B.3 に示す3種類の刺激音を用いる。これらの刺激音は実験Ⅱの刺激音とは異なる。基本周波数は 150 Hz, サンプル周波数は 44100 Hz である。また、これらの刺激音に関しても、音の高さについてシェッフエの一対比較による聴取実験を行った。実験機器、実験環境、刺激音の長さ、刺激音の呈示方法、評価方法、評価尺度などは本研究の実験Ⅱと同様である。その結果、低

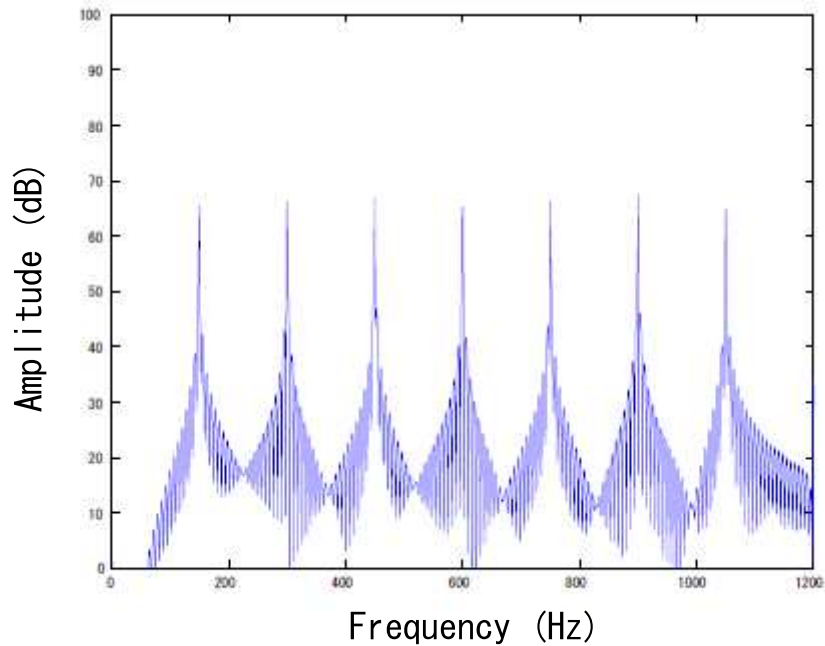


図 B.1: 刺激音 S の振幅スペクトル

いから高い順に，刺激音 T, S, U の順番で並べられた．この結果は 95 % 信頼区間で差が有意であった．このことから，これらの刺激音もスペクトル包絡の変化により音の高さが異なると感じられた可能性がある刺激音である．

B.2.2 純音

純音は サンプル周波数 44100 Hz, 1 Hz 刻みの音である．その例を図 B.4, B.5, B.6 に示す．これらは図 2.2 を用いて録音した音である．この純音は MATLAB で作成した．純音の周波数以外の周波数成分も含んでいるが，最も強度が強い周波数成分が純音の周波数となっている．

B.2.3 実験方法

刺激音 S, T, U それぞれの調波複合音と同じ音の高さに感じられる純音の周波数を解答した．実験参加者は 1 名である．

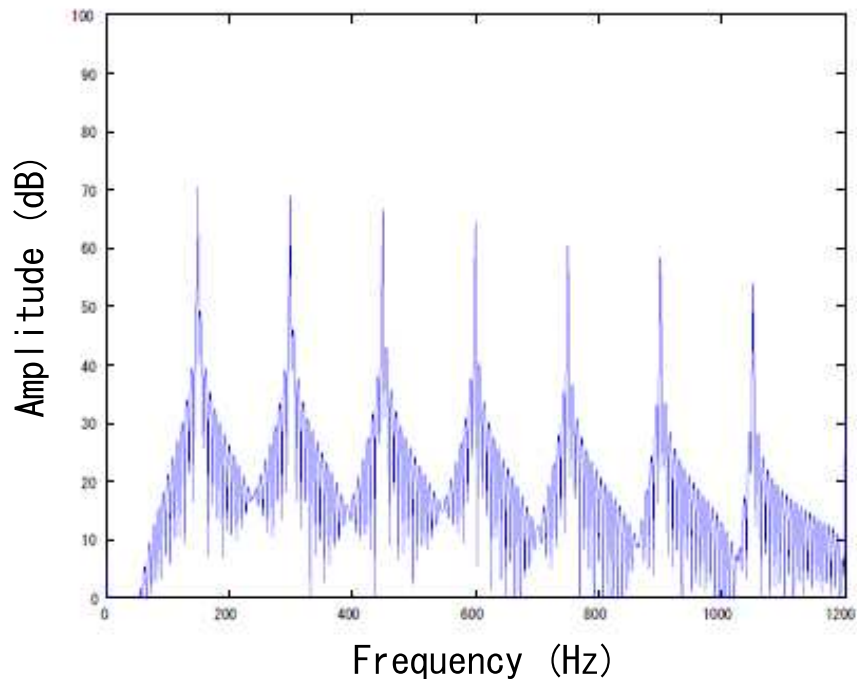


図 B.2: 刺激音 T の振幅スペクトル

B.3 結果と考察

刺激音 S, T, U のどれもが, 152 Hz から 153 Hz までの純音と同じ音の高さであると解答された。

調波複合音の音の高さがスペクトル包絡に応じて変化する可能性が考えられても, これらの音と同じ高さにて感じられる純音の高さは異なるわけではないことが示唆された。このことから, スペクトル包絡に応じて変化する音の高さと, 周波数に応じて変化する音の高さは比較できないものである可能性が示唆された。また調整された純音の周波数と調波複合音の基本周波数は異なったことから, 高調波成分の影響により, 基本周波数から少しずれた周波数の音の高さを感じている可能性があることが考えられる。

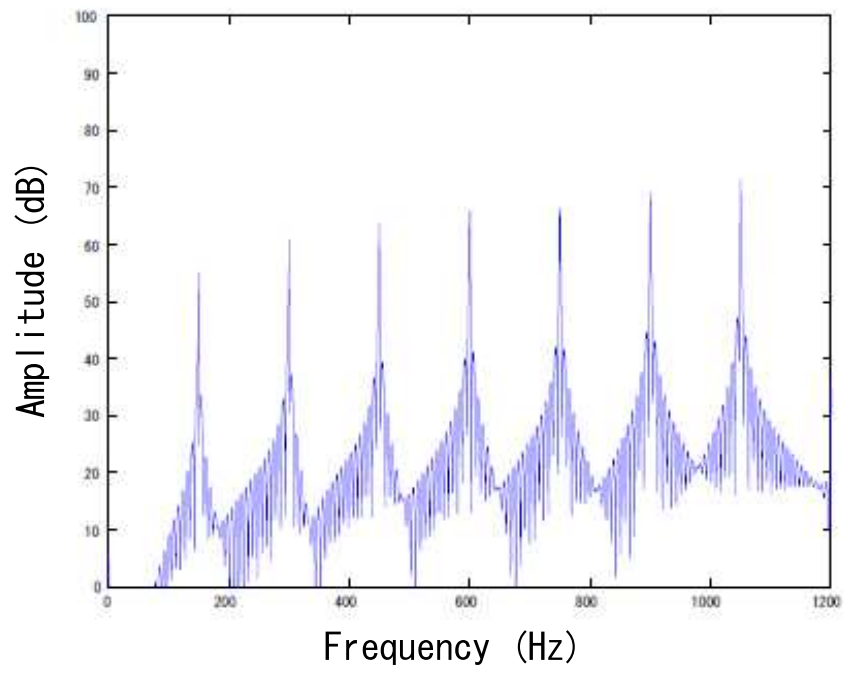


図 B.3: 刺激音 U の振幅スペクトル

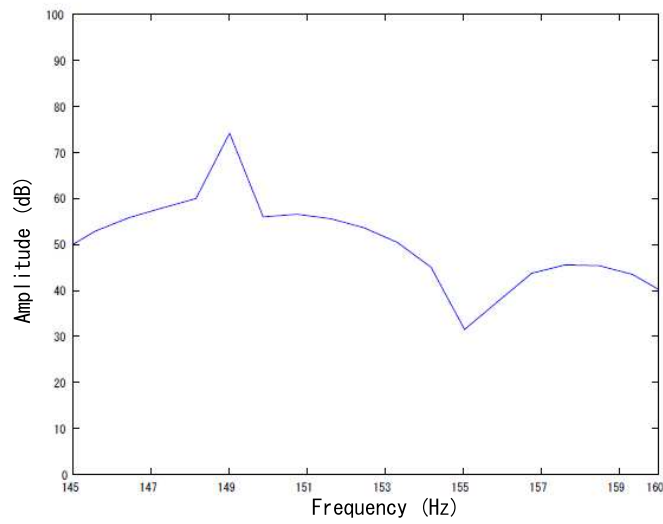


図 B.4: 149 Hz の純音を再生したときの周波数特性

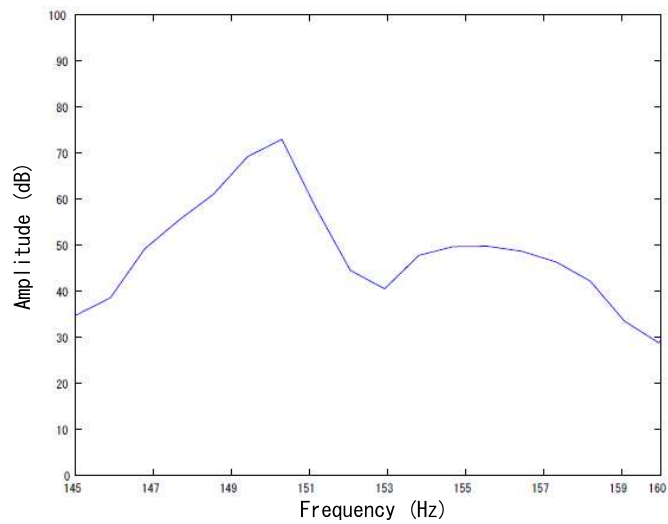


図 B.5: 150 Hz の純音を再生したときの周波数特性

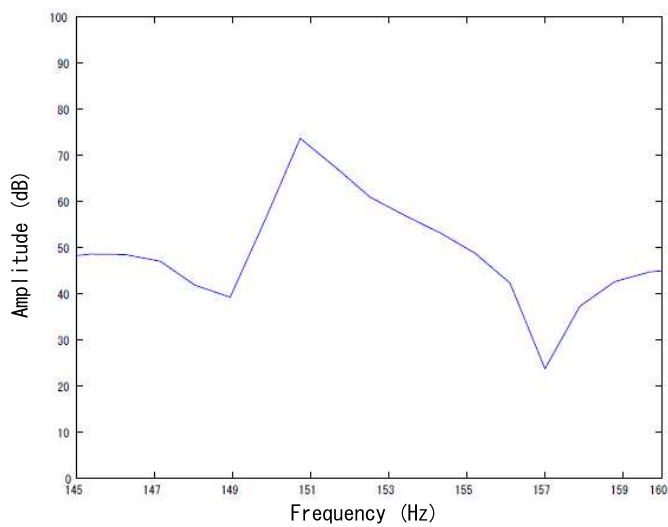


図 B.6: 151 Hz の純音を再生したときの周波数特性

参考文献

- [1] Zwicker and Fastl, *Psycho-acoustics*, Springer, Germany, 1999.
- [2] Ritsma, “Frequencies dominant in the perception of the pitch of complex sounds,” *J. Acoust. Soc. Am.*, **42**, 191–198, 1967.
- [3] ムーア 著, 大串健吾 監訳, “聴覚心理学概論,” 誠信書房, 1989.
- [4] 佐藤 信, “統計的官能検査法,” 日科技連, 1985.
- [5] 林 知己夫, 鮑戸 弘, “多次元尺度解析法,” サイエンス社, 1976.
- [6] 岩宮 眞一郎, “図解入門 よくわかる 最新 音響の基本と仕組み,” 秀和システム, 2007.
- [7] Ohgushi, “On the role of spatial and temporal cues in the perception of the pitch of complex tones,” *J. Acoust. Soc. Am.* **64**(3), Sept. 1978

謝辞

本研究を行うにあたり，多大なる御指導ならびに御鞭撻賜りました，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いたします。

本研究を行うにあたり，有益な御助言をいただき，御指導いただいた，北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科 鵜木祐史准教授，李軍鋒助教，宮内良太助教に心より感謝いたします。

さらに，本研究を行うにあたり，貴重な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 音情報処理分野の皆様，生体情報処理分野の皆様，および諸先輩方に厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり，貴重な時間を割いて本研究の実験に参加していただいた赤木，鵜木研究室の皆さんに心より感謝いたします。

最後に，大学院での研究生生活をあたたかく見守ってくれた多くの方々に心より感謝致します。

本研究に関する研究業績

学会発表リスト

Mai Ishida and Masato Akagi, “Pitch perception of complex sounds with varied fundamental frequency and spectral tilt,” Proc. NCSP10, March 2010.

石田舞, 赤木正人, “音色的高さに影響を及ぼす物理量の検討,” 日本音響学会 2010年 春季研究発表会 講演論文集, 1-R-21, March 2010.